
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

ÇEVRESEL GERİ SAÇILIM HABERLEŞME TABANLI BİLİŞSEL RADYO AĞLARININ PERFORMANS ANALİZİ

Muhammed Yusuf ONAY

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARALIK 2023

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.

Muhammed Yusuf ONAY

05/12/2023

ÇEVRESEL GERİ SAÇILIM HABERLEŞME TABANLI BİLİŞSEL RADYO AĞLARININ PERFORMANS ANALİZİ

(Doktora Tezi)

Muhammed Yusuf ONAY

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2023

ÖZET

Kablosuz haberleşme sistemlerinin hızla gelişim göstermesiyle birlikte günlük hayattaki uygulamaların sayısında artış yaşanmıştır. Bu durum, sistem modelinde yer alan cihazlara enerji temin etme konusunda problem oluşturmaktadır. Problemin üstesinden gelebilmenin yanı sıra özellikle yeni nesil haberleşme modellerinde ağ yapısında bulunan kullanıcıların, sistemdeki kısıtlara göre düşük enerji ile mümkün olan en yüksek bit hızında bilgiyi aktarması hedeflenmektedir. Düşük güçle haberleşmenin gerçekleştirilmesi için son zamanlarda akademik camianın ve endüstrinin ilgisini çeken çevresel geri saçılım haberleşme tekniği önerilmiştir. Pasif bir haberleşme türü olan bu teknikte kullanıcılar çevredeki sinyalleri geri saçarak alıcıya bilgi aktarımı yapmaktadır. Haberleşme ağında sadece bu tekniğin kullanılması bit iletim hızı bakımından yeni nesil iletişim sistemlerinin gereksinimlerini karşılayamamaktadır. Bu noktada çevredeki mevcut haberleşme sisteminin iletişim altyapısını kullanan bilişsel radyo ağları, çevresel geri saçılım haberleşme tekniğine entegre edilmiştir. Yukarıda zikredilen amaçlara ulaşmak adına bu tez kapsamında, hem kullanıcıların ihtiyacı olan enerji problemini çözmek için, hem de çıkılabilecek en yüksek bit hızında bilgi alışverişinin gerçekleştirildiği haberleşme protokollerini tasarlamak için enerji hasadı tekniği, çevresel geri saçılım haberleşme ve bilişsel radyo ağlarının birlikte düşünüldüğü çevresel geri saçılım haberleşme tabanlı bilişsel radyo ağları modellenmiştir. Ek olarak, bit iletim hızı açısından performansa katkı sağlayan röle kullanıcıları, ele alınan sistemlere dahil edilmiştir. Çevresel geri saçılım haberleşme sistemlerinin pasif yolla gerçekleştirilmesi, mevcut sistemi dışardan gelebilecek herhangi bir müdaheleye karşı savunmasız bıraktığından bu durumun sistem performansına etkisi de ayrıca değerlendirilmiştir. Sistem modellerinde ele alınan dışbükey problem, alıcıya ulaşan bit sayısı bakımından maksimize edilmeye çalışılmıştır. Bu noktada ortaya konulan dışbükey optimizasyon problemi bilgisayar ortamında çözülmüş, simülasyon sonuçları grafiksel olarak gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlarda literatürdeki benzer yaklaşımlara kıyasla daha yüksek bit iletim hızlarına ulaşıldığı görülmüştür.

Bilim Kodu	:	93420
Anahtar Kelimeler	:	Kablosuz haberleşme, çevresel geri saçılım, bilişsel radyo ağları, doğrusal enerji hasadı, röle, dışbükey optimizasyon, bit hızı
Sayfa Adedi	:	116
Danışman	:	Prof. Dr. Özgür ERTUĞ

PERFORMANCE ANALYSIS OF AMBIENT BACKSCATTER COMMUNICATION BASED COGNITIVE RADIO NETWORKS

(Ph. D. Thesis)

Muhammed Yusuf ONAY

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2023

ABSTRACT

With the rapid development of wireless communication systems, the number of applications in daily life has increased. This situation creates a problem in supplying energy to the devices in the system model. In addition to overcoming this problem, especially in new generation communication models, it is aimed for users in the network structure to transfer information at the highest possible bit rate and with low energy according to the constraints in the system. To achieve low-power communication, ambient backscatter communication technique has recently been proposed, which has attracted the attention of the academic community and industry. In this technique, which is a passive type of communication, users transfer information to the receiver by scattering the surrounding signals back. Using only this technique in the communication network cannot meet the requirements of new generation communication systems in terms of bit transmission rate. At this point, cognitive radio networks that use the communication infrastructure of the existing communication system in the environment have been integrated into the ambient backscatter communication technique. Within the scope of this thesis, ambient backscatter communication based cognitive radio networks, where energy harvesting technique, ambient backscatter communication and cognitive radio networks are considered together, have been modeled in order to both solve the energy problem required by the users and to design communication protocols that enable information exchange at the highest possible bit rate. In addition, relay users that contribute to performance in terms of bit transmission rate are included in the systems considered. Since the passive implementation of ambient backscatter communication systems leaves the existing system vulnerable to any external interference, the effect of this situation on the system performance was also evaluated. The convex problem in system models is maximized in terms of the number of bits transmitted to the receiver. At this point, the convex optimization problem is solved in the computer environment and the simulation results are shown graphically. The results showed that higher bit transmission rates were achieved compared to similar approaches in the literature.

Science Code	:	93420
Key Words	:	Wireless communication, ambient backscatter, cognitive radio networks, lineer energy harvesting, relay, convex optimization, bit rate
Page Number	:	116
Supervisor	:	Prof. Dr. Özgür ERTUĞ

TEŞEKKÜR

Doktora tezimin hazırlanması süresince yardımlarıyla çalışmama yön veren, bilgi ve tecrübesi ile akademik hayatıma yeni bakış açıları kazandıran danışman hocam sayın Prof. Dr. Özgür ERTUĞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Değerli görüş ve önerileri ile tez çalışmama katkıda bulunan doktora tezi izleme komitesi üyeleri sayın Prof. Dr. Murat Hüsnü SAZLI ve sayın Prof. Dr. Erkan AFACAN hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Bu sürecin başından bu yana ilgisi, sabrı ve sevgisiyle en büyük destekçim olan biricik eşim Kübra ONAY'a, eğitim hayatıma başladığım ilk günden beri her zaman yanımda olan ve destekleriyle başarılarımın mimarı olan annem Berrin ONAY, babam Mehmet Emin ONAY ve ablam Pınar TARCAN'a teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xv

SİMGELER VE KISALTMALAR xviii

1. GİRİŞ 1

2. ÇEVRESEL GERİ SAÇILIM HABERLEŞME 9

3. KABLOSUZ AĞLARDA ENERJİ HASADI TEKNİĞİ 15

3.1. Kablosuz Olarak Sadece Güç Transferi 15

3.2. Kablosuz Güç Kullanarak Gerçekleştirilen Haberleşme Modeli 16

3.3. Eşzamanlı olarak Bilgi ve Güç İletim Modeli 16

4. BİLİŞSEL RADYO AĞLARI VE ÇEVRESEL GERİ SAÇILIM HABERLEŞME TEKNİĞİ İLE BİRLİKTE KULLANIMI 19

4.1. İkincil Verici ve İkincil Alıcı İçyapısının Blok Şeması 20

4.2. Zaman Bölmeli Çoklu Erişim 22

4.3. Dikgen Olmayan Çoklu Erişim 23

4.4. ÇGSH Tabanlı Bilişsel Radyo Ağı Modelleri 24

4.4.1. ÇGSH tabanlı üstüne kurulan bilişsel radyo ağı 25

4.4.2. ÇGSH tabanlı altına kurulan bilişsel radyo ağı 27

5. RÖLE VE SİNYAL BOZUCU VARLIĞINDA AĞ YAPILARI 31

5.1. ÇGSH Tabanlı Bilişsel Radyo Ağlarında Röle Kullanımı 31

Sayfa

5.2. Sinyal Bozucu varlığında ÇGSH Tabanlı Bilişsel Radyo Ağı 32

6. LİTERATÜRDE YAPILAN ÇALIŞMALAR 35

7. ÇEVRESEL GERİ SAÇILIM HABERLEŞME TABANLI BİLİŞSEL RADYO AĞLARININ MODELLENMESİ 43

7.1. Çevresel Geri Saçılım Tabanlı Heterojen Bilişsel Radyo Ağlarında Röleli İşbirlikçi Haberleşme 43

7.2. Röle ve Sinyal Bozucu altında Çevresel Geri Saçılım Tabanlı Bilişsel Radyo Ağı 61

7.3. Çift Yönlü Erişim Noktasının Bulunduğu Hücresel Ağ Yapısı 68

7.4. Çevresel Geri Saçılım Tabanlı Altına Kurulan Bilişsel Radyo Ağı Yapısı 75

8. SİMÜLASYON ÇIKTILARI VE ELDE EDİLEN BULGULAR 83

8.1. Çevresel Geri Saçılım Tabanlı Heterojen Bilişsel Radyo Ağlarında Röleli İşbirlikçi Haberleşme Modeli için Parametre Değerleri ve Performans Analizi 83

8.2. Röle ve Sinyal Bozucu altında Çevresel Geri Saçılım Tabanlı Bilişsel Radyo Ağı için Parametre Değerleri ve Performans Analizi 90

8.3. Çift Yönlü Erişim Noktasının bulunduğu Hücresel Ağ Yapısı için Parametre Değerleri ve Performans Analizi 95

8.4. Çevresel Geri Saçılım Tabanlı Altına Kurulan Bilişsel Radyo Ağ Yapısı için Parametre Değerleri ve Performans Analizi 99

9. SONUÇ 103

KAYNAKLAR 107

ÖZGEÇMİŞ 115

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 7.1. Birden çok ST ve röle kullanıcısının olduğu işbirlikçi sistem modelindeki notasyon ve kısaltmaların özeti 48

Çizelge 7.2. Birden çok ST ve röle kullanıcısının olduğu işbirlikçi sistem modelinde TDMA ve NOMA senaryosu için kullanılabilecek algoritma tablosu 60

Çizelge 8.1. Birden çok ST/röle kullanıcısının olduğu işbirlikçi sistem modeli için kullanılan simülasyon parametre değerleri 84

Çizelge 8.2. Sinyal bozucunun yer aldığı her iki sistem modeli için kullanılan simülasyon parametre değerleri 91

Çizelge 8.3. Çift yönlü erişim noktasına sahip sistem için kullanılan parametre değerleri 95

Çizelge 8.4. Altına kurulan bilişsel radyo ağı için kullanılan parametre değerleri 99

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Monostatik geri saçılım haberleşme 10

Şekil 2.2. Bistatik geri saçılım haberleşme 11

Şekil 2.3. Çevresel geri saçılım haberleşme 11

Şekil 2.4. Çevresel geri saçılım haberleşme sistemlerinde geri saçılım yapan kullanıcıda iki durumlu modülasyon 13

Şekil 3.1. Kablosuz olarak sadece güç transferi ağ modeli..... 15

Şekil 3.2. Kablosuz güç kullanarak gerçekleştirilen haberleşme modeli..... 16

Şekil 3.3. Eş zamanlı olarak bilgi ve güç iletim ağ modeli..... 17

Şekil 4.1. Hibrit bir yapıya sahip ST kullanıcısının içyapısının blok halinde gösterimi 21

Şekil 4.2. Tipik bir SR kullanıcısının içyapısının blok halinde gösterimi 21

Şekil 4.3. Zaman-frekans düzleminde TDMA gösterimi..... 22

Şekil 4.4. ÇGSH tabanlı bilişsel radyo ağı için örnek bir zaman çerçevesi..... 23

Şekil 4.5. Tipik bir NOMA şeması 24

Şekil 4.6. ÇGSH tabanlı üstüne kurulan bilişsel radyo ağında geri saçılım modu 25

Şekil 4.7. ÇGSH tabanlı üstüne kurulan bilişsel radyo ağında enerji hasadı..... 26

Şekil 4.8. ÇGSH tabanlı üstüne kurulan bilişsel radyo ağında aktif veri iletim modu ... 27

Şekil 4.9. ÇGSH tabanlı altına kurulan bilişsel radyo ağında geri saçılım modu..... 28

Şekil 4.10. ÇGSH tabanlı altına kurulan bilişsel radyo ağında enerji hasadı 29

Şekil 4.11. ÇGSH tabanlı altına kurulan bilişsel radyo ağında aktif veri iletim modu... 30

Şekil 5.1. Röleye sahip ÇGSH tabanlı bilişsel radyo ağı model yapısı 32

Şekil 5.2. Sinyal bozucunun yer aldığı ÇGSH tabanlı bilişsel radyo ağı model yapısı.. 33

Şekil 7.1. (a) Önerilen sistem modeli. (b) $N = 1$, $M = 1$ için alt sistem modeli 45

Şekil 7.2. Sistem modeli için zaman çerçevesi. (a) Önerilen TDMA senaryosu (b) Önerilen NOMA senaryosu..... 47

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.3. Tek röle ve tek ST kullanıcısına sahip birinci sistem modeli 62

Şekil 7.4. İki röle ve iki ST kullanıcısına sahip ikinci sistem modeli 63

Şekil 7.5. Tek röle ve tek ST kullanıcısına sahip birinci sistem modeli için zaman çerçevesi 63

Şekil 7.6. İki röle ve iki ST kullanıcısına sahip ikinci sistem modeli için zaman çerçevesi 64

Şekil 7.7. Çift yönlü erişim noktasına sahip sistem modeli 70

Şekil 7.8. ST_1, ST_2 ve HAP istasyonunun zaman çerçevesindeki durumları 70

Şekil 7.9. ÇGSH tabanlı altına kurulan bilişsel radyo sistem modeli 76

Şekil 7.10. ÇGSH tabanlı altına kurulan bilişsel radyo ağı için zaman çerçevesi 77

Şekil 8.1. Düğüm/Röle sayısının değişimine göre toplam bit iletim hızı 85

Şekil 8.2. Röle sayısının değişimine göre bütün durumlardaki toplam bit iletim hızı.... 86

Şekil 8.3. Birincil kanalın sessiz kalma süresine göre tüm durumlardaki iletim hızı değişimi 87

Şekil 8.4. Farklı geri saçılım hızı altında toplam bit iletim hızı değişimi 88

Şekil 8.5. Düğüm/Röle sayısının değişimine göre sistem enerji verimliliği 89

Şekil 8.6. Birincil kanalın sessiz kalma süresine göre sistem enerji verimliliği değişimi 90

Şekil 8.7. Baz istasyonu sinyal iletim gücüne göre toplam bit iletim hızı değişimi 92

Şekil 8.8. Sinyal bozucunun gücüne göre toplam bit iletim hızı değişimi 93

Şekil 8.9. ST kullanıcısının güç yansıma katsayısına göre toplam bit iletim hızı değişimi 94

Şekil 8.10. ST-baz istasyonu arasındaki mesafeye göre ST tarafından hasat edilen enerji 94

Şekil 8.11. HAP istasyonunun sinyal iletim gücüne göre toplam veri iletim hızı 96

Şekil 8.12. ST_1 geri saçılım verimliliğine göre toplam bit iletim hızı 97

Şekil 8.13. HAP istasyonunun sinyal iletim gücüne göre en uygun zaman değerleri 97

Şekil **Sayfa**

Şekil 8.14. WiFi cihazı-ST_2 arasındaki uzaklığa bağlı olarak toplam veri iletim hızı.... 98

Şekil 8.15. PT'nin sinyal frekansına göre ST kullanıcıları tarafından hasat edilen güç 100

Şekil 8.16. Aynı geri saçılım hızına sahip ST kullanıcılarının sayısına göre bit iletim hızı 101

Şekil 8.17. Farklı geri saçılım hızına sahip ST kullanıcılarının sayısına göre bit iletim hızı 102

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
c	Işık hızı
E_i	Bataryadaki başlangıç enerjisi
f	Sinyalin frekansı
H	H matrisi
Hz	Hertz
kbps	Kilo bits per second
km	Kilometre
Mbps	Mega bits per second
RL_j	j. Röle kullanıcısı
s	Saniye
THz	Terahertz
T	Zaman
*****	Karmaşık eşlenik operatörü
Γ	Anten yansıma katsayısı
λ	Sinyal dalga boyu

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
AVİM	Aktif Veri İletim Modu
AWGN	Additive White Gaussian Noise
CRNs	Cognitive Radio Networks
CSI	Channel State Information
ÇGSH	Çevresel Geri Saçılım Haberleşme
DF	Decode Forward
DSS	Dedicated Signal Source
EE	Energy Efficiency
FM	Frekans Modülasyonu

Kısaltmalar	Açıklamalar
GSRA	Geri Saçılım Röle Aktif
HAP	Hybrid Access Point
IoT	Internet of Things
KKT	Karush Kuhn Tucker
MIMO	Multi Input Multi Output
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access
PC	Primary Channel
PR	Primary Receiver
PT	Primary Transmitter
RFID	Radio Frequency Identification
SC	Secondary Channel
SIC	Successive Interference Cancellation
SNR	Signal Noise Ratio
SR	Secondary Receiver
ST	Secondary Transmitter
TDMA	Time Division Multiple Access
TV	Televizyon
WiFi	Wireless Fidelity

1. GİRİŞ

Son zamanlarda 5G ve ötesi haberleşme teknolojileri ile ilgili literatürde pek çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların temelinde, veri aktarımının düşük gecikme süresiyle yüksek kapasitede yapılarak çevredeki milyarlarca kullanıcının ya da cihazın birbirleriyle kesintisiz haberleşebileceği protokoller oluşturabilme düşüncesi yatar. Bu noktada ortaya çıkan ve sürekli artan enerji talebi, sistem modellemelerinde düşünülmesi ve dikkat edilmesi gereken bir konudur [1-2].

5G ve ötesi sistemlerde bütün cihazların birbirleriyle iletişim kurabilmesi ve her yere kablosuz iletişimin ulaştırılması amaçlanmaktadır. Bu kapsamda hedeflere ulaşmaya yönelik başlıca teknolojik atılımlar şunları içermektedir:

a-) Geniş spektrum kaynaklarına sahip THz bandında çalışan bir haberleşme model yapısı tasarlamak.

b-) Kablosuz olarak gerçekleştirilen enerji hasadı ile aktif veri iletim senaryosunu verimli hale getirip sistemin kanal kapasitesini artırmak.

c-) Enerji tasarrufu için geri saçılım haberleşme ağ yapılarını genişletmek.

d-) Yapay zeka kullanarak ağ sistem tasarımlarını geliştirmek.

e-) Hücresiz devasa çok girişli çok çıkışlı (multi input-multi output) sistem modelleri oluşturup günlük hayata uygulanabilirliği konusunda ortaya çıkabilecek problemleri belirlemek ve çözümler geliştirmek.

f-) Nesnelerin İnterneti (Internet of Things) gibi yeni nesil iletişim sistemlerinde birçok cihazın birbirleriyle haberleşebildiği düşük enerji-yüksek veri hızı-yüksek enerji verimliliği üçgeninde en uygun ağ yapıları tasarlamak.

