

**İŞBİRLİKLİ KABLOSUZ SİSTEMLER İÇİN  
AĞ KODLAMALI TEKRAR GÖNDERİM İSTEĞİ  
YÖNTEMLERİ**

**NETWORK CODED AUTOMATIC REPEAT REQUEST  
METHODS  
FOR COOPERATIVE WIRELESS SYSTEMS**

**RAŞİT TUTGUN**

**Doç. Dr. EMRE AKTAŞ**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim - Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

**DOKTORA TEZİ**

olarak hazırlanmıştır.

2015

**RAŞİT TUTGUN**'ın hazırladığı “İşbirlikli Kablosuz Sistemler İçin Ağ Kodlamalı Tekrar Gönderim İsteği Yöntemleri” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ali Özgür YILMAZ

Başkan

.....

Doç. Dr. Emre AKTAŞ

Danışman

.....

Doç. Dr. Cenk TOKER

Üye

.....

Doç. Dr. Tolga GİRİCİ

Üye

.....

Yrd. Doç. Dr. Berkan DÜLEK

Üye

.....

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **DOKTORA TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma SEVİN DÜZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

*eşime ve kızıma...*

## ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

... / ... / 20...

Raşit TUTGUN

## ÖZET

# İŞBİRLİKLİ KABLOSUZ SİSTEMLER İÇİN AĞ KODLAMALI TEKRAR GÖNDERİM İSTEĞİ YÖNTEMLERİ

**RAŞİT TUTGUN**

**Doktora, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. EMRE AKTAŞ**

**Haziran 2015, 74 sayfa**

Tekrar gönderim isteği (ARQ), iletim güvenilirliğini arttırmak için haberleşme sistemlerinde kullanılan bir hata kontrol mekanizmasıdır. Kablosuz iletişim kanalının ilintili sönümlenmeli doğası gereği paket hataları rasgele olmaktan çok grup halinde ortaya çıkabilmektedir. Bu gibi durumlarda geleneksel ARQ verimli olmaz ve bağlantı katmanındaki performansı ciddi şekilde düşer. Son yıllarda bu engeli aşmak için işbirlikli haberleşme kavramlarını ARQ içinde kullanmanın yöntemlerinin araştırıldığı çalışmalar literatürde görülmektedir. İşbirlikli haberleşme kavramı 2000'li yılların başından itibaren sönümlenmeli kanallarda çeşitlemeyi sağlayan bir yöntem olarak yoğun biçimde incelenmiştir. Bu kavramın ARQ mekanizmasında kullanılması ise hatalı bir mesajı sürekli aynı sönümlenmiş kanaldan tekrar göndermek yerine bağımsız sönümlenmiş başka bir kanaldan göndererek çeşitlemeyi bağlantı katmanında sağlamış olur. Literatürdeki araştırmalar işbirlikli ARQ kullanmanın geleneksel ARQ kullanmaya göre avantajlarını analiz ve benzetim sonuçlarıyla göstermiştir.

İşbirlikli haberleşmenin bir genellemesi olarak görülebilecek ağ kodlamasının üzerindeki çalışmalar son yıllarda yoğunlaşmıştır. Ağ kodlamasında işbirliği yapan röle düğümleri kaynaktan aldıkları paketleri olduğu gibi hedefe göndermek yerine üzerinde işlem yaparak iletebilmektedirler. Bu işlem birden çok paketi hedefte ayrılabilir şekilde birleştirmektir. Bu şekilde yapılan birleştirmelerin kanalın daha etkin bir biçimde kullanılmasını sağlayarak toplamdaki iletim hızlarında kazançlar sağladığı gösterilmiştir.

Bu tez çalışması, işbirlikli ARQ protokollerinin ağ kodlaması ile etkinliğinin arttırılma-

sını amaçlamaktadır. Ağ kodlaması hem işbirliğinin getirdiği çeşitleme kazançlarını elde ettiği hem de paketler arası birleştirmenin getirdiği iletim hızı avantajını kullandığı için ARQ performansını arttırmak üzere ideal bir aday olarak durmaktadır. Bu alanda şu zamana kadar yapılmış olan çalışmalar ağ kodlamalı ARQ yöntemlerinin getireceği kazançları göstermektedir. Ancak mevcut ağ kodlamalı ARQ araştırmaları tekrar gönderim sürecinde işbirliği yapacak düğüm seçimini ve paket birleştirme seçeneklerini sınırlı senaryolar altında ele almaktadır. Tezin temel amacı, çok sınırlı durumları ele alan mevcut çalışmaların aksine, ağ kodlaması literatüründe iyi bilinen ancak henüz işbirlikli ARQ için çalışılmamış durum ve yöntemleri ağ kodlamalı işbirlikli ARQ çalışması kapsamında araştırmaktır. Bunun için tekrar gönderim düğümü seçimi üzerine yeni stratejiler geliştirilmiştir. Ayrıca fiziksel katmanda ağ kodlama için geliştirilmiş olan paket birleştirme yöntemlerinin ARQ'ya has bağlantı katmanına uyarlanması araştırılmıştır. Bu yöntemlerle özgün ağ kodlamalı ARQ stratejileri önerilmiş ve bunların başarımları incelenmiştir. Yeni stratejiler geliştirirken literatürde çoğunlukla kullanılan basit hata modellerinin aksine gerçekçi sönümlenmeli kanal ve paket hata modelleri kullanılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Tekrar gönderim isteği, ağ kodlaması, işbirlikli haberleşme, kablosuz haberleşme

## **ABSTRACT**

### **NETWORK CODED AUTOMATIC REPEAT REQUEST METHODS FOR COOPERATIVE WIRELESS SYSTEMS**

**RAŞİT TUTGUN**

**Doctor of Philosophy, Department of  
Electrical and Electronics Engineering**

**Supervisor: Doç. Dr. EMRE AKTAŞ**

**June 2015, 74 pages**

Automatic repeat request (ARQ) is an error control mechanism used to improve link reliability in communication systems. Due to the correlated fading nature of wireless communication channels, packets errors can occur in groups as opposed to occurring randomly. In those cases, traditional ARQ is not efficient and the link layer performance is significantly degraded. In order to overcome this, in recent years, studies which investigate the use of cooperative communication concepts in ARQ are seen in literature. The concept of cooperative communications has been investigated heavily as a means of providing diversity in fading channels since the early 2000s. The use of this concept in the ARQ mechanism provides the retransmission of an erroneous messages from a different channel rather than retransmitting it from the same channel, thus utilizing diversity in the link layer. Investigations in the literature show the advantages of cooperative ARQ compared with conventional ARQ via analysis and simulation results.

Network coding, which can be seen as a generalization of cooperative communication, has received significant research attention recently. In network coding, the cooperative relay nodes can process and then forward the packets they receive from the source, as opposed to forwarding them directly. This processing is the form of combining multiple packets in such a way that they can be separated at the destination. It has been shown that such combinations result in more efficient use of the channel, resulting in improved overall data rates.

This thesis work aims to improve the efficiency of cooperative ARQ protocols using network coding. Network coding seems an ideal candidate for improving the performance of ARQ as it achieves the diversity gains provided by user cooperation, and also utilizes the data rate advantage of combining packets. The current investigations in this area show the gains of network coding ARQ methods. However current network coding ARQ researches are done for limited retransmitting node choice and limited packet combining scenarios. The main goal of this thesis, contrary to existing studies considering very limited cases, is to investigate the cases and methods which are well-known in the network coding literature, in the context of network coded cooperative ARQ. To that end, novel strategies for the choice of retransmitting nodes were developed. In addition, adaptation of recent packet combining methods developed for physical layer to link layer for ARQ was investigated. Novel ARQ strategies using these methods were proposed, and their performance was investigated. As opposed to simple error models commonly used in the literature, realistic fading channel and packet error models were used to develop new strategies.

**Keywords:** Automatic repeat request, network coding, cooperative communication, wireless communication



## TEŞEKKÜR

Bu tez alıőması boyunca bana yol gösteren ve bağımsız bir araştırmacı olmam konusunda rehberlik eden tez danıőmanım Sayın Doç. Dr. Emre Aktaş'a,

Bilgi ve deneyimlerini paylaőarak tez çalıőmamıza yön veren tez izleme komitesinin değerli üyeleri Sayın Doç. Dr. Cenk Toker ve Sayın Doç. Dr. Tolga Girici'ye,

Değerli görüş ve önerileri için savunma sınavı jüri üyelerine,

Beni yetiőtiren ve bugünlere gelmemde üzerimde büyük emekleri olan sevgili annem ve babama, çocukluğumuzu paylaőtığımız ve her zaman yanımda olan kardeőlerime,

Hayatıma anlam katan ve her daim destekleyen sevgili eőim Mediha'ya ve biricik kızım Elif'e,

teőekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi
ÇİZELGELER .....	viii
ŞEKİLLER .....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	x
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ VE TEZİN KATKISI .....	3
2.1. İşbirlikli Haberleşme .....	3
2.2. İşbirlikli ARQ (C-ARQ) .....	4
2.3. Ağ Kodlaması .....	5
2.4. Ağ Kodlaması Üzerine ARQ .....	6
2.5. Ağ Kodlamalı ARQ (NC-ARQ) .....	6
2.6. İşbirlikli Ağ Kodlamalı ARQ (C-NC-ARQ) .....	7
2.7. Tezin Katkısı .....	7
3. KANAL VE HATA MODELİ .....	10
4. İKİ YÖNLÜ RÖLELEME KANALI İÇİN C-NC-ARQ YÖNTEMLERİ .....	15
4.1. Sistem Modeli .....	15
4.2. C-NC-ARQ Yöntemlerinin İşleyişi .....	17
4.2.1. Röle Tabanlı Ağ Kodlamalı Tekrar Gönderim (RT-AK) .....	21
4.2.2. Sıralı Ağ Kodlamalı Tekrar Gönderim (ST-AK) .....	22
4.2.3. Kanal Bilgisine Dayalı Ağ Kodlamalı Tekrar Gönderim (KT-AK) .	23
4.3. İş Çıkarma Oranı Analizi .....	23
4.3.1. $W_0(i)$ Alt durumlarından Geçişler .....	27
4.3.2. $W_1(a, i)$ Alt durumlarından Geçişler .....	28
4.3.3. $W_2(b, i)$ Alt durumlarından Geçişler .....	29

4.3.4. Kararlı Durum Olasılıkları .....	30
4.3.5. ST-AK ve KT-AK Stratejileri .....	31
4.4. Ortalama Gecikme ve Enerji Tüketimi .....	31
4.5. Uygumaya Dair Meseleler .....	32
4.6. Sayısal Sonuçlar .....	33
5. TÜMEGÖNDERİM AĞI İÇİN C-NC-ARQ YÖNTEMİ .....	41
5.1. Sistem Modeli .....	41
5.2. C-NC-ARQ Yönteminin İşleyişi .....	43
5.3. Sayısal Sonuçlar .....	49
6. SONUÇ .....	53
KAYNAKLAR .....	54
EKLER .....	60
ÖZGEÇMİŞ .....	73

## ÇİZELGELER

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1. Kanal ( $\mathbf{s}_c$ ) ve ARQ ( $\mathbf{s}_p, \mathbf{s}_r$ ) durum değişkenleri .....	21
Çizelge 4.2. C-NC-ARQ Tablosu .....	22
Çizelge 4.1. RT-AK stratejisi için $W_2(3, \cdot)$ alt durumundan geçişler. ....	30
Çizelge 5.1. $k + 1$ 'inci zaman dilimi için $R_1$ tarafından gönderilmesi muhtemel paketler. ....	49
Çizelge .1. $T_0$ durumundan geçiş tablosu. ....	62
Çizelge .2. RT-AK ve RT için $T_1$ durumundan geçiş tablosu. ....	63
Çizelge .3. RT-AK için $T_2$ durumundan geçiş tablosu. ....	64
Çizelge .4. RT için $T_2$ durumundan geçiş tablosu. ....	65
Çizelge .5. ST-AK ve ST için $T_1$ durumundan geçiş tablosu. ....	66
Çizelge .6. KT-AK için $T_1$ durumundan geçiş tablosu. ....	67
Çizelge .7. KT için $T_1$ durumundan geçiş tablosu. ....	68
Çizelge .8. ST-AK için $T_2$ durumundan geçiş tablosu. ....	69
Çizelge .9. ST için $T_2$ durumundan geçiş tablosu. ....	70
Çizelge .10. KT-AK için $T_2$ durumundan geçiş tablosu. ....	71
Çizelge .11. KT için $T_2$ durumundan geçiş tablosu. ....	72

## ŞEKİLLER

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Tez ile ilişkili konular ve birbirleriyle olan bağlantıları .....	4
Şekil 3.1. Gilbert-Elliot modeli .....	12
Şekil 3.2. Kanal katsayılarının zamandaki ilintisi .....	14
Şekil 4.1. İki-yönlü röleleme kanalı .....	15
Şekil 4.2. C-NC-ARQ durum modeli .....	19
Şekil 4.3. C-NC-ARQ akış şeması .....	20
Şekil 4.4. İki-yönlü röleleme kanalında C-NC-ARQ için Markov modeli .....	24
Şekil 4.5. RT-AK yönteminin kesinti olasılığına bağlı iş çıkarma oranı .....	35
Şekil 4.6. ST-AK yönteminin kesinti olasılığına bağlı iş çıkarma oranı .....	35
Şekil 4.7. KT-AK yönteminin kesinti olasılığına bağlı iş çıkarma oranı .....	36
Şekil 4.8. Sönümlenme payına bağlı iş çıkarma oranları .....	36
Şekil 4.9. Kanal ilintisine bağlı iş çıkarma oranları .....	38
Şekil 4.10. Röle sönümlenme payına bağlı iş çıkarma oranı .....	38
Şekil 4.11. Sönümlenme payına bağlı ağ kodlaması olasılığı. ....	40
Şekil 4.12. KT-AK yöntemlerinin karşılaştırılması .....	40
Şekil 5.1. İşbirlikli tümegönderim ağı .....	42
Şekil 5.2. Tümegönderim ağı için C-NC-ARQ akış şeması .....	47
Şekil 5.3. Kesinti olasılığına bağlı iş çıkarma oranı .....	51
Şekil 5.4. Kanal ilintisine bağlı iş çıkarma oranı .....	52
Şekil 5.5. Rölelerin görece konumuna bağlı iş çıkarma oranı .....	52

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$y_j(t)$	alıcıda alınan zaman-alanındaki sinyal
$T_s$	sembol süresi
$T_p$	paket süresi
$\mathbf{y}[k]$	alıcıda bir paket süresi boyunca alınan ayırık zaman sinyali
$M$	bir paketteki sembol sayısı
$\mathbf{q}$	$M$ sembolden oluşan paket
$h[k]$	zamanla değişen rasgele kanal
$\mathbf{w}[k]$	toplanır Gauss gürültüsü
$\sigma_h^2$	zamanla değişen rasgele kanalın değişintisi
$\sigma_w^2$	toplanır Gauss gürültüsünün değişintisi
$\Gamma_0$	verici çıkışındaki sembol gücü
$\lambda[k]$	anlık kesinti olasılığı
$\gamma[k]$	anlık sinyal-gürültü-oranı
$\bar{\lambda}$	ortalama kesinti olasılığı
$F$	sönümlenme payı
$\Lambda$	geçiş olasılık matrisi
$P_{ij}$	$i$ durumundan $j$ durumuna geçiş olasılığı
$R_h(n)$	kanal katsayılarının ilinti fonksiyonu
$\rho$	zamanla değişen rasgele kanalın ilinti katsayısı
$S_1, S_2$	iki yönlü röleleme kanalındaki kaynaklar
$R$	iki yönlü röleleme kanalındaki röle
$C$	iki yönlü röleleme kanalındaki tekrar gönderici düğümü
$\mathbf{s}_c$	kanal durum değişkeni
$\mathbf{s}_p, \mathbf{s}_r$	ARQ durum değişkeni
$T_0$	$S_1$ 'in $\mathbf{q}_1$ paketini ilk kez gönderimini gösteren durum
$T_1$	$S_2$ 'in $\mathbf{q}_2$ paketini ilk kez gönderimini gösteren durum
$T_2$	tekrar gönderim durumu

$Z(k)$	C-NC-ARQ durum değişkeni
$\Sigma$	C-NC-ARQ geçiş olasılık matrisi
$\pi$	kararlı-durum olasılıkları
$W(k)$	C-NC-ARQ alt durum değişkeni
$W_0(i)$	C-NC-ARQ alt durumu
$W_1(a, i)$	C-NC-ARQ alt durumu
$W_2(b, i)$	C-NC-ARQ alt durumu
$\eta$	ortalama iş çıkarma oranı
$T_D$	gecikme suresi
$P\{AK\}$	ağ kodlaması olasılığı
$S$	tmegerendirim ağındaki kaynak
$R_1, R_2$	tmegerendirim ağındaki röleler
$D_1, D_2, D_3$	tmegerendirim ağındaki hedefler
$N$	tmegerendirim ağındaki ereve boyutu
$CW_i$	$i$ 'inci gnderimdeki geri çekilme penceresinin boyutu
$CW_{min}$	geri çekilme penceresinin ilk (en küçük) boyutu
$CW_{max}$	geri çekilme penceresinin son (en büyük) boyutu
$\mathbf{S}_d$	paket durum matrisi
$\mathbf{S}_{d,ij}$	$\mathbf{S}_d$ matrisinin alt matrisleri
$\beta$	görece konum parametresi

### Kısaltmalar

ACK	Olumlu Geribildirim
ARQ	Tekrar Gönderim İsteği
C-ARQ	İşbirlikli Tekrar Gönderim İsteği
C-NC-ARQ	İşbirlikli Ağ Kodlamalı Tekrar Gönderim İsteği
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineering
KT	Kanal Bilgisine Dayalı Tekrar Gönderim

KT-AK	Kanal Bilgisine Dayalı Ağ Kodlamalı Tekrar Gönderim
LTE	Long-Term Evolution
NACK	Olumsuz Geribildirim
NC-ARQ	Ağ Kodlamalı Tekrar Gönderim İsteği
ST	Sıralı Tekrar Gönderim
ST-AK	Sıralı Ağ Kodlamalı Tekrar Gönderim
RT	Röle Tabanlı Tekrar Gönderim
RT-AK	Röle Tabanlı Ağ Kodlamalı Tekrar Gönderim
XOR	Exclusive OR



# 1. GİRİŞ

İşbirlikli haberleşme, işbirlikçi düğümler (röleler) vasıtasıyla uzaysal çeşitlemeden yararlanma olanağı verdiği için son yıllarda oldukça popüler bir araştırma konusu haline gelmiştir. İşbirliğindeki esas amaç, iletim için istatistiksel olarak birbirinden bağımsız kanalları kullanmak suretiyle çeşitleme kazancı sağlamaktır [1–5]. Literatürdeki çoğu çalışma, işbirlikli haberleşmenin fiziksel katman tasarım ve performansı açılarından faydalarını ortaya koymaktadır. Ancak son zamanlarda işbirlikli haberleşmenin daha yüksek katmanlardaki avantajlarını özellikle bağlantı katmanı ve tekrar gönderim isteği (ARQ) protokollerine uygulanmasını araştıran çalışmalar bulunmaktadır [6–17].

ARQ, iletim güvenilirliğini arttırmak için haberleşme sistemlerinde kullanılan bir hata kontrol mekanizmasıdır. Bir iletim başarısız olduğunda, hedeften kaynağa iletilen olumsuz geribildirim (NACK) mesajı kayıp/hatalı paketlerin tekrar gönderimini tetiklemektedir. Bu prosedür alıcı paketleri hatasız alana dek sürmektedir. ARQ, paket iletimlerindeki gürültünün ilintisiz olduğu ve paket hatalarının bağımsız olarak oluştuğu gürültülü kanallarda iyi çalışır. Ancak kablosuz haberleşme kanallarında paket hataları çoğunlukla kanal sönümlemesinden kaynaklanmaktadır. Kanal sönümlemesi ise sönümleme sürecinin ilintisinden dolayı bağımsız olmaktan çıkar. Yavaş sönümleme durumunda (yüksek evre uyumluluk zamanı için) ardarda yapılan iletimlerde paket hataları meydana gelebilmektedir. Bu tür durumlarda ARQ verimli olmayabilir ve bağlantı katmanındaki iş çıkarma oranı performansı düşebilir. Son yıllarda bu problemin çözümü için yükselt-ve-ilet [18, 19] ve çöz-ve-ilet [20, 21] gibi işbirlikli yöntemler ARQ içine entegre edilmeye başlanmıştır.

İşbirlikli ARQ yöntemleri, kablosuz iletişim kanalının tümegönderim özelliğinden faydalanmak suretiyle tekrar gönderim sürecini verimli hale getirerek iş çıkarma oranının arttırılmasını ve gecikmenin azaltılmasını amaçlar. Kablosuz iletişim kanalının tümegönderim özelliği, ağdaki herhangi bir düğümden yapılan yayının kapsama alanı dahilindeki tüm düğümlerden alınabilmesine olanak verir. Ağdaki herhangi bir düğümden herhangi başka bir düğüme gönderilen pakette hata olması durumunda, gönderilen paketi doğru almış kapsama alanı dahilindeki diğer düğümler (röleler) tekrar gönderim sürecinde paketin kaynağı ve hedefi olan düğümlere yardım ederek işbirlikli bir yapı oluştururlar. Bu strateji tekrar gönderim için alternatif kanallar kulla-

narak tekrar gönderim sayısını düşürmeyi hedefler. Bir anlamda, uzaysal çeşitleme ortaya çıkar. Fiziksel katmandaki işbirlikli yöntemlerin aksine ( [4, 5] ve içindeki referanslar), işbirlikli ARQ yöntemlerinde röleler, sadece kaynak ve hedef arasındaki bağlantı başarısız olduğunda tekrar gönderim sürecinde işbirliği yaparlar.

Ağın iş çıkarma oranını arttırmanın bir diğer yolu da ağ kodlamasından faydalanmaktır. Ağ kodlamasının ardındaki fikir, aynı hedefe iletilen farklı paketlerin cebirsel işlemler ile birleştirilmesidir.

Ağ kodlaması ilk olarak kablolu ağlar için ağ katmanında önerilmiştir [22–24]. Tüme-gönderim özelliğinden dolayı kablosuz ağ, ağ kodlaması için kendine has zorluklar ve avantajlar içermektedir [25]. Kablosuz ağ kodlaması fiziksel katman için [25–32] numaralı çalışmalarda önerilmiş ve literatürde geniş bir şekilde çalışılmıştır. (Ağ kodlaması hakkında detaylı literatür analizi için [33] incelenebilir). Son zamanlarda, ağ kodlamalı ARQ yönteminin işbirliksiz ağlarda uygulaması için çalışmalar yapılmıştır [34–38]. Bu tür ağlarda ağ kodlaması için paket birleştirme sadece kaynak düğümde yapılmaktadır. İşbirlikli ağlara ağ kodlamalı ARQ uygulandığında ise paket birleştirme sadece kaynak düğümde değil aynı zamanda röle düğümlerde de yapılabilmektedir. Bu yaklaşıma işbirlikli ağ kodlamalı ARQ (C-NC-ARQ) denmektedir. C-NC-ARQ, röleler ile işbirliği yapmanın getirdiği uzaysal çeşitleme avantajı ile ağ kodlamasının paket birleştirme yoluyla sağladığı iş çıkarma oranı arttırma avantajını birleştirdiği için gelecek vadetmektedir [39–44]. Bu tezin konusu da C-NC-ARQ yöntemlerini araştırmak ve yeni bir yöntem önermektir. Bir sonraki bölümde, bu konuyla ilgili literatür özeti ve tezin literatüre katkısı anlatılacaktır.

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ VE TEZİN KATKISI

Bu bölümde, tezin de dahil olduğu çalışmaları özetleyen literatür analizi ve tezin literatüre katkısı anlatılmaktadır. Literatür analizinde verilen alt konu başlıkları birbirleri ile Şekil 2.1’de verildiği gibi ilişkilidir. Tezde önerilen yöntemler, Şekil 2.1’de en altta gösterilen “İşbirlikli Ağ Kodlamalı ARQ” grubuna dahildir. Bölümün devamında alt konu başlıklarının detayı verilecektir.

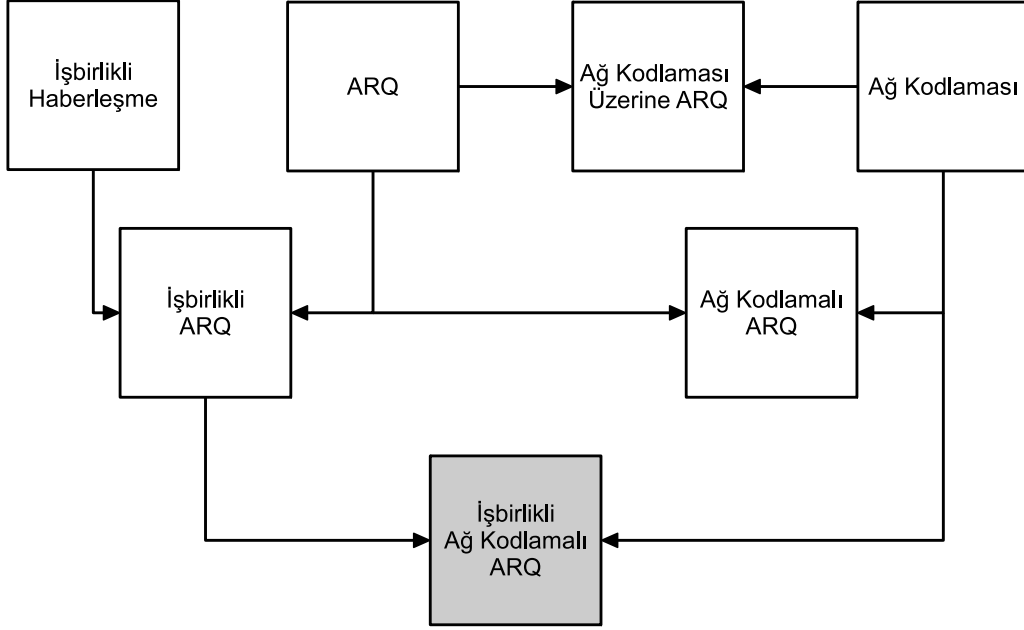
### 2.1 İşbirlikli Haberleşme

Geleneksel haberleşme ağlarında alıcı ve verici yardım almaksızın doğrudan bağlantı kurarken işbirlikli ağlarda ara istasyonlar (röleler) alıcı-verici arasındaki iletişime yardım ederler [1,2]. İşbirliğindeki esas amaç sönmülemeli kanallarda alıcıdaki belirsizliğin azaltılması için vericiye yardım etmektir. Bu amaçla diğer çeşitleme yöntemleri gibi çeşitleme kazancı (işbirliği çeşitlemesi) sağlanarak hata oranı azaltılır [3, 4]. Bu durumda röle sayısı ile çeşitleme kazancı arasında doğrudan bir ilişki kurulabilir. Bunun yanısıra işbirliği yöntemleri de işbirlikli bir sistemin performansını etkiler.

En bilinen işbirliği yöntemleri yükselt-ve-ilet ve çöz-ve-ilet protokolleridir [5]. Yükselt-ve-ilet yönteminde röle, vericiden aldığı sinyali sayısal olarak işlemeksizin sadece yükselterek alıcıya iletir. Buna analog iletim de denir. Çöz-ve-ilet yönteminde ise vericiden gönderilmiş olan mesaj rölede çözülerek yeniden kodlanır ve alıcıya iletilir. Bu, sayısal iletime örnek olur. Kodlama yöntemlerine uygun oluşu ve güç kısıtları nedeniyle çöz-ve-ilet protokolü, yükselt-ve-ilet protokolüne nazaran ön plana çıkmaktadır.

İşbirliğindeki esas amaç çeşitleme kazancını sağlamak olduğu içi genellikle yapılan çalışmalar fiziksel katmana yöneliktir. Bu katmandaki işbirlikli haberleşme yöntemleri vericiden iletilen bilgi paketlerinin güvenilirliğini arttırma (hata oranını azaltma) amacı güder. Hatanın önlenemediği durumlarda ise hatalı mesajın tekrar gönderim görevi bir üst katman olan ortam erişim kontrol katmanına bırakılır.

İşbirlikli haberleşme yöntemleri şimdiye dek literatürde pek çok kez çalışılmış olsa da mevcut haberleşme sistemlerinde çok yaygın kullanımı yoktur. Hali hazırda IEEE 802.16j standardı [45] ve bir dördüncü nesil teknolojisi olan LTE-advanced sistemleri için [46] işbirlikli haberleşme yöntemleri tanımlanmıştır ancak işbirlikli haberleşme-



Şekil 2.1. Tez ile ilişkili konular ve birbirleriyle olan bağlantıları. Tezde önerilen yöntemler “İşbirlikli ağ kodlamalı ARQ” grubuna dahildir.

nin asıl dördüncü nesil sonrası haberleşme sistemlerinde etkin bir şekilde kullanılması beklenmektedir.

## 2.2 İşbirlikli ARQ (C-ARQ)

İşbirlikli ARQ (C-ARQ) yöntemleri işbirliği sürecine ortam erişim kontrol katmanını dahil ederek sadece iletişim güvenilirliğini arttırmayı değil aynı zamanda tekrar gönderim sürecini de verimli hale getirmeyi amaçlar. C-ARQ yönteminin işbirlikli haberleşmeden temel farkı röle düğümlerin sadece tekrar gönderim sürecinde işbirliğine dahil olmasıdır.

Bugüne kadar literatürde pek çok C-ARQ yöntemi önerilmiştir ve bu alan literatürde belli bir olgunluğa erişmiştir ve işbirliği ile ARQ birleşiminin geleneksel ARQ sistemlerine nazaran sunduğu avantajlar gösterilmiştir [9, 10, 21, 47–52]. Örneğin [9]'da birden fazla rölenin olduğu bir ağda C-ARQ yönteminin ortalama iş çıkarma oranı analitik olarak elde edilmiştir. [10]'da ise çöz-ve-ilet ile yükselt-ve-ilet protokollerini uygulayan C-ARQ yöntemleri analiz yoluyla karşılaştırılmıştır. Hem hızlı hem de yavaş değişen sönümlenmeli kanallarda çeşitleme mertebesinin üst sınırları çöz-ve-ilet uygulayan ARQ için çıkarılmıştır [47, 48]. Çöz-ve-ilet ARQ protokolü için kesinti olasılığı hızlı değişen kanal durumunda [21]'de, yavaş değişen kanal durumunda

ise [49]'da bulunmuştur. [50]'de işbirlikli dur-ve-bekle ARQ protokolü için gecikme modeli oluşturulmuş ve hangi koşullar altında işbiriksiz modele kıyasla üstün olduğu anlatılmıştır. [51]'de ise çeşitli işbirliği modelleri ve ARQ tipleri için gecikme analizi yapılmıştır. [52]'de, iki kaynaklı tek hedefli bir işbirliği modeli için işbirliği-öncesi ve işbirliği-sonrası ARQ protokolleri önerilmiştir. İşbirliği-sonrası protokolde olumlu ve olumsuz geribildirimler işbirliği yapılan iletişim çerçevesi sonrası gönderilirken işbirliği-öncesi protokolde hedef, kanal durumuna göre işbirliği yapılıp yapılmayacağına karar vermektedir.

Yukarıda özetlenen çalışmalar C-ARQ kapsamında yapılan araştırmaların sadece bir kısmını oluşturmaktadır. Ancak bu çalışma seçkisi bile C-ARQ protokollerinin sunduğu avantajları ortaya koymaya yeterlidir. Sağlanan bu kazançlar, rölelerin aldıkları paketleri olduğu gibi iletmek yerine başka paketler ile birleştirerek ilettikleri ağ kodlaması yöntemi ile arttırılabilir.

### **2.3 Ağ Kodlaması**

Ağ kodlaması ile birlikte röleler kaynaktan aldıkları paketleri olduğu gibi hedefe ilemenin yanında ilettikleri paketler üzerinde işlem yapma yeteneği de kazanmıştır [22]. Röleler bağımsız veri paketlerini genelde doğrusal bir birleştirme yöntemi ile birleştirirler. Bu doğrusal birleştirme çoğunlukla ikili tabanda XOR işlemi ile gerçekleştirilir. Ancak daha yüksek sıralı Galois alanları üzerinden birleştirme yapmak da mümkündür. Ağın veri akış hızını arttıran bu birleştirme, hedefin paketleri çözebileceği şekilde yapılır. Ağ kodlaması ilk kez hatasız noktadan noktaya bağlantılara sahip örgüsel ağ için ağ katmanında yapılan bir işlem olarak öne sürülmüştür [22–24]. Ağ kodlamasının kablosuz ağlara uyarlanması çalışmaları ise kablosuz kanalların hatasız modellenemeyecek gürültülü ve sönümlenmeli yapısı ve doğal olarak var olan tümegönderim özelliği nedeniyle fiziksel katman üzerine yoğunlaşmıştır. Burada kaynaktan gönderilirken kanalın tümegönderim özelliği nedeniyle ağdaki diğer düğümler tarafından duyulabilen paketler söz konusu olmaktadır. Bu durumda paketi duyan ara düğümler, ağ kodlaması yoluyla birden fazla paketi birleştirerek hedeflere iletebilmektedirler.

Kablosuz ağlarda fiziksel katmanda yapılan çalışmaların amacı hata oranını azaltmak ve veri iletim oranını arttırmaktır. Ancak kablosuz kanalların yapısı gereği paket hataları yine de kaçınılmazdır. Bu hataları gidermek için bağlantı katmanında

ARQ mekanizması kullanılabilir. Ağ kodlamasının bu mekanizmaya entegrasyonu istendiği takdirde tekrar gönderim sistemiyle ilişkisi ve bu sisteme olası kazançlarının ayrıca incelenmesi gerekmektedir. Bağlantı katmanında ağ kodlaması konusu literatürde yeni bir konudur ve bu alanda boşluklar bulunmaktadır.

## **2.4 Ağ Kodlaması Üzerine ARQ**

Bağlantı katmanında hata kontrol mekanizması olarak ARQ kullanan bir sistem için ağ kodlamasını kullanmanın yollarından biri ağ kodlamasını tamamen fiziksel katmanda tutmak ve bunun üzerindeki bağlantı katmanında ARQ kullanmaktır. Böyle bir sistemde hedefte hata olup olmadığına bakılmaksızın işbirlikli röle düğümleri fiziksel katman için geliştirilmiş ağ kodlaması yöntemlerini kullanarak hata oranını düşürürler ve ağ kodlaması işlemleri aynen tekrarlanır. [29] numaralı çalışma böyle bir sistemi ele almıştır. Bu sistem ağ kodlaması ve ARQ mekanizmasını birbirinden ayrı tutarak kavramsal basitlik sağlar. Ancak kanalı etkin kullanamamaktadır çünkü kanalın güçlü olduğu ve paketin bir seferde hatasız hedefe ulaştığı durumda bile ağ kodlamasında gelen artık gönderimlerden dolayı bir kayıp söz konusudur.

## **2.5 Ağ Kodlamalı ARQ (NC-ARQ)**

Ağ kodlaması üzerine ARQ yönteminde bahsedilen kaybı gidermenin yolu ağ kodlamasını ARQ içine katmaktır [34–38]. [34–37] numaralı çalışmalarda ağ kodlaması iletimde bir hata olması durumunda tekrar gönderilecek paketin kaynak tarafından başka paketlerle birleştirildiği bir çoğagönderim senaryosu için düşünülmüştür. Bu birleştirme yaklaşımı diğer hedeflerin hatasız aldığı bir paketin başka bir hedefte hatalı alınması durumunda faydalı olabilir. Kaynakta paketlerin birleştirilmesi kuyrukta bekleyen paket sayısını düşürdüğü [34] ve verimliliği arttırdığı [35–37] için tekrar gönderim sayısının azaltılmasına yardımcı olur. [34–36] numaralı çalışmalardaki yöntemler işbiriksiz ağ kodlamasını uygularlar zira iletişim tek atlamalı (kaynaktan hedeflere) olduğu için ağ kodlaması sadece kaynak düğüm tarafından yapılmaktadır. [38] numaralı çalışma ise yukarıdaki yaklaşımı kaynaklar arasında doğrudan bağlantının olmadığı iki yönlü röleleme ağının tümegönderim fazı için uygulamıştır.

