
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

ARQ GERİBESLEME SİSTEMLERİNDE BİLİŞSEL RADYO (BR) KULLANIMI

Metin ÇİÇEK

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EYLÜL 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Metin ÇİÇEK

...../……/……

ARQ GERİBESLEMELİ SİSTEMLERDE BİLİŞSEL RADYO (BR) KULLANIMI

(Doktora Tezi)

Metin ÇİÇEK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2021

ÖZET

Bilişsel Radyo (BR); boş veya seyrek olarak kullanılan spektrum kanallarının sezilmesi ile tespit edilen uygun boşlukların ikincil kullanıcılara kullandırılması suretiyle spektrum verimliliği sağlamayı amaçlar. Bu tez çalışmasında otomatik tekrar isteği (Automatic Repeat Request - ARQ) haberleşme sistemlerinde bilişsel ikincil kullanıcılara ait kaynak tespiti ve bu kaynağın değerlendirilmesine ilişkin simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Birincil sistemlere ait frekanslar alt paylaşımlı ve yer paylaşımlı olmak üzere iki farklı yöntem ile ikincil sistemler tarafından kullanılabilir. Alt paylaşım yöntemine göre birincil kullanıcılar üzerinde belirli seviyede girişim oluşturma seçeneği mevcut iken, yer paylaşımlı modelde birincil kullanıcılar üzerinde herhangi bir şekilde girişim oluşmasına olanak vermeden tespit edilen boş kanalların kullanılması amaçlanır. Bu çalışmada her iki yöntem ile Temel ARQ ve Karma ARQ (Hybrid ARQ - HARQ) sistemlerde BR uygulamaları incelenmiştir. Birincil sistemin ARQ kontrol sinyallerinin dinlenmesiyle, BR dolaylı olarak kanalın durumu ve birincil sistem üzerine oluşturduğu girişim hakkında bilgi edinme imkânına sahip olmaktadır. Böylece ikincil kullanıcı spektruma erişim amacına yönelik hareket stratejisini belirleyebilmektedir. Birincil ARQ ve HARQ sistemlerin ikincil olarak kullanımına yönelik gerçekleştirilen simülasyonlarda, birincil kullanıcı başarım performansı korunurken, ikincil kullanıcıya önemli miktarda kaynak sağlanabildiği gözlemlenmiştir.

Bilim Kodu	:	90523
Anahtar Kelimeler	:	Spektrum paylaşımı, Bilişsel Radyo, ARQ, HARQ, Spektrumun ikincil kullanımı, Geribeslemeli haberleşme sistemleri
Sayfa Adedi	:	96
Danışman	:	Prof. Dr. Nursel AKÇAM

USAGE OF COGNITIVE RADIO (CR) IN ARQ FEEDBACK SYSTEMS

(Ph. D. Thesis)

Metin ÇİÇEK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2021

ABSTRACT

Cognitive Radio (CR) seeks to identify channels that are empty or infrequent by detecting the spectrum environment so that the available spectrum can be used more efficiently, and to allocate appropriate channels to secondary users. In this thesis, simulation studies on detection and evaluation of communication resource for cognitive secondary users in Automatic Repeat Request (ARQ) systems have been carried out. The frequencies of the primary systems can be used by the secondary systems in two different ways: underlay and overlay. While there is an option to create a certain level of interference on primary users according to the underlay method, in the overlay model, it is aimed to use the detected empty channels without allowing any interference on the primary users. In this thesis, CR applications for Basic ARQ and Hybrid ARQ (HARQ) systems with both methods are examined. By listening to the ARQ control signals of the primary system, the CR indirectly has the opportunity to obtain information about the state of the channel and its interference on the primary system. Thus, the secondary user can determine the action strategy for the purpose of accessing the spectrum. In the simulations performed for the secondary use of primary ARQ and HARQ systems, it has been observed that a significant amount of resources can be provided to the secondary user while maintaining the primary user throughput performance.

Science Code : 91440

Key Words : Spectrum sharing, Cognitive Radio, ARQ, HARQ, Secondary use of spectrum, Feedback communication systems system

Page Number : 96

Supervisor : Prof. Dr. Nursel AKÇAM

TEŞEKKÜR

Uzun ve zorlu tez çalışmam süresince beni destekleyen, büyük sabır ve hoşgörü ile davranan, yoğun mesaisine rağmen sürekli zaman ayırarak çalışmalarımda önemli katkıda bulunan sayın hocam Prof. Dr. Nursel AKÇAM'a, bilgi ve deneyimleriyle beni yönlendiren sayın hocalarım Prof Dr. Erdem YAZGAN ve Doç Dr. Özgür ERTUĞ'a en içten saygılarımı ve teşekkürlerimi sunmak isterim.

Bugünlere gelmemde en büyük desteği gördüğüm anneme ve babama, tez çalışmam boyunca gösterdiği hoşgörü ile desteği için kıymetli eşime, bu süreçte bana ve aileme huzur ve mutluluk vererek bizi neşelendiren sevgili çocuklarım Ahmet Emre ve Zeynep Elif'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xii

1. GİRİŞ 95

2. ARQ YAPILARI 103

2.1. Hata Sezme Yöntemi Olarak CRC 104

2.2. ARQ Sistemlerde Güvenilirlik 107

2.3. Temel ARQ Yapıları 109

2.3.1. Dur ve Bekle (SW) ARQ protokolü 109

2.3.2. N Adım Geri Git (GB-N) ARQ protokolü 111

2.3.3. Seçici Tekrar (SR) ARQ protokolü 113

2.4. HARQ Yapıları 116

2.4.1. Tip1 HARQ 117

2.4.2. Tip 2 HARQ 118

2.5. ARQ ve HARQ Sistemlere İlişkin Başarım Simülasyonları 122

3. BİLİŞSEL RADYO 127

3.1. BR Tanımı 129

3.2. Frekans Kaynağının Değerlendirilmesi Bakımından BR 132

3.3. BR'nun Avantajları 134

3.4. BR'nun Gerçekleştirilmesi Önündeki Engeller 136

3.4.1. Gizli düğüm veya girişim problemi 136

3.4.2. Donanım gereçleri 138
3.4.3. Sistem kontrol zorluğu 138
4. ARQ SİSTEMLERDE BR 139
4.1. Kullanılan BR Modeli 139
4.2. Alt Paylaşımlı Modeller 140
4.2.1. Temel ARQ sistemlerinin BR tarafından alt paylaşımlı ikincil kullanımı ... 142
4.2.2. HARQ sistemlerin BR tarafından alt paylaşımlı ikincil kullanımı 149
4.2.3. Asenkron alt paylaşımlı SW HARQ sisteminin ikincil kullanımı 152
4.3. Yer Paylaşımlı Model 158
4.3.1. Yer paylaşımlı bilişsel SW HARQ modeli 158
4.3.2. Uzun gecikmeli SW HARQ sistem için BR kullanımı 161
4.3.3. Kısa gecikmeli SW HARQ sistem için BR kullanımı 162
4.3.4. Yer paylaşımlı SW HARQ sistem için performans analizi 163
4.3.5. Yer paylaşımlı SW HARQ sistemde düğüm uzaklıklarının etkileri 169
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 181
KAYNAKLAR 183

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.1. Simülasyon çalışmasında esas alınan parametre değerleri 150

Çizelge 4.2. Kullanılan modelde farklı t_i süresine karşılık t_{j1} ve t_{j2} değerleri ve ikincil başarım notasyonları 155

Çizelge 4.3. Bilişsel SW HARQ modellerinin kıyaslaması..... 161

Çizelge 4.4. d_{11} ile d_{21} ve d_{12} ile d_{22} arasındaki ilişkiye göre ikincil veri paketi üzerindeki girişim süreleri 173

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. SW ARQ protokolü 110

Şekil 2.2. GBN ARQ protokolüne bir örnek..... 112

Şekil 2.3. SR ARQ protokolüne bir örnek 113

Şekil 2.4. Temel ARQ sistemlerinin performansları 116

Şekil 2.5. HARQ sistemlerinin performansları..... 123

Şekil 2.6. SW ARQ ve SW HARQ sistemlerinin performans kıyaslaması 124

Şekil 2.7. GB-N ARQ ve GB-N HARQ sistemlerinin performans kıyaslaması 124

Şekil 2.8. SR ARQ ve SR HARQ sistemlerinin performans kıyaslaması 125

Şekil 3.1. Spektrum kullanımı 128

Şekil 3.2. Frekans-zaman boyutlarında tanımlanan spektrum boşlukları..... 128

Şekil 3.3. BR gelişim süreci..... 130

Şekil 3.4. Matrissel anlatımla BR kavramı 131

Şekil 3.5. Radyo ortamı için kullanılan genel bilişsel yöntem 133

Şekil 3.6. Gizli düğüm problemi..... 137

Şekil 4.1. BR modeli..... 139

Şekil 4.2. ARQ sistemde Erişim Kontrol Algoritması..... 141

Şekil 4.3. İkincil verici gücü 4Watt iken SW ARQ birincil ve ikincil başarım performansları..... 146

Şekil 4.4. İkincil verici gücü 5Watt iken SW ARQ birincil ve ikincil başarım performansları..... 146

Şekil 4.5. İkincil verici gücü 6 Watt iken SW ARQ birincil ve ikincil başarım performansları..... 147

Şekil 4.6. GB-N ARQ birincil ve ikincil başarım performansları 148

Şekil 4.7. SR ARQ birincil ve ikincil başarım performansları 148

Şekil 4.8. Alt paylaşımlı bilişsel SW HARQ sisteminde birincil ve ikincil kullanıcı başarım performansları 151

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.9. Alt paylaşımlı bilişsel GB-N HARQ sisteminde birincil ve ikincil kullanıcı başarım performansları 151

Şekil 4.10. Alt paylaşımlı bilişsel SR HARQ sisteminde birincil ve ikincil kullanıcı başarım performansları 152

Şekil 4.11. SW HARQ çalışma prensibi 153

Şekil 4.12. Kullanılan modelde bir paket gönderimi zaman periyodu için verici ve alıcıların veri paketi durumu 154

Şekil 4.13. Farklı t_i sürelerini esas alan SU'ların SNR-Başarım performansı 155

Şekil 4.14. t_{j1} oranına göre birincil ve ikincil kullanıcı başarım değerleri, SNR=1dB . 156

Şekil 4.15. t_{j1} oranına göre birincil ve ikincil kullanıcı başarı oranları, SNR=3dB 157

Şekil 4.16. Birincil ve ikincil SW HARQ vericilerinin davranışı..... 160

Şekil 4.17. Uzun gecikmeli SW HARQ sisteminin ikincil kullanımı 162

Şekil 4.18. Kısa gecikmeli SW HARQ sisteminin ikincil kullanımı..... 163

Şekil 4.19. İkincil SW HARQ kullanıcının başarım performansı 165

Şekil 4.20. İkincil SW HARQ kullanıcının ortalama gecikme performansı..... 166

Şekil 4.21. Birincil ve ikincil kullanıcıların uçtan uca bit başarım performansları 167

Şekil 4.22. Birincil ve ikincil kullanıcıların uçtan uca bit başarım performansları 168

Şekil 4.23. Faklı P_{on} değerleri için birincil başarım performansları ($a_1=1$)..... 168

Şekil 4.24. Birincil ve ikincil iletim süresince birincil alıcının durumu..... 170

Şekil 4.25. d_{11}, d_{21} ilişkisine bağlı olarak birincil alıcıdaki paket çerçeve düzeni 171

Şekil 4.26. $d_{11}>d_{21}$ ve $d_{12}>d_{22}$ durumlarında ikincil alıcıda paket çerçeve düzeni 173

Şekil 4.27. $d_{11}=d_{21}$ ve $d_{12}=d_{22}$ kabulüyle d_{11} ile d_{22} arasındaki ilişkiye göre birincil ve ikincil başarımlar..... 175

Şekil 4.28. $d_{11}=d_{21}$ ve $d_{11}=d_{22}$ kabulüyle d_{12} ile d_{22} arasındaki ilişkiye göre birincil ve ikincil kullanıcı başarım performansları 176

Şekil 4.29. $d_{11}=d_{22}$ ve $d_{12}=d_{22}$ kabulüyle d_{21} ile d_{11} arasındaki ilişkiye göre birincil ve SU başarım performansları 177

Şekil 4.30. ρ değerine göre birincil ve ikincil başarım performansları..... 178

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
a	Gecikme oranı
a_d	Kodlayıcıya ilişkin *d* uzaklığı için hatalı yolların sayısı
D_d	Kodu çözülen dizinin sezilen hatayı içermesi olayı
d_{ij}	*i* vericisinden *j* alıcısına doğru uzaklık
db	Desibel
E_b	Bir bilgi bitinin enerjisi
L_2	İkincil veri (data) paketi uzunluğunu
N_0	Gürültü gücü
P_c	İkincil kullanıcının kanalı kullanma hakkını kazanma ihtimali
P_d	Kod çözücüde *d* uzaklığında yanlış yol seçilme olasılığı
P_F	Alıcının veri paketini hatalı alma olasılığı
P_{on}	PU'nın her bir TS'de kanalı kullanma ihtimali
P_p	Birincil veri paketinin alıcıya doğru iletilme ihtimali
P_s	İkincil veri paketinin alıcıya doğru iletilme ihtimali
$P_v(E)$	Viterbi kod çözücüde oluşan hata olasılığı
R	Verici hızı
R_c	Kod oranı
R_L	Kodlamalardan dolayı oluşan başarım kaybı
$\mathbf{R_s}$	İkincil verici hızı
$\mathbf{R_1}$	Birincil alıcı
$\mathbf{R_2}$	İkincil alıcı
sn	Saniye
T	Başarım
$\mathbf{T_1}$	Birincil verici
$\mathbf{T_2}$	İkincil verici
T_p	Birincil kullanıcının başarım değeri

Simgeler	Açıklamalar
T_p^*	İkincil sistemin bulunduğu ortamda birincil başarım değeri
T_e	Birincil kullanıcının eşik başarım değeri
t_e	Girişim süresi
t_{pij}	*i* düğümünden *j* düğümüne sinyal iletim süresi
t_s	Spektrum sezme için harcanan süre
t_f	Vericinin veri paketini kanala verdiği süre
t_w	Stop-and-Wait sistem için bekleme süresi
ε	Bit hata oranı
μ	İkincil vericinin bekleme süresi

Kısaltmalar	Açıklamalar
ARQ	Automatic Repeat Request (Otomatik Tekrar İsteği**)**
AWGN	Additive White Gaussian Noise (Eklenebilir Beyaz Gausyan Gürültü)
BER	Bit Error Rate **(**Bit Hata Oranı)
BR	Bilişsel Radyo
CRC	Cyclic Redundancy Check (Döngüsel Artıklık Denetimi)
DSE	Dinamik Spektrum Erişimi
FEC	Forward Error Correction (İleri Yönde Hata Düzeltimi)
GB-N	Go Back-N (N-Adım Geri Git)
HARQ	Hibrit Automatic Repeat Request (Hibrit Otomatik Tekrar İsteği)
ITU	International Telecommunication Union (Uluslararası Telekomünikasyon Birliği)
LBC	Linear Block Codes **(**Lineer Blok Kodlar)
OSI	Open System Interconnection (Açık Sistem Arabağlaşımı)
PU	Primary User (Birincil Kullanıcı)
SNR	Signal-to-Noise Ratio **(**İşaret/Gürültü Oranı)
SR	Selective Repeat **(**Seçici Tekrar)
SU	Secondary User (İkincil Kullanıcı)
TCP	Transmission Control Protocol (İletişim Kontrol Protokolü)

Kısaltmalar	Açıklamalar
TS	Time Slot (Çevrim Periyodu)
YTR	Yazılım Tanımlı Radyo

1. GİRİŞ

Son yıllarda kablosuz haberleşme teknolojilerinde gerçekleşen gelişmeler ve bu teknolojilerin üzerinden sunulan mobil uygulamalara giderek artan bir kullanıcı talebi olmaktadır. Bu durum spektrum kullanımındaki artışa neden olduğundan, klasik spektrum yönetimi politikalarının dışında yeni teknik çözüm önerilerini ortaya çıkarmıştır. Bu önerilerden bir tanesi; mevcut spektrumun dinamik olarak sezilmesiyle, birincil kullanıcı (PU)'ların iletişiminde herhangi bir kalite kaybı oluşturmadan belirlenen boş veya düşük güçlü frekans bantlarından faydalanmayı (ikincil kullanıcıların kullanımına açmayı) amaçlayan BR kavramıdır.

Klasik spektrum yönetimi modelinde ana frekans blokları ilgili teknolojilere ve uygulamalara statik bir yöntemle paylaştırılır. İlgili frekans kanalındaki kullanıcılar da önceden belirlenen düzenleyici esaslara uygun olarak frekans paylaşımı, çoğullama yapıları, modülasyon, kodlama, iletim gücü gibi parametreler bakımından mevzuatın öngördüğü biçimde iletişimde bulunurlar.

BR, statik spektrum yönetiminin dışında; konuma, zamana, kanal yapısına, kullanıcı sayısına göre koşulları göz önünde bulundurarak, frekans bandı başta olmak üzere, uygun haberleşme parametrelerini belirleyen ve kullanabilen adaptif yapılar olarak tanımlanır. Bu sebeple, BR yeni dinamik spektrum kaynaklarının yaratılması bakımından spektrumdaki tıkanıklığa karşı ümit vadeden bir haberleşme sistemidir. BR tekniği ile spektrum boşlukları fırsatçı biçimde kullanılarak spektral verimlilik artırılabilir. Spektrumun sezilmesi, yönetilmesi ve paylaşılması ile ikincil kullanıcı (Seconder User - SU)'lar spektrum boşluklarının varlıklarını saptar ve PU'lar üzerinde girişim oluşturmadığı sürece söz konusu boşlukları fırsatçı biçimde kullanırlar. Bu koşulu sağlama adına bazı yöntemler ortaya atılmıştır. Bunlardan bir tanesi de, birçok haberleşme sisteminde hata kontrol tekniği olarak kullanılan ARQ sinyallerinin değerlendirilmesidir.

Bununla birlikte, veri haberleşmesinde hata, alıcıda ya doğrudan düzeltilebilir ya da hatanın sezilmesinden sonra vericiden hata tespit edilen veri paketini tekrar göndermesi istenerek hata düzeltilir. Söz konusu paketin verici tarafından tekrar iletilmesinin istenmesi ARQ olarak adlandırılır.

Spektrum yönetimine ve frekans kullanımına ilişkin yapılan çok sayıda çalışmada; kullanıcılara tahsis edilen frekans bantlarının zaman ve konum bazlı olarak yapılan analizlerinde büyük oranda kullanılmadığını göstermektedir. Söz konusu çalışmalarda ayrıca kablosuz haberleşme sistemlerin en çok kullanıldığı frekans bantlarında talebin giderek arttığı görülmüştür. Son 25 yılda artan talep ile giderek değerlenen spektrumun daha etkin ve verimli kullanılmasına yönelik son yıllarda önemli çalışmalar yapılmaktadır [1-7]. Frekans bantlarına olan talep artışı ve frekans kıtlığı problemine yönelik olarak önerilen önemli çözüm yollarından biri de BR kullanımıdır. BR kavramı frekans kıtlığı problemine çözüm bulmak amacıyla ilk olarak 1999 yılında Mitola ve Maguire tarafından ortaya atılmıştır [1].

BR, Dinamik Spektrum Erişimi ve Fırsatçı Spektrum Paylaşımı yöntemiyle SU'nın (yasal olarak hizmet almamış durumda olan) PU (yasal olarak belirli bir spektrumu kullanma hakkı bulunan) tarafından kullanılmayan veya yeterince kullanılamayan spektrum boşluğuna erişimini sağlar. Bu yaklaşım spektrum kullanımını önemli ölçüde verimlileştirir. Bu radyo ortamında SU'lar çeşitli spektrum sezme yöntemleriyle spektrum boşluklarının varlıklarını saptar ve PU'lar üzerinde girişim oluşturmadığı sürece söz konusu boşlukları fırsatçı biçimde kullanır [6].

İkincil kullanıcıların, lisanslı kullanıcıların kaynaklarından yararlanması sürecinde PU'ların kaynağa erişiminde herhangi bir engel oluşmamalıdır. Bu kapsamda literatürde yer alan ve de günümüzde kullanım alanlarını gördüğümüz "detect-and-avoid" modellerinde, SU sürekli olarak spektrum boşluklarını tarar ve belirlediği bu boşluklarda iletimini gerçekleştirir, ancak PU üzerinde girişim oluşturmaktan sakınmalıdır [8]. Ancak bu modellerde genellikle yanlış sezme işlemleri ile PU ile çakışmalar olabilmektedir. Bununla birlikte, literatürde mevcut kablosuz sistemlerde herhangi bir performans azalmasına sebep olmadan yeni sistemlerde güç ve bantgenişliğini sınırlamak üzere "girişim sıcaklığı" modeli önerilmiştir. [9,10]. Ancak bu modelde, pratikte oldukça zor olan girişim kanalının doğru tahmin edilmesi gerekmektedir. Yanlış girişim seviyesinin belirlenmesi durumunda PU üzerinde telafisi mümkün olmayan girişim oluşumu söz konusudur. Alternatif olarak işbirlikçi spektrum paylaşım modelleri önerilmiştir [11-13]. İşbirlikçi modellerde farklı senaryolar kullanılmıştır. Bu senaryolarda; SU gürültünün yüksek olduğu kanal ortamlarında bir röle gibi hareket ederek PU'nın sinyalini güçlendirici etki göstermekte, PU'nın iletişim performansını artırmakta, daha sonra kendi iletişiminde

kullanmak üzere puan toplamaktadır. Birçok parametre belirli bir noktaya erişince (kanal gürültü durumu, toplanan puan, anlık birinci ve SU'ya ait başarım performansları vs) SU tarafından iletim yapılmaktadır. Dolayısıyla her iki kullanıcının iletimine imkan vermek amacıyla ilgili parametrelere ilişkin optimizasyon çalışması yürütülmüştür. İlaveten SU'nın işbirliği dolayısıyla, birincil alıcı üzerinde gerçekleşecek muhtemel girişim, uygun güç kontrol mekanizmaları sayesinde telafi edilebilmektedir [14,15].

Bununla birlikte, literatürde ARQ geribeslemeli sistemlerde BR kullanımı hususu da farklı açılardan değerlendirilmiştir. Literatürde ARQ temelli birincil sistemin "Olumlu Alındı" (ACK, Acknowledgement) veya "Olumsuz Alındı" (NAK, Not-Acknowledgement) geribesleme sinyalleri kullanılmasını amaçlayan muhtelif modeller önerilmiştir. Geribeslemeli veri sistemleri için izlenen genel yöntem; birincil sistemin ARQ kontrol sinyallerinin dinlenmesiyle, BR'nun dolaylı olarak kanalın durumu ve birincil sistem üzerine oluşturduğu girişim hakkında bilgi edinmesi ve böylece spektruma erişimi için hareketini belirleyebilmesidir [16].

BR'nun ARQ sistemlere sağladığı bir diğer önemli kazanım, kodlama şeması ve uzunluğu dahil paket çerçeve yapılarında adaptif olarak değişikliğe gidebilmesidir. Böylece söz konusu esneklik kullanılarak, birincil sistemle beraber aynı kanal ortamında iletişim halinde bulunmasına olanak sağlanır [17].

Ayrıca SU'nın, ARQ temelli birincil sistemin geribesleme sinyallerini dinleyebildiği, böylece PU'nın hedef başarımını elde etmesi şartıyla, SU'ya adaptif olarak kendi hızını ayarlama imkanının verildiği çalışmalar bulunmaktadır [18-19].

İkincil kullanıcının birincil ARQ kullanıcısı üzerinde oluşturduğu girişim ve bu girişimin tekrarlı paket gönderimlerinde nasıl bir etkisinin olduğu hususu da çalışılmıştır [20-22]. PU ile SU'nın aynı zamanda iletim yaptığı durumda girişimin azaltılmasına ilişkin senaryolar sunulmuştur. Birincil ve SU'lar arasındaki etkileşimin tanımlanması için Markov modeli kullanılmıştır ve SU için optimal başarım artırım stratejileri önerilmiştir. Birincil sistemin olasılıksal iletim modeline ilişkin tam veya kısmi bilgilerin SU tarafından bilindiği kabulüyle, PU için kabul edilebilecek en üst başarım kaybı dikkate alınarak optimizasyon sağlanmıştır. Ayrıca, çok yollu iletimli (multi-hop) röle esasına dayalı BR tabanlı ARQ mekanizması Markov zinciri modeli kullanılarak çalışılmıştır [23].

Cheng ve arkadaşlarının önerdiği çalışmada, birincil bir ARQ sistemini takip eden SU boş periyotlar boyunca sürekli iletim yapmakta ve meşgul periyotlar boyunca PU'nın hizmet dışı kalmasını beklemektedir [24]. İkincil kullanıcının, PU'nın kanalı kullanım durumuna bağlı olarak bir olasılık fonksiyonunu takip ettiği fırsatçı bir girişim azaltma çalışması gerçekleştirilmiştir. Birincil ARQ tekrar iletimlerin sayısında belirli bir sınırlama olmadığı kabulüyle, eşzamanlı ikincil iletişimlerin etkisi değerlendirilmiştir.

Ayrıca literatürde ARQ temelli bir PU ile birlikte bulunan ikincil bir kullanıcının fırsatçı spektrum erişimi şeması önerilmiştir [25-27]. Temel fikir, SU'ya erişim imkanı vermek için PU tarafından gerçekleştirilen tekrar iletimlerde tespit edilen fırsatların kullanılmasıdır. Spektrum paylaşımının elde edilebilmesi için SU yoklama sinyali (probing signal) yayınlamaktadır. Bu sinyalin cevabı olarak birincil verici tarafından gönderilen uygun ACK/NAK mesajını dinlemektedir ve daha sonra spektruma erişilip erişilmeyeceği hususuna karar verilmektedir. İkincil sistemin başarım performansında "detect-and-avoid" şemasına nazaran bir artış olmasına rağmen lisanslı frekans bandının yoklanması ile ikincil iletişim birincil alıcı üzerinde sürekli girişime sebep olmaktadır. Böylelikle, kontrollü bir etkileşim söz konusu olmasına rağmen birincil iletim performansının düşmesine yol açılmaktadır.

Birincil ARQ iletimleri hakkındaki elde edilebilecek herhangi bir bilgi çok değerli olup, dikkatli kullanılması gerekmektedir. Bu düşünceden hareketle, iki önemli çalışmada birincil HARQ sisteminin aynı veri paketine ilişkin tekrar iletimleri arasındaki benzerlikler ve farklılıklar değerlendirilmiştir [26,27]. Bahse konu çalışmalarda, bir veri paketine ilişkin ilk iletimin yeterli bilgi sağlamadığı düşüncesiyle aynı veri paketinin ikinci iletimi analiz edilmektedir. Söz konusu tespitlerle gerçekleştirilen ikincil iletim uygulamasıyla önemli ikincil hızlar sağlarken, birincil alıcı üzerinde oldukça az bir girişim oluşturulduğu gözlemlenmiştir.

Güç kontrolünü esas alan çalışmalarda, birincil ARQ sistemini alt paylaşım esasına göre kullanmak isteyen SU'nın verici gücü kontrol edilmek suretiyle, PU üzerindeki girişim azaltılmaya çalışılmıştır [28-30]. Önerilen güç kontrol modellerinde, birincil ARQ geribesleme sinyalleri önemli bir bilgi kaynağı olarak değerlendirilmiştir. Güç kontrolü ile birincil girişim kontrol altına alınabilirken, ikincil kapasite de önemli artışlar sağlanmıştır.

Ayrıca, alt paylaşımlı BR modelinin önerildiği, birincil ARQ sistemle işbirlikçi çalışma esasına dayalı model önerilmiştir [31]. Li ve arkadaşları, birincil ve ikincil kullanıcıların beraber bulunduğu ortamda SU'lar için işbirlikçi erişime dayalı bir spektrum paylaşım modeli önermiştir [32]. Bu modelde ikincil sistem, işbirlikçi mod ile erişim modu arasında geçişler yapmaktadır. Böylelikle birincil başarım performansında herhangi bir azaltıcı etki olmadan spektruma erişmeyi başarmaktadır. İşbirlikçi modda, birincil alıcıdan gönderilen NAK sinyali saptanırsa, ikincil verici bir röle gibi davranarak aynı veri paketini birincil alıcıya iletmek suretiyle PU'ya yardımcı olmaktadır. Bu durumda, birincil sistemin doğruluk başarımı artırılarak, ikincil sistemin katkılarıyla gerçekleştirilen bu artış neticesinde, ikincil sistemde kredi biriktirilmektedir. Söz konusu krediler, daha sonra erişim modunda kullanılmak üzere ikincil spektrum erişim hakkı elde etmek için değerlendirilmektedir. Ortalama olarak, işbirlikçi modda biriktirilen kredilerin, erişim modunda birincil başarım performansındaki azalmayı telafi edecek yeterlilikte olduğu bir kredi sistemi kullanılmaktadır. Böylece ikincil sistem spektruma erişimi en fazla imkan ile elde etmiş olmakla birlikte, spektrum paylaşımının olmadığı duruma göre birincil sistem için eşit veya daha yüksek oranda başarım sağlanmaktadır. Ayrıca, yüksek girişimli HARQ kanalında alıcıların işbirlikçi modele göre çalıştığı bir yöntem de önerilmiştir [33].

1. tip HARQ yöntemini kullanan PU'lar ile spektruma erişmek isteyen bilişsel SU'lar için bir yöntem önerilmiş olup, bu teknik, SU alıcısında kullanılan Girişim Engelleme (Interference Cancellation) ile ortak ARQ kanalında baskı oluşturmaktadır [34].

HARQ geribesleme kullanılarak spektrum paylaşım şebekelerinin başarım ve kesinti olasılığı performansları belirlenmektedir [35,36]. Makki ve arkadaşları tekrar süresi çeşitliliği ve fazlalık artırımlı (incremental redundancy) HARQ protokolleri üzerinde durmuş olup, sonuçlar sürekli haberleşme modelleri için elde edilmiştir [35]. Kanal veri iletim performansı, SU iletim tepe gücü ve PU alınan girişim güç kısıtları dikkate alınarak incelenmiştir. Ayrıca ikincil-birincil kanal durum bilgisi hata olasılığının ikincil kanal performansına etkisi değerlendirilmiştir. Söz konusu çalışmada simülasyon sonuçları, başarım değerinin HARQ tarafından yeterince artırılamamasına karşın, mevcut kesinti olasılığının tüm durumlar için azaltıldığını göstermektedir.

BR'nun, PU'nın efektif paket hızını izlediği ve sadece bu hızın belirli bir eşiğin üstünde olması durumda iletim yapılmasına izin verdiği basit ve kapsayıcı bir strateji önerilmiştir

[19]. Bu stratejide hem bilinmeyen zaman değişimli girişim karakteristikleri hem de uygun gecikme özellikleri dikkate alınmış olup, SU için iletim imkanı oluşturacak PU hız sınırı matematiksel ifadelerle tespit edilmeye çalışılmıştır.

Lapiccirella ve arkadaşları tarafından; PU'nın korunması sağlanırken SU için üstün bir performans sağlayan model çift yönlü ve interaktif bir kablosuz haberleşme sistemi dikkate alınmıştır [37]. Diğer literatürden farklı bir bakış açısı ile sunulan bu çalışmada birincil ve ikincil kullanıcının bir arada bulunma performansını oluşturan parametrelere ilişkin durum bilgisi, önerilen bir güncelleme vektörü ile her iletimde güncellenmektedir.

Daha önceki çalışmaların [26] geliştirilmesiyle Li ve arkadaşları tarafından sunulan çalışmada [38]; SU, PU'nın ARQ sinyallerini dinleyerek birincil kanal hakkında bilgi toplamasının yanı sıra bir paket iletmek ve birincil ARQ geribesleme sinyallerini dinlemek suretiyle kanalı yoklayabileceği şeklinde bir yöntem sunulmuştur. Böylece birincil kanal ve çapraz kanalın göreli kapasitesi hakkında ilave bilgi edinmiş olunmaktadır. Bu metot SHARP (Spectrum Harvesting with ARQ Retransmission and Probing) olarak isimlendirilmiştir. Yoklama işlemi birincil başarımdaki kaybı minimum seviyede tutmak için çok seyrek olarak gerçekleştirilmektedir. Bu modele göre geleneksel ve agresif SHARP yöntemleri iki çeşit SHARP yöntemi söz konusudur. Her iki yöntem de PU'nın herhangi bir kesintiye uğramasından sakınmaktadır. Yöntemlerin farkları ise; geleneksel SHARP'ın birincil işlemleri tamamen serbest bırakırken, agresif SHARP, SU için en iyi başarım değerini elde etmek için bazen PU'yı bir paket için bir defalık iletim yerine iki defalık iletime zorlayabilmesidir. Önerilen sistemin performansları analiz edilmiştir ve görülmüştür ki; önerilen yaklaşım ile ikincil başarım önemli derecede artırılabilmektedir. Bu arada hem yoklama periyodunda hem de iletim sürecinde birincil başarımında küçük bir azalma söz konusu olmaktadır.

Rehman ve arkadaşlarının önerdiği çalışmada [39], herhangi bir veri aktarım tekniğini kullanan PU'ların kanalı kullanmadığı periyotlarda bilişsel SU'nın tam doğrulukta spektrum sezme işlemi yaptığı kabulüyle PU'nın boş gönderim periyotları yer paylaşım yöntemi esas alınarak kullanılmaya çalışılmıştır. Aynı sistem ve yöntem kullanılmak üzere, spektrum sezme işleminin kısmı doğruluk ile gerçekleşmesi durumunda SU'nın başarım değerlendirmesi de yapılmıştır [40].

Bu tez çalışmasında, ARQ sistemler; temel ARQ yapıları ve HARQ yapıları olmak üzere iki ayrı ana başlıkta ele alınmıştır. BR uygulamasında ise alt paylaşımlı ve yer paylaşımlı olmak üzere iki temel yöntem esas alınmıştır. Alt paylaşımlı BR modeli tüm ARQ ve HARQ sistemleri için uygulanmıştır. Alt paylaşım modeli uygulanırken, tez çalışması kapsamında geliştirilen ve önerilen Erişim Kontrol Algoritması (EKA) kullanılmıştır. Birincil ve ikincil kullanıcının ARQ geribesleme sinyalleri bazı iletim parametreleri kullanılarak EKA ile SU'nın davranışları belirlenmektedir. Böylece PU üzerindeki zararlı girişim sınırlandırılmaktadır. Yer paylaşımlı BR model olarak, Dur-ve-Bekle (SW, Stop-and-Wait) HARQ sistemlerde PU'nın bekleme süreleri SU tarafından değerlendirilmiştir. Önerilen yöntem ile PU üzerinde herhangi bir girişim oluşmaz iken, SU için önemli haberleşme kaynağı sağlanmıştır.