Bu noktada, kablosuz güç aktarımlı haberleşme sistemleri, 5G ve ötesi iletişim protokollerinin geliştirilebilirliği açısından giderek daha fazla ilgi görmektedir [3-5]. Kablosuz güç aktarılarak cihazların enerji ihtiyacının karşılandığı bu tür sistemlerde sinyal yayıcı rolünde, kiplenmiş sinyal yayılımı yapan TV kulesi, WiFi erişim noktası ve FM kulesi olabileceği gibi kiplenmemiş sinyal gönderimi yapan özel tahsis edilmiş bir sinyal kaynağı (DSS) da kullanılabilir. Ortamda belirli yerlere konumlandırılmış kullanıcılar, kurgulanmış

zaman çerçevesinde kendisine tahsis edilen süreyi etkin bir şekilde kullanarak, yukarıda zikredilen istasyonlardan topladığı radyo frekans sinyalinden enerji hasat eder [6]. Sistem modelinde yer alan kullanıcıların çevreden yakaladıkları radyo frekans sinyali ile hasat ettikleri enerji miktarı, ağda alıcı olarak görev yapan cihaza doğru iletilen veri hızını ciddi bir şekilde etkilemektedir. Önerilen sistem modeline uygun tasarlanan zaman çerçevesinde, birbirleriyle ya da alıcı ile haberleşme yapabilen kullanıcıların enerji hasat süresi ne kadar uzun olursa, bit aktarımında bu enerji kullanılabileceğinden o kadar yüksek veri hızı elde edilebilir [7]. Zaman çerçevesinde planlanan periyot süresi 1 saniye alınıp normalize edilmiş değer düşünüldüğünde enerji depolama sırasında veri aktarımı yapılamayacağından, kullanıcıların enerji hasat etme süresini uzun tutması sistem modelinde alıcıya ulaşan toplam bit sayısını ciddi bir şekilde düşürür ve sistem performansı bu durumdan olumsuz etkilenir. Bu problemin üstesinden gelebilmek için özellikle yeni nesil haberleşme sistemlerinde hedeflenen senaryoların gerçekleştirilebilmesi adına kullanıcının baz istasyonundan gelen hazır sinyali modüle ederek alıcıya saçtığı pasif bir haberleşme türü olan çevresel geri saçılım haberleşme sistemi (ÇGSH) önerilmiş ve mevcut halde bulunan kablosuz güç aktarımlı haberleşme sistemlerine entegre edilmiştir [8-10].

Çevresel geri saçılım haberleşme sistemlerinde ağda verici olarak görev yapan kullanıcı, ortamdaki mevcut sinyali kendi haberleşme senaryosunda veri aktarımı için kullandığından, mühim miktarda güç tüketen ve ortaya enerji ihtiyacı çıkaran radyo frekans sinyal üretecine ihtiyaç duymaz. Çevresel geri saçılım haberleşme sisteminde ağda bulunan ve sadece geri saçılım yoluyla iletişimini gerçekleştiren cihaz, bataryasız çalışabildiğinden ve ortamda hazır bulunan sinyalin kendisine ait frekans bandını kullanıp özel bir frekans bandına ihtiyaç duymadığından bu tip haberleşme modelleri geleneksel iletişim ağlarından bahse konu olan özellikleriyle daha üstündür [11-13]. Literatürde yürütülen çalışmalar incelendiğinde çevresel geri saçılım haberleşme sistemlerinin daha çok sensör ağı ve nesnelerin interneti (IoT) gibi özellikle enerji ihtiyacının kritik öneme sahip olduğu düşük güçlü iletişim sistemlerinde kullanıldığına şahit olunmaktadır [14-17]. Bununla birlikte veri iletim hızı bakımından sistem performansını daha üst seviyelere çıkarabilmek adına kullanıcının ciddi miktarda enerji gerektiren aktif veri iletimi de yapması elzemdir. Bu açıdan bakıldığında cihazın sadece geri saçılım yapması yerine hem geri saçılım hem de aktif veri iletimini yapabilecek karma bir yapıda olması gerekmektedir. Hibrit yapıdaki bu tür kullanıcıların iç devre modelinde hem batarya hem de enerji hasat devresi bulunmaktadır. Enerji hasat etme işlemi ile doldurulan batarya sonrasında aktif veri iletiminde kullanılmak üzere devreye

alınır [18-20]. Çevresel geri saçılım haberleşme sistemlerinde üzerinde çalışılan ve çözülmeyi bekleyen temelde dört ana problem vardır. Bu problemlerden birincisi, ağa yerleştirilmiş kullanıcı sadece geri saçılım yaptığı takdirde veri hızı düşük kalmaktadır. Bu da ileri haberleşme teknolojileri açısından olumsuz bir durumdur. İkinci olarak, kullanıcının radyo frekans kaynağından uzakta bulunup hem geri saçılım hem de enerji hasadı yaptığı durumda mesafeden ötürü depolanan enerji çok düşük düzeylerde seyretmektedir. Üçüncüsü, şayet ortamda kullanılabilir bir sinyal bulunamazsa geri saçılım yoluyla veri aktarımı gerçekleştirilemeyeceğinden, tasarlanan sistem modelinin alıcıya ulaşan bit sayısı bakımından performansı ciddi manada düşebilmektedir. Son olarak, ortamdaki mevcut sinyallerin dinamik yapısı ve zaman içindeki değişkenliği, düşünülen sistem modeli için kontrol edilebilir olmadığından bir problem olarak önümüze çıkmaktadır. Bu sorunların üstesinden gelebilmek için çevresel geri saçılım haberleşme sistemleri, bilişsel radyo ağları ile birlikte düşünülmüş, sistem performansını artırmak için çeşitli haberleşme konfigürasyonları ele alınıp analiz edilmiştir [21-24].

Bilişsel radyo ağları (CRNs), hali hazırda haberleşme protokolünü gerçekleştiren mevcut sistemlerin alt yapısını ve frekans bandını kullanan ve bir başka alt sistem kurup bu sistemde alıcı olarak görevlendirilen cihaza doğru veri akışını gerçekleştiren bir iletişim modelidir [25-28]. Bu noktada mevcut sisteme birincil kanal (PC), mevcut sistemin üzerine inşa edilen alt sisteme de ikincil kanal (SC) denilmektedir. Ana sistemin alt yapısından faydalanma türüne göre ve sunulan modelin karakteristiğine bağlı olarak kullanılabilecek birçok bilişsel radyo ağı vardır. Bu tez çalışmasında literatürde pek çok çalışmada ele alınmış üstüne kurulan ve altına kurulan bilişsel radyo ağları tercih edilmiştir. Altına kurulan modelde birincil kanaldaki verici yayınını kesintisiz gerçekleştirirken, üstüne kurulan bilişsel radyo ağlarında, birincil kanalda sistemin sinyal yayıcı rolündeki vericisi, zaman çerçevesinde belli bir süre yayın yapmayıp susar. Boşta kalma süresi olarak değerlendirilebilecek bu zaman, ikincil kanaldaki kullanıcıların aktif veri iletimi yapması için bir fırsat olarak görülebilir. Üstüne kurulan bilişsel radyo ağında, mevcut sistemin üzerine kurulan alt sistem, birincil kanalın sessiz kaldığı süreyi aktif veri iletimi için kullandığından ikincil kanal kullanıcıları, birincil kanalın alıcısına bir girişim oluşturmaz. Böylece bu periyotta sinyal girişiminin getirebileceği olumsuzluklardan da kurtulabiliriz. Buradan şu kritik yorum yapılabilir. İkincil kanalın alıcıya ulaşan bit sayısı bakımından performansı, birincil kanaldaki baz istasyonunun sessiz kalma ve meşgul olma süreleriyle birlikte baz istasyonu verici gücüyle de doğrudan ilişkilidir. Ayrıca mevcut sistemin üstüne tasarladığımız haberleşme modelinin

başarımını etkileyecek ve kurguladığımız ağın matematiksel forma dönüştürülmüş şeklinde mühim role sahip sistem parametreleri, PT'nin sinyal iletim gücü ve boşta kalma süresi gibi parametrelerle birlikte dikkate alınarak sistem başarımı tahkik edilmelidir. Örneğin, PT'nin yayın süresinin çok uzun olması, her ne kadar ikincil kanaldaki kullanıcıların geri saçılım yoluyla gönderdiği bilgiyi ve hasat edilen enerjiyi artırsa da bu enerjinin kullanılabileceği aktif veri iletim süresi kısaldığından iletilen bit sayısının ciddi şekilde düşmesine neden olur [29-30].

Literatürde yürütülen çalışmalarda çevresel geri saçılım haberleşme, enerji hasadı ve bilişsel radyo ağlarının birlikte kullanıldığı ÇGSH tabanlı bilişsel radyo ağlarının performansı genellikle tek kullanıcı ve bir alıcıya sahip sistemler üzerinde bulunmaya çalışılmış, böylece sistem karmaşıklığı minimize edilmiştir. Ek olarak bu tip modellemelerde kullanıcıdan alıcıya gönderilen veri, aracısız ve başka yardımcı cihazlar kullanılmadan geri saçılmaktadır. Fakat bu modellemeler veri iletim hızı, çevredeki mevcut sinyallerin enerjisinden faydalanma ve sistemin kanal kapasitesinin artırılması bakımından yetersiz kalabilmektedir. Gerçek hayatta uygulanabilirliği açısından yeni nesil haberleşme tekniklerine ivme kazandırmak adına bu konu özelinde yürütülen son çalışmalarda, mevcut yaklaşımlara ek olarak işbirlikçi iletişim ağları eklenmiş ve sistemin performansı artırılmıştır [31-34].

İşbirlikçi ağ yapılarında sistem performansını artırmak için genellikle röle adı verilen ve vericiden gelen bilgiyi alıcıya aktarmada görev alan kullanıcılar yer alır. Röle, alıcıya kullanıcıdan daha yakın konumlandırılır ve kodu çöz-sonra-ilet (decode-then-forward, DF protocol) protokolünü kullanarak görevini tamamlar. Böylece alıcıdan uzakta bulunan bir kullanıcı, röle sayesinde yüksek bit hızıyla haberleşmesini gerçekleştirir [35-38].

5G ve ötesi sistemleri, yüksek veri hızı ve kısa gecikme süresine sahip düşük güçlü kablosuz haberleşme sistemlerinin geniş çapta dağılımını desteklemektedir. Özellikle büyük ölçekli nesnelerin interneti gibi yeni nesil iletişim ağlarında yüksek spektral ve enerji verimliliği sağlayan ve gelecek vaat eden ÇGSH tabanlı bilişsel radyo ağlarının, zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA) ve dikgen olmayan çoklu erişim (NOMA) tekniğini kullanarak veri alışverişini gerçekleştirmesi, akademideki araştırmacıların üzerinde çalıştıkları konuların başında gelmektedir [21, 39]. TDMA tekniği, bu tip sistemlere rahat uygulanabiliyor olduğundan ve kullanıcılar arası girişimi engellediğinden tercih edilmektedir. NOMA tekniği ise birden çok kullanıcının aynı anda veri aktarmasına imkân tanır. NOMA

tekniğinde kullanılan ardışık girişim giderici (successive interference cancellation, SIC) ve süperpozisyon yöntemleri, birden fazla hücrede bulunan kullanıcının aynı spektrum/zaman kaynakları üzerinden iletişim kurmasına olanak tanır ve böylece hizmet verilen cihazların sayısını önemli ölçüde artırabilir. Kullanıcıların sinyal iletim gücü ayarlanarak kullanıcılar arasında adalet sağlanabilir.

Bahsi geçen yeni nesil haberleşme sistemleri, akıllı ev, akıllı şehir, akıllı tarım, sağlık sektörü ve insansız hava araçlarının geniş bir alanda uygulanabilirliği konularında umut vadetmektedir. Sensörlerin geniş bir alanda faaliyet göstermesinde kullanıcılara enerji temini konusu yüksek maliyetleri de beraberinde getirir. Ayrıca duvarların içine yerleştirilen, ekili arazilere konumlandırılan, mayınlı bölgelerde faaliyet gösteren sensörlere güç sağlamak ve bakımlarında pil değişikliği yapmak çok zordur. Bu noktada sürekli ve yeterli bir hizmetin verilebilmesi için ÇGSH tabanlı bilişsel radyo ağları oldukça popüler bir yöntemdir. Pasif bir haberleşme olan geri saçılım tekniğiyle, akıllı şehir uygulamalarında belirli bölgelere yerleştirilen cihazlardan veri toplamak ve enerjisi kısıtlı sensörlerle yüksek veri hızında hizmetler sağlamak mümkündür [40]. Burada dikkat edilmesi gereken durum, haberleşme ağında sistem tasarımcısı tarafından belirli yerlere konumlandırılmış her bir cihazın, zaman çerçevesinde bir periyotta aktif veri iletimi, geri saçılım ve enerji hasat işlemini ne kadar süreyle gerçekleştireceğinin bulunması mevzusudur ve bu konu kablosuz güç aktarımlı karma kullanıcıya sahip geri saçılım haberleşme sistemlerinde bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Eğer üzerinde çalışılan sistem bir veya iki değil de çok kullanıcılı bir model ise, değişken sayısının artmasıyla belirtilen zamanları bulma ve problemi çözme daha karmaşık hale gelmektedir [12].

Bu tez kapsamında dört farklı model önerilmiş olup aşağıda verilen çalışmalar gerçekleştirilmiştir:

1-) Ele alınan ilk model, heterojen bilişsel radyo ağları için ÇGSH tabanlı röle kullanan işbirlikçi bir sistem modelidir. Temel amacımız, birden çok röle ve kullanıcı yerleştirilerek tasarlanan karmaşık yapıdaki bu ağı matematiksel olarak modellemek ve literatürdeki benzer çalışmalarda ulaşılan bit iletim hızlarını aşabilmektir. İncelenen model, kullanıcıların hem TDMA hem de NOMA haberleşme tekniğini bir arada kullandığı, birden çok rölenin görev aldığı işbirlikçi bir sistem olması bakımından başarım analizinin gerçekleştirildiği literatürdeki ilk çalışmadır. Bu sistemde öncelikle tasarlanan zaman çerçevesi temelinde

matematiksel denklemler çıkartılmış, akabinde bir optimizasyon problemine dönüştürülüp sistemin karakteristik özellikleri sunulmuştur. Sistemin performansını maksimize etmek için her bir kullanıcıya özel olan aktif veri iletimi, geri saçılım ve enerji depolama süreleri bulunmuş ve sistemde alıcıya gönderilen bit sayısı maksimize edilmiştir. İkincil kanalın sistem performansı, birincil kanalın yayın yapmayıp boşta kaldığı süre, her bir kullanıcının geri saçılım hızı ve kullanıcı-röle sayısının değişimine göre değerlendirilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre önerilen işbirlikçi bu sistem modeli ile ikincil kanalın performansı önemli ölçüde artmıştır.

2-) İkinci modelde, röle ve sinyal bozucu altında ÇGSH tabanlı bilişsel bir radyo ağı önerilmiştir. Dışarıdan gelebilecek saldırılara karşı sistemin performansının nasıl değiştiğinin analiz edilmeye çalışıldığı bu bölümde, iki farklı ağ üzerinden çalışmalar yürütülmüştür. Röle, kullanıcı sayısı ve sinyal bozucunun varlığında alıcıya ulaşan bit sayısı maksimize edilip ağ başarımı iyileştirilmiştir. Mevcut konu kapsamında sinyal bozucunun bu tip haberleşme sistemleriyle birlikte düşünüldüğü çalışma sayısı oldukça az olduğundan, önerilen modeller sonuçları bakımından literatüre katkı sağlamıştır.

3-) Üçüncü modelde, çift yönlü erişim noktasının (full duplex HAP) kullanıldığı hücresel bir sistem modeli ele alınmıştır. Ağa harici bir alıcı tahsis etmeyerek kullanıcılardan gelen bilgilerin, kullanıcılara sürekli sinyal iletimi yapan HAP'ta toplanması sağlanmıştır. Sistemin bit iletim hızının maksimize edilmeye çalışıldığı bu modelde kullanıcılara tahsis edilecek en uygun süreler, Karush-Kuhn-Tucker (KKT) tekniği ile bulunmuştur. Önerilen bu model ile elde edilen bulgular, 5G ve ötesi ağ yapılarında birden çok kullanıcının yer alacağı karma haberleşme sistemlerinin temelini oluşturacak sonuçları içermesi bakımından önemlidir.

4-) Dördüncü model, ÇGSH tabanlı altına kurulan bilişsel radyo ağının düşünüldüğü bir sistemdir. Birincil kanaldaki vericinin yayınını hiç kesmediği bu senaryoda, ikincil kanaldaki kullanıcılar bu durumu dikkate alarak alıcıya veri aktarımı yapmaktadırlar. Sistemin kanal kapasitesinin maksimize edilmeye çalışıldığı bu model, matematiksel denklemler ile ifade edildikten sonra belli kısıtlara sahip bir optimizasyon problemine dönüştürülmüştür. Problemin amaç fonksiyonunu maksimum değere getirecek sistem parametreleri nümerik analizler ile bulunmuştur. Daha sonra farklı senaryolar altında sistem performansı karşılaştırmalı olarak grafiklerde gösterilmiştir.

Bu tez dokuz bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde çevresel geri saçılım haberleşme ile ilgili genel ve teknik bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde kablosuz haberleşme

sistemlerinde kullanılan enerji hasat etme tekniği açıklanmıştır. Dördüncü bölümde bilişsel radyo ağları üzerinde durulmuş olup bu ağların ÇGSH ile birlikte kullanımı konusunda açıklamalar mevcuttur. Beşinci bölümde röle ve sinyal bozucu varlığında ÇGSH tabanlı bilişsel radyo ağının yapısı verilmiştir. Altıncı bölümde ele alınan konu kapsamında literatürde yapılmış çalışmalara değinilmiştir. Yedinci bölümde tez kapsamında önerilen dört farklı sistem modeli ele alınmış olup, her bir ağ yapısının çalışma prensibi ayrı başlıklarda matematiksel olarak ifade edilmiştir. Sekizinci bölümde, sunulan modellerin simülasyon sonuçlarına yer verilmiş ve son olarak dokuzuncu bölümde sonuç kısmı ile tez sonlandırılmıştır.

2. ÇEVRESEL GERİ SAÇILIM HABERLEŞME

1948 yılında Harry Stockman tarafından öne sürülen ve teorik temellere dayandırılan geri saçılım haberleşme sistemleri, son zamanlarda düşük güçle çalışan kablosuz iletişim sistemleri ve nesnelerin interneti gibi yeni nesil haberleşme sistemlerini kapsayan 5G ve ötesi uygulamalarda oldukça ilgi görmeye başlamıştır [1-2]. 5G ve ötesi alanında yapılan çalışmalar, çok sayıda kullanıcının birbirleriyle düşük güç ve yüksek veri hızında haberleşme yapabilmesine yoğunlaşmıştır. Çok sayıda kullanıcının var olduğu yeni nesil iletişim sistemlerine gerekli enerjiyi sağlamak büyük bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Mevcut geleneksel haberleşme sistemleri ile bu hedeflerin karşılanması pek mümkün değildir. Bu sebeple veri aktarımını pasif bir şekilde gerçekleştirecek, ortaya çıkacak yüksek miktardaki enerji ihtiyacını mümkün olduğu kadar minimize edecek, ayrıca yeni sistem modelleri ile yüksek veri iletim hızlarına erişebilecek geri saçılım haberleşme sistemi önerilmiştir. Esasında geri saçılım haberleşme, hâlihazırda Radyo Frekanslı Tanılama (Radio Frequency Identification, RFID) sistemlerinde kullanılmaktadır [41-42]. Burada kullanılan yöntem sadece alıcı (tag)-verici (reader) arasındaki ilişkiye bağlı olup, vericinin gönderdiği sinyalin alıcı tarafta geri saçılarak pasif bir yolla sinyalin tekrar verici antene gönderilmesi olayıdır.