## 2.6 İşbirlikli Ağ Kodlamalı ARQ (C-NC-ARQ)

Kablosuz kanalın tümegönderim özelliği ve rölelerin yardımı sayesinde işbirlikli ağlar için kayıp paketlerin birleştirilebilmesi olasılığı artar. Bundan dolayı daha iyi iş çıkarma oranı performansı elde etmek ve işbirliği çeşitlemesinden faydalanmak mümkün olur [39–44]. [34–37] numaralı çalışmalarda tek-atlamalı çoğagönderim senaryosu, [39]’da bir rölenin yardım ettiği tek kaynaklı duruma genelleştirilmiştir. Bu fikrin birden fazla kaynağa genelleştirilmesi ise [40, 41] numaralı çalışmalarda araştırılmıştır. [42]’de yazarlar, rölelerin hatalı iletim sonucunda hedefe tekrar gönderilen paket ile aynı hedefe iletilecek olan kendilerine ait paketi birleştirebildikleri bir strateji önermişlerdir. Hedefte hatalı bir paket alındığında, bu paketin tekrar gönderim sürecinde röle, kendine ait paket ile hatalı paketi birleştirerek hedefe iletilebilmektedir. Bu senaryo, hedefin ağ kodlanmış paketleri daha önce aldığı hatalı paketleri kullanarak çözebilecek yeteneğe sahip olmasını gerektirmektedir. Bu yöntemin benzeri, fiziksel katmanda gerçekleştirilen iki yönlü röleleme kanalına ağ kodlaması dahil edilerek [43]’te önerilmiştir. C-NC-ARQ fikirleri ise rasgele erişimli kanallar kapsamında [44]’te incelenmiştir.

## 2.7 Tezin Katkısı

Bu tez çalışmasında işbirlikli ağlar için ağ kodlamalı ARQ yöntemleri önerilmiştir. Tez iki farklı problemi ele almaktadır. İlk kısımda iki yönlü röleleme kanalı (Bölüm 4), ikinci kısımda ise tümegönderim ağı (Bölüm 5) için işbirlikli ağ kodlamalı ARQ yöntemleri önerilmiştir.

Detayları Bölüm 4’te anlatılacak olan tezin ilk kısmında kaynaklar arasında doğrudan bir bağlantının olduğu iki yönlü röleleme kanalı için C-NC-ARQ yöntemleri çalışılmıştır. Literatürdeki geçmiş çalışmaların aksine burada önerilen yöntemlerde röle tekrar gönderim sürecinde daha uyarlamalı davranmaktadır. Önerilen yöntemlerde röle ve kaynaklar hangi paketlerin hangi düğümler tarafından başarıyla alındığına bağlı olarak hareket etmektedirler. Önerilen yöntemlerin tekrar gönderim sürecinde tekrar gönderilecek paketler ve tekrar gönderici düğüm *C-NC-ARQ Tablosu* adı verilen ve Bölüm 4’te detaylı tartışılacak olan bir dizi kural ile belirlenir. C-NC-ARQ Tablosu’nda verilen kurallar dizisi önerilen farklı stratejilere bağlı olarak değişiklik göstermektedir: *Röle Tabanlı Ağ Kodlamalı Tekrar Gönderim (RT-AK)*, *Sıralı Ağ Kodlamalı Tekrar Gönderim (ST-AK)*, *Kanal Bilgisine Dayalı Ağ Kodlamalı Tekrar Gönderim (KT-AK)*.

Her bir strateji tekrar gönderim sürecini kanal bilgisine dayalı olarak uyarlama fikrine dayanmaktadır. RT-AK stratejisinde röle kanallarının kaynaklar-arası kanaldan her zaman daha iyi olduğu ön bilgisine dayanarak tekrar gönderim sürecinde röle, işbirliği yapabilecek durumda olduğu takdirde tekrar gönderici düğümü olarak önceliğe sahip olmaktadır. ST-AK stratejisinde tekrar gönderici düğümü seçimi röle ve kaynak arasında her bir gönderim için sıralı olarak değiştirilmektedir. Bu strateji kanalların ardışık gönderimler esnasında uzun süreli kesintilerde olduğu varsayımı altında tekrar gönderim için alternatif bağlantılar kullanmak suretiyle uzaysal çeşitlemeden faydalanmaktadır. KT-AK stratejisi ise daha uyarlamalı olup sadece kanallar hakkında ön bilgileri kullanmakla kalmaz daha önceki kanal durumlarının da kaydını tutar ve bu bilgiye göre hareket eder.

Bölüm 5'te tartışılacak olan diğer problemde tek kaynağın birden fazla hedefe bir grup paketi gönderdiği bir tümegönderim ağı için bir C-NC-ARQ yöntemi önerilmiştir. Bu senaryoda aynı paketler birden fazla hedefe gönderilmektedir. Herhangi bir başarısız iletim olduğu takdirde kaynak düğüm ağıdaki röleler ile işbirliği yapabilmektedir. Uygun durumda olan tüm düğümler tekrar gönderim sürecinde kanala rasgele erişim hakkı elde etmek için geri çekilme mekanizmasını kullanmaktadırlar. Ağ kodlaması hem kaynakta hem de rölelerde birden fazla kayıp paketi birleştirmek için kullanılabilir. Bu çalışmada ise geri çekilme mekanizmasını kullanılmamıştır.

Literatürde, kayıp paketlerin ARQ geribildirimleri ve kanal bilgisine dayalı olarak uyarlamalı bir şekilde birleştirilmesi fikri ağ kodlaması yapan işbirlikli ARQ kapsamında incelenmemiştir. Literatürde sönümlenmeli kanalın ve kanal ilintisinin iş çıkarma oranı üzerine etkisini inceleyen [7, 15, 16] gibi çalışmalar olsa da bunlar, ağ kodlamasının olmadığı C-ARQ grubuna girmektedir. Bu tez çalışmasında ise gerçekçi kanal modelleri kullanılarak sönümlenmeli kanalın ve kanal ilintisinin C-NC-ARQ sisteminin performansına etkisi araştırılmıştır ve kanal hatalarının ilintisini hesaba katan bir kanal modelinden yararlanılmıştır. İlintili kanal ikili Markov modeli ile gösterilmiştir. Kanal ilintisinin hem Bölüm 4 hem de Bölüm 5'te önerilen yöntemler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. İş çıkarma oranı verimliliği performans ölçütü olarak alınmıştır. İş çıkarma oranı hem analitik hem de benzetim yoluyla hesaplanmıştır. Önerilen yöntemler, literatürde daha önce önerilmiş olan işbirliksiz ağ kodlamalı ARQ, işbirlikli ARQ ve geleneksel ARQ yöntemleri ile karşılaştırılmıştır.



Tezin katkısı aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

- İş ıkarma oranı performansını arttırmak için ağ kodlaması kullanan özgün uyarlamalı işbirlikli ARQ yöntemlerini iki yönlü röleleme kanalı ve tümegönderim ağı için önermek.
- İki yönlü röleleme kanalı için önerilen yöntemin iş çıkarma oranını hem analiz hem de Monte Carlo benzetim yoluyla hesaplamak.
- Tümegönderim ağı için önerilen yöntemin iş çıkarma oranını Monte Carlo benzetim yoluyla hesaplamak.
- Kanal sönümlemesinin ve kanal ilintisinin etkisini incelemek için Markov modellerinden faydalanmak ve farklı kanal koşulları için kanal parametrelerinin önerilen yöntemlerin performansı üzerine olan etkisini incelemek.

Bu tez çalışması boyunca yukarıda özetlenen katkılar literatüre yayın olarak kazandırılmıştır. İki-yönlü röleleme kanalı için nerilen C-NC-ARQ yöntemleri ile ilgili çalışmalar [53] ve [54]'te, tümegönderim ağı için nerilen C-NC-ARQ yöntemi ile ilgili çalışma ise [55]'te yayınlanmıştır.

Tezin geri kalanı dört temel bölümden oluşmaktadır. Bölüm 3'te önerilen yöntemlerin analizinde kullanılacak olan kanal ve hata modeli anlatılmıştır. Bölüm 4, iki yönlü röleleme kanal modelini, bu kanal için önerilmiş olan C-NC-ARQ yöntemini, yöntemin iş çıkarma oranı analizi ile analiz ve benzetim sonuçlarını karşılaştırmalı olarak içermektedir. Bölüm 5 ise tümegönderim ağı için önerilmiş olan C-NC-ARQ yöntemini ve iş çıkarma oranı sonuçlarını karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Bölüm 6'da, tez çalışmasında ulaşılan sonuçlar verilmiştir.

### 3. KANAL VE HATA MODELİ

Bu bölümde, tez ile önerilen C-NC-ARQ yöntemlerinin analizinde kullanılan kanal ve hata modeli anlatılacaktır.

Ağdaki herhangi bir verici düğümden gönderilen  $q_j(t)$  sembolü düz sönümlmeli kanaldan geçerek alıcı düğümüne ulaşmaktadır. Alıcıda alınan zaman-alanındaki sinyal,

$$y_j(t) = q_j(t)h_j(t) + w_j(t) \quad (3.1)$$

olarak verilir. Burada  $h_j(t)$  zamanla değişen sönümlmeli kanalı,  $w_j(t)$  ise toplanır Gauss gürültüsünü göstermektedir. Zamanla değişen kanalın  $M$  tane sembolden oluşan bir paket süresi boyunca değişmediği yani blok sönümlmeye maruz kaldığı ancak paketler arası ilintili olarak yavaş bir şekilde değiştiği varsayılmıştır.  $T_s$  sembol süresini,  $T_p = MT_s$  paket süresini,  $T_c$  ise kanalın evre uyumluluk zamanını gösterdiği durumda  $T_p \ll T_c$  olarak ifade edilir. Bu durumda, bir sembol süresinde alınan ayırık-zaman sinyali aşağıdaki hale gelir:

$$y_j[k] = y_j(kT_p) = q_j h[k] + w_j[k] \quad (3.2)$$

Bir paket süresi boyunca alınan sinyal ise

$$\begin{aligned} \mathbf{y}[k] &= [y_1[k] \cdots y_M[k]] \\ &= [q_1 \cdots q_M] h[k] + [w_1[k] \cdots w_M[k]] \\ &= \mathbf{q}h[k] + \mathbf{w}[k] \end{aligned} \quad (3.3)$$

olur. Zamanla değişen rasgele kanal  $h[k]$ , haberleşen istasyonların görece konumlarının değişmesi ve çok-yol etkisinden kaynaklanan sönümlleme etkisi gösterir. Kanalın Rayleigh sönümlmeye maruz kaldığı kabul edilmiştir. Dolayısıyla karmaşık Gauss dağılımlıdır:  $h[k] \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_h^2)$ .  $\mathbf{w}[k]$  ise toplanır Gauss gürültüsünü gösterir:  $\mathbf{w}[k] \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma_w^2 \mathbf{I}_M)$ . Burada  $\mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ , sıfır-ortalamalı ve  $\sigma^2$  değışintisine sahip dairesel simetrik karmaşık-değerli Gauss dağılımını gösterir.  $\mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma^2 \mathbf{I}_M)$  ise sıfır-ortalamalı,  $\sigma^2 \mathbf{I}_M$  değışinti matrisine sahip M-boyutlu vektörel Gauss dağılımıdır.

$M$  sembolder oluşan  $\mathbf{q}$  paketindeki semboller karmaşık Gauss dağılımlı kabul edilmiştir:  $\mathbf{q} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma_q^2 \mathbf{I}_M)$ . Bundan dolayı, ARQ için paket hata olasılığı uzun bir kanal kodu kullanılması durumunda, karşılıklı bilgi kesinti olasılığı ile yaklaştırılabilmektedir [56–58]. Bu durumda,  $R_b$  bit/sembol veri hızı için, kanalın anlık olarak kesintiye uğrama olasılığı aşağıdaki gibi verilir [59]:

$$\lambda[k] = P \{ \log_2 (1 + \gamma[k]) \leq R_b \}. \quad (3.4)$$

Burada verilen kesinti olasılığı oldukça uzun kanal kodları kullanılması durumunda elde edilir. Pratikte sonlu uzunluktaki kanal kodları kullanılmaktadır. Bu durumda ise kesinti olasılığı yukarıdaki ifadeye benzer şekilde elde edilmekle birlikte sağlanması gereken eşik sinyal-gürültü-oranı değeri bir miktar artmaktadır. [60] numaralı çalışmada sonlu uzunluktaki kanal durumunda eşik değer in ideal durumdan ne kadar farklılaştığı tartışılmıştır.

Yukarıdaki eşitlikte verilen  $\gamma[k]$  alıcıda görülen anlık sinyal-gürültü-oranıdır:

$$\gamma[k] = \frac{|h[k]|^2 \sigma_q^2}{\sigma_w^2}. \quad (3.5)$$

$A[k] = |h[k]|^2$  şeklinde tanımlanırsa,  $h[k]$  karmaşık Gauss dağılımlı olduğundan  $A[k]$  üssel dağılıma sahip olur:

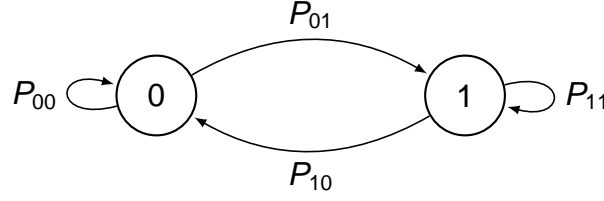
$$p(A[k]) = \frac{1}{\sigma_h^2} \exp \left( -\frac{A[k]}{\sigma_h^2} \right) = \text{Exp}(A[k]; \sigma_h^2). \quad (3.6)$$

Bu durumda, kanalın ortalama kesinti olasılığı

$$\bar{\lambda} = \int_0^{\bar{\gamma}} p(A[k]) dA[k] = 1 - \exp \left( -\frac{1}{F} \right) \quad (3.7)$$

şeklinde bulunur. Burada  $\bar{\gamma} = (2^{R_b} - 1) \sigma_w^2 / \sigma_q^2$  şeklinde verilir.  $F$  ise sönümlenme payıdır ve  $F = \sigma_h^2 / \bar{\gamma}$  olarak tanımlanır. Sönümlenme payı, kanalın kesintiye karşı dayanıklılığının bir ölçüsüdür.  $F$  değeri arttıkça, kanal daha seyrek kesintiye uğrar.

Yüksek ilintili olarak yavaş değişen kanallarda, paket hataları birbirini takip eden paketlerde ortaya çıkabilir. ARQ için iş çıkarma oranı analiz edilirken kanal ilintisinin



Şekil 3.1. Gilbert-Elliot modeli

dikkate alınması gerekir, zira yüksek kanal ilintisinden dolayı ARQ tekrar gönderimlerinin sayısındaki muhtemel bir artış iş çıkarma oranında düşüşe sebep olacaktır.

İş çıkarma oranı analiz edilirken sonlu-durum Markov modelleri zamandaki kanal ilintisinin gösterimi için sıklıkla kullanılmaktadır [61–65]. Bu modeller kanalın  $(h[k])$  Markov zinciri oluşturduğunu varsayar ve kanalı sonlu sayıdaki durumlara indirger:

$$p(h[1], h[2], \dots, h[N]) = p(h[1]) \prod_{k=1}^{N-1} p(h[k+1]|h[k]). \quad (3.8)$$

Paket hataları için kesinti hata olasılığı modeli kullanıldığında kanalı modellemek için Şekil 3.1 ile gösterilen Gilbert-Elliot modeli olarak da bilinen iki durumlu Markov modeli uygun düşer [65, 66]. Bu modelde kanaldaki kesinti durumu paket gönderimindeki başarı durumu ile doğrudan ilişkilidir. Bu modele göre 0 durumu, kanaldaki kesintiden kaynaklanan paket kaybını, 1 durumu ise kesinti olmadığı durumda paket başarısını gösterir ve Markov modeli aşağıdaki geçiş olasılık matrisi ile tanımlanır:

$$A = \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} \\ P_{10} & P_{11} \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

Kanalın bir paketin gönderimi süresince boyunca sabit kaldığı kabul edildiğinden  $P_{ij}$  olasılığı,  $k$ 'inci gönderimde  $i$  durumundan  $k+1$ 'inci gönderimde  $j$  durumuna geçiş olasılığını gösterir ve Rayleigh kanal için bu olasılıklar aşağıdaki şekilde ifade edilir [67] (Rician ve Nakagami düz sönmülemeli kanallar için benzer Markov modelleri [68] ve [69]'da verilmiştir):

$$P_{01} = \frac{Q(\theta, \rho\theta) - Q(\rho\theta, \theta)}{\bar{\lambda}/(1 - \bar{\lambda})} \quad (3.10)$$

$$P_{10} = \frac{\bar{\lambda}P_{01}}{1 - \bar{\lambda}} \quad (3.11)$$

$$P_{11} = 1 - P_{10} \quad (3.12)$$

$$P_{00} = 1 - P_{01}. \quad (3.13)$$

Burada  $\bar{\lambda}$ , (3.7) ile verilen, kanaldaki kesinti olasılığıdır.  $\theta$  ise,

$$\theta = \sqrt{\frac{2}{F(1 - \rho^2)}} \quad (3.14)$$

şeklinde tanımlanır.  $Q(\cdot, \cdot)$ , Marcum Q fonksiyonunu göstermektedir:

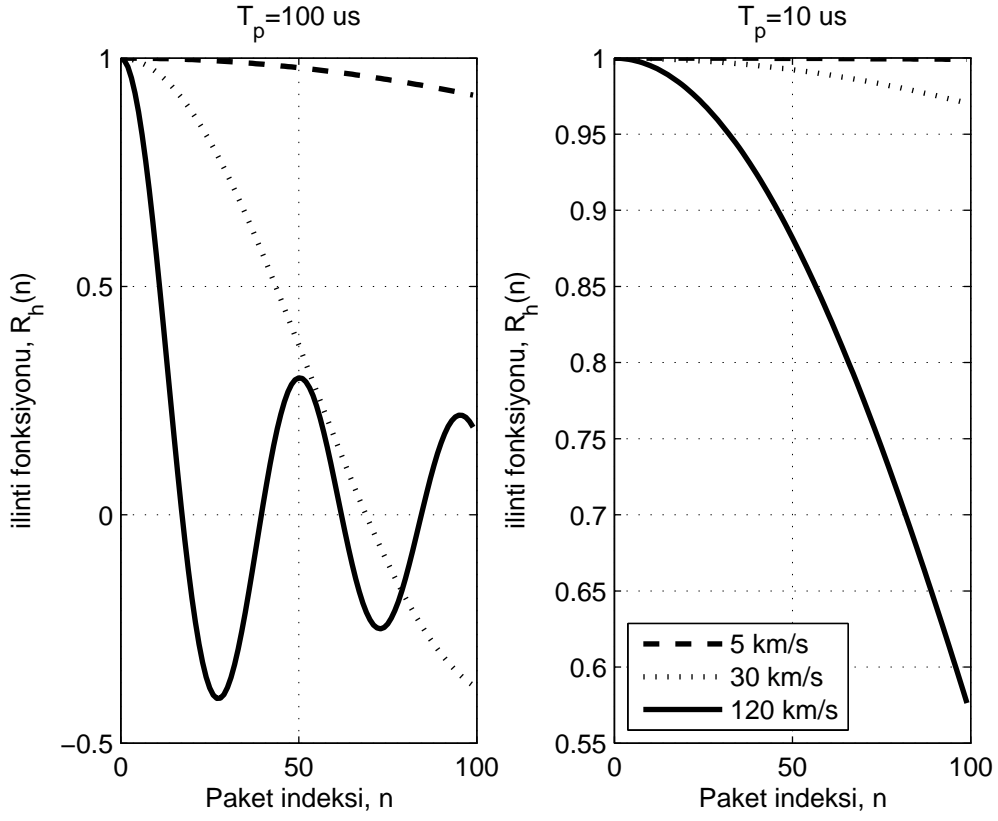
$$Q(a, b) = \int_b^{\infty} x \exp\left(-\frac{x^2 + a^2}{2}\right) I_0(ax) dx \quad (3.15)$$

Yukarıdaki eşitliklerde geçen ilinti katsayısı  $\rho$ , zamanla değişen kanalın ardışık iki katsayısı arasındaki ilintiyi göstermektedir ve  $\rho = R_h(1)$  şeklinde tanımlanır. Burada  $R_h(n)$ , zamanda ilintili olan  $h[k]$  rasgele değişkenin ilinti fonksiyonudur. Bu fonksiyon Jakes yaklaşımı ile modellenebilir [70]. Bu modelde, aralarında  $n$  tane paket süresi kadar zaman farkı olan iki kanal katsayısının ilintisi sıfıncı mertebeden birinci tip Bessel fonksiyonu ile verilir (tüm  $k$ 'lar için):

$$R_h(n) = E\{h[n+k]h[k]^*\} = J_0(w_d n). \quad (3.16)$$

Burada  $w_d$ , paket süresine düzgelenmiş azami Doppler frekansını gösterir:  $w_d = 2\pi f_d T_p$ .  $f_d$  ise azami Doppler frekansıdır ve  $f_d = v_m/\lambda$  olarak tanımlanır. Azami Doppler frekansı mobil istasyonlar arası görece  $v_m$  hızına ve  $\lambda$  taşıyıcı dalga boyuna bağlıdır.

Ağdaki düğümlerin görece hızlarına bağlı olarak tecrübe ettikleri kısa dönem sönmüleme farklılaşabilir. Bu değişim düzgelenmiş Doppler frekansı ile kontrol edilir. Düğümlerin görece hızları arttıkça, aralarındaki kanalın değişim hızı artarken zaman ilintisi azalacaktır. Bir noktadan sonra düğümler arası kanal bağımsız hale gelebilir. Bir başka deyişle, paketten pakete bağımsız kanal etkileri görülür. Yavaş değişen kanal, ağdaki düğümlerin nispeten durağan kaldıkları bir durumu ifade eder. Böyle bir senaryoda kanalın zaman ilintisi yüksektir.



Şekil 3.2. Kanal katsayılarının zamandaki ilintisi. Taşıyıcı frekansı  $f_c = 2$  GHz alınmıştır.

Örnek olarak, Şekil 3.2'de, iki farklı paket süresi için ( $T_p = 10 \mu s$  ve  $T_p = 100 \mu s$ ) farklı görece hız değerlerine göre paketler arasındaki ilinti katsayısının değişimi görülebilir. Burada, taşıyıcı frekansı  $f_c = 2$  GHz alınmıştır. Dikkat edilirse, mobil istasyonun hızı arttıkça, kanal katsayılarının ilintileri azalmaktadır. Ayrıca paket süresi azaldıkça da kanal ilintisi artmakta ve kanal durağanlaşmaktadır.

## 4. İKİ YÖNLÜ RÖLELEME KANALI İÇİN C-NC-ARQ YÖNTEMLERİ

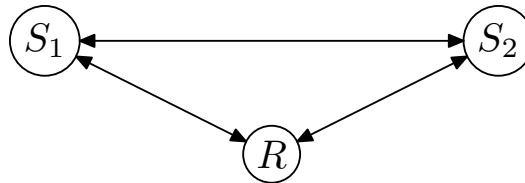
Bu bölümde iki yönlü röleleme kanal modeli, bu kanal için önerilmiş olan C-NC-ARQ yöntemleri, yöntemlerin iş çıkarma oranı analizi ile karşılaştırmalı analiz ve benzetim sonuçları yer almaktadır.

### 4.1 Sistem Modeli

Ele alınan kablosuz iletişim ağında iki kaynak ve bir röle düğümü bulunmaktadır (Şekil 4.1). Şekil 4.1’de bir verici-alıcı ikilisi arasındaki kanal bir okla gösterilmektedir. Ağdaki düğümler yarı-dupleks modda çalışmaktadır ve zaman-bölmeli çoğullama yapılmaktadır. Erişim ortamı, *zaman dilimlerine* ayrılmıştır. Kanal modeli, Bölüm 3’te verildiği gibi zamanla değişen düz sönümlenmeli kanaldır. Kanalın bir zaman diliminde sabit kaldığı, zaman dilimleri arasında değiştiği varsayılmıştır.

Kaynaklar ( $S_1$  ve  $S_2$ ) karşılıklı olarak iletişim kurmaktadır:  $S_2$ ,  $S_1$  için hedeftir;  $S_1$  de  $S_2$  için hedeftir. Kaynaklar-arası iletişim,  $S_1$  ve  $S_2$ ’nin karşılıklı olarak paketlerini göndermeleriyle başlamaktadır. Bir paketin iletiminden hemen sonra paketin hedefi tarafından dur-ve-bekle tarzı bir geribildirim yapılmaktadır. Paketin kaynak tarafından gönderilmesi ve geribildirim kaynak tarafından alınması bir zaman dilimini kapsamaktadır. Geribildirimler olumlu geribildirim (ACK) ve olumsuz geribildirim (NACK) şeklinde verilmektedir. Geribildirimlerin ağdaki tüm düğümler tarafından duyulduğu varsayılmıştır. Dolayısıyla kaynak tarafından gönderilen bir paketin zaman dilimi sonunda hedefte ve diğer düğümde başarıyla alınıp alınmadığı ağdaki tüm düğümler tarafından bilinmektedir.

Bir *tur*, her iki kaynaktan birer paketin ( $\{q_1, q_2\}$ )  $S_2$  ve  $S_1$ ’de başarıyla alınana dek geçen süreyi tanımlamaktadır. Bu süre, kaynaklar veya röle tarafından olası tekrar gönderimleri de kapsamaktadır. Dolayısıyla bir tur süresi çok sayıda zaman dilimini



Şekil 4.1. İki-yönlü röleleme kanalı: İki kaynak ve bir röleden oluşan iki-yönlü iletişim ağı.

kapsayabilir.

Bir turun  $k$ 'inci zaman diliminde başladığı varsayıldığında bu zaman diliminde  $S_1$ ,  $M$  sembolen oluşan  $\mathbf{q}_1$  paketini göndermektedir.  $S_2$  ve  $R$ 'de alınan sinyaller sırasıyla, (3.3) numaralı eşitlikte verilen sinyal modeline uygun şekilde, aşağıda verilmektedir:

$$\mathbf{y}_{s,2}[k] = \mathbf{q}_1 h_s[k] + \mathbf{w}_{s,2}[k] \quad (4.1)$$

$$\mathbf{y}_{r,1}[k] = \mathbf{q}_1 h_{r,1}[k] + \mathbf{w}_r[k]. \quad (4.2)$$

$S_1$ 'in gönderimini takiben  $S_2$ ,  $M$  sembolen oluşan  $\mathbf{q}_2$  paketini  $k + 1$ 'inci zaman diliminde göndermektedir.  $S_1$  ve  $R$ 'de alınan sinyaller, sırasıyla,

$$\mathbf{y}_{s,1}[k + 1] = \mathbf{q}_2 h_s[k + 1] + \mathbf{w}_{s,1}[k + 1] \quad (4.3)$$

$$\mathbf{y}_{r,2}[k + 1] = \mathbf{q}_2 h_{r,2}[k + 1] + \mathbf{w}_r[k + 1] \quad (4.4)$$

şeklinde gösterilir. Burada  $\{h_s[k], h_{r,1}[k], h_{r,2}[k]\}$  zamanla değişen ve birbirinden bağımsız sönümlenmeli kanal katsayılarını göstermektedir ve Bölüm 3'te gösterildiği gibi karmaşık Gauss dağılımlıdır:  $h_s(k) \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{h,s}^2)$ ,  $h_{r,1}(k) \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{h,r,1}^2)$ ,  $h_{r,2}(k) \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{h,r,2}^2)$ .  $\{\mathbf{w}_{s,1}(k), \mathbf{w}_{s,2}(k), \mathbf{w}_r(k)\}$  ise toplanır Gauss gürültüsünü göstermektedir:  $\mathbf{w}_{s,1}(k) \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma_{w,s,1}^2 \mathbf{I}_M)$ ,  $\mathbf{w}_{s,2}(k) \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma_{w,s,2}^2 \mathbf{I}_M)$ ,  $\mathbf{w}_r(k) \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma_{w,r}^2 \mathbf{I}_M)$ .

Bölüm 3'te verildiği gibi kaynaklar-arası kanalın ( $S_1 - S_2$ ) ortalama kesinti olasılığı

$$\bar{\lambda}_s = 1 - \exp\left(-\frac{1}{F_s}\right) \quad (4.5)$$

şeklinde bulunur.  $F_s$ , kaynaklar-arası kanalın sönümlenme payıdır. Benzer şekilde röle kanallarının ( $S_1 - R$  ve  $S_2 - R$ ) sönümlenme payları  $F_{r,1}$  ve  $F_{r,2}$  şeklinde tanımlanırsa ortalama kesinti olasılıkları da ( $i = 1, 2$  için)

$$\bar{\lambda}_{r,i} = 1 - \exp\left(-\frac{1}{F_{r,i}}\right) \quad (4.6)$$

olur.



Zamanla değişen kanalların Bölüm 3'te anlatılan Markov modeline uygun şekilde ilintili olarak değiştii varsayılmıştır. Buna göre,  $S_1 - S_2$ ,  $S_1 - R$  ve  $S_2 - R$  kanallarının geçiş olasılık matrisleri (3.9) eşitliğinde verildiği gibi, sırasıyla,  $A_s$ ,  $A_{r,1}$  ve  $A_{r,2}$  ile gösterilir. Geçiş olasılıkları ise, yine sırasıyla,  $P_{ij,s}$ ,  $P_{ij,r,1}$  ve  $P_{ij,r,2}$  ile gösterilmektedir. Burada verilen geçiş olasılıkları; (3.10), (3.11), (3.12) ve (3.13)'te tanımlanan geçiş olasılığı ifadelerinde, ilgili kanalın sönümlenme payı ile (4.5) ve (4.6)'da verilen kesinti olasılıkları kullanılarak bulunabilir. Kanalların ilinti fonksiyonunun da (3.16) eşitliğinde verilen Jakes modeline [70] uyduğu varsayılmıştır.

## 4.2 C-NC-ARQ Yöntemlerinin İşleyişi

Yeni bir turun başlangıcında, sistemin *gönderim fazında* olduğu kabul edilir. Gönderim fazı iki zaman dilimini kapsamaktadır: İlk zaman diliminde  $S_1$ ,  $q_1$  paketini; ikinci zaman diliminde ise  $S_2$ ,  $q_2$  paketini ilk kez göndermektedir. Kaynaklar-arası kanal bu iki zaman diliminde kesintiye uğramadığı takdirde tur başarıyla tamamlanmış olur ve sistem tekrar gönderim fazından iki yeni paketin gönderimiyle başlar. Öte yandan, en az bir paketin gönderimi başarısız olursa sistem *tekrar gönderim fazına* girer. Tekrar gönderim fazında hangi paketin kim tarafından gönderileceği Çizelge 4.2 ile verilen ve bu bölümün devamında açıklanacak olan *C-NC-ARQ Tablosu* ismi verilen kurallar bütünü tarafından belirlenmektedir. Tekrar gönderim fazı her iki paket de hedefleri tarafından başarıyla alınana dek sürecektir. Tekrar gönderim fazının sonunda yeni bir tur yine gönderim fazında başlamaktadır. Tekrar gönderim fazında röle kayıp paketlerden en az birini alması halinde kaynak ile işbirliği yaparak sadece başarısız paketi veya başarısız paketlerden oluşan ağ-kodlanmış paketi göndermektedir.

Sistemde sinyalleşme için merkezi bir koordinasyonun olmadığı varsayılmıştır. Dağıtık koordinasyon, bir gönderim sonunda paketin başarı durumunu göstermek için hedef istasyon tarafından gönderilen ve ağdaki diğer düğümler tarafından duyulan ACK/NACK ile sağlanmaktadır. Gönderimlerin başarı/başarısızlık durumları, ağın ARQ durumlarını ve dolayısıyla sonraki gönderimin ne şeklide yapılacağını belirlemektedir. C-NC-ARQ Tablosu,  $q_1$  ve  $q_2$  paketlerinin  $S_1$ ,  $S_2$  ve  $R$  düğümlerindeki durumuna bağlı olarak hangi paketin hangi düğüm tarafından gönderileceğini göstermektedir. Bu tablonun her bir satırı, ağdaki bir ARQ durumunu belirtir. Ağdaki tüm düğümlerde mevcut olan tablo, her gönderim sonunda gelen ACK/NACK'e göre merkezi bir koordinasyona gerek duymaksızın güncellenir.  $q_1$  ve  $q_2$  paketlerinin ba-

şarı/başarısızlık durumları ağın durum modeli ile gösterilmektedir.

Ağın durum modeli iki farklı durum değişkenini içermektedir: Kanal durum değişkenleri ve ARQ durum değişkenleri.  $\mathbf{s}_c[k]$  tarafından temsil edilen kanal durumu, kanalların  $k$ 'inci zaman dilimi boyunca kesintide olup olmadığını göstermektedir. Bu vektör değişkenin kaynaklar-arası kanal ve röle kanallarının durumlarına karşılık gelen üç elemanı mevcuttur:

$$\mathbf{s}_c[k] = \begin{bmatrix} s_c(k, 1) & s_c(k, 2) & s_c(k, 3) \end{bmatrix}. \quad (4.7)$$

Burada  $s_c(k, 1)$ ,  $s_c(k, 2)$  ve  $s_c(k, 3)$ , sırasıyla,  $(S_1 - R)$ ,  $(S_2 - R)$ ,  $(S_1 - S_2)$  kanallarının  $k$ 'inci zaman dilimindeki durumlarını gösterir.

ARQ durum değişkeni  $\mathbf{s}_p[k]$ ,  $\mathbf{q}_1$  ve  $\mathbf{q}_2$  paketlerinin  $k-1$ 'inci zaman dilimi sonunda, sırasıyla,  $S_2$  ve  $S_1$ 'deki başarı/başarısızlık durumlarını göstermektedir:

$$\mathbf{s}_p[k] = \begin{bmatrix} s_p(k, 1) & s_p(k, 2) \end{bmatrix}. \quad (4.8)$$

Bir başka ifadeyle,  $\mathbf{s}_p[k] = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1 @ S_2 & \mathbf{q}_2 @ S_1 \end{bmatrix}$  şeklinde yazılabilir.

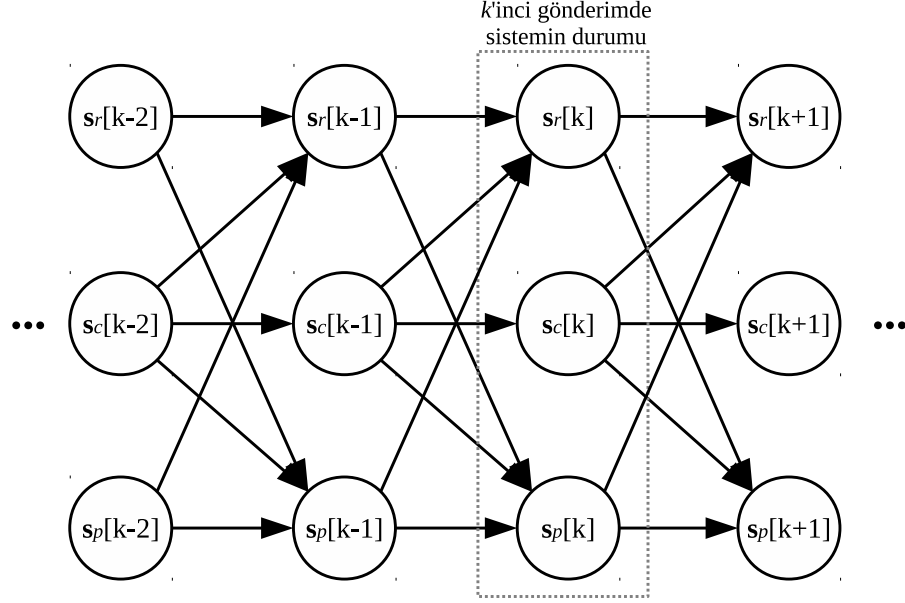
Benzer şekilde, diğer ARQ durum değişkeni  $\mathbf{s}_r[k]$  ise  $\mathbf{q}_1$  ve  $\mathbf{q}_2$  paketlerinin  $k-1$ 'inci zaman dilimi sonunda röledeki başarı/başarısızlık durumunu gösterir:

$$\mathbf{s}_r[k] = \begin{bmatrix} s_r(k, 1) & s_r(k, 2) \end{bmatrix}. \quad (4.9)$$

Bu değişken vektör de, yukarıdakine benzer şekilde,  $\mathbf{s}_r[k] = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1 @ R & \mathbf{q}_2 @ R \end{bmatrix}$  şeklinde gösterilebilir.

Kanal ve ARQ durum değişkenleri, Çizelge 4.1'de açıklandığı şekilde kesinti/başarısızlık anlamına gelen 0 veya kesintisizlik/başarı anlamına gelen 1 değerlerinden birini alabilirler. Kanal durum değişkenleri (4.5) ve (4.6) ifadelerinde verilen geçiş olasılıklarına uygun şekilde kesinti/kesintisizlik durumları geçiş yaparken, ARQ durum değişkenleri de kanal durum değişkenlerine bağlı olarak başarı/başarısızlık durumları arasında geçiş yapar.