2. ARQ YAPILARI

Haberleşme ortamında veri paketleri iletilirken paketteki bazı bitler bozulabilir. Ancak alıcıda alınan paketteki bitlerin doğru olduğu kabul edilir. Oysa paketteki tek bir bitin hatalı alınması tüm paketin bile yanlış anlaşılmasına sebep olabilir. Dolayısıyla kanal ortamı ne kadar güvenilirli olursa olsun haberleşme sistemleri aktardıkları tüm verilerin karşı tarafça doğru alındığından emin olmalıdır.

Bu sebeple haberleşme sistemlerinde alınan veri paketlerinin hatalı olup olmadığının tespitine yönelik olarak alıcılarda hata sezme teknikleri uygulanır. Eğer söz konusu hatalar düzeltilemiyor ise söz konusu paketin verici tarafından tekrar gönderilmesi gerekir. Alıcıda hata ya doğrudan düzeltilebilir ya da hatanın sezilmesinden sonra vericinin tekrar hata tespit edilen veri paketini göndermesi istenerek, söz konusu hata düzeltilebilir. Vericinin söz konusu paketi tekrar iletmesinin istenmesi ARQ olarak adlandırılır [41].

ARQ protokolü günümüzde, paket haberleşmesi esasına dayalı çok sayıda telekomünikasyon sisteminde kullanılır. ARQ protokolü Açık Sistem Arabağlaşımı (OSI, Open System Interconnection) modelinde 2. katman olan Veri Link Katmanında çalışmaktadır. İnternet şebekesi protokolü olan İletişim Kontrol Protokolü (TCP, Transmission Control Protocol), bir ARQ çeşidi olan N-Adım Geri Git (GB-N, Go Back-N) yapısını kullanarak veri iletimi güvenliğini sağlamaktadır. Yine kablosuz 2. Nesil (2N), 3. Nesil (3N), 4. Nesil (4N) veri haberleşme sistemlerinde ve kablosuz bağlantı alanı (Wireless Fidelity – WiFi) gibi kısa mesafe kablosuz veri haberleşme sistemlerinden, uydu linklerinde veri haberleşme sistemlerine kadar birçok haberleşme sisteminde veri güvenilirliğinin sağlanması bakımından yaygın biçimde kullanılır.

Veri paketi alıcıya ulaştığında ARQ yapıları ile hata sezme işlemi uygulanır. Hata sezilmesi durumunda İleri Yönde Hata Düzeltimi (FEC, Forward Error Correction) yapıları ile hata düzeltme işlemi uygulanabilir. ARQ ve FEC sistemlerinin kombine edildiği, hata sezme ve hata doğrultma işlemlerini yürüten bu yapılar HARQ olarak adlandırılır [42-43]. Veri haberleşme sistemlerinde hata sezme teknikleri açısından ağırlıklı olarak ARQ yapıları kullanılır. Ayrıca kapsamlı hata düzeltme teknikleri açısından da FEC yöntemleri

kullanılırken, hem hata sezme hem de hata düzeltme tekniklerinin beraber kullanılması açısından HARQ yöntemleri de kullanılabilir.

Veri haberleşmesinde hata sezme işlemine yönelik olarak yaygın olarak Döngüsel Artıklık Denetimi (CRC, Cyclic Redundancy Check) ve Lineer Blok Kodlar (LBC, Linear Block Codes) kullanılır [44]. Bu tezde hata sezme işlemi amacıyla CRC kodlar kullanılmıştır.

2.1. Hata Sezme Yöntemi Olarak CRC

ARQ'da hata sezme amacıyla vericide mesaj bit paketi önceden belirlenmiş olan CRC kod fonksiyonu ile çarpılarak kanala verilir. Alıcıda alınan bu veri paketi aynı CRC fonksiyonuna bölünerek kalan değere bakılır. Kalanın sıfıra eşit olması halinde söz konusu pakette bozulmanın olmadığı, belirli bir kalan değer bulunması halinde ise paket bitlerinde hata bulunduğu yönünde karar verilerek hata sezme işlemi yapılır.

Bu yöntemde gönderilen veri katarından elde edilen bir sınama katarı, gönderilen veri katarının sonuna eklenir ve nihai katar alıcıya ulaştırılır. Veri katarı *P(x)* polinomu ile tanımlansın. *n* bit uzunluklu bilgi sinyali için söz konusu polinom,

$$P(x) = b_{n-1}x^{n-1} + b_{n-2}x^{n-2} + ... + b_1x^1 + b_0x^0 \tag{2.1}$$

şeklinde tanımlanır. x^{n-1} teriminin katsayısı, polinomun ilk biti, x^{n-2} teriminin katsayısı da ikinci bitidir. x^0 teriminin katsayısı ise son bitin değeridir. Örneğin, 1001010111 bit dizisine karşılık gelen polinom aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} P(x) &= 1.x^9 + 0.x^8 + 0.x^7 + 1.x^6 + 0.x^5 + 1.x^4 + 0.x^3 + 1.x^2 + 1.x^1 + 1.x^0 \\ &= x^9 + x^6 + x^4 + x^2 + x^1 + x^0 \end{aligned} \tag{2.2}$$

P(x) polinomu x^p ile çarpılır. Aslında oluşan yeni polinoma ilişkin katar, önceki polinom ile onun sonuna eklenmiş *p* adet 0 bitinden oluşur:

$$1001010111\underbrace{00...00}_{p\ adet\ 0}$$

$x^p.P(x)$ polinomu, *p.* dereceden *G(x)* olarak tanımlanan bir üreteç polinomuna bölünür. Üreteç polinomları önceden verici ve alıcı tarafından bilinen polinomlardır. Vericide $x^p.P(x)/G(x)$ hesaplanırken, bu bölme işleminin bölümü *Q(x)*, kalanı *R(x)* olur.

$$x^p.P(x) = Q(x).G(x) + R(x) \tag{2.3}$$

Modulo 2 aritmetiği kullanılacak olursa,

$0+0=0;\quad 0-0=0$
$0+1=1;\quad 0-1=1$
$1+0=1;\quad 1-0=1$
$1+1=0;\quad 1-1=0$

Yani,

$$\begin{aligned} x^p.P(x) - R(x) &= Q(x).G(x) \\ x^p.P(x) + R(x) &= Q(x).G(x) \end{aligned} \tag{2.4}$$

olmalıdır.

Verici alıcıya *P(x)* polinomuna eşdeğer bit dizisi yerine $x^p.P(x)+R(x)$ polinomunu göndersin. Bu bit dizisi, gönderilecek olan asıl mesaj bit dizisi ile bunun sonuna eklenmiş olan *p* adet bitten oluşan ek diziden ibarettir. Vericiden iletilen dizi, *G(x)* dizisinin katıdır *ve G(x)* üreteç dizisi de alıcı tarafından bilinmektedir.

Kanaldan geçerek alıcıya ulaşan bit dizisinde herhangi bir bitin bozulmadığını kabul edelim. Alıcı, elde ettiği diziyi *G(x)* polinomuna böler. Bu bölmenin sonunda kalan 0 olursa bit dizisinin hatasız olarak alıcıya ulaştığı sonucu çıkar. Elde edilen bit dizisinin son *p* adet bitini atar ve geriye kalan *n* adet bit, gerçek mesaj bitini ifade eder.

Örnek: 1010010111 mesaj bit dizisi CRC yöntemi ile hata sezme amaçlı olarak kullanılsın:

Bu mesaj katarına eş düşen polinom,

$$P(x) = x^9 + x^7 + x^4 + x^2 + x + 1 \tag{2.5}$$

Üreteç polinomu,

$$G(x) = x^4 + x^2 + x + 1 \tag{2.6}$$

belirlenmiş olsun. Eş. 2.3'deki gibi ifade edilirse,

$$x^4.P(x) = x^{13} + x^{11} + x^8 + x^6 + x^5 + x^4 \tag{2.7}$$

Söz konusu polinomunun üreteç fonksiyonuna bölümü ile;

$$x^{13} + x^{11} + x^8 + x^6 + x^5 + x^4 \quad \left| \frac{x^4 + x^2 + x + 1}{x^9 + x^6 + x^5 + x^2} \right.$$

$x^{13} + x^{11} + x^{10} + x^9$

.....

$x^{10} + x^9 + x^8 + x^6 + x^5 + x^4$

$x^{10} + x^8 + x^7 + x^6$

.....

$x^9 + x^7 + x^5 + x^4$

$x^9 + x^7 + x^6 + x^5$

.....

$x^6 + x^4$

$x^6 + x^4 + x^3 + x^2$

.....

$x^3 + x^2$

elde edilir. Vericide tespit edilen ilgili polinomlar;

Bölünen Eş. 2.7, bölen Eş. 2.6, bölüm,

$$Q(x) = x^9 + x^6 + x^5 + x^2 \tag{2.8}$$

Kalan,

$$R(x) = x^3 + x^2 \tag{2.9}$$

şeklindedir. Bu durumda, vericiden iletilecek bit dizisi,

$$\begin{aligned} Q(x).G(x) &= x^p.P(x) + R(x) = x^4(x^9 + x^7 + x^4 + x^2 + x + 1) + x^3 + x^2 \\ &= x^{13} + x^{11} + x^8 + x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + x^2 \end{aligned} \tag{2.10}$$

polinomu dikkate alındığında, aşağıdaki gibi olmalıdır:

1 0 1 0 0 1 0 1 1 1 1 1 0 0
mesaj bitleri *CRC bitleri*

Alıcı, elde ettiği bu diziyi *G(x)* polinomuna böler. Hatasız alıcıya ulaştığını kabul ettiğimiz bu bit dizisinin bölümünden doğal olarak kalan sıfır olarak bulunur [45].

2.2. ARQ Sistemlerde Güvenilirlik

Bir ARQ sisteminde alıcı, sezilemeyen bir hata sebebiyle kabul ettiği bir veri paketinde kod çözme hatası verir. Bu durum hata olayı olarak adlandırılır. *P(E)* hata olayı olasılığını göstersin. Güvenilir bir ARQ sisteminde *P(E)* değeri çok küçük olmalıdır. ARQ sisteminin güvenilirliği *P(E)* hata olasılığı ile ölçülür. ARQ sistemlerde sistem başarım performansı, alıcıda birim zamanda hatasız olarak alınan bit sayısının aynı zamanda vericiden iletilen ortalama bit sayısına oranıdır. Her üç temel ARQ sistemi aynı güvenilirlik performansını gösterir ancak farklı başarım performansları sağlarlar.

Örneğin, bir ARQ sisteminde hata sezme amacıyla *(n,k)* oranlı bir CRC kodu, *C* kullanılsın. Bu yapıda ilgili olasılıklara ilişkin olarak aşağıdaki notasyonlar tanımlansın;

P_c = Alınan veri paketinde hata bulunmaması,
P_d = Alınan veri paketinin sezilebilir bir hata örüntüsü (patern) içermesi,
P_e = Alınan veri paketinin belirlenemeyen bir hata örüntüsü içermesi,
Bu durumda,

$$P_c + P_d + P_e = 1 \tag{2.11}$$

dir. P_c olasılığı, kanal hata istatistiklerine, P_d ve P_e olasılıkları ise kanal hata istatistiklerine ve *(n,k)* oranlı *C* kodu seçimine bağlıdırlar. P_e, normalde kodun belirlenemeyen hata olasılığı olarak tanımlanmaktadır.

Veri paketinin hiçbir hata içermemesi veya sezilemeyecek bir hata paterni içermesi durumunda alıcı tarafından kabul edilir. Sezilemeyen hata örüntüsü ilk iletimde veya diğer tekrar iletimlerde gerçekleşebileceğinden, ARQ sisteminde alıcıda kabul edilen bir veri paketinin kod çözümü hatasını ifade eden *P(E)* olasılığı şu şekilde verilir;

$$\begin{aligned} P(E) &= P_e + P_d.P_e + {P_d}^2.P_e + ... = P_e(1 + P_d + {P_d}^2 + ...) \\ &= P_e \frac{1}{1 - P_d} = \frac{P_e}{P_c + P_e} \end{aligned} \tag{2.12}$$

Eğer *C* hata sezme kodu; P_e'nin P_c'ye göre çok küçük olacak şekilde özellikle seçilirse, *P(E)* olasılığı da küçük olacaktır. Eğer alıcıda alınan bit dizisi sezilebilir hata içeriyorsa, bu paket kabul edilmez ve paketin tekrar iletimi talep edilir. ε bit hata oranına sahip bir rasgele hata kanalı için,

$$P_c = (1 - \varepsilon)^n \tag{2.13}$$

şeklinde ifade edilmektedir. P_e tespit edilmemiş hata olasılığına sahip bir lineer blok kod için üst sınır şu şekilde tanımlanabilir [46,47]:

$$P_e \leq [1 - (1 - \varepsilon)^k]\ 2^{-(n-k)} \tag{2.14}$$

Eğer bu şekilde bir kod, hata sezme amacıyla kullanılırsa ve *n-k* parite bit sayısı yeterince büyük olursa, P_e, P_c'ye göre oldukça küçük olacak ve dolayıyla *P(E) << 1* olacaktır. Örneğin, C kodu (2047,2014) oranlı Bose–Chaudhuri–Hocquenghem (BCH) kodu olsun. Bu kod yukarıda belirtilen şartı sağlar. Bu kodun bir ARQ sisteminde hata sezme kodu olarak kullanıldığı düşünülsün. $\varepsilon = 10^{-3}$ kabul edilsin (yüksek bit hata oranına sahip olsun). O zaman $P_c \approx 1{,}25x10^{-1}$ ve $P_e \leq 10^{-10}$ olacaktır. Eş. 2.12'nin de kullanımıyla, $P(E) \leq 8x10^{-10}$ olacaktır. Buradan da görüleceği üzere, ARQ sistemler için küçük miktarda parite biti kullanılarak yüksek sistem güvenilirliği elde edilebilir [48].

2.3. Temel ARQ Yapıları

Alıcıda hataların düzeltilememesi durumunda en makul yöntem, alınan pakette hatanın tespit edilerek vericiden tekrar istenmesidir. Bu yöntemi esas alan üç temel ARQ yapısı mevcuttur:

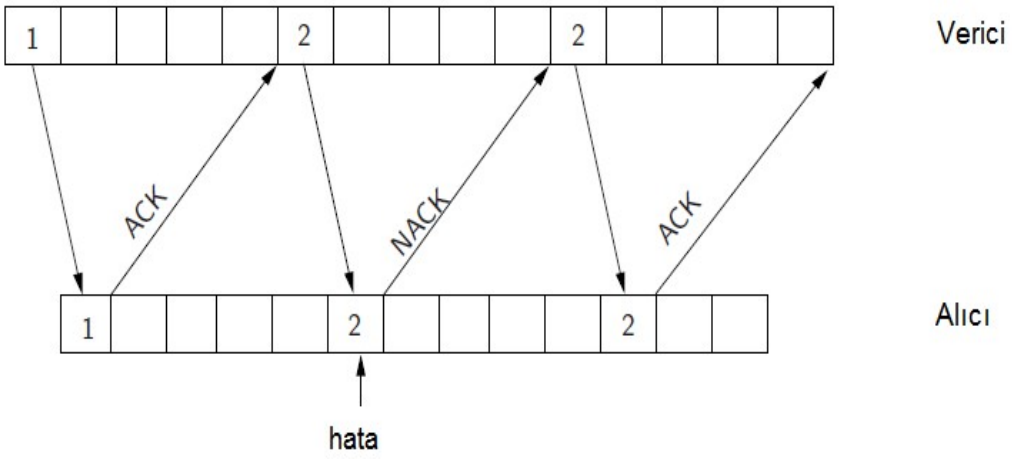
- SW ARQ
- GBN ARQ
- Seçici Tekrar (SR, Selective Repeat) ARQ

Yalın olarak hata sezme kodu ile çalışan ve paket gönderim sırasının belirli bir düzene göre işlediği protokollerdir. Vericide belirli bir hata sezme kodu ile kodlanan paketlenmiş sayısal temel bant işaret vericiden iletilerek kanal ortamından geçer ve alıcı tarafından alındıktan sonra hata sezme işlemine tabi tutulur. Hata tespiti durumunda ACK sinyali üretilerek geribesleme kanalı üzerinden vericiye söz konusu veri paketinin doğru alındığına ilişkin sinyal gönderilir. Eğer söz konusu veri paletinde hata tespit edilirse, vericiye veri paketinin hatalı alındığını bildiren NAK sinyali geribesleme kanalı üzerinden iletilir. Alıcı, hatalı aldığını belirttiği veri paketini doğru alana kadar, verici tarafından ilgili paket iletilmeye devam eder. Temel ARQ sistemlerinin performansı bu sistemlerin güvenilirlik ve başarım (throughput) değerleriyle ölçülür [26,49].

2.3.1. Dur ve Bekle (SW) ARQ protokolü

SW protokolünde vericiden gönderilen bir paket alıcıda doğru çözülene kadar verici tarafından gönderilmeye devam edilir. Verici ilk veri paketini gönderdikten sonra alıcıdan ACK veya NAK sinyalini bekler. Bir veri paketinin vericiden iletilmesi ve ilgili geribesleme sinyalinin vericiye ulaşmasını içeren süre bir çevrim periyodu (Time Slot, TS) olarak adlandırılır. Bu süreçte vericiden başka bir veri iletimi olmaz. İlk veri paketi alıcıya ulaştığında, alıcı bu paketi çözer. Pakette hata tespit edilmesi durumunda vericiye NAK sinyali gönderir ve ilgili paketi atar. Vericiye bu NAK sinyali ulaşınca, verici aynı veri paketini tekrar gönderir. Tekrar iletilen ilgili paket alıcıda tekrar çözülür. Bu kod çözümü sonrası hata tespit edilirse tekrar bir NAK sinyali üretilir ve aynı gönderim süreci tekrar işletilir. Kod çözümü sonrasında herhangi bir hata tespit edilmez ise, alıcıdan vericiye

ACK sinyali iletilir. Vericiye ACK sinyali ulaşmasıyla, verici bir sonraki veri paketini iletir. Ancak veri paketi alıcıda doğru çözüldükten sonra verici bir sonraki veri paketini gönderebilir. Bu süreç tüm veri paketleri doğru biçimde alınana kadar devam eder. Şekil 2.1'de SW ARQ yapısına yer verilmektedir. Şekil 2.1'de vericiden iletilen birinci paket alıcıda doğru alındığından vericiye ACK sinyali gönderilmiştir. Birinci veri paketinin doğru alındığına ilişkin geribesleme sinyali vericiye ulaşana kadar verici sessiz kalır. Birinci pakete ilişkin ACK sinyali vericiye ulaşınca, verici ikinci paketi gönderir. Alıcıya ulaşan ikinci paket hatalı olarak çözülmüş olup, vericiye NAK sinyali iletilir. Verici ikinci pakete ilişkin NAK sinyalini alınca ikinci paketi tekrar gönderir. Tekrar iletilen ikinci paket alıcıda bu sefer doğru çözülmüş, dolayısıyla ACK sinyali iletilmiştir. Verici bu ACK sinyalini alınca üçüncü paketi iletir.



Şekil 2.1. SW ARQ protokolü

Vericide *a* bitlik mesaj sinyali herhangi bir hata sezme kodu ile işleme tabi tutulur. Bu amaç için genellikle CRC kullanılır. Böylelikle mesaj bitlerine *c* bitlik CRC parite biti eklenerek *k* uzunluklu kod kelimesi üretilir.

$$k = a + c \tag{2.15}$$

R hızına sahip söz konusu haberleşme sisteminde veri paketinin gönderilmesinden geribesleme sinyalinin verici tarafından alınmasına kadar geçen süre t_w olmak üzere, tüm periyot $(t_w + t)$ süresince gönderilebilecek bit sayısı $k+R\ t_w$ şeklindedir.

Bir veri paketinin alıcıda hatasız alınma olasılığı *P* olmak üzere, söz konusu paketin alıcıda

doğru alınabilmesi için vericiden iletilmesi gereken ortalama bit sayısı, *E[b]*

$$\begin{aligned} E[b] &= (k+Rt_w)P + 2(k+Rt_w)P(1-P) + 3(k+Rt_w)P(1-P)^2 + ... \\ &+ i(k+Rt_w)P(1-P)^{i-1} = (k+Rt_w)P[1+2(1-P)+3(1-P)^2+...] \\ &= (k+Rt_w)P\frac{1}{P^2} = \frac{k+Rt_w}{P} \end{aligned} \tag{2.16}$$

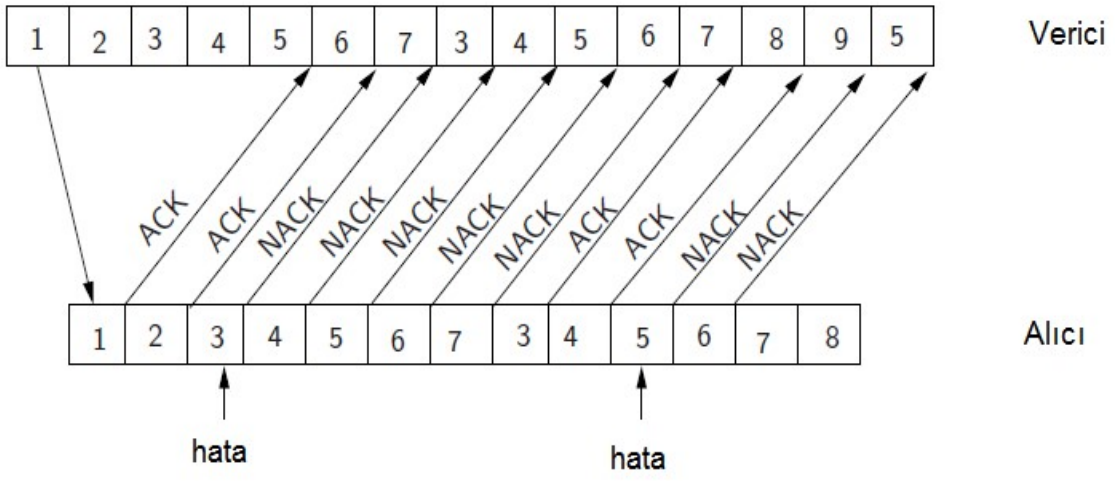
şeklinde ifade edilir. ARQ sistemlerde sistem başarım performansı (*T*), alıcıda birim zamanda hatasız olarak alınan bit sayısının aynı zamanda vericiden iletilen ortalama bit sayısına oranıdır [48].

$$T = \frac{a}{E[b]} = \frac{P.a}{k+Rt_w} \tag{2.17}$$

2.3.2. N Adım Geri Git (GB-N) ARQ protokolü

Verici sürekli olarak alıcıya veri paketi gönderir. Bununla birlikte her paketin doğru çözülüp çözülmediğine ilişkin ACK/NAK sinyali de her tespit sonrası sürekli olarak vericiye gönderilir. Ancak alıcıda *i.* pakette bir hata tespiti akabinde gönderilen NAK sinyali vericiye ulaştığında, verici veri paketi gönderimini durdurarak tekrar *i.* pakete dönerek, *i.* paket dahil olmak üzere söz konusu paketten sonraki paketleri de sırayla tekrar gönderir.

Verici NACK yanıtını alınca, *i.* paketten başlayarak gönderdiği paketleri yineler. *N* paket gerile adı, vericinin hata durumunda ilk hatalı paketten başlayarak, tüm gönderdiklerini tekrar etmesinden dolayı kullanılmaktadır. Bu gönderilenlerin bir kısmı alıcısına doğru varmış olsa bile, bunlar alıcıda çöpe atılmış olduğundan hepsi yinelenir.



Şekil 2.2. GBN ARQ protokolüne bir örnek

Şekil 2.2'de *N=4* olan bir GBN ARQ yapısına örnek verilmiştir. Bu GBN yapısında alıcıya ulaşan birinci ve ikinci paketler doğru olarak çözülmüş, bu paketlerin doğru çözüldüğüne ilişkin ACK sinyalleri vericiye iletilmiştir. Alıcıya ulaşan üçüncü paket çözülmesi ile hata tespit edilmiş ve NACK sinyali iletilmiştir. Söz konusu NACK sinyali vericiye ulaştığında verici yedinci paketi göndermiş bulunmaktadır. Verici bir sonraki paket gönderimi için sekizinci paketi değil, olumsuz alındı sinyalini aldığı üçüncü paketi gönderir. Akabinde üçüncü paketten sonraki tüm paketleri sırasıyla göndermeye devam eder. Dolayısıyla dört paket geriye gitmiş olur. Vericinin tekrar ilettiği üçüncü paket alıcıya ulaştığında bu sefer doğru çözülür ve ACK sinyali üretilir. Devam eden paketlerin daha önce doğru çözülüp çözülmediğine bakılmaksızın sırayla kod çözme işlemine devam edilir. Beşinci paketin alıcıda hatalı çözüldüğü görülmektedir. Alıcı dokuzuncu veri paketini gönderdiğinde beşinci paketin olumsuz alındığı sinyali vericiye ulaşır. Verici onuncu paketi değil, beşinci veri paketi ve müteakip paketleri göndermeye başlar. Bu süreç tüm veri paketleri alıcı tarafından doğru alınana kadar devam eder.

Temel GBN ARQ protokolünde bir veri paketinin doğru olarak alınabilmesi için gerekli ortalama bit sayısı şu şekilde ifade edilir.

$$E[b] = P + P(1-P)(N+1) + P(1-P)^2(2N+1) + \ldots + P(1-P)^i(iN+1) + \ldots \quad (2.18)$$

Buradan ortalama bit sayısı;

$$E[b] = \frac{P + N(1-P)}{P} \tag{2.19}$$

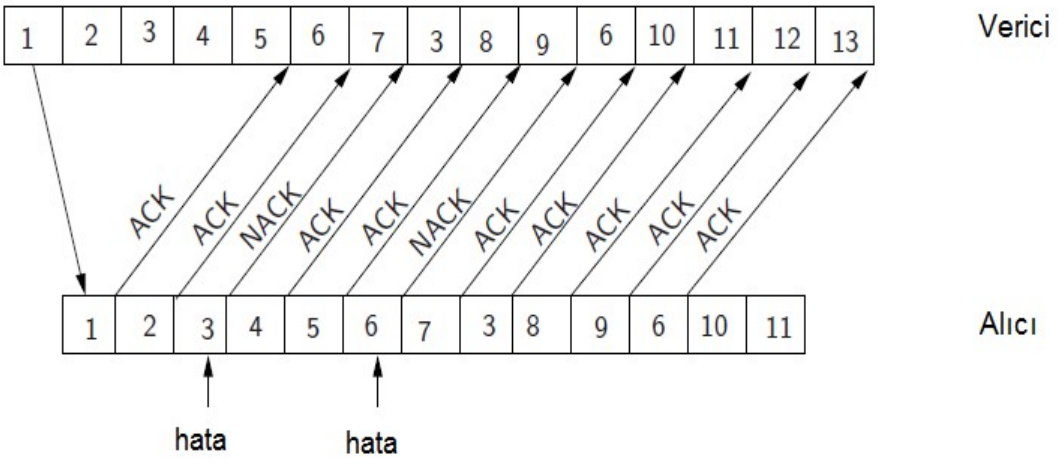
şeklinde ifade edilmekte olup, sistem başarımı da

$$T = \frac{P(a/k)}{P + (1-P)N} \tag{2.20}$$

olarak tanımlanmaktadır [48].

2.3.3. Seçici Tekrar (SR) ARQ protokolü

Bu protokol yapısında alıcı tarafından sadece bozulan ya da hatalı paketlerin yinelenmesi istenir. Bu durumda verici sürekli olarak veri paketi gönderir. Ancak alıcıda çözülmesi sonucunda NAK sinyali oluşan paketlerin tekrar gönderilmesi verici tarafından öncelikli kabul edilir. Hatalı alındığı öğrenilen paketin iletiminden sonra, verici daha önce kaldığı paketten itibaren gönderimine devam eder.



Şekil 2.3. SR ARQ protokolüne bir örnek

Şekil 2.3'te örnek bir SR ARQ yapısına yer verilmektedir. Şekilden görüleceği üzere; alıcı birinci ve ikinci paketleri doğru çözmüş, üçüncü pakette hata tespit etmiştir. Üçüncü pakete ilişkin NAK sinyali vericiye ulaştığında verici yedinci paketi göndermiş

bulunmaktadır. NAK sinyalini alınca üçüncü paketi tekrar gönderir ve akabinde kaldığı paketten, yani sekizinci paketten itibaren iletimine devam eder. Aynı şekilde altıncı veri paketi için alıcıda hata tespit edilmiştir. İlgili NAK sinyali vericiye ulaştığında, verici onuncu paket yerine ilk önce altıncı paketi tekrar iletmiş, sonrasında onuncu paketten itibaren gönderimine devam etmiştir.

Temel SR ARQ protokolünde bir veri paketinin doğru olarak alınabilmesi için gerekli ortalama bit sayısı

$$E[b] = P + 2P(1-P) + 3P(1-P)^2 + ... + iP(1-P)^{i-1} + ... \tag{2.21}$$

biçiminde ifade edilir. Bu durumda ortalama bit sayısı,

$$E[b] = \frac{1}{P} \tag{2.22}$$

şeklinde ifade edilmekte olup, sistem başarımı da

$$T = P\,(\frac{a}{k}) \tag{2.23}$$

olarak tanımlanmaktadır [48].

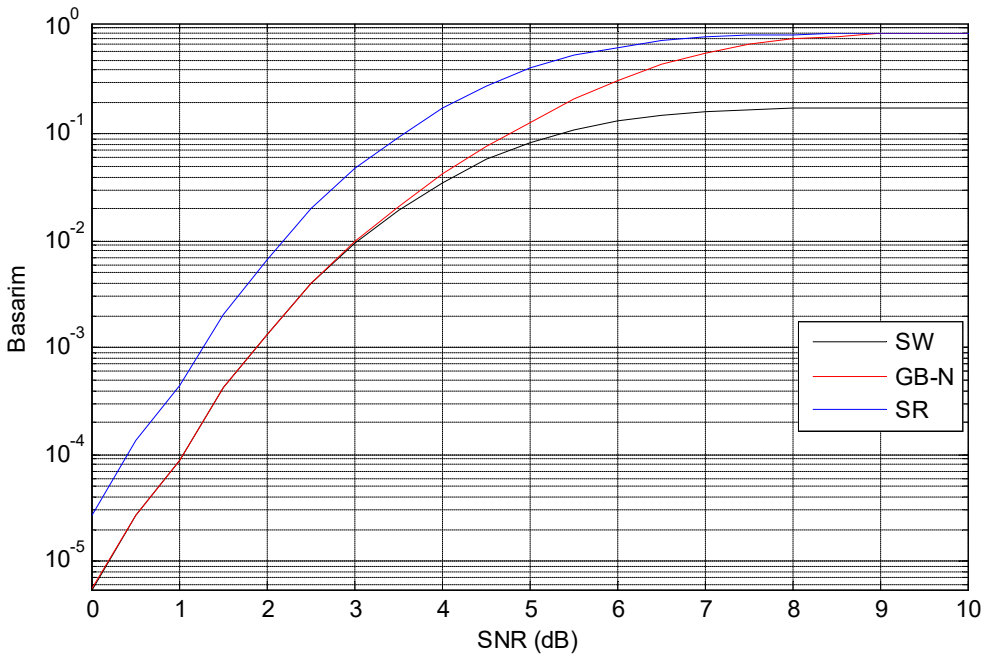
Şekil 2.4'te Eklenebilir Beyaz Gausyan Gürültü (AWGN, Additive White Gaussian Noise) kanalda çalışan, mesaj bitinin 128, parite bit sayısının 16 olduğu temel ARQ sistemlerinin performanslarına kıyaslamalı olarak yer verilmektedir. Simülasyonda iletim gecikme süresi (verici-alıcı iletim süresi) 0,65ms alınırken, vericilerin hızı yaklaşık 55 kbps olarak alınmıştır [50]. Şekilde görüleceği üzere; kanalın tüm İşaret/Gürültü Oranı (SNR, Signal-to-Noise Ratio) değerleri için en düşük başarım performansını SW ARQ sistemi, en yüksek başarım değerlerini SR sistemi göstermektedir. *SNR=6dB* değeri için SW sistemi *T*=0,1312 iken, GB-N sistemi *T*=0,3203 ve SR sistemi de *T*=0,6561 değerini göstermektedir.

Her üç sistem için de yüksek gürültülü kanal şartlarında, yani düşük SNR değerleri için başarım değerleri düşüktür. Çünkü yüksek gürültülü kanal ortamında iletilen veri paketlerindeki bitlerin bozulma ihtimali artar. Bit Hata Oranı (BER, Bit Error Ratio) ve

Paket Hata Oranı (PER, Packet Error Ratio,) değerleri yükselir. Her hatalı alınan veri paketi için alıcıdan tekrar gönderim talebi iletilir ve bir paketin alıcıda doğru alınabilmesi için harcanan ortalama süre artar. Böylece sistem başarım performansları da düşer. Bununla birlikte SNR değeri yükseldikçe, yani kanalın güvenilirliği arttıkça, ortalama olarak bir veri paketinin alıcıda doğru alınabilmesi ihtimali yükselir. Böylece veri paketinin tekrar gönderim miktarı azaldığından başarım performansı da yükselir.

SW ARQ sisteminde bir veri paketinin iletimi sonrasında ilgili veri paketinin geribesleme sinyalinin vericiye ulaşmasına kadar geçen süre bekleme süresidir. Bu bekleme süresinde herhangi bir veri iletimi olmadığından sistem performansı olumsuz etkilenir. Bununla birlikte GB-N sisteminde düşük SNR değerleri için, hatalı alınan her veri paketinin tekrar alıcıya ulaşmasına kadar geçen sürede alıcıya gelen veri paketleri görmezden gelinir. Bir diğer ifadeyle, GB-N sisteminde hatalı alınan her veri paketinin tekrar alınmasına kadar geçen süre boş zamanı ifade eder ve bu sürenin başarım değerini olumsuz etkilemesi bakımından SW sistemi ile aynı özellik gösterir. Bu sebeple, düşük SNR değerleri için (yaklaşık 3dB'den aşağı değerler için) SW ARQ ve GB-N ARQ protokolleri yakın başarım performansı sergiler. Bununla birlikte, yüksek SNR değerleri için veri paketinin hatalı alınma olasılığı düşeceğinden tekrar iletimler azalır ve GB-N protokolünde alıcının N adım bekleme süreleri olmaz. Bu sebeple *SNR=9dB* ve üzeri değerlerde SR ARQ ile benzer başarım performansı gösterir.