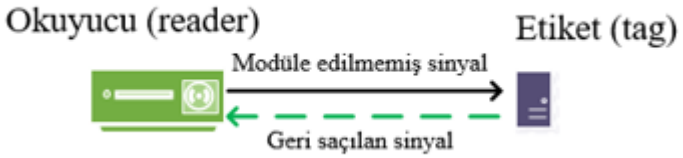
Geleneksel iletişim sistemlerinden farklı olarak geri saçılım haberleşme sisteminde sinyal iletimi yapacak kullanıcı, iç devre yapısında ciddi miktarda güç tüketebilen radyo frekans üreteci, yükselteç gibi elektronik elemanlara sahip değildir. Dolayısıyla düşük enerji ile yüksek veri hızında iletişimin gerçekleşmesi hedefine pasif bir iletişim türü olan geri saçılım haberleşme ile ulaşılabileceği fikri birçok araştırmacının üzerinde durduğu konulardan biridir [9].

Geri saçılım haberleşme ağında görev alan kullanıcı, kendisine gelen sinyalin karakteristik özelliklerine bağlı kaldığından aktif bir radyo frekans üreteci kullanmaz. Gelen sinyalin saçılarak bilgi iletiminin gerçekleşmesi, haberleşme protokolünün yüksek veri hızında yapılması hedefine ulaşma noktasında problem oluşturabilmektedir. Bu yüzden sistemin hibrit ağ yapıları ile birlikte kullanılması düşünülmüştür [43].

Temelde geri saçılım haberleşme modelleri üç bölüme ayrılır.

a-) Monostatik geri saçılım haberleşme:

Monostatik geri saçılım ağ konfigürasyonu, Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Bu yapı, RFID etiket ve okuyucu arasındaki iletişimi esas alan ve geri saçılım haberleşmenin temelini oluşturan modeldir. Burada kullanıcılar tarafından herhangi bir enerji hasat işlemi olmamaktadır. Sadece pasif bir haberleşme ile protokol tamamlanmaktadır. Okuyucu, etikete doğru modüle edilmemiş sinyali gönderir. Etiket, kendisine gelen sinyali anten empedans uyumsuzluğundan faydalanarak geri saçar. Geri saçılım işleminde basit modülasyon tekniğiyle etiket bilgisi, saçılan sinyale bindirilir. Bilgi taşıyan geri saçılım sinyali okuyucuda çözülür, ardından bilgi elde edilerek iletişim tamamlanır. Bu tip bir haberleşme uygulamasında kullanıcılar arasındaki mesafe kısa tutulmaktadır. Aksi halde sinyaldeki zayıflama, okuyucu tarafında bilginin tekrar elde edilememesine yol açar.



Şekil 2.1. Monostatik geri saçılım haberleşme.

b-) Bistatik geri saçılım haberleşme:

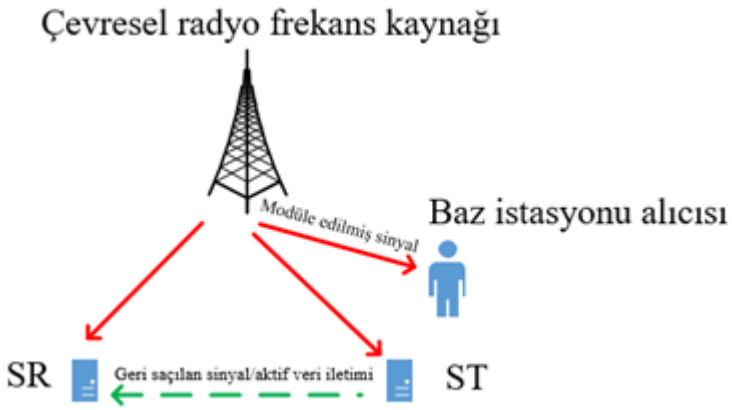
Bistatik geri saçılım haberleşme sistemlerinde, monostatik yapıdan farklı olarak enerji hasat etme işlemi söz konusudur. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi baz istasyonu tarafından her iki kullanıcıya sinyal iletimi olmaktadır. Bu sinyal ile enerji hasadı yapan kullanıcılar, içyapılarındaki devre enerji tüketimini karşılayabilmektedir. Baz istasyonu burada alıcı olarak görev yapmaz. Sadece mevcut sisteme enerji akışını sağlar. ST kullanıcısı, baz istasyonundan gelen sinyali geri saçarak SR'ye gönderir. Bu sistem modeli alıcıya ulaşan veri sayısı açısından değerlendirilirse sistem parametrelerinin en uygun değerlerini bulma işlemi, monostatik geri saçılıma göre daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Ayrıca ağa özel tahsis edilmiş baz istasyonundan ötürü de daha maliyetlidir. Buna rağmen hem haberleşme mesafesi hem de veri hızı bakımından çok daha iyi sonuçlar alınabilmektedir.



Şekil 2.2. Bistatik geri saçılım haberleşme.

c-) Çevresel geri saçılım haberleşme:

Literatürde en çok kullanılan ve üzerinde en fazla çalışılan geri saçılım haberleşme türüdür. Bilişsel radyo ağlarına uygulanabilirliği açısından sistem performansını artırmaya yönelik pek çok araştırma yapılmıştır. Şekil 2.3'te ağ modeli gösterilmiştir. Çevrede hazır bulunan FM, TV ve WiFi erişim noktası gibi baz istasyonlarının sinyali kullanılarak iletişim gerçekleştirilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, baz istasyonunun alıcısına girişim oluşturmayacak şekilde ST-SR arası bir haberleşme linki oluşturmaktır. ST ve SR'den oluşan ikincil kanal, baz istasyonu kanalını kullandığından harici bir haberleşme altyapısına ihtiyaç duymamaktadır. Bu durum ikincil kanalın tasarlanmasında gereken maliyeti düşürmektedir. Baz istasyonunun kendi alıcısına gönderilen sinyal modüle edilmiş olduğundan, ST'nin modüleli sinyali kullanarak kendi bilgisini ekleyip SR'ye iletmesi uygulamada karşılaşılan zorluklardan biridir. Ayrıca baz istasyonunun ikincil kanal kullanıcılarına uzak olması sistem başarımını düşürmektedir.

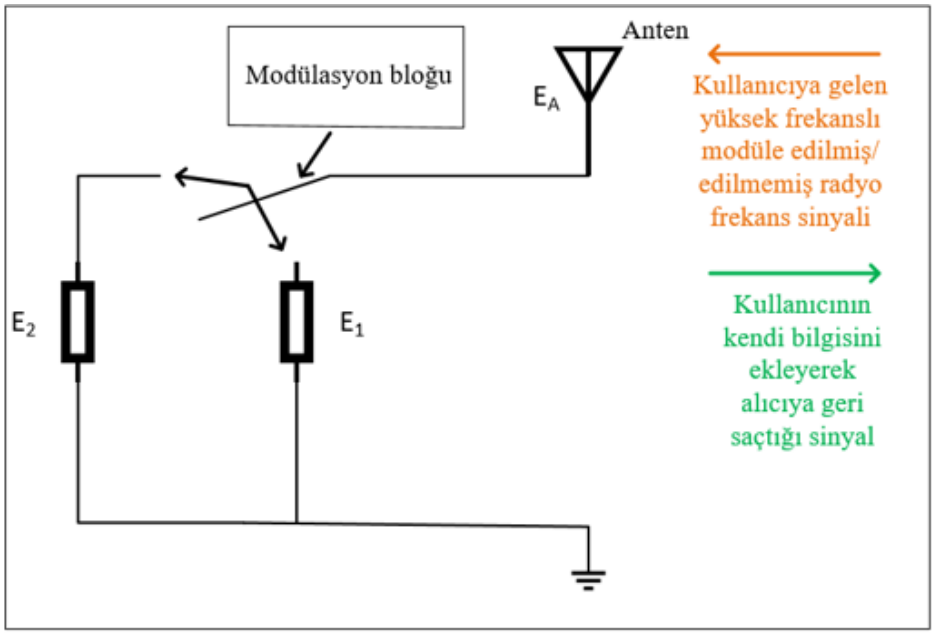


Şekil 2.3. Çevresel geri saçılım haberleşme.

Geleneksel iletişim sistemlerinde tasarlanan antenin yüksek verimlilik ile çalışabilmesi için empedans uyumluluğunun olması elzem bir meseledir. Kabul edilen bu durumun aksine çevresel geri saçılım haberleşme sistemlerinde anten empedans uyumsuzluğu oluşturularak antene gelen sinyalin bir kısmı geri saçılıp kalan kısmı da anten tarafından absorbe edilir. Tam bu esnada, klasik modülasyon teknikleri yardımıyla kendi bilgisini saçılan sinyal üzerine bindiren verici, alıcıya doğru bit aktarımını icra eder. Sinyale ne tür modülasyon uygulanacağını belirleyen anten yansıma katsayısının yük ve anten empedansı ile ilişkisini veren Eş. 2.1, aşağıda verilmiştir [44].

$$\Gamma = \frac{E_Y - E_A^*}{E_y + E_A^*} = |\Gamma| e^{j\theta} \tag{2.1}$$

Yukarıda verilen eşitlikte antene bağlı olan yük empedansı E_y, anten empedansı E_A, karmaşık eşlenik operatörü * ile gösterilmiştir. Çevreden alıcı antene doğru gelen sinyal $S_c(t)$ ise antenden geri saçılan sinyal $S_b(t) = S_c(t)\Gamma$ ile ifade edilebilir. Denklemden görüleceği üzere anten empedansının eşleniği, yansıma katsayısı açısından ortaya bir genlik ve faz bilgisini çıkarmaktadır. Bu özellik geri saçılım haberleşme sistemlerinde genlik ve faz modülasyon teknikleriyle bilgiyi iletme imkânı sunmaktadır. Geleneksel iletişim sistemlerinde yer alan ve basit bir teorik altyapıya sahip iki durumlu modülasyon, hem tez kapsamında önerdiğimiz sistem modellerinde hem de literatürde mevcut konu özelinde yürütülen birçok çalışmada tercih edilmektedir. Sunulan sistemlerde kullanıcının iki durumlu modülasyon ile veri iletimini gerçekleştirdiği düşünüldüğünde, sistemin performans analizi daha rahat incelenebilmekte ve bulunan sonuçlar daha tutarlı olmaktadır. Şekil 2.4'te çevresel geri saçılım haberleşme sistemlerinde iki durumlu modülasyon gerçekleştiren bir kullanıcının blok yapısı gösterilmiştir. Eğer kullanıcı empedans uyumunu yakalarsa, ortama bit iletimini gerçekleştirecek bir sinyal geri saçılamaz ve bu durum bit 0 şeklinde belirtilebilir. Yük empedansı, modülasyon bloğunun anahtarlama işlemiyle değiştirildiğinde ortaya empedans uyumsuzluğu çıkar ve sinyal geri saçılır. Bu senaryo da bit 1 ile gösterilir. Bahsi geçen konu, geri saçılım haberleşmede kullanılabilecek en temel modülasyon teknikleri arasında yer almasına karşılık literatürde farklı modülasyon tipleri de incelenmiştir [9, 10].



Şekil 2.4. Çevresel geri saçılım haberleşme sisteminde geri saçılım yapan kullanıcıda iki durumlu modülasyon

Çevresel geri saçılım haberleşme (ÇGSH), ortamda mevcut bulunan sinyal kaynaklarının kullanılmasına dayanan bir geri saçılım haberleşme türüdür. Çevredeki kaynaklar TV, FM istasyonu olabileceği gibi, günümüz dünyasında hemen hemen her lokasyonda konumlandırılmış bir WiFi cihazı da olabilmektedir. 5G ve ötesi iletişim sistemi modellerinde, özellikle yüksek veri hızının elde edilmesi, düşük enerjiyle haberleşmenin gerçekleştirilmesi ve alıcıya ulaşan bit sayısının maksimize edilmesi konuları kapsamında ÇGSH alanında pek çok teorik çalışma yapılmış olmasına rağmen, uygulama sahasında birçok problem ile karşılaşılmaktadır. Bu problemler hem ÇGSH sisteminin performansını düşürmekte hem de ağda kullanılacak cihazların tasarımını zorlaştırmaktadır. Başlıca sorunlar aşağıda listelenmiştir:

a-) ÇGSH ile ortamda mevcut bulunan sinyal kullanıldığından, kaynağın sinyal türüne bağlılık oldukça fazladır. Bu durum kullanıcı tasarımını zorlaştırmaktadır.

b-) TV ve FM gibi baz istasyonlarının konumlarına müdahele edilemediğinden haberleşme yapılabilecek alan daralmaktadır ve veri hızı düşmektedir.

c-) Çevrede kontrol edilemeyen bu sinyaller zamanla değişkenlik gösterebilmektedir.

d-) Çevredeki sinyaller kullanılarak gerçekleştirilen ÇGSH sisteminde kullanıcıların, sinyal yayılımı yapan asıl vericinin kendi alıcısına doğru girişim yapmamayı garantilemesi gerekmektedir.

e-) Sistem, dışarıdan gelebilecek istenmeyen dinleme, sinyal bozma gibi girişimlere karşı oldukça savunmasızdır.

Tüm bu zorlukların üstesinden gelebilmek için literatürde ÇGSH tekniği ile ilgili araştırmalar halen devam etmektedir [2]. Bu tez kapsamında özellikle b-), d-) ve e-) maddeleri ile alakalı çalışmalar yapılmış, yeni sistem modelleri önerilmiş ve sonuçlar analiz edilmiştir.

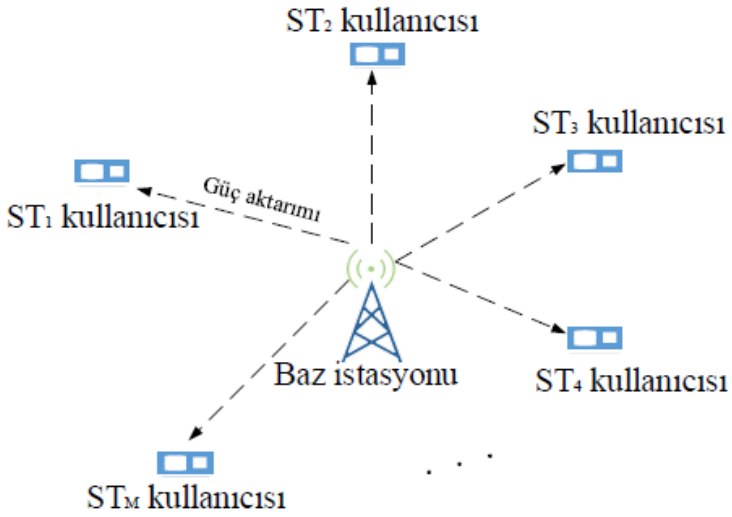
3. KABLOSUZ AĞLARDA ENERJİ HASADI TEKNİĞİ

Güneşten ve rüzgârdan faydalanılarak gerçekleştirilen geleneksel doğal enerji hasadı teknikleri, çevresel kısıtlamalar nedeniyle istikrarlı bir güç kaynağı olarak kullanılamamaktadır. Buna karşılık, radyo frekansından enerji hasat etme teknolojisi çevreden daha az etkilendiğinden ve diğer tekniklere nazaran daha istikrarlı ve kontrol edilebilir olduğundan bilim insanlarının ilgisini çekmiştir [45-50].

Birçok cihazın harici bir enerji temini olmadan birbirleriyle iletişim kurabildiği ağ modeli, özellikle yeni nesil iletişim sistemlerinde temel amaçtır. Ortaya çıkan bu enerji ihtiyacının karşılanması enerji hasat etme teknikleriyle çözülebilmektedir. Literatürde mevcut 3 çeşit enerji hasat etme tekniği vardır.

3.1. Kablosuz Olarak Sadece Güç Transferi:

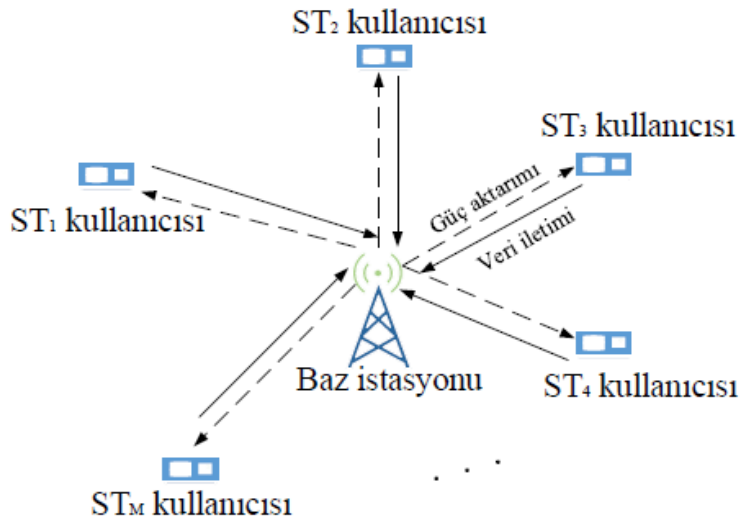
Bu model Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Bu yöntemde her bir kullanıcıya ulaşan sinyal ile sadece enerji hasadı yapılmaktadır. Böylece cihaz gerekli olan enerji ihtiyacını baz istasyonundan sağlar. Kablosuz olarak sadece güç transferinin yapıldığı bu model, yakıt kullanımına ihtiyaç duymayan elektrikli arabalarda, batarya değişiminin zor olduğu ve bu yüzden kablosuz güç transferinin gerektiği vücut içine yerleştirilen cihaz gibi tıbbi alanlarda kullanılabilmektedir.



Şekil 3.1. Kablosuz olarak sadece güç transferi ağ modeli.

3.2. Kablosuz Güç Kullanarak Gerçekleştirilen Haberleşme Modeli:

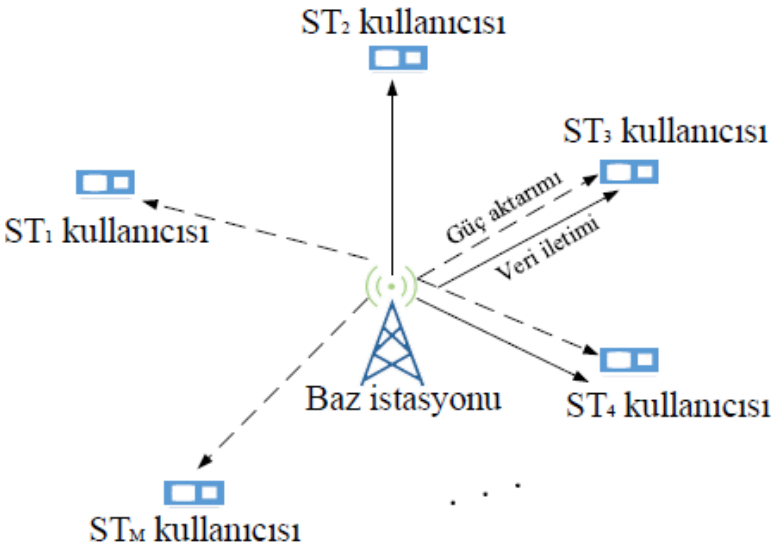
Şekil 3.2'de gösterilen modelde baz istasyonu hem verici hem de alıcı gibi görev yapmaktadır. Sürekli sinyal gönderimi yaparak kullanıcıya enerji hasat etme imkânı tanıyan güç istasyonu, aynı kullanıcıdan gelen bilgiyi alabilmektedir. Bu tip bir istasyon çift yönlü erişim noktası (full-duplex, HAP) olarak adlandırılmaktadır. Sistemdeki kullanıcı hasat ettiği enerjiyi sadece kendi iç devre yapısında kullanmak üzere harcamaz, aynı zamanda baz istasyonuna doğru sinyal iletiminin gerçekleştirilebilmesinde de kullanır.



Şekil 3.2. Kablosuz güç kullanarak gerçekleştirilen haberleşme modeli.