Şekil 4.2, durum değişkenlerinin zamana bağlı olarak birbirlerine bağlılıklarını göstermektedir. Bu gösterimde,  $a$  değişkeninden  $b$  değişkenine çizilen bir ok,  $b$ 'nin  $a$ 'ya

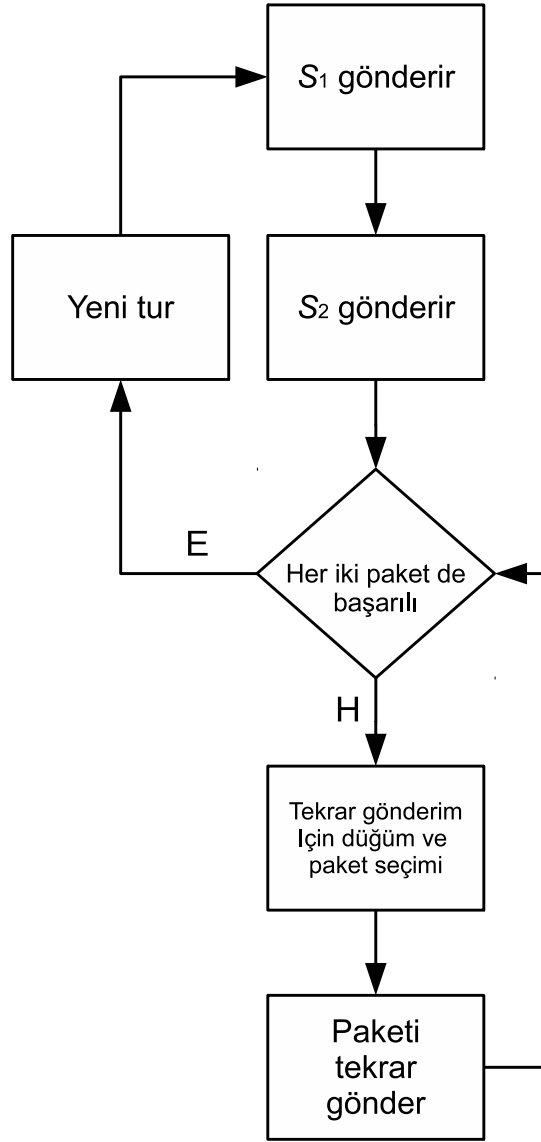


Şekil 4.2. C-NC-ARQ zamana bağlı durum modeli. Durum değişkenlerinin zamana bağlı değişen değerlerinin birbirleriyle olan ilişkisini göstermektedir.

bağımlılığını belirtir. Şekilde gösterildiği gibi, ARQ durum değişkenleri  $s_p[k]$  ve  $s_r[k]$ , bir önceki değerlerine ( $s_p[k-1]$  ve  $s_r[k-1]$ ) ve ayrıca bir önceki kanal durum değişkenine ( $s_c[k-1]$ ) bağımlıdır.

Örneğin,  $k-1$ 'inci zaman diliminde  $S_1$  gönderim yapıyorsa,  $q_2$  ile ilişkili ARQ durum değişkenleri zaman dilimi sonunda aynı kalırken ( $s_p(k, 2) = s_p(k-1, 2)$  ve  $s_r(k, 2) = s_r(k-1, 2)$ ),  $q_1$  ile ilişkili ARQ durum değişkenleri, kanal durumlarına bağlı olarak değişir:  $s_p(k, 1) = s_c(k-1, 3)$  ve  $s_r(k, 1) = s_c(k-1, 1)$ . Ayrıca dikkat edilmesi gereken nokta, yeni bir tur başladığında yeni paketler gönderileceğinden  $s_p$  ve  $s_r$  ARQ durum değişkenleri sıfırlanmaktadır.

C-NC-ARQ için akış şeması Şekil 4.3 ile gösterilmektedir. Şemadan görüleceği gibi, bir turun bitişi her iki kaynaktan birer paketin başarıyla alınmasına ( $q_1$  paketinin  $S_2$  tarafından,  $q_2$  paketinin  $S_1$  tarafından) bağlıdır. Gönderim fazının sonunda en az bir paketin başarısız olması halinde başlayan tekrar gönderim fazında, C-NC-ARQ Tablosu'na göre belirlenen ve seçilen stratejiye bağlı olarak değişecek olan tekrar gönderici düğümü ile tekrar gönderilecek paket seçimi yapılmaktadır. Bu döngü, tur başarıya ulaşana yani her iki paket de hedeflerinde başarıyla alınana dek devam edecektir. Tekrar gönderim fazı için üç yeni strateji önerilmiştir: röle tabanlı ağ kodlamalı tekrar gönderim (RT-AK), sıralı ağ kodlamalı tekrar gönderim (ST-AK) ve kanal



Şekil 4.3. C-NC-ARQ akış şeması

Durum değişkeni	Değer	Açıklama
$s_c(k, i)$	0	Kanal- $i$ , $k$ 'inci zaman diliminde kesintide
	1	Kanal- $i$ , $k$ 'inci zaman diliminde kesintide değil
$s_p(k, i)$	0	$k - 1$ 'inci zaman dilimi sonunda paket $\mathbf{q}_i$ , $S_j$ 'de başarıyla alınamadı
	1	$k - 1$ 'inci zaman dilimi sonunda paket $\mathbf{q}_i$ , $S_j$ 'de başarıyla alındı
$s_r(k, i)$	0	$k - 1$ 'inci zaman dilimi sonunda paket $\mathbf{q}_i$ , $R$ 'de başarıyla alınamadı
	1	$k - 1$ 'inci zaman dilimi sonunda paket $\mathbf{q}_i$ , $R$ 'de başarıyla alındı

Çizelge 4.1. Kanal ( $\mathbf{s}_c$ ) ve ARQ ( $\mathbf{s}_p$ ,  $\mathbf{s}_r$ ) durum değişkenleri.  $j \in \{1, 2\}, j \neq i$ .

bilgisine dayalı ağ kodlamalı tekrar gönderim (KT-AK). Önerilen bu stratejilerin ARQ durum değişkenlerine göre nasıl işleyeceği Çizelge 4.2'de verilen C-NC-ARQ Tablosu'nda özetlenmiştir. Bu tabloda ağ kodlamalı sütununda yer alan işlemler önerilen stratejilerin izleyeceği yolu, ağ kodlamasız sütununda yer alan işlemler ise karşılaştırma amacıyla kullanılacak olan ve önerilen stratejilerden farklı olarak ağ kodlaması yapmayan işbirlikli ARQ yöntemlerinin izleyeceği yolu göstermektedir. Bu yöntemlere örnek vermek gerekirse, [8] (Protocol I), [17] ve [19] ağ kodlamasız röle tabanlı tekrar gönderim yöntemiyle benzerlik gösterirken, [6] ve [8] (Protocol II), kanal bilgisine dayalı ağ kodlamasız tekrar gönderime yöntemiyle uyumaktadır.

#### 4.2.1 Röle Tabanlı Ağ Kodlamalı Tekrar Gönderim (RT-AK)

Röle tabanlı tekrar gönderim stratejisine göre tekrar gönderim, paketi başarılı aldığı takdirde, sürekli olarak röle tarafından gerçekleştirilmektedir. Çizelge 4.2'de, farklı  $\mathbf{s}_p$  ve  $\mathbf{s}_r$  durumları için tekrar gönderimi hangi düğümün yapacağı ve hangi paketi göndereceği verilmiştir. Röle tabanlı stratejide, tekrar gönderici ( $C$  düğümü) tercihi sürekli olarak röleden yana kullanılmaktadır ( $C = R$ ). Örnek olarak Çizelge 4.2'de,  $\mathbf{s}_p[k] = [0 \ 0]$  ve  $\mathbf{s}_r[k] = [1 \ 0]$  olduğu durumda,  $\mathbf{q}_1$  paketinin tekrar gönderimini  $S_1$  yerine  $R$  yapmaktadır. Bir başka deyişle, röle kesintiye uğramadığı durumlarda devreye girerek tekrar gönderim görevini üstlenmektedir. Ağ kodlamalı röle tabanlı stratejinin (RT-AK) ağ kodlamasız yöntemden farkı, her iki kaynakta kesintiye uğra-

$k$ 'inci gönderim öncesindeki durum				$k$ 'inci gönderim	
$s_p(k, 1)$	$s_p(k, 2)$	$s_r(k, 1)$	$s_r(k, 2)$	Ağ kodlamalı	Ağ Kodlamasız
0	0	0	0	$S_1 \rightarrow \mathbf{q}_1$	$S_1 \rightarrow \mathbf{q}_1$
0	0	0	1	$S_1 \rightarrow \mathbf{q}_1$	$S_1 \rightarrow \mathbf{q}_1$
0	0	1	0	$C \rightarrow \mathbf{q}_1$	$C \rightarrow \mathbf{q}_1$
0	0	1	1	$R \rightarrow \mathbf{q}_1 \oplus \mathbf{q}_2$	$C \rightarrow \mathbf{q}_1$
0	1	0	0	$S_1 \rightarrow \mathbf{q}_1$	$S_1 \rightarrow \mathbf{q}_1$
0	1	0	1	$S_1 \rightarrow \mathbf{q}_1$	$S_1 \rightarrow \mathbf{q}_1$
0	1	1	0	$C \rightarrow \mathbf{q}_1$	$C \rightarrow \mathbf{q}_1$
0	1	1	1	$C \rightarrow \mathbf{q}_1$	$C \rightarrow \mathbf{q}_1$
1	0	0	0	$S_2 \rightarrow \mathbf{q}_2$	$S_2 \rightarrow \mathbf{q}_2$
1	0	0	1	$C \rightarrow \mathbf{q}_2$	$C \rightarrow \mathbf{q}_2$
1	0	1	0	$S_2 \rightarrow \mathbf{q}_2$	$S_2 \rightarrow \mathbf{q}_2$
1	0	1	1	$C \rightarrow \mathbf{q}_2$	$C \rightarrow \mathbf{q}_2$

Çizelge 4.2. C-NC-ARQ Tablosu. C tekrar gönderici düğümü stratejiye göre seçilmektedir.

mış iki paketi başarılı bir şekilde alan rölenin ( $\mathbf{s}_r[k] = [1 \ 1]$ ), iki paketi ağ kodlaması yoluyla birleştirerek bir seferde tekrar gönderimi gerçekleştirilmesi dolayısıyla tekrar gönderim sayısını azaltmasıdır. Bu stratejinin, röle kanallarının sönümlenme payının kaynaklar-arası kanaldan daha iyi olduğu durumda iş çıkarma oranı ve paket gecikmesi anlamında iyi sonuç vermesi mümkündür. Ancak kanalların yüksek ilintili olarak blok sönümlenmeye maruz kalması durumunda bu strateji başarısız olabilir zira röle kanalları uzun süreli olarak kesintiye uğrayabilir. Bu problemi aşmak için tekrar gönderici düğümünün periyodik olarak değiştirilmesi kesintide olmayan bir kanal bulmak açısından faydalı olabilir. Bu amaçla sıralı ağ kodlamalı tekrar gönderim stratejisi önerilmiştir.

#### 4.2.2 Sıralı Ağ Kodlamalı Tekrar Gönderim (ST-AK)

Sıralı tekrar gönderim stratejisinin röle tabanlı stratejiden farkı, tekrar gönderimin röle ve başarısız paketin sahibi olan kaynak düğüm tarafından sırayla gerçekleştirilmektedir. Örnek olarak Çizelge 4.2'de,  $\mathbf{s}_p[k] = [0 \ 0]$  ve  $\mathbf{s}_r[k] = [1 \ 0]$  durumu oluştuğunda tekrar gönderim röle tarafından ( $C = R$ ), tekrar gönderim neticesinde

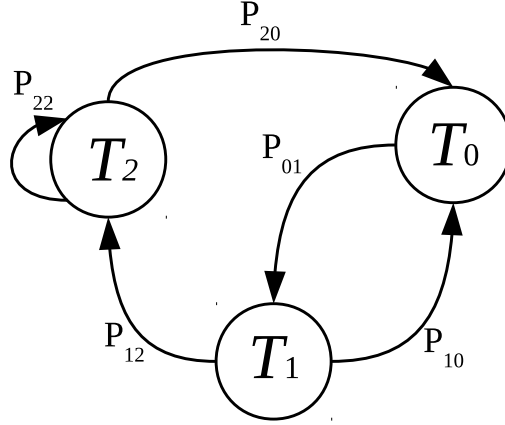
durum değişmezse ( $\mathbf{s}_p[k+1] = [0 \ 0]$  ve  $\mathbf{s}_r[k+1] = [1 \ 0]$ ) bu sefer paketin sahibi kaynak tarafından ( $C = S_1$ ) tekrar gönderim yapılmaktadır. Bu strateji kanal ilintisinin yüksek olduğu durumda iyi sonuç verebilir. Zira tekrar göndericiyi sırayla değiştirmek tekrar gönderilen paketleri zamanda serpiştirme yoluyla blok sönmümeden kurtarabilir. Bu strateji röle tabanlı ağ kodlamalı stratejiye göre daha karmaşıktır. Çünkü bir önceki gönderimde tekrar gönderimi hangi düğümün yaptığı bilgisinin tüm düğümlerde tutulmasını gerektirir. Sıralı ağ kodlamalı tekrar gönderim stratejisinin performansını daha da iyileştirmek mümkündür. Dikkat edilirse bu stratejide, kanal ile ilgili bir geribildirim almaksızın tekrar gönderici düğümü seçilmektedir. Ancak örneğin  $k$ 'inci zaman dilimi başında, ağdaki tüm düğümler  $k - 1$ 'inci zaman dilimindeki kanal durumları hakkında C-NC-ARQ Tablosu'nda özetlenen ACK/NACK'den dolayı bilgi sahibi olurlar. Bu bilgiyi kullanarak tekrar gönderici seçimini iyileştirmek mümkün olabilir. Kanal bilgisine dayalı ağ kodlamalı tekrar gönderim, bu prensibe göre çalışmaktadır.

#### 4.2.3 Kanal Bilgisine Dayalı Ağ Kodlamalı Tekrar Gönderim (KT-AK)

Tekrar gönderici düğüm seçimi  $\mathbf{s}_c$  değişkeni tarafından kontrol edilen bir önceki kanal durumuna bakarak yapılır. Örneğin Çizelge 4.2'de,  $\mathbf{s}_p[k] = [0 \ 0]$  ve  $\mathbf{s}_r[k] = [1 \ 0]$  durumu oluştuğunda,  $k$ 'inci gönderimde  $\mathbf{q}_1$  paketinin tekrar gönderimi yapılırken kaynaklar-arası kanalın  $k - 1$ 'inci gönderimde kesintiye uğramayıp röle kanalının uğraması halinde ( $s_c(k - 1, 2) = 0$ ,  $s_c(k - 1, 3) = 1$ ) tekrar gönderim kaynak tarafından ( $C = S_1$ ), aksi durumda ise röle tarafından ( $C = R$ ) gerçekleştirilmektedir. Bu strateji, kanallara ait ön bilgi olmaması durumunda iyi performans gösterebilir. Zira yüksek hızda değişen kanallarda en iyi tekrar gönderici seçimi anlık olarak değişebilmektedir. Bu durumda yapılabilecek en iyi hamle bir önceki kanal durumuna bağlı olarak tekrar göndericiyi belirlemek olmalıdır.

#### 4.3 İş Çıkarma Oranı Analizi

C-NC-ARQ stratejilerinin iş çıkarma oranı analizi ağın durumlarına göre yapılmaktadır. Ağda iki temel durum vardır: gönderim durumu ve tekrar gönderim durumu. Yeni bir turun başlangıcını gösteren gönderim durumu iki farklı durum tarafından temsil edilmektedir:  $S_1$ 'in  $\mathbf{q}_1$  paketini ilk kez gönderimini gösteren  $T_0$  durumu ile  $S_2$ 'nin  $\mathbf{q}_2$  paketini ilk kez gönderimini gösteren  $T_1$  durumu. Bu paketlerin en az birinin



Şekil 4.4. İki-yönlü röleme kanalında C-NC-ARQ için Markov modeli

hedeflerinde alınamaması durumunda ağ,  $T_2$  tarafından temsil edilen tekrar gönderim durumuna girmektedir. Önceki bölümde önerilen C-NC-ARQ stratejileri, ağın  $T_2$  durumundaki davranışına göre farklılık göstermektedir. Ağın durumu, ARQ durum değişkenleri  $\mathbf{s}_p$  ve  $\mathbf{s}_r$  ile kanal durum değişkeni  $\mathbf{s}_c$ 'ye bağlı olarak değişmektedir. Bu durum değişkenleri Şekil 4.2'de verilen Markov modeline uyduğu için ağın durumları da zamanda Markov modeline uyar.

$Z(k)$ ,  $k - 1$ 'inci zaman dilimi sonunda C-NC-ARQ durumunu göstermektedir.  $Z(k) = T_0$ ,  $k - 1$ 'inci zaman dilimi sonunda turun başarıyla bittiğini ve  $k$ 'inci zaman diliminde  $S_1$ 'in  $\mathbf{q}_1$  paketini gönderdiğini;  $Z(k) = T_1$ ,  $k - 1$ 'inci zaman dilimi sonunda  $S_1$ 'in  $\mathbf{q}_1$  paketini ve  $k$ 'inci zaman diliminde  $S_2$ 'in  $\mathbf{q}_2$  paketini gönderdiğini belirtmektedir. C-NC-ARQ stratejilerindeki işbirliğinin amacı tekrar gönderim sürecine röleyi dahil etmek olduğu için kaynaklardan gönderilen paketlerin ilk gönderimleri bitmeden tekrar gönderim süreci başlamamaktadır. Dolayısıyla  $T_0$  durumundan tek olası geçişler  $T_1$  durumunadır.

$Z(k) = T_1$  durumundan sonra her iki paketin de başarılı olması halinde sistem tekrar  $Z(k + 1) = T_0$  durumuna geri döner. Aksi durumda,  $Z(k + 1) = T_2$  durumuna geçiş yapılır:

$$Z(k) = \begin{cases} T_0, & \mathbf{s}_p[k] = [1 \ 1], \\ T_1, & \mathbf{s}_p[k - 1] = [1 \ 1], \\ T_2, & \text{diğer durumlar.} \end{cases} \quad (4.10)$$



$Z(k)$  durumlarının geçişleri Şekil 4.4'te verilen Markov modeli ile gösterilmektedir. Burada  $P_{AB}$ ,  $T_A$  durumundan  $T_B$  durumuna geçiş olasılığıdır. Bu Markov modelinin geçiş olasılık matrisi aşağıda verilmiştir:

$$\Sigma = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ P_{10} & 0 & P_{12} \\ P_{20} & 0 & P_{22} \end{bmatrix}. \quad (4.11)$$

Kararlı-durum olasılıkları  $\pi = [\pi_0 \quad \pi_1 \quad \pi_2]$  ise aşağıdaki eşitlikten bulunmaktadır:

$$\pi \Sigma = \pi. \quad (4.12)$$

Yeni bir turun başlangıcını  $T_0$  durumu belirttiği için sistemin  $T_0$  durumuna her geçişi,  $\mathbf{q}_1$  ve  $\mathbf{q}_2$  paketlerinin, sırasıyla,  $S_2$  ve  $S_1$  düğümlerinde başarıyla alındığı anlamına gelir. Kararlı-durumda, başarıyla alınmış paketlerin ortalama sayısının toplam gönderim sayısına oranı ortalama iş çıkarma oranını verir. Bu parametre ise  $T_0$  durumunun kararlı-durum olasılığına eşittir. Dolayısıyla ortalama iş çıkarma oranı

$$\eta = 2\pi_0 \quad (4.13)$$

şeklinde yazılır. İş çıkarma oranındaki 2 ifadesi, turun bitiminde iki başarılı paket kaynaklarda alındığı için yer almaktadır.  $\pi_0$  olasılığı turun kararlı-durumdaki başarı olasılığını verdiği için, kararlı-durumdaki iş çıkarma oranı da  $2\pi_0$  olur. İş çıkarma oranının hesaplanabilmesi için  $\Sigma$  geçiş olasılık matrisinin elemanlarının hesaplanması gerekmektedir.  $\Sigma$  matrisinin elemanları bir önceki bölümde anlatılan CNC-ARQ stratejilerine bağlı olarak farklılık göstermektedir.

İş çıkarma oranı analizinde, [7]'de verilen yöntem esas alınmıştır. Bu çalışmada, önerilen tekrar gönderim yönteminin davranışını açıklayan analitik modeli oluşturmak için Markov sürecinden yararlanılmıştır. Bu tez çalışmasında da benzer metodoloji izlenerek önerilen C-NC-ARQ stratejilerinin analitik modelin oluşturmak için üç-durumlu Markov süreci oluşturulmuş ve sistemin iş çıkarma oranı elde edilmiştir.

$Z(k)$  değişkeni; ARQ durum değişkenleri  $\mathbf{s}_p$  ve  $\mathbf{s}_r$  ile kanal durum değişkeni  $\mathbf{s}_c$ 'ye bağlı olarak Çizelge 4.2'de verilen C-NC-ARQ Tablosu'na göre  $T_0$ ,  $T_1$  ve  $T_2$  durumları arasında geçiş yapmaktadır.

Şekil 4.4'te verilen C-NC-ARQ durum modeli, sistemin genel operasyonunu anlamak açısından yardımcı olmaktadır. Ancak bu gösterim şekli ARQ durum değişkenleri ile kanal durum değişkenini gizlemektedir. Bu değişkenlerin tüm olası konfigürasyonları Şekil 4.4'teki  $T_0$ ,  $T_1$  ve  $T_2$  durumlarında gömülü haldedir. Kanal ve ARQ durum değişkenlerinin farklı konfigürasyonları için  $T_0$ ,  $T_1$  ve  $T_2$  durumlarına ait *alt durumların* tanımlanması sistemin analizini kolaylaştırmaktadır. Sistemin ana durumları  $T_0$ ,  $T_1$  ve  $T_2$ 'nin alt durumları sırasıyla,  $\mathbf{W}_0$ ,  $\mathbf{W}_1$  ve  $\mathbf{W}_2$  alt durum vektörleriyle gösterilmektedir. Tüm bu alt durum vektörlerindeki alt durum değişkenleri,  $W(k)$  değişkeni ile temsil edilen yeni bir Markov modeli oluşturmaktadır.

$T_0$  durumunun alt durumlarını  $\mathbf{W}_0$  vektörü içermektedir:

$$\mathbf{W}_0 = \left[ W_0(0) \quad W_0(1) \quad \cdots \quad W_0(7) \right]. \quad (4.14)$$

$k$ 'inci zaman dilimi içinde  $W(k) = W_0(i)$  oluşması, bu zaman diliminin yeni bir turun başlangıcı olduğunu göstermektedir.  $i \in \{0, \dots, 7\}$  ise  $k$ 'inci zaman dilimi için kanal durum indeksini belirtir. Bu indeks, ikili  $[s_c(k, 1), s_c(k, 2), s_c(k, 3)]$  vektörünün onluk karşılığıdır. Örneğin ilk gönderimin  $k$ 'inci zaman diliminde yapıldığı varsayılırsa  $[s_c(k, 1), s_c(k, 2), s_c(k, 3)] = 101$  kanal durumlarının oluşması  $W(k) = W_0(5)$  alt durumuna karşılık gelir.

$T_1$  durumunun alt durumları,  $a \in \{0, \dots, 3\}$  ve  $i \in \{0, \dots, 7\}$  için  $W_1(a, j)$  ile gösterilmektedir. Burada  $a$ ,  $[s_p(k, 1), s_r(k, 1)]$  ikili sayısının onluk karşılığı iken  $i$  ise  $k$ 'inci zaman dilimindeki kanal durum indeksini göstermektedir.  $T_1$ 'in alt durumlarını oluştururken  $[s_p(k, 1), s_r(k, 1)]$  değişkenlerini dahil etmenin sebebi şöyle açıklanabilir: Sistem  $k - 1$ 'inci zaman diliminin başında  $T_0$  durumunda iken  $S_1$  gönderim yaptığından ARQ durum değişkenleri  $s_p(k, 2) = s_p(k - 1, 2)$  ve  $s_r(k, 2) = s_r(k - 1, 2)$  değerlerini korurken  $s_p(k, 1)$  ve  $s_r(k, 1)$  değişkenleri sırasıyla,  $s_c(k - 1, 3)$  ve  $s_c(k - 1, 1)$  kanal durum değişkenlerine bağlı olarak değişmektedir:  $s_p(k, 1) = s_c(k - 1, 3)$ ,  $s_r(k, 1) = s_c(k - 1, 1)$ .  $T_1$  ile ilişkili 32 uzunluğundaki alt durum vektörü aşağıda verilmiştir:

$$\mathbf{W}_1 = \left[ W_1(0, 0) \quad \cdots \quad W_1(0, 7) \quad \cdots \quad W_1(3, 7) \right]. \quad (4.15)$$

Tekrar gönderim durumu olan  $T_2$ 'nin alt durumları hangi C-NC-ARQ stratejisinin kullanıldığına bağlıdır. Röle tabanlı strateji en az alt duruma sahip en yalın olanıdır.

Bundan sonraki kısımda önce röle tabanlı strateji için  $T_2$ 'nin alt durumları açıklanacak ve iş çıkarma oranı bu stratejiye göre çıkarılacaktır. Daha sonra diğer iki strateji için çıkarımların nasıl değiştiği açıklanacaktır.

RT-AK için  $T_2$ 'nin alt durumları  $W_2(b, i)$  ile temsil edilmektedir. Burada  $b \in \{0, \dots, 11\}$ ,  $[s_p(k, 1), s_p(k, 2), s_r(k, 1), s_r(k, 2)]$  ikili vektörünün onluk karşılığı;  $i \in \{0, \dots, 7\}$  ise  $k$ 'inci zaman dilimindeki kanal indeksidir. Dikkat edilirse  $b$  değişkeni 11'den büyük değer almamaktadır. Bunun sebebi,  $k - 1$ 'inci zaman dilimi sonunda  $s_p(k, 1) = s_p(k, 2) = 1$  olduğunda  $k$ 'inci zaman diliminin yeni bir tur ile başlamasıdır. Bundan sonraki kısımda bu alt durumlar arası geçişler ve olasılıklarının nasıl bulunacağı anlatılmıştır. Alt durumlar arası tüm olası geçişlerin tabloları ise Bölüm 6'de verilmiştir.

#### 4.3.1 $W_0(i)$ Alt durumlarından Geçişler

Yeni bir tur başladıktan sonra  $T_0$  durumunu  $T_1$  takip ettiği için  $W_0(i)$  alt durumundan tek olası geçişler  $W_1(a, j)$  ( $i, j \in \{0, \dots, 7\}$ ,  $a \in \{0, \dots, 3\}$ ) alt durumunadır.  $k$ 'inci zaman dilimindeki kanal durumu  $i$ ,  $k$ 'inci zaman dilimi sonunda  $S_1$  tarafından gönderilen  $\mathbf{q}_1$  paketinin  $S_2$  ve  $R$ 'de başarıyla alınıp alınmadığını dolayısıyla  $[s_p(k + 1, 1), s_r(k + 1, 1)]$  değişkenlerini ve  $a$  indeksini belirlemektedir. Örnek olarak, kanal indeksi  $i$ 'ye karşılık gelen  $a$  indeksi  $a'$  olarak gösterilsin. Sonraki zaman dilimindeki kanal durum indeksi  $j$ ,  $\{0, \dots, 7\}$  değerlerinden herhangi birini alabilmektedir. Kanal durumu  $i$ 'den kanal durumu  $j$ 'ye geçiş  $p_c(i, j)$  olasılığı ile gösterilmektedir. Bu geçiş olasılığı  $S_1 - R$ ,  $S_2 - R$ ,  $S_1 - S_2$  kanalları birbirinden bağımsız olduğu için her bir kanalın ayrı ayrı geçiş olasılıkları çarpımına eşittir. Örneğin kanal durumu  $i = 2$ 'den  $j = 7$ 'ye geçme olasılığı

$$\begin{aligned}
 p_c(2, 7) &= Pr\{[s_c(k, 1), s_c(k, 2), s_c(k, 3)] = [010] \\
 &\quad \rightarrow [s_c(k + 1, 1), s_c(k + 1, 2), s_c(k + 1, 3)] = [111]\} \\
 &= P_{01,r,1} P_{11,r,2} P_{01,s}.
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

şekilde ifade edilir. Burada geçen  $P_{01,r,1}$ ,  $P_{11,r,2}$  ve  $P_{01,s}$  geçiş olasılıkları Bölüm 4.1'de tanımlanmıştır. Dolayısıyla  $W_0(i)$ 'den  $W_1(a, j)$ 'ye geçiş olasılığı aşağıdaki şekilde ta-

nımlanır:

$$Pr\{W_0(i) \rightarrow W_1(a, j)\} = \begin{cases} p_c(i, j), & a = a', \\ 0, & \text{aksi takdirde.} \end{cases} \quad (4.17)$$

#### 4.3.2 $W_1(a, i)$ Alt durumlarından Geçişler

$W(k) = W_1(a, i)$  alt durumlarından  $W_0$  veya  $W_2$  alt durumlarına geçiş olabilir.  $W(k+1) = W_0(j)$  alt durumuna geçiş,  $\mathbf{q}_1$  ve  $\mathbf{q}_2$  paketlerinin tekrar göndericiye ihtiyaç duymaksızın ilk gönderimlerinde başarıyla hedeflere ulaştığını ve  $k+1$ 'inci gönderimin yeni bir turla başlayacağını belirtir. Burada  $a$  ve  $i$  indeksleri ( $k$ 'inci zaman dilimindeki  $s_p(k, 1)$  ve  $s_r(k, 1)$  durumları ile kanal durumu), bir sonraki durumun  $W(k+1) = W_0(j)$  olup olmayacağını belirlemektedir. Sonraki durum aşağıdaki koşul sağlandığında  $W_0(j)$  olmaktadır:

$$a : s_p(k, 1) = 1 \quad \text{ve} \quad i : s_c(k, 3) = 1. \quad (4.18)$$

Yukarıdaki gösterimde  $a : s_p(k, 1) = 1$ , “ $s_p(k, 1) = 1$  durumunu içeren tüm  $a$  değerleri” anlamına gelmektedir. Bu durumda geçiş olasılığı

$$Pr\{W_1(a, i) \rightarrow W_0(j)\} = \begin{cases} p_c(i, j), & a : s_p(k, 1) = 1 \quad \text{ve} \quad i : s_c(k, 3) = 1, \\ 0, & \text{aksi takdirde.} \end{cases} \quad (4.19)$$

olmaktadır. Eğer yukarıdaki yeni tur koşulu sağlanmazsa bir sonraki zaman diliminde ağ tekrar gönderim durumuna girer:  $W(k+1) = W_2(b', j)$ . Burada  $b'$  aşağıdaki ikili vektörün onluk karşılığıdır:

$$[\mathbf{s}_p[k+1], \mathbf{s}_r[k+1]] = [s_p(k, 1), s_c(k, 3), s_r(k, 1), s_c(k, 2)]. \quad (4.20)$$

Yukarıdaki ifadeyi sadeleştirmek için aşağıda verilen gösterim tanımlanmıştır:

$$b' = \text{dec} \{ [\mathbf{s}_p[k+1], \mathbf{s}_r[k+1]] \mid W(k) = W_1(a, i) \}. \quad (4.21)$$

Buradaki  $\text{dec}\{\mathbf{v}\}$  ifadesi,  $\mathbf{v}$  ikili vektörünün onluk karşılığı anlamına gelmektedir. Bu durumda, yukarıda verilen (4.21) numaralı eşitlik,  $k$ 'inci zaman dilimindeki durumun

$W_1(a, i)$  olduğu verildiğinde,  $s_p(k, 1)$ ,  $s_r(k, 1)$  ve  $k$ 'inci zaman dilimindeki kanal durumunun bilindiğini; sonraki zaman dilimi  $k + 1$  için  $s_p(k, 1)$  ve  $s_r(k, 1)$  durumlarının (4.20) numaralı eşitlik kullanılarak bulunabileceğini ve  $[s_p(k, 1), s_r(k, 1)]$  ikili vektörün onluk karşılığının da  $b'$  parametresi olduğunu gösterir. (4.20) numaralı eşitlik ise,  $k$ 'inci zaman diliminde  $S_2$  kaynağı  $\mathbf{q}_2$  paketini gönderdiği için  $\mathbf{q}_2$  paketi ile ilişkili  $k + 1$ 'inci zaman dilimindeki paket ve röle durumlarının, sırasıyla,  $S_1 - S_2$  ve  $S_2 - R$  kanallarının durumlarına göre değiştiğini,  $\mathbf{q}_1$  paketi ile ilişkili paket ve röle durumlarının ise  $k$ 'inci zaman dilimindeki değerleri ile aynı olduğunu belirtir. Bu durumda geçiş olasılığı aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$Pr\{W_1(a, i) \rightarrow W_2(b, j)\} = \begin{cases} p_c(i, j), & b = b', \\ 0, & \text{aksi takdirde.} \end{cases} \quad (4.22)$$

#### 4.3.3 $W_2(b, i)$ Alt durumlarından Geçişler

Tekrar gönderimi ifade eden  $W_2(b, i)$  alt durumlarından  $W_2(b, i) \rightarrow W_2(c, j)$  ve  $W_2(b, i) \rightarrow W_0(j)$  geçişleri mümkündür.  $T_0$  ve  $T_1$ 'in alt durumlarından geçişlerin aksine,  $W(k) = W_2(b, i)$  için  $k$ 'inci zaman dilimindeki gönderimin hangi düğüm tarafından yapılacağı belirlenmiş değildir. Tekrar gönderici  $b$ 'ye bağlı olarak değişmektedir. Verilen bir  $b$  için  $\mathbf{s}_p[k]$  ve  $\mathbf{s}_r[k]$  durumları bilindiğinden  $k$ 'inci gönderimde hangi paketin kim tarafından gönderileceği Çizelge 4.2'de verilen kurallara göre belirlenir.  $k$ 'inci zaman dilimindeki kanal durumu verildiğinde sonraki paket ve röle durumları da  $(\mathbf{s}_p[k + 1]$  ve  $\mathbf{s}_r[k + 1])$  bulunur. Eğer  $\mathbf{s}_p[k + 1] = [1 \ 1]$  koşulu sağlanırsa bir sonraki alt durum  $p_c(i, j)$  olasılıkla  $W(k + 1) = W_0(j)$  olur ve sistem yeni bir tura başlar.  $\mathbf{s}_p[k + 1]$  ise sıfırlanır. Öte yandan  $\mathbf{s}_p[k + 1] = [1 \ 1]$  koşulu sağlanamazsa bir sonraki zaman dilimindeki alt durum  $p_c(i, j)$  olasılıkla  $W(k + 1) = W_2(c, j)$  olur. Burada  $c = \text{dec}\{\mathbf{s}_p[k]\mathbf{s}_r[k]\}$  şeklinde tanımlanmıştır. Örnek olarak  $b = 3$  ve  $i \in \{0, \dots, 7\}$  için  $W_2(b, i)$  alt durumundan geçişler ve olasılıkları Çizelge 4.1'te verilmiştir.  $W_2(b, i)$  alt durumu için  $b = 3$  olması, paket ve röle durumlarının  $\mathbf{s}_p[k] = [0 \ 0]$ ,  $\mathbf{s}_r[k] = [1 \ 1]$  olduğu anlamına gelmektedir. Bu durumda Çizelge 4.2'de verilen kurallara göre RT-AK stratejisi için  $k$ 'inci zaman diliminde tekrar gönderici ve göndereceği paket şu şekilde belirlenir:  $R \rightarrow \mathbf{q}_1 \oplus \mathbf{q}_2$ .

$W(k)$	$k$ 'inci zaman diliminde kanal $S_1 - R, S_2 - R, S_1 - S_2$	$\mathbf{s}_p[k+1], \mathbf{s}_r[k+1]$	$W(k+1)$ $j \in \{0, \dots, 7\}$	Geçiş olasılığı
$W_2(3, 0)$	0, 0, 0	[0 0], [1 1]	$W_2(3, j)$	$p_c(0, j)$
$W_2(3, 1)$	0, 0, 1	[0 0], [1 1]	$W_2(3, j)$	$p_c(1, j)$
$W_2(3, 2)$	0, 1, 0	[0 1], [1 1]	$W_2(7, j)$	$p_c(2, j)$
$W_2(3, 3)$	0, 1, 1	[0 1], [1 1]	$W_2(7, j)$	$p_c(3, j)$
$W_2(3, 4)$	1, 0, 0	[1 0], [1 1]	$W_2(11, j)$	$p_c(4, j)$
$W_2(3, 5)$	1, 0, 1	[1 0], [1 1]	$W_2(11, j)$	$p_c(5, j)$
$W_2(3, 6)$	1, 1, 0	[1 1], [1 1]	$W_0(j)$	$p_c(6, j)$
$W_2(3, 7)$	1, 1, 1	[1 1], [1 1]	$W_0(j)$	$p_c(7, j)$

Çizelge 4.1. RT-AK stratejisi için  $W_2(3, \cdot)$  alt durumundan geçişler.