Temel ARQ yapıları içerisinde en üstün başarım performansını SR ARQ protokolü gösterir. Çünkü vericide sürekli olarak paket aktarımı vardır ve alıcıda da sürekli olarak paket alımı mevcuttur. Alıcıda hatalı alınan veri paketi tekrar istenirken, bu veri paketinin alıcıya tekrar ulaşmasına kadar geçen sürede alıcı veya verici sıradaki diğer paketler için veri iletimini gerçekleştirirler. Herhangi bir şekilde bekleme söz konusu olmadığından en üstün başarım performansı elde edilir.



Şekil 2.4. Temel ARQ sistemlerinin performansları

2.4. HARQ Yapıları

Temel ARQ yapılarından farklı olarak; HARQ yönteminde kullanılan kodlama tekniği ile hem hata sezme hem de hata düzeltme gerçekleştirilir [42,43]. Alıcıda çözülen kod sonrası hatalı olan bitlerin sayısı kullanılan kod yapısının hata düzeltme kapasitesi içindeyse bu hatalar düzeltilir. Eğer söz konusu eşik değerden fazla hata mevcutsa vericiye yeniden iletim isteği gönderilir.

HARQ yapılarında ARQ sistemlerine FEC alt yapıları iliştirilir. Bazı haberleşme sistemlerinde alıcıda hatanın tespiti halinde tekrar aynı veri paketinin vericiden istenmesi yerine alıcıda söz konusu hatanın öncelikle düzeltilmesi yoluna gidilmesi daha avantajlı olabilir. Hata düzeltme işleminin yapılabilmesi için ilgili veri paketinin herhangi bir hata düzeltme kodu ile kodlama işlemine tabi tutulması gerekir. Herhangi bir hata düzeltme kodu ile kodlanan veri paketinin uzunluğu ilgili kod uzunluğuna bağlı olarak büyür. Bu durum frekans bantgenişliğinin artması anlamına gelir ve söz konusu artış da haberleşme kaynağını kullanımını verimsizleştirir. Ancak kanalın durumuna göre alıcıda alınan veri paketinde hata sezilmesi durumunda, veri paketinin doğru biçimde alınıncaya kadar vericiden tekrar istenmesi durumu gerek frekans bantgenişliği gerekse zaman açısından ilgili haberleşme sistemini daha fazla verimsiz kılar. Bunun için, birçok durumda temel

veri paketi vericiden iletilmeden önce veri paketi üzerinde hata sezme ve hata düzeltme işlemleri yapılabilecek şekilde kodlama işlemleri gerçekleştirilir. Hem ARQ hem FEC süreçlerini barındıran bu yapılara HARQ yapılar denilir.

FEC yapıları alınan paketlerdeki hataları düzeltmek suretiyle tekrar iletimden kaynaklanan atıl frekansı düşürür. Bu durum başarım performansını artırır. FEC'in hataları düzeltemediği durumlarda da ARQ'nun sürece katkısı ile verinin güvenilirliği sağlanır. Böylece her iki yapının bir kombinasyonu ile yalın FEC sistemlere göre daha yüksek veri doğruluğu, yalın ARQ sistemlere göre de daha yüksek başarım performansı sağlanabilir. Literatürde temelde iki çeşit HARQ yapısı sunulmaktadır [43,51]: 1. tip HARQ ve 2. tip HARQ. Her HARQ yapısı da kendi içerisinde temel ARQ protokollerinden bir tanesini kullanır. ARQ bünyesine iliştirilen FEC'in uygulama biçimine göre HARQ yapılar kendi içerisinde farklılıklar gösterir. Bununla birlikte literatürde birinci ve ikinci tip HARQ'nun farklı uygulamalarından esinlenerek üçüncü tip HARQ model önerisi de bulunur [52]. Bu tez çalışmasında Tip 1 ve Tip 2 HARQ yöntemlerine ilişkin bilgi verilecek olmakla birlikte, yapılan simülasyon çalışmalarında Tip 1 HARQ yöntemi esas alınmıştır.

2.4.1. Tip1 HARQ

Bu yapıda, vericide kullanılan kodlama yapısı hem hata sezme hem de hata düzeltme özelliklidir. Bazı çalışmalarda hem hata düzeltme hem de hata sezme özelliği gösteren tek kod kullanılır [42]. Bununla birlikte her iki amaç için iki farklı kodun kullanıldığı örnekler çoğunluğu teşkil eder [48,53]. Bu çerçevede 1. Tip HARQ yapısında mesaj verisi öncelikle yüksek oranlı bir hata sezme kodu ile kodlanır. Bu kod yaygın olarak CRC kod yöntemidir. Bu kodlanmış dizi daha sonra hata düzeltme içeren kod ile tekrar kodlanır. Literatürde hata düzeltme kodları olarak konvolusyon kodları veya blok kodlarının kullanıldığı 1. Tip HARQ uygulamalar yaygındır. Alıcıda hata sezilen veri paketinde hata düzeltilmeye çalışılır. Hata sayısı, kodun hata düzeltme kapasitesi içerisinde ise hatalar düzeltilir ve vericiye ACK sinyali iletilerek bir sonraki veri paketinin iletimine geçilir. Eğer düzeltilemeyecek sayıda veya yapıda bir hata mevcut ise, bu durumda söz konusu paket veri yastığından atılarak aynı paketin tekrar iletilmesi ister. 1. Tip HARQ yapısında hem hata sezme hem de hata düzeltme amaçlı olarak kod kullanıldığından eşlik denetim bit sayısı, yalın bir ARQ sistemindeki sadece hata sezme amaçlı kullanılan koda göre çok daha fazladır. Kanal hata oranının düşük olduğu ortamlarda 1. Tip HARQ sistemler, kendi

yalın ARQ yapılarına göre nispeten daha düşük başarım performansı gösterirler. Çünkü vericide mesaj bitlerine hata sezme kodlarının ilave edilmesinin yanında, bu nihai bit dizisi hata düzeltme kodu ile işleme alınarak bit sayısı artırılır. Bu durumda birim zamanda aktarılan mesaj bit sayısı düşer, başarım performansı da azalır. Ancak kanal hata oranının yüksek olduğu iletim ortamlarında 1. Tip HARQ sistemler, kendi yalın ARQ yapılarına göre daha yüksek başarım performansı gösterirler. Çünkü hata düzeltme kapasitesi tekrar iletim frekansını azaltır. 1. Tip HARQ yapıları kanal gürültüsünün ve girişimin yüksek olduğu ortamlar için kullanılabilecek en uygun veri iletim protokollerindendir. Bununla birlikte, bit hata oranının değiştiği durağan olmayan kanallarda 1. Tip HARQ yapılarının bazı sakıncaları bulunur. Zira kanal hata oranının düşük olması durumunda iletim oldukça rahat olur ve belki de hata düzeltme işlemine gerek duyulmaz. Çünkü ARQ gönderimlerinde hata düzeltmeye ilişkin bit fazlalıklarının gönderilmesi frekans bandının ve zamanının boşa israf edilmesi anlamına gelir.

2.4.2. Tip 2 HARQ

Bu yapıda alıcı ardı ardına hatalı alınan veri paketlerini birleştirmek suretiyle çözme yoluna gider. Bu yapı da temel olarak; Takipçil Birleştirmeli HARQ (Chase Combining, CC HARQ) ve Değişen Fazlalık HARQ (Incremental Redundancy, IR HARQ) olmak üzere iki sınıfa ayrılır [54]:

Takipçil Birleştirmeli HARQ;

Bu yapıda tekrarı istenen veri paketleri aynı biçimde iletilir. Kaynak verileri tüm iletim boyunca aynı kaynak kodlama işlemine tabi tutulur ve iletilen sinyal aynı kodlanmış bitlere sahiptir [55,56]. Birleştirme işlemi demodülasyondan sonra kod çözme işleminden önce yapılır ve ardıl paketlerin birleşimi için Maksimum Oranlı Birleştirme (MRC, Maximum Ratio Combining) tekniği kullanılır [57]. Her bir iletim birinci iletim ile aynı olduğundan dolayı tekrarlı çeşitlilik (repetition diversity) HARQ olarak da adlandırılır. İletimler arasında ilave kod kazancı oluşmaz. E_b bir bilgi bitinin enerjisini tanımlamak üzere, bu yöntemde her bir iletimle birlikte alıcıda elde edilen E_b/N_0 değerleri toplanır.

Değişen Fazlalık HARQ;

Tip 2 HARQ yöntemi kanalın durumuna göre farklılık arz eden bir strateji güder. Kanal İşaret/Gürültü güç oranları yüksek iken ve de daha boş bir kanal kapasitesi söz konusu iken

hata sezme amaçlı bir ARQ yapısı gibi davranır, kanal gürültüsü arttıkça hata düzeltmeye odaklı bir davranış sergilenir. Mesaj dizisi sadece hata sezme amacıyla parite bitleriyle kodlanır ve iletilir. Hata düzeltmeye yönelik kodlama işlemi ise sadece alıcı tarafından ihtiyaç duyulduğunda iletilir. Bu sebeple değişken kanal ortamları için adaptif bir gönderim seçeneği sunduğundan avantajlıdır.

Bu 2. tip HARQ yöntemi aşağıdaki süreci içerir [42,51]:

1. *k*-bitlik mesaj dizisi, *(n,k)* yüksek oranlı C_1 hata sezme kodu ile kodlanarak *n*-bitlik P_1 veri paketi formuna dönüştürülür.
2. P_1 dizisi *(2n,n)* oranlı sistematik çevrilebilir C_2 kodu ile kodlanarak P_2 veri paketi formuna dönüştürülür.
3. C_2 kod kelimesi kaynaklı P_2 veri paketi veri yastığında saklanırken, C_1 kod kelimesi kaynaklı P_1 veri paketi alıcıya gönderilir.
4. P_1 veri paketi alıcıda hata sezme işlemine tabi tutulur. Hata tespit edilememesi halinde vericiden bir sonraki veri paketi istenir. Bu durumda vericide veri yastığında saklanan P_2 veri paketi veri yastığından atılır. Eğer alıcıda hata tespit edilecek olursa, vericiden P_2 veri paketinin gönderilmesi istenir.
5. Alıcıya ulaşan P_2 veri paketi öncelikle dönüştürülerek hata kontrolü yapılır. Hata tespit edilememesi halinde vericiden bir sonraki veri paketine ilişkin sürece geçilmesi istenir. Eğer alıcıda hata tespit edilecek olursa, alıcı veri yastığında tutulan ve hatalı olduğu bilinen alıcıdaki P_1 veri paketi C_2 kodu ile kodlanır ve yine alıcıda bulunan ve hatalı olduğu bilinen P_2 veri paketi ile birleştirilir. Elde edilen nihai veri dizisi tekrar çözülerek hata kontrolünden geçirilir. Hata tespit edilememesi halinde vericiden bir sonraki veri paketi istenir. Eğer hata tespit edilecek olursa, vericiden aynı mesaj paketi doğru elde edilinceye kadar aynı işlemlere devam edilir.

İlk olarak önerilen yukarıdaki algoritmaya müteakip literatürde 2. tip IR-HARQ yönteminin farklı modelleri de ortaya atılmıştır [58]. Temel olarak bu yöntemde her bir yeni iletim alıcıya farklı ve yeni bir biçimde iletilir. Her bir yeni iletim süresinde alıcıya gönderilen veri paketine ilave parite bitleri iliştirilir. Bu iliştirilen bitler sistemin hata düzeltme kapasitesinin artırılmasına imkân verir. Alıcı aynı veri paketine ilişkin her bir yeni iletimdeki bilgileri birleştirir. Her bir iletimdeki bit dizisi bir önceki iletilen ile aynı olmaz. Sonuç olarak vericideki kod oranı her bir iletimde artar [59].

Sürekli olarak veri aktarımı olduğu kabul edilen bir Tip 1 HARQ yapısına [60] ilişkin başarım verimliliğini analiz etmeye çalışalım.

Hata sezme kodu parite bitleri ile birlikte (a+c) uzunluklu bit dizi iletilmeye çalışılsın. Hata düzeltme için de sabit bir kod oranı R_c belirlenirse,

$$R_c = l / v \tag{2.24}$$

yazılabilir. Alıcıda alınan paketin hatalı olduğu tespit edilirse, düzeltilmeye çalışılır. Eğer hata kodu hata düzeltme kapasitesinin içerisinde ise bu paket veri yastığına alınır. Aksi takdirde, alıcı bu paketi reddeder ve geribesleme sinyali aracılığı ile tekrar iletim talep eder. Hata düzeltme amacıyla bir konvolusyon kod çözücü kullanılması durumunda, ortalama iletimlerin sayısı;

$$T_r = \sum_{i=0}^{+\infty} P(D_d)^i = \frac{1}{1 - P(D_d)} \tag{2.25}$$

biçiminde ifade edilir. Burada D_d, kod çözülen dizinin sezilen hatayı içermesi olayı olarak tanımlanır. Kod trellis seviyelerindeki hata olayları bağımsız olmadığından, $P(D_d)$'nin tam olarak değerlendirilebilmesi zordur. Ancak $P(D_d)$ için üst sınır tanımlanabilir [57];

$$P(D_d) \le 1 - (1 - P(E))^{\frac{a+c}{l}} \tag{2.26}$$

$P_v(E)$, Viterbi kod çözücüde oluşacak hata olasılığının üst sınırını tanımlar.

$$P_v(E) \le \sum_{d=d_f}^{+\infty} a_d \times P_d \tag{2.27}$$

Burada; a_d, d uzaklığı için hatalı yolların sayısını, P_d de d uzaklığında yanlış yol seçilme olasılığıdır. AWGN kanalda İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Binary Phase Shift Keying, BPSK) kullanımına ilişkin BER değerini ifade etmek üzere,

$$p = \frac{1}{2} erfc\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right) \tag{2.28}$$

AWGN kanalda sert karar (hard desicion) kod çözme için P_d şu şekilde tanımlanır.

$$P_d = \begin{cases} \sum_{j=\frac{d+1}{2}}^{d} \binom{d}{j} p^j (1-p) & d, tek \\ \sum_{j=\frac{d}{2}+1}^{d} \binom{d}{j} p^j (1-p)^{d-j} + \frac{1}{2}\binom{d}{d/2}\left[p(1-p)\right]^{d/2} & d, çift \end{cases} \tag{2.29}$$

ve yumuşak kod çözme (soft desicion decoding) için de;

$$P_d = Q\left(\sqrt{\frac{2dE_b}{N_0}}\right) \tag{2.30}$$

biçiminde tanımlanmaktadır. *Q(x)*

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{+\infty} e^{-y^2/2}\, dy \tag{2.31}$$

olarak verilir. Eş 2.25 ve Eş. 2.26' den,

$$T_r \le \frac{1}{(1-P_v(E))^{\frac{a+c}{l}}} \tag{2.32}$$

ve Başarım,

$$T = \frac{R_c}{T_r} R_L \tag{2.33}$$

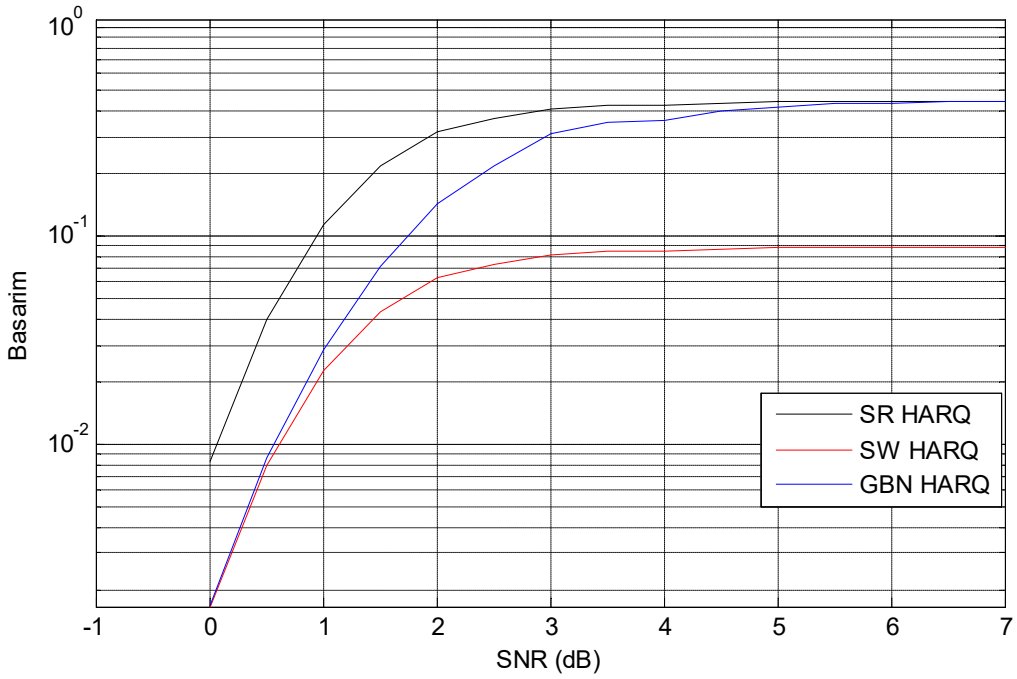
elde edilir. Bununla birlikte,

$$R_L = \frac{a}{(a+c+lm)} \tag{2.32}$$

kodlamalardan dolayı başarımdaki kaybı ifade eder [52,60].

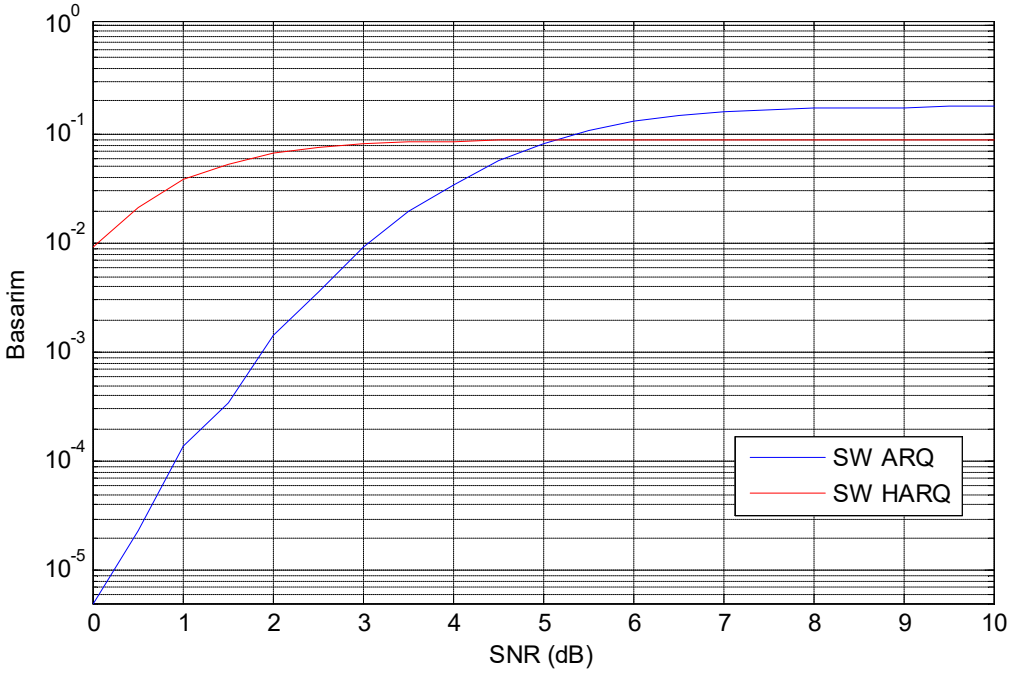
2.5. ARQ ve HARQ Sistemlere İlişkin Başarım Simülasyonları

HARQ protokolleri de uygulama çeşidine göre SW HARQ, GBN HARQ ve SR HARQ yöntemlerini içerir. Şekil 2.5'te 1. Tip HARQ sistemlerin başarım performans grafiğine yer verilmektedir. Bu simülasyonda her veri paketinde 256 bit kullanılırken, CRC parite bit sayısı 32 bittir. Hata düzeltme kodu olarak ½ oranlı konvolusyon kodlayıcı kullanılmıştır. Söz konusu simülasyon sonucunda görüleceği üzere, en düşük performansı SW HARQ sistemi göstermektedir. Çok düşük SNR değerleri için GBN HARQ sistemi SW HARQ sistemi ile benzer performans gösterirken, kanalın iyileşmesiyle birlikte performans durumu SR HARQ sisteme yaklaşmaktadır. HARQ sistemlerinde ARQ sistemlerden farklı olarak mesaj bitleri hata sezme kodlarının yanında hata düzeltme kodları ile kodlanırlar. Bu durumda bir mesaj biti başına iletilen ortalama bit sayısı artmaktadır. Dolayısıyla verimlilik de düşmektedir. Ancak yüksek gürültülü kanal şartlarında alıcıda hatalı alındığı anlaşılan bir veri paketi için ARQ sistemlerde mutlak olarak paket tekrar istenirken HARQ sistemlerde hata düzeltilme yoluna gidilir. Eğer hata düzeltme kodu marifetiyle hata düzeltilebilirse paketin tekrar istenmesi önlenmiş olur. Bu durum sistemde önemli şekilde performans artışı sağlar.

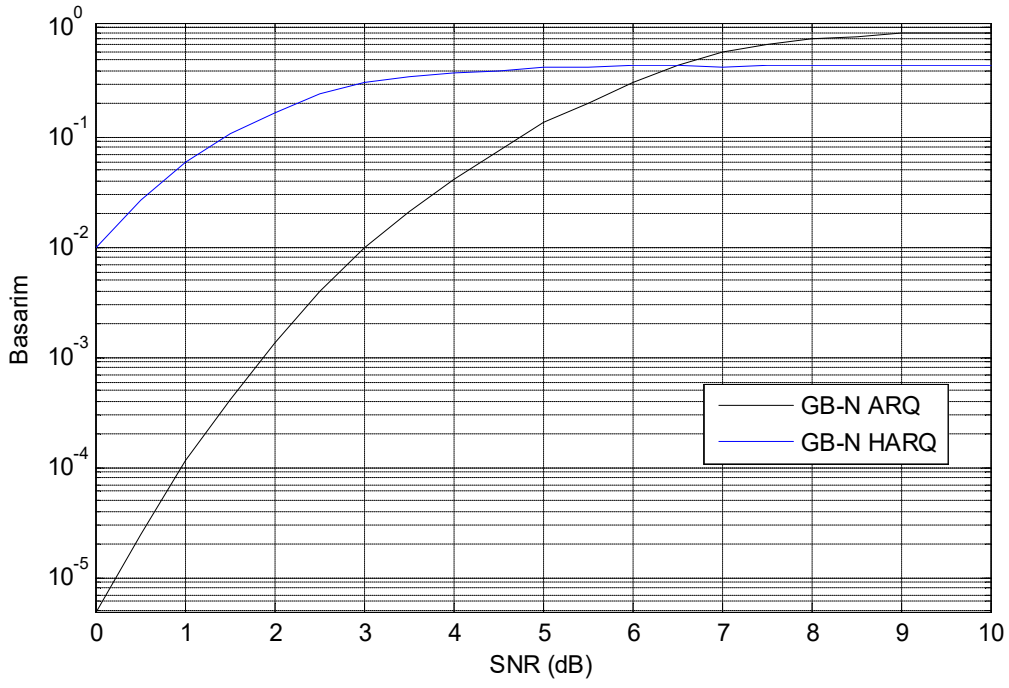


Şekil 2.5. HARQ sistemlerinin performansları

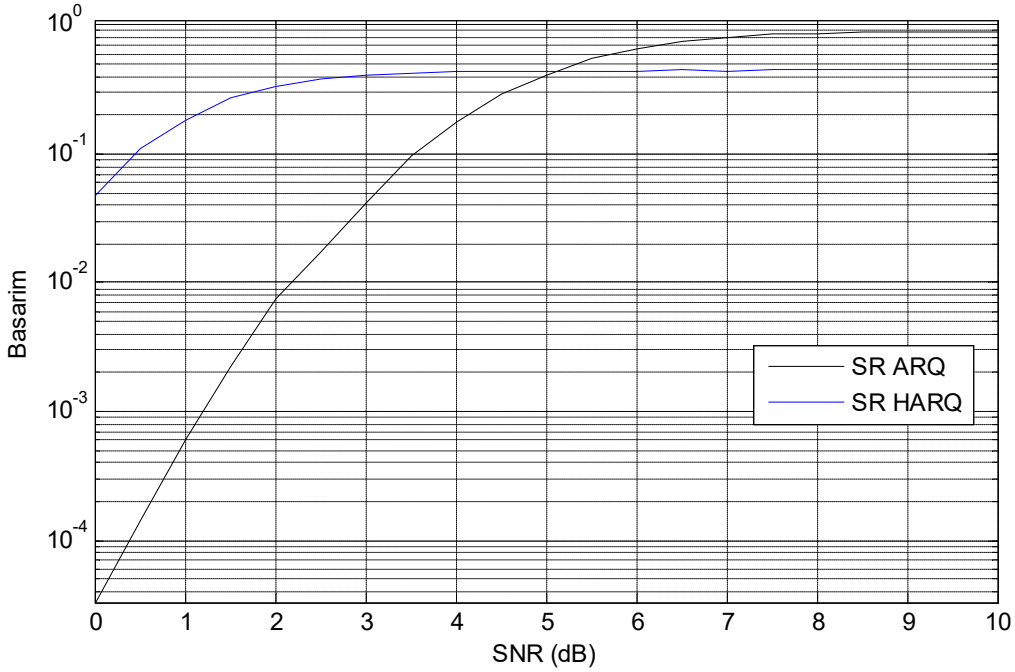
Şekil 2.6'da SW ARQ ve SW HARQ teknikleri, Şekil 2.7'de GB-N ARQ ve GB-N HARQ teknikleri, Şekil 2.8'de de SR ARQ ve SR HARQ tekniklerine ilişkin performans kıyaslaması yapılmıştır. Hem ARQ hem de HARQ tekniklerinde mesaj bit sayısı 128, CRC parite bit sayısı 16 bit alınmıştır. GB-N için N=5 esas alınmıştır. Her üç simülasyonda da ortak olarak çıkarılabilecek sonuç; düşük SNR değerlerinde yani olumsuz kanal şartlarında HARQ, yüksek SNR değerlerinde, yani yüksek güvenilirli kanal ortamlarında ARQ sistemlerin üstün performans sergilediğidir.



Şekil 2.6. SW ARQ ve SW HARQ sistemlerinin performans kıyaslaması



Şekil 2.7. GB-N ARQ ve GB-N HARQ sistemlerinin performans kıyaslaması



Şekil 2.8. SR ARQ ve SR HARQ sistemlerinin performans kıyaslaması

3. BİLİŞSEL RADYO

Mevcut hali ile yetersiz kalan frekans spektrumunun artan talebi karşılayamayacağı ortaya çıkmıştır. Bu durum spektrum tahsisi için yeni arayışları da beraberinde getirmiştir. Mevcut spektrumun daha verimli kullanılabilmesi için spektrum ortamının sürekli olarak sezilmesiyle boş ya da yoğunluğu az olan kanalların belirlenmesi ve uygun kanalların SU'lara tahsisi bu yaklaşımlardan birisidir. Bu kapsamda; günümüzün statik frekans kullanım mekanizmasından farklı olarak, dinamik bir spektrum yönetim ve paylaşım metodu öneren BR teknolojisinin, yaşadığımız frekans kıtlığı probleminin çözümüne önemli katkı sunması beklenmektedir.

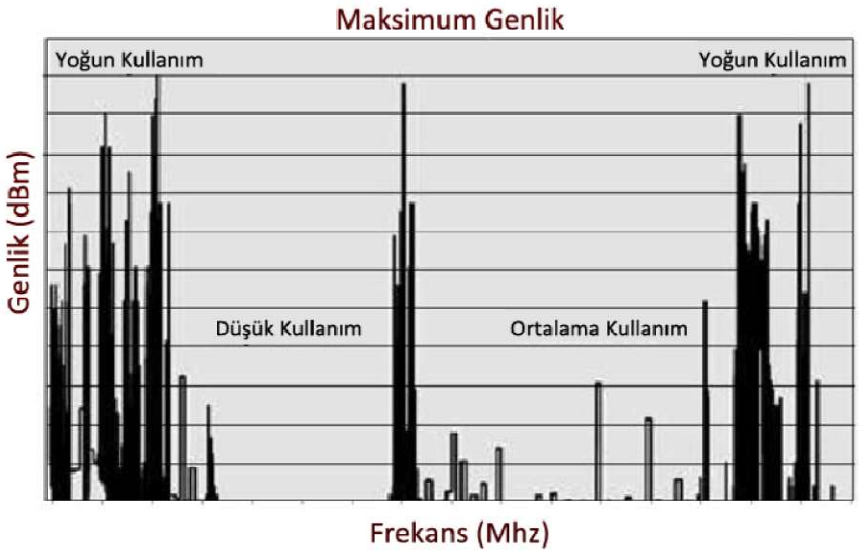
Teknik bakımdan incelendiğinde; birbiriyle örtüşmeyecek biçimde bütün bir radyo frekans spektrumunda farklı hizmetlere farklı frekans bantlarının atanması ve aynı hizmete ilişkin ayrılan bantta farklı kullanıcılara farklı alt kanalların paylaştırılması, haberleşme sisteminin tasarımının ve spektrum yönetimi uygulamasının kolay olmasını sağlar. Ancak bu yöntem frekans spektrumunun etkin kullanılması açısından verimli bir metot değildir. Bu kapsamda yapılan çalışmalar, kullanıcılara tahsis edilen frekans bantlarının zaman ve konum bazlı olarak yapılan analizlerinde büyük oranda kullanılmadığını göstermektedir.

Federal Haberleşme Komisyonu (Federal Communications Commission, FCC) Sektrum Görev Gücü (Spectrum Task Force, SPTF)' nün yaptığı bu çalışmalar, tahsis edilen spektrumun zamana ve konuma göre kullanımın %15 ile %85 arasında değiştiğini göstermektedir. Gerçekten de yüksek gelirli şehirsel bölgelerde radyo frekans spektrumu incelendiğinde [3];

- Bazı frekans bantlarının zamanın büyük kısmında büyük oranda kullanılmadığı,
- Bazı frekansların sadece kısmi olarak kullanıldığı,
- Kalan frekansların yine tamamen değerlendirilmemekle birlikte yoğun kullanıldığı

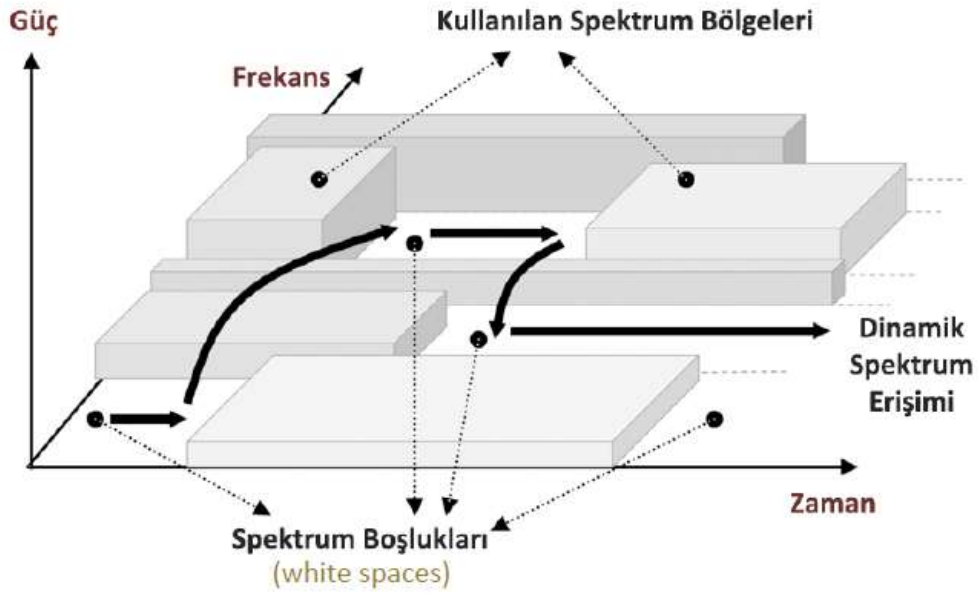
tespit edilmiştir.

Bu duruma ilişkin işaret genlik spektrumuna Şekil 3.1'de yer verilmektedir [2].



Şekil 3.1. Spektrum kullanımı

Bu nedenle elekromanyetik spektrum, "spektrum boşlukları"nın değerlendirilmesini gerekli kılar. Spektrum boşlukları "PU'ya tahsis edilen fakat belirli zamanda ve/veya özel coğrafik alanlarda söz konusu kullanıcı tarafından kullanılmayan frekans bandı" şeklinde tanımlanır. Belirli bir bölgede frekans-zaman boyutlarındaki güç seviyesini gösteren Şekil 3.2'de Dinamik Spektrum Erişimi (DSE) yöntemiyle değerlendirilebilecek spektrum boşlukları anlatılmaktadır [2].



Şekil 3.2. Frekans-zaman boyutlarında tanımlanan spektrum boşlukları

DSE yöntemiyle doğru yerde ve doğru zamanda SU'nın PU tarafından kullanılmayan spektrum boşluğuna erişim sağlaması, spektrum kullanımını önemli ölçüde geliştirilebilecektir. Yazılım Tanımlı Radyo (YTR)(Software Defined Radio) ve nihayetinde akıllı işaret işleme teknikleriyle güçlendirilerek oluşturulabilecek BR, spektrum deliklerinin varlığından faydalanmak suretiyle spektrum verimliliğini artırmaya yönelik çözüm yolu olarak önerilmiştir. BR kavramı ifade edilen problemlere çözüm bulmak amacıyla ilk olarak 1999 yılında Mitola ve Maguire tarafından ortaya atılmıştır [1].