3.3. Eş zamanlı Olarak Bilgi ve Güç İletim Modeli:

Bu model hibrit bir yapıya sahip olup Şekil 3.3'te verilmiştir. Literatürde, eş zamanlı kablosuz bilgi ve güç iletimi (simultaneously wireless information and power transfer, SWIPT) şeklinde adlandırılmaktadır [51-53]. Baz istasyonu tarafından kullanıcılara enerji gönderiminin yanı sıra bilgi de iletilerek iki farklı görev yerine getirilmektedir. Kullanıcının, zaman periyodunda ne kadarlık süre enerji hasadı yapacağı, ne kadarlık süre baz istasyonundan gelen bilgiyi çözeceği problemi, sistem performansı ve enerji verimliliği açısından ayrıca değerlendirilmesi gereken bir konudur.



Şekil 3.3. Eş zamanlı olarak bilgi ve güç iletim ağ modeli.

4. BİLİŞSEL RADYO AĞLARI VE ÇEVRESEL GERİ SAÇILIM HABERLEŞME TEKNİĞİ İLE BİRLİKTE KULLANIMI

Yüksek veri hızlı uygulamalara ve internet hizmetine olan talebin artması, spektrum kaynaklarının daha verimli kullanılması ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Bu bağlamda, tasarlanan sistemin parametrelerini, haberleşme ortamının karakteristik özelliklerine göre ayarlayabilen bilişsel radyo ağları, literatürde üzerinde çokça durulan konular arasında yerini almıştır [54-55].

Haberleşmenin gerçekleştirildiği mevcut sistemlerin frekans, bant genişliği ve teknik iletişim altyapısından faydalanmayı hedefleyen bilişsel radyo ağları, birincil kanal (primary channel, PC) ve ikincil kanaldan (secondary channel, SC) oluşmaktadır. Birincil kanal mevcut sistem olup ikincil kanal tarafından kullanılmaktadır. İkincil kanala konumlandırılmış ikincil verici (ST) ve ikincil alıcı (SR), birincil kanaldaki birincil vericinin (PT) sinyalini kullanarak haberleşmektedir. PT, kendi alıcısı PR'ye veri iletimini yaparak PR'ye ulaşması gereken bit sayısını karşılamaktadır. ST, PT'nin sinyali ile geri saçılım yaparak düşük enerjili bir haberleşme gerçekleştirirken, aynı zamanda performansı artırmak için enerji hasadı yaparak aktif veri iletimi ile ikincil kanalın başarımını üst noktalara çıkarabilmektedir.

Bilişsel radyo ağları, üstüne kurulan ve altına kurulan olmak üzere iki temel yaklaşıma sahiptir. Üstüne kurulan yapıda PT, zaman çerçevesinin bir bölümünde sessiz kalır. Sessiz kalınan sürede ikincil kanal devreye girer ve ST, SR'ye bilgi iletimi yapar. PT'nin yayın yapmadığı sürede geri saçılım yapılamayacağından ST, daha önceden hasat ettiği enerjiyi kullanarak aktif veri iletim yoluyla sinyal gönderiminde bulunur. Altına kurulan ağ modelinde PT, sinyalini PR'ye kesintisiz gönderir. İkincil kanal sadece geri saçılım ile veri aktarımına devam ederse ikincil kanalın alıcıya ulaşan bit sayısı bakımından performansı çok düşük kalacağından aktif veri iletiminin de hesaba katılması gerekir. Bu yüzden aktif veri iletimi sırasında ST'nin sinyal iletim gücü, belli bir eşik değerin altından tutularak PR'de oluşabilecek olası bir girişimin önüne geçilmiş olur.

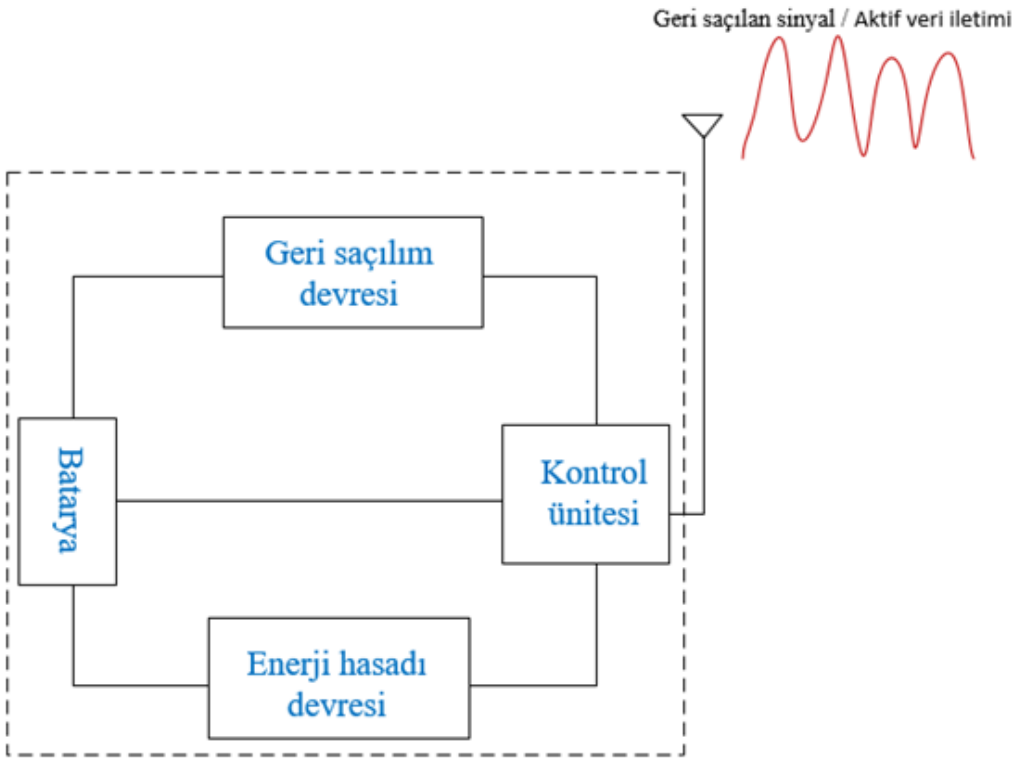
Bilişsel radyo ağlarında ikincil kanaldaki kullanıcıların hasat ettiği toplam enerjinin ve geri saçılım-enerji hasadı-aktif veri iletimi sürelerinin bulunması üzerinde durulması gereken önemli konulardandır.

4.1. İkincil Verici ve İkincil Alıcı İçyapısının Blok Şeması

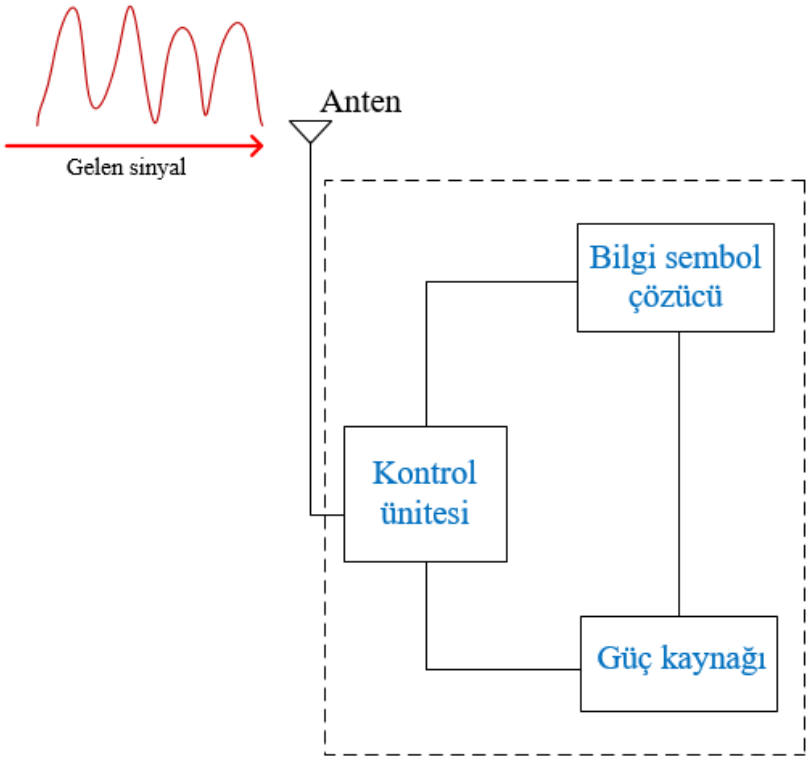
Çevresel geri saçılım haberleşme tabanlı bilişsel radyo ağında kullanılabilecek hibrit bir yapıya sahip ST kullanıcısının içyapısı blok halinde Şekil 4.1'de çizilmiştir. Normalde geri saçılımın etkin olduğu bir pasif haberleşme sisteminde kullanıcı sadece geri saçılım devresine sahiptir. Bu haberleşme yöntemi sayesinde düşük enerji ile veri iletimi gerçekleştirildiğinden, aktif olarak bilgi iletimi için enerji hasadına ihtiyaç duyulmaz. Sadece enerji hasadı-sonra-aktif veri iletimin etkin olduğu tipik bir kablosuz güç aktarımlı bilişsel radyo ağında ise kullanıcı geri saçılım yapmaz ve geleneksel haberleşme sistemlerinde referans alınan teknikler ile alıcıya bilgi akışı gerçekleştirir.

Tez kapsamında, alıcıya ulaşan bit sayısının maksimize edilmesi bakımından performans analizini artırmaya yönelik önerilen sistem modellerinde, ST kullanıcısının hibrit bir yapıya sahip olduğu düşünülmüştür. İçyapıda hem enerji hasat devresi hem de geri saçılım devresi bulunduğundan sistemin başarımını maksimize etmede geri saçılım/enerji hasadı-sonra-aktif veri iletimi arasındaki haberleşme protokollerinin en uygun şekilde ayarlanması büyük önem arz etmektedir. Sunulan sistem modeli kapsamında kullanıcıya her bir haberleşme türü için ne kadar süre tahsis edileceği bulunduktan sonra kontrol ünitesindeki anahtarlama sayesinde devreler arası geçiş yapılabilmektedir.

ST'den gönderilen sinyali alarak bilgiyi tekrar elde eden SR kullanıcısının içyapısı da Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Alıcı tarafında her bir ST'ye karşılık ayrı bir SR kullanılabileceği gibi ikincil kanalda tek bir SR konumlandırılıp iletişim de sağlanabilmektedir. SR kullanıcısının gelen tüm verileri çözme görevi olduğundan devre yapısında güç kaynağı bulundurmaktadır. Sistem modelindeki kullanıcılar veri aktarımında TDMA tekniğini kullandığı takdirde birbirlerine herhangi bir girişim oluşturmayacağından, bilginin tekrar elde edilmesinde SR tarafında daha az enerji harcanmaktadır. Ancak ST kullanıcıları tarafından gönderilen bilgilerin aynı zaman ve frekans ekseninde gönderildiği senaryo olan NOMA tekniğinde, girişim kaçınılmaz olduğundan, SR tarafında ardışık girişim giderici (successive interference cancelation-SIC) tekniği kullanılabilmektedir [39]. Bu işlem için gerekli enerji ihtiyacı güç kaynağından sağlanmaktadır.



Şekil 4.1. Hibrit bir yapıya sahip ST kullanıcısının içyapısının blok halinde gösterimi.

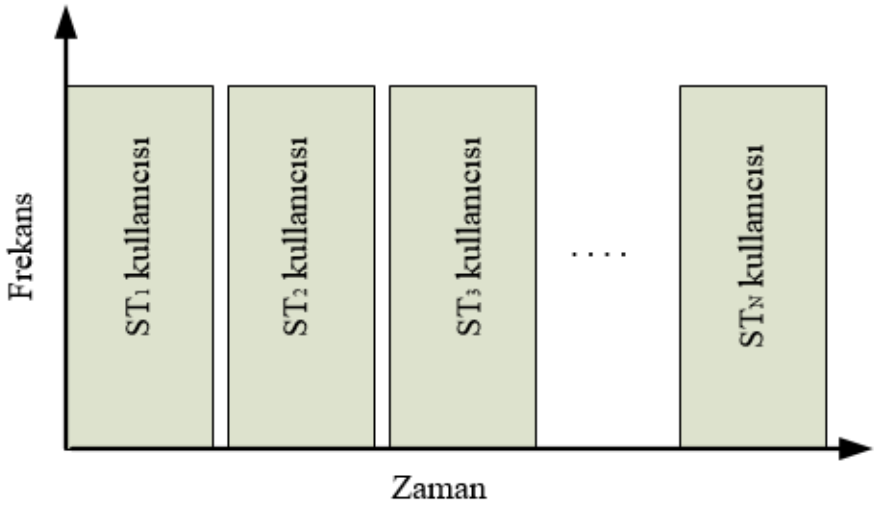


Şekil 4.2. Tipik bir SR kullanıcısının içyapısının blok halinde gösterimi.

4.2. Zaman Bölmeli Çoklu Erişim

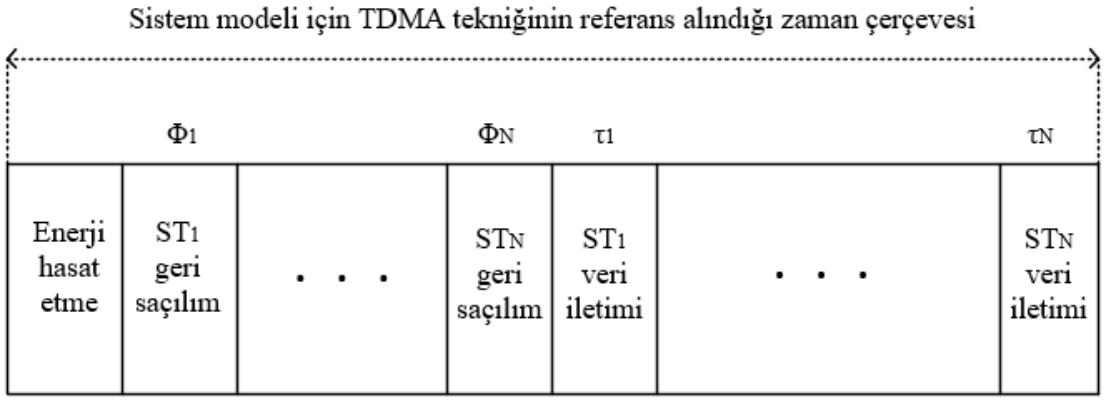
ÇGSH tabanlı bilişsel radyo ağında kablosuz bilgi aktarımı için literatürdeki mevcut çoklu erişim teknikleri kullanılabilir. Buna rağmen uzay bölmeli çoklu erişim (SDMA), frekans bölmeli çoklu erişim (FDMA) ve kod bölmeli çoklu erişim (CDMA) gibi yöntem şemaları, sistem karmaşıklığından ve bu tip modellere uygulanabilirlikleri zor olmasından ötürü geri saçılım haberleşme sistemlerinde pek kullanılmazlar. Genellikle sadece geri saçılım yapabilen cihazların bilgi işlem yetenekleri sınırlıdır. Bu sebeple sistem karmaşıklığı açısından daha basit haberleşme teknikleri kullanılmalıdır. Zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA) şemaları bu noktada düşünülen ve yeni nesil haberleşme sistemlerine uygulanabilirliği açısından üzerinde çokça çalışılan konular arasındadır [11]. Çeşitli yaklaşımlar, geri saçılım haberleşmede en pratik veri iletimi olarak TDMA tabanlı bir sistem modeli benimsemektedir. Bu teknikte kullanıcılar, radyo frekans sinyalinden enerji hasadını kolaylıkla yapabildiği gibi kendilerine tahsis edilen sürede kesintisiz veri iletimini gerçekleştirmeyi de garanti ederler.

TDMA, birden çok kullanıcıya sahip bir iletişim sisteminde alıcıya veri gönderme işleminin her bir kullanıcıya farklı zaman tahsis edilerek gerçekleştirildiği, böylece kullanıcılar arası girişimin engellendiği bir sayısal haberleşme teknolojisidir. Şekil 4.3'te tipik bir TDMA şeması gösterilmektedir. TDMA teknolojisinde kullanıcılar aynı frekans bandında farklı zamanlarda kullanılır. Sistemde her bir kullanıcı aynı bant genişliğini paylaştığı için, aralarındaki senkronizasyonun dikkatli bir şekilde yapılması gerekmektedir.



Şekil 4.3. Zaman-frekans düzleminde TDMA gösterimi.

Şekil 4.4, birden çok kullanıcıya sahip çevresel geri saçılım haberleşme tabanlı bilişsel radyo ağı için örnek bir zaman çerçevesini göstermektedir. Her kullanıcı için ayrı tahsis edilen bir sürede iletişim gerçekleştirilmektedir. Verilen zaman çerçevesinin başından sonuna kadar geçen süre bir tam periyot olarak alınmaktadır. Haberleşme sisteminin yapısına göre süreç, döngüsel olarak tekrar edebilir. Farklı bir döngüsel periyotta kullanıcılara tahsis edilecek süre değişebilir. Bu senaryo dinamik TDMA olarak adlandırılmaktadır. Burada mühim olan durum, sistem parametrelerinin optimal değerlerinin bulunup en uygun sürelerin veri aktarımı yapacak kullanıcılara tahsis edilmesidir. Bahsi geçen konu, tez kapsamında farklı sistem modelleri üzerinden incelenmiştir.



Şekil 4.4. ÇGSH tabanlı bilişsel radyo ağı için örnek bir zaman çerçevesi.

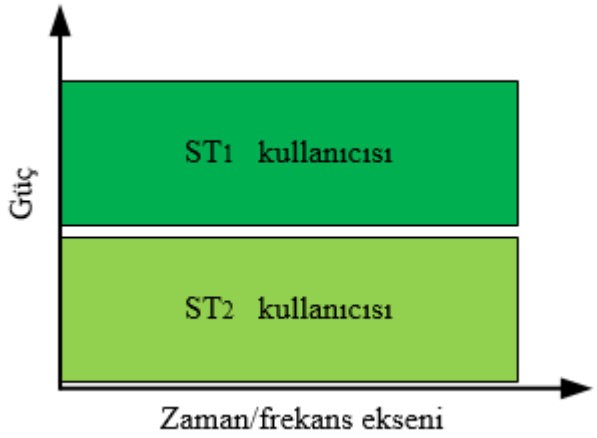
4.3. Dikgen Olmayan Çoklu Erişim

TDMA tekniğinin geri saçılım haberleşme sistemlerine entegre edilmesi, avantajları yanında bazı dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Bunlardan en önemlisi kanal kapasitesinin düşük kalması durumudur. Bu yüzden TDMA tekniğine ek olarak dikgen olmayan çoklu erişim (NOMA) yöntemi son zamanlarda birçok araştırmada ele alınmıştır [3].

NOMA, iki ya da daha fazla kullanıcının bulunduğu haberleşme sisteminde, aynı zaman/frekans ekseninde farklı güç bileşenlerinin kullanılıp bu yöntemle veri aktarımının gerçekleştirildiği çoklu erişim tekniğidir. Şekil 4.5'te tipik bir NOMA şeması gösterilmiştir. Kullanıcıların aynı anda veri gönderimi yaptıkları NOMA senaryosunda, alıcı (SR) tarafta önce yüksek güç bileşenine sahip (en kötü kanal koşullarında bulunan kullanıcı) kullanıcının bilgisi elde edilir. Daha sonra bu bilgi alıcıdaki toplam sinyalden çıkartılarak kullanıcının

sembolüne ulaşılır. İşlem kaç tane kullanıcı varsa bu şekilde devam eder. Bu işlem literatürde ardışık girişim giderici (SIC) olarak adlandırılmaktadır. En sonunda en düşük güç bileşenine sahip (en iyi kanal koşullarına sahip kullanıcı) kullanıcının bilgisi elde edilir. ÇGSH tabanlı bilişsel radyo ağlarında kullanıcıların farklı güç seviyeleri, sistemdeki kanal koşullarının farklı değere sahip olmasıyla elde edilebilir.