#### 4.3.4 Kararlı Durum Olasılıkları

(4.13) numaralı eşitlikte verilen ortalama iş çıkarma oranını elde etmek için yukarıda tanımlanan alt durumların kararlı durum olasılıklarına ihtiyaç duyulur. Kararlı durum olasılık dağılımını bulabilmek için tüm alt durumları içeren vektörün tanımlanması gerekir:

$$\mathbf{W}_o = \left[ \mathbf{W}_0 \quad \mathbf{W}_1 \quad \mathbf{W}_2 \right].$$

RT-AK stratejisi için tanımlanacak olan  $\mathbf{W}_o$  vektörünün uzunluğu 136 olur. Tüm alt durumların geçişlerini içeren geçiş olasılık matrisinin ( $\Lambda_o$ ) ( $m, n$ )'inci elemanı aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$\Lambda_o(m, n) = Pr\{W_o(m) \rightarrow W_o(n)\} (m, n \in \{1, \dots, 136\}). \quad (4.23)$$

$\Lambda_o$  geçiş olasılık matrisinin elemanları Bölüm 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3'te anlatıldığı şekilde bulunmaktadır. Matris ise aşağıdaki yapıya sahiptir:

$$\Lambda_o = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \Lambda_{o,01} & \mathbf{0} \\ \Lambda_{o,10} & \mathbf{0} & \Lambda_{o,12} \\ \Lambda_{o,20} & \mathbf{0} & \Lambda_{o,22} \end{bmatrix}. \quad (4.24)$$

Kararlı durum olasılık vektörü,

$$Pr\{\mathbf{W}_o\} = \left[ Pr\{\mathbf{W}_0\} \quad Pr\{\mathbf{W}_1\} \quad Pr\{\mathbf{W}_2\} \right] \quad (4.25)$$

aşağıdaki denklem setinin çözümüdür:

$$Pr\{\mathbf{W}_o\} = Pr\{\mathbf{W}_o\} \Lambda_o \quad \text{ve} \quad \sum_{i=1}^{136} Pr\{W_o(i)\} = 1.$$

(4.13) verilen iş çıkarma oranı,  $T_0$  durumunun kararlı durum olasılığından hesaplanabilir:

$$\pi_0 = \sum_{i=1}^8 Pr\{W_o(i)\}. \quad (4.26)$$

#### 4.3.5 ST-AK ve KT-AK Stratejileri

ST-AK ve KT-AK stratejileri için iş çıkarma oranı analizleri bir önceki bölümde verilen analize benzemekle birlikte stratejilerin tekrar gönderim fazındaki farklılıklarından dolayı  $\mathbf{W}_2$  durumuna ait alt durumların sayısı ve her bir alt durumun ifade ettiği koşullar stratejiler için farklılık göstermektedir.

ST-AK stratejisi için tekrar gönderimi hangi düğümün yapacağını belirleyen bir *jeton* değişkeni tanımlanmaktadır:  $t \in \{0, 1\}$ .  $t = 0$  rölenin,  $t = 1$  ise paketin sahibi kaynağın ( $S_1$  veya  $S_2$ ) tekrar gönderimi yapacağını göstermektedir. Bu durumda,  $T_2$ 'nin alt durumları  $W_2(b, t, i)$  şeklinde tanımlanır ve  $\mathbf{W}_2$  alt durum vektörünün toplamda  $12 \times 8 \times 2 = 192$  elemanı bulunmaktadır.

ST-AK stratejisine benzer şekilde KT-AK stratejisi için de bir jeton değişkeni bulunmaktadır. Fakat ST-AK'dakinin aksine tüm alt durumlar değil sadece Çizelge 4.2'de birden fazla olası tekrar gönderici barındıran satırlar jeton değişkeni içerir. Örneğin,  $W_2(0, \cdot)$  alt durumu jeton değişkeni içermezken  $W_2(7, \cdot, \cdot)$  alt durumunda bulunmaktadır.  $W_2(7, t, \cdot)$  alt durumuna göre  $t = 0$  olduğu koşulda röle aksi takdirde  $S_1$  tekrar gönderim yapmaktadır. ST-AK stratejisinin aksine, KT-AK stratejisinde  $t$  değişkeni her tekrar gönderimden sonra değiştirilmez çünkü tekrar gönderici düğüm bir önceki kanal durumuna ( $\mathbf{s}_c$ ) göre belirlenir. Bu durumda,  $\mathbf{W}_2$ 'deki alt durumların sayısı  $5 \times 2 \times 8 + 7 \times 8 = 136$  olur.

#### 4.4 Ortalama Gecikme ve Enerji Tüketimi

Başarılı bir tur ( $\mathbf{q}_1$  ve  $\mathbf{q}_2$  paketlerinin, sırasıyla,  $S_2$  ve  $S_1$ 'de başarıyla alınması) için ortalama gecikme  $E\{T_D\}$  olarak tanımlanırsa Şekil 4.4'te verilen modele göre  $T_D$

aşağıdaki şekilde gösterilebilir:

$$\underbrace{T_0 \rightarrow T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow T_2 \rightarrow \dots \rightarrow T_2 \rightarrow T_2 \rightarrow T_0}_{T_D} \quad (4.27)$$

Bu durumda, ortalama gecikme  $E\{T_D\} = 2/\eta$  şeklinde yazılabilir. Bu parametre hem tekrar gönderim sayısı ile hem de *enerji tüketimi* ile doğru orantılıdır. Ağda tekrar gönderimler dışında ilave yük olmadığı varsayılırsa tur başına enerji tüketimi tur başına toplam gönderim sayısına veya iş çıkarma oranının tersinin iki katına eşit olur.

#### 4.5 Uygumaya Dair Meseleler

1. *Zaman senkronizasyonu*: Ağdaki düğümler arası senkronizasyon önemli bir meseledir ve üstesinden gelinmediği takdirde performansı ciddi şekilde etkileyebilir. Bu çalışmada düğümler arası senkronizasyonun sağlandığı varsayılmıştır. Bu varsayım zamanı dilimlere ayıran çoklu erişim yöntemlerinde genellikle kullanılmaktadır. Ayrıca gönderimler arası yeterli zaman aralıkları kullanıldığı takdirde senkronizasyon hataları kritik olmayacaktır.
2. *Değişken paket boyutları*: Farklı kaynaklardan gelen paketlerin boyutları eşit olmayabilir. Yukarıda önerilen stratejiler bu durumda da geçerli olmakla birlikte ağ kodlamasından kaynaklanan performans artışı düşecektir. Örnek olarak senkronizasyonun sağlandığı durumda, sırasıyla  $L_1$  ve  $L_2$  boyutlarındaki,  $\mathbf{q}_1$  ve  $\mathbf{q}_2$  paketleri zamanın % $r$ 'sinde ağ kodlaması yoluyla birleştirilebilir. Burada  $r = 100 \times \min(L_1, L_2) / \max(L_1, L_2)$  şeklinde tanımlanır. Bekleneceği gibi ağ kodlamasının katkısı  $r$  ile birlikte artmaktadır.
3. *Zaman aşımı*: Önerilen yöntemlerde zaman aşımı olmadığı varsayılmıştır. Bir başka ifadeyle tur tamamlanana dek tekrar gönderimler sürmektedir. Pratikte çok uzun süreli kesintileri engellemek için hatalı paketin tekrar gönderimi belirli bir süre sonunda iptal edilebilir. Tezde önerilen yöntemlerde işbirliği dolayısıyla uzaysal çeşitlemeden yararlanma imkanı olduğu için uzun süreli kesintilere maruz kalma olasılığı da oldukça düşürülse de yüksek ilintili ortamda röle kanallarının da kesintide olma ihtimali artabilir. Zaman aşımının tezde önerilen yöntemlere uygulanması iş çıkarma oranı performansı artırabilir. Ancak tekrar



gönderimler belirli bir süre sonunda kesildiğinden paket kayıpları da görülebilir. Zaman aşımı durumunda farklı bir analiz yaklaşımı gerektiğinden bu tez çalışması kapsamında ele alınmamıştır.

4. *Turlar-arası ağ kodlaması:* Bu çalışmada haberleşme seanslarının turlara bölündüğü varsayılmıştır ve önerilen stratejilerin amacı tur başına gönderimlerin sayısını azaltmaktır. Yukarıda anlatıldığı gibi bir tur  $\{q_1, q_2\}$  paket çifti başarıyla alınana dek devam etmektedir. Bu sağlandığı takdirde yeni bir tur başlanmaktadır. Yeni bir tur başlangıcında röle, daha önceki turda başarıyla çözüldüğü paketleri silmekte ve ağdaki ARQ durumu da sıfırlanmaktadır. Bundan farklı olarak farklı turlara ait paketleri birleştirmek de mümkündür. Bu yöntem turlar-arası ağ kodlaması ismi verilir ve bu yöntem ağ kodlamasında sağlanan faydayı arttırır [42]. Bu fikri uygulamak, bu tez çalışmasında önerilenden farklı bir strateji gerektirir. Örneğin C-NC-ARQ Tablosu'nun yapısı önceki turlara ait ARQ geribildirimlerini içerecek şekilde değişir. Buna bağlı olarak en uygun birleştirme seçenekleri kullanıldığında iş çıkarma oranını daha fazla arttırmak mümkün olabilir. Bu çalışmanın, tezde önerilen yöntemler için ileride uygulanması mümkündür ancak farklı bir yöntemi işaret ettiğinden bu tez çalışmasının kapsamında çalışılmamıştır.
5. *Gelişmiş ARQ yöntemleri:* Bu tez çalışmasının ana amacı ağ kodlamasının işbirlikli ARQ üzerindeki temel etkilerinin araştırılmasıdır. Bunun için en yalın ARQ yöntemi seçilerek ağ kodlamasının ARQ performansı üzerine katkısının analiz edilmesi öncelik teşkil etmiştir. Ağ kodlamasının geri-dön-N, seçici tekrar gönderim ve melez ARQ gibi daha gelişmiş ARQ metotları üzerine olan etkisinin araştırılması önemli bir çalışma olmakla birlikte farklı bir yaklaşım gerektirdiğinden bu tez çalışması kapsamında ele alınmamıştır.

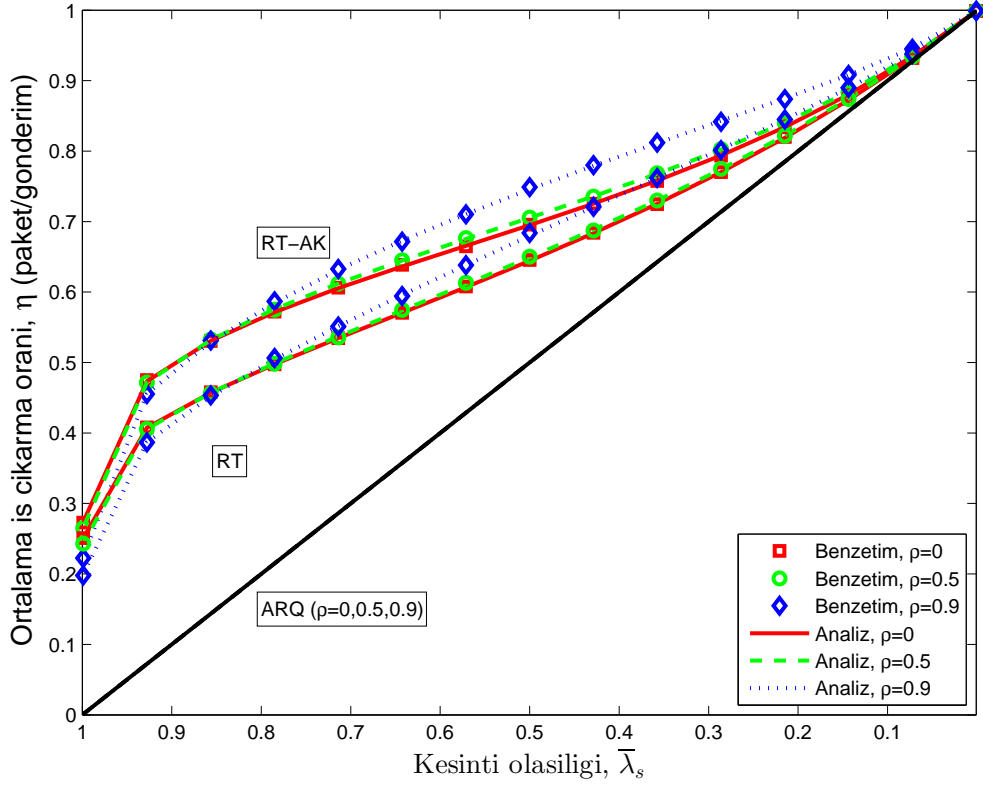
#### 4.6 Sayısal Sonuçlar

Bu bölümde C-NC-ARQ yöntemlerinin farklı kanal koşulları için performans sonuçları verilecek ve kanal ilintisinin ağ iş çıkarma oranı üzerine etkisi incelenecektir. Benzetim sonuçları (3.9) eşitliğinde verilen modele göre rasgele üretilen sönümlenmeli kanallar ve Çizelge 4.2'de verilen protokol kuralları ile yapılan Monte Carlo benzetimleri ile elde edilmiştir.

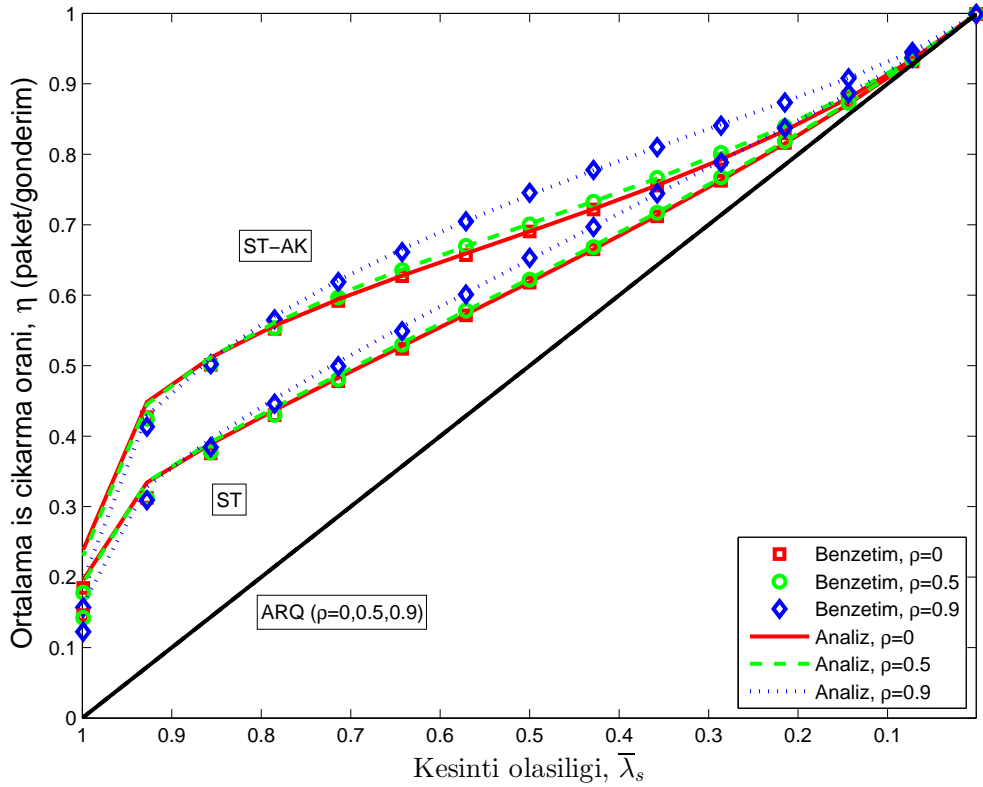
Şekil 4.5'te RT-AK yönteminin iş çıkarma oranı performansı farklı kanal ilinti katsayıları için verilmiştir. Üç farklı ilinti katsayısı incelenmiştir: ilintisiz ( $\rho = 0$ ), orta dereceli ilintili ( $\rho = 0.5$ ), yüksek ilintili ( $\rho = 0.9$ ). Monte Carlo benzetim sonuçları ile karşılaştırılan analitik sonuçların örtüştüğü görülmüştür. Röle kanallarının sönümleme payının kaynaklar-arası kanalın sönümleme payından yüksek olduğu durum ele alınmıştır:  $F_r/F_s = 10$  ( $F_{r,i} = F_r, i = 1, 2$ ). Karşılaştırma amacıyla  $\eta_{ARQ} = 1 - \bar{\lambda}_s$  eşitliği ile hesaplanan geleneksel dur-ve-bekle ARQ iş çıkarma oranı da gösterilmiştir. Kesinti olasılığının yüksek değerleri için ( $\bar{\lambda}_s > 0.8$ ) kanal ilintisinin iş çıkarma oranı üzerinde olumsuz etkisi olduğu gözlenmiştir. Bu durum tekrar gönderim fazının uzun süreli kanalı kesintide olan rölelerin tekrar gönderiminde takılı kalmasından kaynaklanmaktadır. Kanal ilintisinin olumsuz etkisinin olumluya döndüğü kesinti olasılığı eşiği,  $F_r/F_s = 10$  dB durumu için  $\bar{\lambda}_r < 0.15$  olarak tanımlanabilir.  $\bar{\lambda}_s < 0.8$  ve  $\bar{\lambda}_r < 0.15$  için kanal ilintisinin olumlu etkisi gözlenmektedir. Bu durumun nedeni düşük kesinti olasılığı ile birlikte yüksek ilintili kanalları uzun süreli olarak kesintisiz durumda kalan rölelerin çeşitleme kazancının birleşimidir. Bir başka önemli gözlem ise ağ kodlaması kullanan RT-AK yönteminin kullanmayan RT yöntemine göre iş çıkarma oranı bağlamında 0.1 daha iyi sonuç vermesidir ki bu kayda değer bir artıştır. Benzer davranışlar ST-AK ve KT-AK yöntemleri için de sırasıyla, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de gözlenmiştir.

Üç yöntemin performansları Şekil 4.8'de karşılaştırılmıştır. Burada sadece analitik sonuçlar gösterilmiştir. İki farklı ilinti katsayısı için ve röle kanalları ile kaynaklar-arası kanalın sönümleme paylarının eşit olduğu durumda ( $F_r/F_s = 0$  dB) sönümleme payına karşın iş çıkarma oranı sonuçları incelenmiştir. İlintisiz durumda ( $\rho = 0$ ) yöntemler arasında fark olmazken tam ilintili durumda ( $\rho = 0.999$ ) RT-AK yöntemi, ST-AK ve KT-AK yöntemlerinden daha kötü sonuç vermiştir. Bu durumdayken geleneksel ARQ bile RT-AK yöntemine göre daha avantajlıdır. Bu durumun nedeni, yüksek ilintili olarak ardarda kesintide olan röle kanallarına rağmen tekrar gönderim için rölelerin tercih edilmesi ve sonucunda tekrar gönderim sayısının artmasıdır. Bu durum, ST-AK ve KT-AK yöntemlerinde gözlenmemektedir. Şekil 4.8'den çıkarılabilecek bir diğer sonuç da  $F_r/F_s = 0$  dB durumunda röle kanalları avantaj sağlamadığından ağ kodlamasının avantajının da görülememesidir.

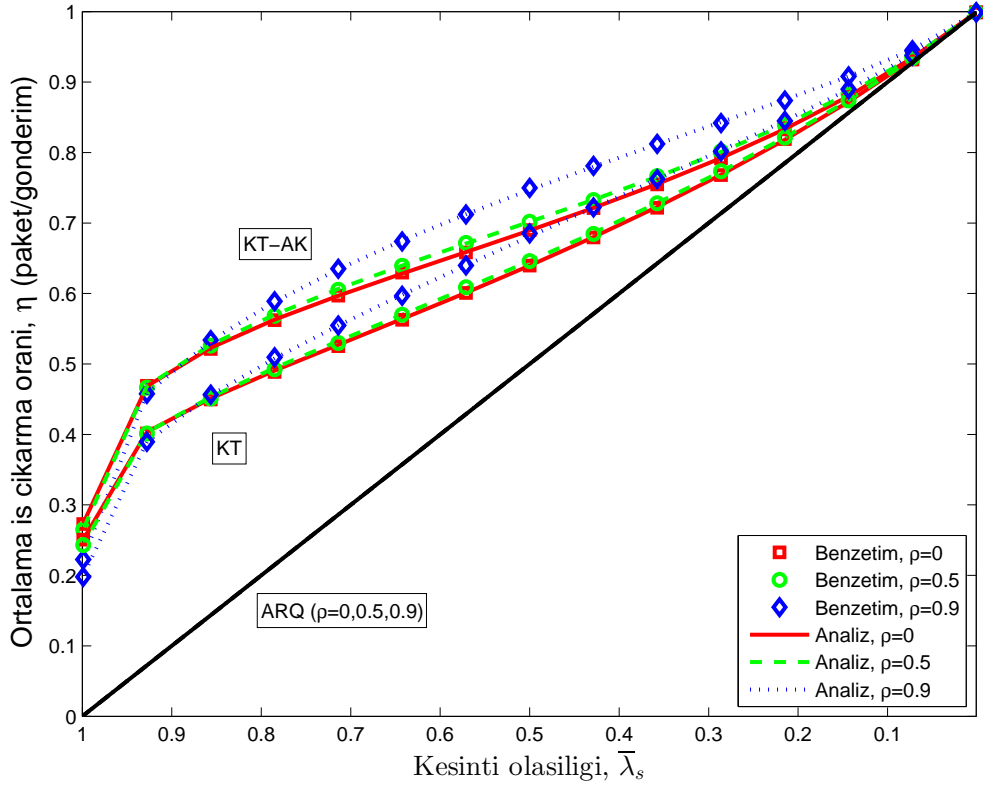
Kanal ilintisinin iş çıkarma oranı üzerine etkisi Şekil 4.9'de görülebilir. Burada kaynaklar-arası kanalın sönümleme payı  $F_s = 0$  dB olarak sabitlenmiş ve iki farklı durum ince-



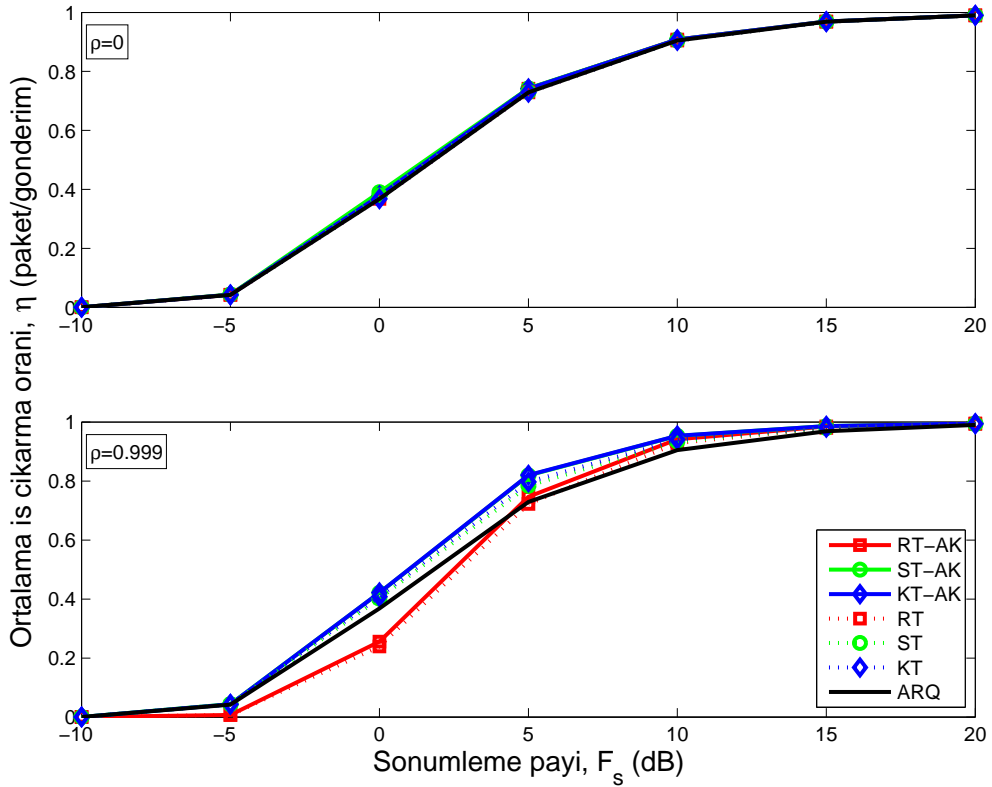
Şekil 4.5. RT-AK yönteminin farklı ilinti katsayıları için analitik ve benzetim sonuçları.  
 $F_r/F_s = 10$  dB.



Şekil 4.6. ST-AK yönteminin farklı ilinti katsayıları için analitik ve benzetim sonuçları.  
 $F_r/F_s = 10$  dB.



Şekil 4.7. KT-AK yönteminin farklı ilinti katsayıları için analitik ve benzetim sonuçları.  $F_r/F_s = 10$  dB.

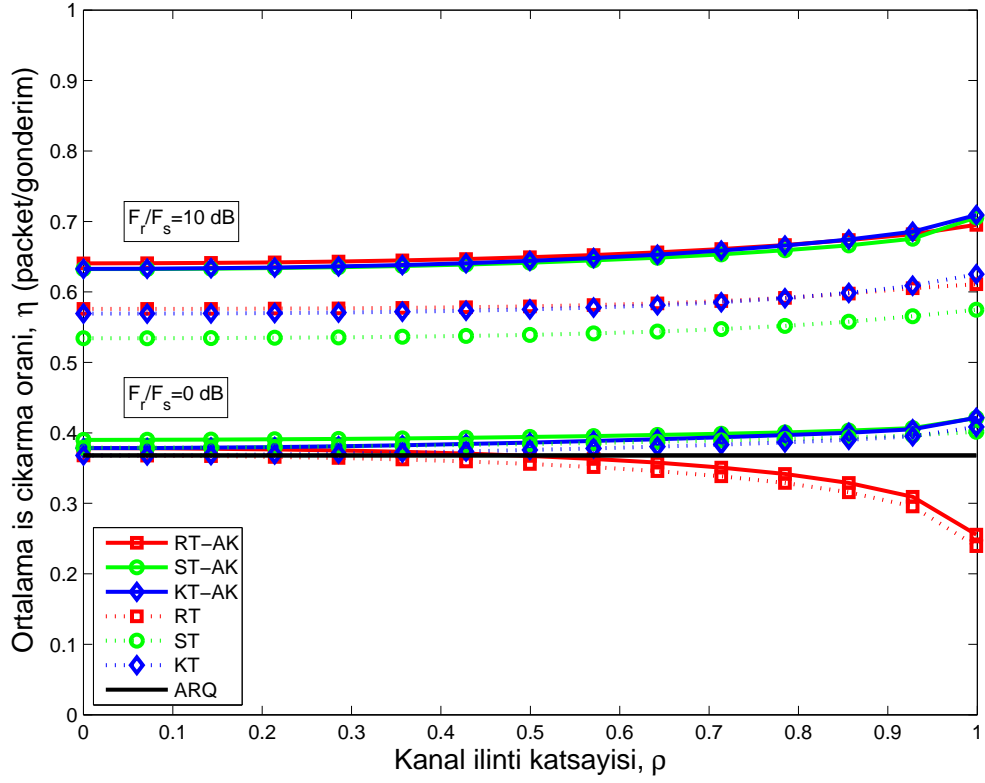


Şekil 4.8. Sönümlenme payına bağlı iş çıkarma oranları.  $F_r/F_s = 0$  dB.

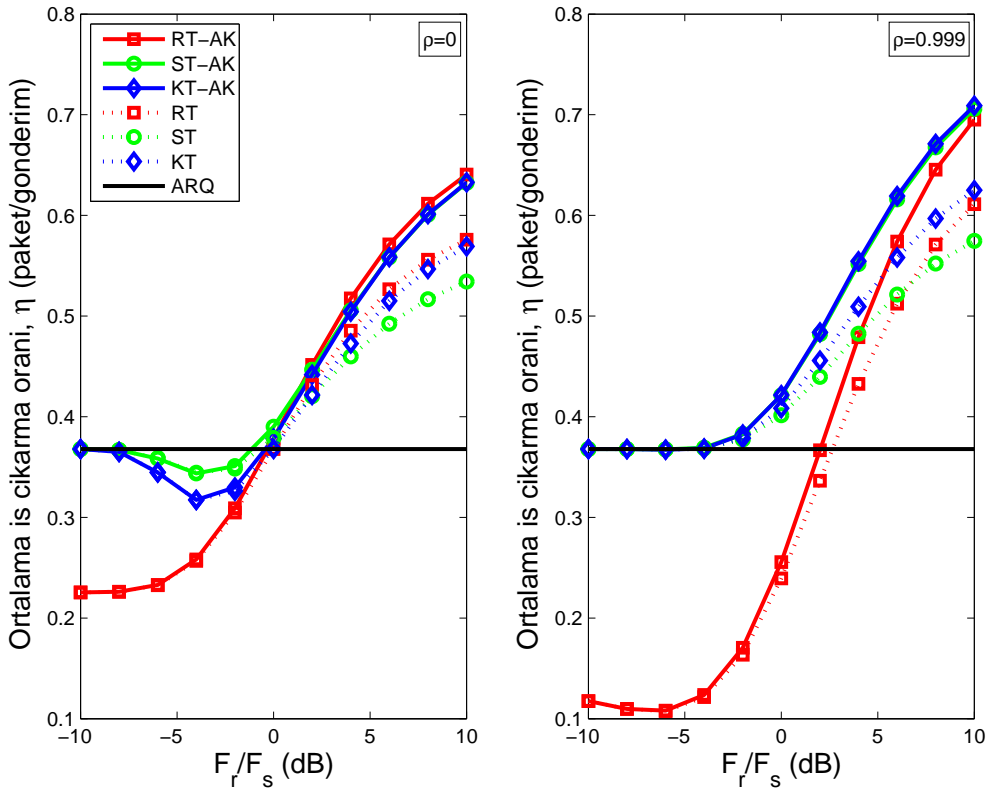
lenmiştir: (i) röle kanallarının daha iyi olduğu durum ( $F_r/F_s = 10$  dB), (ii) bütün kanalların sönümlenme paylarının aynı olduğu durum ( $F_r/F_s = 0$  dB). Röle kanallarının daha iyi olduğu durumda ( $F_r = 10$  dB), tüm yöntemler için  $F_r = 0$  dB durumuna göre ağ kodlamasının daha fazla avantaj sağladığı görülmektedir. Bu durumun nedeni, ağ kodlamasının avantajının görülebilmesi için Çizelge 4.2'de verilen  $\mathbf{s}_\rho[k] = [0 \ 0]$  ve  $\mathbf{s}_r[k] = [1 \ 1]$  ARQ durumunun daha sık oluşması gerekmektedir ki bu durum röle kanalları sönümlenme payı kaynaklar-arası kanaldan daha iyi olduğu takdirde görülür.  $F_r = 10$  dB durumu için RT-AK yöntemi, ST-AK ve KT-AK yöntemlerine nazaran az da olsa daha yüksek performans göstermektedir. Çünkü RT-AK yöntemi ortalama daha iyi olan röle kanallarını sürekli olarak kullanmaktadır. Bir başka gözlem de kanal ilintisi çok düşük olmadığı sürece en iyi performans gösteren yöntemin KT-AK olmasıdır. Zira kanal ilintisi sıfıra yaklaştıkça yani kanal ilintisiz hale geldikçe bir önceki zaman dilimindeki kanal durumunun şu anki kanal durumu hakkında fazla bilgi vermemekte dolayısıyla KT-AK yöntemi için tekrar gönderici seçimi rasgele hale gelmektedir.  $F_r = 0$  dB durumu için RT-AK yönteminin en kötü sonucu verdiği görülür. Bunun nedeni RT-AK yönteminin röle kanallarındaki kesintiye rağmen özellikle yüksek ilintili olarak tekrar eden kesinti durumlarında tekrar gönderimde röle üzerinde ısrar etmesidir.

Şekil 4.10'da, röle sönümlenme payının iş çıkarma oranı üzerine etkisi görülmektedir. Burada  $F_s = 0$  dB olarak sabit alınmıştır. Beklendiği gibi RT-AK yöntemi röle sönümlenme payı düşük iken daha en kötü sonucu vermektedir. Bu durum oluştuğunda ağ kodlamasının da olumlu bir katkısı olmamaktadır. Röle kanalları sönümlenme payı yüksek iken RT-AK yöntemi ilintisiz durumda ( $\rho = 0$ ) KT-AK yöntemine göre daha iyi performans gösterirken tamamen ilintili durumda ( $\rho = 0.999$ ) daha düşük performansla sahiptir. Bir diğer gözlem de röle kanallarının sönümlenme payının kaynaklar-arası kanaldan daha kötü olduğu durumda ( $F_r/F_s < 0$  dB) ve düşük ilinti değerleri için ( $\rho \ll 1$ ) işbirlikli ARQ yöntemlerinin geleneksel ARQ yönteminden bile daha kötü sonuç vermesidir. Röle kanallarının koşulları oldukça iyileştiğinde ( $F_r/F_s > 10$  dB) RT-AK yöntemi iyi bir seçenek haline gelmektedir. Diğer bütün durumlarda ST-AK ve KT-AK yöntemleri daha iyi çalışmaktadır.

Bölüm 4.2'de tartışıldığı ve yukarıdaki sayısal sonuçlardan görüldüğü üzere, önerilen ağ kodlamalı işbirlikli ARQ yöntemleri ağ kodlamasız alternatifleriyle karşılaştırıldığında röle kanal koşulları kaynaklar-arası kanaldan daha iyi olduğunda daha yüksek



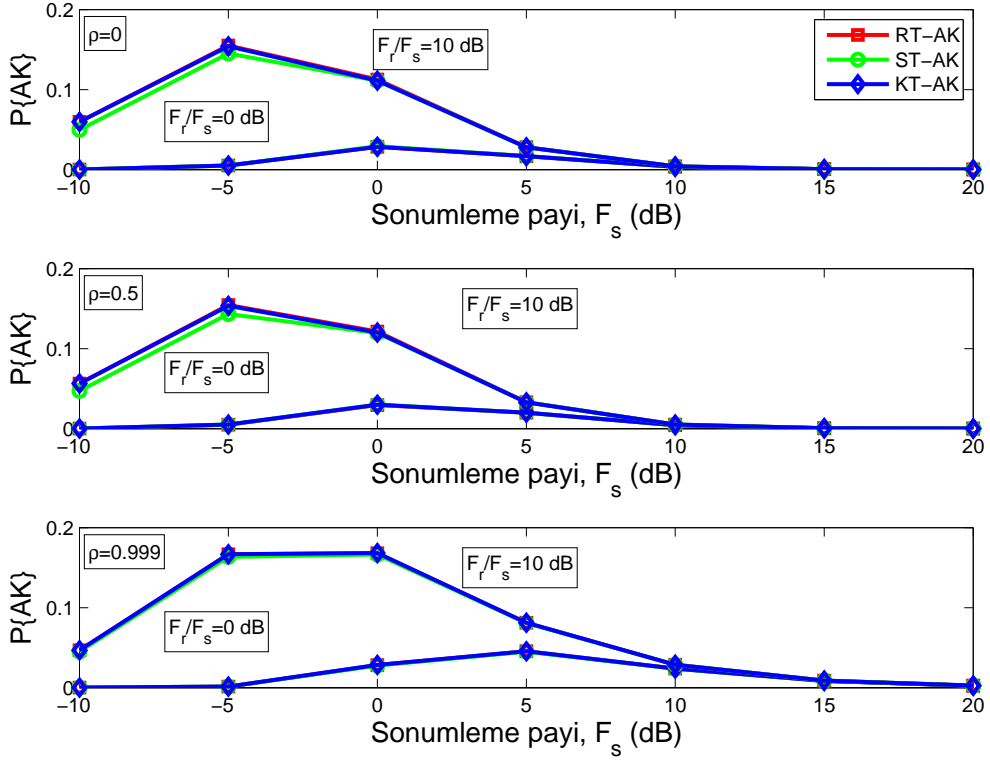
Şekil 4.9. Kanal ilintisine bağlı iş çıkarma oranları.  $F_s = 0$  dB.