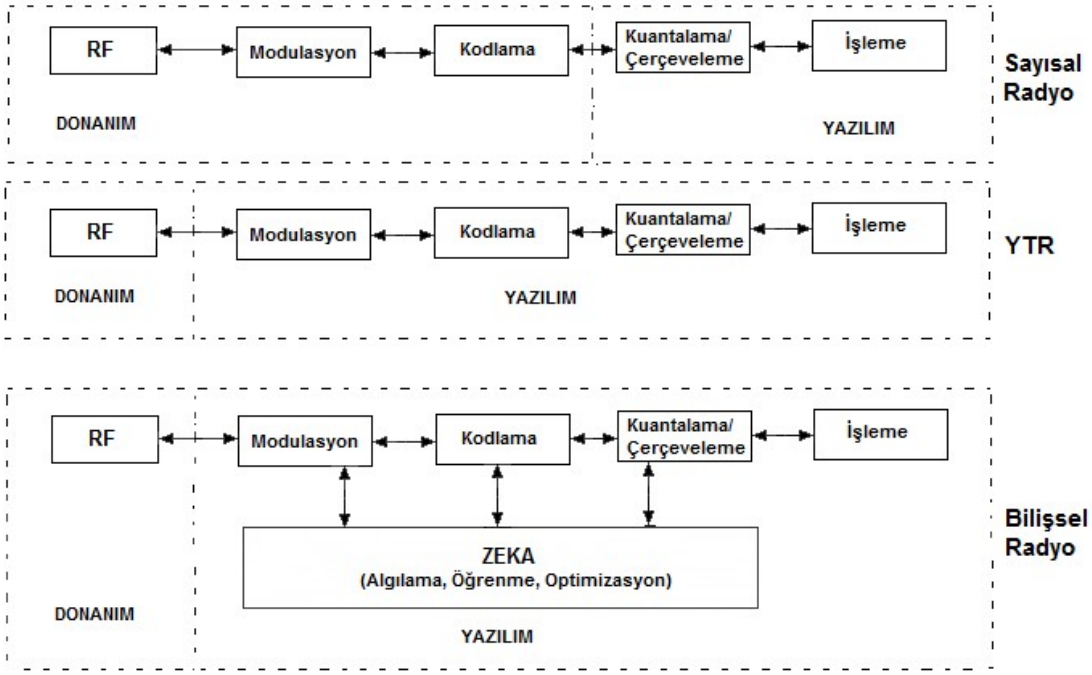
3.1. BR Tanımı

Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (International Telecommunication Union, ITU), BR ve YTR sistemlerini şu şekilde tanımlamaktadır [6]:

YTR: Elektromanyetik ortama bağlı olarak; frekans aralığı, modülasyon tipi ve güç gibi teknik parametrelerin değiştirilmesi veya ayarlanmasına imkân veren radyo cihazıdır.

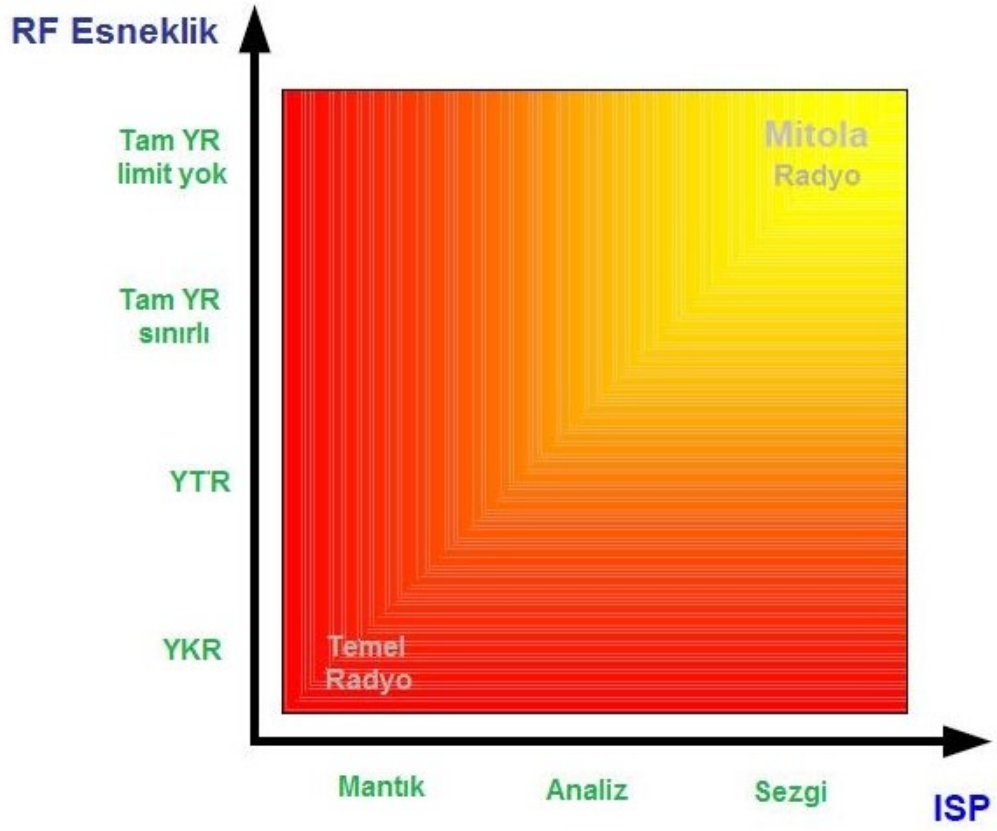
BR: Çalışma ortamı, düzenlemeleri ve dâhili durumu ile ilgili bilgi edinebilen ve edindiği bilgilerle öğrenebilen ve ürettiği bilgilerle dinamik olarak kendi parametreleri ve protokollerini düzenleyebilen radyo teknolojisidir.

Günümüzde BR, YTR teknolojisi ile yapay zekâ tekniklerini kullanarak spektrumu dinamik olarak kullanmayı mümkün kılabilecek bir anahtar teknoloji olacağı ifade edilmektedir. BR gelişim süreci kapsamında geleneksel gelişmiş sayısal radyo, YTR ve BR cihaz yapılarına Şekil 3.3'te yer verilmektedir. Geleneksel sayısal radyoda, işaret sayısala dönüştürülerek gerekli sayısal işleme ve kuantalama dâhil temel bant işaretin elde edilmesi yazılımla sağlanır. Kodlama, modülasyon ve RF yükselteç işlemleri ise donanımla sağlanır. Yazılım tanımlı radyoda sayısal işleme, çerçeveleme, kodlama ve modülasyon işlemleri yazılımla yapılır. YTR teknolojisi ile yapay zekâ tekniklerini birleştiren BR'de söz konusu işlemler zekâ içeren yazılımla gerçekleştirilir [61].



Şekil 3.3. BR gelişim süreci

BR sistemlerde gerekli olan iki temel anahtar; esneklik (YTR tarafından karşılanır) ve akıllılıktır (ISP tarafından sağlanır). Bu iki faktörün çok sayıda yetenek ve karmaşıklık dereceleri, iki faktörün oluşturduğu BR'nun yetenek ve faaliyet kapsamını genişletirken, tanımını yapmayı da zorlaştırır. BR kavramı en geniş anlamda matrissel biçimde tanımlanır. Şekil 3.4'te RF esneklik ve akıllılık parametrelerinin her ikisinin arttığı durumlar için BR'nun gelişmiş formlarına yer verilmektedir. Şekildeki matris her iki faktörün karmaşıklık ve/veya yetenek seviyelerine göre oluşmaktadır. RF esnekliği bulunmayan herhangi bir aygıt en yüksek seviyede akıllı işaret işleme yeteneğine sahip olsa da bilgiye dayalı kararlar veremez. Aynı şekilde çok esnek bir haberleşme sistemi, iletişimine yönelik mantıklı kararlar alamıyorsa, elde edilen bilgi kullanılamaz [6,7].



Şekil 3.4. Matrissel anlatımla BR kavramı

Örneğin matrisin aşağıdaki yarı diliminde bir yerde BR seviyesi değerlendirilsin; bu bölgede makul bir akıllık derecesi söz konusu iken, RF esnekliği o kadar önemli olmayabilir. Herhangi bir tasarımcı söz konusu yapıyı genişbant bir antenden meydana gelen bir radyo oluşturarak sağlayabilir. Böylece BR'nun kendi çalışma frekansını seçmesi sağlanır. Bir diğer tasarımcı genişbant anten yerine, BR'nun çalışma yönünü seçebilmesini sağlamak üzere hüzme biçimlendirici anten kullanmak isteyebilir. Bir diğer üçüncü tasarımcı orijinal anteni koruyup, BR'nun çalışma güç seviyesini belirleyebilmesi için sistemin dinamik erimini[1] genişletmeyi seçebilir. Bu durumlar dikkate alındığında: Hangi tercih en iyisidir? Frekans, uzaysal veya güç (veya genlik) esnekliği mi?, hangi esneklik seçimi BR'yu dikey eksende daha çok yukarı çıkarabilir? gibi soruların cevabı tasarımın düşünüldüğü haberleşme uygulamasına göre değişecektir [6].

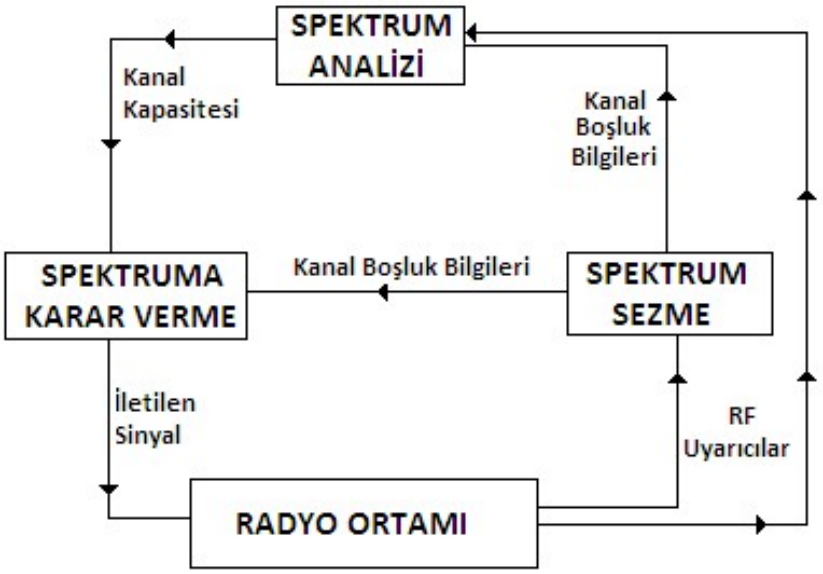
[1] Dinamik erim: Bir sistemin işleyebileceği en büyük ve en küçük işaret güçlerinin oranı ya da bu oranın desibel olarak ifade edilen algoritması

Radyo tasarımında öncelik verilen özelliklerden en azından bir faktörde gerçekleşen gelişim eksen boyunca değişiklikle sonuçlanmaktadır. Bir diğer ifadeyle, nereden başladığından bağımsız olarak, belirli bir gelişim, BR'yi matriste yukarılara veya sağ tarafa doğru taşır. Eksenlerde gelişimin nasıl sağlanacağına yönelik kesin bir yöntem yoktur. Örnek vermek gerekirse; "hüzme biçimlendirici antenden önce genişbant anten kullanılmalıdır." şeklinde bir kural söz konusu değildir. Dolayısıyla belirli bir radyo, yazılım esasına dayalı kapasite ve bilişsellik parametrelerine ait özelliklerin ne kadar fazlasını bünyesinde barındırırsa, İdeal BR-Mitola Radyo-Tam BR olarak tanımlanan BR gelişim matrisinin sağ-üst köşesine o kadar yaklaşır [6].

3.2. Frekans Kaynağının Değerlendirilmesi Bakımından BR

Bölüm 3.1'de tanımlandığı üzere, BR bulunduğu ortam şartlarını dikkate alarak, en yüksek performansı yakalamak adına, kullandığı haberleşme parametrelerini değiştirir. Bu parametreler arasında; frekans, konum, modülasyon, kuantalama seviyeleri, kodlama, antenler dahil fiziksel katman çeşitlilikleri sayılabilir. Ancak literatürde BR'nun çok değerli ve kıt bir kaynak olan frekans kaynağını öncelikli parametre alan uygulamalar söz konusudur. BR konusundaki mevcut teknik çalışmalar, frekans kıt kaynağından ikincil biçimde yararlanmayı amaçlar.

BR cihaz kendisi için en uygun bandı seçebilen, bunun için spektrumu dinamik olarak izleyen ve kullanan bir teknolojidir. Spektrumu dinamik kullanabilmesi için; spektrumu sezme, spektrumu yönetme, spektrumu değiştirme ve spektrumu paylaşma fonksiyonlarını yerine getirebilmesi gerekir. Şekil 3.5'te temel bilişsel radyo döngüsü görülmektedir [61].



Şekil 3.5. Radyo ortamı için kullanılan genel bilişsel yöntem

BR, bulunduğu farklı ortamlarla etkileşim halinde olan ve o anki ihtiyaçlarına göre iletim parametrelerini etkileşimsel olarak değiştirebilme ve adapte olabilme kabiliyetine sahiptir. Etkileşimsel yeteneğinin bilişsel döngü içersindeki temel adımları aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

Spektrum sezme: BR cihaz, spektrum bantlarını izleyebilmeli, bu bantlar hakkında gerekli istatistiki bilgileri edinebilmeli ve böylece bantlar içerisindeki boşlukları ortaya çıkarabilmelidir.

Spektrum analizi: Tespit edilen bant boşluklarının karakteristikleri ve ilgili düzenleyici bilgileri çıkarabilmelidir. BR cihaz, ayrıca kendi lokasyonunu ile diğer alıcı ve vericilerin lokasyon bilgilerini elde edebilmelidir.

Spektruma karar verme: Son aşamada ise elde ettiği karakteristik bilgilere ve kullanıcı ihtiyaçlarına göre en uygun frekans bandının kullanılmasına karar verebilmelidir. Sezilen bandın *spektrum kuralları ve kullanım kısıtlamaları* hakkında bilgi sahibi olunması gerekir. Bu kurallar ve kullanım kısıtları bandın belirlenmesi ve paylaşım mekanizmalarına (frekans paylaşımı, zaman paylaşımlı ve coğrafik paylaşım) bağlı olarak çeşitli karmaşıklık seviyelerine sahiptir.

Toparlanmış bilgi hakkında karar vermek: BR cihaz yukarıdaki bilgiler ile kendi yeteneklerini eşleştirir. Uygun mantık ağlarını da kullanarak sonuçlar üretir.

Bu kararlara göre hareket etmek (dinamik ve bağımsız olarak): söz konusu sonuçlar ile üretilen fırsatların kullanılması dinamik ayarlama gerektirir. BR'nun yeniden adapte olabilme yeteneği ise donanımsal olarak herhangi bir değişiklik yapmaksızın farklı bir frekans bandına geçilmesi durumunda veya mevcut kanalda meydana gelen diğer BR dışı kaynaklanan değişikliklerde çalışma parametrelerinin değiştirilmesi işlemidir. Burada değiştirilebilecek parametreler:

- Çalışma frekansı: BR cihaz bulunduğu ortama göre en uygun frekans bandını seçebilir ve kullandığı frekansı değiştirebilir.
- Modülasyon: Spektral verimliliği artırmak ve iletimdeki bit hata oranını minimuma indirebilmek için kullandığı kanalın o anki durumuna göre modülasyon tekniğini değiştirebilir.
- Çıkış gücü: BR cihazın iletim için kullandığı güç kanalın o anki durumuna ve izin verilen sınırlara göre değiştirilebilir. Burada temel gösterge kanalın aynı anda birçok kullanıcı tarafından eş zamanlı olarak kullanılması durumunda kullanıcıların birbirleri üzerinde elektromanyetik girişim oluşturmadan iletimin sürdürülmesidir.
- Adaptif antenler: BR, diğer alıcı tarafı ve diğer kanal şartlarını değerlendirerek uygun anten parametrelerini yeniden ayarlamalıdır.
- Elde edilen sonuçlardan öğrenme: Cihazlar kendi dâhili veritabanlarını güncelleyebilirler, bir kısmını koruyabilirler ve/veya bu bilgileri ana veritabanına gönderebilirler.

BR sistemler için "tek kural tümü için geçerlidir" söz konusu değildir. Mevcut kullanıcıların korunması için BR'nun oluşturulmuş kurallara uyması ve yukarıda ifade edilen özelliklerin bir veya birkaçını yerine getirmesi gereklidir [6].

3.3. BR'nun Avantajları

BR'nun kullanılabilmesi durumunda pek çok paydaş açısından avantajlı durum sağlanmış olur [6,62]:

Tüketiciler: Frekans kaynağını kullanan tüketicilere doğrudan kaynak sağlanmış olur. BR'nun olabildiğince kullanımının sağlanabilmesi ile en büyük avantajı tüketicilerin kazanacağı aşikardır. Halihazırdaki frekans bandının kullanımından dolayı oluşan maliyetin azalması anlamına da gelir.

Düzenleyiciler: Yeni frekans kaynaklarının doğması, düzenleyici otoriteleri de rahatlatacaktır. Ayrıca frekansın BR tarafından dinamik olarak izlenebilmesi de, spektrumun düzenlenmesi ve kontrolü açısından önemli bilgiler sağlar [62].

Lisans sahipleri ve operatörler: BR ile frekans bandının ikincil kullanımı söz konusu olacağından, aynı frekans bandını kullanabilecek muhtemel yeni kullanıcıların kullanımlarından dolayı gelir kazancı söz konusu olacaktır. Ayrıca kanalın verimli kullanılabilmesi bir diğer avantajdır. Adaptif kullanım seçenekleri sebebiyle tüketiciye yüksek hızlar sağlanır [62].

Şebeke: BR'lar; her bir katmandaki parametre performanslarının ölçümlerine dayalı bir prensiple çalışır. Söz konusu ölçümlerle tüm katmanların optimizasyonu sağlanabilir. Ancak fiziksel katman ve MAC katmanları radyo/kablosuz sistemler için çok büyük önem taşırlar. Lokal spektrumun ölçülmesine dayalı gerçek zamanlı bir uygulama olarak söz konusu katmanların optimizasyonu BR araştırmalarında ve tasarımlarında önemli bir yer teşkil eder.

Akıllı radyoların ağ katmanı, şebekenin gürbüzlüğü ve istikrarı bakımından bütün radyo yapısına çok önemli katkılar sağlayabilir. Radyo, birden fazla erişim noktasının olduğu bölgelerde az trafiğin taşındığı veya ilgili trafiğin daha az kaynağı tükettiği bir erişim noktasını seçebilir. Benzer şekilde, radyo şebeke performans değişikliklerine bağlı olarak trafik hacmini düzenleyebilir. Ayrıca radyo, kullanıcının servis talebi için en uygun şebekeyi seçebilir [63].

Bunun yanında bilişsel özelliklere sahip olma ihtiyacının, geleneksel radyolara göre maliyeti daha çok artıracağı değerlendirilmektedir. Bu yüzden, terminallerin ve altyapı ekipmanlarının üretim hacmi, ilave maliyet düşürme fırsatı oluşturur. Teknik parametrelerin uyumlaştırılması standardizasyon sürecinde ölçek ekonomisi sağlar.

Üstelik donanımsal özelliklerin yazılımsal özelliklere kaydırılması endüstriyel yenilik bakımından önemli bir faktördür. Bu kapsamda rekabet, BR çalışma davranışlarının gelişmesi ve güncellemelerin daha hızlı gerçekleşmesi anlamına gelir [6].

Tedarikçi: BR sistemler sabit radyolara göre çok daha karmaşıktır. Yüksek esnekliğe sahip olan böyle bir radyonun yetkilendirme sürecinin daha da karmaşık olacağı ihtimal dâhilindedir. Ayrıca BR'nun değişen düzenlemelere uyum yeteneği, bu cihazların kullanıcılar tarafından ikinci kullanımlarına kapalı hale getirir. Bu faktör tedarikçileri kar marjını azaltmaya zorlarken, bu etkileri azaltmaya yönelik bazı yöntemler söz konusudur: Örneğin, kullanıcılar hücresel sistem el cihazları gibi, sağlanan az miktarda servis gelişimine bağlı olarak ürünlerini değiştirmeye teşvik edilebilir. BR sistemlerin gelişim sürecinde oluşacak piyasa ve düzenleme koşulları ile birlikte tedarikçi firmaların izleyeceği yöntem, bilişsel sistemlerin üreticiler bakımından faydalarını netleştirecektir. Bununla birlikte yeni teknolojilere sahip yeni cihazlar tedarikçiler için yeni pazarlar anlamına da gelir.

Ticari kullanım: BR cihazların ve radyo ortamının geliştirilmesi ile kullanıcı terminallerinden tüm radyonun izlenmesi ve kontrolüne kadar birçok cihazın geliştirilmesi, piyasaya sürülmesi, kullanılmasına kadar geniş bir yelpazede ticari avantajlar saklıdır. Bu alanda Ar-Ge esaslı çalışmalar yürüten organizasyonların önemli kazanımları söz konusudur.

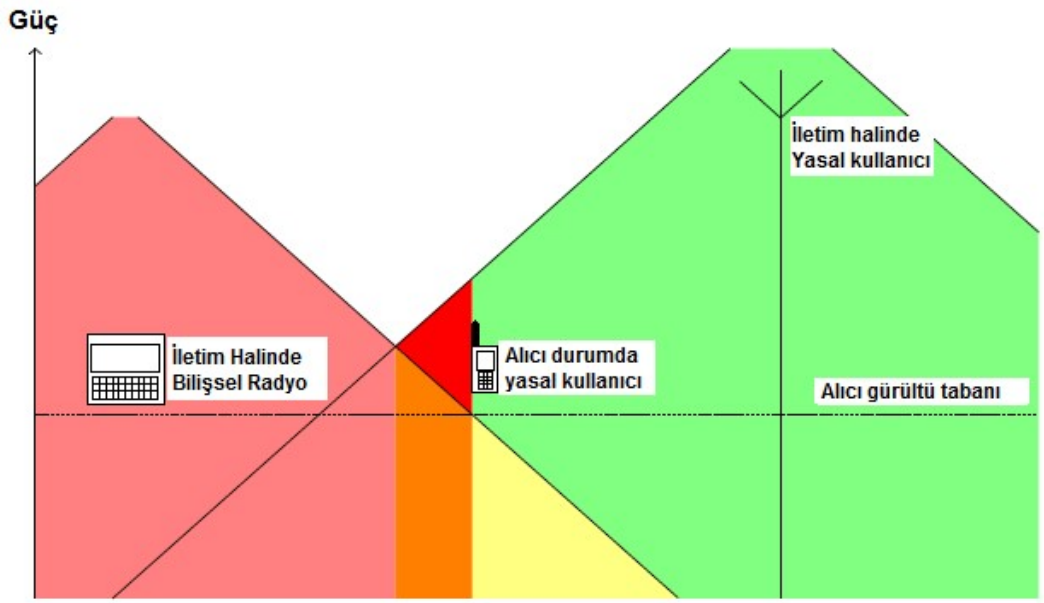
3.4. BR'nun Gerçekleştirilmesi Önündeki Engeller

BR'nun teknik anlamda gerçekleştirilmesi önünde üç büyük temel problem yer almaktadır: girişim (özellikle gizli düğümlerden kaynaklanan-*hidden nodes*), donanım ve kontrol.

3.4.1. Gizli düğüm veya girişim problemi

İdealde bir BR'nun diğer radyo kullanıcı üzerinde etkisi olmamalıdır. Ancak pratikte söz konusu etkiler beklenmektedir. Bazı kullanıcıların bilişsel olmayan radyoya sahip olmaları ve bu cihazların özellikle de spektrum, zaman ve konum gibi kaynakların paylaşımlı olması durumunda BR tarafından kaynaklanan girişimden nasıl etkilenecekleri, üzerinde

durulması gereken önemli bir sorudur. Özerk ve adaptif yapısı sebebiyle, BR'nun kararlarının ve davranışlarının önceden bilinmesi ve kontrol edilmesi çok zordur.



Şekil 3.6. Gizli düğüm problemi

Şekil 3.6'da, gizli düğüm problemine ilişkin bir örneğe yer verilmektedir. BR cihaz, yayın yapan yasal kullanıcının oldukça uzağında yerleşmiş durumdadır, ancak alıcı durumdaki kullanıcıya çok yakın durumdadır. Alıcı durumdaki kullanıcı haberleşme hücresinin köşesinde yer almaktadır. Kırmızı renkli bölüm güvenilir haberleşme için gerekli minimum Taşıyıcı/Girişim Oranı (Carrier-to-Interference Ratio, CIR[2])'ndan aşağı değerler taşır. BR cihaz yayına başlamadan önce, söz konusu bölgede herhangi bir kullanıcının olup olmadığını belirlemek için spektrum ölçümü yapar. Normalde BR bulunduğu bölgede hangi frekansların kullanılabileceğini belirlemek için spektrumu analiz eder, ancak yayın yapan kullanıcının BR cihazın çok uzağında yer almasından dolayı, BR cihazın bulunduğu yerde yayılım gücü çok düşük olacak, ortam gürültü gücünün de altında kalarak, sezilmesi çok zor olacaktır. Bu durumda alıcı durumdaki kullanıcı yayın yapmadığı sürece, BR cihaz bu kullanıcıyı sezemez. Sonuç olarak, BR cihaz yayın yapan kullanıcıyı sezmekte başarısız olur ve alıcı durumdaki kullanıcının varlığını fark edemez. Dolayısıyla, kullanıcıların iletişimde olduğu frekansın kullanılabilir olduğu kararını veren BR cihaz yayın yapmaya başlarsa, bu yayın yasal alıcı durumdaki radyo üzerinde girişim oluşturur [6].

[2] Signal-to-interference ratio (SIR) olarak da bilinen CIR, alınan modüle edilmiş ortalama taşıyıcı güç *S*'in veya *C*'nin alınan ortalama kanallar arası girişim gücü, *I*'ya oranı olarak tanımlanmaktadır.

3.4.2. Donanım gereçleri

BR uygulamalarına yönelik spektrum sezme işlemi için yüksek örnekleme hızları, yüksek ayrıştırma özelliği ile birlikte geniş dinamik frekans aralığında çalışabilen yüksek hızlı işaret işleme yapabilen işlemciler bulunduran analog-dijital dönüştürücüler olmalıdır.

Bu bakımdan, spektrumdaki önemli imkânların belirlenebilmesi için oldukça geniş frekans bandının yakalanması ve analiz edilmesi zorunludur. Bu doğrultuda, daha geniş bantlarda yapılması zaruri işlemler, antenler ve güç kuvvetlendiriciler gibi RF gereçlerinde önemli derecede ilave donanımlara ihtiyaç duyulur. Ayrıca çok düşük gecikme sürelerine sahip yüksek hızda işaret işleme gerçekleştirebilen işlemci devreler (Sayısal İşaret İşlemci (Digital Signal Proccessing, DSP), Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri (Field Programmable Gate Array, FPGA) v.s.) gerekir [6].

3.4.3. Sistem kontrol zorluğu

Bütün kullanıcıların karakteristik davranışlarının, bir veya birden fazla BR veya BR sistemiyle aynı kaynakları (spektrum, zaman, mekân v.s.) paylaşmaları dikkate alınarak tüm durumlar için çözüm sağlanmalıdır. Son derece büyük bir sahada, çok sayıda ve karmaşık işlemler yapılması gerektiğinden dolayı tüm sistemin anlık olarak kontrol edilebilmesi içerisinde çok sayıda ve karmaşık optimizasyon işlemlerini barındıran büyük bir problemdir.

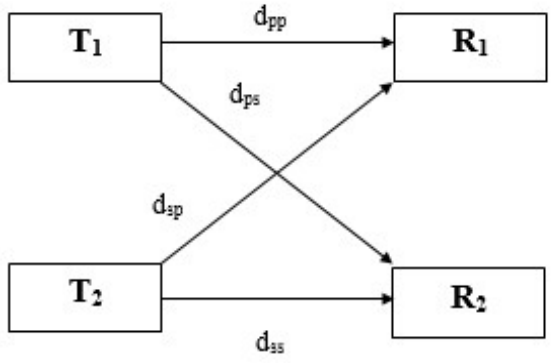
Belirtildiği üzere; Tam-İdeal BR sistemlerin geliştirilmesi önünde önemli problemler bulunmaktadır. Ancak son 20 yılda bu problemleri aşmaya yönelik kayda değer teknik, akademik ve Ar-Ge çalışmaları yürütüldüğü aşikârdır. Tam-İdeal BR sistemlerin geliştirilmesi durumunda Bölüm 3.4'te ifade edilen avantajlar elde edilebilir.

4. ARQ SİSTEMLERDE BR

Yöntem itibariyle BR için iki farklı kullanım metodu izlenmektedir: i) Yer paylaşım (overlay), SU için herhangi bir güç sınırlaması olmaksızın sadece PU'nın kullanmadığı boş spektrum aralıklarının kullanılması ve ii) Alt paylaşım (underlay), SU için belirli güç limitleri sağlanarak tanımlanan tüm frekans bölgesinde çalışmasına imkan tanınmasıdır. ARQ sistemlerde gerek yer paylaşım gerekse alt paylaşım modellerine göre BR uygulamaları söz konusudur. Bu tez çalışmasında da her iki paylaşım modeline göre uygulamalar gerçekleştirilmiştir.

4.1. Kullanılan BR Modeli

Kablosuz haberleşme ortamında bir birincil bir de ikincil kullanıcı çiftini bulunduran BR modeli Şekil 4.1'de gösterilmekte olup, bu şebekede "T_1" birincil verici, "R_1" birincil alıcıdır. Bununla birlikte "T_2" ve "R_2" ikincil kullanıcı çiftini temsil etmektedir. Bu modelde alıcıların kanal durum bilgisinden Kanal Durum Bilgisi (Channel State Information, CSI)'nden mahrum kaldığı kabul edilmiştir. Uzaklık değeri olarak gösterilen d_{ij}, i vericisinden j alıcısına doğru uzaklığı temsil etmektedir.



Şekil 4.1. BR modeli

Birincil düğümler, ikincil düğümlerin varlığından habersizdir. Birincil ve ikincil vericiler sırasıyla P_1 ve P_2 güçlerinde yayın yapmaktadır.

Vericiden alıcıya doğru iletim yolu ileri yönlü link olarak tanımlanırken, geribesleme sinyallerinin alıcıdan vericiye doğru aktarıldığı iletim yolu geri yönlü link olarak

tanımlanır ve her iki link farklı frekans bantlarında çalışır. Ayrıca ileri yönlü link bilgi paketleri aktarılan yol olduğundan yüksek bantgenişliğine sahipken, geribesleme sinyalleri alındı veya alınmadı şeklinde temelde iki çeşit bilgi taşıdığından geri yönlü link için çok düşük bir bantgenişliği yeterlidir. Bu çerçevede birincil ve ikincil geri yönlü linklerin de farklı bantlarda çalıştığı kabul edilmiştir.

Bu bölümde ikincil kullanıcı çiftinin, birincil çiftin kullandığı kod kitabını bildiği kabul edilmiştir. Birincil düğümler, ikincil düğümlerin varlığından habersizdir. Söz konusu modelde aynı zamanda (frekansta) hem paket iletimi, hem de paket alımı yapılamamaktadır. Aksi belirtilmediği sürece, her iki kullanıcı çifti de eşzamanlı olarak yayın yapmaktadır. PU sabit bir P_1 güç değerinde ve R_p sabit bir hızında yayın yapmaktadır. Aksi belirtilmediği sürece kanal ortamının AWGN kanal ortamı olduğu kabul edilmektedir.

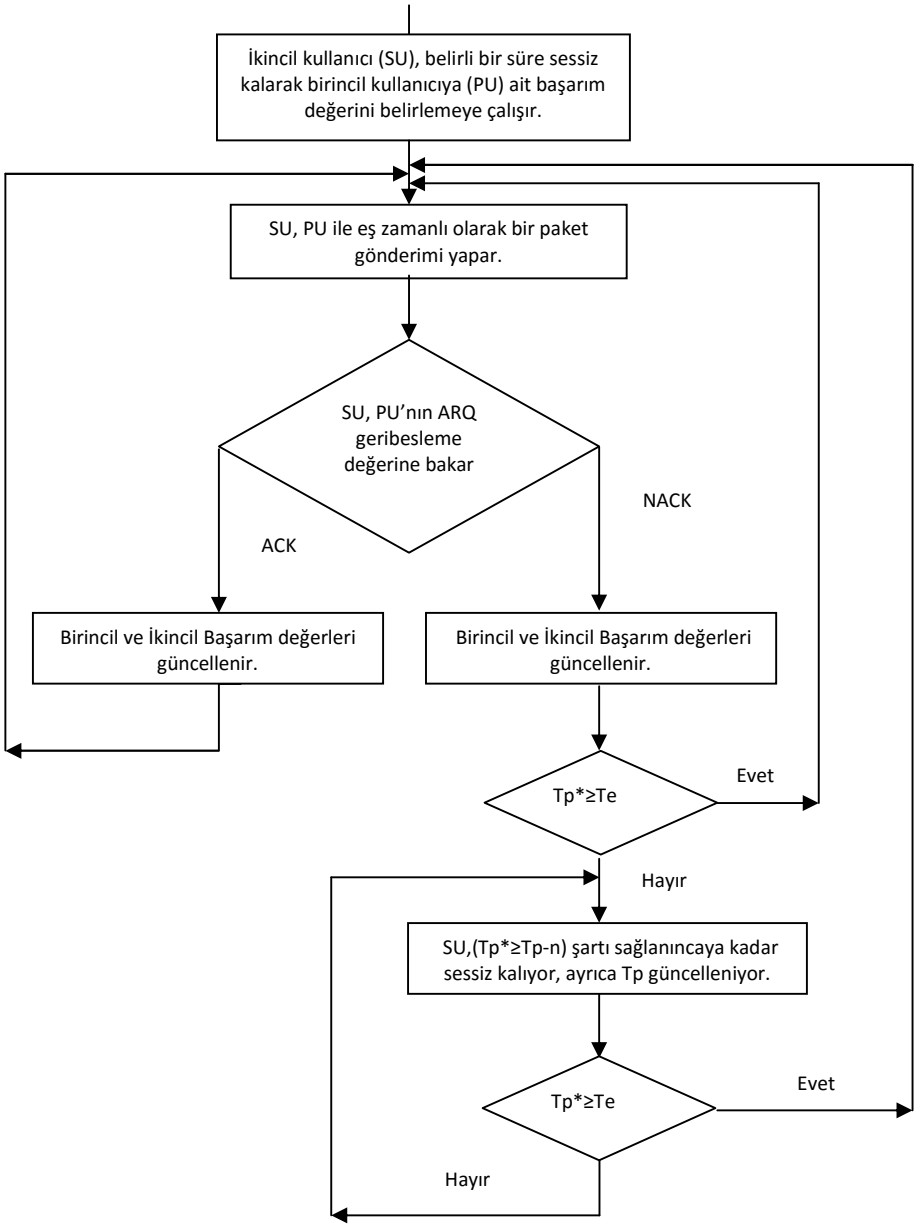
4.2. Alt Paylaşımlı Modeller

Alt paylaşım modelinde PU'nın önceden düzenleyici çerçevede belirlenen kapsamda haberleşme performansında belirli bir azalma hedeflenir. SU, PU'nın haberleşme performansında belirlenen seviyenin altına inmeden kendisine iletim kaynağı edinmeye çalışır. Böylece PU için ihmal edilebilir bir kaynağa karşılık SU için önemli miktarda haberleşme kaynağı edinilir. PU için önceden belirlenen kayıp eşiğinden daha fazla bir performans kaybına izin verilmez.