Frekans spektrumundan etkin bir şekilde faydalanmaya imkân tanıyan ve sistemdeki kullanıcıların servis kalitesini (QoS) karşılayan NOMA tekniği, sistem performansını üst seviyelere çıkarması açısından geleneksel iletişim yöntemlerine göre daha avantajlı konumdadır.



Şekil 4.5. Tipik bir NOMA şeması.

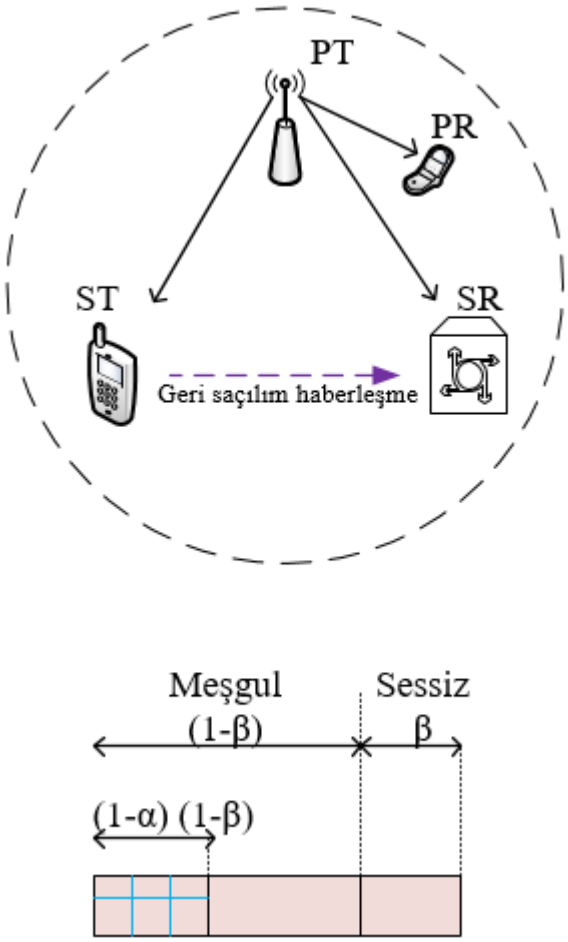
4.4. ÇGSH Tabanlı Bilişsel Radyo Ağı Modelleri

ÇGSH sistemlerinde düşük veri hızı problemini çözmek için ortaya konulan en önemli ağ modellerinden biri de ÇGSH tabanlı bilişsel radyo ağlarıdır. Bu tip bir iletişim sisteminde bulunan kullanıcı sadece geri saçılım yoluyla bilgi iletimi yapmamaktadır. Kullanıcı, sistem için tasarlanmış zaman periyodunda kendisine tahsis edilen bir sürede geri saçılım yaptıktan sonra enerji hasadı yaparak aktif veri iletimi de yapabilmektedir. Kullanıcı, hasat ettiği enerjiyle bataryasını doldurmaktadır. Kablosuz enerji aktarımıyla haberleşmenin gerçekleştirildiği bu sistemde kullanıcı, bilişsel radyo ağının vericisi konumundaki baz istasyonunun sinyalini hem geri saçarak bilgi aktarımı yapmakta hem de sinyalden enerji hasat ederek enerji verimliliğini artırıp aktif veri iletimi için kendisine uygun haberleşme zemini hazırlamaktadır. Böylece daha yüksek veri hızlarına sahip bir ağ modeli

oluşturulmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, kullanıcının alıcıya gönderdiği bit sayısının maksimize edilebilmesi için yeterli miktarda enerji hasadı yapılması durumudur. Enerji hasat etme süresi artarsa, bir periyotta kullanıcıya tahsis edilecek geri saçılım süresi kısalacağından sistemin başarımı düşebilir. Bu süreyi dengeleyebilmek ve enerji hasadı-geri saçılım haberleşme-aktif veri iletimi üçgeninde verimli zaman tahsislerini yapabilmek için literatürde çalışmalar yapılmaya devam edilmektedir.

4.4.1. ÇGSH tabanlı üstüne kurulan bilişsel radyo ağı

Çevresel geri saçılım haberleşme tabanlı üstüne kurulan bilişsel radyo ağında geri saçılım modunun etkin olduğu senaryo ve sistemin zaman çerçevesi Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

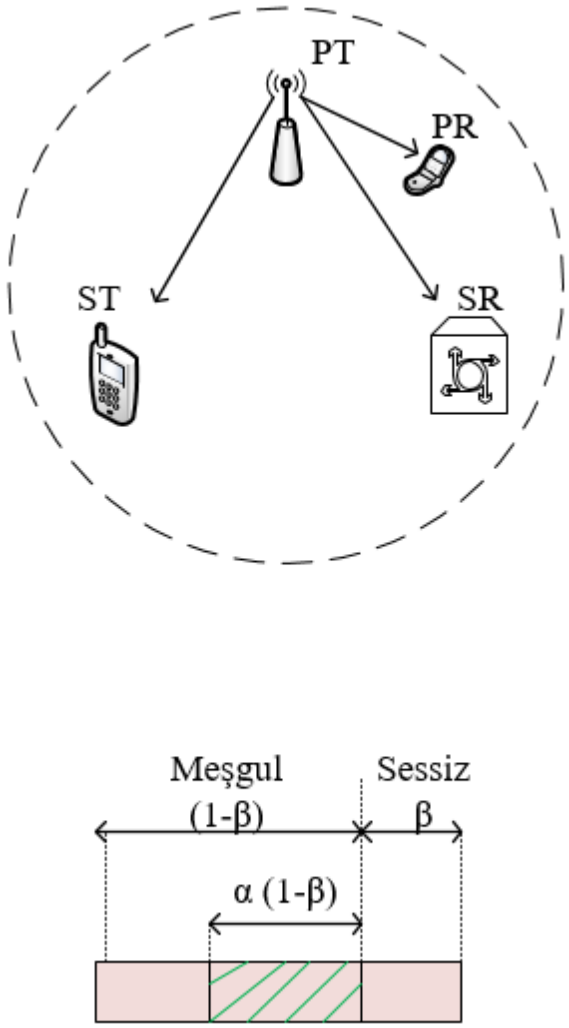


Şekil 4.6. ÇGSH tabanlı üstüne kurulan bilişsel radyo ağında geri saçılım modu.

Birincil kanal (1-β) süresince aktif iken ikincil kanalın vericisi rolündeki ST, PT'den gönderilen sinyali geri saçarak basit kipleme teknikleriyle (1-α)(1-β) süresi boyunca SR'ye

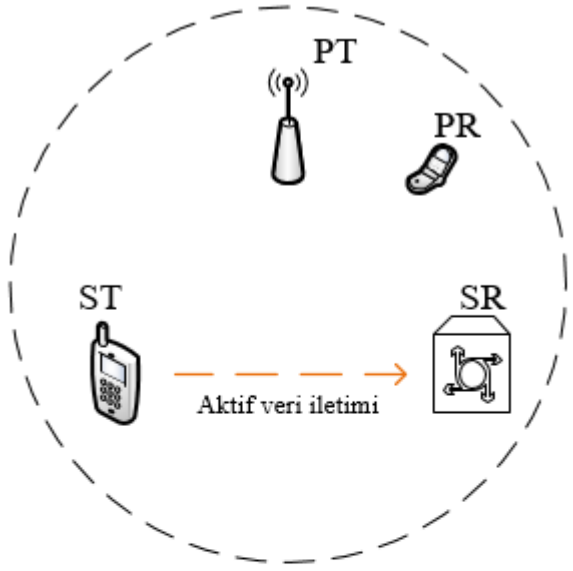
ulaştırır. SR'ye gönderilen geri saçılım sinyalinin düşük bit hızından dolayı PR'de dikkate değer bir girişim görülmemektedir. PT ise ilettiği sinyal ile SR'de girişim oluşturabilmektedir. Dolayısıyla SR, SIC tekniği ile PT sinyalini toplam sinyalden elimine eder ve ST'nin bilgisine ulaşır. Geri saçılım haberleşmenin aktif olduğu bu zaman diliminde ST tarafından hasat edilen enerji, basit devre operasyonları için kullanılmaktadır.

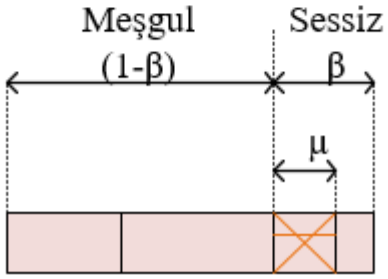
Şekil 4.7'de ise enerji hasadı için ayrılan zamanda kullanıcıların durumları verilmiştir. Burada ST, α(1-β) süresince sadece enerji hasadı yaparak bataryasını doldurmaktadır. Kablosuz güç aktarımlı haberleşmenin temelini oluşturan bu senaryo aktif veri iletimi için gereklidir. PT, yayınını sürdürerek PR ile olan iletişimini devam ettirmektedir.



Şekil 4.7. ÇGSH tabanlı üstüne kurulan bilişsel radyo ağında enerji hasadı.

Zaman çerçevesinin son kısmı olan aktif veri iletim modu, Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, PT'nin yayını kesmesi ve birincil kanalın pasif hale geçmiş olması durumudur. İkincil kanal, bu senaryodan faydalanarak aktif veri iletimi yapar. ST, hasat ettiği enerjiyi kullanıp yüksek sinyal iletim gücüyle μ süresince SR'ye bilgisini iletir. PR pasif halde olduğundan ST tarafında PR'ye yapılabilecek bir girişim matematiksel analizlerde düşünülmez ve ST için sinyal iletim gücü kısıtlamasına gidilmez.



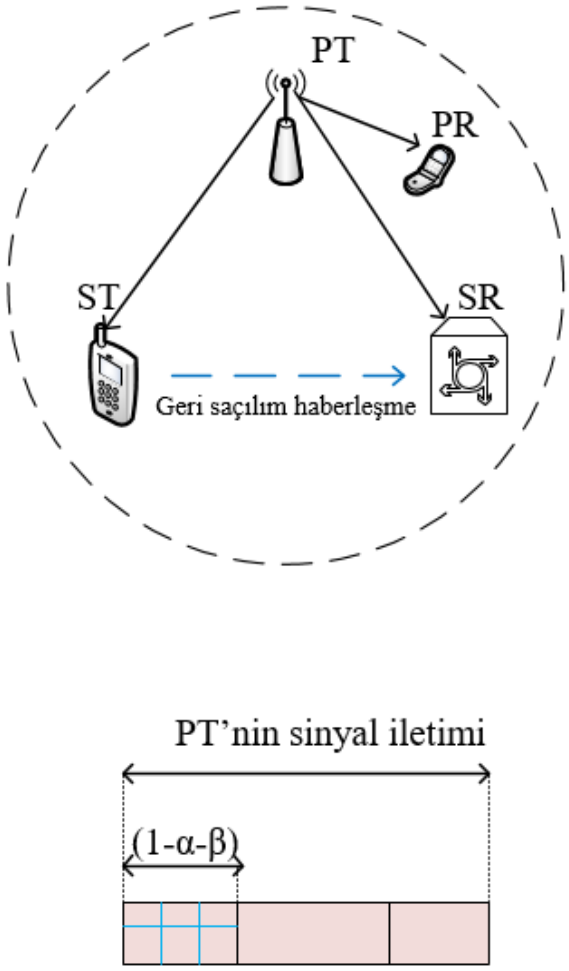


Şekil 4.8. ÇGSH tabanlı üstüne kurulan bilişsel radyo ağında aktif veri iletim modu.

4.4.2. ÇGSH tabanlı altına kurulan bilişsel radyo ağı

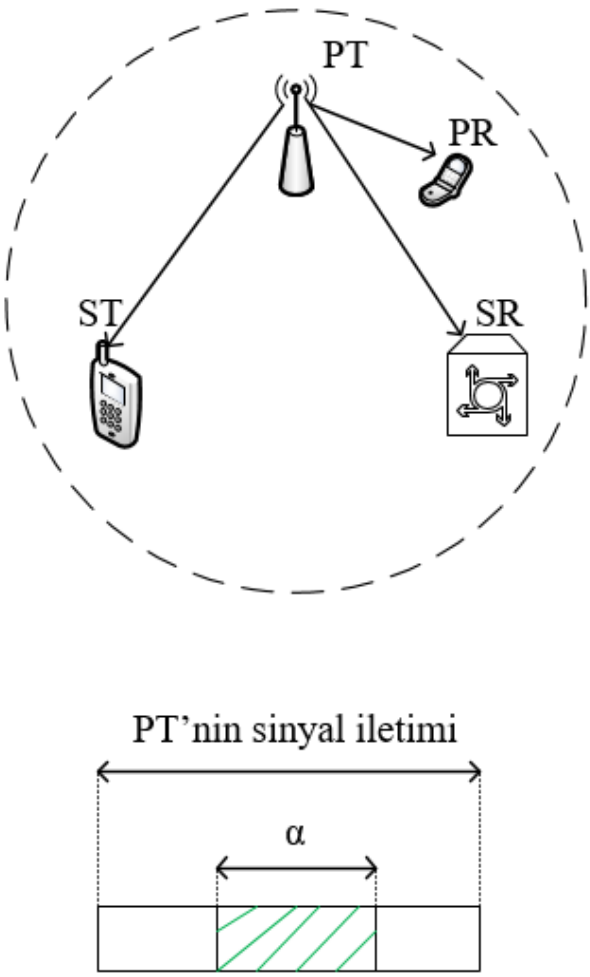
Çevresel geri saçılım haberleşme tabanlı altına kurulan bilişsel radyo ağında geri saçılım modunun ve enerji hasadı periyodunun etkin olduğu senaryo ve sistemin zaman çerçevesi sırasıyla Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Her iki periyot, üstüne kurulan

senaryodaki karşılaşılan durumlarla benzerlik gösterir. Tek fark olarak, PT'nin sinyali zaman çerçevesinin tamamını kapsamaktadır.

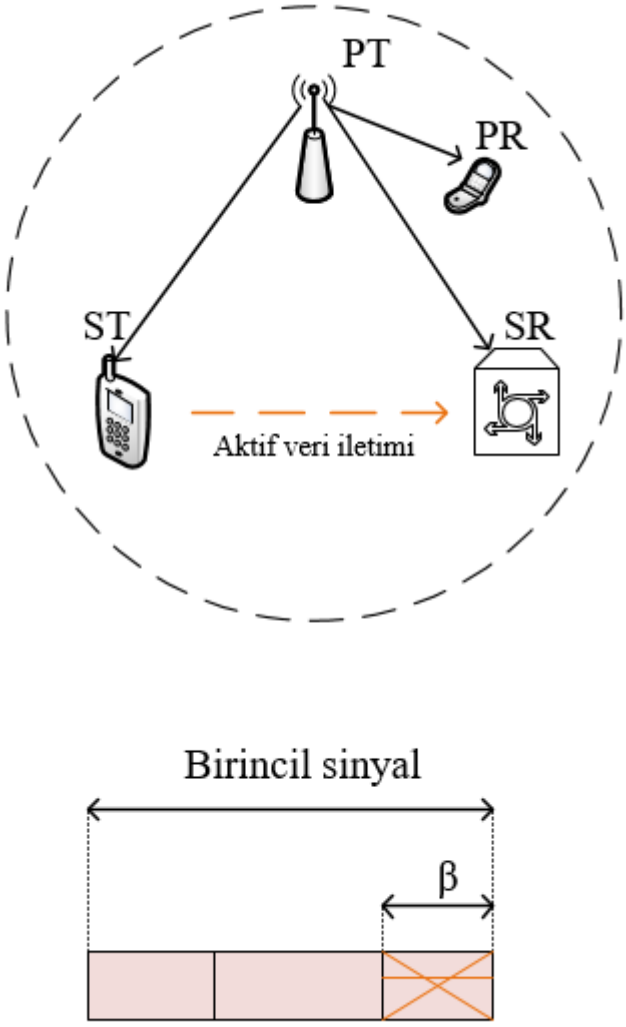


Şekil 4.9. ÇGSH tabanlı altına kurulan bilişsel radyo ağında geri saçılım modu.

Aktif veri iletim modunda PT ve PR aralarındaki bilgi alışverişine devam etmektedir. Bu durumdaki sistem modeli, Şekil 4.11'de gösterilmiştir. İkincil kanal birincil kanalın haberleşme altyapısını kullandığından birincil kanalın sürekli aktif kalması, ikincil kanalın performansını değerlendirmede dikkate alınması gereken bir konudur. ST, PR tarafındaki SNR değerini belli bir eşik değerinin altına düşüremez. Bu yüzden aktif veri iletimi sırasında ST tarafından gönderilen sinyalin iletim gücü, önceden belirlenen bir değerin altında tutulur. Böylece PR'nin arzu edilen bilgiyi elde etmesi garanti altına alınır.



Şekil 4.10. ÇGSH tabanlı altına kurulan bilişsel radyo ağında enerji hasadı.



Şekil 4.11. ÇGSH tabanlı altına kurulan bilişsel radyo ağında aktif veri iletim modu.

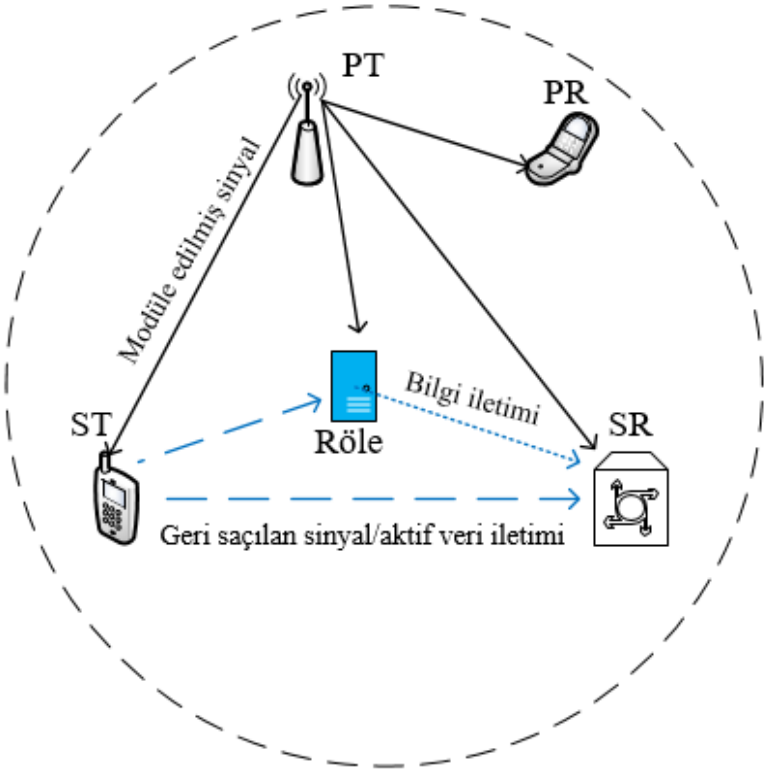
5. RÖLE VE SİNYAL BOZUCU VARLIĞINDA AĞ YAPILARI

Röle ile bilgi iletim tekniği, son zamanlarda ağların haberleşme mesafesinin yanı sıra verimi de artıran yenilikçi bir teknoloji haline gelmiştir [56]. Kullanıcıdan gelen bilgiyi alıcıya aktarmada görev alan röle, ÇGSH tabanlı bilişsel radyo ağlarında haberleşme mesafesini ve veri hızını önemli ölçüde artırmaktadır. Ağa özel tahsis edilen bir rölenin enerji problemini çözmek için sisteme kablosuz olarak güç aktarımı sağlayan enerji hasadı tekniği entegre edilebilir. Böylece kullanıcıların haberleşme mesafesini artıran, aktif veri iletim moduna dayalı olarak bilgi aktarımına yardımcı olan ve pilsiz çalışan röleler, yeni nesil iletişim sistemlerindeki ağlara yerleştirilebilir. Bu tür hibrit sistemlerde röle, SWIPT tekniğini kullanarak baz istasyonundan enerji temin ederken, kullanıcının bilgisini de alıcıya aktarabilir.