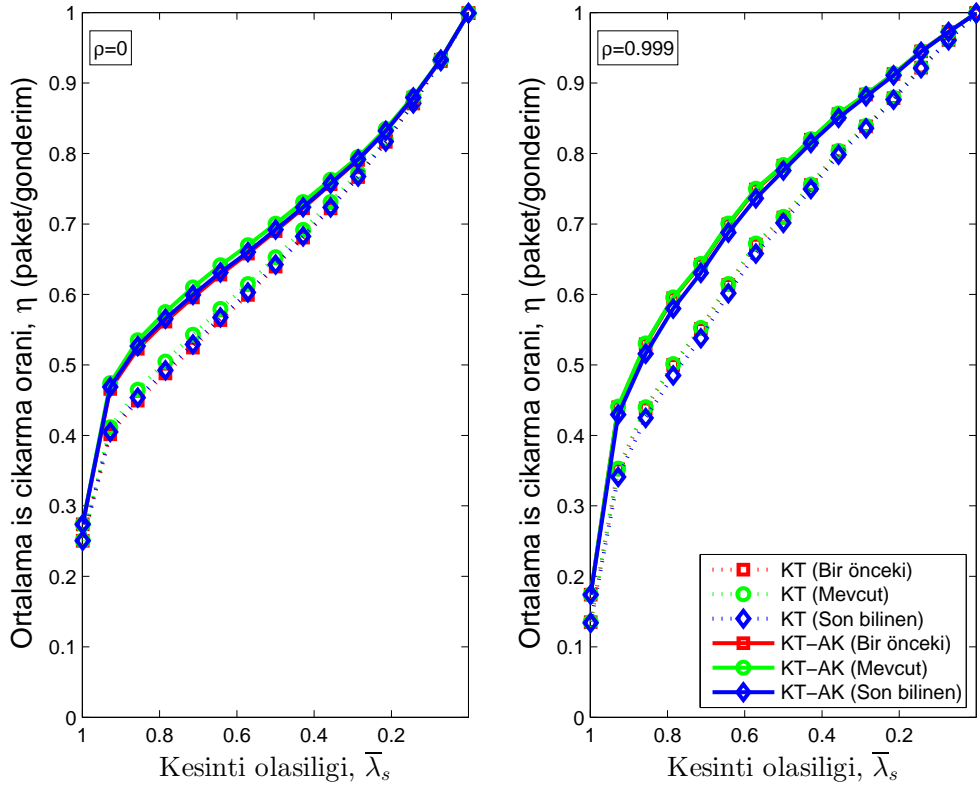
Şekil 4.10. Röle sönmüleme payına bağlı iş çıkarma oranı.  $F_s = 0$  dB.

performans göstermektedir. Performanstaki bu artışın temel nedeni ağ kodlamasıdır. Ağ kodlaması olasılığı arttıkça önerilen yöntemlerin performans kazançları da artacaktır.  $P\{AK\}$  ile tanımlanan ağ kodlaması olasılığı,  $\mathbf{q}_1$  ve  $\mathbf{q}_2$  paketlerinin  $R$ 'de başarıyla alındığı fakat sırasıyla,  $S_2$  ve  $S_1$ 'de alınmadığı durumun kararlı-durum olasılığına eşittir. Bir başka ifadeyle  $W_2(3, \cdot)$  alt durumunun kararlı-durum olasılığıdır. Bu olasılığın değişimi Şekil 4.11'de kaynaklar-arası kanalın sönümlenme payına bağlı olarak verilmiştir. Bu şekilden görüleceği gibi sönümlenme payının düşük olduğu ve  $F_r/F_s$  oranının 1'den büyük olduğu (veya 0 dB'den büyük olduğu) durumlarda ağ kodlaması olasılığı sönümlenme payıyla orantılı olarak artmaktadır. Bunun nedeni,  $F_r/F_s$  oranının büyük değerleri ve  $F_s$ 'nin küçük değerleri için kaynaklar-arası kanalın röle kanallarına nazaran daha sık sönümlenmeye maruz kalması dolayısıyla  $\mathbf{s}_p[k] = [0 \ 0]$  ve  $\mathbf{s}_r[k] = [1 \ 1]$  durumlarının daha sık oluşmasıdır. Oluşan bu durum, ağ kodlaması yapmaya olanak vermektedir.  $F_s$ 'nin yüksek değerleri için ağ kodlaması olasılığı  $F_s$ 'nin artışıyla birlikte ağ kodlaması olasılığı düşmektedir. Bunun nedeni, sönümlenme payı artışıyla birlikte kaynaklar-arası kanalın koşullarının iyileşmesinden dolayı en azından bir paketin kaynaklardan birinde başarıyla alınabilmesidir. Elde edilen bu sonuçlar, önerilen ağ kodlamalı yöntemlerin kazançlarının daha yüksek olduğu kanal durumlarını belirtmektedir.

KT-AK yönteminin analizinde bahsedildiği üzere  $k$ 'inci zaman dilimindeki tekrar göndericiye karar vermek için başvuru olan  $k - 1$ 'inci zaman dilimine ait kanal bilgisinin  $k$ 'inci zaman diliminde mevcut olduğu varsayılmıştır. Bu bilginin de her zaman dilimi sonunda güncellenen ACK/NACK'den alındığı kabul edilmiştir. Ancak tüm kanallara ait ACK/NACK'ler bir önceki zaman diliminde mevcut olmayabilir. Pratikte, en son elde edilen kanal geribildirimleri her bir kanalın *son bilinen* durumu olarak kullanılabilir. Bu durum, kanal bilgisinin güncel olmayabileceğinden dolayı performansı olumsuz anlamda etkileyebilir. Bu etkinin incelenmesi için Şekil 4.12 verilmiştir. Şekil 4.12'de, KT-AK yöntemlerinin *bir önceki* zaman dilimindeki kanal bilgisi ve *son bilinen* kanal bilgisi kullandığı durumlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma için referans olarak en iyi durumu ifade eden *mevcut* zaman dilimindeki kanal bilgisi kullanan KT-AK yönteminin sonuçları da verilmiştir. Performans sonuçlarının üç durum için de birbirine yakın olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuca göre pratik uygulamada son bilinen kanal durumu kullanılabilir.



Şekil 4.11. Sönümlenme payına bağlı ağ kodlaması olasılığı.



Şekil 4.12. KT-AK yöntemlerinin karşılaştırılması.  $F_r/F_s = 10$  dB.



## 5. TÜMEGÖNDERİM AĞI İÇİN C-NC-ARQ YÖNTEMİ

Bu bölümde tümegönderim ağ modeli, bu ağ için önerilmiş olan C-NC-ARQ yöntemi ile yöntemin karşılaştırmalı benzetim sonuçları yer almaktadır.

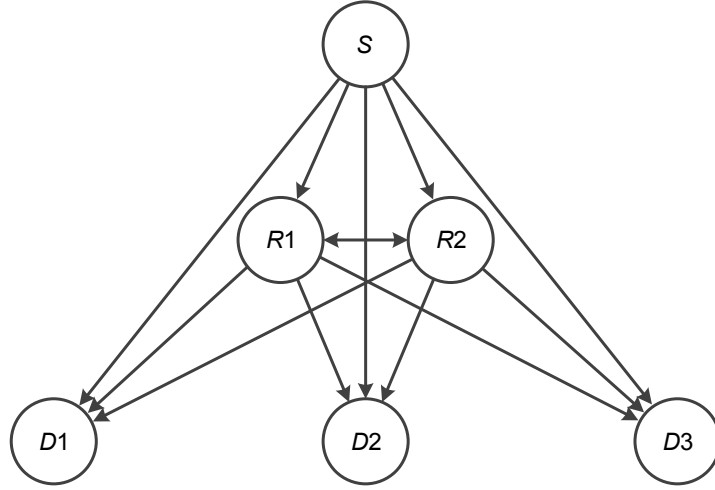
### 5.1 Sistem Modeli

Kablosuz bir iletişim ağında birden fazla hedef düğümle haberleşen bir kaynak düğüm ve tekrar gönderim sürecinde kaynak düğümle işbirliği yapan birden fazla röle düğüm bulunmaktadır (Şekil 5.1). Gösterimin kolay olması açısından Şekil 5.1’de iki röle ve üç hedef gösterilmiştir. Şekil 5.1’de bir verici-alıcı ikilisi arasındaki kanal bir okla gösterilmektedir. Ağdaki düğümler yarı-dupleks modda çalışmaktadır ve zaman-bölmeli çoğullama yapılmaktadır. Erişim ortamı *zaman dilimlerine* ayrılmıştır. Kanal modeli, Bölüm 3’te verildiği gibi zamanla değişen düz sönümlenmeli kanaldır. Kanalın bir zaman diliminde sabit kaldığı, zaman dilimleri arasında değiştiği varsayılmıştır.

Haberleşme kaynak düğümü  $S$ ’nin  $N$  tane alt çerçeveden oluşan bir çerçeveyi hedef düğümlere ( $D_i, i = 1, 2, 3$ ) geribildirim beklemeden ardarda göndermesiyle başlamaktadır. Her bir alt çerçeve faydalı yük olarak bir veri paketini içermektedir ve paketin doğruluğu hedefler tarafından döngüsel artıklık denetim kodları ile kontrol edilmektedir. Çerçevenin iletimini takiben hedef düğümler  $S$ ’ye iletilen paketlerin durumu hakkında geribildirim yapmaktadırlar. Her bir alt çerçevenin iletimi bir zaman dilimi sürdüğünden bir çerçevenin iletimi  $N$  zaman dilimi sürmektedir. Geri bildirimler olumlu (ACK) ve olumsuz (NACK) olarak iki şekilde yapılmaktadır. ACK ve NACK kanallarının hatasız olduğu varsayılmıştır. Analiz kolaylığı açısından ACK/NACK iletim süreleri ihmal edilmiştir. Kaynaktan iletilen çerçeve ile hedeflerden iletilen ACK/NACK’ler ağdaki röleler dahil tüm düğümler tarafından duyulabilmekte dolayısıyla hangi paketin hangi istasyonda alınamadığı bilinmektedir. İletim başarısız olduğu takdirde paketin tümüyle kaybolduğu varsayılmaktadır.

Bir *tur*,  $N$  paketi içeren bir çerçevenin tüm hedef düğümler tarafından başarıyla alınana dek geçen süreyi ifade etmektedir. Bu süre zarfında gerek kaynak gerekse röleler tarafından tekrar gönderimler de söz konusu olmaktadır.

Bir turun  $k$ ’inci zaman diliminde başladığı varsayıldığında,  $k$ ’inci zaman diliminde



Şekil 5.1. İşbirlikli tümegönderim ağı: Rôle düğümleri tekrar gönderim fazında kaynak düğüm ile işbirliği yapmaktadır.

$S$ ,  $N$  alt çerçeveden  $(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \dots, \mathbf{q}_N)$  oluşan bir çerçeveyi hedeflere iletmeye başlanmaktadır. Bir alt çerçevenin indeksi  $k'$  ile gösterilirse her bir  $k' \in \{1, \dots, N\}$  için  $\mathbf{q}_{k'}$ ,  $k'$ 'inci alt çerçevenin sembollerini içeren  $M$  uzunluğundaki bir vektördür. Buna göre,  $(k+k')$ 'inci zaman diliminde  $i$ 'inci hedefte ( $D_i$ ) ve  $j$ 'inci rölede ( $R_j$ ) alınan sinyaller, sırasıyla (3.3) numaralı eşitlikte verilen sinyal modeline uygun şekilde, aşağıda verilmektedir:

$$\mathbf{y}_{d,i}[k+k'] = \mathbf{q}_{k'} h_{sd,i}[k+k'] + \mathbf{w}_{d,i}[k+k'] \quad (5.1)$$

$$\mathbf{y}_{r,j}[k+k'] = \mathbf{q}_{k'} h_{sr,j}[k+k'] + \mathbf{w}_{r,j}[k+k'] \quad (5.2)$$

Çerçevenin kaynak tarafından ilk gönderiminden sonra, hedeflerde alınamayan alt çerçevelerin tekrar gönderimi söz konusu olur. Bu durumda röleler, doğru çözdükleri kayıp alt çerçevelerin tekrar gönderimine yardım ederler. Örneğin  $j$ 'inci rölenin  $m$ 'inci alt çerçeveyi ( $\mathbf{q}_m$ ),  $k'' \in \{N+1, N+2, \dots\}$  için  $(k+k'')$ 'inci zaman diliminde tekrar gönderdiği varsayalım. Bu durumda  $i$ 'inci hedefte alınan sinyal aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\mathbf{y}_{d,i}[k+k''] = \mathbf{q}_m h_{rd,i,j}[k+k''] + \mathbf{w}_{d,i}[k+k''] \quad (5.3)$$

Burada  $\{\mathbf{w}_x[k]\}$  ile gösterilen değişkenler toplanır Gauss gürültüsüdür:  $\mathbf{w}_x[k] \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma_{w,x}^2 \mathbf{I}_M)$ . Zamanla değişen ve birbirinden bağımsız sönümlenmeli kanal kat-

sayıları ise  $\{h_x[k]\}$  değişkenleri ile gösterilmektedir ve Bölüm 3'te gösterildiği gibi karmaşık Gauss dağılımlıdır:  $h_x[k] \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{h,x}^2)$ .

Bölüm 3'te verildiği gibi, kaynak-hedef kanallarının  $(S - D_i)$  ortalama kesinti olasılığı Rayleigh kanal için

$$\bar{\lambda}_{sd,i} = 1 - \exp\left(-\frac{1}{F_{sd,i}}\right) \quad (5.4)$$

şeklinde bulunur.  $F_{sd,i}$ ,  $i$ 'inci kaynak-hedef kanalının  $(S - D_i)$  sönmleme payıdır. Benzer şekilde kaynak-röle  $(S - R_j)$  ve röle-hedef  $(R_j - D_i)$  sönmleme payları  $F_{sr,j}$  ve  $F_{rd,ji}$  şeklinde tanımlanırsa, ortalama kesinti olasılıkları da ( $j = 1, 2$  ve  $i = 1, 2, 3$  için)

$$\bar{\lambda}_{sr,j} = 1 - \exp\left(-\frac{1}{F_{sr,j}}\right) \quad (5.5)$$

$$\bar{\lambda}_{rd,ji} = 1 - \exp\left(-\frac{1}{F_{rd,ji}}\right) \quad (5.6)$$

olur.

Zamanla değişen kanalların Bölüm 3'te anlatılan Markov modeline uygun şekilde ilintili olarak değiştiği varsayılmıştır. Buna göre,  $S - D_i$ ,  $S - R_j$  ve  $R_j - D_i$  kanallarının geçiş olasılık matrisleri (3.9) eşitliğinde verildiği gibi, sırasıyla,  $\Lambda_{sd,i}$ ,  $\Lambda_{sr,j}$  ve  $\Lambda_{rd,ji}$  ile gösterilir. Geçiş olasılıkları ise, yine sırasıyla,  $a, b \in \{0, 1\}$  için  $P_{ab,sd,i}$ ,  $P_{ab,sr,j}$  ve  $P_{ab,rd,ji}$  ile gösterilmektedir. Burada verilen geçiş olasılıkları; (3.10), (3.11), (3.12) ve (3.13)'te tanımlanan geçiş olasılığı ifadelerinde, ilgili kanalın sönmleme payı ile (5.4), (5.5) ve (5.6)'da verilen kesinti olasılıkları kullanılarak bulunabilir. Kanalların ilinti fonksiyonunun da (3.16) eşitliğinde verilen Jakes modeline uyduğu varsayılmıştır.

## 5.2 C-NC-ARQ Yönteminin İşleyişi

Sistem yeni bir tur başladığında *gönderim fazındadır*. Bu fazda kaynak  $S$ , hedeflere ( $D_1$ ,  $D_2$  ve  $D_3$ ) bir çerçeveyi ACK veya NACK beklemeden iletir. Bir çerçeve süresi boyunca ( $N$  alt çerçeve (paket) süresi boyunca) kaynak-hedef kanallarının hiçbiri kesintide olmazsa çerçeve başarıyla hedefler tarafından alınmış olur ve tur sona

erer. Bir turun bitişinin ardından yeni bir tur yine gönderim fazında başlamaktadır. Çerçevdeki paketlerin herhangi biri herhangi bir hedefte alınmadığı takdirde ağ *tekrar gönderim fazına* girer ve tüm paketler tüm hedeflerde başarıyla alınana dek bu fazda kalır. Röleler hedeflerin alamadığı paket veya paketleri başarıyla çözdükleri takdirde tekrar gönderim fazında kaynak düğümle işbirliği yapar ve kayıp paket veya paket grubunu tekrar gönderir. Tekrar gönderim fazında hangi paketin gönderileceği önerilen C-NC-ARQ stratejisiyle belirlenir. Bu strateji bölümün devamında izah edilecektir.

Tekrar gönderim fazında ortama erişim için merkezi bir kontrol mevcut değildir. Röleler tekrar gönderim fazına hedeflerden aldıkları ACK/NACK'lere göre dahil olurlar. Tekrar gönderici düğümün seçimi için rasgele erişim mekanizması kullanılır. Tekrar gönderim fazının başında tekrar gönderim geribildirimlerine cevap verebilecek durumda olan tüm düğümlerin kanal erişim hakkı için yarıştıkları *çekişme periyodu* gelir. Tekrar gönderim için aday olan her bir düğüm kendine has bir sayıcının geriye sayımı bittikten sonra tekrar gönderim girişimini yapmaktadır. Sayıcının değeri ise  $\{0, 1, \dots, CW_i\}$  sonlu kümesinden eşit olasılıkla seçilen rasgele bir sayıdır. Burada  $CW_i$ ,  $i$ 'inci tekrar gönderim girişimindeki geri çekilme penceresidir. Geri çekilme pencereleri ilk tekrar gönderimin başında tüm düğümler için  $CW_{min}$  ilk değerini alır. Tekrar gönderim girişiminin başarısız olduğu durumda geri çekilme pencerelerinin genişletildiği ceza mekanizması mevcuttur. Buna göre tekrar gönderim iki durumda başarısız olmaktadır: (i) birden fazla tekrar gönderici düğümün aynı anda kanala erişimi neticesinde çarpışma oluşması, (ii) tek bir tekrar gönderici düğümün iletim yapması ancak kanaldaki kesintiden dolayı iletimin başarısız olması. İlk durumda, çarpışmaya neden olan tekrar gönderici düğümlerin geri çekilme pencereleri iki katına çıkarılmaktadır:  $W_i \rightarrow 2CW_i$ . İkinci durumda ise tekrar gönderim sonunda başarısız olan düğümün geri çekilme penceresi iki katına çıkarılmaktadır. Yukarıdakilere ek olarak geri çekilme penceresinin genişletildiği bir durum daha mevcuttur. Bu durumda, tekrar gönderimi yapılacak birden fazla paket mevcutken ağ kodlaması yoluyla bu paketleri birleştirme imkanı olmayan aday tekrar gönderici düğüm, ağ kodlaması yapma imkanı olan muhtemel diğer düğümlere imkan tanımak adına geri çekilme penceresini genişletme yoluyla kendini cezalandırır ve pencere genişliğini iki katına çıkarır. Geri çekilme pencerelerinin genişletilmesi azami pencere genişliğine ulaşılan dek sürer:  $CW_{max}$ .

Tekrar gönderim fazında hangi paketin gönderileceğine  $\mathbf{S}_d$  paket durum matrisine göre karar verilir. Bu matris  $k$ 'inci zaman dilimi sonunda paketlerin hedeflerdeki durumlarını göstermektedir.  $\mathbf{S}_d$  matrisinin her biri bir paketi temsil eden toplamda  $N$  adet kolonu ve her biri bir hedefteki paket durumlarını gösteren toplam üç adet satırı bulunmaktadır. Örneğin  $\mathbf{S}_d(k)$  matrisinin  $(i, j)$ 'inci elemanı  $j$ 'inci paketin  $(\mathbf{q}_j)$   $i$ 'inci hedefteki ( $D_i$ ) durumunu göstermektedir.  $\mathbf{S}_d$  matrisinin elemanları başarısız paket durumunu gösteren 0 ve başarılı paket durumunu gösteren 1 değerlerini alabilirler. Paketin başarılı/başarısız olma durumu, paketin gönderildiği zaman diliminde kanalın kesintide olup olmama durumu ile doğrudan ilgilidir. Kanalın kesinti/kesintisizlik durumları Bölüm 3'te verilen Markov modeliyle uyumludur ve Bölüm 5.1'de tanımlanan geçiş olasılıklarıyla kanal durumlarının geçişleri tanımlanmaktadır. Ağda ACK/NACK'ler tüm düğümler tarafından duyulabildiği için  $\mathbf{S}_d(k)$  matrisi de tüm düğümlerde mevcuttur.

Hedeflerden gelen ACK/NACK'lere bağlı olarak  $\mathbf{S}_d(k)$  matrisi tekrar gönderim için aday olan (kaynak ve uygun durumdaki röleler) tüm düğümlerde oluşturulur. Her aday düğüm,  $\mathbf{S}_d(k)$  matrisi ve kendisi tarafından doğru şekilde alınan paketlere göre hareket eder. Aday düğüm tekrar gönderilecek paket için olası paketler arasından seçim yapar. Olası paketleri belirlemek için tüm hedefleri birlikte düşünmek yerine hedef ikililerini göz önüne alır:  $D_1-D_2$ ,  $D_2-D_3$  ve  $D_1-D_3$ . Bunun sebebi, özellikle çok sayıda hedef düğümünün olduğu durumda tüm hedefleri birlikte ele alarak olası paketleri belirlemenin doğuracağı işlem karmaşıklığıdır. Özellikle ağdaki düğümlerin mobil istasyonlar olabileceği düşünülürken işlem karmaşıklığı mobil cihazlardaki enerji tüketimini arttırabilir. Ayrıca işbirlikli ağlarda işbirliğinin getireceği ilave yüklerin fazla olmaması tercih edileceğinden en iyi çözümü vermesi muhtemel yüksek karmaşıklıkla müşterek eniyileme (tüm hedeflerin birlikte ele alınması) yerine daha düşük karmaşıklığa sahip alt-çözümler (hedef ikililerin ele alınması) seçilmektedir. Dolayısıyla hedef ikililerine bağlı olarak  $\mathbf{S}_d(k)$  matrisinin alt-matrisleri,  $\mathbf{S}_{d,ij}(k)$ , göz önüne alınır. İki satırdan ve  $N$  kolondan oluşan  $\mathbf{S}_{d,ij}(k)$  matrisinin ilk satırı  $D_j$  hedefindeki, ikinci satırı ise  $D_i$  hedefindeki paket durumlarını gösterir. Tekrar gönderim için olası paketler bu alt-matrislerin aşağıda anlatılacak olan kurallar dahilinde taranması neticesinde bulunur. Her röle, hedeflerden aldığı ACK/NACK'lerden edindiği sinyal-gürültü-oranına göre hedeflerden ikisine öncelik verir. En yüksek sinyal-gürültü-oranını veren hedef ikilisi seçilir. Kaynak düğüm ise hedef düğümler ara-

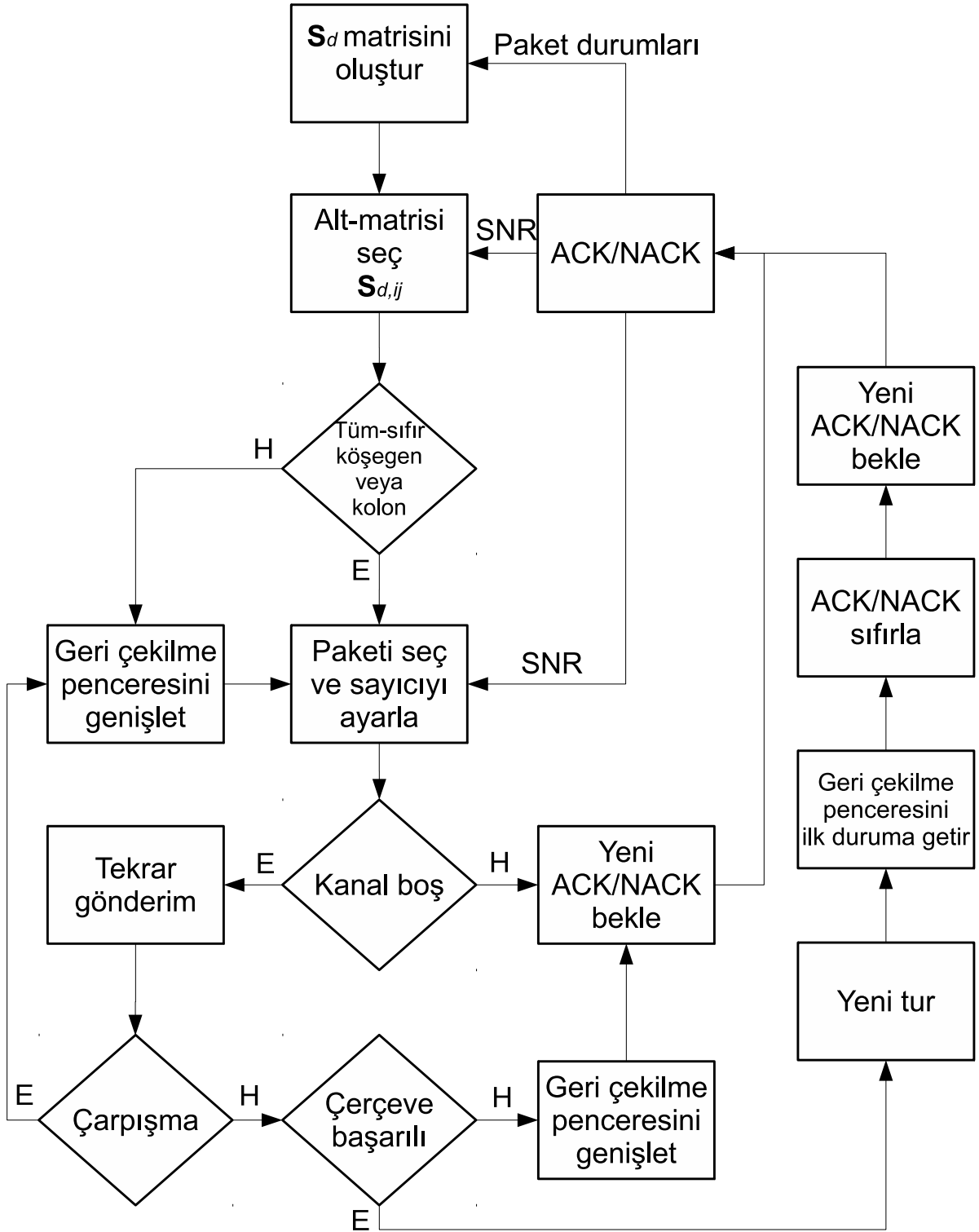
sında ayırım yapmaz ve tüm hedef ikililerini dikkate alır. Önerilen yöntemin akış şeması Şekil 5.2'de verilmiştir.

Tekrar gönderim için aday olan düğüm Şekil 5.2'de verilen kurallara göre gönderilecek paketi seçmektedir. Hedeflerden aldığı ACK/NACK'lere göre  $\mathbf{S}_d(k)$  matrisi oluşturulmaktadır. Yine ACK/NACK'lerden elde edilen sinyal-gürültü-oranı bilgilerine göreyse hedefler arasında önceliklendirme yapılarak  $\mathbf{S}_d(k)$  matrisinin  $\mathbf{S}_{d,ij}(k)$  alt-matrisleri belirlenmektedir. Tekrar gönderilecek paketleri belirlerken esas amaç  $\mathbf{S}_{d,ij}(k)$  alt-matrisindeki olabildiğince çok "sıfır"ı "bir" yapmaktır. Bunun için  $\mathbf{S}_{d,ij}(k)$  alt-matrisinde *tüm-sıfır köşegen veya tüm-sıfır kolonlar* aranır. Tüm-sıfır kolon hedeflerin her ikisi tarafından da alınamamış olan ortak  $\mathbf{q}_p$  paketini gösterirken tüm-sıfır köşegen ise iki farklı  $\mathbf{q}_m$  ve  $\mathbf{q}_n$  paketlerini işaret eder. Burada  $\mathbf{q}_m$  paketi  $D_i$  tarafından alınmış ancak  $D_j$  tarafından alınamamış paketi temsil ederken  $\mathbf{q}_n$  ise tam tersi yani  $D_i$  tarafından alınamamış  $D_j$  tarafından alınmış pakettir. İlk durumda yani tüm-sıfır kolon için  $\mathbf{q}_p$  paketi tekrar gönderim için seçilmektedir. İkinci durumda (tüm-sıfır köşegen için) ise  $\mathbf{q}_n \oplus \mathbf{q}_m$  ağ kodlanmış paketi seçilmektedir. Her iki seçim de tek gönderimde  $\mathbf{S}_{d,ij}(k)$  alt-matrisinin iki tane sıfırını bir yapmayı hedeflemektedir. Bu koşulu sağlayan birden fazla seçenek olması durumunda ise seçim rasgele yapılmaktadır. Öte yandan bu koşulu sağlayan seçenek bulunamazsa paket seçimi  $\mathbf{S}_d(k)$  matrisinin tek satırlı alt-matrisleri dikkate alınarak yapılır. Burada en yüksek sinyal-gürültü-oranı değerini veren hedef ilk tercih olur. Ancak tek satırlı alt-matrise göre yapılan paket tercihi iki sıfırını bir yapmayı garanti etmeyeceğinden tekrar gönderim için aday olan düğüm daha iyi durumda olabilecek adaylara öncelik vermek adına yukarıda anlatıldığı gibi geri çekilme penceresini genişletmek suretiyle kendini cezalandırmaktadır.

Yukarıda anlatılan strateji daha iyi anlaşılması için bir örnekle izah edilecektir. Bir çerçevenin içinde beş tane paket olduğu ( $\{\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \dots, \mathbf{q}_N\}$ ,  $N = 5$ ) ve  $k$ 'inci zaman dilimi sonunda paket durum matrisinin aşağıdaki gibi olduğu varsayalım:

$$\mathbf{S}_d(k) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5.7)$$

Birinci rölenin de ( $R_1$ ) dördüncü paket dışında diğer paketleri aldığı varsayılırsa,  $R_1$



Şekil 5.2. Tümegönderim ağı için C-NC-ARQ akış şeması

açısından paket durum matrisinin görünümü aşağıdaki gibidir:

$$\mathbf{S}_d(k) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & X & 0 \\ 1 & 0 & 1 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Buradaki  $X$ 'ler,  $R_1$ 'de başarısız olan dördüncü paketin işbirliğine dahil olamayacağını dolayısıyla  $R_1$  açısından ilgisiz olduğunu göstermektedir. Kalan matris, iki-satırlı  $\mathbf{S}_{d,ij}$  alt-matrislerine bölünmektedir.  $R_1$  ise ACK/NACK'lerden aldığı bilgilere göre en yüksek sinyal-gürültü-oranını veren iki hedefle ilişkili alt-matrise öncelik verecektir. (5.8) numaralı eşitlikte verilen matrisin tüm olası alt-matrisleri aşağıda gösterilmiştir:

$$\mathbf{S}_{d,12}(k) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & X & 0 \\ 1 & 0 & 1 & X & 0 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

$$\mathbf{S}_{d,13}(k) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

$$\mathbf{S}_{d,23}(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Dikkat edilirse, (5.9), (5.10) ve (5.11)'de daire içine alınmış kolonlar tüm-sıfır kolonları göstermektedir. Bu kolonlar, yukarıda izah edildiği üzere röle tarafından gönderildiği takdirde NACK olarak bildirilmiş iki ayrı paketin başarıyla alınması muhtemeldir. Örneğin  $\mathbf{S}_{d,12}$  ele alınır,  $\mathbf{q}_5$  paketinin gönderildiği durumda daha önce  $D_1$  ve  $D_2$ 'de başarısız olmuş  $\mathbf{q}_5$  paketi düzeltilebilir. Önerilen yöntemin esas amacı aynı anda iki sıfırı bir yapmak olduğundan böyle bir seçenek söz konusu olduğunda tek sıfırı bir yapmayı hedefleyen seçenekler değerlendirmeye alınmaz. İki sıfırı bir yapmanın diğer yolu ağ kodlaması yoluyla başarısız paketleri birleştirmektir. Bunu yapmak için iki-satırlı alt-matrislerde tüm-sıfır köşegenler aranmaktadır. Örneğin  $\mathbf{S}_{d,12}$  alt-matrisindeki tüm-sıfır köşegenler aşağıda belirtilmiştir:

$$\mathbf{S}_{d,12}(k) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & X & 0 \\ 1 & 0 & 1 & X & 0 \end{bmatrix} \quad (5.12)$$



Yukarıda gösterilen ikinci ve üçüncü kolonlarda yer alan tüm-sıfır köşegen,  $D_1$ 'in  $\mathbf{q}_2$  paketini aldığı ancak  $\mathbf{q}_3$  paketini kaybettiğini göstermektedir.  $D_2$  için ise bu durumun tersi söz konusudur. Ağ kodlaması yoluyla bu iki paketin birleştirilmesi ( $\mathbf{q}_2 \oplus \mathbf{q}_3$ ) ve tekrar gönderilmesi durumunda  $D_1$  ve  $D_2$ 'nin, sırasıyla,  $\mathbf{q}_3$  ve  $\mathbf{q}_2$  paketlerini düzeltmesi muhtemeldir. Benzer şekilde  $\mathbf{q}_1 \oplus \mathbf{q}_2$  paketini göndermek de  $D_1$  ve  $D_2$ 'de, sırasıyla,  $\mathbf{q}_1$  ve  $\mathbf{q}_2$  paketlerini düzeltebilecektir.

Sonuç olarak; (5.9), (5.10), (5.11), (5.12)'de verilen alt-matrislere bakarak  $k + 1$ 'inci zaman dilimi için  $R_1$ 'in tekrar gönderdiği takdirde iki sıfırı bir yapması muhtemel paket seçenekleri aşağıda verilmiştir:

$$\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3, \mathbf{q}_5, \mathbf{q}_1 \oplus \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_2 \oplus \mathbf{q}_3.$$

Yukarıda anlatıldığı gibi  $R_1$ 'in hangi hedef ikilisine öncelik vereceği ACK/NACK'lerden edindiği sinyal-gürültü-oranı bilgisine göre belirlenmektedir. Çizelge 5.1, üç farklı önceliklendirme durumuna göre gönderilebilecek paket seçeneklerini göstermektedir. Verilen bir önceliklendirme için birden fazla paket seçeneği olması durumunda ise seçim rasgele yapılmaktadır.

Öncelik	Muhtemel paketler
$D_1, D_2$	$\mathbf{q}_5, \mathbf{q}_1 \oplus \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_2 \oplus \mathbf{q}_3$
$D_1, D_3$	$\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_3, \mathbf{q}_5$
$D_2, D_3$	$\mathbf{q}_2, \mathbf{q}_5$

Çizelge 5.1.  $k + 1$ 'inci zaman dilimi için  $R_1$  tarafından gönderilmesi muhtemel paketler.

Dikkat edilirse tekrar gönderim neticesinde rölelerin daha önce alamadıkları paketleri düzeltmeleri söz konusu olabilir. Bu durum oluşursa bir sonraki tekrar gönderim için paket belirleme aşamasında rölenin  $\mathbf{S}_d(k)$  matrisindeki  $X$ 'leri dikkate alma şansı doğabilecektir.

### 5.3 Sayısal Sonuçlar

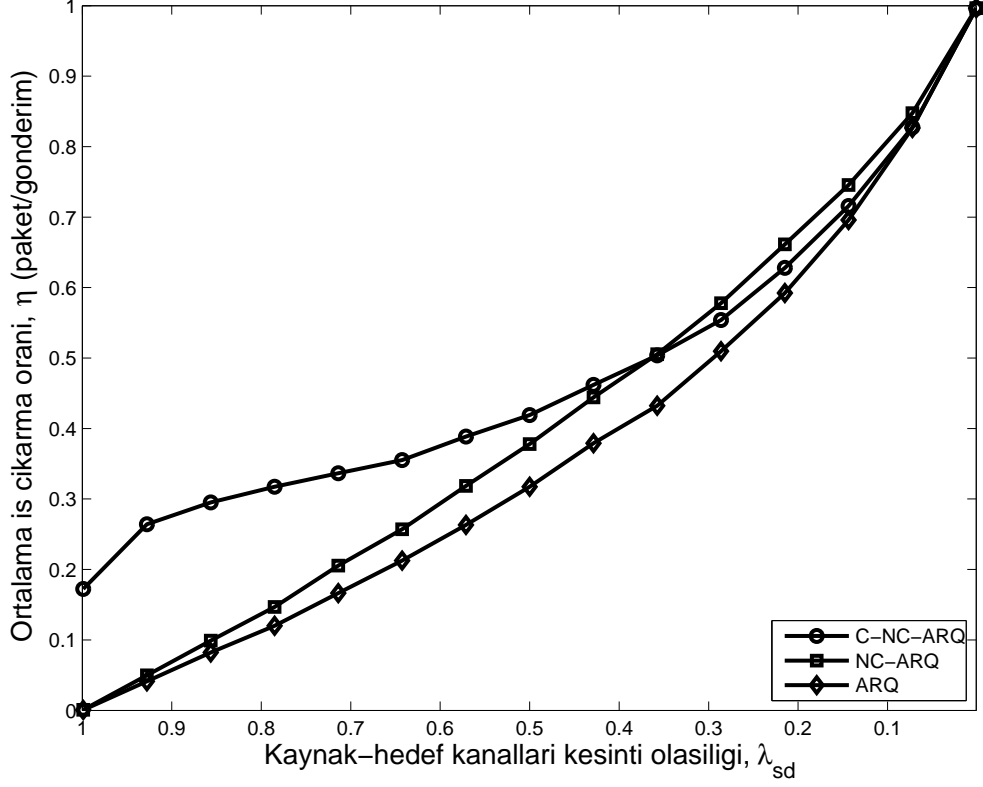
Bu bölümde tümegönderim ağı için önerilen C-NC-ARQ stratejisinin farklı kanal koşulları altında performans sonuçları ve kanal ilintisinin performansa etkisi araştırılacaktır. Önerilen C-NC-ARQ stratejisinin performansı işbirliğinin olmadığı ağ kodlamalı ARQ (NC-ARQ) yöntemi ve geleneksel ARQ ile karşılaştırılmıştır. Benzetim

sonuçları, sönümlenmeli kanalların (3.9) kullanılarak rasgele üretildiği Monte Carlo benzetimleri kullanılarak elde edilmiştir. Ortalama iş çıkarma oranı  $\eta = N/N_r$  şeklinde tanımlanmıştır. Burada  $N_r$ ,  $N$  paketten oluşan bir çerçevenin tüm hedeflere ulaşması için gereken ortalama iletim sayısını göstermektedir. Yukarıda anlatılan yöntemin hedef önceliklendirmesi ise ortalama sinyal-gürültü-oranına göre yapılmıştır.