Alt paylaşım modelde birincil ve ikincil kullanıcılar eşzamanlı olarak ARQ protokolünde çalışır. Bununla birlikte ikincil iletimin girişiminden dolayı düşmesi beklenen birincil başarım değerinin belirli bir seviyede tutulması amaçlanır. Bu seviyenin altına inilmesi durumunda SU'nın erişim kontrolü vasıtasıyla sessiz kalması sağlanarak birincil başarımın tekrar karakteristik başarım değerine doğru çıkması sağlanır. Birincil başarıma ait eşik değeri, PU için ihmal edilebilir gürültü seviyesini ifade eder ve bu SU için önemli haberleşme kaynağı olabilir. Söz konusu stratejiyi izleyen EKA Şekil 4.2'de verilmektedir.

Bununla birlikte, SU'nın birincil kullanıcı çiftine hiç girişim oluşturmadan veya ihmal edilebilir bir düzeyde girişim oluşturarak kendisi için önemli miktarda haberleşme kaynağı da bulabilir. Bu durumun; T_2'nin, R_1'e yeteri miktarda uzak olması veya T_2 iletim gücünün

yeteri miktarda düşük olmasına bağlı olduğu açıktır. Ancak ikincil kullanıcı çiftinin ilgili uzaklık bilgilerine ve birincil iletim gücü bilgilerine sahip olamadığı durumda SU bu bilgileri dolaylı olarak birincil geribesleme sinyallerinden çıkarmaya çalışmalıdır.



Şekil 4.2. ARQ sistemde Erişim Kontrol Algoritması

Önerilen EKA'nın çalışma akışı;

a. Kanalın SU tarafından kullanımının başlanması halinde ilk olarak SU, PU'nın haberleşme performansını ölçer. Bunun için belirli bir süre kanala doğrudan müdahale

etmeyerek sadece PU'nın ARQ geribesleme sinyallerini dinler. PU'nın kanalda tek başına olduğu durumdaki performansı belirlenir.

b. SU kanalda paket gönderimi yapar ve bu gönderimin üzerinde girişim oluşturduğu PU'nın gönderim performansına bakar. Eğer PU'nın gönderimine ilişkin geribesleme sinyali ACK ise, SU aynen gönderine devam eder ve bu gönderimler sonrası her iki kullanıcının başarım değerleri güncellenir.
c. Eğer PU'nın gönderimine ilişkin geribesleme sinyali NAK ise; SU, yeni belirlenen başarım değerleri kapsamında PU'nın başarım performans kıyaslamasını yapar. Bu kıyaslamaya göre, birincil başarım eşik değerinin üzerinde kalındığı tespit edilirse SU iletimine devam edilir.
d. Aşama (c)'deki kıyaslamaya göre PU'nın başarım eşik değerinin altında kalındığı görülürse; PU'nın başarım performansı belirlenen eşik değeri geçinceye kadar SU kanala müdahale etmez.

Tüm veri paketleri iletilene kadar SU EKA kapsamında hareket eder.

4.2.1. Temel ARQ sistemlerinin BR tarafından alt paylaşımlı ikincil kullanımı

Bu bölümde, Temel ARQ protokolünü kullanan ve birincil kanalda iletim yapmak isteyen SU için haberleşme kaynağı oluşma imkanı incelenmiştir. PU ile eşzamanlı olarak yayın yaptığı göz önünde bulundurulan ikincil BR kullanıcı çifti, birincil kanal kısıtlarını da dikkate alarak iletim yapar. Söz konusu kısıtları sağlayabilmek için erişim kısıtlama modeli kullanılmış olup, yapılan simülasyon sonuçlarına göre SU için önemli başarım değerleri sağlayan haberleşme kaynakları elde edilir. SU için söz konusu kaynak elde edilirken PU'ya ait başarım değeri önceden belirlenen ve makul görülebilir bir seviyenin altına düşmeyerek, PU kısıtlarının da korunduğu gözlenir.

İlk simülasyon çalışmasında PU ve SU'nın aynı kanal ortamında SW ARQ protokolünde çalıştığı dikkate alınmış ve her iki kullanıcı için 10 kbps hıza sahip SW ARQ haberleşme sisteminde 0.65 ms gecikme süresi olarak alınmıştır. Veri paketleri 128 bit bilgi biti ile hata sezme amaçlı 16 bitlik CRC parite bitlerinden oluşan 144 bitten ibarettir. BR'ya ait ARQ yöntemi de birincil sistemle aynı özelliklere sahiptir ve eşzamanlı olarak

çalışmaktadır. Birincil başarım değeri için makul görülebilir eşik değer maksimum başarım değerinin %5 aşağısı olarak belirlenmiştir.

Bir ARQ sisteminin başarım değeri, birim zamanda alıcıda doğru alınan bit sayısının vericiden birim zamanda iletilen bit sayısına oranı şeklinde tanımlanır. Böyle bir sistemde SU'nın başarım değerini iki olay etkilemektedir: (a) İkincil kullanıcının kanalı kullanma hakkını kazanma ihtimali P_c ve (b) İkincil vericinin veri paketini ikincil alıcıya doğru iletme ihtimali, P_s. İkincil veri paketinin ikincil alıcıda *n.* iletim sonrasında alındığı kabul edilirse, *n.* iletim sonrasında ikincil alıcının doğru veri paketini elde etme olasılığı,

$$P_s(n) = \sum_{m=1}^{n} P_c(m/n) P_s(m/n) \tag{4.1}$$

olarak ifade edilir. Her bir iletimde ikincil alıcının veri paketini doğru biçimde elde etmesi olasılığı P_s, kanalın gürültüsüne, PU'nın ikincil veri paketi üzerinde oluşturduğu girişim ile ilişkilidir. Bununla birlikte, ikincil vericinin kanalı kullanarak birincil alıcı üzerinde girişim oluşturması durumunda ne kadarlık bir girişim oluşturduğu da önem arz eder.

SU'nın kanalı sürekli kullanarak PU'ya ait birincil başarım değerini önceden belirlenen T_e eşik Başarım değerinin altına düşürmemelidir. Bunun için SU'ya erişim sınırlaması getiren önerilen EKA çerçevesinde hareket etmelidir.

$$P_c = P(T_p^* \geq T_e) \tag{4.2}$$

$$P_c = P(T_p^* \geq (1 - \frac{n_{\%}}{100})) \tag{4.3}$$

Sonuçta, tek bir paketin ikincil vericiden alıcıya doğru olarak iletilmesine ilişkin matematiksel analizden sonra, tüm ikincil veri paketlerinin alıcıya doğru iletilmesine ilişkin karakteristik ikincil başarım değeri;

$$T_s = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \times P_s(n).R_T \tag{4.4}$$

biçiminde tanımlanır. Burada R_T, CRC kodlamadan dolayı oluşan kod oranı ve bir TS için paket bekleme sürelerinden dolayı oluşan ortalama başarım kaybını ifade etmektedir ve vericinin mesaj dizisini göndermesi ile bu diziye ilişkin geribesleme sinyalini alması arasındaki süre t_w, vericinin veri hızı β ve kodlanmış haliyle vericiden iletilen bir paketteki bit sayısı γ olmak üzere;

$$R_T = R_{CRC}\left(\frac{\gamma}{\gamma + t_w\beta}\right) \tag{4.5}$$

biçiminde ifade edilir. Konunun anlaşılması için bu çalışmada birincil ve ikincil kullanıcılara ilişkin olarak aynı paket çerçeve boyutu (frame size), TS süresi ve kodlama yapıları ve iletim hızı esas alındığından R_T oranı her iki kullanıcı için aynı değer olur.

BR için önerilen EKA çerçevesinde çalışan ikincil kullanıcı çifti ile aynı kanalda yayın yapan PU'ya ait başarım değerini iki olay etkiler. (a) SU'nın kanalı kullanma hakkını kazanma ihtimali P_c ve (b) birincil vericinin veri paketini birincil alıcıya doğru iletme ihtimali, P_p. Veri paketini doğru iletme ihtimali, SU kanalı kullanırken $P_{p1,}$ SU yokken veya sessizken P_{p2} olmaktadır. Veri paketinin birincil alıcıda *n.* iletim sonrasında alındığını kabul edersek, *n.* iletim sonrasında birincil alıcının doğru veri paketini elde etme olasılığı;

$$P_p(n) = \sum_{m=1}^{n}\left[P_c(m/n)P_{p1}(m/n) + (1 - P_c(m/n)P_{p2}(m/n))\right] \tag{4.6}$$

olarak ifade edilir.

T_p değeri SU'nın olmadığı durumda PU'ya ait başarım değerini ifade ettiğinden SU'nın kanalı kullanma hakkını elde etme olasılığından bağımsızdır. Bununla birlikte T_p^* önerilen EKA çerçevesinde çalışan SU'nın bulunduğu durumdaki birincil başarımı belirttiğinden SU'nın kanalı kullanma hakkını elde etme olasılığına bağlıdır.

$$T_p^* = \sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n} \times P_p(n)\, R_T \tag{4.7}$$

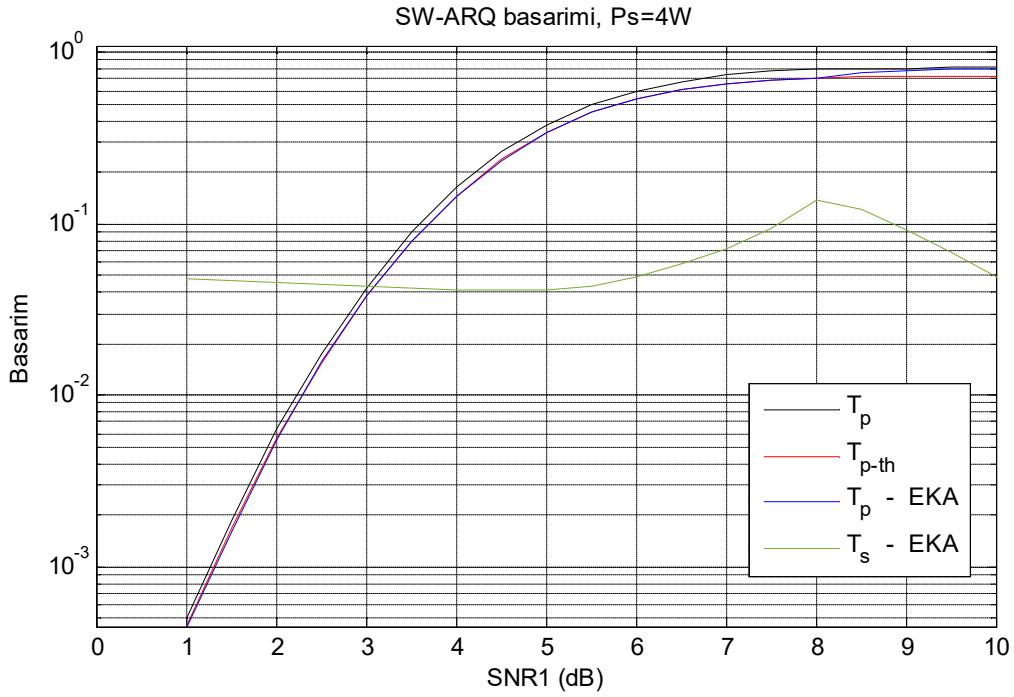
SU'nın birincil karakteristik Başarım değerine ilişkin tespiti ise şu şekilde ifade edilebilir:

$$T_p = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \times \left[\sum_{m=1}^{n} P_{p2}(m/n) \right] R_T \tag{4.8}$$

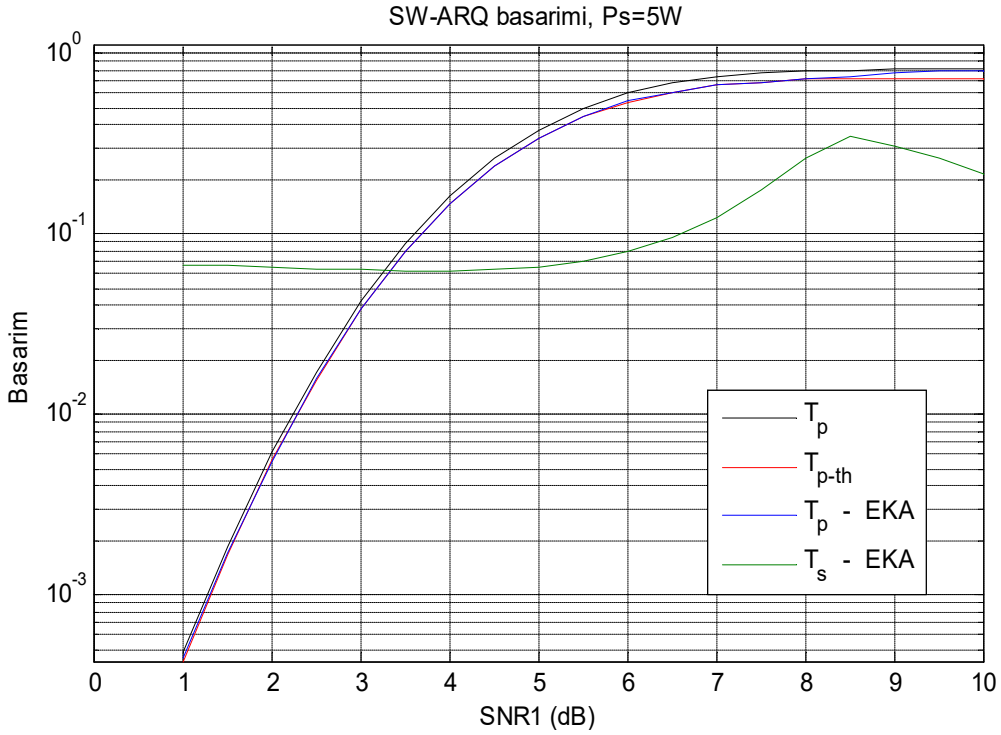
İkincil kullanıcının iletimi halinde (birincil başarımın eşiğin üzerinde çıkması durumu) PU üzerine ne kadar girişim oluşturduğuna bağlı olarak birincil ve ikincil başarım değerleri değişir.

Uzaklık verileri d_{11}=1, d_{12}=4, d_{22}=1,d_{21}=4 birim (kanal kazanç değerleri uzaklık verilerine göre düzenlenmiştir), ikincil verici gücü P_s sırasıyla 4W (Şekil 4.3), 5W (Şekil 4.4) ve 6W (Şekil 4.5) olarak alınmıştır. Söz konusu parametrelerle gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarına göre [64];

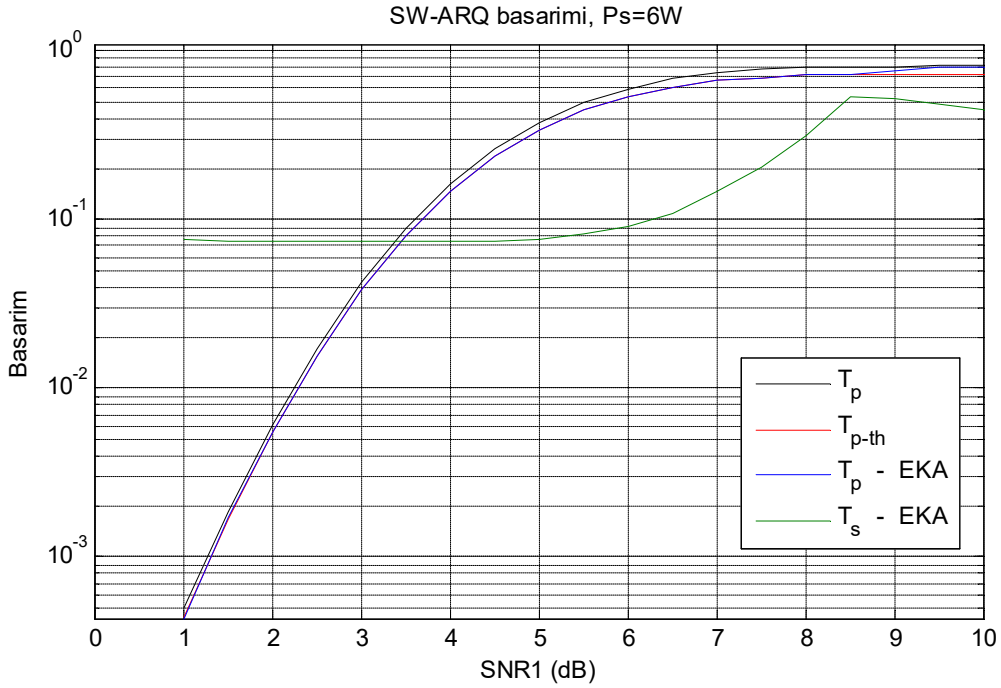
- Birincil kullanıcı çifti için belirli bir seviyenin üzerinde girişim oluşmaması şartı SU'ya ait erişim kontrolü vasıtasıyla tüm SNR değerleri için sağlanmıştır. Tüm simülasyonlarda PU'nın başarımı, hiçbir zaman tanımlanan eşik değerden aşağıya inmediği görülmüştür.
- İkincil verici gücünün yüksek olması halinde ikincil başarım performansının yükseldiği görülmektedir.
- Özellikle SNR_1=5,5dB'den (PU'nın SNR değeri) sonra SU performansının yükseldiği, SU verici güç değerine göre 8-8,5 dB seviyelerinde maksimum başarım değerinin sağlandığı görülmektedir. Bu seviyeden sonra ise ikincil başarım düşmektedir, zira PU'nın verici gücü yükseldiğinden ikincil alıcı üzerinde girişim artmaktadır.



Şekil 4.3. İkincil verici gücü 4Watt iken SW ARQ birincil ve ikincil başarım performansları



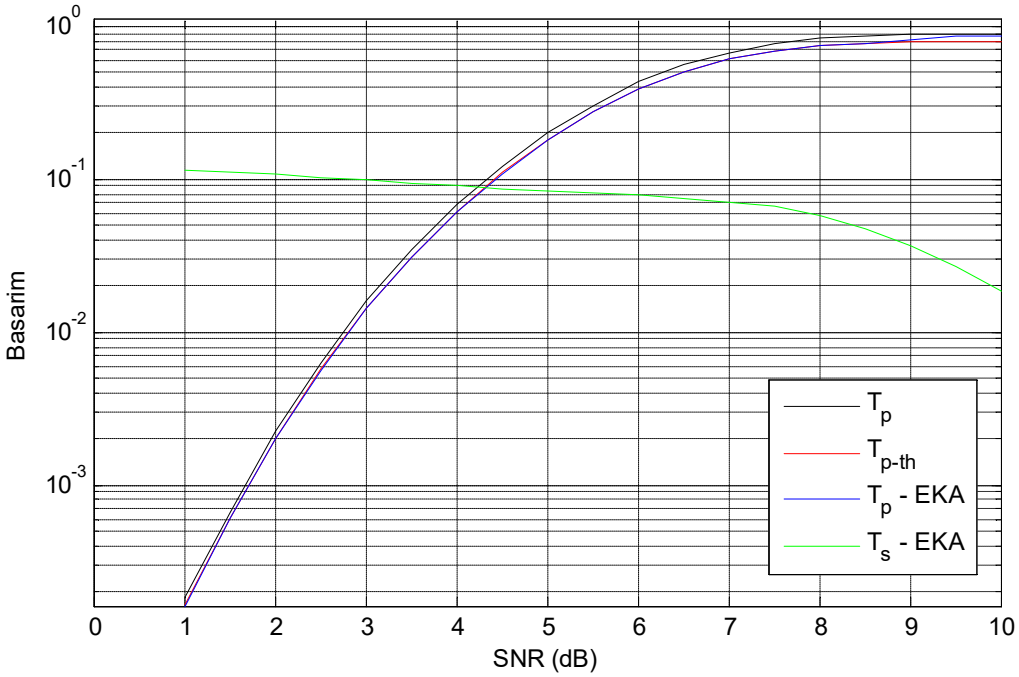
Şekil 4.4. İkincil verici gücü 5Watt iken SW ARQ birincil ve ikincil başarım performansları



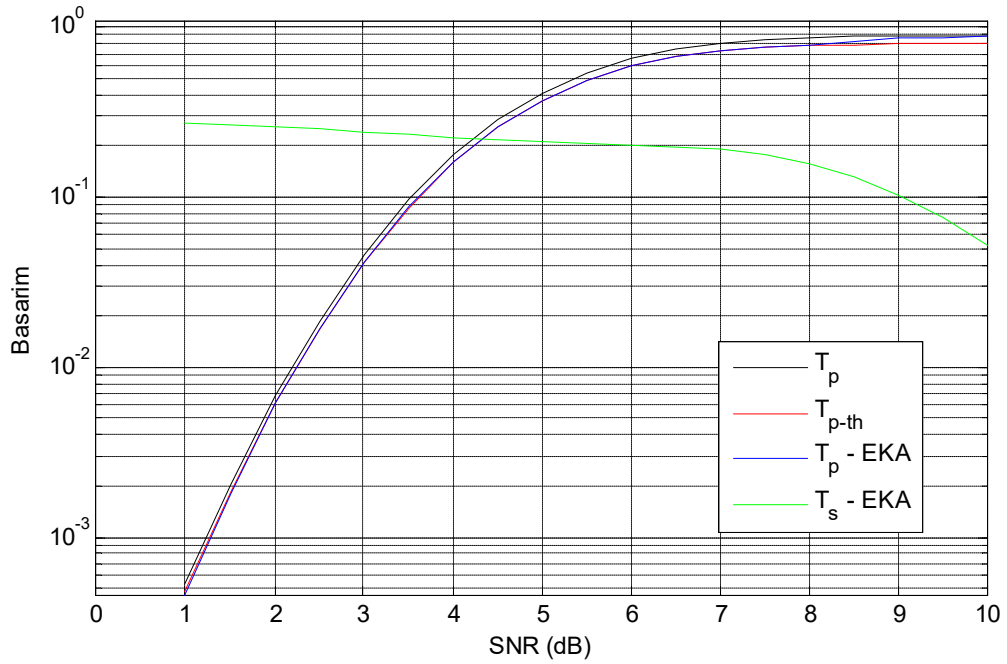
Şekil 4.5. İkincil verici gücü 6 Watt iken SW ARQ birincil ve ikincil başarım performansları

Yukarıda eşzamanlı SW ARQ sistemi kapsamında gerçekleştirilen simülasyonlarda PU ve SU'ya ait veri paketlerinin aynı anda alıcılara ulaştığı kabul edilmiştir.

GB-N ARQ yapısını kullanan PU ile aynı kanalda ikincil iletim yapmak isteyen SU'nın haberleşme performanslarına ise Şekil 4.6'da yer verilmektedir. SU'nın iletim gücü 4 Watt kabul edilirken, PU'nın SNR performansına göre her iki kullanıcının başarım performansı gösterilmektedir. SU yukarıda belirtildiği üzere EKA kapsamında hareket etmektedir. Paket geri adım sayısı, N=3 alınmıştır. Aynı yöntemle Şekil 4.7'de de SR ARQ protokolünü kullanan PU ve SU'nın başarım performansları simüle edilmiştir.



Şekil 4.6. GB-N ARQ birincil ve ikincil başarım performansları



Şekil 4.7. SR ARQ birincil ve ikincil başarım performansları

Herhangi bir kanalın BR tarafından kullanımına ilişkin olarak ilk kuralın, PU'nın öngörülen seviyeden fazla girişime maruz kalmaması olduğu ifade edilmişti. Bu bölümde Temel ARQ sistemlerine ilişkin gerçekleştirilen tüm simülasyonlarda; PU'nın başarımı öngörülen seviyenin altına inmemiştir. Önerilen EKA ile bu kural korunmuştur. Ayrıca

BR'nun kullanımının avantajı olarak ikincil bir kaynak elde edilmesi olduğu belirtilmişti. Bu bağlamda, bu bölümdeki simülasyonlarda PU ile aynı kanalı kullanan SU için önemli miktarda haberleşme kaynağı elde edildiği görülmüştür. SW ARQ sistemlerde SNR_1= 3dB ve GB-N ARQ ile SR ARQ sistemler için SNR_1=4,5dB altındaki değerlerde birincil başarım performanslarından daha üstün ikincil başarım performansları elde edilmiştir.

Bununla birlikte, temel ARQ protokollerini kullanan SU'lar içerisinde en yüksek performansı (beklendiği üzere), SR ARQ kullanan SU göstermiştir. En düşük başarım performansını ise SW ARQ kullanan SU göstermiştir.

4.2.2. HARQ sistemlerin BR tarafından alt paylaşımlı ikincil kullanımı

ARQ sistemlerde Eş. 4.5'te verilen denklemde R_T başarım kaybını ifade ederken HARQ sistemlerde hata düzeltme amacıyla kullanılan konvolusyon kodlarından dolayı yeni bir başarım kaybı parametresi oluşur. Mesaj bitlerinin daha fazla bit ile ifadesi ile sonuçlanan kodlamadan dolayı HARQ sistemlerde ki başarım kaybı,

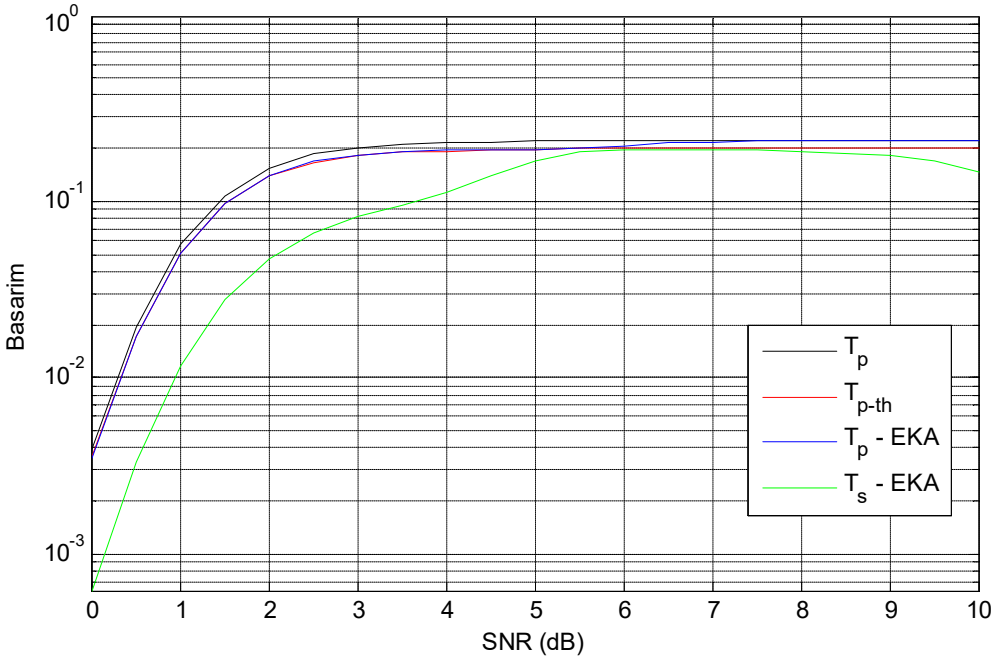
$$R_T = R_{CRC} R_{CC} \left(\frac{\gamma}{\gamma + t_w \beta} \right) \tag{4.9}$$

şeklinde ifade edilir. Bu değişiklikten dolayı, her ne kadar HARQ sistemlerde başarım kaybının olduğu düşünülse de, konvolusyon kodlarının ilave kullanımı ile alıcıda veri paketinin hatalı alınma olasılığı önemli ölçüde düşer. Bu nedenle gerek PU'nın başarım ölçümünde tanımlanan Eş. 4.6'daki P_p değeri, gerekse SU'nın başarım ölçümünde tanımlanan Eş. 4.1' deki P_s değeri, konvolusyon Viterbi kod çözücü marifeti sebebiyle düşer. Alıcıda paketin hatalı alınma olasılığındaki bu düşüş, hem PU hem SU başarım performansında önemli artış sağlar.

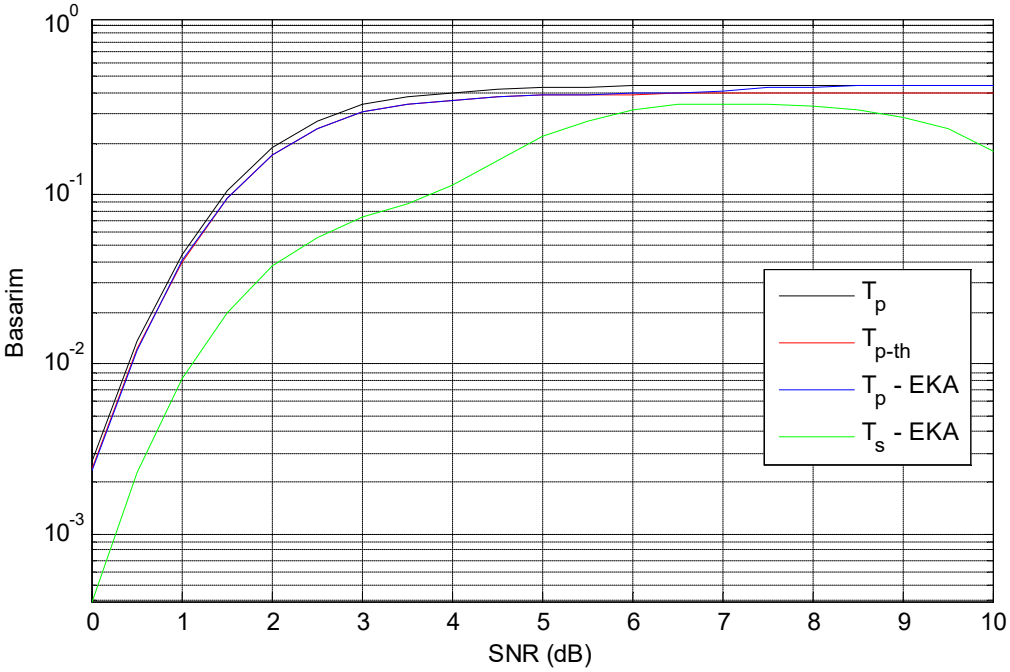
HARQ sistemlerin SU'lar tarafından kullanımına ilişkin sistem performanslarına Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da yer verilmektedir. Bu bölümdeki tüm simülasyonlarda kullanılan parametre değerlerine Çizelge 4.1'de yer verilmektedir.

Çizelge 4.1. Simülasyon çalışmasında esas alınan parametre değerleri

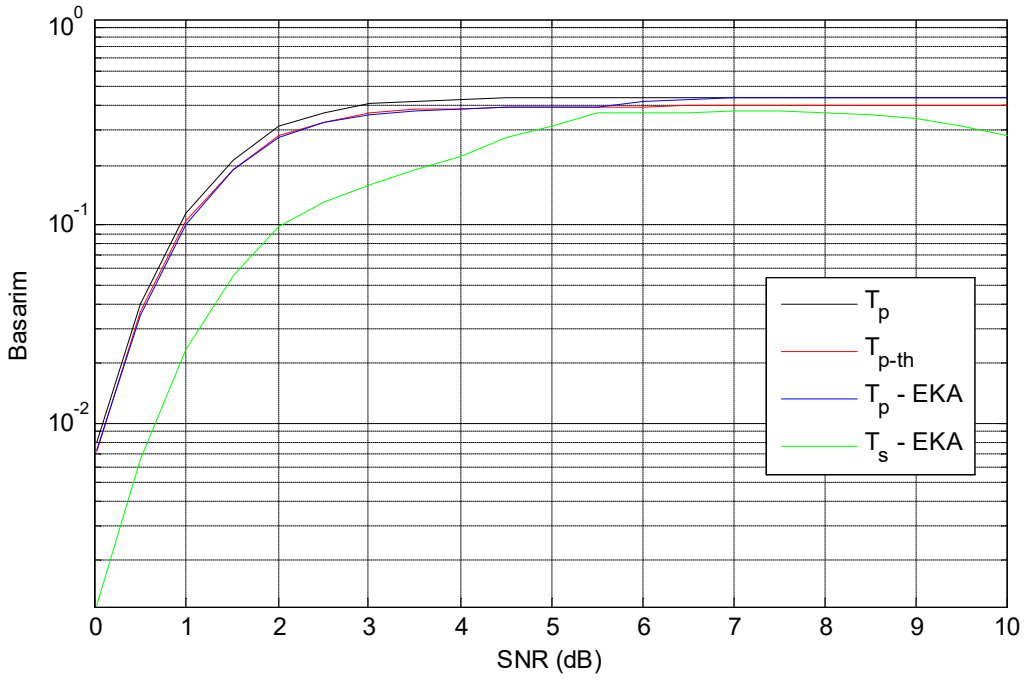
Parametreler	Alınan değerler
Veri paketi mesaj bit sayısı	256
Hata sezme kodu	CRC, 32 bit
Hata düzeltme kodu ve oranı	Konvolusyon kodu, 1/2 oran
Hata kod çözücü	Viterbi algoritması
Modülasyon	BPSK
Kanal	AWGN (gecikmeler dikkate alınmıştır.)
Kanal iletim hızı, β	100kbps
İkincil verici gücü, P_2	6,0206 dBm
Gürültü gücü	1 mW
SW sistem için bekleme süresi, t_w ($=2t_p$)	5,76 x10^{-3} saniye
GB-N için adım	2
Kanala verilen paketteki bit sayısı, γ	576 bit
Birincil verici ile ikincil alıcı arasındaki uzaklık, d_{11}	1 birim
Birincil verici ile ikincil alıcı arasındaki uzaklık, d_{12}	2 birim
İkincil verici ile ikincil alıcı arasındaki uzaklık, d_{22}	1 birim
İkincil verici ile ikincil alıcı arasındaki uzaklık, d_{21}	2 birim
Birincil başarım eşik yüzdesi, $n_{\%}$	5 (%)



Şekil 4.8. Alt paylaşımlı bilişsel SW HARQ sisteminde birincil ve ikincil kullanıcı başarım performansları



Şekil 4.9. Alt paylaşımlı bilişsel GB-N HARQ sisteminde birincil ve ikincil kullanıcı başarım performansları

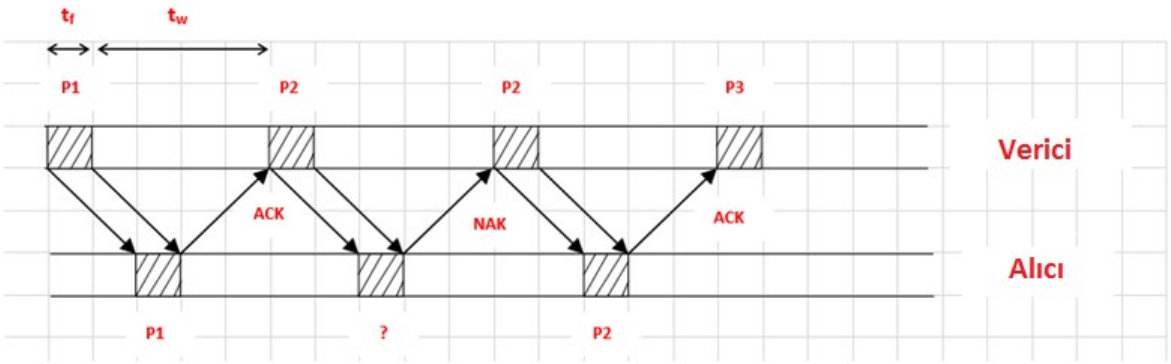


Şekil 4.10. Alt paylaşımlı bilişsel SR HARQ sisteminde birincil ve ikincil kullanıcı başarım performansları

Herhangi bir kanalın BR tarafından kullanımına ilişkin olarak ilk kuralın, PU'nın öngörülen seviyeden fazla girişime maruz kalmaması olduğu ifade edilmişti. Bu bölümde HARQ sistemlerine ilişkin gerçekleştirilen tüm simülasyonlarda; PU'nın başarımı öngörülen seviyenin altına inmemiştir. Önerilen EKA ile bu kural korunmuştur. Ayrıca HARQ sistemlere ilişkin simülasyonlarda PU ile aynı kanalı kullanan SU için önemli miktarda haberleşme kaynağı elde edildiği görülmüştür.