Geri saçılım sistemlerinin dışarıdan gelebilecek müdahelelere karşı savunmasız olduğu daha önceki bölümlerde ifade edilmişti. Bu bölümde sinyal bozucunun varlığında ağ yapısının şekli gösterilmiştir. Tezin yedinci bölümünde sinyal bozucunun varlığında haberleşme modelinin matematiksel analizine ayrıntılı olarak yer verilmiştir.

5.1. ÇGSH Tabanlı Bilişsel Radyo Ağlarında Röle Kullanımı

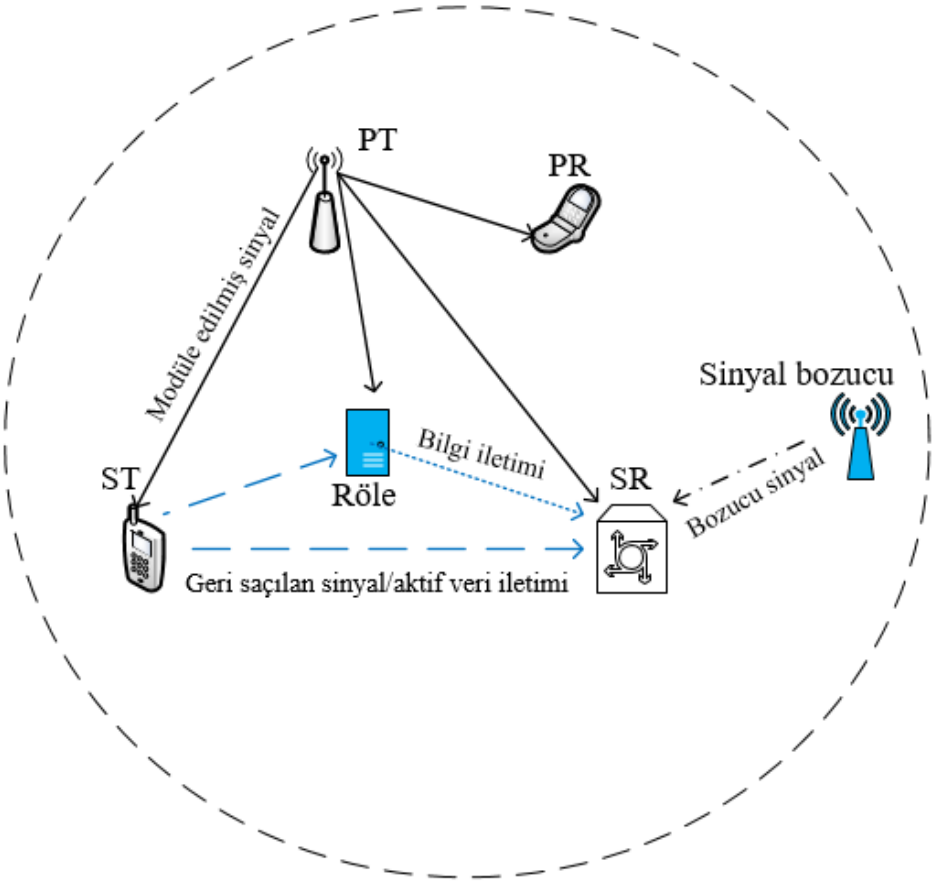
Özellikle 5G ve ötesi iletişimde öne sürülen sistem modelleri incelediğinde, röle kullanımı üzerinde çokça durulduğu görülmektedir [57-58]. Haberleşme sistemlerinde röle, kullanıcı tarafından kendisine gönderilen sinyali kodu çöz-sonra-ilet (decode-then-forward, DF protocol) protokolüyle alıcıya ulaştırır. ÇGSH tabanlı bilişsel radyo ağlarında ikincil kanalın performansını artırmak için de röle kullanımına yer verilmiştir. Röle kullanan bir ÇGSH tabanlı bilişsel radyo ağı, Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Röle, ST tarafından kendisine gönderilen sinyali SR'ye ulaştırır. Bu tip bir sistem modelinde uygun yere konumlandırılan röle, harici bir enerji kaynağı bulundurmayıp PT'nin sinyalini kullanarak enerji hasat edebilir. Böylece sistem tarafından hasat edilen toplam enerji de artmış olur. Röle kullanımının olduğu ikincil kanalda her bir kullanıcının üç farklı modda ne kadar süre vakit geçireceği bilgisi, ayrıca değerlendirilmesi ve analiz edilmesi gereken bir konudur. Bu tez kapsamında röle kullanımının olduğu sistem modellerinde, sistem performansının nasıl iyileştirildiği hem matematiksel analizlerle hem de simülasyonlarla gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Röleye sahip ÇGSH tabanlı bilişsel radyo ağı model yapısı.

5.2. Sinyal Bozucu varlığında ÇGSH Tabanlı Bilişsel Radyo Ağı

ÇGSH tabanlı bilişsel radyo ağı, birincil kanalın iletişim altyapısını kullandığından dışarıdan gelebilecek bazı saldırılara karşı savunmasızdır. Bu durumu değerlendirmek ve sistem performansının değişimini ölçmek için haberleşme modeline sinyal bozucu entegre edilmektedir [59]. Şekil 5.2'de ağ yapısı gösterilmiştir. Sinyal bozucu, alıcı-verici linkinde alıcıyı hedef olarak düşünüp SR'de elde edilen toplam sinyal üzerine kendi sinyalini ekleyerek SNR değerini düşürmektedir. Böyle bir karıştırıcı terminali varlığının sistem performansı üzerindeki etkisini incelemek için bozucu sinyali matematiksel denklemlerde gürültü olarak düşünüp analitik çıkarımları buna göre yapmak büyük önem teşkil etmektedir.



Şekil 5.2. Sinyal bozucunun yer aldığı ÇGSH tabanlı bilişsel radyo ağı model yapısı.

6. LİTERATÜRDE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Mevcut konu özelinde literatürde pek çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda sadece geri saçılım tekniğinin kullanıldığı bir sistem olabildiği gibi, bilişsel radyo ağları ile birlikte düşünülen hibrit modeller de bulunmaktadır. Önerilen haberleşme modellerinin daha çok kanal kapasitesini, veri hızını, haberleşme mesafesini ve enerji verimliliğini maksimum seviyeye çıkarma hedefine odaklandıkları görülmektedir.

2013 yılında yürütülen bir çalışmada, çevresel geri saçılım haberleşme ağında iki kullanıcının birbirleriyle iletişim kurabildiği model, donanımsal olarak tasarlanmıştır [8]. Bu deney, çevresel geri saçılım haberleşme sistemleri için bir temel teşkil etmektedir. Çalışmada kullanılan cihazların içyapılarında herhangi bir harici batarya bulunmamaktadır. Sadece çevredeki TV sinyalinin kullanılmasıyla haberleşme sağlanmaktadır. Deney, açık alan ve kapalı alan olmak üzere iki farklı ortamda yürütülmüştür. Kapalı alanda alıcı-verici arası mesafe 0,4 metre olduğunda 1 kbps bit hızına ulaşılırken, açık alanda aynı veri hızı aralarındaki mesafe 0,7 metre olduğunda sağlanmaktadır. Kapalı alanda çevredeki engellerin sinyal gücünde zayıflatma oluşturması, haberleşme mesafesinin düşmesine sebep olmuştur. Bu çalışmadan ilham alınarak FM sinyali kullanıldığı takdirde sistem performansının nasıl değiştiği bir başka makalede incelenmiştir [60]. Elde edilen sonuçlarda iki kullanıcı arası uzaklık 18,3 metreye çıktığında 3,2 kbps veri hızına ulaşılmıştır. Kullanılan kaynak tipi WiFi erişim noktası olduğu takdirde alıcı-verici arası uzaklık çok kısa tutulmuştur [61]. WiFi erişim noktası hem düşük güçlü hem de yüksek frekanslı bir sinyal yayılımı yaptığından, kullanıcının dinamik bir yapıya sahip bu kaynaktan faydalanması zorlaşmaktadır. Başka bir çalışmada yazarlar, geri saçılım haberleşme mesafesini daha üst noktalara çıkarmak için donanımsal olarak bir alıcı tasarlamışlardır [62]. Verici sinyal iletim gücü 30 dBm, alıcı-verici arasındaki uzaklık 60 metre olduğunda bit iletim hızı 1 kbps seviyesinde kalmıştır. Her ne kadar veri hızı düşük olsa da mesafenin artması bakımından dikkate alınması gereken bir sonuçtur.

Nesnelerin İnterneti (IoT), çeşitli cihazları, akıllı sensörleri internete bağlayabilen ve tüm düğümler arasında bilgi alışverişini ve paylaşımını mümkün kılan, farklı türde ağlardan oluşan gelecek nesil bir haberleşme türüdür. IoT, akıllı ev ve akıllı şehir gibi farklı uygulamaları sağlamak için karmaşık ve heterojen bir ortamda geniş alanlara dağılmış çok

sayıda düğümü birbirine bağlar. Bu noktada bu kadar çok sayıda IoT düğümü için enerji tedariği bir problem haline gelmektedir. Düğümlerin enerji kullanımını kendi kendine sürdürülebilir bir şekilde sağlaması için radyo frekans sinyalinden enerji hasadı tekniği umut verici bir teknoloji olarak ortaya çıkmaktadır. Literatürdeki pek çok çalışma, enerji hasadı teknolojisinin pil sorununu çözmede etkili olduğunu göstermiştir [63-65].

2022 yılında Yang ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada, kullanıcılar bataryasız düşünülmüştür [66]. Kablosuz olarak gerçekleştirilen enerji hasadıyla devrenin temel enerji ihtiyacı karşılanmaktadır. Ele alınan hasat işlemi tipik doğrusal enerji hasadına ek olarak doğrusal olmayan bir yapıya da sahiptir. Pratik uygulamalar için daha çok tercih edilen lineer olmayan enerji hasadı tekniği bu bağlamda lineer tekniklerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, enerji kısıtlaması olmayan IoT cihazının kanal sönümleme kazancına göre sinyal iletim gücünü uyarlanabilir şekilde ayarlayabilmesi için yeni hibrit ardışık girişim giderici (SIC) önerilmiştir. Simülasyon ve analitik sonuçlar, IoT cihazlarının veri hızının eşik değerinden yüksek olması durumunda hata kesinti tabanının ortaya çıktığı ve hibrit SIC şemasının mevcut durumun üstesinden gelebileceğini göstermiştir. Elde edilen sonuçlarda, kullanıcı sayısının sonsuza gitmesi durumunda kesinti olasılığının sıfıra düşebileceği de görülmüştür.

Bir başka çalışmada, iki kullanıcı arasında doğrudan bağlantıyı kesecek bir engel olduğu düşünülüp önerilen sistemin kanal kapasitesi performansı analiz edilmiştir [34]. Geri saçılım haberleşmenin bu tip bir duruma karşı hassasiyeti göz önüne alındığında ağ kapasitesinin artırımı konusunda neler yapılabileceğinin araştırılması oldukça önemlidir. İşbirlikçi bir haberleşmenin ele alındığı bu sistemde röle önce enerji hasat eder. Daha sonrasında kendisine gelen sinyalden kodu çöz-sonra-ilet protokolünü uygulayarak bilgiyi elde edip alıcıya aktarır. Bu çalışmada amaç, kullanıcının sinyal yayıcıdan gönderilen sinyalin ne kadarını geri saçıp ne kadarıyla enerji hasadı yapacağını belirleyen güç bölme faktörünü ve zaman bloğundaki süreleri optimize ederek sistemin kapasite performansını maksimize etmektir. Ortaya konulan problem dışbükey bir yapıya sahip olduğundan nümerik analizler ile çözülmüştür. Bu model, alıcı-verici arasındaki iletişimi bozan bir engel olduğunda hem rölenin hem de ana kulllanıcının nasıl bir davranış sergilemesi gerektiğinin bulunması açısından önemli bir çalışmadır. Geleneksel geri saçılım haberleşme senaryolarındaki durumlarla kıyaslandığında kanal kapasitesi bakımından daha iyi sonuçların elde edildiği görülmüştür.

Kusurlu ardışık girişim giderici (imperfect SIC) yönteminin kullanıldığı, NOMA tekniğiyle gerçekleştirilen çevresel geri saçılım haberleşme sistemi için yeni bir optimizasyon çerçevesi 2021 yılında Khan ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir [67]. Haberleşme sistemindeki toplam bit iletim hızının artırılması amaçlanan bu çalışmada, sinyal yayıcının iletim gücü ve geri saçılım cihazının yansıma katsayısı birlikte optimize edilmiştir. Ele alınan optimizasyon problemi için kapalı formda çözümler, Lagrange çarpanlarının alt gradyan yöntemiyle iteratif şekilde hesaplanması yoluyla bulunmuştur. Simülasyon sonuçları, önerilen ortak optimizasyon çerçevesinin diğer optimizasyon senaryolarına kıyasla üstünlüğünü göstermektedir.

Çalışma [68]'de, akıllı şehir uygulamalarında kullanılmak üzere geri saçılım ağı için yeni bir model önerilmiştir. Genel olarak geri saçılım haberleşme tabanlı bilişsel bir radyo ağı, uygulanması kolay ve veri aktarımının rahatça sağlanabiliyor olmasından dolayı TDMA tabanlı bilgi aktarımı gerçekleştirir. Buna karşın nispeten katı bir veri iletim yöntemi olan TDMA'de IoT ağının özelliği dikkate alındığında ölçeklenebilirlik sağlamada zorluk yaşatabilmektedir. Bu sorunu çözmek için yazarlar önerdikleri yöntemde çekişme tabanlı bir sistem kullanmaktadır. Kullanıcılar arasındaki çekişmeye bağlı olarak kurulan bu modelde cihazlar, ortam uygun olduğunda veri aktarmaya başlar. Ortam meşgulse, müsait olana kadar bekletilir. Kullanıcıların enerji hasadı yapmasına izin verilen bu yöntemde performans değerlendirmesi için kapsamlı bilgisayar simülasyonları gerçekleştirilmiş ve sonuçlar, geri saçılım ağındaki tipik bir erişim tekniği olan TDMA ile karşılaştırılmıştır. Analizler sonucunda önerilen yöntemin ortalama iletim gecikmesi açısından temel yönteme göre daha avantajlı olduğu görülmüştür. Bu sayede sistem modeli, çeşitli geri saçılım IoT ağ hizmetleri için verimli bir şekilde kullanılabilir.

2022 yılında yapılan bir başka çalışmada yazarlar, geri saçılım tabanlı kablosuz güçle çalışan sistemlerde enerji verimliliğini (EE) en üst düzeye çıkarmak için optimal kaynak tahsis şemasının tasarımına odaklanmıştır [69]. Ana kullanıcı ve rölenin belirli bir noktaya konumlandırıldığı sistemde hibrit erişim noktası rolündeki sinyal yayıcı, her iki cihaza enerji aktarımı sağlamaktadır. Hibrit erişim noktası iletim gücünün ve sistemdeki zaman parametrelerinin ortaklaşa optimize edilmesiyle enerji verimliliğini en üst düzeye çıkarmak amaçlanmıştır. Bu bağlamda iteratif optimizasyon algoritması önerilmiştir. Simülasyon sonuçlarında sistemin enerji verimliliğinin önerilen algoritmayla yaklaşık %10 oranında artış gösterdiği kaydedilmiştir.

Ağdaki kullanıcıların baz istasyonuna uzaklığı enerji hasadını ciddi ölçüde etkilediğinden, hareket halinde bir baz istasyonu olarak insansız hava aracının sistem modeline dahil edilmesi literatürde ele alınmıştır [70]. Kullanıcılar tarafından hasat edilen enerji, okuyucu (alıcı) tarafına doğru yürütülen geri saçılım haberleşme ve aktif veri iletiminde kullanılır. Bu makalede, insansız hava aracının iletim gücünü ve yörüngesini, kullanıcıların geri saçılım yansıma katsayılarını, aktif veri iletimi için sinyal iletim gücünü ve geri saçılım-enerji hasadı-aktif veri iletim arasındaki zaman tahsisini birlikte optimize ederek toplam enerji verimliliğini (EE) en üst düzeye çıkarmak hedeflenmiştir. İteratif bir algoritma öne sürülerek gerçekleştirilen çalışmada optimizasyon probleminin çok hızlı yakınsadığı ve elde edilen sonuçların benzer yaklaşımdaki senaryolara kıyasla enerji verimliliği bakımından daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Röle kullanarak bilgi aktarımının gerçekleştirildiği ve geri saçılım haberleşme tekniklerinin kullanıldığı ortak bir modelin performans optimizasyonuna odaklanan bazı çalışmalar literatürde bulunmaktadır. [71]'de, kaynak düğümün alıcı düğümle iletişim kurmasına yardımcı olmak için geri saçılım tabanlı bir sistem sunularak röle kullanılmıştır. Bu çalışmadan faydalanarak Zheng ve arkadaşları, hem kullanıcıların hem de rölenin geri saçılım haberleşme ile veri ilettiği iki kullanıcılı tek röleli bir ağ önermiştir [72]. Sadece geri saçılım haberleşmenin etkin olduğu çalışmalarda röle kullanılsa da ağ kapsama alanı etkili bir şekilde genişletilememektedir. Lu ve arkadaşları haberleşme mesafesini genişletmek ve veri iletim hızını yükseltmek için rölelerin, kullanıcıların bilgilerini geri saçılım modu veya enerji hasadı-sonra-aktif veri iletim modu aracılığıyla iletmelerine yardımcı olduğu hibrit bir röle iletim ağı önerdi [73]. Kullanılan röleler iki farklı mod arasında geçiş yapmak için karmaşık devrelerle donatılmıştır. Bu durum yüksek güç tüketimine yol açmaktadır. Mevcut problemi çözebilmek için rölenin çevredeki radyo frekans sinyalinden enerji hasat edip, kullanıcıdan gönderilen geri saçılım sinyalini çözerek alıcıya ilettiği senaryolar düşünülmüştür [33, 74]. Ek olarak, rölenin aynı anda enerji hasat etmesini ve bilgi toplamasını sağlamak için geri saçılım iletişim sistemine SWIPT tekniği dahil edilmiştir. Nguyen ve arkadaşları, rölenin önce SWIPT ve geri saçılım haberleşmeyi eş zamanlı olarak gerçekleştirdiği ve ardından hasat edilen enerjiyi kullanarak birincil kanaldaki vericinin kendi alıcısına yaptığı bilgi aktarımında yardımcı olduğu sistemde kesinti performansını araştırmıştır [75].