İş çıkarma oranının ( $\eta$ ) kaynak-hedef kanallarının ortalama kesinti olasılığına ( $i = 1, 2, 3$  için  $\bar{\lambda}_{sd,i} = \bar{\lambda}_{sd}$ ) bağlı değişimi ilintisiz kanal durumu için ( $\rho = 0$ ) Şekil 5.3'te verilmiştir. Röle kanallarının ( $S-R_j$ ,  $R_1-R_2$ ,  $R_j-D_i$ ) sönümlenme paylarının kaynak-hedef kanallarından ( $S-D_i$ ) daha yüksek olduğu durum ele alınmıştır:  $F_r/F_s = 10$  dB,  $F_{sr,j} = F_{rr} = F_{rd,ji} = F_r$ ,  $F_{sd,i} = F_s$ . Beklendiği gibi kesinti olasılığının ( $\bar{\lambda}_{sd}$ ) 0.5 değerinden daha büyük olduğu durumda C-NC-ARQ yöntemi, röleler ile işbirliği yapmanın avantajını röle kanal koşullarının kaynak-hedef kanallarından daha iyi olduğu için görmektedir. Kesinti olasılığının 0.5 değerinden küçük olduğu durumda ise üç yöntemin performansları birbirine yaklaşmaktadır. Bunun nedeni  $\bar{\lambda}_{sd}$  düştükçe kaynak-hedef kanallarının iyileşmesi dolayısıyla tekrar gönderim ihtiyacının azalması ve sonucunda işbirliğine daha az gereksinim duyulmasıdır.

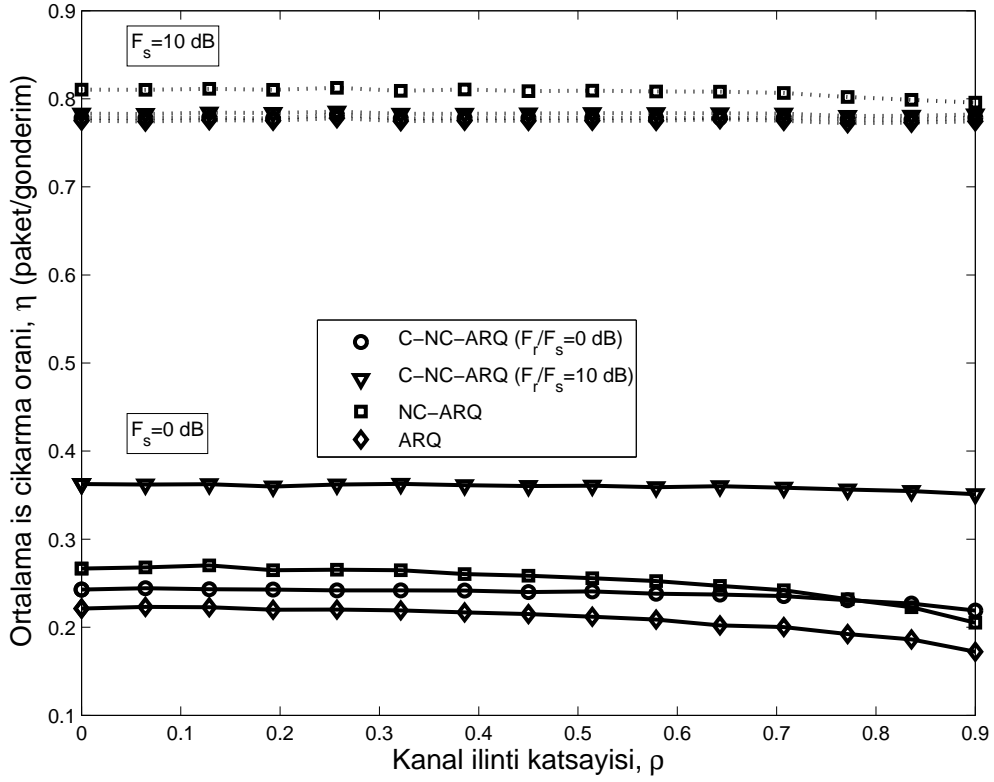
Kanal ilintisini etkisi Şekil 5.4'te verilmiştir. Kanal ilintisi arttıkça, özellikle kaynak-hedef kanallarının sönümlenme payının düşük olduğu durumda ( $F_s = 0$  dB), her üç yöntemin de performansı düşmektedir. Performans düşüşü  $F_r/F_s = 10$  dB durumu için C-NC-ARQ yönteminde en azdır. Bunun nedeni yüksek ilintiden dolayı oluşan uzun süreli kesintilere karşı röle ile işbirliğinin uzaysal çeşitleme sağlaması dolayısıyla kesintide olmayan kanaldan faydalanabilme şansının artmasıdır.

Şekil 5.5'te ilintisiz kanal durumu için ( $\rho = 0$ ) rölenin kaynak ve hedef düğümlere görece konumunun iş çıkarma oranı üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Görece konum, sönümlenme paylarının oranları ( $F_{rd}/F_{sd}$  ve  $F_{sr}/F_{sd}$ ) ile belirtilmektedir. Burada  $F_{sd}$  sabit tutulurken  $F_{sr}$  ve  $F_{rd}$  rölenin kaynak ve hedeflere görece konumu ile değiştirilmiştir. Görece konum  $\beta$  parametresi ile tanımlanmıştır:  $F_{sr}/F_{sd} = 1/\beta^2$  ve  $F_{rd}/F_{sd} = 1/(1 - \beta)^2$ . Bir başka ifadeyle  $\beta \rightarrow 1$  iken röleler hedeflere yaklaşmakta ve röle-hedef kanal koşulları iyileşmektedir. Kaynak-röle kanalları ise kötüleşmektedir. Öte yandan  $\beta \rightarrow 0$  iken röleler kaynağa yaklaşmakta ve yukarıdaki durumun tersi oluşmaktadır. Bu senaryoda röle kanallarının kaynak-hedef kanallarından her

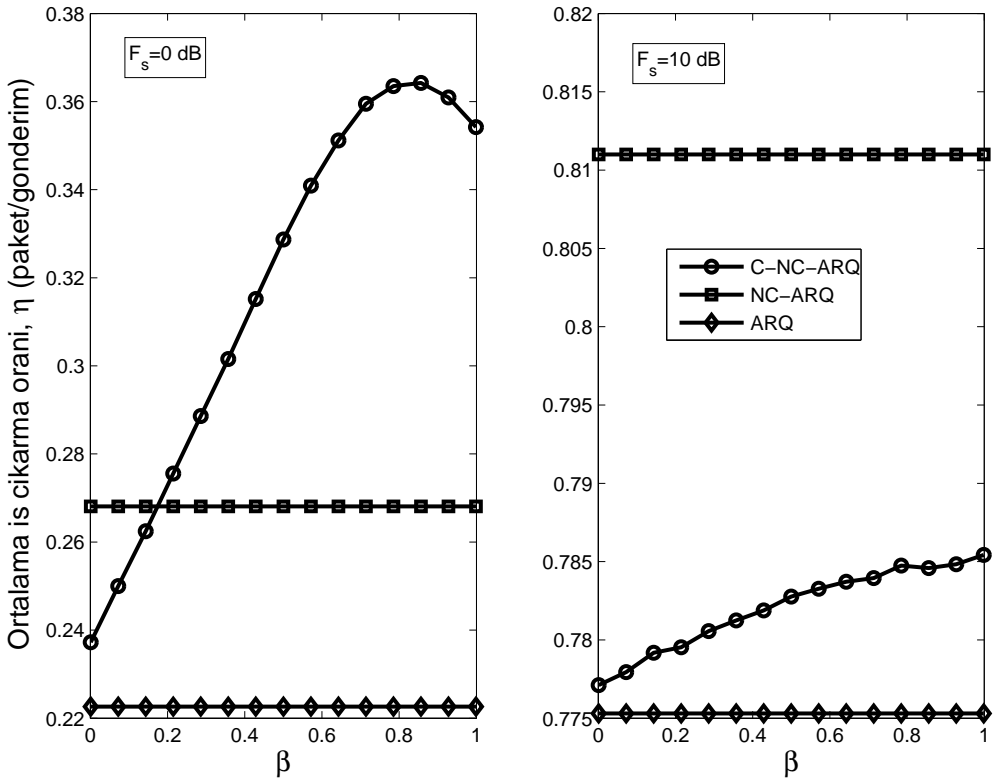


Şekil 5.3. Kesinti olasılığına bağlı iş çıkarma oranı. İlintisiz kanal durumu ( $\rho = 0$ ).  $F_r/F_s = 10$  dB.

zaman daha iyi olduğu varsayılmıştır.  $F_{sd} = 0$  dB iken,  $\beta$  parametresinin artışı röle-hedef kanallarının sönmüleme paylarını iyileştirmekte ve sonuç olarak röleler ile işbirliğinin iş çıkarma oranı üzerine olumlu etkisi görülmektedir. Ancak bununla birlikte  $\beta > 0.8$  durumu için  $\beta$  parametresinin artışı iş çıkarma oranı üzerinde olumsuz etki göstermektedir. Bu durumun nedeni rölelerin kaynaktan uzaklaşmalarından dolayı kaynak-röle kanallarının daha sık kesintiye uğramaları ve işbirliği şansının azalmasıdır. Bundan dolayı  $\beta < 0.8$  durumuna kıyasla röleler ile işbirliğinin daha az katkısı olmaktadır. Dikkat edilirse, C-NC-ARQ ile NC-ARQ yöntemleri arasındaki temel fark işbirliğinin katkısıdır. Bu katkı ise doğrudan kaynak-röle ve röle-hedef kanal koşullarına bağlıdır. Bu durumda işbirliğinin katkısının azami olduğu en uygun nokta bulunabilmektedir.



Şekil 5.4. Farklı kanal sönümlenme payı oranları için kanal ilintisine bağlı iş çıkarma oranı.



Şekil 5.5. Rölelerin görece konumuna bağlı iş çıkarma oranı.  $F_{rr}/F_{sd} = 10$  dB.

## 6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında tekrar gönderim fazına ağ kodlamasını entegre eden özgün işbirlikli ARQ yöntemleri önerilmiş ve önerilen yöntemler iki farklı ağ senaryosu için incelenmiştir.

Ele alınan senaryoların ilkinde kaynaklar arasında doğrudan bağlantının olduğu iki yönlü röleleme kanalı için önerilen işbirlikli ağ kodlamalı ARQ (C-NC-ARQ) yönteminin ilintili kanallardaki iş çıkarma oranının bulunabilmesi için analitik bir yöntem çıkarılmıştır. Önerilen yöntemin farklı kanal koşullarında ağ kodlaması yapmayan işbirlikli ARQ yöntemleri ve geleneksel ARQ ile performans sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre röle kanallarının ortalama kesinti olasılığı kaynaklar-arası kanalın ortalama kesinti olasılığından daha kötü olmadığı ve kanalın yüksek hızda sönümlenmediği sürece önerilen yöntemlerin performansı arttırdığı gözlenmiştir. Ağ kodlamasının katkısı ise röle kanallarının sönümlenme paylarının kaynaklar-arası kanaldan 10 dB veya daha büyük olduğunda görülmektedir. Kanalın zamandaki ilintisinin önerilen yöntemlerin kazancını genel olarak arttırdığı görülmüştür. Önerilen üç farklı stratejiden (RT-AK, ST-AK ve KT-AK), röle tabanlı stratejinin (RT-AK) en sade olduğu ve röle kanallarının ortalama güvenilirliğinin yüksek olduğu durumda tercih edilebileceği sonucuna varılmıştır. Kanal bilgisine dayalı (KT-AK) stratejinin ise düğümlerin en son bilinen kanal durumlarının kaydını tutabildikleri takdirde en iyi seçenek olduğu görülmektedir.

Tez kapsamında ele alınan ikinci senaryo tek kaynağın birden fazla hedefe bir grup paket gönderdiği tümegönderim ağıdır. Bu ağ senaryosu için özgün bir C-NC-ARQ yöntemi önerilmiş ve iş çıkarma oranı performansı Monte Carlo benzetimleri yoluyla elde edilmiştir. Önerilen yöntemin performans sonuçları farklı kanal koşulları için ağ kodlamalı ARQ ve geleneksel ARQ ile karşılaştırılmıştır. Ele alınan ilk senaryoda olduğu gibi kanal ilintisini etkisini incelemek için kanal, ikili Markov modeli ile gösterilmiştir. Röle kanal koşullarının kaynak-hedef kanallarınıninkinden daha iyi olduğu durumda röleler ile işbirliği yapmanın olumlu etkisi olduğu ve iş çıkarma oranını arttırdığı görülmüştür.

## KAYNAKLAR

- [1] E. C. van der Meulen, "Three-terminal communication channel," *Advanced Applied Probability*, vol. 3, pp. 120–154, **1971**.
- [2] T. M. Cover ve A. A. E. Gamal, "Capacity theorems for the relay channel," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52(5), pp. 572–584, **1979**.
- [3] A. Sendonaris, E. Erkip, ve B. Aazhang, "User cooperation diversity-Part I: System description," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 51(11), pp. 1927–1938, **2003**.
- [4] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, ve G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 50(12), pp. 3062–3080, **2004**.
- [5] A. Nosratinia, T. E. Hunter, ve A. Hedayat, "Cooperative communication in wireless networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 42(10), pp. 74–80, **2004**.
- [6] B. Zhao ve M. C. Valenti, "Practical relay networks: A generalization of hybrid-ARQ," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23(1), pp. 7–18, **2005**.
- [7] M. Dianati, X. Ling, K. Naik, ve X. Shen, "A node-cooperative ARQ scheme for wireless ad hoc networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 55(3), pp. 1032–1044, **2006**.
- [8] G. Yu, Z. Zhang, ve P. Qiu, "Cooperative ARQ in wireless networks: Protocols description and performance analysis," *IEEE International Conference on Communications, ICC*, pp. 3608–3614, **2006**.
- [9] I. Stanojev, O. Simeone, Y. Bar-Ness, ve C. You, "Performance of multi-relay collaborative hybrid-ARQ protocols over fading channels," *IEEE Communications Letters*, vol. 10(7), pp. 522–524, **2006**.
- [10] I. Byun ve K. S. Kim, "Cooperative hybrid-ARQ protocols: Unified frameworks for protocol analysis," *ETRI Journal*, vol. 33(5), pp. 759–769, **2011**.
- [11] X. He ve F. Li, "An automatic cooperative retransmission MAC protocol in wireless local area networks," *European Wireless Conference (EW)*, pp. 228–233, **2009**.
- [12] K. Lu, S. Fu, ve Y. Qian, "Increasing the throughput of wireless lans via cooperative retransmission," *IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM*, pp. 5231–5235, **2007**.
- [13] J. Alonso-Zarate, E. Kartsakli, C. Verikoukis, ve L. Alonso, "Persistent RSCMA: A MAC protocol for a distributed cooperative ARQ scheme in wireless networks," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2008, Article ID 817401, 13 pages, **2008**.

- [14] L. Le ve E. Hossain, "An analytical model for ARQ cooperative diversity in multi-hop wireless networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7(5), pp. 1786–1791, **2008**.
- [15] J. S. Harsini, F. Lahouti, M. Levorato, ve M. Zorzi, "Analysis of non-cooperative and cooperative type II hybrid ARQ protocols with AMC over correlated fading channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 10(3), pp. 877–889, **2011**.
- [16] N. Marchenko ve C. Bettstetter, "Cooperative ARQ with relay selection: An analytical framework using semi-Markov processes," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 63(1), pp. 178–190, **2013**.
- [17] H. A. Ngo ve L. Hanzo, "Hybrid automatic-repeat-request systems for cooperative wireless communications," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 16(1), pp. 25–45, **2014**.
- [18] I. Krikidis, "Distributed truncated ARQ protocol for cooperative diversity networks," *IET Communications*, vol. 1(6), pp. 1212–1217, **2007**.
- [19] C. L. Wang, T.-N. Cho, W.-C. Lo, ve J.-Y. Chen, "Efficient ARQ protocols for a two-way amplify-and-forward relaying system," *IEEE 77th Vehicular Technology Conference, Spring, VTC*, pp. 1–5, **2013**.
- [20] K. Azarian, H. E. Gamal, ve P. Schniter, "On the optimality of the ARQ-DDF protocol," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 54(4), pp. 1718–1724, **2008**.
- [21] S. Lee, W. Su, S. Batalama, ve J. D. Matyjas, "Cooperative decode-and-forward ARQ relaying: Performance analysis and power optimization," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9(8), pp. 2632–2642, **2010**.
- [22] R. Ahlswede, N. Cai, S.-Y. R. Li, ve R. W. Yeung, "Network information flow," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 46(4), pp. 1204–1216, **2000**.
- [23] S. R. Li, R. W. Yeung, ve C. Ning, "Linear network coding," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 49(2), pp. 371–381, **2003**.
- [24] R. Koetter ve M. Medard, "An algebraic approach to network coding," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 11(5), pp. 782–795, **2003**.
- [25] S. Zhang, S. C. Liew, ve P. P. Lam, "Hot topic: Physical-layer network coding," *12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MOBICOM*, pp. 358–365, **2006**.
- [26] C. Fragouli, D. Katabi, A. Markopoulou, M. Medard, ve H. Rahul, "Wireless network coding: Opportunities & challenges," *IEEE Military Communications Conference, MILCOM*, pp. 1–8, **2007**.
- [27] P. Popovski ve H. Yomo, "Physical network coding in two-way wireless relay channels," *IEEE International Conference on Communications, ICC*, pp. 707–712, **2007**.

- [28] S. Katti, I. Maric, A. Goldsmith, D. Katabi, ve M. Medard, "Joint relaying and network coding in wireless networks," *IEEE International Symposium on Information Theory, ISIT*, pp. 1101–1105, **2007**.
- [29] S. Katti, H. Rahul, H. Wenjun, D. Katabi, M. Medard, ve J. Crowcroft, "XORs in the air: Practical wireless network coding," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 16(3), pp. 497–510, **2008**.
- [30] C. H. Liu ve F. Xue, "Network coding for two-way relaying: achievable rate regions, sum rate and opportunistic scheduling," *IEEE International Conference on Communications, ICC*, pp. 1044–1049, **2008**.
- [31] W. Li, J. Li, ve P. Fan, "Network coding for two-way relaying networks over rayleigh fading channels," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59(9), pp. 4476–4488, **2010**.
- [32] B. Nazer ve M. Gastpar, "Reliable physical layer network coding," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99(3), pp. 438–460, **2011**.
- [33] R. Bassoli, H. Marques, J. Rodriguez, K. W. Shum, ve R. Tafazolli, "Network coding theory: A survey," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 15(4), pp. 1950–1978, **2013**.
- [34] J. K. Sundararajan, D. Shah, ve M. Medard, "ARQ for network coding," *IEEE International Symposium on Information Theory, ISIT*, pp. 1651–1655, **2008**.
- [35] T. Tran, T. Nguyen, B. Bose, ve V. Gopal, "A hybrid network coding technique for single-hop wireless networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 27(5), pp. 685–698, **2009**.
- [36] D. Nguyen, T. Tran, T. Nguyen, ve B. Bose, "Wireless broadcast using network coding," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58(2), pp. 914–925, **2009**.
- [37] S. Sorour ve S. Valaee, "An adaptive network coded retransmission scheme for single-hop wireless multicast broadcast services," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 19(3), pp. 869–878, **2011**.
- [38] Q. T. Vien, L.-N. Tran, ve H. X. Nguyen, "Network coding-based ARQ retransmission strategies for two-way wireless relay networks," *International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks, SoftCOM*, pp. 180–184, **2010**.
- [39] P. Fan, C. Zhi, C. Wei, ve K. B. Letaief, "Reliable relay assisted wireless multicast using network coding," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 27(5), pp. 749–762, **2009**.
- [40] Q. T. Vien, L.-N. Tran, ve E.-K. Hong, "Network coding-based retransmission for relay aided multisource multicast networks," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2011:643920, **2011**.



- [41] S. Qi, L. Yonghua, H. Zhiqiang, ve L. Jiaru, "On reliable multicast with network coding-ARQ for relay cooperation cells," *IEEE 75th Vehicular Technology Conference, Spring, VTC*, pp. 1–5, **2012**.
- [42] A. Munari, F. Rossetto, ve M. Zorzi, "Phoenix: Making cooperation more efficient through network coding in wireless networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8(10), pp. 5248–5258, **2009**.
- [43] X. Shi, J. Ge, Y. Ji, ve C. Sun, "Network-coding-based hybrid ARQ for two-way relaying," *Fourth International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems*, pp. 536–540, **2012**.
- [44] A. Antonopoulos, C. Verikoukis, C. Skianis, ve O. B. Akan, "Energy efficient network-coding based MAC for cooperative ARQ wireless networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 11, pp. 190–200, **2013**.
- [45] IEEE 802.16 Relay Task Group, "<http://www.ieee802.org/16/relay/>," **2008**.
- [46] Q. Li, R. Q. Hu, Y. Qian, ve G. Wu, "Cooperative communications for wireless networks: techniques and applications in LTE-advanced systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19(2), pp. 22–29, **2012**.
- [47] T. Tabet, S. Dusad, ve R. Knopp, "Diversity-multiplexing-delay tradeoff in half-duplex ARQ relay channels," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 53(10), pp. 3797–3805, **2007**.
- [48] L. Weng ve R. D. Murch, "Achievable diversity-multiplexing-delay tradeoff for ARQ cooperative broadcast channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7(5), pp. 3797–3805, **2008**.
- [49] S. Tomasin, M. Levorato, ve M. Zorzi, "Steady state analysis of coded cooperative networks with HARQ protocol," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 57(8), pp. 2391–2401, **2009**.
- [50] I. Cerutti, A. Fumagalli, ve P. Gupta, "Delay models of single-source single-relay cooperative ARQ protocols in slotted radio networks with Poisson frame arrivals," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 16(2), pp. 371–382, **2008**.
- [51] H. Boujemaa, "Delay analysis of cooperative truncated HARQ with opportunistic relaying," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58(9), pp. 4795–4804, **2009**.
- [52] C. Zhang, W. Wang, ve G. Wei, "Design of ARQ protocols for two-user cooperative diversity systems in wireless networks," *Computer Communications*, vol. 32(6), pp. 1111–1117, **2009**.
- [53] R. Tutgun ve E. Aktas, "Cooperative network coded ARQ strategies for two way relay channels," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. PP(99), p. 1, **2014**.

- [54] R. Tutgun ve E. Aktas, "İki-yönlü röleme kanalında işbirlikli ağ kodlamalı tekrar gönderim isteği," *IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı, SİU*, pp. 1–4, **2013**.
- [55] R. Tutgun ve E. Aktas, "Cooperative network coded ARQ strategy for broadcast networks," *IEEE International Conference on Communications, ICC*, pp. 1–6, **2015**.
- [56] G. Caire, G. Taricco, ve E. Biglieri, "Optimum power control over fading channels," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 45(5), pp. 1468–1489, **1999**.
- [57] E. Malkamaki ve H. Leib, "Coded diversity on block-fading channels," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 45(2), pp. 771–781, **1999**.
- [58] A. Guillen i Fabregas ve G. Caire, "Coded modulation in the block-fading channel: coding theorems and code construction," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52(1), pp. 91–114, **2006**.
- [59] D. Tse ve P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge University Press, New York, **2005**.
- [60] Y. Polyanskiy, H. V. Poor, ve S. Verdú, "Channel coding rate in the finite block-length regime," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 56(5), pp. 2307–2359, **2010**.
- [61] H. S. Wang ve N. Moayeri, "Finite-state Markov channel – a useful model for radio communication channels," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 44(1), pp. 163–171, **1995**.
- [62] M. Zorzi, R. R. Rao, ve L. B. Milstein, "Error statistics in data transmission over fading channels," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 46(11), pp. 1468–1477, **1998**.
- [63] Q. Zhang ve S. A. Kassam, "Finite-state Markov model for Rayleigh-fading channels," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 47(11), pp. 1688–1692, **1999**.
- [64] F. Babich ve G. Lombardi, "A Markov model for the mobile propagation channel," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 49(1), pp. 63–73, **2000**.
- [65] E. N. Gilbert, "Capacity of a burst-noise channel," *Bell System Technical Journal*, vol. 39, pp. 1253–1265.
- [66] E. O. Elliot, "Estimates of error rates for codes on burst-noise channels," *Bell System Technical Journal*, vol. 42, pp. 1977–1997, **1963**.
- [67] M. Zorzi, R. R. Rao, ve L. B. Milstein, "ARQ error control for fading mobile radio channels," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 46(2), pp. 445–455, **1997**.
- [68] C. Pimentel, T. H. Falk, ve L. Lisboa, "Finite-state Markov modeling of correlated Rician-fading channels," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 53(5), pp. 1491–1501, **2004**.

- [69] H. Kong ve E. Shwedyk, "A hidden Markov model (HMM)-based MAP receiver for Nakagami fading channels," *IEEE International Symposium on Information Theory, ISIT*, p. 210, **1995**.
- [70] W. C. Jakes, *Microwave Mobile Communications*. Wiley, New York, NY, **1974**.

## EKLER

### EK 1: TÜRKÇE-İNGİLİZCE TERİMLER SÖZLÜĞÜ

ağ kodlaması	: network coding
alt durum	: sub-state
ayrık-zaman	: discrete-time
bağlantı katmanı	: link layer
blok sönümlleme	: block fading
çekişme periyodu	: contention period
çerçeve	: frame
çeşitleme	: diversity
çoğagönderim	: multicast
çoğullama	: multiplexing
çoklu erişim	: multiple access
çöz-ve-ilet	: decode-and-forward
dağıtık koordinasyon	: distributed coordination
döngüsel artıklık denetim kodu	: cyclic redundancy check code
durum değikeni	: state variable
durum modeli	: state model
dur-ve-bekle	: stop-and-wait
düğüm	: node
düz sönümlleme	: flat fading
evre uyumluluk zamanı	: coherence time
fiziksel katman	: physical layer
geri çekilme penceresi	: back off window
geri-dön-N	: go-back-N
gönderim	: transmission
iki yönlü röleleme	: two way relay
ilinti	: correlation
iş çıkarma oranı	: throughput
işbirlikli haberleşme	: cooperative communication
kararlı-durum	: steady-state

karşılıklı bilgi	: mutual information
kesinti olasılığı	: outage probability
Markov zinciri	: Markov chain
melez ARQ	: hybrid ARQ
müşterek eniyileme	: joint optimization
olumlu geribildirim	: acknowledgement
olumsuz geribildirim	: negative acknowledgement
ortam erişim kontrol katmanı	: medium access control layer
röle	: relay
seçici tekrar	: selective repeat
sinyal-gürültü-oranı	: signal-to-noise-ratio
sonlu-durum	: finite-state
sönümlenme	: fading
sönümlenme payı	: fading margin
tek-atlamalı	: single-hop
tekrar gönderici	: retransmitter
tekrar gönderim isteği	: automatic repeat request
toplanır Gauss gürültüsü	: additive Gaussian noise
tur	: round
tümegönderim	: broadcast
uzaysal çeşitleme	: spatial diversity
yarı-dupleks	: half-duplex
yükselt-ve-ilet	: amplify-and-forward
zaman dilimi	: slot
zamanla değişen	: time varying

## EK 2: DURUMLAR-ARASI GEÇİŞ TABLOLARI

$W(k-1)$	$s_c[k-1]$	$s_p[k]$	$s_r[k]$	$W(k)$
$W_0(0)$	000	00	00	$W_1(0, \cdot)$
$W_0(1)$	001	10	00	$W_1(2, \cdot)$
$W_0(2)$	010	00	00	$W_1(0, \cdot)$
$W_0(3)$	011	10	00	$W_1(2, \cdot)$
$W_0(4)$	100	00	10	$W_1(1, \cdot)$
$W_0(5)$	101	10	10	$W_1(3, \cdot)$
$W_0(6)$	110	00	10	$W_1(1, \cdot)$
$W_0(7)$	111	10	10	$W_1(3, \cdot)$

Çizelge .1.  $T_0$  durumundan geçiş tablosu.

$W(k-1)$	$s_p[k-1]$	$s_r[k-1]$	$s_c[k-1]$	$s_p[k]$	$s_r[k]$	$W(k)$
$W_1(0,0)$	00	00	000	00	00	$W_2(0, \cdot)$
$W_1(0,1)$	00	00	001	01	00	$W_2(4, \cdot)$
$W_1(0,2)$	00	00	010	00	01	$W_2(1, \cdot)$
$W_1(0,3)$	00	00	011	01	01	$W_2(5, \cdot)$
$W_1(0,4)$	00	00	100	00	00	$W_2(0, \cdot)$
$W_1(0,5)$	00	00	101	01	00	$W_2(4, \cdot)$
$W_1(0,6)$	00	00	110	00	01	$W_2(1, \cdot)$
$W_1(0,7)$	00	00	111	01	01	$W_2(5, \cdot)$
$W_1(1,0)$	00	10	000	00	10	$W_2(2, \cdot)$
$W_1(1,1)$	00	10	001	01	10	$W_2(6, \cdot)$
$W_1(1,2)$	00	10	010	00	11	$W_2(3, \cdot)$
$W_1(1,3)$	00	10	011	01	11	$W_2(7, \cdot)$
$W_1(1,4)$	00	10	100	00	10	$W_2(2, \cdot)$
$W_1(1,5)$	00	10	101	01	10	$W_2(6, \cdot)$
$W_1(1,6)$	00	10	110	00	11	$W_2(3, \cdot)$
$W_1(1,7)$	00	10	111	01	11	$W_2(7, \cdot)$
$W_1(2,0)$	10	00	000	10	00	$W_2(8, \cdot)$
$W_1(2,1)$	10	00	001	11	00	$W_0(\cdot)$
$W_1(2,2)$	10	00	010	10	01	$W_2(9, \cdot)$
$W_1(2,3)$	10	00	011	11	01	$W_0(\cdot)$
$W_1(2,4)$	10	00	100	10	00	$W_2(8, \cdot)$
$W_1(2,5)$	10	00	101	11	00	$W_0(\cdot)$
$W_1(2,6)$	10	00	110	10	01	$W_2(9, \cdot)$
$W_1(2,7)$	10	00	111	11	01	$W_0(\cdot)$
$W_1(3,0)$	10	10	000	10	10	$W_2(10, \cdot)$
$W_1(3,1)$	10	10	001	11	10	$W_0(\cdot)$
$W_1(3,2)$	10	10	010	10	11	$W_2(11, \cdot)$
$W_1(3,3)$	10	10	011	11	11	$W_0(\cdot)$
$W_1(3,4)$	10	10	100	10	10	$W_2(10, \cdot)$
$W_1(3,5)$	10	10	101	11	10	$W_0(\cdot)$
$W_1(3,6)$	10	10	110	10	11	$W_2(11, \cdot)$
$W_1(3,7)$	10	10	111	11	11	$W_0(\cdot)$

Çizelge .2. RT-AK ve RT için  $T_1$  durumundan geçiş tablosu.

$k-1$				$k$			$k-1$				$k$			$k-1$				$k$		
$W(k-1)$	$s_p$	$s_r$	$s_c$	$s_p$	$s_r$	$W(k)$	$W(k-1)$	$s_p$	$s_r$	$s_c$	$s_p$	$s_r$	$W(k)$	$W(k-1)$	$s_p$	$s_r$	$s_c$	$s_p$	$s_r$	$W(k)$
$W_2(0,0)$	00	00	000	00	00	$W_2(0,\cdot)$	$W_2(4,0)$	01	00	000	01	00	$W_2(4,\cdot)$	$W_2(8,0)$	10	00	000	10	00	$W_2(8,\cdot)$
$W_2(0,1)$	00	00	001	10	00	$W_2(8,\cdot)$	$W_2(4,1)$	01	00	001	11	00	$W_0(\cdot)$	$W_2(8,1)$	10	00	001	11	00	$W_0(\cdot)$
$W_2(0,2)$	00	00	010	00	00	$W_2(0,\cdot)$	$W_2(4,2)$	01	00	010	01	00	$W_2(4,\cdot)$	$W_2(8,2)$	10	00	010	10	01	$W_2(9,\cdot)$
$W_2(0,3)$	00	00	011	10	00	$W_2(8,\cdot)$	$W_2(4,3)$	01	00	011	11	00	$W_0(\cdot)$	$W_2(8,3)$	10	00	011	11	01	$W_0(\cdot)$
$W_2(0,4)$	00	00	100	00	10	$W_2(2,\cdot)$	$W_2(4,4)$	01	00	100	01	10	$W_2(6,\cdot)$	$W_2(8,4)$	10	00	100	10	00	$W_2(8,\cdot)$
$W_2(0,5)$	00	00	101	10	10	$W_2(10,\cdot)$	$W_2(4,5)$	01	00	101	11	10	$W_0(\cdot)$	$W_2(8,5)$	10	00	101	11	00	$W_0(\cdot)$
$W_2(0,6)$	00	00	110	00	10	$W_2(2,\cdot)$	$W_2(4,6)$	01	00	110	01	10	$W_2(6,\cdot)$	$W_2(8,6)$	10	00	110	10	01	$W_2(9,\cdot)$
$W_2(0,7)$	00	00	111	10	10	$W_2(10,\cdot)$	$W_2(4,7)$	01	00	111	11	10	$W_0(\cdot)$	$W_2(8,7)$	10	00	111	11	01	$W_0(\cdot)$
$W_2(1,0)$	00	01	000	00	01	$W_2(1,\cdot)$	$W_2(5,0)$	01	01	000	01	01	$W_2(5,\cdot)$	$W_2(9,0)$	10	01	000	10	01	$W_2(9,\cdot)$
$W_2(1,1)$	00	01	001	10	01	$W_2(9,\cdot)$	$W_2(5,1)$	01	01	001	11	01	$W_0(\cdot)$	$W_2(9,1)$	10	01	001	10	01	$W_2(9,\cdot)$
$W_2(1,2)$	00	01	010	00	01	$W_2(1,\cdot)$	$W_2(5,2)$	01	01	010	01	01	$W_2(5,\cdot)$	$W_2(9,2)$	10	01	010	10	01	$W_2(9,\cdot)$
$W_2(1,3)$	00	01	011	10	01	$W_2(9,\cdot)$	$W_2(5,3)$	01	01	011	11	01	$W_0(\cdot)$	$W_2(9,3)$	10	01	011	10	01	$W_2(9,\cdot)$
$W_2(1,4)$	00	01	100	00	11	$W_2(3,\cdot)$	$W_2(5,4)$	01	01	100	01	11	$W_2(7,\cdot)$	$W_2(9,4)$	10	01	100	11	01	$W_0(\cdot)$
$W_2(1,5)$	00	01	101	10	11	$W_2(11,\cdot)$	$W_2(5,5)$	01	01	101	11	11	$W_0(\cdot)$	$W_2(9,5)$	10	01	101	11	01	$W_0(\cdot)$
$W_2(1,6)$	00	01	110	00	11	$W_2(3,\cdot)$	$W_2(5,6)$	01	01	110	01	11	$W_2(7,\cdot)$	$W_2(9,6)$	10	01	110	11	01	$W_0(\cdot)$
$W_2(1,7)$	00	01	111	10	11	$W_2(11,\cdot)$	$W_2(5,7)$	01	01	111	11	11	$W_0(\cdot)$	$W_2(9,7)$	10	01	111	11	01	$W_0(\cdot)$
$W_2(2,0)$	00	10	000	00	10	$W_2(2,\cdot)$	$W_2(6,0)$	01	10	000	01	10	$W_2(6,\cdot)$	$W_2(10,0)$	10	10	000	10	10	$W_2(10,\cdot)$
$W_2(2,1)$	00	10	001	00	10	$W_2(2,\cdot)$	$W_2(6,1)$	01	10	001	01	10	$W_2(6,\cdot)$	$W_2(10,1)$	10	10	001	11	10	$W_0(\cdot)$
$W_2(2,2)$	00	10	010	10	10	$W_2(10,\cdot)$	$W_2(6,2)$	01	10	010	11	10	$W_0(\cdot)$	$W_2(10,2)$	10	10	010	10	11	$W_2(11,\cdot)$
$W_2(2,3)$	00	10	011	10	10	$W_2(10,\cdot)$	$W_2(6,3)$	01	10	011	11	10	$W_0(\cdot)$	$W_2(10,3)$	10	10	011	11	11	$W_0(\cdot)$
$W_2(2,4)$	00	10	100	00	10	$W_2(2,\cdot)$	$W_2(6,4)$	01	10	100	01	10	$W_2(6,\cdot)$	$W_2(10,4)$	10	10	100	10	10	$W_2(10,\cdot)$
$W_2(2,5)$	00	10	101	00	10	$W_2(2,\cdot)$	$W_2(6,5)$	01	10	101	01	10	$W_2(6,\cdot)$	$W_2(10,5)$	10	10	101	11	10	$W_0(\cdot)$
$W_2(2,6)$	00	10	110	10	10	$W_2(10,\cdot)$	$W_2(6,6)$	01	10	110	11	10	$W_0(\cdot)$	$W_2(10,6)$	10	10	110	10	11	$W_2(11,\cdot)$
$W_2(2,7)$	00	10	111	10	10	$W_2(10,\cdot)$	$W_2(6,7)$	01	10	111	11	10	$W_0(\cdot)$	$W_2(10,7)$	10	10	111	11	11	$W_0(\cdot)$
$W_2(3,0)$	00	11	000	00	11	$W_2(3,\cdot)$	$W_2(7,0)$	01	11	000	01	11	$W_2(7,\cdot)$	$W_2(11,0)$	10	11	000	10	11	$W_2(11,\cdot)$
$W_2(3,1)$	00	11	001	00	11	$W_2(3,\cdot)$	$W_2(7,1)$	01	11	001	01	11	$W_2(7,\cdot)$	$W_2(11,1)$	10	11	001	10	11	$W_2(11,\cdot)$
$W_2(3,2)$	00	11	010	10	11	$W_2(11,\cdot)$	$W_2(7,2)$	01	11	010	11	11	$W_0(\cdot)$	$W_2(11,2)$	10	11	010	10	11	$W_2(11,\cdot)$
$W_2(3,3)$	00	11	011	10	11	$W_2(11,\cdot)$	$W_2(7,3)$	01	11	011	11	11	$W_0(\cdot)$	$W_2(11,3)$	10	11	011	10	11	$W_2(11,\cdot)$
$W_2(3,4)$	00	11	100	01	11	$W_2(7,\cdot)$	$W_2(7,4)$	01	11	100	01	11	$W_2(7,\cdot)$	$W_2(11,4)$	10	11	100	11	11	$W_0(\cdot)$
$W_2(3,5)$	00	11	101	01	11	$W_2(7,\cdot)$	$W_2(7,5)$	01	11	101	01	11	$W_2(7,\cdot)$	$W_2(11,5)$	10	11	101	11	11	$W_0(\cdot)$
$W_2(3,6)$	00	11	110	11	11	$W_0(\cdot)$	$W_2(7,6)$	01	11	110	11	11	$W_0(\cdot)$	$W_2(11,6)$	10	11	110	11	11	$W_0(\cdot)$
$W_2(3,7)$	00	11	111	11	11	$W_0(\cdot)$	$W_2(7,7)$	01	11	111	11	11	$W_0(\cdot)$	$W_2(11,7)$	10	11	111	11	11	$W_0(\cdot)$

Çizelge .3. RT-AK için  $T_2$  durumundan geçiş tablosu.