4.2.3. Asenkron alt paylaşımlı SW HARQ sisteminin ikincil kullanımı

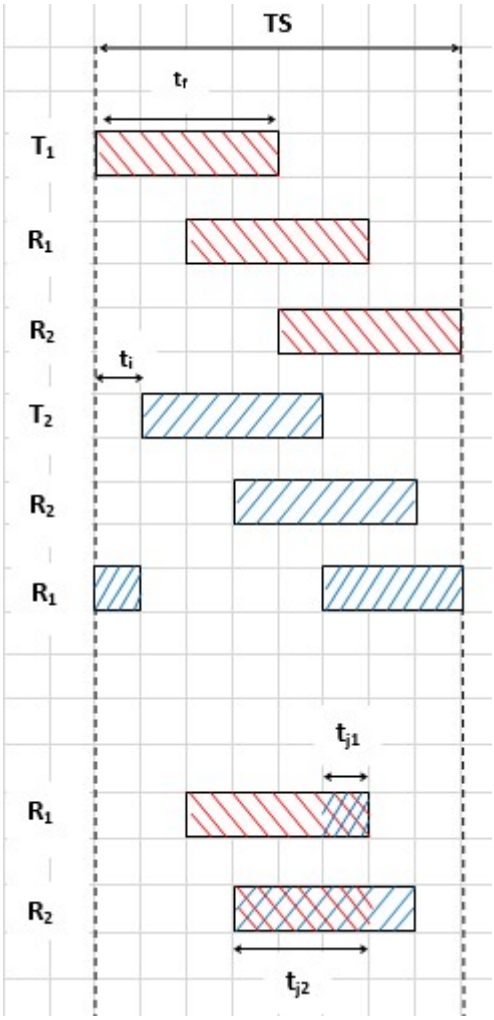
Şekil 4.11'de SW HARQ çalışma prensibi gösterilmektedir. Klasik bir SW HARQ yapısında verici t_f süre içerisinde veri paketini kanala iletir ve iletilen paketin alıcı tarafından doğru alınıp alınmadığını belirten geribesleme sinyalini t_w süre bekler. Bu süreçte vericiden başka bir veri iletimi olmaz. Bilgi bitleri vericide iletilmeden önce CRC ve konvolusyon kodu ile kodlanarak iletilen bit oranı artırılır. Alıcıda alınan veri paketi öncelikle uygun konvolusyon kod çözücüde çözülür. Daha sonra vericide işlenen CRC kod polinomuna bölünerek hata olup olmadığı anlaşılır. Sonuca göre vericiye uygun geribesleme sinyali gönderilir. Bir veri paketinin vericiden iletilmesi ve ilgili geribesleme sinyalinin vericiye ulaşmasını içeren süre bir TS olarak tanımlanır.



Şekil 4.11. SW HARQ çalışma prensibi

Birincil SW HARQ bekleme sürelerinin (t_w) SU tarafından olabildiğince kullanılması her iki kullanıcı çifti için yararlı olur. Bu çalışmada aynı çerçeve ve periyot yapılarına sahip birincil ve ikincil kullanıcılar için, SU'nın belirli başlangıç gecikme süreleriyle birincil bekleme sürelerini değerlendirmesine ilişkin analizler yapılmıştır. Simülasyon sonuçları ile söz konusu bekleme sürelerinin ikinci kullanıcılar tarafından değerlendirilmesi halinde önemli başarım değerinin sağlandığı gözlemlenmiştir.

Şekil 4.12'de PU'nın veri paketini gönderdikten sonra uzaklıkla orantılı kanal kazançlarına bağlı olarak birincil alıcıya ve daha sonra ikincil alıcıya ulaştığı, bununla birlikte, birincil periyot başlangıcından t_i süre sonra ikincil vericinin veri paketini gönderdiği ve bu paketinde uzaklık değerlerine bağlı olarak ikincil ve birincil alıcılara ulaştığı kabul edilmiştir. Şekilde kırmızı şeritli paketler birincil, mavi şeritli paketler ikincil veri paketlerini göstermektedir. Alıcılara aynı zamanda ulaşan veri paketlerinin ilgi kısımlarında girişim oluşmaktadır. (Şekilde her iki kullanıcı çifti için t_f=t_w kabul edilmiştir) Şekil 4.12'deki örnekte; birincil vericiden birincil alıcıya veri propogasyon süresi t_{11}=t_f /2 iken, t_i=$TS/8$ için, birincil alıcıya ulaşan birincil pakete t_{j1}=$0,25t_f$ kadarlık süre girişim oluşmaktadır. Bu girişim, ikincil vericinin ikincil alıcıya gönderdiği paketin, birincil alıcıya ulaştığı zaman oluşturduğu girişimdir.

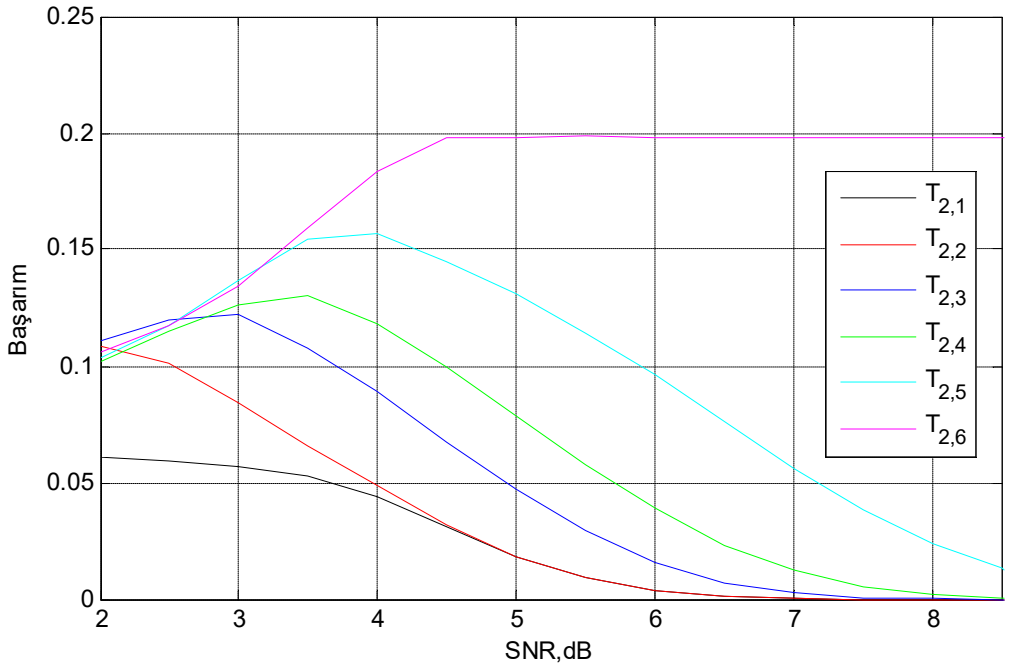


Şekil 4.12. Kullanılan modelde bir paket gönderimi zaman periyodu için verici ve alıcıların veri paketi durumu

Bu simülasyon çalışmasında belirtilen haberleşme yapısı için Çizelge 4.1'de belirtilen parametre değerleri kullanılmıştır. Kullanılan modelde ikincil vericinin TS'nin başlangıcından itibaren belirli t_i süreler sonrasında veri gönderimi yaptığı durumlarda, birincil ve ikincil alıcılardaki kendi veri paketleri üzerinde ne kadar süre girişim oluştuğuna ilişkin bilgiler Çizelge 4.2'de yer almaktadır. Çizelge 4.2'de ayrıca belirtilen t_i süreleri için ikincil başarım değerleri tanımlanmış olup, bu başarım değerlerine ilişkin simülasyon sonuçları da Şekil 4.13'te verilmiştir.

Çizelge 4.2. Kullanılan modelde farklı t_i süresine karşılık t_{j1} ve t_{j2} değerleri ve ikincil başarım notasyonları

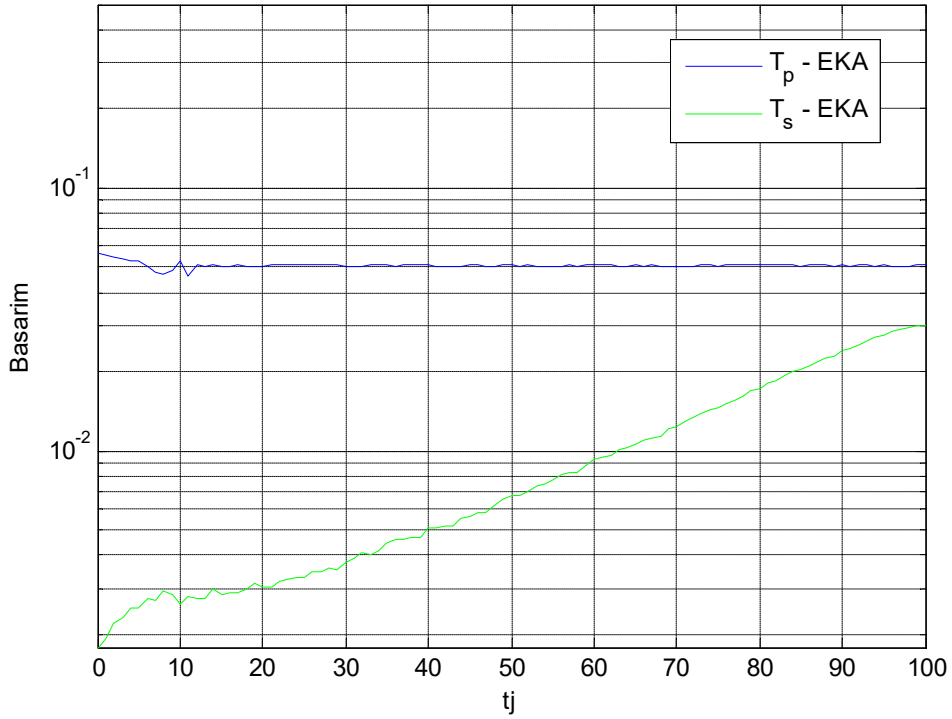
t_i	t_{j1}	t_{j2}	T_2
---	t_f	t_f	$T_{2,1}$
TS/4	0	t_f	$T_{2,2}$
TS/8, 3TS/8	0.25 t_f	0.75 t_f	$T_{2,3}$
0, TS/2	0.5 t_f	0.5 t_f	$T_{2,4}$
5TS/8, 7TS/8	0.75 t_f	0.25 t_f	$T_{2,5}$
3T/4	t_f	0	$T_{2,6}$



Şekil 4.13. Farklı t_i sürelerini esas alan SU'ların SNR-Başarım performansı

Şekil 4.13'te SW HARQ yapısında sürekli olarak iletim halinde bulunan PU'nın SNR değerine göre, farklı t_i zamanına ve sabit P_2 seviyesinde iletim gücüne sahip SU'nın başarım değerleri simüle edilmektedir. Birincil başarım değerinin sürekli olarak önceden belirlenen eşik değerden yüksekte kalmasının sağlandığı söz konusu simülasyon sonucuna göre; kullanılabilecek modele göre birincil ve ikincil veri paketlerinin tamamına girişim oluşacak eşzamanlı bir SW HARQ yapısında en düşük ikincil başarım değeri elde edilmektedir.

En üstün ikincil başarım performansı PU üzerinde en fazla girişimin oluştuğu ve SU üzerine herhangi bir girişimin oluşmadığı durumda gerçekleşmiştir. Birincil veri paketi üzerinde oluşan girişimin arttıkça ve ikincil veri paketi üzerinde oluşacak girişim azaldıkça SU başarım artmaktadır. Her ne kadar birincil veri paketi üzerine oluşan girişim artsa da kullanılan EKA mekanizması ile PU başarımı korunmaktadır. Bununla birlikte, SU üzerine oluşan girişim azaldıkça da ikincil başarım doğrudan artmaktadır. Ayrıca birincil veri paketi üzerinde oluşan az da olsa bir girişim söz konusu ise, ikincil başarım en fazla 4,5dB seviyesinden itibaren SNR değeri yükseldikçe düşmektedir.



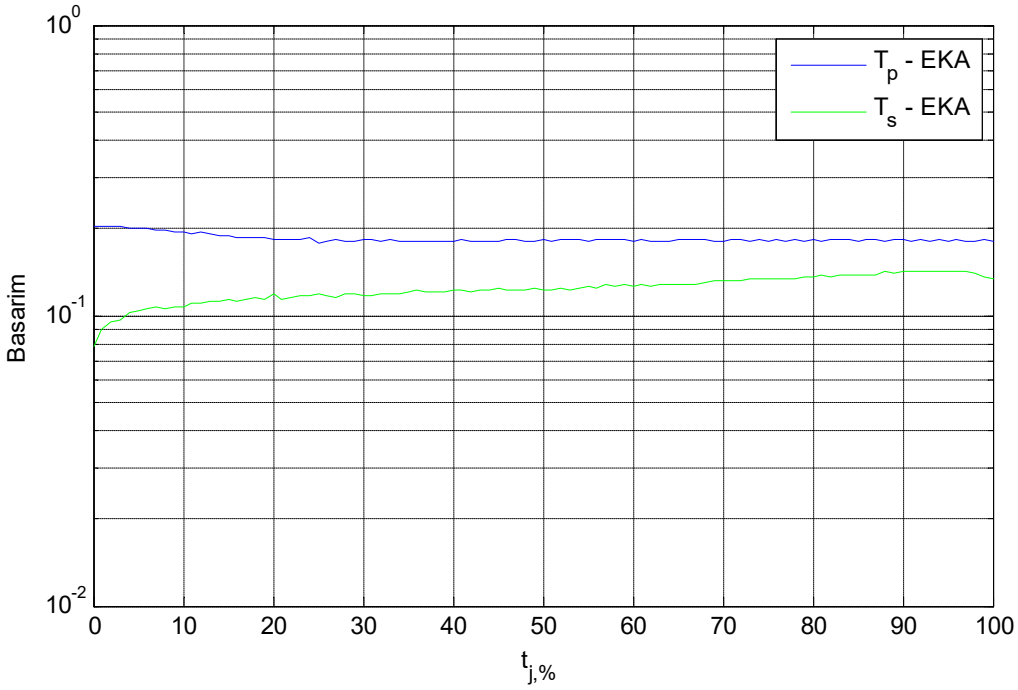
Şekil 4.14. t_{j1} oranına göre birincil ve ikincil kullanıcı başarım değerleri, SNR=1dB

Şekil 4.14'te SU'nın t_i başlangıç süresini değiştirmek suretiyle birincil veri paketi üzerinde yüzde olarak oluşan girişim süresi t_{j1} değerine ($t_{j1} = \%.t_f/100$) karşılık birincil ve ikincil başarım değerleri simüle edilmiştir. PU'ya ve SU'ya ait SNR oranı olarak 1dB'nin esas alındığı simülasyona göre;

- İkincil kullanıcı başarım oranının en düşük t_{j1}=*% 0-5* (t_{j2}=*% 100-95*) oranında yakalandığı ve oran yükseldikçe, yani birincil veri paketi üzerine oluşan girişim süresi arttıkça ikincil başarım oranın yükseldiği gözlemlenmiştir. Birincil veri paketi üzerine oluşan girişim süresi arttıkça ikincil veri paketi üzerine oluşan girişim süresi

azalmaktadır. Ancak bu SNR oranında birincil başarım değeri eşik değerin üzerinde tutulmaya çalışıldığından birincil başarım oranı korunmaktadır. İkincil kullanıcıya, birincil başarımda *%n* oranında eşik avantajı sağlandığından, SU *%0-5* aralığında bu avantajı kullanarak kendi başarım değerini artırmaya çalışmaktadır.

- Birincil başarım oranı en yüksek değerini t_{j1}=*%0* 'da (yani PU üzerine hiç bir girişimin oluşmadığı durum) yakalarken t_{j1}=*% 10* oranına kadar azalmakta ancak daha sonraki artan t_{j1} oranlarında EKA'nın marifetiyle başarım değeri 0,05 değeri ve üzerinde tutulmaktadır.



Şekil 4.15. t_{j1} oranına göre birincil ve ikincil kullanıcı başarı oranları, SNR=3dB

Şekil 4.15'te bir önceki simülasyondan farklı olarak birincil ve ikincil SNR değeri 3 dB alınmıştır. Bu kanal gürültü seviyesinde birincil veri paketleri üzerinde girişim süresi artsa da belirli bir seviyeden sonra EKA tarafından korunduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte t_{j1} oranı yükseldikçe, ikincil veri paketi üzerindeki girişim süresi t_{j2} azaldığından ikincil başarım değerinin de genel olarak arttığı gözlemlenmektedir.

Bu bölümde alt paylaşımlı bilişsel SW HARQ modeli önerilerek, PU'nın bekleme sürelerinde oluşan kanal kapasite farklılıkları dikkate alınmış, PU ile aynı veri paketi yapısı ve SW HARQ parametrelerine sahip SU'nın farklı iletim başlangıç sürelerinde yayın yapması halinde ne kadarlık başarım kazancı elde edilebildiği gözlemlenmiştir.

Kullanılan EKA çerçevesinde birincil başarım değerinin önceden belirlenen bir seviyenin altına düşmesi engellenmiş olup, kullanılan uzaklık ve konum parametreleri çerçevesinde PU üzerinde maksimum girişim, SU üzerinde minimum girişim oluşturacak şekilde ikincil iletim başlangıç sürelerinin belirlenmesinin SU'ya çok önemli miktarda başarım kazancı sağlayacağı simülasyon sonuçları ile ortaya konmuştur.

4.3. Yer Paylaşımlı Model

ARQ sistemlerde yer paylaşımlı BR model uygulamaları, alt paylaşım modeli uygulamalarına göre daha az sayıda yer tutar. Alt paylaşım senaryoları, PU'ların kanalı aktif olarak kullandığı durumlar için oluşturulduğundan gerçek uygulamalar ile daha fazla benzerlik gösterir. Bununla birlikte yer paylaşımlı BR modelleri, iki durumda uygulanabilir.

a) PU'nın kanalda bulunmadığı veya kanalı kullanmadığı durumda.
b) PU kanalı kullansa bile, bu kullanımdan SU'lara kaynak oluşturabilecek boşlukların bulunması durumunda.

Literatürde belirtilen durumlardan ikincisine ilişkin bir çalışma bulunmamaktadır. Ancak ARQ sistemlere ilişkin yer paylaşım modeli çalışmalarının birinci durumdaki senaryolar kapsamında olduğu görülmektedir. Bu tezde gerçekleştirilen çalışmada ise ikinci duruma yönelik yer paylaşım modeli oluşturulmuştur.

4.3.1. Yer paylaşımlı bilişsel SW HARQ modeli

Literatürde konuya ilişkin önerilen çalışmada [39], PU'ların kanalı kullanmadığı periyotlarda bilişsel SU'nın tam doğrulukta spektrum sezme işlemi yaptığı kabulüyle PU'nın boş gönderim periyotları yer paylaşım yöntemi esas alınarak SW HARQ protokolü ile kullanılmaya çalışılmıştır ve çeşitli birincil kanal kullanım oranlarına göre ikincil başarım performansları analiz edilmiştir. Bir diğer benzer çalışmada [40] da yer paylaşım yöntemi esas alınarak SW HARQ protokolü ile kullanılmaya çalışılmıştır, ancak spektrum sezme işleminin kısmi gerçekleştirildiği kabulü yapılmıştır. Her iki çalışma HARQ sistemler üzerinde gerçekleştirilen yer paylaşımı modelini taşıyan önemli iki çalışmadır. Ancak ARQ ve HARQ sistemlerde yer paylaşımlı BR model kullanımında genel yöntem;

PU'nın boylu boyunca kullanmadığı çevrim sürelerinin SU'lar tarafından kullanılmasıdır [65].

Bununla birlikte bu tez çalışmasında [66], PU bizzat kanalda ve aktif olarak çalışırken SU'ya haberleşme kaynağı sağlanmaktadır. Gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları ile; SW HARQ sistemini kullanan ve kanalda sürekli olarak çalışan PU'nın bekleme süreleri ikincil kaynak edinimi için değerlendirilmek suretiyle SU için önemli miktarda haberleşme kaynağı elde edildiği tespit edilmiştir. Ayrıca PU üzerinde herhangi bir girişim oluşmadığı, PU'nın herhangi bir performans kaybı yaşamadığı görülmüştür.

Şekil 4.11'de yer verildiği üzere; verici, veri paketini t_f sürede kanala verirken, müteakip t_w süre alıcıdan gelecek cevabı bekler. Bu süre zarfında herhangi bir iletim yapmaz. Bir TS, t_f ve sinyalin alıcı-verici arasında iki kez iletim süresini oluşturan $2t_p$ ($t_w=2t_p$)'den ibarettir.

$$TS = t_f + 2t_p \tag{4.10}$$

SW ARQ ve SW HARQ sistemlerinde gecikme oranı olarak,

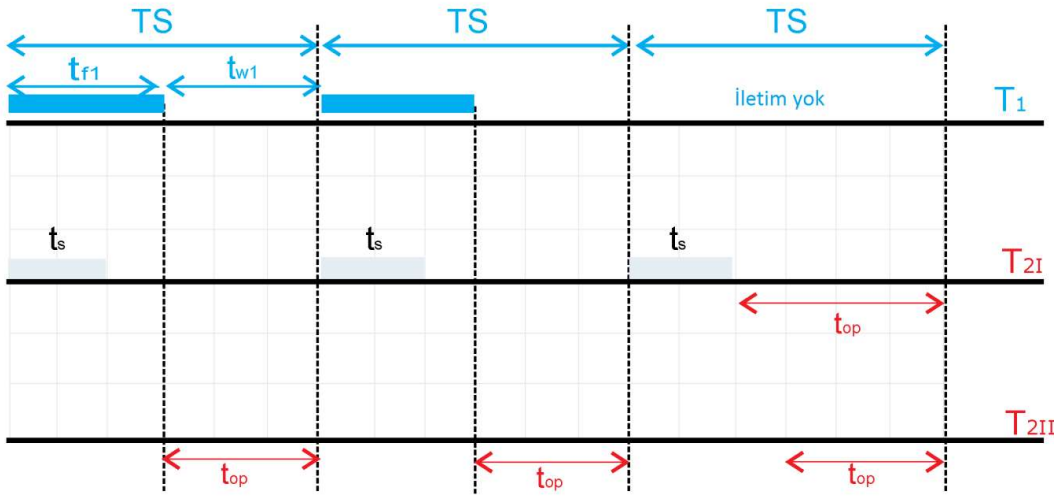
$$a = \frac{t_f}{t_w} \tag{4.11}$$

tanımlanır. Genellikle ARQ sistemlerde $a<1$ şartı uzun gecikmeli sistemleri, $a>1$ şartı ise kısa gecikmeli sistemleri ifade eder.

Önerilen modelde PU'nın sürekli olarak SW HARQ protokolünde çalıştığı ve SU'nın varlığından haberdar olmadığı kabul edilmiştir. SU, SW HARQ protokolünde çalışmaktadır ve PU'nın haberleşme şartlarını dikkate alarak kendi uygun iletim parametrelerini belirlemektedir. Notasyonda alt indis olarak ifade edilen 1 ve 2, ilgili notasyonun sırasıyla PU ve SU'ya ait olduğunu belirtmektedir.

Şekil 4.16 ve Çizelge 4.3, literatürde tanımlanan [39,40] ve bu çalışmada önerilen yer paylaşımlı SW HARQ modellerinin çalışma prensibini ortaya koymaktadır. Şekil 4.16'daki ilk satır SW HARQ vericisi, T_1'in iletim davranışını göstermektedir. Buna göre, T_1 ilk ve

ikinci TS'lerde iletim yaparken üçüncü TS'de pasif kalmış, iletim yapmamıştır. İkinci satır klasik ikincil SW HARQ vericisi, T_{2I}'i temsil etmektedir.



Şekil 4.16. Birincil ve ikincil SW HARQ vericilerinin davranışı

Her bir TS'de, T_{2I} öncelikle t_s süre ile birincil kanalı sezmeye çalışır. Bu işlem sonrası kanalın boş oluğunu tespit ederse bir sonraki TS başlangıcına kadar kanala erişerek kanalı kullanır. Aksi takdirse bir sonraki spektrum sezme kararını bekler. Şekil 4.16'daki duruma göre; T_{2I} birinci ve ikinci TS'lerde kanalı kullanamayacak, sadece üçüncü TS'de kullanabilecektir. Dolayısıyla ikincil verici, T_1'in pasif kaldığı hiçbir şekilde kanalı kullanmadığı TS'lerde iletim yapabilecektir ve T_1'in iletim yaptığı TS'lerde kanalı kullanması söz konusu değildir. Şekildeki üçüncü satır bu tezde önerilen [66] SW HARQ vericisini, T_{2II}'yi temsil etmektedir. T_{2II}; her TS'de T_1'in bekleme süreleri olan t_{wI}'i kullanmak suretiyle kanala erişmektedir. İlgili TS'de PU'nın iletim halinde olup olmamasına bakmaksızın kanalı kullanmaktadır. Aktif bir SW HARQ sisteminde TS'nin tamamı süresinde kanal PU'ya tahsis edilmiş olsa bile, aslında T_1 bu TS'nin tamamı süresince iletim yapmamaktadır. TS'nin t_{fI} kısmında iletim yapılırken, TS'nin geriye kalan zamanında (t_{wI}) herhangi bir işlem yapılmadan beklemektedir. Bu çalışma ile kanal PU'nın aktif kullanımında iken T_1 tarafından iletim yapılmayan ve pasif kalınan t_{wI} süreleri, T_{2II} tarafından bir haberleşme fırsatı olarak değerlendirilmeye çalışılmıştır.

Çizelge 4.3. Bilişsel SW HARQ modellerinin kıyaslaması

Literatürde yer verilen SW HARQ modeli [39,40]	Önerilen Bilişsel SW HARQ modeli [66]
SU kanalı sadece tamamen boş olan TS'lerde kullanabilir. T_1'in kullanımında olan TS'ler süresince ikincil olarak kullanılamaz. Bu durum ikincil başarım performansını olumsuz etkilemektedir.	T_1'in kanalı kulanıp kullanmasına bakmaksızın tüm TS'lerde t_{w1} süre kanalı kullanilir. Bu durum SU'ya önemli haberleşme kaynağı oluşturmaktadır ve başarım performansını artırmaktadır.
SU, senkronizasyona ilişkin olarak birincil TS sürelerini bildiği kabul edilmektedir. (SW HARQ protokolünde her bir çevrimdeki TS süreleri eşittir, her bir TS'deki t_{fl} süreleri tanımlıdır ve seyrek olarak değişir.)	Aynı kabul söz konusudur.
İlgili TS'de SU, PU'nın yayın yapıp yapmadığını tespit etmek amacıyla t_s süre ile sezme işlemi yapmaktadır. Ayrıca muhtemel yanlış spectrum sezme işlemi sebebiyle PU üzerine girişim oluşturma ihtimali bulunmaktadır.	SU spektrum sezme işlemine ihtiyaç duymamaktadır. Çünkü PU kanalı kullansın veya kullanmasın, her TS'deki fırsat süreleri SU tarafından değerlendirilir.
Düğümler arasındaki uzaklıklar değerlendirmeye alınmamıştır.	İkincil verici-alıcı mesafesinin birincil verici-alıcı mesafesinden daha kısa veya eşit olduğu kabul edilmiştir.

4.3.2. Uzun gecikmeli SW HARQ sistem için BR kullanımı

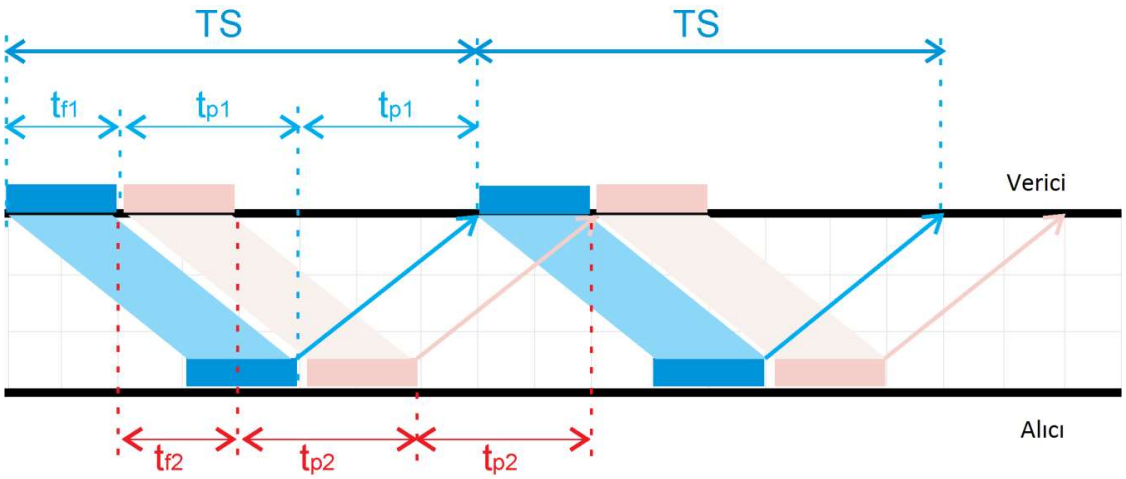
Birincil uzun gecikmeli bir SW HARQ sisteminin bir ikincil SW HARQ kullanıcısı tarafından kullanımı Şekil 4.17'de gösterilmektedir. Mavi renkli şeritler birincil veri paketlerini, kırmızı renkli şeritler ikincil veri paketlerini temsil etmektedir. Eş. 4.11'den görüleceği üzere, uzun gecikmeli bir SW HARQ sisteminde t_w değeri t_f değerinden daha büyüktür. T_1, t_{fl} süresince veri paketini kanala iletirken T_2 sessizdir. T_1 iletimi kesip bekleme moduna geçince, T_2 kendi ikincil veri paketini iletimine başlar. Birincil geribesleme sinyali farklı bir banttan iletildiğinden, ileri yönlü link üzerinde ikincil veri iletimine herhangi bir girişim oluşmaz. Aynı şekilde ikincil geribesleme sinyali farklı banttan iletildiğinden birincil veri iletimi süresince PU üzerinde girişim oluşmaz. Böylece PU sanki kanal sadece kendisine tahsisli gibi kanalı SW HARQ protokolü ile kullanmaya devam eder. Ayrıca SU da, birincil kanalda TS sürelerdeki kullanılmayan bekleme aralıklarını değerlendirir. SU'nın tüm TS'leri kullanabilmesi için,

$$TS > t_{f2} + t_{w2} \tag{4.12}$$

şartı korunmalıdır. SU'nın PU ile aynı iletim hızı, veri çerçeve yapısına sahip olduğunu kabul edersek (t_{f1}=t_{f2} anlamına gelmektedir.) propagasyon süreleri arasındaki ilişki;

$$t_{p2} \leq t_{p1} \tag{4.13}$$

şeklinde tanımlanmalıdır. Bu durumda T_2 ile R_2 arasındaki uzaklık, d_2'nin; T_1 ile R_1 arasındaki uzaklık, d_1'den daha kısa veya eşit olduğu anlamına gelir. Bu çalışmada d_1 ve d_2 değerleri eşit kabul edilmiştir.