Sadece geri saçılım haberleşmenin etkin olduğu ağ modellerinde veri hızı düşük kalmaktadır. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için eş zamanlı olarak bilgi ve enerji aktarımının yapıldığı röleye sahip hibrit bir sistem, 2022 yılında Zhuang ve arkadaşları tarafından önerilmiştir [76]. Sistemde her kullanıcının kendine ait bir rölesi bulunmaktadır. Tüm röleler enerji hasadı sonrası kullanıcı bilgisini NOMA tekniği ile alıcıya iletmektedir. Röle güç yansıma katsayısı, kullanıcılar ve röleler arasında en uygun zaman değerleri bulunarak veri hızı bakımından sistem performansı maksimize edilmeye çalışılmıştır. Problemin hesaplama karmaşıklığını azaltmak için iki alt problem ele alınmıştır. Simülasyon sonuçlarında veri hızında kayda değer bir artışın olduğu görülmüştür. Ayrıca önerilen sistem, yazarların kendi içinde belirledikleri senaryolara kıyasla daha iyi performans göstermiştir.

Bir başka çalışmada [77], çift yönlü erişim noktası özelliğine sahip bir baz istasyonu ve enerji hasat eden birden fazla kablosuz cihaza sahip geri saçılım haberleşme tabanlı bir model sunulmuştur. Tipik bir geri saçılım-enerji hasadı-aktif veri iletimi periyotlarının benimsendiği bu sistemde, baz istasyonundan farklı uzaklıklara konumlandırılmış kullanıcıların gidiş-dönüş yol kaybından dolayı kendi aralarında adaletsiz bir ortam oluşmaktadır. Bu dezavantajın üstesinden gelebilmek için her kullanıcının gönderdiği veri sayısını belli bir değerin üzerinden tutarak, toplam bit iletim hızı maksimize edilmeye çalışılmıştır. Dışbükey optimizasyon tekniklerini kullanarak optimum zaman tahsisinin incelendiği bu çalışmada yazarlar, simülasyon sonuçlarını makalenin kendi içinde belirledikleri kıstas ile karşılaştırarak önerdikleri modelin üstünlüğünü kanıtlamışlardır.

2022 yılında Ge ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, birincil kanaldaki kullanıcının minumum veri talebi karşılanırken birden fazla kullanıcıya sahip ikincil kanalın veriminin maksimum seviyeye çıkartılması amaçlanmıştır [78]. İkincil kanalın performansını incelemek için ortaya konulan problem, kullanıcıların veri iletim süreleri ve birincil kanaldaki vericinin iletim gücünün birlikte optimize edilmesi açısından değerlendirilmiştir. Yazarlar, Fibonacci araması ve eşit aralıklı arama algoritmalarını önermişlerdir. Nümerik analizlerde, birincil kanaldaki alıcının minumum veri talebinin artmasıyla ikincil kanalın bit iletim hızında azalma olduğu tespit edilmiştir.

Çalışma [79]'da, nesnelerin interneti (IoT) uygulamaları için kablosuz güç aktarımlı geri saçılım haberleşmede NOMA tekniğinin kullanıldığı bir ağ yapısı önerilmiştir. Baz

istasyonu, alıcı ve birden çok kullanıcının (IoT cihazı) olduğu bu modelde zaman parametreleri ve geri saçılım cihazlarının yansıma katsayısı ortak optimize edilerek, her bir kullanıcının gönderdiği minumum veri sayısı maksimize edilmiştir. Sistem modeli için sunulan optimizasyon problemi dışbükey olmayan bir yapıdadır. Bu yüzden yazarlar, dışbükey olmayan problemi eşitsizlik dönüşümü yaklaşımı kullanarak yardımcı değişkenlerin yardımıyla bir dışbükey probleme dönüştürmüştür. Daha sonra iteratif algoritma ile problem çözülmüştür. Simülasyon sonuçlarında algoritmanın hızlı yakınsadığı gösterilmiş ve önerilen sistem modelinin mevcut ağ yapıları ile karşılaştırıldığında, IoT cihazlarının elde ettiği maksimum-minimum verim açısından üstünlüğü ortaya konulmuştur.

Geri saçılım sistemlerinde hata koruması (error protection) olmamasından dolayı iletişim güvenilirliği garanti edilememektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek için literatürde analitik olarak hata performansı incelenmiştir [80]. İlk olarak, sonlu blok uzunluğu veri hızına dayalı olarak hata olasılığının izlenebilir bir üst sınırı türetilmiştir. İkinci olarak, güvenilirlik ile enerji tüketimi arasındaki dengeyi sağlamak için bir optimizasyon algoritması tasarlanmıştır. Son olarak simülasyon sonuçlarında önerilen modelin performans kazanımları gösterilmiştir.

Bir başka çalışmada [22], radyo frekans destekli bilişsel radyo ağları için yeni bir çevresel geri saçılım haberleşme modeli önerilmiştir. Bu çerçevede geri saçılım haberleşme ve enerji hasadı-sonra-aktif veri iletim stratejileriyle entegre edilmiş spektrum algılamalı yapı dikkate alınmıştır. Zaman çerçevesinin başında spektrum algılama zamanı tahsis edilmiş olup sinyal kestirimi açısından olasılıklar eşitliklere dahil edilmiştir. Bu çalışmada enerji verimliliğinin analitik ifadesi türetilip maksimize edilmeye çalışılmıştır. İlgili analitik sonuçları doğrulamak ve önerilen modelin enerji verimliliği açısından performans kazanımını göstermek için bilgisayar simülasyonlarından elde edilen kapsamlı sonuçlar sunulmuştur. Böylece kablosuz iletişim uygulamalarında, gelecekteki haberleşme sistemlerinin tasarımında ve geri saçılım tekniğinin davranışı hakkında teorik ve teknik bilgiler literatüre kazandırılmıştır.

2022 yılında Wang ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada, enerji hasadı tabanlı çevresel geri saçılım haberleşme tekniğinin performansını artırmak için en uygun zaman tahsis şeması önerilmiştir [56]. Birden çok rölenin kullanımı bakımından literatürdeki benzer çalışmalardan farklılık göstermektedir. Güç kaynağı olarak görev yapan baz istasyonu, sabit

güçle kesintisiz sinyal iletimi yapmaktadır. Sistemde yer alan tek kullanıcı, geri saçılım haberleşme yaparken tüm röleler enerji hasadı yapmaktadır. Daha sonra kullanıcı tarafından seçilen röle, hasat ettiği enerjiyi kullanarak kendisine gelen bilgilerin kodunu çözüp iletmektedir. Bu çalışmada amaç, verimi en üst düzeye çıkaracak ayarlanabilir geri saçılım yansıma katsayısını ve röle seçimini dikkate alan en uygun zaman tahsis şeması bulmaktır. Simülasyon sonuçlarında önerilen modelin sistem veriminin, model içinde kıstas olarak alınan senaryolara göre daha iyi performans gösterdiği görülmüştür.

Çalışma [81]'de, çok taşıyıcılı bir sistemde işbirlikçi bilişsel radyo ağı için, birincil kanalın servis kalitesini sağlarken ikincil kanal için bilgi gizliliğini garanti etmek adına fiziksel katman güvenliği üzerinde durulmuştur. İlk olarak bu tür bir bilişsel radyo ağı için iletişim modeli sunulmuştur. Birincil kanalın alıcısına iletilen veri sayısını ve ikincil kanalın gizlilik oranını en üst düzeye çıkarmak için sistem, matematiksel probleme dönüştürülmüştür. Optimizasyon teknikleri kullanılarak elde edilen sonuçlarda, sinyal bozucunun konumunun gizlilik performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.

Çevresel geri saçılım haberleşme teknolojisi ile ilgili yapılan çalışmaların çoğu teorik analizler kapsamındadır. Ancak tıbbi uygulamalarda kullanımı konusunda da bazı incelemeler mevcuttur. Özellikle hasta kişilerin kritik tıbbi değerlerinin (kalp atım hızı gibi) takibini yapmak için geri saçılım haberleşme ağında kullanılmak üzere bir sensör tasarlanmıştır [82]. İnsan vücuduna yerleştirilen bir cihazın enerji ihtiyacının kablosuz olarak karşılanması ve cihaz boyutunun küçük olması istenir. Bu bağlamda yazarlar uygun bir geri saçılım sensörü ile bu ihtiyacı karşılamışlardır.

7. ÇEVRESEL GERİ SAÇILIM HABERLEŞME TABANLI BİLİŞSEL RADYO AĞLARININ MODELLENMESİ

Bu bölümde dört farklı haberleşme sisteminin modellemesi ve matematiksel analizi yapılmıştır. Her bir sisteme ait performans sonuçları, 8. bölümde dört alt başlıkta ayrı ayrı grafiksel olarak verilmiş olup sonuçlar ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir.

7.1. Çevresel Geri Saçılım Tabanlı Heterojen Bilişsel Radyo Ağlarında Röleli İşbirlikçi Haberleşme

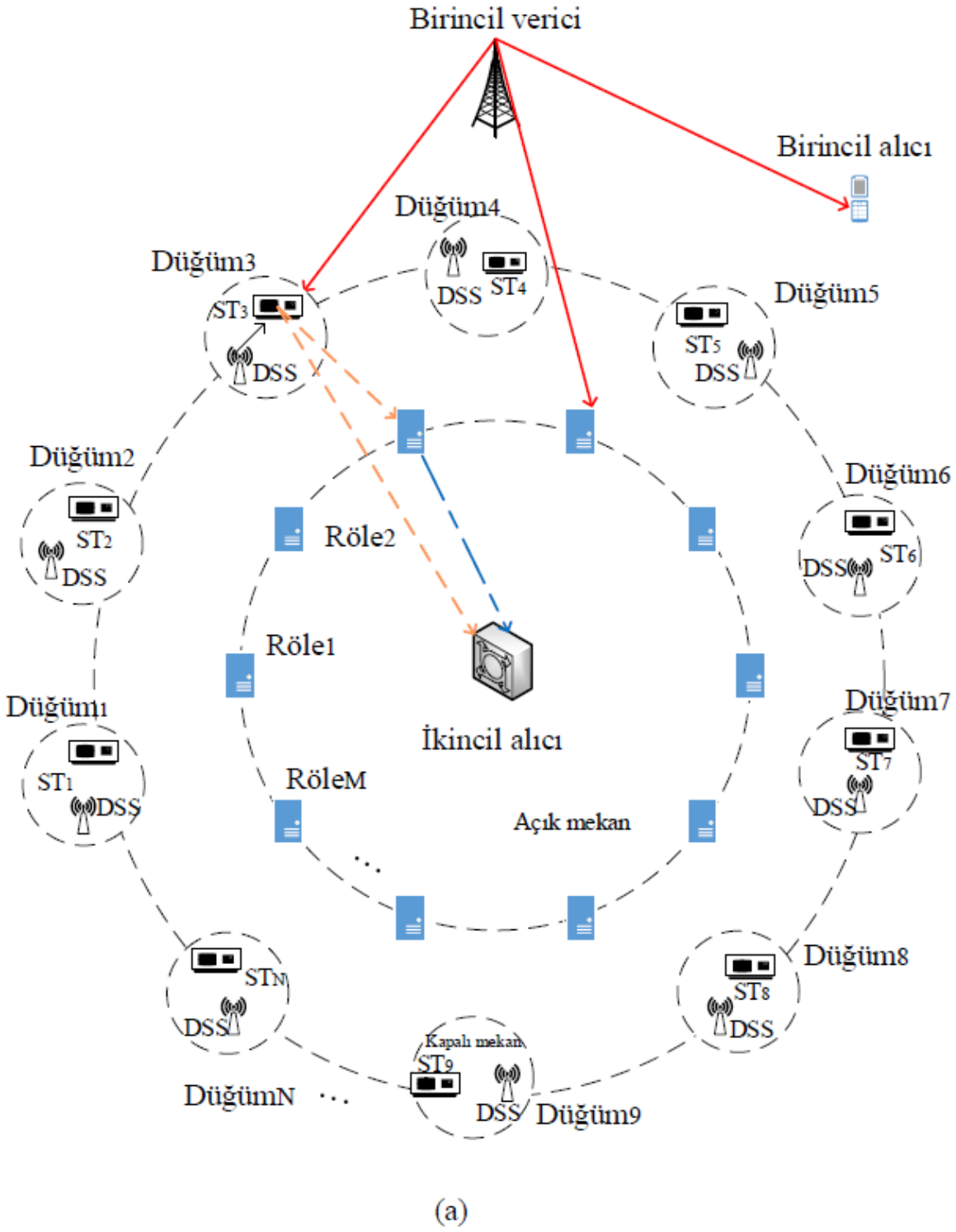
Bu haberleşme sisteminde, çevresel geri saçılım haberleşme tabanlı bilişsel radyo ağlarında ikincil kanalın performansını geliştirmek için birden çok ikincil verici (ST) ve röleye (Relay) sahip işbirlikçi yeni bir ağ modeli geliştirilmiştir. ST, kendisine ait verisini hem ikincil alıcıya (SR) hem de röleye geri saçar ve zaman çerçevesinde bulunan meşgul periyodu süresince birincil verici (PT) tarafından yayılan sinyalden enerji hasat eder. Sinyalin geri saçılması ile ST tarafından aktif hale getirilen röle, kendisine aktarılan bilgiyi kodu çöz-sonra-ilet (decode-then-forward) protokolünü kullanarak SR'ye iletir. PT'nin yayın yapmadığı ve sessiz kaldığı boşta kalma süresince ST'nin enerji depolama ünitesi ile çevreden hasat ettiği enerjiyi kullanarak aktif veri iletimini gerçekleştirdiği bu sistemde en temel amacımız, haberleşme ağının alıcısı konumundaki SR cihazına iletilen bit sayısını maksimum seviyeye çıkarmaktır.

Çok kullanıcıya sahip bu tür işbirlikçi sistemlerde her bir ST kullanıcısının ele alınan zaman çerçevesince bir tam periyotta ne kadar süre geri saçılım, enerji hasadı ve aktif veri iletimi gerçekleştireceğinin bulunması genel manada sistemdeki problemin çözümünü karmaşık hale getirmektedir. Bu nedenle, kullanıcıların zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA) ve dikgen olmayan çoklu erişim (NOMA) teknikleri kullanarak veri ilettikleri düşünülmüş, sistem modeli matematiksel olarak modellenerek bir optimizasyon problemine dönüştürülmüştür. Numerik analizler ışığında elde edilen sonuçlara göre NOMA'da daha yüksek veri iletim hızlarına ulaşıldığı görülmüştür. Buna ek olarak önerilen model, ST'nin sadece enerji toplayıp aktif olarak veri iletebildiği veya sadece çevresel geri saçılım haberleşme ile veri aktarımı yaptığı literatürdeki mevcut yaklaşımlarla karşılaştırıldığında daha iyi performans göstermiştir.

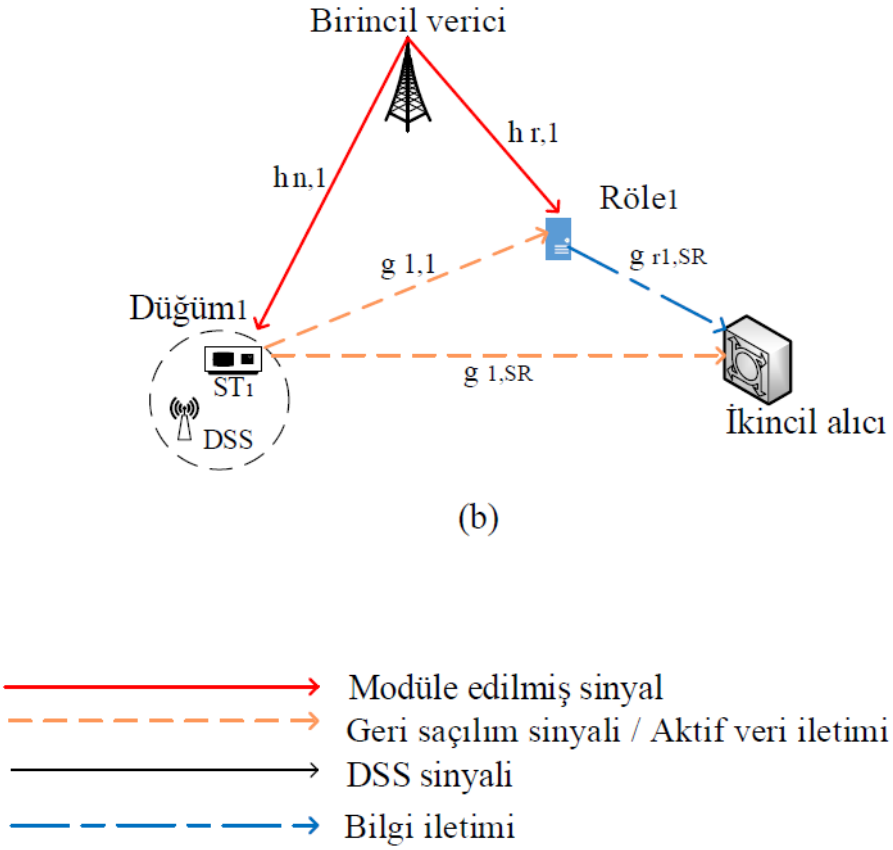
Tez kapsamında önerilen bu modelde, ikincil kanalda bulunan ST ve röle kullanıcıları sistem alıcısına bilgilerini TDMA ve NOMA teknikleri olmak üzere iki farklı şekilde göndermektedir. Sistem modeli ve kullanıcıların hangi modda ne kadar süre veri aktarımı yapacağını bulmak için tasarlanmış zaman çerçevesi sırasıyla Şekil 7.1 ve Şekil 7.2'de verilmiştir. Şekil 7.1'e bakıldığında N tane düğüm ve M adet röle bulunmakta olup $N \geq M$ kabul edilmiştir. Yani röleler en fazla ST kullanıcı sayısı kadar olabilmektedir. Her bir düğümde (kapalı alan) bir adet ST kullanıcısı ve ona yakın konumlandırılmış bir radyo frekans üreteci bulunmaktadır [18]. WiFi erişim noktası ya da tahsis edilen sinyal kaynağı (DSS) olarak tanımlayabileceğimiz bu bileşeni kapalı alana yerleştirip onun sisteme katkı sağladığını düşünmek, her evde artık bir internetin olduğu farz edildiğinde mantıklı ve makuldür. Zaman çerçevesinde hem TDMA hem de NOMA senaryosu için iki farklı durum kullanılmıştır. Geri saçılım ve röle aktif modunda (GSRA), tüm kullanıcılar birincil vericinin yaydığı sinyalden enerji hasadı yaparken aynı zamanda sistem iletişiminde aktif olacak röle kullanıcıları seçilir.

Her bir ST_i ($i = 1, 2, \ldots N$) kullanıcısı, bilgisini hem SR'ye hem de aktif halde bulunan röleye geri saçar. Burada her bir röle kullanıcısı RL_j ($j = 1, 2, \ldots M$) ile ifade edilir. RL_j kullanıcısı kendisine gelen sinyaldeki bilgiyi önce çözer sonra SR'ye iletir. Bir diğer durum olan aktif veri iletim modunda (AVİM) birinci kanaldaki PT, PR'ye doğru veri transferini sonlandırmıştır. Artık bir sonraki periyoda kadar sessiz bir şekilde beklemektedir. Birincil kanal için bilgi akışının durduğu bu süre, ikincil kanaldaki kullanıcıların SR'ye veri aktarması için bir fırsat olarak görülür. GSRA modunda enerji hasadı yapan ST kullanıcıları, bu enerjiyi aktif veri iletimi yapmak için kullanır. Röleler ise hasat ettikleri enerjiyi birinci durumda kullandıklarından ikinci modda aktif olamamaktadırlar.