$k-1$				$k$			$k-1$				$k$			$k-1$				$k$		
$W(k-1)$	$s_p$	$s_r$	$s_c$	$s_p$	$s_r$	$W(k)$	$W(k-1)$	$s_p$	$s_r$	$s_c$	$s_p$	$s_r$	$W(k)$	$W(k-1)$	$s_p$	$s_r$	$s_c$	$s_p$	$s_r$	$W(k)$
$W_2(0,0)$	00	00	000	00	00	$W_2(0,\cdot)$	$W_2(4,0)$	01	00	000	01	00	$W_2(4,\cdot)$	$W_2(8,0)$	10	00	000	10	00	$W_2(8,\cdot)$
$W_2(0,1)$	00	00	001	10	00	$W_2(8,\cdot)$	$W_2(4,1)$	01	00	001	11	00	$W_0(\cdot)$	$W_2(8,1)$	10	00	001	11	00	$W_0(\cdot)$
$W_2(0,2)$	00	00	010	00	00	$W_2(0,\cdot)$	$W_2(4,2)$	01	00	010	01	00	$W_2(4,\cdot)$	$W_2(8,2)$	10	00	010	10	01	$W_2(9,\cdot)$
$W_2(0,3)$	00	00	011	10	00	$W_2(8,\cdot)$	$W_2(4,3)$	01	00	011	11	00	$W_0(\cdot)$	$W_2(8,3)$	10	00	011	11	01	$W_0(\cdot)$
$W_2(0,4)$	00	00	100	00	10	$W_2(2,\cdot)$	$W_2(4,4)$	01	00	100	01	10	$W_2(6,\cdot)$	$W_2(8,4)$	10	00	100	10	00	$W_2(8,\cdot)$
$W_2(0,5)$	00	00	101	10	10	$W_2(10,\cdot)$	$W_2(4,5)$	01	00	101	11	10	$W_0(\cdot)$	$W_2(8,5)$	10	00	101	11	00	$W_0(\cdot)$
$W_2(0,6)$	00	00	110	00	10	$W_2(2,\cdot)$	$W_2(4,6)$	01	00	110	01	10	$W_2(6,\cdot)$	$W_2(8,6)$	10	00	110	10	01	$W_2(9,\cdot)$
$W_2(0,7)$	00	00	111	10	10	$W_2(10,\cdot)$	$W_2(4,7)$	01	00	111	11	10	$W_0(\cdot)$	$W_2(8,7)$	10	00	111	11	01	$W_0(\cdot)$
$W_2(1,0)$	00	01	000	00	01	$W_2(1,\cdot)$	$W_2(5,0)$	01	01	000	01	01	$W_2(5,\cdot)$	$W_2(9,0)$	10	01	000	10	01	$W_2(9,\cdot)$
$W_2(1,1)$	00	01	001	10	01	$W_2(9,\cdot)$	$W_2(5,1)$	01	01	001	11	01	$W_0(\cdot)$	$W_2(9,1)$	10	01	001	10	01	$W_2(9,\cdot)$
$W_2(1,2)$	00	01	010	00	01	$W_2(1,\cdot)$	$W_2(5,2)$	01	01	010	01	01	$W_2(5,\cdot)$	$W_2(9,2)$	10	01	010	10	01	$W_2(9,\cdot)$
$W_2(1,3)$	00	01	011	10	01	$W_2(9,\cdot)$	$W_2(5,3)$	01	01	011	11	01	$W_0(\cdot)$	$W_2(9,3)$	10	01	011	10	01	$W_2(9,\cdot)$
$W_2(1,4)$	00	01	100	00	11	$W_2(3,\cdot)$	$W_2(5,4)$	01	01	100	01	11	$W_2(7,\cdot)$	$W_2(9,4)$	10	01	100	11	01	$W_0(\cdot)$
$W_2(1,5)$	00	01	101	10	11	$W_2(11,\cdot)$	$W_2(5,5)$	01	01	101	11	11	$W_0(\cdot)$	$W_2(9,5)$	10	01	101	11	01	$W_0(\cdot)$
$W_2(1,6)$	00	01	110	00	11	$W_2(3,\cdot)$	$W_2(5,6)$	01	01	110	01	11	$W_2(7,\cdot)$	$W_2(9,6)$	10	01	110	11	01	$W_0(\cdot)$
$W_2(1,7)$	00	01	111	10	11	$W_2(11,\cdot)$	$W_2(5,7)$	01	01	111	11	11	$W_0(\cdot)$	$W_2(9,7)$	10	01	111	11	01	$W_0(\cdot)$
$W_2(2,0)$	00	10	000	00	10	$W_2(2,\cdot)$	$W_2(6,0)$	01	10	000	01	10	$W_2(6,\cdot)$	$W_2(10,0)$	10	10	000	10	10	$W_2(10,\cdot)$
$W_2(2,1)$	00	10	001	00	10	$W_2(2,\cdot)$	$W_2(6,1)$	01	10	001	01	10	$W_2(6,\cdot)$	$W_2(10,1)$	10	10	001	11	10	$W_0(\cdot)$
$W_2(2,2)$	00	10	010	10	10	$W_2(10,\cdot)$	$W_2(6,2)$	01	10	010	11	10	$W_0(\cdot)$	$W_2(10,2)$	10	10	010	10	11	$W_2(11,\cdot)$
$W_2(2,3)$	00	10	011	10	10	$W_2(10,\cdot)$	$W_2(6,3)$	01	10	011	11	10	$W_0(\cdot)$	$W_2(10,3)$	10	10	011	11	11	$W_0(\cdot)$
$W_2(2,4)$	00	10	100	00	10	$W_2(2,\cdot)$	$W_2(6,4)$	01	10	100	01	10	$W_2(6,\cdot)$	$W_2(10,4)$	10	10	100	10	10	$W_2(10,\cdot)$
$W_2(2,5)$	00	10	101	00	10	$W_2(2,\cdot)$	$W_2(6,5)$	01	10	101	01	10	$W_2(6,\cdot)$	$W_2(10,5)$	10	10	101	11	10	$W_0(\cdot)$
$W_2(2,6)$	00	10	110	10	10	$W_2(10,\cdot)$	$W_2(6,6)$	01	10	110	11	10	$W_0(\cdot)$	$W_2(10,6)$	10	10	110	10	11	$W_2(11,\cdot)$
$W_2(2,7)$	00	10	111	10	10	$W_2(10,\cdot)$	$W_2(6,7)$	01	10	111	11	10	$W_0(\cdot)$	$W_2(10,7)$	10	10	111	11	11	$W_0(\cdot)$
$W_2(3,0)$	00	11	000	00	11	$W_2(3,\cdot)$	$W_2(7,0)$	01	11	000	01	11	$W_2(7,\cdot)$	$W_2(11,0)$	10	11	000	10	11	$W_2(11,\cdot)$
$W_2(3,1)$	00	11	001	00	11	$W_2(3,\cdot)$	$W_2(7,1)$	01	11	001	01	11	$W_2(7,\cdot)$	$W_2(11,1)$	10	11	001	10	11	$W_2(11,\cdot)$
$W_2(3,2)$	00	11	010	10	11	$W_2(11,\cdot)$	$W_2(7,2)$	01	11	010	11	11	$W_0(\cdot)$	$W_2(11,2)$	10	11	010	10	11	$W_2(11,\cdot)$
$W_2(3,3)$	00	11	011	10	11	$W_2(11,\cdot)$	$W_2(7,3)$	01	11	011	11	11	$W_0(\cdot)$	$W_2(11,3)$	10	11	011	10	11	$W_2(11,\cdot)$
$W_2(3,4)$	00	11	100	00	11	$W_2(3,\cdot)$	$W_2(7,4)$	01	11	100	01	11	$W_2(7,\cdot)$	$W_2(11,4)$	10	11	100	11	11	$W_0(\cdot)$
$W_2(3,5)$	00	11	101	00	11	$W_2(3,\cdot)$	$W_2(7,5)$	01	11	101	01	11	$W_2(7,\cdot)$	$W_2(11,5)$	10	11	101	11	11	$W_0(\cdot)$
$W_2(3,6)$	00	11	110	10	11	$W_2(11,\cdot)$	$W_2(7,6)$	01	11	110	11	11	$W_0(\cdot)$	$W_2(11,6)$	10	11	110	11	11	$W_0(\cdot)$
$W_2(3,7)$	00	11	111	10	11	$W_2(11,\cdot)$	$W_2(7,7)$	01	11	111	11	11	$W_0(\cdot)$	$W_2(11,7)$	10	11	111	11	11	$W_0(\cdot)$

Çizelge .4. RT için  $T_2$  durumundan geçiş tablosu.

$W(k-1)$	$s_p[k-1]$	$s_r[k-1]$	$s_c[k-1]$	$s_p[k]$	$s_r[k]$	$W(k)$
$W_1(0,0)$	00	00	000	00	00	$W_2(0,0,\cdot)$
$W_1(0,1)$	00	00	001	01	00	$W_2(4,0,\cdot)$
$W_1(0,2)$	00	00	010	00	01	$W_2(1,0,\cdot)$
$W_1(0,3)$	00	00	011	01	01	$W_2(5,0,\cdot)$
$W_1(0,4)$	00	00	100	00	00	$W_2(0,0,\cdot)$
$W_1(0,5)$	00	00	101	01	00	$W_2(4,0,\cdot)$
$W_1(0,6)$	00	00	110	00	01	$W_2(1,0,\cdot)$
$W_1(0,7)$	00	00	111	01	01	$W_2(5,0,\cdot)$
$W_1(1,0)$	00	10	000	00	10	$W_2(2,0,\cdot)$
$W_1(1,1)$	00	10	001	01	10	$W_2(6,0,\cdot)$
$W_1(1,2)$	00	10	010	00	11	$W_2(3,0,\cdot)$
$W_1(1,3)$	00	10	011	01	11	$W_2(7,0,\cdot)$
$W_1(1,4)$	00	10	100	00	10	$W_2(2,0,\cdot)$
$W_1(1,5)$	00	10	101	01	10	$W_2(6,0,\cdot)$
$W_1(1,6)$	00	10	110	00	11	$W_2(3,0,\cdot)$
$W_1(1,7)$	00	10	111	01	11	$W_2(7,0,\cdot)$
$W_1(2,0)$	10	00	000	10	00	$W_2(8,0,\cdot)$
$W_1(2,1)$	10	00	001	11	00	$W_0(\cdot)$
$W_1(2,2)$	10	00	010	10	01	$W_2(9,0,\cdot)$
$W_1(2,3)$	10	00	011	11	01	$W_0(\cdot)$
$W_1(2,4)$	10	00	100	10	00	$W_2(8,0,\cdot)$
$W_1(2,5)$	10	00	101	11	00	$W_0(\cdot)$
$W_1(2,6)$	10	00	110	10	01	$W_2(9,0,\cdot)$
$W_1(2,7)$	10	00	111	11	01	$W_0(\cdot)$
$W_1(3,0)$	10	10	000	10	10	$W_2(10,0,\cdot)$
$W_1(3,1)$	10	10	001	11	10	$W_0(\cdot)$
$W_1(3,2)$	10	10	010	10	11	$W_2(11,0,\cdot)$
$W_1(3,3)$	10	10	011	11	11	$W_0(\cdot)$
$W_1(3,4)$	10	10	100	10	10	$W_2(10,0,\cdot)$
$W_1(3,5)$	10	10	101	11	10	$W_0(\cdot)$
$W_1(3,6)$	10	10	110	10	11	$W_2(11,0,\cdot)$
$W_1(3,7)$	10	10	111	11	11	$W_0(\cdot)$

Çizelge .5. ST-AK ve ST için  $T_1$  durumundan geçiş tablosu.

$W(k-1)$	$s_p[k-1]$	$s_r[k-1]$	$s_c[k-1]$	$s_p[k]$	$s_r[k]$	$W(k)$
$W_1(0,0)$	00	00	000	00	00	$W_2(0, \cdot)$
$W_1(0,1)$	00	00	001	01	00	$W_2(4, \cdot)$
$W_1(0,2)$	00	00	010	00	01	$W_2(1, \cdot)$
$W_1(0,3)$	00	00	011	01	01	$W_2(5, \cdot)$
$W_1(0,4)$	00	00	100	00	00	$W_2(0, \cdot)$
$W_1(0,5)$	00	00	101	01	00	$W_2(4, \cdot)$
$W_1(0,6)$	00	00	110	00	01	$W_2(1, \cdot)$
$W_1(0,7)$	00	00	111	01	01	$W_2(5, \cdot)$
$W_1(1,0)$	00	10	000	00	10	$W_2(2, 0, \cdot)$
$W_1(1,1)$	00	10	001	01	10	$W_2(6, 1, \cdot)$
$W_1(1,2)$	00	10	010	00	11	$W_2(3, 0, \cdot)$
$W_1(1,3)$	00	10	011	01	11	$W_2(7, 0, \cdot)$
$W_1(1,4)$	00	10	100	00	10	$W_2(2, 0, \cdot)$
$W_1(1,5)$	00	10	101	01	10	$W_2(6, 1, \cdot)$
$W_1(1,6)$	00	10	110	00	11	$W_2(3, 0, \cdot)$
$W_1(1,7)$	00	10	111	01	11	$W_2(7, 0, \cdot)$
$W_1(2,0)$	10	00	000	10	00	$W_2(8, \cdot)$
$W_1(2,1)$	10	00	001	11	00	$W_0(\cdot)$
$W_1(2,2)$	10	00	010	10	01	$W_2(9, 0, \cdot)$
$W_1(2,3)$	10	00	011	11	01	$W_0(\cdot)$
$W_1(2,4)$	10	00	100	10	00	$W_2(8, \cdot)$
$W_1(2,5)$	10	00	101	11	00	$W_0(\cdot)$
$W_1(2,6)$	10	00	110	10	01	$W_2(9, 0, \cdot)$
$W_1(2,7)$	10	00	111	11	01	$W_0(\cdot)$
$W_1(3,0)$	10	10	000	10	10	$W_2(10, \cdot)$
$W_1(3,1)$	10	10	001	11	10	$W_0(\cdot)$
$W_1(3,2)$	10	10	010	10	11	$W_2(11, 0, \cdot)$
$W_1(3,3)$	10	10	011	11	11	$W_0(\cdot)$
$W_1(3,4)$	10	10	100	10	10	$W_2(10, \cdot)$
$W_1(3,5)$	10	10	101	11	10	$W_0(\cdot)$
$W_1(3,6)$	10	10	110	10	11	$W_2(11, 0, \cdot)$
$W_1(3,7)$	10	10	111	11	11	$W_0(\cdot)$

Çizelge .6. KT-AK için  $T_1$  durumundan geçiş tablosu.

$W(k-1)$	$s_p[k-1]$	$s_r[k-1]$	$s_c[k-1]$	$s_p[k]$	$s_r[k]$	$W(k)$
$W_1(0,0)$	00	00	000	00	00	$W_2(0, \cdot)$
$W_1(0,1)$	00	00	001	01	00	$W_2(4, \cdot)$
$W_1(0,2)$	00	00	010	00	01	$W_2(1, \cdot)$
$W_1(0,3)$	00	00	011	01	01	$W_2(5, \cdot)$
$W_1(0,4)$	00	00	100	00	00	$W_2(0, \cdot)$
$W_1(0,5)$	00	00	101	01	00	$W_2(4, \cdot)$
$W_1(0,6)$	00	00	110	00	01	$W_2(1, \cdot)$
$W_1(0,7)$	00	00	111	01	01	$W_2(5, \cdot)$
$W_1(1,0)$	00	10	000	00	10	$W_2(2, 0, \cdot)$
$W_1(1,1)$	00	10	001	01	10	$W_2(6, 1, \cdot)$
$W_1(1,2)$	00	10	010	00	11	$W_2(3, \cdot)$
$W_1(1,3)$	00	10	011	01	11	$W_2(7, 0, \cdot)$
$W_1(1,4)$	00	10	100	00	10	$W_2(2, 0, \cdot)$
$W_1(1,5)$	00	10	101	01	10	$W_2(6, 1, \cdot)$
$W_1(1,6)$	00	10	110	00	11	$W_2(3, 0, \cdot)$
$W_1(1,7)$	00	10	111	01	11	$W_2(7, 0, \cdot)$
$W_1(2,0)$	10	00	000	10	00	$W_2(8, \cdot)$
$W_1(2,1)$	10	00	001	11	00	$W_0(\cdot)$
$W_1(2,2)$	10	00	010	10	01	$W_2(9, 0, \cdot)$
$W_1(2,3)$	10	00	011	11	01	$W_0(\cdot)$
$W_1(2,4)$	10	00	100	10	00	$W_2(8, \cdot)$
$W_1(2,5)$	10	00	101	11	00	$W_0(\cdot)$
$W_1(2,6)$	10	00	110	10	01	$W_2(9, 0, \cdot)$
$W_1(2,7)$	10	00	111	11	01	$W_0(\cdot)$
$W_1(3,0)$	10	10	000	10	10	$W_2(10, \cdot)$
$W_1(3,1)$	10	10	001	11	10	$W_0(\cdot)$
$W_1(3,2)$	10	10	010	10	11	$W_2(11, 0, \cdot)$
$W_1(3,3)$	10	10	011	11	11	$W_0(\cdot)$
$W_1(3,4)$	10	10	100	10	10	$W_2(10, \cdot)$
$W_1(3,5)$	10	10	101	11	10	$W_0(\cdot)$
$W_1(3,6)$	10	10	110	10	11	$W_2(11, 0, \cdot)$
$W_1(3,7)$	10	10	111	11	11	$W_0(\cdot)$

Çizelge .7. KT için  $T_1$  durumundan geçiş tablosu.

$k-1$				$k$				$k-1$				$k$				$k-1$				$k$																	
$W(k-1)$	$s_p s_r t s_c$	$s_p s_r t$	$s_c$	$W(k)$	$s_p s_r t$	$s_c$	$s_p s_r t$	$W(k)$	$W(k-1)$	$s_p s_r t s_c$	$s_p s_r t$	$s_c$	$W(k)$	$W(k-1)$	$s_p s_r t s_c$	$s_p s_r t$	$s_c$	$W(k)$	$W(k-1)$	$s_p s_r t s_c$	$s_p s_r t$	$s_c$	$W(k)$	$W(k-1)$	$s_p s_r t s_c$	$s_p s_r t$	$s_c$	$W(k)$									
$W_2(0, A, 0)$	0000A000	0000A		$W_2(0, A, \cdot)$	$W_2(0, A, 1)$	0000A001	1000A	$W_2(8, A, \cdot)$	$W_2(0, A, 2)$	0000A010	0000A		$W_2(0, A, \cdot)$	$W_2(0, A, 3)$	0000A011	1000A		$W_2(8, A, \cdot)$	$W_2(0, A, 4)$	0000A100	0010A		$W_2(2, A, \cdot)$	$W_2(0, A, 5)$	0000A101	1010A	$W_2(10, A, \cdot)$	$W_2(0, A, 6)$	0000A110	0010A		$W_2(2, A, \cdot)$	$W_2(0, A, 7)$	0000A111	1010A		$W_2(10, A, \cdot)$
$W_2(1, A, 0)$	0001A000	0001A		$W_2(1, A, \cdot)$	$W_2(1, A, 1)$	0001A001	1001A	$W_2(9, A, \cdot)$	$W_2(1, A, 2)$	0001A010	0001A		$W_2(1, A, \cdot)$	$W_2(1, A, 3)$	0001A011	1001A		$W_2(9, A, \cdot)$	$W_2(1, A, 4)$	0001A100	0011A		$W_2(3, A, \cdot)$	$W_2(1, A, 5)$	0001A101	1011A	$W_2(11, A, \cdot)$	$W_2(1, A, 6)$	0001A110	0011A		$W_2(3, A, \cdot)$	$W_2(1, A, 7)$	0001A111	1011A		$W_2(11, A, \cdot)$
$W_2(2, 0, 0)$	00100000	00101		$W_2(2, 1, \cdot)$	$W_2(2, 0, 1)$	00100001	00101	$W_2(2, 1, \cdot)$	$W_2(2, 0, 2)$	00100010	10101		$W_2(10, 1, \cdot)$	$W_2(2, 0, 3)$	00100011	10101		$W_2(10, 1, \cdot)$	$W_2(2, 0, 4)$	00100100	00101		$W_2(2, 1, \cdot)$	$W_2(2, 0, 5)$	00100101	00101	$W_2(2, 1, \cdot)$	$W_2(2, 0, 6)$	00100110	10101		$W_2(10, 1, \cdot)$	$W_2(2, 0, 7)$	00100111	10101		$W_2(10, 1, \cdot)$
$W_2(2, 1, 0)$	00101000	00100		$W_2(2, 0, \cdot)$	$W_2(2, 1, 1)$	00101001	10100	$W_2(10, 0, \cdot)$	$W_2(2, 1, 2)$	00101010	00100		$W_2(2, 0, \cdot)$	$W_2(2, 1, 3)$	00101011	10100		$W_2(10, 0, \cdot)$	$W_2(2, 1, 4)$	00101100	00100		$W_2(2, 0, \cdot)$	$W_2(2, 1, 5)$	00101101	10100	$W_2(10, 0, \cdot)$	$W_2(2, 1, 6)$	00101110	00100		$W_2(2, 0, \cdot)$	$W_2(2, 1, 7)$	00101111	10100		$W_2(10, 0, \cdot)$
$W_2(3, A, 0)$	0011A000	0011A		$W_2(3, A, \cdot)$	$W_2(3, A, 1)$	0011A001	0011A	$W_2(3, A, \cdot)$	$W_2(3, A, 2)$	0011A010	1011A		$W_2(11, A, \cdot)$	$W_2(3, A, 3)$	0011A011	1011A		$W_2(11, A, \cdot)$	$W_2(3, A, 4)$	0011A100	0111A		$W_0(\cdot)$	$W_2(3, A, 5)$	0011A101	0111A	$W_2(7, A, \cdot)$	$W_2(3, A, 6)$	0011A110	11110		$W_0(\cdot)$	$W_2(3, A, 7)$	0011A111	11110		$W_0(\cdot)$
$W_2(4, A, 0)$	0100A000	0100A		$W_2(4, A, \cdot)$	$W_2(4, A, 1)$	0100A001	11000	$W_0(\cdot)$	$W_2(4, A, 2)$	0100A010	0100A		$W_2(4, A, \cdot)$	$W_2(4, A, 3)$	0100A011	11000		$W_0(\cdot)$	$W_2(4, A, 4)$	0100A100	0110A		$W_2(6, A, \cdot)$	$W_2(4, A, 5)$	0100A101	11100	$W_0(\cdot)$	$W_2(4, A, 6)$	0100A110	0110A		$W_2(6, A, \cdot)$	$W_2(4, A, 7)$	0100A111	11100		$W_0(\cdot)$
$W_2(5, A, 0)$	0101A000	0101A		$W_2(5, A, \cdot)$	$W_2(5, A, 1)$	0101A001	11010	$W_0(\cdot)$	$W_2(5, A, 2)$	0101A010	0101A		$W_2(5, A, \cdot)$	$W_2(5, A, 3)$	0101A011	11010		$W_0(\cdot)$	$W_2(5, A, 4)$	0101A100	0111A		$W_2(7, A, \cdot)$	$W_2(5, A, 5)$	0101A101	11110	$W_0(\cdot)$	$W_2(5, A, 6)$	0101A110	0111A		$W_2(7, A, \cdot)$	$W_2(5, A, 7)$	0101A111	11110		$W_0(\cdot)$
$W_2(6, 0, 0)$	01100000	01101		$W_2(6, 1, \cdot)$	$W_2(6, 0, 1)$	01100001	01101	$W_2(6, 1, \cdot)$	$W_2(6, 0, 2)$	01100010	11100		$W_0(\cdot)$	$W_2(6, 0, 3)$	01100011	11100		$W_0(\cdot)$	$W_2(6, 0, 4)$	01100100	01101		$W_2(6, 1, \cdot)$	$W_2(6, 0, 5)$	01100101	01101	$W_2(6, 1, \cdot)$	$W_2(6, 0, 6)$	01100110	11100		$W_0(\cdot)$	$W_2(6, 0, 7)$	01100111	11100		$W_0(\cdot)$
$W_2(6, 1, 0)$	01101000	01100		$W_2(6, 0, \cdot)$	$W_2(6, 1, 1)$	01101001	11100	$W_0(\cdot)$	$W_2(6, 1, 2)$	01101010	01100		$W_2(6, 0, \cdot)$	$W_2(6, 1, 3)$	01101011	11100		$W_0(\cdot)$	$W_2(6, 1, 4)$	01101100	01100		$W_2(6, 0, \cdot)$	$W_2(6, 1, 5)$	01101101	11100	$W_0(\cdot)$	$W_2(6, 1, 6)$	01101110	01100		$W_2(6, 0, \cdot)$	$W_2(6, 1, 7)$	01101111	11100		$W_0(\cdot)$
$W_2(7, 0, 0)$	01110000	01111		$W_2(7, 1, \cdot)$	$W_2(7, 0, 1)$	01110001	01111	$W_2(7, 1, \cdot)$	$W_2(7, 0, 2)$	01110010	11110		$W_0(\cdot)$	$W_2(7, 0, 3)$	01110011	11110		$W_0(\cdot)$	$W_2(7, 0, 4)$	01110100	01111		$W_2(7, 1, \cdot)$	$W_2(7, 0, 5)$	01110101	01111	$W_2(7, 1, \cdot)$	$W_2(7, 0, 6)$	01110110	11110		$W_0(\cdot)$	$W_2(7, 0, 7)$	01110111	11110		$W_0(\cdot)$
$W_2(7, 1, 0)$	01111000	01110		$W_2(7, 0, \cdot)$	$W_2(7, 1, 1)$	01111001	11110	$W_0(\cdot)$	$W_2(7, 1, 2)$	01111010	01110		$W_2(7, 0, \cdot)$	$W_2(7, 1, 3)$	01111011	11110		$W_0(\cdot)$	$W_2(7, 1, 4)$	01111100	01110		$W_2(7, 0, \cdot)$	$W_2(7, 1, 5)$	01111101	11110	$W_0(\cdot)$	$W_2(7, 1, 6)$	01111110	01110		$W_2(7, 0, \cdot)$	$W_2(7, 1, 7)$	01111111	11110		$W_0(\cdot)$
$W_2(8, A, 0)$	1000A000	1000A		$W_2(8, A, \cdot)$	$W_2(8, A, 1)$	1000A001	11000	$W_0(\cdot)$	$W_2(8, A, 2)$	1000A010	1001A		$W_2(9, A, \cdot)$	$W_2(8, A, 3)$	1000A011	11010		$W_0(\cdot)$	$W_2(8, A, 4)$	1000A100	1000A		$W_2(8, A, \cdot)$	$W_2(8, A, 5)$	1000A101	11000	$W_0(\cdot)$	$W_2(8, A, 6)$	1000A110	1001A		$W_2(9, A, \cdot)$	$W_2(8, A, 7)$	1000A111	11010		$W_0(\cdot)$
$W_2(9, 0, 0)$	10010000	10011		$W_2(9, 1, \cdot)$	$W_2(9, 0, 1)$	10010001	10011	$W_2(9, 1, \cdot)$	$W_2(9, 0, 2)$	10010010	10011		$W_2(9, 1, \cdot)$	$W_2(9, 0, 3)$	10010011	10011		$W_2(9, 1, \cdot)$	$W_2(9, 0, 4)$	10010100	11010		$W_0(\cdot)$	$W_2(9, 0, 5)$	10010101	11010	$W_0(\cdot)$	$W_2(9, 0, 6)$	10010110	11010		$W_0(\cdot)$	$W_2(9, 0, 7)$	10010111	11010		$W_0(\cdot)$
$W_2(9, 1, 0)$	10011000	10010		$W_2(9, 0, \cdot)$	$W_2(9, 1, 1)$	10011001	11010	$W_0(\cdot)$	$W_2(9, 1, 2)$	10011010	10010		$W_2(9, 0, \cdot)$	$W_2(9, 1, 3)$	10011011	11010		$W_0(\cdot)$	$W_2(9, 1, 4)$	10011100	10010		$W_2(9, 0, \cdot)$	$W_2(9, 1, 5)$	10011101	11010	$W_0(\cdot)$	$W_2(9, 1, 6)$	10011110	10010		$W_2(9, 0, \cdot)$	$W_2(9, 1, 7)$	10011111	11010		$W_0(\cdot)$
$W_2(10, A, 0)$	1010A000	1010A		$W_2(10, A, \cdot)$	$W_2(10, A, 1)$	1010A001	11100	$W_0(\cdot)$	$W_2(10, A, 2)$	1010A010	1011A		$W_2(11, A, \cdot)$	$W_2(10, A, 3)$	1010A011	11110		$W_0(\cdot)$	$W_2(10, A, 4)$	1010A100	1010A		$W_2(10, A, \cdot)$	$W_2(10, A, 5)$	1010A101	11100	$W_0(\cdot)$	$W_2(10, A, 6)$	1010A110	1011A		$W_2(11, A, \cdot)$	$W_2(10, A, 7)$	1010A111	11110		$W_0(\cdot)$
$W_2(11, 0, 0)$	10110000	10111		$W_2(11, 1, \cdot)$	$W_2(11, 0, 1)$	10110001	10111	$W_2(11, 1, \cdot)$	$W_2(11, 0, 2)$	10110010	10111		$W_2(11, 1, \cdot)$	$W_2(11, 0, 3)$	10110011	10111		$W_2(11, 1, \cdot)$	$W_2(11, 0, 4)$	10110100	11110		$W_0(\cdot)$	$W_2(11, 0, 5)$	10110101	11110	$W_0(\cdot)$	$W_2(11, 0, 6)$	10110110	11110		$W_0(\cdot)$	$W_2(11, 0, 7)$	10110111	11110		$W_0(\cdot)$
$W_2(11, 1, 0)$	10111000	10110		$W_2(11, 0, \cdot)$	$W_2(11, 1, 1)$	10111001	11110	$W_0(\cdot)$	$W_2(11, 1, 2)$	10111010	10110		$W_2(11, 0, \cdot)$	$W_2(11, 1, 3)$	10111011	11110		$W_0(\cdot)$	$W_2(11, 1, 4)$	10111100	10110		$W_2(11, 0, \cdot)$	$W_2(11, 1, 5)$	10111101	11110	$W_0(\cdot)$	$W_2(11, 1, 6)$	10111110	10110		$W_2(11, 0, \cdot)$	$W_2(11, 1, 7)$	10111111	11110		$W_0(\cdot)$

Çizelge .8. ST-AK için  $T_2$  durumundan geçiş tablosu.  $A = 0$  iken röle,  $A = 1$  iken kaynak gönderim yapmaktadır.