Şekil 4.17. Uzun gecikmeli SW HARQ sisteminin ikincil kullanımı

4.3.3. Kısa gecikmeli SW HARQ sistem için BR kullanımı

Birincil kısa gecikmeli bir SW HARQ sisteminin bir ikincil SW HARQ kullanıcısı tarafından kullanımı Şekil 4.18'de gösterilmektedir. Şekilden görüleceği üzere, T_1 her bir TS'nin büyük kısmında iletim yaparken, t_{f1}'den daha kısa sürede beklemektedir ve sinyallerin kanalda iletimi gerçekleşmektedir.

$$t_{w1} < t_{f1} \tag{4.14}$$

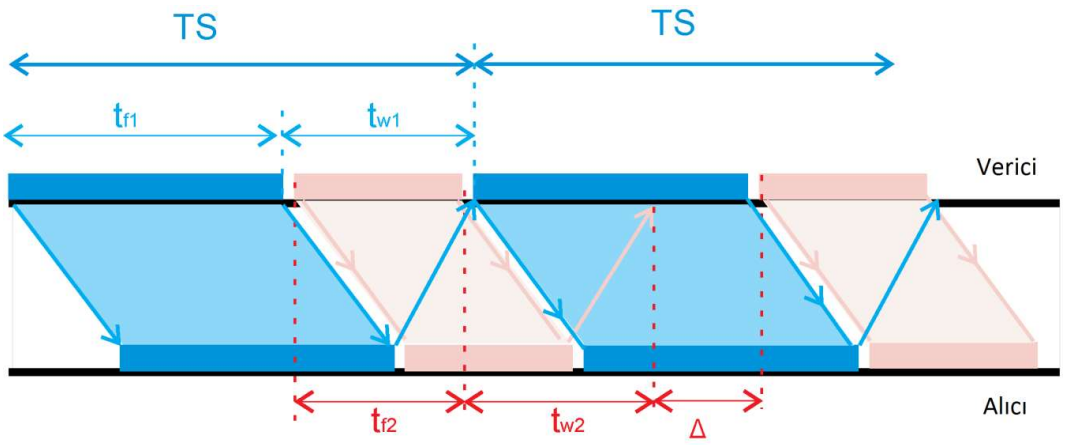
İkincil kullanım açısından T_2 sadece t_{w1} sürede iletim yapabilecektir. Ancak T_2, kendi veri paketinin tamamını t_{w1} sürede iletemeyecektir. Dolayısıyla t_{w1} süresine uygun olarak kendi veri paketi uzunluğunu kısaltmalıdır [67-69]. Sonuç olarak t_{f2} parametresi,

$$t_{f2} \le t_{w1} < t_{f1} \tag{4.15}$$

şartını sağlayacak biçimde kısaltılır. t_{f1} ve TS değerleri SU tarafından bilindiğinden, t_{w1} değeri elde edilebilir. R_s, T_2'nin verici hızı, L_2 SU'nın veri paketi uzunluğunu ifade etmek üzere, t_{f2} şu şekilde ifade edilebilir:

$$t_{f2} = \frac{L_2}{R_s} \tag{4.16}$$

SU, kendi veri paketindeki bit sayısını (L_2) artırmak veya azaltmak suretiyle t_{f2} değerini atayabilir. Tabi ki bu yol ile, PU'ya göre daha az bilgi biti iletmiş olacaktır, çünkü $t_{f1}>t_{f2}$ dir.



Şekil 4.18. Kısa gecikmeli SW HARQ sisteminin ikincil kullanımı

İlave olarak; ikincil geribesleme sinyalinin T_2'ye ulaşmasından sonra T_2, Δ süre boyunca T_1'in iletimini bitirmesini beklemek zorundadır. SU için bekleme ile geçen bu süre sebebiyle ikincil başarım performansı olumsuz etkilenir. Çünkü birim zamanda iletilen bit sayısı azalır.

4.3.4. Yer paylaşımlı SW HARQ sistem için performans analizi

Yer paylaşımına ilişkin performans analizleri başarım ve gecikme karakteristikleri ile tanımlanabilir. Bu bölümde ikincil SW HARQ sisteminin performansı paket başarımı ve paket gecikmesi değerlerinin ölçümü ile analiz edilmiştir. İlaveten, SU'nın uçtan uca performansının tayini için bit başarım simülasyonu gerçekleştirilmiştir [70]. Bu başarım ayrıca PU başarımı ile de kıyaslanmıştır. Ayrıca bu tez çalışmasında yapılan tüm

simülasyonlar literatürde yapılan benzer çalışmalarla kıyas yapılmasına olanak verecek şekilde gerçekleştirilmiştir.

Bir veri paketinin alıcıda *n.* iletim ile alınabildiği kabul edilirse, alıcının *n.* iletim ile doğru veri paketini elde etmesine ilişkin olasılık şu şekilde ifade edilir:

$$P(n) = \sum_{m=1}^{n} P_F^{m-1}(1 - P_F) \tag{4.17}$$

Alıcının veri paketini hatalı alma olasılığını ifade eden P_F, kanalın gürültüsü ve hata düzletme kodunun performansı ile ilgilidir. Alıcıda tüm veri paketlerinin alınmasına ilişkin karakteristik başarım;

$$T_P = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \times P(n) \tag{4.18}$$

şeklinde ifade edilir. t_f başına paket olmak üzere normalize paket başarımı [39];

$$T_P^{'} = \frac{t_f}{TS} \times T_P \tag{4.19}$$

olarak tanımlanır. Bir ARQ sisteminin uçtan uca bit başarım değeri;

$$T_b = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \times P(n) R_T \tag{4.20}$$

şeklinde tanımlanır. R, CRC kodlamadan dolayı oluşan kod oranı, konvolusyon kodlayıcının kod oranı ve bir TS için paket bekleme sürelerinden dolayı oluşan ortalama başarım kaybını belirtmekte olup, Eş. 4.5'te ifade edilmiştir.

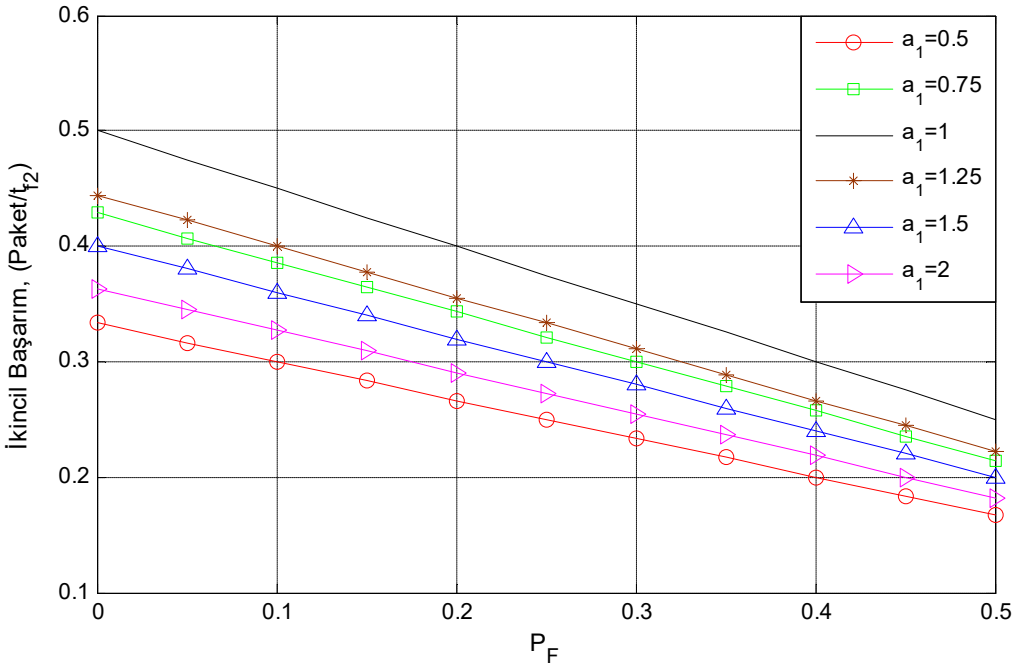
Ayrıca ARQ sistemlerde gecikme [26,27,66];

$$D = TS \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{P(n)} \tag{4.21}$$

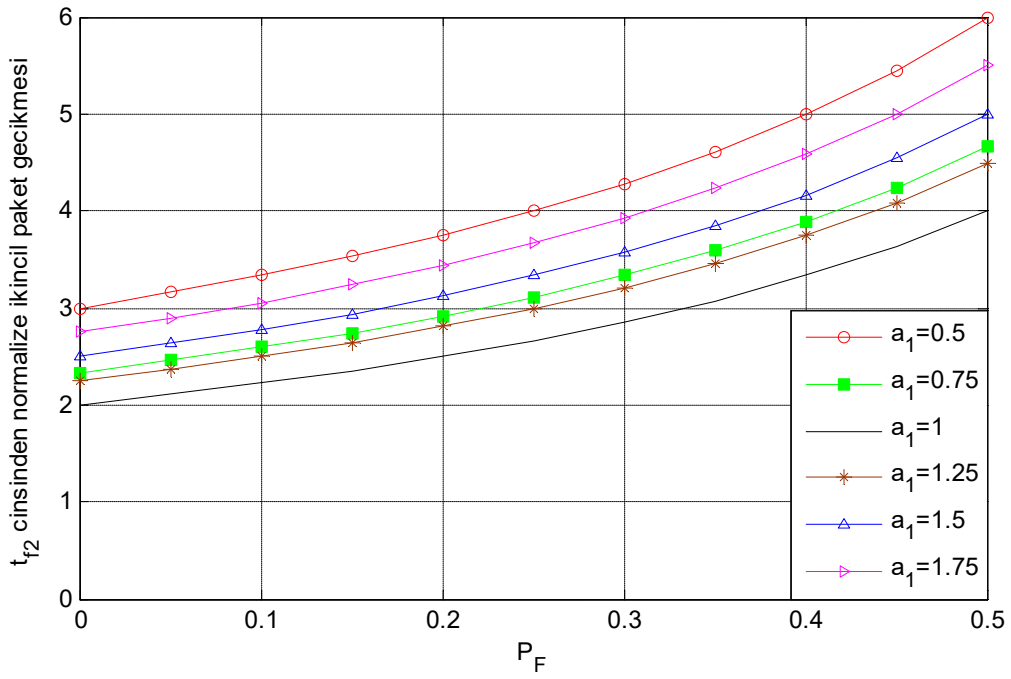
şeklinde tanımlanır.

Gerçekleştirilen simülasyonlarda aksi belirtilmedikçe; 256 bit mesaj biti, 32 bit CRC parite biti, ½ konvolüsyon kod oranı, BPSK modulasyonu ve kod çözücü olarak Viterbi kod çözücü kullanılmıştır. Söz konusu simülasyonlarda AWGN kanalda SNR_1 ve SNR_2 değerleri 4dB olarak kabul edilmiştir.

Şekil 4.19'da, PU'nın değişik *a* parametreleri dikkate alınarak, paket hata olasılığına karşın, ikincil SW HARQ kullanıcısının normalize paket başarımı simüle edilmiştir. P_F'nin artması ile kanalın güvenilirliği azaldığından, aynı paketin tekraren daha fazla sayıda iletilmesi gerekmiş, böylece paket başarımı azalmıştır. Maksimum başarım performansı $a_1=1$'de elde edilmiştir.



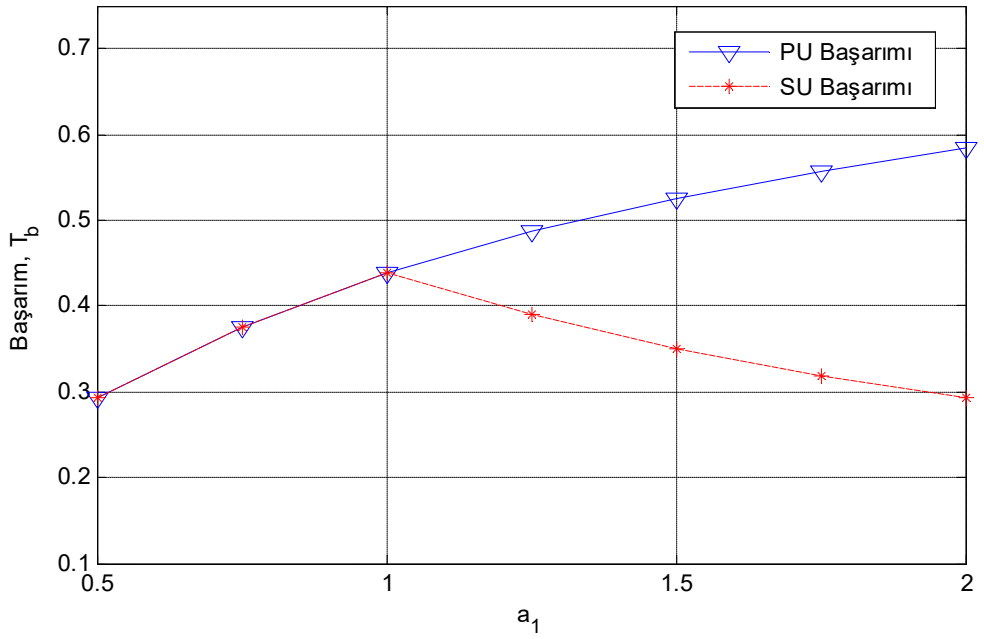
Şekil 4.19. İkincil SW HARQ kullanıcının başarım performansı



Şekil 4.20. İkincil SW HARQ kullanıcının ortalama gecikme performansı

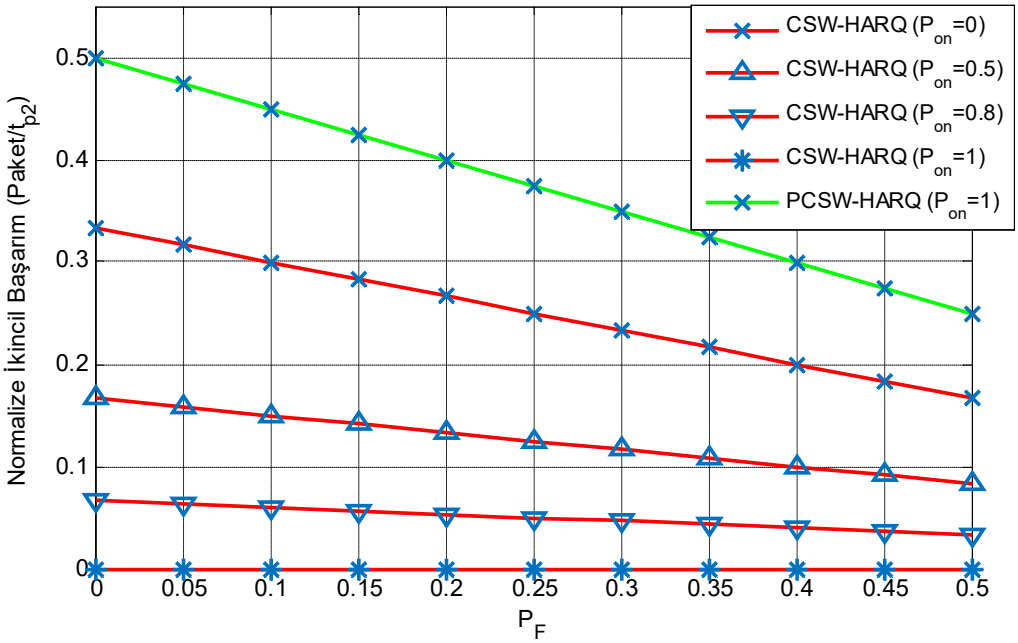
Şekil 4.20, PU'nın farklı *a* parametreleri için, ikincil bilişsel SW HARQ kullanıcısının ortalama paket gecikmesini göstermektedir. P_F'nin artması ve kanal güvenilirliğinin düşmesi ile veri paketinin doğru biçimde alınması gecikmektedir. Minimum ortalama gecikme $a_1=1$'de elde edilmiştir. Uzun gecikmeli bir birincil SW HARQ sisteminde çalışan ikincil sistem de uzun gecikmeli karakter gösterecektir. SU'nın birincil çerçeve süre parametrelerini (TS,t_{f1},t_{w1}) dikkate almak zorunda olmasından dolayı, birincil gecikme değerlerinin artması ile ikincil gecikme değerleri de yükselecektir. Aynı P_F değerleri için, birincil gecikme arttıkça ikincil gecikme de artacaktır ve ikincil başarım da düşecektir.

Farklı a_1 değerleri için, PU ve SU'ya ait uçtan uca başarım performanslarına kıyaslamalı olarak Şekil 4.21'de yer verilmektedir.



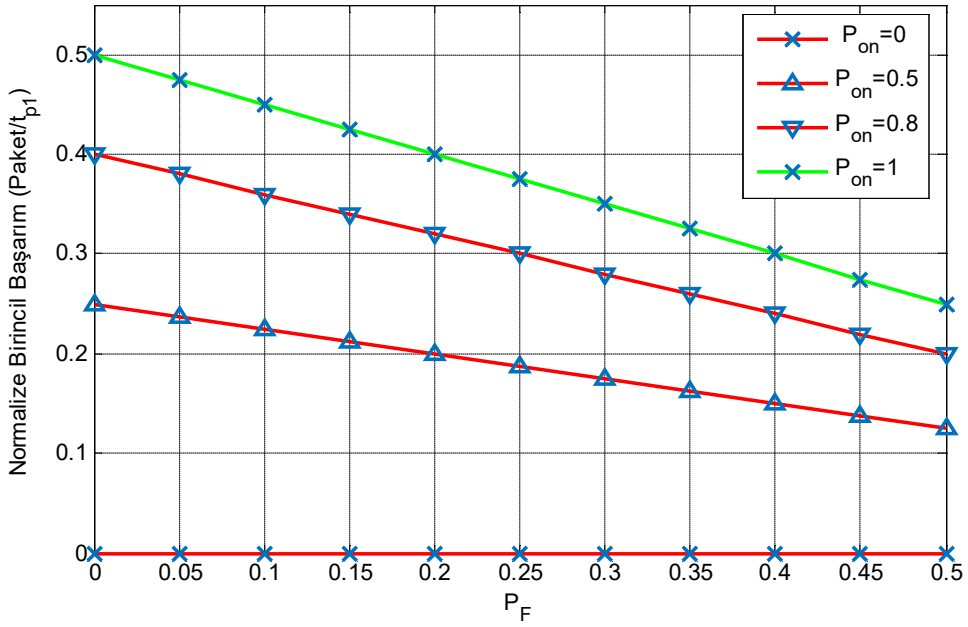
Şekil 4.21. Birincil ve ikincil kullanıcıların uçtan uca bit başarım performansları

Birincil SW HARQ kullanıcısı, SU'nın varlığından ve ikincil iletimden bağımsız olarak tamamen kendi a parametre değerine göre başarım performansı sergiler. Eğer PU, uzun gecikmeli bir esasla çalışıyorsa, SU'nın başarım performansı PU performansı ile aynı olur. Kısa gecikmeli bir SW HARQ sisteminde a_1 değerinin artması ile birim zamanda iletilen birincil bit sayısı arttığından PU'nın başarım performansı artar. Bununla birlikte, kısa gecikmeli bir birincil SW HARQ sisteminde çalışan ikincil SW HARQ kullanıcısının başarım performansı a_1 değerinin artması ile azalacaktır. Çünkü birim zamanda iletilen ikincil bit sayısı düşer.



Şekil 4.22. Birincil ve ikincil kullanıcıların uçtan uca bit başarım performansları

Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te klasik ve önerilen SW HARQ sistemlerinde birincil ve ikincil başarım performansları analiz edilmektedir. P_{on}, PU'nın her bir TS'de kanalı kullanma ihtimalini ifade etmektedir. Mevcut klasik SW HARQ (CSW-HARQ) metodunda, SU sadece PU'nın kanalı kullanmadığı TS'lerde kanalda iletim yapabilir. Bu sebeple, P_{on} değerinin azalması ile SU'nın birim zamanda ileteceği ortalama bit sayısı artar.



Şekil 4.23. Faklı P_{on} değerleri için birincil başarım performansları (a_1=1)

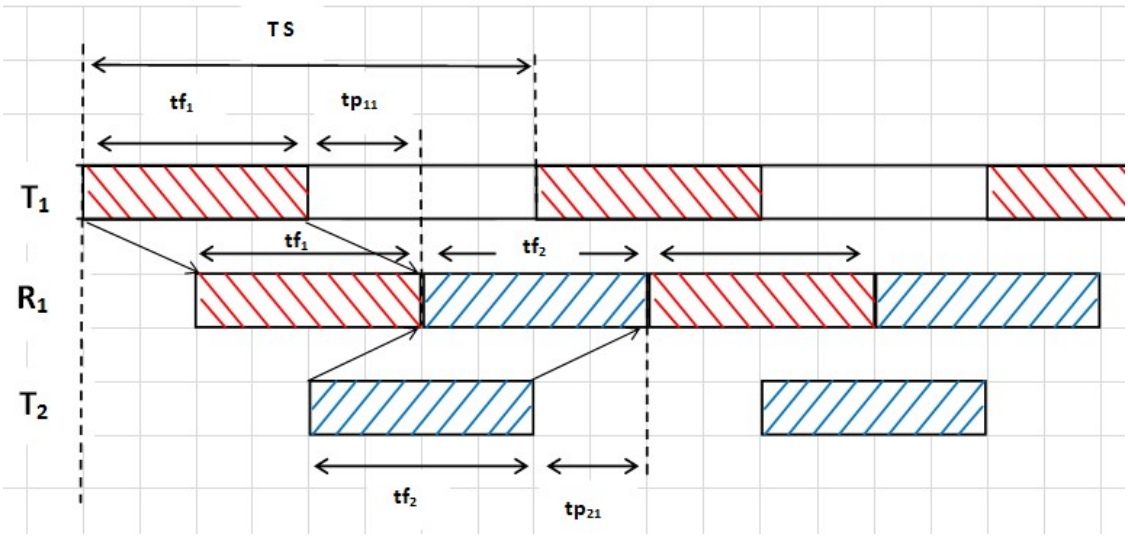
Şekil 4.22'de görüleceği üzere CSW-HARQ metodunda SU başarımı $P_{on}=0$'da maksimum değerine ulaşmaktadır. Ancak Şekil 4.23'te, P_{on} değerinin azalması PU'nın başarım performansının da azalması anlamını taşır (Birincil başarım, SU için kullanılan CSW-HARQ veya Önerilen CSW-HARQ (PCSW-HARQ) metotlarından bağımsızdır. Birincil başarım sadece P_{on} ile ilgilidir ve P_{on} değerini de PU kendisi belirler). CSW-HARQ yönteminde, PU'nın her TS'yi kullanması durumunda ($P_{on}=1$), SU herhangi bir iletim yapamaz ve ikincil başarım sıfırdır. Ancak PCSW-HARQ yönteminde SU her TS'de iletim yapabileceğinden tüm P_{on} durumlarında, SU üstün başarım performansı sergiler. İlaveten, CSW-HARQ yönteminde her TS'de, t_s süre gerçekleştirilen spektrum sezme işleminden dolayı SU başarım performansı olumsuz etkilenir ([26]'da ve bu çalışmada CSW-HARQ metodu için $t_s=TS/3$ alınmıştır). PCSW-HARQ metodunda spektrum sezme işlemi için zaman harcanmamasından dolayı, PCSW-HARQ yönteminin CSW-HARQ yöntemine üstünlüğü bariz şekilde ortaya çıkmaktadır.

4.3.5. Yer paylaşımlı SW HARQ sistemde düğüm uzaklıklarının etkileri

Bu bölümde düğümler arasındaki uzaklık değerlerinin değişiminin birincil ve ikincil başarım performanslarını nasıl etkilediği irdelenmiştir. Bu anlamda Şekil 4.1'de verilen model yapısı özellikle kullanılmıştır. Farklı açılardan uzaklık değerlerinin nasıl etkili olduğu analiz edilmeye çalışılmıştır [71].

Birincil alıcı bakımından bilişsel kullanım:

İkincil kullanıma uygunluk açısından öncelikle birincil alıcı R_1'nin hangi zaman dilimlerinde girişime maruz kalmaması gerektiği ve hangi zaman dilimlerinde maruz kalabileceği hususu değerlendirilmelidir. Birincil verici T_1'den gönderilen veri paketin son bitinin alıcıya ulaşmasından, bir sonraki veri paketinin ilk bitinin ulaşmasına kadar geçen sürede birincil alıcı R_1 için anlamsız karşılanabilir. İkincil verici T_2'den ikincil alıcı R_2'ye iletilen paket bu süre içerisinde R_1'e ulaşması durumunda birincil kullanıcı çifti üzerinde girişim oluşturmaz. Ancak bu zaman dışındaki ikincil iletimler R_1 üzerinde girişim oluşturur. Şekil 4.24'te birincil SW HARQ iletimi için T_1 ve R_1'de ki veri çerçeve yapısı görülmektedir. Kırımızı çizgili paketler birincil veri paketlerini, mavi şeritli veri paketleri ikincil veri paketlerini göstermek üzere, şekilde birincil iletim süresince T_2'nin belirli zaman aralıklarında iletim halinde bulunması durumunda R_1 üzerinde oluşturduğu zararsız girişime de yer verilmektedir.



Şekil 4.24. Birincil ve ikincil iletim süresince birincil alıcının durumu

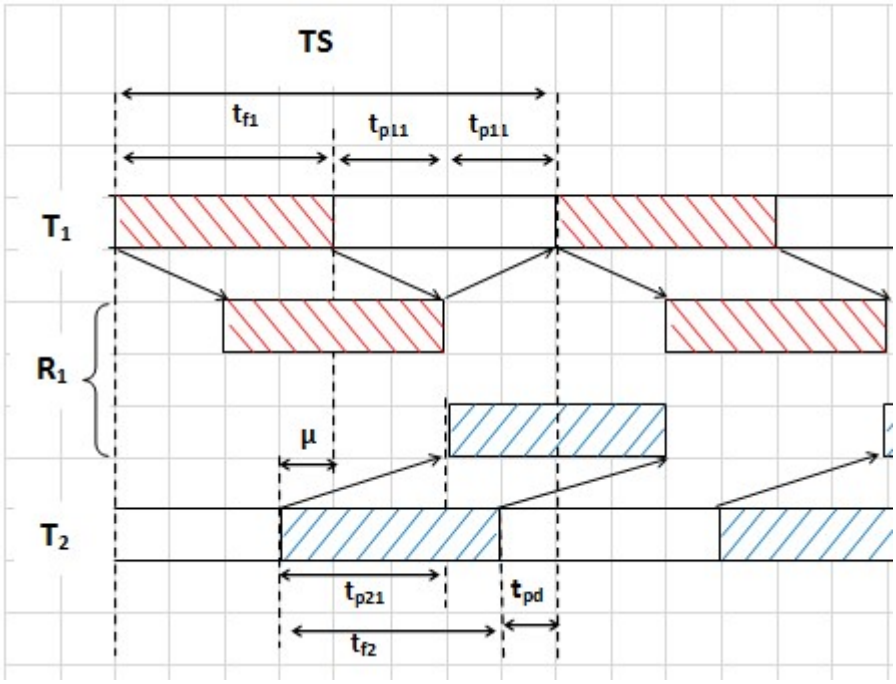
Alıcıda bir TS, vericiden iletilen veri paketinin kanaldan alınması için geçen süre t_f ve sinyalin verici-alıcı arasında iki defalık iletim süresinden ibarettir (Bkz. Eş. 4.10).

Alıcıda t_{fl} süresi boyunca ikincil sinyal girişimi beklenmemesi gerektiğinden bir TS'den kalan sürede birincil alıcıda ikincil sinyal girişimi makul görülebilebilir. Bu durumda;

$$t_{f2} \leq 2t_{p11} \tag{4.21}$$

şartı öncelikle sağlanmalıdır. t_{p11} ve t_{p21} iletim sürelerinin aynı olması halinde (bu durumda $d_{11}=d_{21}$ olur). T_1'nin veri paketinin son bitini göndermesinin hemen akabinde T_2'nin ikincil veri paketini R_2'ye iletmeye başlaması söz konusu olabilir. Şekil 4.25'te yer verildiği üzere; $d_{11}<d_{21}$ olması durumunda T_1'nin iletimi tamamlamasından μ saniye önce T_2'nin iletime başlaması kendi başarım performansını artırması açısından yararlı olacaktır.

$$\mu = \left| t_{p21} - t_{p11} \right| \tag{4.22}$$



Şekil 4.25. d_{11}, d_{21} ilişkisine bağlı olarak birincil alıcıdaki paket çerçeve düzeni

Ayrıca t_{pd}, T_1 ve T_2 arasındaki sinyal iletim süresini ifade etmek üzere; T_2, T_1'nin paket iletimine başlamasından t_{pd} saniye önce iletimini bitirmelidir. Bu durumda d mesafesinin kısalması ikincil iletim için avantaj sağlar. Yani;

$$t_{f2} \leq t_w - t_{pd} + \mu \tag{4.23}$$

koşulu ile ikincil iletim gerçekleştirilebilir. Ayrıca Eş. 4.21 şartı sağlandıktan sonra ikincil veri paketine ilişkin R_2'den iletilecek geribesleme sinyalinin T_2'ye ulaşması için

$$t_{p22} \leq \frac{TS - t_{f2}}{2} \tag{4.23}$$

koşulu sağlanmalıdır. m, T_2'nin, geribesleme sinyali kendisine ulaştıktan sonra, bir sonraki veri paketini göndermeye başlamasına kadar beklemesi gerektiği süreyi tanımlamak üzere,

$$t_{f2} + 2t_{p22} + m = t_{f1} + 2t_{p11} \tag{4.24}$$

eşitliği gereğince t_{p22} değerinin yüksek olması halinde söz konusu eşitliğin korunması için ikincil çerçeve uzunluğu düşürülerek t_{f2} değeri azaltılabilir (bu durumda $m=0$'dır). Bununla birlikte $t_{p22}<t_{p11}$ olması durumunda, Eş 4.21 ve Eş. 4.24 dikkate alınarak T_2'nin m süre boşta beklemesi gerekecektir (bu durumda $m\neq0$'dır).

Birincil çerçeve yapısı bakımından bilişsel kullanım

Belirli ARQ sisteminde ρ şeklinde bir gecikme katsayısı tanımlanırsa;

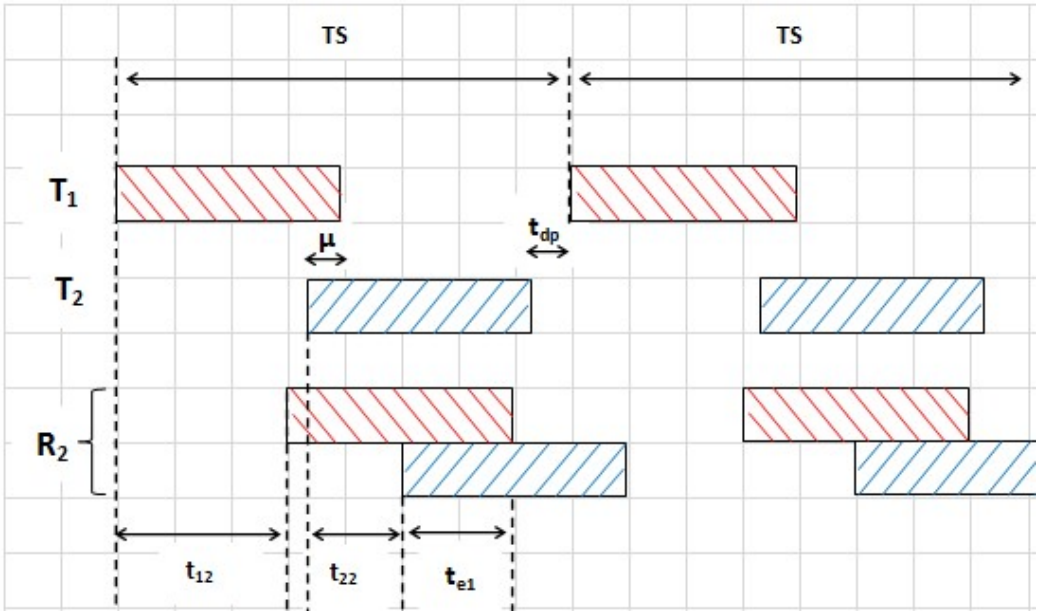
$$\rho = \frac{t_{w1}}{t_{f1}} = \frac{2t_{p11}}{t_{f1}} \tag{4.25}$$

i) $\rho \geq 1$ ise, SU'nın PU ile aynı çerçeve yapısına sahip olması halinde $t_{f1}=t_{f2}$ olacağından $d_{22}\leq d_{11}$ şartı gerekir. Bu eşitsizlikte d_{22} azaldıkça m süresi de artacaktır. Bununla birlikte $d_{22}>d_{11}$ olması durumunda SU veri paketi uzunluğunu azaltarak t_{f2} süresini düşürebilir, böylece Eş. 4.24 çerçevesinde t_{p22} süresinin artmasına olanak tanıyarak iletim yapabilir.

ii) $\rho < 1$ ise, SU'nın PU ile aynı paket çerçeve uzunluğuna sahip olması durumunda Eş. 4.21 sağlanmadığından iletim yapılamaz. Ancak SU'nın Eş. 4.21'i sağlayacak şekilde veri paketi uzunluğunu azaltması halinde ikincil iletim imkanı olabilir. Bu durumda da fazla bekleme sürelerinden ve nispeten düşük paket bit sayısından dolayı ileride görüleceği üzere ikincil başarım değeri önemli derecede düşer.

İkincil alıcı bakımından bilişsel kullanım:

Birincil alıcı üzerinde zararlı girişim oluşmaması hususu bir gereklilik iken ikincil alıcı için böyle bir gereklilik bulunmaz. Ancak SU için etkin haberleşme kaynağının sağlanabilmesi amacıyla R_2 üzerindeki girişim durumu da değerlendirilmelidir. Bu bölümde R_2 üzerinde birincil iletimden kaynaklı girişimin belirlenebilmesi için $d_{11},d_{21},d_{12},d_{22}$ uzaklık değerleri üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır. Şekil 4.12'de $\rho = 1$ kabul edilerek $d_{11}>d_{21}$ ve $d_{12}>d_{22}$ durumlarında ikincil alıcının verimli çalışabileceği paket çerçeve düzenine yer verilmiştir.



Şekil 4.26. $d_{11}>d_{21}$ ve $d_{12}>d_{22}$ durumlarında ikincil alıcıda paket çerçeve düzeni

$t_{p11}>t_{p21}$ olduğundan dolayı Eş. 4.22'den hareketle T_2'nin, birincil paket gönderiminin bitmesinin ardından $|\mu|$ saniye sonra paket gönderimine başlamalıdır. Her iki vericinin kendi alıcılarına ilettikleri veri paketleri uzaklık kıyaslarına göre R_2'de zaman ekseninde gösterilmiştir. Aslında T_1'den R_1'e iletilen birincil veri paketi, t_e süre ikincil veri paketi üzerinde girişim oluşturmakta olup, t_e süresi şu şekilde tanımlanır:

$$t_e = \left| t_{p12} - t_{p22} - \mu \right| \tag{4.26}$$

Farklı uzaklık kıyaslamalarına göre ikincil alıcıdaki ikincil veri paketi üzerinde oluşan girişim sürelerine Çizelge 4.4'te yer verilmektedir.

Çizelge 4.4. d_{11} ile d_{21} ve d_{12} ile d_{22} arasındaki ilişkiye göre ikincil veri paketi üzerindeki girişim süreleri

Uzaklık kıyasları		Girişim süresi
$d_{11}>d_{21}$	$d_{12}>d_{22}$	$\left\|t_{p12} - t_{p22} - \mu\right\|$
$d_{11}>d_{21}$	$d_{12}<d_{22}$	$\left\|t_{p12} - t_{p22} - \mu\right\|$
$d_{11}<d_{21}$	$d_{12}>d_{22}$	$\left\|t_{p12} - t_{p22} + \mu\right\|$
$d_{11}<d_{21}$	$d_{12}<d_{22}$	$\left\|t_{p12} - t_{p22} + \mu\right\|$

Bu bölümde, yer paylaşımlı BR modeli kapsamında düğümlerin uzaklık değerlerinin değişiminin birincil ve ikincil başarımı nasıl etkilediği hususu simülasyonlar ile analiz edilmiştir. Konunun anlaşılması için birincil ve ikincil kullanıcılara ilişkin olarak aksi belirtilmedikçe aynı paket çerçeve boyutu, TS süresi ve kodlama yapıları ve iletim hızı esas alındığından R_T oranı da her iki kullanıcı için aynıdır.

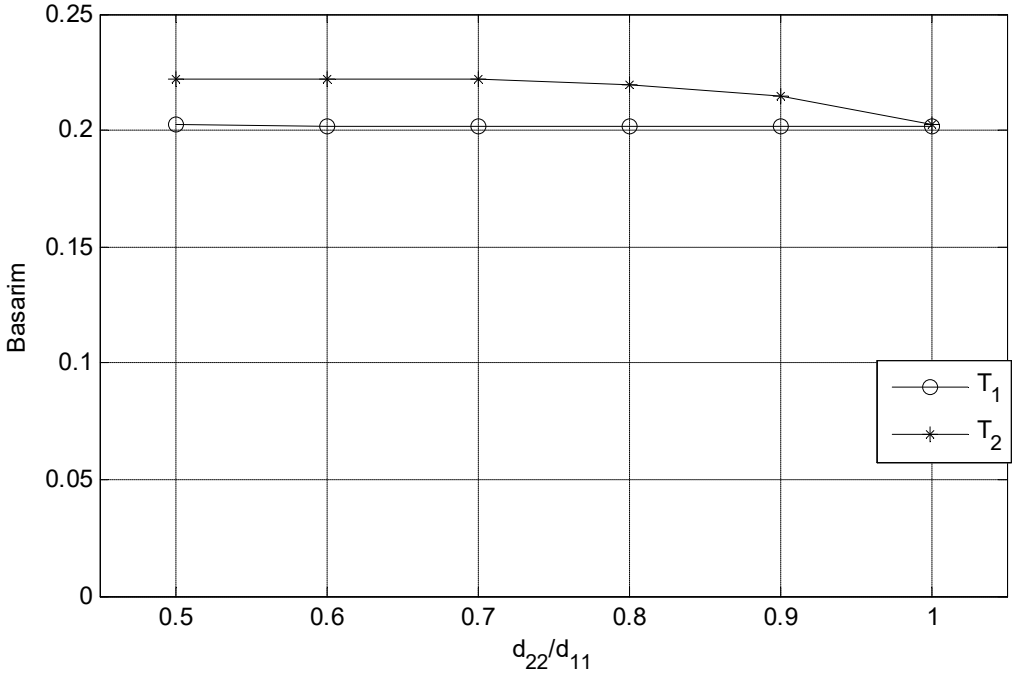
Her iki kullanıcı için 256 bitlik mesaj biti, 32 bitlik CRC parite biti, ½ konvolusyon kodlayıcı, Viterbi kod çözücü kullanılmıştır. Aksi belirtilmedikçe $t_f=2t_p$ ve AWGN kanalda SNR=3dB alınmıştır.

Yukarıda belirtildiği üzere PU'nın iletim yapısının $\rho \geq 1$ şeklinde olması SU için daha avantajlı olmaktadır. Bu anlamda öncelikle $\rho \geq 1$ durumu için SU'ya ilişkin ikincil kaynak tespiti yapılmaya çalışılmıştır.

a) $\rho=1$, $d_{11}=d_{21}$ ve $d_{12}=d_{22}$ kabulüyle d_{11} ile d_{22} arasındaki ilişkiye göre SU performansı tespit edilmeye çalışılmıştır. Söz konusu uzaklık kabullerine göre alıcılarda herhangi bir girişim olmaz ve $\rho=1$ kabulüne göre SU için $t_{f2}=2t_{p11}$ alınabilir. Bu durumda SU t_{f1} sürede veri paketleri alıcı tarafından alınarak geribesleme sinyali ikincil vericiye ulaştırılmalıdır. Yani;

$$2t_{p22} \leq t_{f11} \tag{4.27}$$

olmalıdır. Bu çalışmaya ilişkin simülasyona Şekil 4.27'de yer verilmektedir.

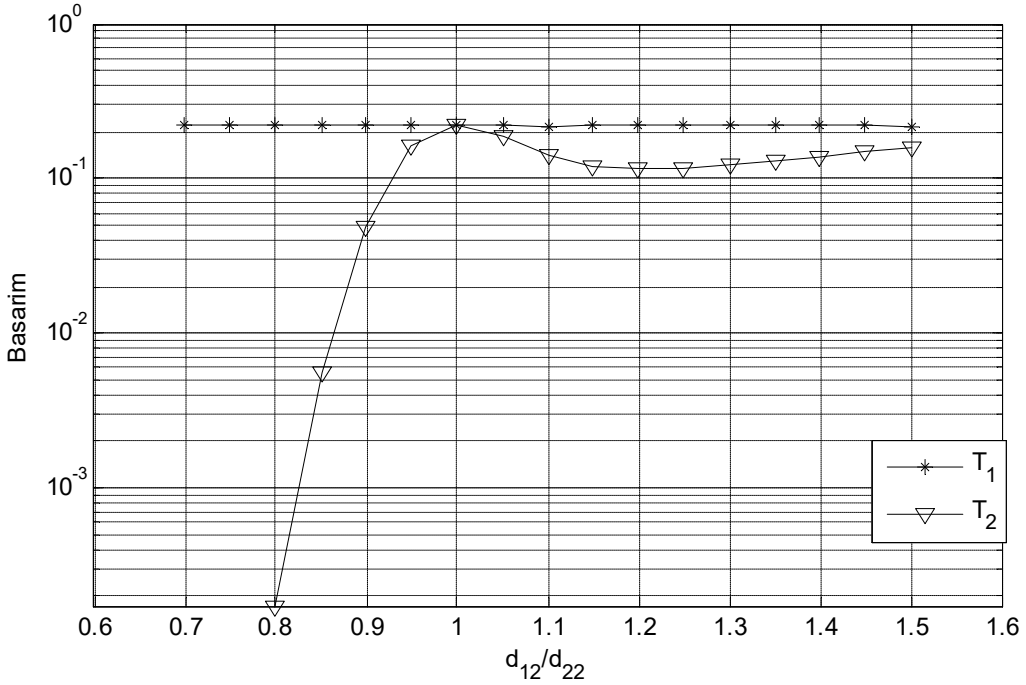


Şekil 4.27. $d_{11}=d_{21}$ ve $d_{12}=d_{22}$ kabulüyle d_{11} ile d_{22} arasındaki ilişkiye göre birincil ve ikincil başarımlar

Eş 4.24 ve Eş 4.27 birlikte göz önünde bulundurulduğunda; $d_{22,}$ d_{11}'e göre azaldığında m değeri artar, bu durum ikincil başarımı olumsuz etkiler. Zira SU için boşa geçen bu sürede iletim yapılamaz. Ancak bu azalma aynı zamanda avantaj da sağlar. Zira d_{22} uzaklığı azaldıkça R_2'deki ikincil güç artar ve ikincil vericinin gürültüye karşı dayanıklılığı artar ve dolayısıyla başarım değeri yükselir. Şekil 4.27'de görüleceği üzere, d_{22}/d_{11} oranı arttıkça ikincil başarım azalarak 1 değerinde birincil başarıma eşit olmuştur. $t_{f2}=2.t_{p11}$ ve $t_{f1}=2.t_{p22}$ olduğu bu noktada en iyi ikincil başarım performansı yakalanmış olur.

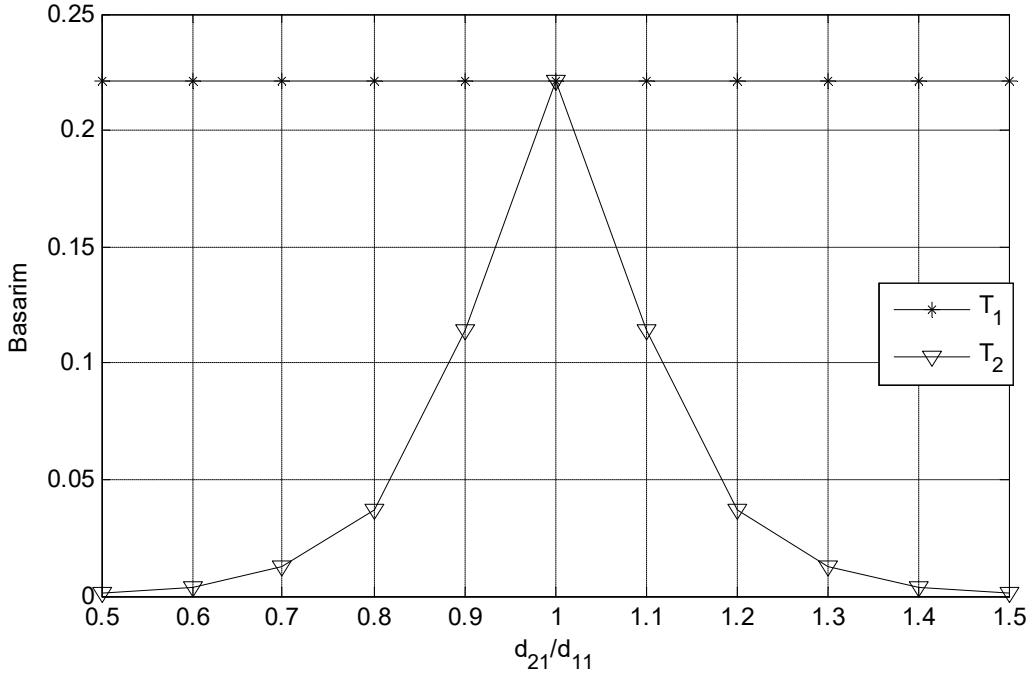
b) $\rho=1$, $d_{11}=d_{21}$ ve $d_{11}=d_{22}$ kabulüyle d_{12} ile d_{22} arasındaki ilişkiye göre ikincil kullanıcı performansı tespit edilmeye çalışılmıştır. d_{12}'nin d_{22}'ye göre düşük olması; R_2 üzerinde göreceli olarak güç seviyesi yüksek bir birincil girişim demektir. Bunun tersi halinde birincil güç uzaklığın karesiyle ters orantılı olarak düşeceğinden R_2 üzerindeki birincil güç ve dolayısıyla girişim etkisi azalır. Ayrıca Eş. 4.26'da verildiği üzere d_{12}/d_{22} oranı 1 değerinden uzaklaştıkça ikincil alıcı üzerindeki t_e süresi de artacağından ikincil başarım performansı azalır. Şekil 4.28 incelendiğinde; d_{12}/d_{22} oranı 1 değerinde, ikincil başarım, birincil başarım performansı ile aynı ve kendi maksimum değerini aldığı, 1'den aşağılara indikçe, birincil iletimden kaynaklanan girişim gücünün ve μ süresin artması dolayısıyla

keskin biçimde azaldığı, 1 değerinden yükseldikçe, t_e süresin artması ve girişim gücünün azalmasından dolayı 10^{-1} değerinin üzerinde kalmak kaydıyla dalgalı seyir izlediği görülmektedir.



Şekil 4.28. $d_{11}=d_{21}$ ve $d_{11}=d_{22}$ kabulüyle d_{12} ile d_{22} arasındaki ilişkiye göre birincil ve ikincil kullanıcı başarım performansları

c) $\rho=1$, $d_{11}=d_{22}$ ve $d_{12}=d_{22}$ kabulüyle d_{21} ile d_{11} arasındaki ilişkiye göre SU performansı tespit edilmeye çalışılmıştır. d_{21}'in d_{11}'e göre artması veya azalması Eş. 4.22'de yer verildiği üzere μ değerini, dolayısıyla Çizelge 4.4'te belirtilen t_e süresini artırır. Şekil 4.29'da verilen simülasyonda d_{21}/d_{11} oranının 1 değerinden aşağı ve yukarı olduğu durumlarda simetrik biçimde ikincil başarım için azalma söz konusudur.



Şekil 4.29. $d_{11}=d_{22}$ ve $d_{12}=d_{22}$ kabulüyle d_{21} ile d_{11} arasındaki ilişkiye göre birincil ve SU başarım performansları

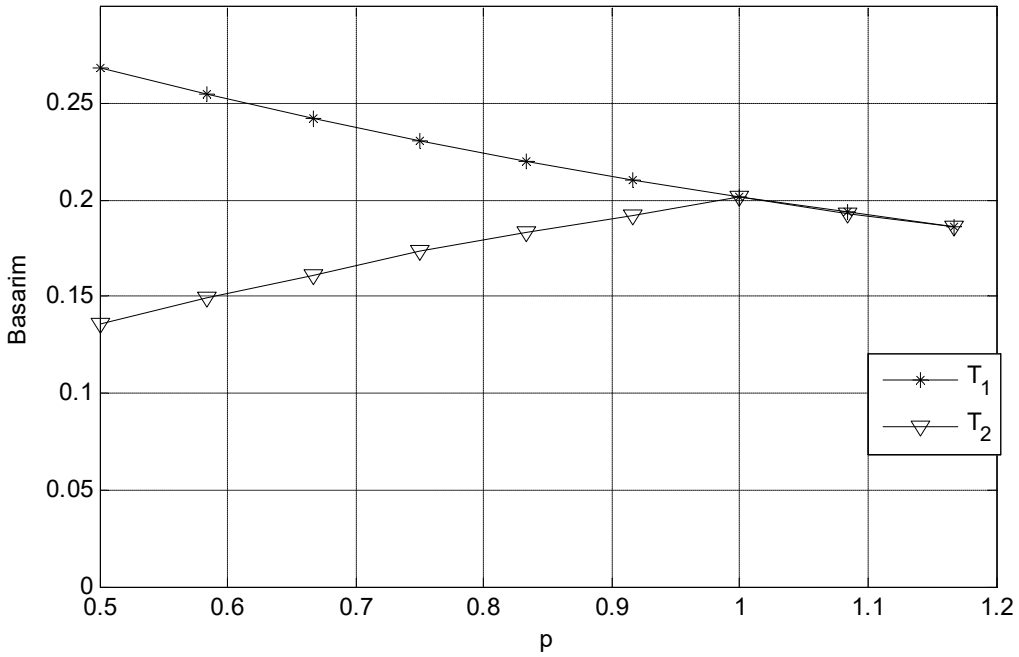
$\rho \geq 1$ durumunda en basit olarak $\rho=1$ halinde uzaklık değerlerine göre ikincil başarım performansının nasıl değiştiğini gözlemledikten sonra şimdi ρ değişkeni ile birincil ve ikincil başarımın nasıl etkilendiğini görelim. Sadece ρ etkisini gözlemlemek amaçlandığından, tüm uzaklık verilerini eşit kabul ederek diğer etkiler göz ardı edilebilir.

Şekil 4.30'da gösterilen simülasyonda ρ değeri arttıkça birincil başarım düşmektedir. Çünkü çevrim periyodunun giderek daha fazla zamanında iletim yapılmakta, t_w artmakta ve R_T değeri azalarak (Bkz. Eş. 4.9) başarım değeri azalmaktadır. $\rho \geq 1$ değerler için, PU ile aynı paket çerçeve yapısına sahip ikincil vericinin $2.t_{p11}$ süre içerisinde rahatlıkla kendi veri paketini kanala verebildiği, bununla birlikte çevrim periyodunun kalan zamanında ileri yönlü ve geri yönlü iletim sağladığı, böylece PU ile aynı başarım performansını yakaladığı görülmektedir.

$\rho < 1$ değerleri için, Eş. 4.21'den hareketle, ikincil vericinin $2.t_{p11}$ süre içerisinde kendi veri paketini kanala vermesi gerektiğinden, ikincil veri paket uzunluğu ölçüsü düşürülerek t_{f2} süresinin azaltılması yoluna gidilir. Yani Eş. 4.21 şartını sağlayacak en büyük t_{f2} değerini yakalayacak şekilde mesaj bit sayısı azaltılır. Bu durumda γ değeri dolayısıyla R_T

değeri düştüğünden başarım değeri de düşer. Ayrıca $t_{11}=t_{22}$ ve $t_{f1} > t_{f2}$ olduğundan m süre de iletim yapmadan beklemek suretiyle başarım değeri ayrıca düşer.

Bu simülasyon çalışmasında uzaklıkların eşit olduğu dolayısıyla SU üzerinde birincil girişim etkilerinin olmadığı kabul edilmiştir. Yukarıda $\rho \geq 1$ kriterinde izlendiği üzere uzaklıkların değişken olması durumunda ikincil başarım performansı ayrıca bu değişkenlerden dolayı da etkilenir.



Şekil 4.30. ρ değerine göre birincil ve ikincil başarım performansları

Bu bölümde literatürde yapılan çalışmalardan farklı olarak PU'nın sürekli olarak iletim halinde bulunduğu durumda SU'nın bilişsel olarak yer paylaşımı modeli ile spektruma erişerek kendisine haberleşme kaynağı bulması incelenmiştir.

İkincil kullanıcının sistemden yer paylaşımlı biçimde yararlanması dolayısıyla simülasyonların tamamında da görüleceği üzere SW HARQ protokolünde iletimine devam eden PU'nın başarım performansı herhangi bir şekilde ikincil kullanımdan etkilenmemektedir.

Yapılan tespitlerde SW HARQ protokolünde çalışan PU'nın varlığında SU için önemli miktarda haberleşme kaynağının sağlanabileceği açıklanarak bu durum simülasyon sonuçları ile ortaya konmuş olup, birincil ve ikincil kullanıcı çiftlerine ait konum verilerinin başarım performansları ile nasıl ilişkili olduğu hususu ayrıntılı olarak irdelenmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, özellikle kablosuz haberleşme sistemlerinde en büyük problem haline gelen frekans spektrum kıtlığı problemine yönelik önemli çözüm sağlayan BR tekniği, ARQ haberleşme sistemlerine uygulanmıştır. ARQ ve HARQ protokolleri ile çalışan PU'dan arttığı ve kullanılmadığı tespit edilen frekans boşlukları ve başarım kapasitesinin SU'lar tarafından kullanılması sağlanmıştır.

Bu tez çalışmasında, alt paylaşımlı ARQ ve HARQ modeller için, PU'nın geribesleme sinyallerini bilgi olarak alıp değerlendiren özgün dinamik EKA yapısı önerilmiştir. SU'nın bu EKA kontrolünde iletime geçtiği veya sessiz konuma geçtiği düşünülmüştür. EKA'nın birinci amacı olan PU'nın haberleşme kapasitesinin korunması sürekli olarak sağlanmıştır. Bununla birlikte, simülasyon sonuçlarından da tespit edildiği üzere, SU'lar için önemli haberleşme kapasitesi elde edilmiştir.

Literatürde verilen birincil ARQ sistemlerde çalışan yer paylaşım esaslı BR uygulamalarında, PU'nın kanalı kullanmadığı yani tamamen pasif kaldığı çevrim sürelerinin değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. PU'nın kullandığı çevrim sürelerinde SU, herhangi bir şekilde ilgili çevrim periyodunu kullanamamaktadır. Bu tezde SW HARQ sistemler için önerilen yer paylaşımlı bilişsel modelde, PU'nın ilgili çevrim sürelerinin tamamını kullandığı durumda bile SU'lar için önemli miktarda kaynak elde edilebildiği tespit edilmiştir. SW sisteminde yer bulan bekleme süreleri, SU'lar tarafından iletim süresi olarak kullanılmıştır. Özellikle uzun gecikmeli birincil SW HARQ sistemlerde aynı verici güç ve kanal şartları için PU ile aynı ikincil başarım değerlerinin yakalandığı simülasyon sonuçları ile görülmüştür.

Bu tezde ayrıca, kablosuz bilişsel ARQ sistemlerde düğümler arası uzaklıkların değişimlerinin başarım performanslarını ne şekilde etkilediği hususları da irdelenerek, simülasyon sonuçları ile ortaya konmuştur.

Bu tezde alt paylaşımlı modellere yönelik olarak EKA ile SU'nın iletim yapması veya sessiz kalması şeklinde iki temel kararı çıktı olarak kullanılmaktadır. İlerleyen dönemde EKA'nın ikiden fazla parametre kararı alacak çıktı üretmesinin avantaj sağlayacağı

düşünülmektedir. Bu iki seçeneğin dışında aynı zamanda adaptif olarak SU üzerinde güç kontrolü sağlayacak şekilde komut üretebilmesi SU'ya önemli kaynak kazanımı sağlayacaktır. PU'nın tespit edilen haberleşme parametrelerini ve ARQ geribesleme sinyallerindeki bilgileri değerlendirerek, modulasyon, kod oranı ve şeması değişikliği yapılabilmesi gibi esneklikler gizli ikincil haberleşme kapasitelerini açığa çıkarabilecektir.

KAYNAKLAR

1. Mitola, J. and Maguire, G.Q. (1999). Cognitive radio: Making Software Radios More Personal. *IEEE Personal Communications*, 6(4), 13-18.

2. Çiçek, M., Urfalıoğlu, R. ve Paçacı, K. (2008). *Bilişsel Radyoda Spektrum Sezme İşlemine Yönelik Yaklaşımlar*. Haberleşme Teknolojileri ve Uygulamaları Sempozyumu, İstanbul, 1-6.

3. Federal Communications Commisssion, (2002). *Spectrum Policy Task Force Report*, Washington, 9-16, Doküman no: FCC-02-135.

4. Akyıldız, I.F., Lee, W-Y., Vuran, M. and Mohanty, S. (2006). Next Generation/Dynamic Spectrum Access/Cognitive Radio Wireless Networks: A survey. *Computer Networks*, 50(13), 2127-2159.

5. Arslan, H. (2007). *Cognitive Radio, Software Defined Radio and Adaptive Wireless Systems*, Tampa: Springer, 43-107.

6. Çiçek, M. (2011). *Bilişsel Radyo Teknolojisi ve Düzenleme Perspektifi*. Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu Uzmanlık Tezi, Ankara, 14-34.

7. QINETIQ, (2007). *Cognitive Radio Technology- A Study for Ofcome*. (1). Londra, İngiltere.

8. Mitola, J. (2000). *Cognitive radio: an integrated agent architecture for software defined radio*. Doktora Tezi, Royal Institute of Technology, Stockholm, İsveç.

9. Haykin, S. (2005). Cognitive radio: brain-empowered wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23(2), 201–220.

10. Xing, Y., Mathur, C.N., Haleem, M.A., Chandramouli, R. and Subbalakshmi, K.P. (2007). Dynamic spectrum access with QoS and interference temperature constraints. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 6(4), 423–433.

11. Han, Y., Pandharipande, A. and Ting, S.H. (2008). *Cooperative spectrum sharing via controlled amplify-and-forward relaying*. IEEE International Symposium on Personel, Indoor and Mobile Radio Communications, Cannes, Fransa, 1-5.

12. Han, Y., Pandharipande, A. and Ting, S.H. (2009). Cooperative decode-and forward relaying for secondary spectrum access. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 8(10), 4945–4950.

13. Li,Q., Ting, S.H., Pandharipande, A. and Han, Y. (2011). Cognitive spectrum sharing with two-way relaying systems. *IEEE Transactions on Vehichular Technology*, 60(3), 1233–1240.

14. Goldsmith, A., Jafar, S.A., Mari´c, I. and Srinivasa, S. (2009). Breaking spectrumgridlock with cognitive radios: an information theoretic perspective. *Proceeding of the IEEE*, 97(5), 894–914.

15. Asghari, V. and Aissa, S. (2011). Resource management in spectrum-sharing cognitive radio broadcast channels: adaptive time and power allocation. *IEEE Transactions on Communications*, 59(5), 1446-1457.

16. Harsini, J.S. and Zorzi, M. (2014). Transmission strategy design in cognitive radio systems with primary ARQ control and QoS provisioning. *IEEE Transactions on Communications*, 62(6), 1790-1802.

17. Makki, B., Svensson, T. and Zorzi, M. (2015). Finite block-lengt analysis of spectrum sharing Networks using rate adaptation. *IEEE Transactions on Communications*, 63(8), 2823-2835.

18. Eswaran, K., Gastpar, M. and Ramchandran, K. (2007). *Bits through ARQs: spectrum sharing with a primary packet system*. IEEE International Symposium on Information Theory, 2171-2175, Nice, Fransa.

19. Eswaran, K., Gastpar, M. and Ramchandran, K. (2011). Cognitive radio through primary control feedback. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 29(2), 384–393.

20. Levorato, M., Mitra, U. and Zorzi, M. (2009). *Cognitive interference management in retransmission-based wireless Networks*. Allerton Conference, Monticello, USA, 94-101.

21. Firouzabadi, S., Levorato, M., O'Neill, D. and Goldsmith, A. (2010). *Learning interference strategies in cognitive ARQ Networks*. IEEE Global Telecommunications Conference, Miami, ABD, 6-10.

22. Michelusi, N., Simeone, O., Levorato, M., Popovski P. and Zorzi, M. (2011). *Optimal cognitive transmission exploiting redundancy in the primary ARQ process*. Information Theory and Applications Workshop, La Jolla, CA, ABD, 1-10.

23. Jeon, S.Y. and Cho, D.H. (2009). An ARQ mechanism considering resource and traffic priorities in cognitive radio systems. *IEEE Communication Letters*, 13(7), 504-506.

24. Cheng, S.-M., Ao, W.C. and Chen, K.-C. (2011). Efficiency of a cognitive radiolink with opportunistic interference mitigation. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 10(6), 1715–1720.

25. Tannious, R. and Nosratinia, A. (2010). *Coexistence through ARQ retransmissions in fading cognitive radio channels*. IEEE International Symposium on Information Theory, Austin, ABD, 2078-2082.

26. Tannious, R. and Nosratinia, A. (2010). Cognitive radio protocols based onexploiting hybrid ARQ retransmission. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 9(9), 2833–2841.

27. Li, J.C. F., Zhang, W., Nosratinia, A. and Yuan, J. (2010). *Opportunistic spectrum sharing based on exploiting ARQ retransmission in cognitive radio Networks*. IEEE Global Telecommunications Conference, Miami, FL, ABD, 1-5.

28. Zhang, R., Liang and Y.C. (2008). *Exploiting Hidden Power-Feedback Loops for Cognitive Radio*. 3rd IEEE Symposium on DySPAN, Chicago, ABD, 922-933.

29. Hamza, D. and Nafie, M. (2010). *Throughput Maximization Over Temporally Correlated Fading Channels in Cognitive Radio Networks*. IEEE International Conference on Telecommunications, Doha, Katar, 411-417.

30. Hoang, A.T. and Liang, Y. (2008). Downlink Channel Assignment and Power Control for Cognitive Radio Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7(8), 3106-3117.

31. Towhidlou, V. and Bahaei, M.S. (2016). *Cooperative ARQ in full duplex cognitive radio Networks*. IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications, Valencia, İspanya, 1-5.

32. Li, Q., Ting, S.H., Pandharipande, A. and Motani, M. (2012). Cooperate-and-Access Spectrum Sharing with ARQ-Based Primary Systems. *IEEE Transations on Communications*, 60(10), 2861-2871.

33. Narasimhan, R. (2010). *Hybrid-ARQ Interference Channels with Receiver Cooperation*. IEEE International Conference on Communications, Cape Town, Güney Afrika, 1-5.

34. Michelusi, N., Popovski, P., Simeone, O., Levorato M. and Zorzi, M. (2013). Cognitive Access Policies under a Primary ARQ Process via Forward-Backward Interference Cancellation. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 31(11), 2378-2386.

35. Makki, B., Graell, A. and Eriksson, T. (2012). HARQ Feedback in Spectrum Sharing Networks. *IEEE Communications Letters*, 16(9), 1337-1340.

36. Joda, R. and Zorzi, M. (2014). *Access policy design for a cognitive secondary user under a primary type-II HARQ process*. IEEE International Symposium on Telecommunications, 63(11), 1094-1099.

37. Lapiccirella, F.E., Ding, Z. and Liu, X. (2011). Improved spectrum access control of cognitive radios based on primary ARQ signals. *IET Communications*, 6(8), 900-908.

38. Li, C. F., Zhang, W., Nosratinia, A. and Yuan, J. (2013). SHARP: Spectrum Harvesting with ARQ Retransmission and Probing in Cognitive Radio. *IEEE Transactions on Communications*, 61(3), 951-960.

39. Rehman, A., Yang, L-.L. and Hanzo, L. (2015). *Performance of Cognitive Hybrid Automatic Repeat reQuest: Stop-and Wait*. Vehicular Technology Conference, Glasgow, İngiltere, 1-5.

40. Rehman, A.U., Dong, C., Yang, L.L. and Hanzo, L. (2016). Performance of Cognitive Stop-and-Wait Hybrid Automatic Repeat Request in the Face of Imperfect Sensing. *IEEE Access*, 4, 5489 – 5508.

41. Chang, S. (1956). Theory of information feedback systems. *IRE Transactions on Information Theory*, 2(3), 29-40.

42. Lin, S. and Yu, P.S. (1982). A Hybrid ARQ Scheme with Parity Retransmission for Error Control of Satellite Channels. *IEEE Transactions on Communications*, 30(7), 1701-1719.

43. Comreo, A. R. and Costello, D.J. (1984). ARQ Schemes for Data Transmission in Mobile Radio Systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 33(3), 472-481.

44. Lin, S. and Costelllo, D.J. (2004). *Error Control Coding.* (2nd edition). New Jersey: Prentice Hall, 51-58.

45. Çölkesen, R. ve Örencik, B. (2000). *Bilgisayar Haberleşmesi ve Ağ Teknolojileri.* (2. Basım). İstanbul: Papatya Yayıncılık, 15-25.

46. Levenshtein, V.I. (1978). Bounds of the probability of Undetected Error. *Problem of Information Transmission*, 13(1), 1-12.

47. Massey, J. (1978). *Coding Techniques for Digital Data Networks*. Proceedings of the International Conference on Information Theory and Systems, Berlin, Almanya, 307-315.

48. Lin, S., Costello, D. and Miller, M. (1984). Automatic-repeat-request error-control schemes. *IEEE Communications Magazine*, 22(12), 5-17.

49. Çiçek, M. ve Akçam, N. (2014). *Geribeslemeli Haberleşme Sistemlerinde Bilişsel Radyo Modelinin Matematiksel Analizi*. International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, Karabük, 569-577.

50. Glover, I.A. and Grant, P.M. (2004). *Digital Communications* (2nd edition) Essex: Prentice Hall, 709-732.

51. Wang, Y. M. and Lin S. (1984). A Modified Selective Repeat Type-II Hybrid ARQ System and Its Performance Analysis. *IEEE Transactions on Communications*, 31(5), 593-608.

52. Bahri, M.W., Boujernaa, H. and Siala, M. (2004). *Performance comparison of Type I, II and III Hybrid ARQ Schemes over AWGN Channels*. IEEE International Conference on Industrial Technology, Hammameti, Tunus, 1417-1421.

53. Ahmadi, S. (2010). *Mobile WiMAX: A System Approarch to Understanding IEEE 802.16m Radio Access Technology* (First edition). Burlington: Academic Press, 289-299.

54. Cheng, J.-F. (2006). Coding performance of hybrid ARQ schemes. *IEEE Transactions on Communications*, 54(6), 1017-1029.

55. Benelli, G. (1985). An ARQ scheme with memory and soft error detectors. *IEEE Transactions on Communications*, 33(3), 285-288.

56. Chase, D. (1985). Code combining–a maximum-likelihood decoding approach for combining an arbitrary number of noisy packets. *IEEE Transactions on Communications*, 33(5), 385-393.

57. Kallel, S. (1990). Analysis of a type II hybrid ARQ scheme with code combining. *IEEE Transactions on Communications*, 38(8), 1133-1137.

58. Metzner, J.J. (1979). Improvements in block retransmission schemes. *IEEE Transactions on Communications*, 27(2), 524-532.

59. Chaitanya, T.V. (2013). *HARQ Systems: Resource Allocation, Feedback Error Protection and Bits-to-Symbol Mapping*. Doktora Tezi, Department of Electrical Engineering, Linköging Üniversitesi, Linköging, İsveç.

60. Lin, S. and Costelllo, D.J. (1983). *Error Control Coding: Fundamentals and Applications*. (1. Baskı). New Jersey: Prentice hall, 3-14.

61. Çiçek M. ve Akçam N. (2014). *Bilişsel Radyo Gelişim Sürecinde Telsiz Cihazların Yazılım Açısından Sisteme Uygunluğunun Kontrolü*. International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, Karabük, 588-596.

62. Anker, P. (2010). *Cognitive Radio, the Market and the Regulator*. IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum, Singapur, 1-6.

63. Akyildiz, I.F., Lee, W.Y., Vuran M.C. and Mohanty, S. (2006). Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey. *Computer Networks*, 50(13), 2127-2159.

64. Çiçek M., Akçam N. ve Dökmetaş B. (2016) *Erişim Kontrolü Temelli Eşzamanlı Birincil ve İkincil SW ARQ Yapılarının Performans Analizi*, International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, Antalya, 725-733.

65. Ozcan, G. and Gursoy, M. (2013). Throughput of cognitive radio systems with finite blocklength codes. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 31(11), 2541-2554.

66. Çiçek, M. and Akçam, N. (2021). A New Approach of Overlay Method for Cognitive SW HARQ System. *Wireless Personel Communications*, 118(3), 1-12.

67. Agarval, S. and De, S. (2016). eDSA: Energy-Efficient Dynamic Spectrum Access Protocols for Cognitive Radio Networks. *IEEE Transactions on Mobile Compting*, 15(12), 3057-3071.

68. Oto, M. and Akan, O. (2012). Energy-efficient packet size optimization for cognitive radio sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 11(4), 1544-1553.

69. Yang, Y., Ma, H. and Aissa, S. (2012). Cross-layer combining of adaptive modulation and truncated ARQ under cognitive radio resource requirements. *IEEE Transactions on Vehicular Technologies*, 61(9), 4020-4030.

70. Ao, W.C. and Chen, K.C. (2010). *End-to-end HARQ in cognitive radio networks*. IEEE Wireless Communication and Networking Conference, Sydney, 1-6.

71. Çiçek, M. ve Akçam, N. (2018). *Birincil SW-HARQ Sistem ile Çalışan Yer Paylaşımlı Bilişsel SW-HARQ Sisteminin Performansı*. International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology, Ankara, 1-8.



GAZİ GELECEKTİR...