$k-1$		$k$		$k-1$		$k$		$k-1$		$k$		$k-1$		$k$	
$W(k-1)$	$s_p s_r t s_c$	$s_p s_r t$	$W(k)$	$W(k-1)$	$s_p s_r t s_c$	$s_p s_r t$	$W(k)$	$W(k-1)$	$s_p s_r t s_c$	$s_p s_r t$	$W(k)$	$W(k-1)$	$s_p s_r t s_c$	$s_p s_r t$	$W(k)$
$W_2(0, A, 0)$	0000A000	0000A	$W_2(0, A, \cdot)$	$W_2(0, A, 1)$	0000A001	1000A	$W_2(8, A, \cdot)$	$W_2(0, A, 2)$	0000A010	0000A	$W_2(0, A, \cdot)$	$W_2(0, A, 3)$	0000A011	1000A	$W_2(8, A, \cdot)$
$W_2(0, A, 4)$	0000A100	0010A	$W_2(2, A, \cdot)$	$W_2(0, A, 5)$	0000A101	1010A	$W_2(10, A, \cdot)$	$W_2(0, A, 6)$	0000A110	0010A	$W_2(2, A, \cdot)$	$W_2(0, A, 7)$	0000A111	1010A	$W_2(10, A, \cdot)$
$W_2(1, A, 0)$	0001A000	0001A	$W_2(1, A, \cdot)$	$W_2(1, A, 1)$	0001A001	1001A	$W_2(9, A, \cdot)$	$W_2(1, A, 2)$	0001A010	0001A	$W_2(1, A, \cdot)$	$W_2(1, A, 3)$	0001A011	1001A	$W_2(9, A, \cdot)$
$W_2(1, A, 4)$	0001A100	0011A	$W_2(3, A, \cdot)$	$W_2(1, A, 5)$	0001A101	1011A	$W_2(11, A, \cdot)$	$W_2(1, A, 6)$	0001A110	0011A	$W_2(3, A, \cdot)$	$W_2(1, A, 7)$	0001A111	1011A	$W_2(11, A, \cdot)$
$W_2(2, 0, 0)$	00100000	00101	$W_2(2, 1, \cdot)$	$W_2(2, 0, 1)$	00100001	00101	$W_2(2, 1, \cdot)$	$W_2(2, 0, 2)$	00100010	10101	$W_2(10, 1, \cdot)$	$W_2(2, 0, 3)$	00100011	10101	$W_2(10, 1, \cdot)$
$W_2(2, 0, 4)$	00100100	00101	$W_2(2, 1, \cdot)$	$W_2(2, 0, 5)$	00100101	00101	$W_2(2, 1, \cdot)$	$W_2(2, 0, 6)$	00100110	10101	$W_2(10, 1, \cdot)$	$W_2(2, 0, 7)$	00100111	10101	$W_2(10, 1, \cdot)$
$W_2(2, 1, 0)$	00101000	00100	$W_2(2, 0, \cdot)$	$W_2(2, 1, 1)$	00101001	10100	$W_2(10, 0, \cdot)$	$W_2(2, 1, 2)$	00101010	00100	$W_2(2, 0, \cdot)$	$W_2(2, 1, 3)$	00101011	10100	$W_2(10, 0, \cdot)$
$W_2(2, 1, 4)$	00101100	00100	$W_2(2, 0, \cdot)$	$W_2(2, 1, 5)$	00101101	10100	$W_2(10, 0, \cdot)$	$W_2(2, 1, 6)$	00101110	00100	$W_2(2, 0, \cdot)$	$W_2(2, 1, 7)$	00101111	10100	$W_2(10, 0, \cdot)$
$W_2(3, 0, 0)$	00110000	00111	$W_2(3, 1, \cdot)$	$W_2(3, 0, 1)$	00110001	00111	$W_2(3, 1, \cdot)$	$W_2(3, 0, 2)$	00110010	10111	$W_2(11, 1, \cdot)$	$W_2(3, 0, 3)$	00110011	10111	$W_2(11, 1, \cdot)$
$W_2(3, 0, 4)$	00110100	00111	$W_2(3, 1, \cdot)$	$W_2(3, 0, 5)$	00110101	00111	$W_2(3, 1, \cdot)$	$W_2(3, 0, 6)$	00110110	10111	$W_2(11, 1, \cdot)$	$W_2(3, 0, 7)$	00110111	10111	$W_2(11, 1, \cdot)$
$W_2(3, 1, 0)$	00111000	00110	$W_2(3, 0, \cdot)$	$W_2(3, 1, 1)$	00111001	10110	$W_2(11, 0, \cdot)$	$W_2(3, 1, 2)$	00111010	00110	$W_2(3, 0, \cdot)$	$W_2(3, 1, 3)$	00111011	10110	$W_2(11, 0, \cdot)$
$W_2(3, 1, 4)$	00111100	00110	$W_2(3, 0, \cdot)$	$W_2(3, 1, 5)$	00111101	10110	$W_2(11, 0, \cdot)$	$W_2(3, 1, 6)$	00111110	00110	$W_2(3, 0, \cdot)$	$W_2(3, 1, 7)$	00111111	10110	$W_2(11, 0, \cdot)$
$W_2(4, A, 0)$	0100A000	0100A	$W_2(4, A, \cdot)$	$W_2(4, A, 1)$	0100A001	11000	$W_0(\cdot)$	$W_2(4, A, 2)$	0100A010	0100A	$W_2(4, A, \cdot)$	$W_2(4, A, 3)$	0100A011	11000	$W_0(\cdot)$
$W_2(4, A, 4)$	0100A100	0110A	$W_2(6, A, \cdot)$	$W_2(4, A, 5)$	0100A101	11100	$W_0(\cdot)$	$W_2(4, A, 6)$	0100A110	0110A	$W_2(6, A, \cdot)$	$W_2(4, A, 7)$	0100A111	11100	$W_0(\cdot)$
$W_2(5, A, 0)$	0101A000	0101A	$W_2(5, A, \cdot)$	$W_2(5, A, 1)$	0101A001	11010	$W_0(\cdot)$	$W_2(5, A, 2)$	0101A010	0101A	$W_2(5, A, \cdot)$	$W_2(5, A, 3)$	0101A011	11010	$W_0(\cdot)$
$W_2(5, A, 4)$	0101A100	0111A	$W_2(7, A, \cdot)$	$W_2(5, A, 5)$	0101A101	11110	$W_0(\cdot)$	$W_2(5, A, 6)$	0101A110	0111A	$W_2(7, A, \cdot)$	$W_2(5, A, 7)$	0101A111	11110	$W_0(\cdot)$
$W_2(6, 0, 0)$	01100000	01101	$W_2(6, 1, \cdot)$	$W_2(6, 0, 1)$	01100001	01101	$W_2(6, 1, \cdot)$	$W_2(6, 0, 2)$	01100010	11100	$W_0(\cdot)$	$W_2(6, 0, 3)$	01100011	11100	$W_0(\cdot)$
$W_2(6, 0, 4)$	01100100	01101	$W_2(6, 1, \cdot)$	$W_2(6, 0, 5)$	01100101	01101	$W_2(6, 1, \cdot)$	$W_2(6, 0, 6)$	01100110	11100	$W_0(\cdot)$	$W_2(6, 0, 7)$	01100111	11100	$W_0(\cdot)$
$W_2(6, 1, 0)$	01101000	01100	$W_2(6, 0, \cdot)$	$W_2(6, 1, 1)$	01101001	11100	$W_0(\cdot)$	$W_2(6, 1, 2)$	01101010	01100	$W_2(6, 0, \cdot)$	$W_2(6, 1, 3)$	01101011	11100	$W_0(\cdot)$
$W_2(6, 1, 4)$	01101100	01100	$W_2(6, 0, \cdot)$	$W_2(6, 1, 5)$	01101101	11100	$W_0(\cdot)$	$W_2(6, 1, 6)$	01101110	01100	$W_2(6, 0, \cdot)$	$W_2(6, 1, 7)$	01101111	11100	$W_0(\cdot)$
$W_2(7, 0, 0)$	01110000	01111	$W_2(7, 1, \cdot)$	$W_2(7, 0, 1)$	01110001	01111	$W_2(7, 1, \cdot)$	$W_2(7, 0, 2)$	01110010	11110	$W_0(\cdot)$	$W_2(7, 0, 3)$	01110011	11110	$W_0(\cdot)$
$W_2(7, 0, 4)$	01110100	01111	$W_2(7, 1, \cdot)$	$W_2(7, 0, 5)$	01110101	01111	$W_2(7, 1, \cdot)$	$W_2(7, 0, 6)$	01110110	11110	$W_0(\cdot)$	$W_2(7, 0, 7)$	01110111	11110	$W_0(\cdot)$
$W_2(7, 1, 0)$	01111000	01110	$W_2(7, 0, \cdot)$	$W_2(7, 1, 1)$	01111001	11110	$W_0(\cdot)$	$W_2(7, 1, 2)$	01111010	01110	$W_2(7, 0, \cdot)$	$W_2(7, 1, 3)$	01111011	11110	$W_0(\cdot)$
$W_2(7, 1, 4)$	01111100	01110	$W_2(7, 0, \cdot)$	$W_2(7, 1, 5)$	01111101	11110	$W_0(\cdot)$	$W_2(7, 1, 6)$	01111110	01110	$W_2(7, 0, \cdot)$	$W_2(7, 1, 7)$	01111111	11110	$W_0(\cdot)$
$W_2(8, A, 0)$	1000A000	1000A	$W_2(8, A, \cdot)$	$W_2(8, A, 1)$	1000A001	11000	$W_0(\cdot)$	$W_2(8, A, 2)$	1000A010	1001A	$W_2(9, A, \cdot)$	$W_2(8, A, 3)$	1000A011	11010	$W_0(\cdot)$
$W_2(8, A, 4)$	1000A100	1000A	$W_2(8, A, \cdot)$	$W_2(8, A, 5)$	1000A101	11000	$W_0(\cdot)$	$W_2(8, A, 6)$	1000A110	1001A	$W_2(9, A, \cdot)$	$W_2(8, A, 7)$	1000A111	11010	$W_0(\cdot)$
$W_2(9, 0, 0)$	10010000	10011	$W_2(9, 1, \cdot)$	$W_2(9, 0, 1)$	10010001	10011	$W_2(9, 1, \cdot)$	$W_2(9, 0, 2)$	10010010	10011	$W_2(9, 1, \cdot)$	$W_2(9, 0, 3)$	10010011	10011	$W_2(9, 1, \cdot)$
$W_2(9, 0, 4)$	10010100	11010	$W_0(\cdot)$	$W_2(9, 0, 5)$	10010101	11010	$W_0(\cdot)$	$W_2(9, 0, 6)$	10010110	11010	$W_0(\cdot)$	$W_2(9, 0, 7)$	10010111	11010	$W_0(\cdot)$
$W_2(9, 1, 0)$	10011000	10010	$W_2(9, 0, \cdot)$	$W_2(9, 1, 1)$	10011001	11010	$W_0(\cdot)$	$W_2(9, 1, 2)$	10011010	10010	$W_2(9, 0, \cdot)$	$W_2(9, 1, 3)$	10011011	11010	$W_0(\cdot)$
$W_2(9, 1, 4)$	10011100	10010	$W_2(9, 0, \cdot)$	$W_2(9, 1, 5)$	10011101	11010	$W_0(\cdot)$	$W_2(9, 1, 6)$	10011110	10010	$W_2(9, 0, \cdot)$	$W_2(9, 1, 7)$	10011111	11010	$W_0(\cdot)$
$W_2(10, A, 0)$	1010A000	1010A	$W_2(10, A, \cdot)$	$W_2(10, A, 1)$	1010A001	11100	$W_0(\cdot)$	$W_2(10, A, 2)$	1010A010	1011A	$W_2(11, A, \cdot)$	$W_2(10, A, 3)$	1010A011	11110	$W_0(\cdot)$
$W_2(10, A, 4)$	1010A100	1010A	$W_2(10, A, \cdot)$	$W_2(10, A, 5)$	1010A101	11100	$W_0(\cdot)$	$W_2(10, A, 6)$	1010A110	1011A	$W_2(11, A, \cdot)$	$W_2(10, A, 7)$	1010A111	11110	$W_0(\cdot)$
$W_2(11, 0, 0)$	10110000	10111	$W_2(11, 1, \cdot)$	$W_2(11, 0, 1)$	10110001	10111	$W_2(11, 1, \cdot)$	$W_2(11, 0, 2)$	10110010	10111	$W_2(11, 1, \cdot)$	$W_2(11, 0, 3)$	10110011	10111	$W_2(11, 1, \cdot)$
$W_2(11, 0, 4)$	10110100	11110	$W_0(\cdot)$	$W_2(11, 0, 5)$	10110101	11110	$W_0(\cdot)$	$W_2(11, 0, 6)$	10110110	11110	$W_0(\cdot)$	$W_2(11, 0, 7)$	10110111	11110	$W_0(\cdot)$
$W_2(11, 1, 0)$	10111000	10110	$W_2(11, 0, \cdot)$	$W_2(11, 1, 1)$	10111001	11110	$W_0(\cdot)$	$W_2(11, 1, 2)$	10111010	10110	$W_2(11, 0, \cdot)$	$W_2(11, 1, 3)$	10111011	11110	$W_0(\cdot)$
$W_2(11, 1, 4)$	10111100	10110	$W_2(11, 0, \cdot)$	$W_2(11, 1, 5)$	10111101	11110	$W_0(\cdot)$	$W_2(11, 1, 6)$	10111110	10110	$W_2(11, 0, \cdot)$	$W_2(11, 1, 7)$	10111111	11110	$W_0(\cdot)$

Çizelge .9. ST için  $T_2$  durumundan geçiş tablosu.  $A = \{0, 1\}$ .  $t = 0$  iken röle,  $t = 1$  iken kaynak gönderim yapmaktadır.

$k-1$				$k$				$k-1$				$k$				$k-1$				$k$											
$W(k-1)$	$s_p s_r t s_c$	$s_p s_r$	$W(k)$	$W(k-1)$	$s_p s_r t s_c$	$s_p s_r$	$W(k)$	$W(k-1)$	$s_p s_r t s_c$	$s_p s_r$	$W(k)$	$W(k-1)$	$s_p s_r t s_c$	$s_p s_r$	$W(k)$	$W(k-1)$	$s_p s_r t s_c$	$s_p s_r$	$W(k)$	$W(k-1)$	$s_p s_r t s_c$	$s_p s_r$	$W(k)$	$W(k-1)$	$s_p s_r t s_c$	$s_p s_r$	$W(k)$				
$W_2(0,0)$	0000-000	0000	$W_2(0,\cdot)$	$W_2(0,1)$	0000-001	1000	$W_2(8,\cdot)$	$W_2(0,2)$	0000-010	0000	$W_2(0,\cdot)$	$W_2(0,3)$	0000-011	1000	$W_2(8,\cdot)$	$W_2(0,4)$	0000-100	0010	$W_2(2,\cdot)$	$W_2(0,5)$	0000-101	1010	$W_2(10,\cdot)$	$W_2(0,6)$	0000-110	0010	$W_2(2,\cdot)$	$W_2(0,7)$	0000-111	1010	$W_2(10,\cdot)$
$W_2(1,0)$	0001-000	0001	$W_2(1,\cdot)$	$W_2(1,1)$	0001-001	1001	$W_2(9,\cdot)$	$W_2(1,2)$	0001-010	0001	$W_2(1,\cdot)$	$W_2(1,3)$	0001-011	1001	$W_2(9,1,\cdot)$	$W_2(1,4)$	0001-100	0011	$W_2(3,\cdot)$	$W_2(1,5)$	0001-101	1011	$W_2(11,\cdot)$	$W_2(1,6)$	0001-110	0011	$W_2(3,\cdot)$	$W_2(1,7)$	0001-111	1011	$W_2(11,0,\cdot)$
$W_2(2,0,0)$	00100000	0010	$W_2(2,0,\cdot)$	$W_2(2,0,1)$	00100001	0010	$W_2(2,1,\cdot)$	$W_2(2,0,2)$	00100010	1010	$W_2(10,\cdot)$	$W_2(2,0,3)$	00100011	1010	$W_2(10,\cdot)$	$W_2(2,0,4)$	00100100	0010	$W_2(2,0,\cdot)$	$W_2(2,0,5)$	00100101	0010	$W_2(2,1,\cdot)$	$W_2(2,0,6)$	00100110	1010	$W_2(10,\cdot)$	$W_2(2,0,7)$	00100111	1010	$W_2(10,\cdot)$
$W_2(2,1,0)$	00101000	0010	$W_2(2,0,\cdot)$	$W_2(2,1,1)$	00101001	1010	$W_2(10,\cdot)$	$W_2(2,1,2)$	00101010	0010	$W_2(2,0,\cdot)$	$W_2(2,1,3)$	00101011	1010	$W_2(10,\cdot)$	$W_2(2,1,4)$	00101100	0010	$W_2(2,0,\cdot)$	$W_2(2,1,5)$	00101101	1010	$W_2(10,\cdot)$	$W_2(2,1,6)$	00101110	0010	$W_2(2,0,\cdot)$	$W_2(2,1,7)$	00101111	1010	$W_2(10,\cdot)$
$W_2(3,0)$	0011-000	0011	$W_2(3,\cdot)$	$W_2(3,1)$	0011-001	0011	$W_2(3,\cdot)$	$W_2(3,2)$	0011-010	1011	$W_2(11,0,\cdot)$	$W_2(3,3)$	0011-011	1011	$W_2(11,1,\cdot)$	$W_2(3,4)$	0011-100	0111	$W_2(7,0,\cdot)$	$W_2(3,5)$	0011-101	0111	$W_2(7,0,\cdot)$	$W_2(3,6)$	0011-110	1111	$W_0(\cdot)$	$W_2(3,7)$	0011-111	1111	$W_0(\cdot)$
$W_2(4,0)$	0100-000	0100	$W_2(4,\cdot)$	$W_2(4,1)$	0100-001	1100	$W_0(\cdot)$	$W_2(4,2)$	0100-010	0100	$W_2(4,\cdot)$	$W_2(4,3)$	0100-011	1100	$W_0(\cdot)$	$W_2(4,4)$	0100-100	0110	$W_2(6,0,\cdot)$	$W_2(4,5)$	0100-101	1110	$W_0(\cdot)$	$W_2(4,6)$	0100-110	0110	$W_2(6,0,\cdot)$	$W_2(4,7)$	0100-111	1110	$W_0(\cdot)$
$W_2(5,0)$	0101-000	0101	$W_2(5,\cdot)$	$W_2(5,1)$	0101-001	1101	$W_0(\cdot)$	$W_2(5,2)$	0101-010	0101	$W_2(5,\cdot)$	$W_2(5,3)$	0101-011	1101	$W_0(\cdot)$	$W_2(5,4)$	0101-100	0111	$W_2(7,0,\cdot)$	$W_2(5,5)$	0101-101	1111	$W_0(\cdot)$	$W_2(5,6)$	0101-110	0111	$W_2(7,0,\cdot)$	$W_2(5,7)$	0101-111	1111	$W_0(\cdot)$
$W_2(6,0,0)$	01100000	0110	$W_2(6,0,\cdot)$	$W_2(6,0,1)$	01100001	0110	$W_2(6,1,\cdot)$	$W_2(6,0,2)$	01100010	1110	$W_0(\cdot)$	$W_2(6,0,3)$	01100011	1110	$W_0(\cdot)$	$W_2(6,0,4)$	01100100	0110	$W_2(6,0,\cdot)$	$W_2(6,0,5)$	01100101	0110	$W_2(6,1,\cdot)$	$W_2(6,0,6)$	01100110	1110	$W_0(\cdot)$	$W_2(6,0,7)$	01100111	1110	$W_0(\cdot)$
$W_2(6,1,0)$	01101000	0110	$W_2(6,0,\cdot)$	$W_2(6,1,1)$	01101001	1110	$W_0(\cdot)$	$W_2(6,1,2)$	01101010	0110	$W_2(6,0,\cdot)$	$W_2(6,1,3)$	01101011	1110	$W_0(\cdot)$	$W_2(6,1,4)$	01101100	0110	$W_2(6,0,\cdot)$	$W_2(6,1,5)$	01101101	1110	$W_0(\cdot)$	$W_2(6,1,6)$	01101110	0110	$W_2(6,0,\cdot)$	$W_2(6,1,7)$	01101111	1110	$W_0(\cdot)$
$W_2(7,0,0)$	01110000	0111	$W_2(7,0,\cdot)$	$W_2(7,0,1)$	01110001	0111	$W_2(7,1,\cdot)$	$W_2(7,0,2)$	01110010	1111	$W_0(\cdot)$	$W_2(7,0,3)$	01110011	1111	$W_0(\cdot)$	$W_2(7,0,4)$	01110100	0111	$W_2(7,0,\cdot)$	$W_2(7,0,5)$	01110101	0111	$W_2(7,1,\cdot)$	$W_2(7,0,6)$	01110110	1111	$W_0(\cdot)$	$W_2(7,0,7)$	01110111	1111	$W_0(\cdot)$
$W_2(7,1,0)$	01111000	0111	$W_2(7,0,\cdot)$	$W_2(7,1,1)$	01111001	1111	$W_0(\cdot)$	$W_2(7,1,2)$	01111010	0111	$W_2(7,0,\cdot)$	$W_2(7,1,3)$	01111011	1111	$W_0(\cdot)$	$W_2(7,1,4)$	01111100	0111	$W_2(7,0,\cdot)$	$W_2(7,1,5)$	01111101	1111	$W_0(\cdot)$	$W_2(7,1,6)$	01111110	0111	$W_2(7,0,\cdot)$	$W_2(7,1,7)$	01111111	1111	$W_0(\cdot)$
$W_2(8,0)$	1000-000	1000	$W_2(8,\cdot)$	$W_2(8,1)$	1000-001	1100	$W_0(\cdot)$	$W_2(8,2)$	1000-010	1001	$W_2(9,0,\cdot)$	$W_2(8,3)$	1000-011	1101	$W_0(\cdot)$	$W_2(8,4)$	1000-100	1000	$W_2(8,\cdot)$	$W_2(8,5)$	1000-101	1100	$W_0(\cdot)$	$W_2(8,6)$	1000-110	1001	$W_2(9,0,\cdot)$	$W_2(8,7)$	1000-111	1101	$W_0(\cdot)$
$W_2(9,0,0)$	10010000	1001	$W_2(9,0,\cdot)$	$W_2(9,0,1)$	10010001	1001	$W_2(9,1,\cdot)$	$W_2(9,0,2)$	10010010	1001	$W_2(9,0,\cdot)$	$W_2(9,0,3)$	10010011	1001	$W_2(9,1,\cdot)$	$W_2(9,0,4)$	10010100	1101	$W_0(\cdot)$	$W_2(9,0,5)$	10010101	1101	$W_0(\cdot)$	$W_2(9,0,6)$	10010110	1101	$W_0(\cdot)$	$W_2(9,0,7)$	10010111	1101	$W_0(\cdot)$
$W_2(9,1,0)$	10011000	1001	$W_2(9,0,\cdot)$	$W_2(9,1,1)$	10011001	1101	$W_0(\cdot)$	$W_2(9,1,2)$	10011010	1001	$W_2(9,0,\cdot)$	$W_2(9,1,3)$	10011011	1101	$W_0(\cdot)$	$W_2(9,1,4)$	10011100	1001	$W_2(9,0,\cdot)$	$W_2(9,1,5)$	10011101	1101	$W_0(\cdot)$	$W_2(9,1,6)$	10011110	1001	$W_2(9,0,\cdot)$	$W_2(9,1,7)$	10011111	1101	$W_0(\cdot)$
$W_2(10,0)$	1010-000	1010	$W_2(10,\cdot)$	$W_2(10,1)$	1010-001	1110	$W_0(\cdot)$	$W_2(10,2)$	1010-010	1011	$W_2(11,0,\cdot)$	$W_2(10,3)$	1010-011	1111	$W_0(\cdot)$	$W_2(10,4)$	1010-100	1010	$W_2(10,\cdot)$	$W_2(10,5)$	1010-101	1110	$W_0(\cdot)$	$W_2(10,6)$	1010-110	1011	$W_2(11,0,\cdot)$	$W_2(10,7)$	1010-111	1111	$W_0(\cdot)$
$W_2(11,0,0)$	10110000	1011	$W_2(11,0,\cdot)$	$W_2(11,0,1)$	10110001	1011	$W_2(11,1,\cdot)$	$W_2(11,0,2)$	10110010	1011	$W_2(11,0,\cdot)$	$W_2(11,0,3)$	10110011	1011	$W_2(11,1,\cdot)$	$W_2(11,0,4)$	10110100	1111	$W_0(\cdot)$	$W_2(11,0,5)$	10110101	1111	$W_0(\cdot)$	$W_2(11,0,6)$	10110110	1111	$W_0(\cdot)$	$W_2(11,0,7)$	10110111	1111	$W_0(\cdot)$
$W_2(11,1,0)$	10111000	1011	$W_2(11,0,\cdot)$	$W_2(11,1,1)$	10111001	1111	$W_0(\cdot)$	$W_2(11,1,2)$	10111010	1011	$W_2(11,0,\cdot)$	$W_2(11,1,3)$	10111011	1111	$W_0(\cdot)$	$W_2(11,1,4)$	10111100	1011	$W_2(11,0,\cdot)$	$W_2(11,1,5)$	10111101	1111	$W_0(\cdot)$	$W_2(11,1,6)$	10111110	1011	$W_2(11,0,\cdot)$	$W_2(11,1,7)$	10111111	1111	$W_0(\cdot)$

Çizelge .10. KT-AK için  $T_2$  durumundan geçiş tablosu.  $t = 0$  iken röle,  $t = 1$  iken kaynak gönderim yapmaktadır.

$k-1$				$k$				$k-1$				$k$				$k-1$				$k$											
$W(k-1)$	$s_p s_r t s_c$	$s_p s_r$	$W(k)$	$W(k-1)$	$s_p s_r t s_c$	$s_p s_r$	$W(k)$	$W(k-1)$	$s_p s_r t s_c$	$s_p s_r$	$W(k)$	$W(k-1)$	$s_p s_r t s_c$	$s_p s_r$	$W(k)$	$W(k-1)$	$s_p s_r t s_c$	$s_p s_r$	$W(k)$	$W(k-1)$	$s_p s_r t s_c$	$s_p s_r$	$W(k)$	$W(k-1)$	$s_p s_r t s_c$	$s_p s_r$	$W(k)$				
$W_2(0,0)$	0000-000	0000	$W_2(0,\cdot)$	$W_2(0,1)$	0000-001	1000	$W_2(8,\cdot)$	$W_2(0,2)$	0000-010	0000	$W_2(0,\cdot)$	$W_2(0,3)$	0000-011	1000	$W_2(8,\cdot)$	$W_2(0,4)$	0000-100	0010	$W_2(2,\cdot)$	$W_2(0,5)$	0000-101	1010	$W_2(10,\cdot)$	$W_2(0,6)$	0000-110	0010	$W_2(2,\cdot)$	$W_2(0,7)$	0000-111	1010	$W_2(10,\cdot)$
$W_2(1,0)$	0001-000	0001	$W_2(1,\cdot)$	$W_2(1,1)$	0001-001	1001	$W_2(9,\cdot)$	$W_2(1,2)$	0001-010	0001	$W_2(1,\cdot)$	$W_2(1,3)$	0001-011	1001	$W_2(9,1,\cdot)$	$W_2(1,4)$	0001-100	0011	$W_2(3,0,\cdot)$	$W_2(1,5)$	0001-101	1011	$W_2(11,\cdot)$	$W_2(1,6)$	0001-110	0011	$W_2(3,0,\cdot)$	$W_2(1,7)$	0001-111	1011	$W_2(11,0,\cdot)$
$W_2(2,0,0)$	00100000	0010	$W_2(2,0,\cdot)$	$W_2(2,0,1)$	00100001	0010	$W_2(2,1,\cdot)$	$W_2(2,0,2)$	00100010	1010	$W_2(10,\cdot)$	$W_2(2,0,3)$	00100011	1010	$W_2(10,\cdot)$	$W_2(2,0,4)$	00100100	0010	$W_2(2,0,\cdot)$	$W_2(2,0,5)$	00100101	0010	$W_2(2,1,\cdot)$	$W_2(2,0,6)$	00100110	1010	$W_2(10,\cdot)$	$W_2(2,0,7)$	00100111	1010	$W_2(10,\cdot)$
$W_2(2,1,0)$	00101000	0010	$W_2(2,0,\cdot)$	$W_2(2,1,1)$	00101001	1010	$W_2(10,\cdot)$	$W_2(2,1,2)$	00101010	0010	$W_2(2,0,\cdot)$	$W_2(2,1,3)$	00101011	1010	$W_2(10,\cdot)$	$W_2(2,1,4)$	00101100	0010	$W_2(2,0,\cdot)$	$W_2(2,1,5)$	00101101	1010	$W_2(10,\cdot)$	$W_2(2,1,6)$	00101110	0010	$W_2(2,0,\cdot)$	$W_2(2,1,7)$	00101111	1010	$W_2(10,\cdot)$
$W_2(3,0,0)$	00110000	0011	$W_2(3,0,\cdot)$	$W_2(3,0,1)$	00110001	0011	$W_2(3,1,\cdot)$	$W_2(3,0,2)$	00110010	1011	$W_2(11,0,\cdot)$	$W_2(3,0,3)$	00110011	1011	$W_2(11,0,\cdot)$	$W_2(3,0,4)$	00110100	0011	$W_2(3,0,\cdot)$	$W_2(3,0,5)$	00110101	0011	$W_2(3,1,\cdot)$	$W_2(3,0,6)$	00110110	1011	$W_2(11,0,\cdot)$	$W_2(3,0,7)$	00110111	1011	$W_2(11,0,\cdot)$
$W_2(3,1,0)$	00111000	0011	$W_2(3,0,\cdot)$	$W_2(3,1,1)$	00111001	0011	$W_2(11,1,\cdot)$	$W_2(3,1,2)$	00111010	1011	$W_2(3,0,\cdot)$	$W_2(3,1,3)$	00111011	1011	$W_2(11,0,\cdot)$	$W_2(3,1,4)$	00111100	0011	$W_2(3,0,\cdot)$	$W_2(3,1,5)$	00111101	0011	$W_2(11,1,\cdot)$	$W_2(3,1,6)$	00111110	1111	$W_2(3,0,\cdot)$	$W_2(3,1,7)$	00111111	1111	$W_2(11,0,\cdot)$
$W_2(4,0)$	0100-000	0100	$W_2(4,\cdot)$	$W_2(4,1)$	0100-001	1100	$W_0(\cdot)$	$W_2(4,2)$	0100-010	0100	$W_2(4,\cdot)$	$W_2(4,3)$	0100-011	1100	$W_0(\cdot)$	$W_2(4,4)$	0100-100	0110	$W_2(6,0,\cdot)$	$W_2(4,5)$	0100-101	1110	$W_0(\cdot)$	$W_2(4,6)$	0100-110	0110	$W_2(6,0,\cdot)$	$W_2(4,7)$	0100-111	1110	$W_0(\cdot)$
$W_2(5,0)$	0101-000	0101	$W_2(5,\cdot)$	$W_2(5,1)$	0101-001	1101	$W_0(\cdot)$	$W_2(5,2)$	0101-010	0101	$W_2(5,\cdot)$	$W_2(5,3)$	0101-011	1101	$W_0(\cdot)$	$W_2(5,4)$	0101-100	0111	$W_2(7,0,\cdot)$	$W_2(5,5)$	0101-101	1111	$W_0(\cdot)$	$W_2(5,6)$	0101-110	0111	$W_2(7,0,\cdot)$	$W_2(5,7)$	0101-111	1111	$W_0(\cdot)$
$W_2(6,0,0)$	01100000	0110	$W_2(6,0,\cdot)$	$W_2(6,0,1)$	01100001	0110	$W_2(6,1,\cdot)$	$W_2(6,0,2)$	01100010	1110	$W_0(\cdot)$	$W_2(6,0,3)$	01100011	1110	$W_0(\cdot)$	$W_2(6,0,4)$	01100100	0110	$W_2(6,0,\cdot)$	$W_2(6,0,5)$	01100101	0110	$W_2(6,1,\cdot)$	$W_2(6,0,6)$	01100110	1110	$W_0(\cdot)$	$W_2(6,0,7)$	01100111	1110	$W_0(\cdot)$
$W_2(6,1,0)$	01101000	0110	$W_2(6,0,\cdot)$	$W_2(6,1,1)$	01101001	1110	$W_0(\cdot)$	$W_2(6,1,2)$	01101010	0110	$W_2(6,0,\cdot)$	$W_2(6,1,3)$	01101011	1110	$W_0(\cdot)$	$W_2(6,1,4)$	01101100	0110	$W_2(6,0,\cdot)$	$W_2(6,1,5)$	01101101	1110	$W_0(\cdot)$	$W_2(6,1,6)$	01101110	0110	$W_2(6,0,\cdot)$	$W_2(6,1,7)$	01101111	1110	$W_0(\cdot)$
$W_2(7,0,0)$	01110000	0111	$W_2(7,0,\cdot)$	$W_2(7,0,1)$	01110001	0111	$W_2(7,1,\cdot)$	$W_2(7,0,2)$	01110010	1111	$W_0(\cdot)$	$W_2(7,0,3)$	01110011	1111	$W_0(\cdot)$	$W_2(7,0,4)$	01110100	0111	$W_2(7,0,\cdot)$	$W_2(7,0,5)$	01110101	0111	$W_2(7,1,\cdot)$	$W_2(7,0,6)$	01110110	1111	$W_0(\cdot)$	$W_2(7,0,7)$	01110111	1111	$W_0(\cdot)$
$W_2(7,1,0)$	01111000	0111	$W_2(7,0,\cdot)$	$W_2(7,1,1)$	01111001	1111	$W_0(\cdot)$	$W_2(7,1,2)$	01111010	0111	$W_2(7,0,\cdot)$	$W_2(7,1,3)$	01111011	1111	$W_0(\cdot)$	$W_2(7,1,4)$	01111100	0111	$W_2(7,0,\cdot)$	$W_2(7,1,5)$	01111101	1111	$W_0(\cdot)$	$W_2(7,1,6)$	01111110	0111	$W_2(7,0,\cdot)$	$W_2(7,1,7)$	01111111	1111	$W_0(\cdot)$
$W_2(8,0)$	1000-000	1000	$W_2(8,\cdot)$	$W_2(8,1)$	1000-001	1100	$W_0(\cdot)$	$W_2(8,2)$	1000-010	1001	$W_2(9,0,\cdot)$	$W_2(8,3)$	1000-011	1101	$W_0(\cdot)$	$W_2(8,4)$	1000-100	1000	$W_2(8,\cdot)$	$W_2(8,5)$	1000-101	1100	$W_0(\cdot)$	$W_2(8,6)$	1000-110	1001	$W_2(9,0,\cdot)$	$W_2(8,7)$	1000-111	1101	$W_0(\cdot)$
$W_2(9,0,0)$	10010000	1001	$W_2(9,0,\cdot)$	$W_2(9,0,1)$	10010001	1001	$W_2(9,1,\cdot)$	$W_2(9,0,2)$	10010010	1001	$W_2(9,0,\cdot)$	$W_2(9,0,3)$	10010011	1001	$W_2(9,1,\cdot)$	$W_2(9,0,4)$	10010100	1101	$W_0(\cdot)$	$W_2(9,0,5)$	10010101	1101	$W_0(\cdot)$	$W_2(9,0,6)$	10010110	1101	$W_0(\cdot)$	$W_2(9,0,7)$	10010111	1101	$W_0(\cdot)$
$W_2(9,1,0)$	10011000	1001	$W_2(9,0,\cdot)$	$W_2(9,1,1)$	10011001	1101	$W_0(\cdot)$	$W_2(9,1,2)$	10011010	1001	$W_2(9,0,\cdot)$	$W_2(9,1,3)$	10011011	1101	$W_0(\cdot)$	$W_2(9,1,4)$	10011100	1001	$W_2(9,0,\cdot)$	$W_2(9,1,5)$	10011101	1101	$W_0(\cdot)$	$W_2(9,1,6)$	10011110	1001	$W_2(9,0,\cdot)$	$W_2(9,1,7)$	10011111	1101	$W_0(\cdot)$
$W_2(10,0)$	1010-000	1010	$W_2(10,\cdot)$	$W_2(10,1)$	1010-001	1110	$W_0(\cdot)$	$W_2(10,2)$	1010-010	1011	$W_2(11,0,\cdot)$	$W_2(10,3)$	1010-011	1111	$W_0(\cdot)$	$W_2(10,4)$	1010-100	1010	$W_2(10,\cdot)$	$W_2(10,5)$	1010-101	1110	$W_0(\cdot)$	$W_2(10,6)$	1010-110	1011	$W_2(11,0,\cdot)$	$W_2(10,7)$	1010-111	1111	$W_0(\cdot)$
$W_2(11,0,0)$	10110000	1011	$W_2(11,0,\cdot)$	$W_2(11,0,1)$	10110001	1011	$W_2(11,1,\cdot)$	$W_2(11,0,2)$	10110010	1011	$W_2(11,0,\cdot)$	$W_2(11,0,3)$	10110011	1011	$W_2(11,1,\cdot)$	$W_2(11,0,4)$	10110100	1111	$W_0(\cdot)$	$W_2(11,0,5)$	10110101	1111	$W_0(\cdot)$	$W_2(11,0,6)$	10110110	1111	$W_0(\cdot)$	$W_2(11,0,7)$	10110111	1111	$W_0(\cdot)$
$W_2(11,1,0)$	10111000	1011	$W_2(11,0,\cdot)$	$W_2(11,1,1)$	10111001	1111	$W_0(\cdot)$	$W_2(11,1,2)$	10111010	1011	$W_2(11,0,\cdot)$	$W_2(11,1,3)$	10111011	1111	$W_0(\cdot)$	$W_2(11,1,4)$	10111100	1011	$W_2(11,0,\cdot)$	$W_2(11,1,5)$	10111101	1111	$W_0(\cdot)$	$W_2(11,1,6)$	10111110	1011	$W_2(11,0,\cdot)$	$W_2(11,1,7)$	10111111	1111	$W_0(\cdot)$

Çizelge .11. KT için  $T_2$  durumundan geçiş tablosu.  $t = 0$  iken röle,  $t = 1$  iken kaynak gönderim yapmaktadır.



## ÖZGEÇMİŞ

### Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı: RAŞİT TUTGUN

Doğum Yeri: Kayseri

Medeni Hali: Evli

E-posta: rasit.tutgun@tubitak.gov.tr, rasittutgun@gmail.com

Adresi: Susuz Mahallesi 3499. Sokak Aydınkent Sitesi No:6A/29 Yenimahalle/ANKARA

### Eğitim

Lise: Akşehir Anadolu Lisesi, KONYA

Lisans: Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, ANKARA

Yüksek Lisans: Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, ANKARA

Doktora: Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, ANKARA

### Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce : Çok iyi

### İş Deneyimi

Eylül 2006-Nisan 2008: Araştırmacı, Hacettepe Üniversitesi, ANKARA

Aralık 2008-Nisan 2013: Araştırma Görevlisi, Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, ANKARA

Nisan 2013- ... : Uzman Araştırmacı, TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, ANKARA

### Deneyim Alanları

Kablosuz Haberleşme Sistemleri, Haberleşmede Sinyal İşleme Teknikleri, Uydu Haberleşme Sistemleri

### Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

### **Tezden Üretilmiş Yayınlar**

Cooperative Network Coded ARQ Strategies for Two-Way Relay Channels, *R. Tutgun, E. Aktaş*, IEEE Tran. on Vehicular Technology, DOI:10.1109/TVT.2014.2349159

### **Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar**

Cooperative Network Coded ARQ Strategy for Broadcast Networks, *R. Tutgun, E. Aktaş*, IEEE International Conference on Communications (ICC), 8-12 Haziran 2015, LONDRA

İki-Yönlü Röleleme Kanalında İş Birlikli Ağ Kodlamalı Tekrar Gönderim İsteği, *R. Tutgun, E. Aktaş*, IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SİU), 24-26 Nisan 2013, GİRNE