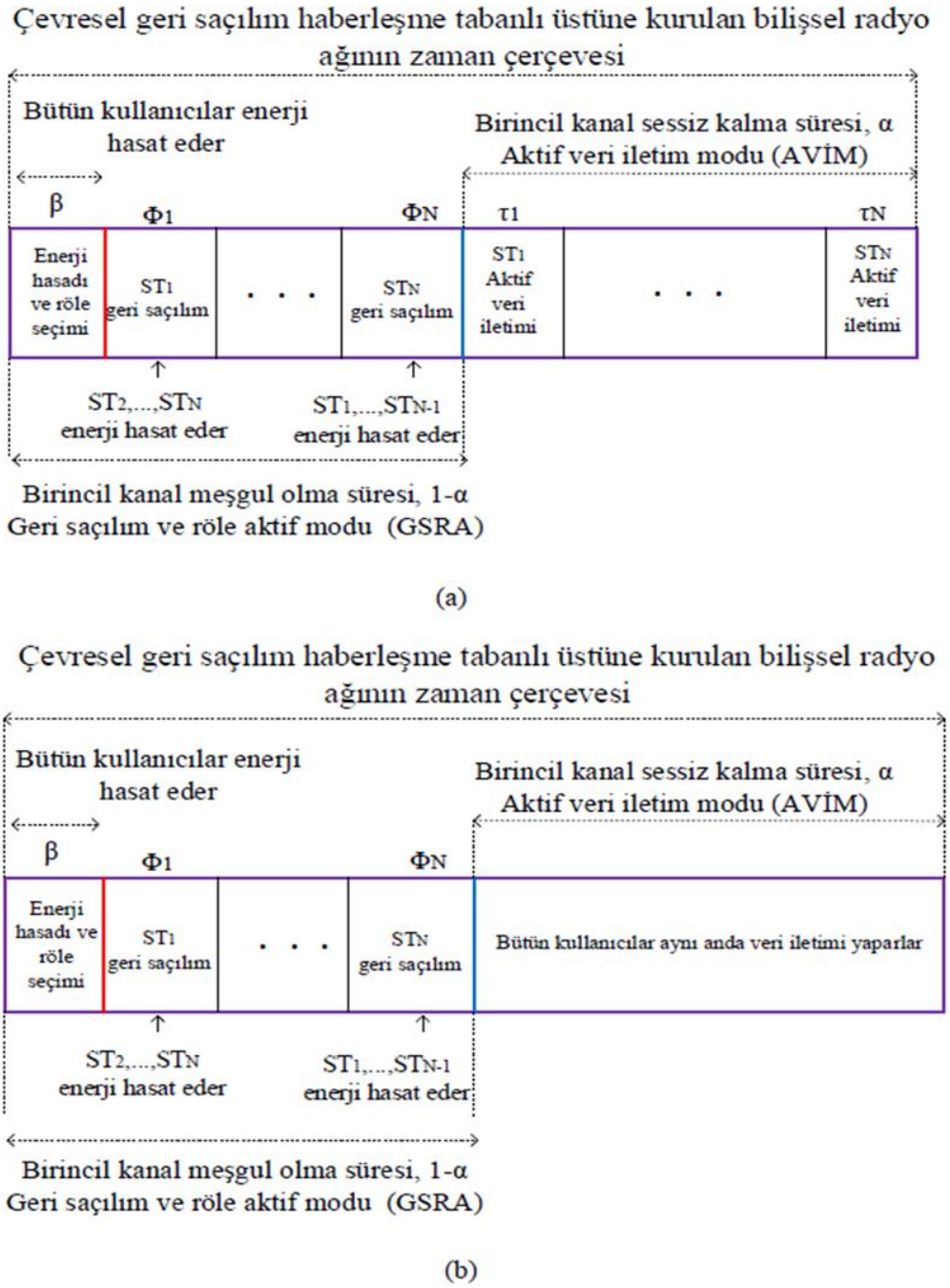
Zaman çerçevesinde kabul edilen periyot süresi $T = 1$ saniyedir. Genel anlamda iki temel durumdan oluşan bu çerçevede AVİM modu için ayrılan süre α kadarken, GSRA modu için ayrılan süre de $1 - \alpha$ kadardır. ST_i kullanıcısı, GSRA durumunda kendisine tahsis edilen ϕ_i süresince bilgisini geri saçarken AVİM modundaki τ_i süresince de aktif veri iletimi yapar. Zaman bloğunun en başında tüm kullanıcıların enerji hasadı yapması ve röle seçimi için ayrılması gereken süre β ile ifade edilmiştir.



Şekil 7.1. (a) Önerilen sistem modeli. (b) $N = 1$, $M = 1$ için alt sistem modeli.



Şekil 7.1. (devamı) (a) Önerilen sistem modeli. (b) $N = 1$, $M = 1$ için alt sistem modeli.



Şekil 7.2. Sistem modeli için zaman çerçevesi. (a) Önerilen TDMA senaryosu (b) Önerilen NOMA senaryosu

Çizelge 7.1. Birden çok ST ve röle kullanıcısının olduğu işbirlikçi sistem modelindeki notasyon ve kısaltmaların özeti

Notasyon ve kısaltmalar	Anlamı
DSS	Tahsis edilen sinyal kaynağı (WiFi erişim noktası)
$PT/PR/PC$	Birincil verici/Birincil alıcı/Birincil kanal
SR/SC	İkincil alıcı/İkincil kanal
ST_i	İkincil verici (i = 1, 2, . . . , N)
P^T/P_{DSS}^T	PT'nin verici gücü/DSS'nin iletim gücü
ϵ/η	Kullanıcı enerji hasat verimliliği/Röle enerji hasat verimliliği
λ/c/f/W	Sinyal dalga uzunluğu/Işık hızı/Sinyal frekansı/Bant genişliği
K_i/ψ	ST_i'nin veri iletim verimliliği/Rölenin veri iletim verimliliği
γ_i	ST_i'nin geri saçılım verimliliği
B_i^b	ST_i'nin geri saçılım hızı
$h_{n,i}, h_{r,j}$	Sırasıyla PT ve ST_i, PT ve RL_j arasındaki kanal kazancı
h_i^{DSS}	ST_i ve DSS arasındaki kanal kazancı
$g_{ij}, g_{i,SR}$	Sırasıyla RL_j ve ST_i, SR ve ST_i arasındaki kanal kazancı
$g_{rj,SR}$	RL_j ve SR arasındaki kanal kazancı
$d_{r,j}, d_{n,i}, d_i^{DSS}$	Sırasıyla PT ve RL_j, ST_i ve PT, DSS ve ST_i arasındaki uzaklık
$G_T, G_i^R, G_{DSS,T}$	PT'nin anten kazancı/ST_i'nin anten kazancı/DSS anten kazancı

Çizelge 7.1'de, ele alınan sistem modeli için notasyon ve kısaltmalar verilmiştir. Sistem modelindeki ST_i sayısı düğüm sayısına eşittir. ST_i kullanıcısı, hem PT'den hem de her bir düğüme konumlandırılmış DSS'den yayılan sinyalden enerji hasat edebilir. Ancak AVİM modunda PT boşta olup sinyal yayınını kestiğinden, ST_i enerji depolamak için sadece DSS'yi kullanır. Boşta kalma süresince depolanan bu enerji, aktif veri iletiminde iç devre yapısındaki enerji tüketimi için kullanılır. Dolayısıyla ST_i kullanıcılarının iç devre yapısında aktif veri iletimi sırasında tüketilen enerji matematiksel denklemlerde optimizasyon problemi açısından değerlendirilmeyip ihmal edilmiştir.

DSS, WiFi erişim noktası olarak düşünüldüğünde kendisi tarafından yayılan sinyalin frekansı yüksek olduğu için ST_i tarafından hasat edilen enerji düşük kalacaktır. Aynı zamanda önerilen modelde her bir ST_i kullanıcısının sadece kendi hücresindeki DSS tarafından iletilen sinyalden enerji topladığı varsayılmıştır.

Şekil 7.1'de verilen sistem modelinin analiz edilip performans açısından değerlendirilebilmesi için tek kullanıcı ve tek röleye sahip alt sistem üzerinden denklemler yazılmaya çalışılacaktır. Daha sonra ifadeler tüm sisteme genelleştirilecektir. Birden fazla kullanıcının olduğu senaryoda sisteme dahil edilecek her bir yeni düğüm ve röle, belirtilen çemberler üzerine $Düğüm_1$ ve $Röle_1$ referans alınarak yerleştirilir. Öncelikle $Düğüm_1$ kapalı alan bölgesine yerleştirilen ST_1 sensör kullanıcısının ϕ_1 süresince geri saçılım yaptığını farz edelim. Bu durumda geri saçılan sinyal ile aktif hale gelen RL_1, ST_1 sinyalini iletir. GSRA modunda ST_1 kullanıcısından SR'ye geri saçılan bit Eş. 7.1 ile tanımlanabilir.

$$R_1^b = \phi_1 B_1^b a_1 \tag{7.1}$$

Burada $a_1 = \gamma_1 g_{1,SR}$ olarak alınmıştır. Her bir ST kullanıcısı için geri saçılım hızı B_i^b sabit kabul edilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda kullanıcı iç devre yapısındaki direnç-kondansatör (RC) elemanlarının uygun değerlerde ayarlanarak istenilen geri saçılım hızlarının elde edilebildiği görülmüştür [8]. Geri saçılım verimliliği γ_1 değeri 0 ile 1 arasında değişmektedir. Eğer γ_1 = 1 ise kullanıcıya gelen sinyalin tamamı alıcıya doğru geri saçılır, γ_1 = 0 durumunda ise geri saçılan sinyal yok demektir. Ana sistemde ST_i kullanıcısı tarafından SR'ye gönderilen bit aşağıdaki eşitlik ile genelleştirilebilir.

$$R_i^b = \phi_i B_i^b a_i \tag{7.2}$$

Birincil kanalda PT tarafından yayılan sinyal $x(t)$ ile ifade edilirse, bu sinyalin ortalama gücü $\frac{1}{T}\int_0^T |x(t)|^2 = P^T$ eşitliği ile bulunur. GSRA durumunda verilerini sırasıyla geri saçan ve alıcıya ileten ST_i ve RL_j kullanıcıları, PR'den yeterince uzak konumlandırıldığından girişime neden olmamaktadırlar [2,21].

RL_j kullanıcısı 1-α boyunca PT'nin yaydığı radyo frekans sinyalinden enerji hasat etmeye devam eder. Daha sonra hasat ettiği bu enerjiyi, ST_i sensöründen gelen bilginin kodunu çözme ve SR'ye aktarmada kullanır. AVİM modunda sessiz kalan PT kullanıcısı, çevreye yaydığı sinyali kestiğinden haberleşme modelindeki hiçbir kullanıcı PT kaynaklı bir enerji hasadı yapamaz. Her bir RL_j kullanıcısının bataryasında başlangıç enerjisi (E_i) olmasına karşın bu enerji, AVİM modunda çalışmak için yeterli olmaz ve RL_j pasif hale geçer. İşbirliğine dayalı bir sistem modeli kurgulanarak ağın performansı artırılmaya çalışıldığından, kullanıcı içyapısına gömülü halde bulunabilecek bir harici enerji kaynağı kullanılmamıştır.

Her bir ST_i, kendisine yakın konumdaki röle kullanıcılarına bilgisini aktarmak için sinyalini geri saçılım haberleşme yoluyla gönderir. Uzakta bulunan RL_j kendisine gelen sinyalin seviyesi düşük kaldığından geri saçılan bilgiyi çözemez. Bu sebeple kendini çalıştırarak hasat ettiği enerjiyi harcamak yerine daire üzerine kendisine yakın konumdaki bir başka ST kullanıcısının bilgisini kendisine iletmesini bekler. Özetle her röle β süresinde kendisine gelen verinin belli bir eşik değerinin (R_t) üstünde veya altında olmasına göre aktif ya da pasif olmaktadır. SR, hem rölenin hem de ST'nin kanal durumu bilgisine (CSI) sahip olup, tüm kullanıcıların hangi fazda çalıştığını iyi bilmektedir. Öte yandan iletilen bilgilerin kodunu çözmek için kullanıcıların çalışma moduna uygun demodülatör devresi kullandığı da varsayılmıştır [17, 24]. Kullanıcıların verilerini aynı anda ilettiği bu tür çok kullanıcılı sistemlerde alıcı, kendisine gelen sinyalleri literatürde çokça kullanılan ardışık girişim giderici (SIC) veya ortak kod çözme yöntemlerini kullanarak geri elde edebilir. Önerilen bu sistemde SR ve RL_j kullanıcılarının SIC yöntemini kullanarak bilgiyi tekrar elde ettikleri düşünülmüştür. Bu yöntemle alıcıya ulaşan herhangi bir girişim sinyali arzu edilen sinyal üzerinden uzaklaştırılabilir.

Zaman çerçevesinin T-saniye periyodu boyunca sabit kalan ancak farklı periyotlarda değişebilen kanal kazançları, yarı statik düz sönümleme (quasi static flat-fading) olarak modellenmiştir. Bunlara ek olarak sistem modelinde mesafeye bağlı bir sinyal zayıflamasının (distance-dependent signal attenuation) olduğu da dikkate alınmıştır. PT'den ST_1 kullanıcısına gelen sinyal $\sqrt{h_{n,1}}x$ olarak ifade edilir. Buradaki gürültü ihmal edilmiştir. ST_1 kullanıcısından geri saçılan sinyal ise Eş. 7.3 ile temsil edilir.

$$S_1 = \gamma_1 \sqrt{h_{n,1}} x c_1 \tag{7.3}$$

Yukarıdaki eşitlikte c_1 ile ifade edilen terim, ST_1 kullanıcısının mevcut sinyali geri saçarken sinyalin üzerine yüklediği kendi bilgisidir. GSRA modunda RL_1 tarafından alınan toplam sinyal şu şekilde yazılabilir.

$$\begin{aligned} y_{r_1} &= \gamma_1 \sqrt{h_{n,1}} \sqrt{g_{11}} x c_1 + \sqrt{h_{r,1}} x + n_{r1} + \gamma_2 \sqrt{h_{n,2}} \sqrt{g_{21}} x c_2 + \sqrt{h_{r,1}} x + n_{r1} + \ldots \\ &+ \gamma_N \sqrt{h_{n,N}} \sqrt{g_{N1}} x c_N + \sqrt{h_{r,1}} x + n_{r1} \end{aligned} \tag{7.4}$$

Ana sistem modelinde herhangi bir RL_j kullanıcısına gelen sinyal ise aşağıdaki gibi genelleştirilebilir.

$$y_{r_j} = \gamma_1 \sqrt{h_{n,1}} \sqrt{g_{1j}} x c_1 + \sqrt{h_{r,j}} x + n_{rj} + \ldots + \gamma_N \sqrt{h_{n,N}} \sqrt{g_{Nj}} x c_N + \sqrt{h_{r,j}} x + n_{rj} \tag{7.5}$$

Eşitlikteki Gauss gürültüsü n_{rj} ile ifade edilmiş olup 0 ortalama, σ^2 varyansına sahiptir ve $N(0, \sigma^2)$ şeklinde gösterilir. PT'den RL_j rölesine ulaşan girişim sinyali $\sqrt{h_{r,j}}$ ile ifade edilmiştir. Sistem modelindeki kullanıcılar TDMA tekniği ile haberleştiklerinde, kendilerine ayrılan süre içerisinde veri aktarımını gerçekleştirdiklerinden birbirlerine girişim oluşturmazlar. Bu durum ağda yüksek veri iletim hızını elde etmek için büyük avantajdır. Şekil 7.2 (a)'da görüldüğü gibi tüm kullanıcılar β süresince birincil sistemdeki verici tarafından yayılan sinyalden enerji hasat eder ve aktif olacak röleler belirlenir. ST_i, ϕ_i süresi boyunca geri saçılım haberleşme yoluyla SR'ye bilgi iletimi gerçekleştirirken, diğer tüm kullanıcılar enerji depolamaya devam eder. Bu durum GSRA modundaki tüm zaman aralıklarında her kullanıcı için devam eder. AVİM fazında her ST_i kullanıcısı, enerji hasat ederek depoladığı enerjiyi τ_i süresi boyunca kullanarak aktif veri iletimini gerçekleştirir. ST_i sensörü, AVİM modunda PT istasyonu sustuğundan ortamda kullanılabilir bir sinyal bulamaz ve geri saçılım yapamaz. GSRA durumunda ST_i ve RL_j, SR'ye bilgi aktarımını yapar. AVİM modunda ise yalnızca ST_i verisini iletir.

5G ve ötesi sistemlerde oldukça tercih edilen NOMA, birden fazla vericinin bulunduğu ağlarda kullanıcıların aynı anda alıcıya veri iletebilmesine ve bu verinin alıcı tarafından sağlıklı bir şekilde geri elde edilebilmesine olanak sağlamaktadır [39]. NOMA tekniğinde

kullanıcılar frekans spektrumunu verimli bir şekilde kullanabilir. Bu avantajlarından dolayı sistem modeli, Şekil 7.2 (b)'de gösterilen NOMA senaryosu ile de kurgulanmıştır. NOMA senaryosunda, TDMA senaryosundan farklı olarak tüm ST kullanıcıları, AVİM modunda bilgilerini aynı anda SR'ye gönderir. ST kullanıcıları birbirlerine girişim oluşturduğundan, matematiksel eşitliklerde bu durum dikkate alınarak çıkarımlar yapılmıştır.

Problem Formülasyonu

ST_i sensörü, GSRA modu sırasında uyguladığı geri saçılım haberleşmede birincil sistemdeki PT 'den enerji hasat etmeye devam eder. Enerji hasat devresindeki bataryada depolanan bu enerji, kullanıcının aktif olarak bilgi iletimini gerçekleştirebilmesinde yeterli değildir. Ancak cüzi miktardaki bu enerji iç devredeki basit bileşenlerin güç tüketimlerinde kullanılabilir. Bu sebepten ötürü geri saçılım sırasında kullanıcının içyapısında tükettiği enerji, matematiksel denklemlerde dikkate alınmamıştır.

β süresince RL_j tarafına ulaşan bit sayısı belli bir eşik değerin (R_t) üzerinde ise o röle aktif olarak kabul edilir. Böylece röle kullanıcıları, depoladıkları enerjiyi kendilerine yakın konumdaki ST kullanıcıları için tüketir. Bu durum, röle tarafından depolanan enerjinin daha verimli kullanılmasına olanak sağlar. Böylece her bir röle kullanıcısı için hizmet kalitesi (QoS) garanti altına alınmış olunur [20]. ST_i kullanıcısından geri saçılan sinyal RL_j tarafında çözüldükten sonra SR'ye iletilir. Şekil 7.1 (b)'de gösterilen alt sistemde sadece RL_1 aktif halde iken SR'ye ulaşan bit sayısı aşağıda verilmiştir.

$$R_1 = \phi_1 B_1^b a_1 + \phi_1 \psi W \log_2\left(1+\gamma_{rl1}\right) \tag{7.6}$$

Eşitlikte γ_{rl1}, RL_1 için sinyal-gürültü oranıdır. Birden çok rölenin aktif olduğu bir senaryoda ϕ_1 süresince SR'ye iletilen veri Eş. 7.7'de verilmiştir.

$$R_1 = \phi_1 B_1^b a_1 + \sum_{j=1}^{M} \phi_1 \psi W \log_2\left(1+\gamma_{rlj}\right) \tag{7.7}$$

GSRA durumunda zaman çerçevesi dikkate alındığında sistemdeki tüm kullanıcılar tarafından SR'ye iletilen toplam bit sayısı aşağıdaki denklemle ifade edilebilir.

$$R_{toplam_1} = \sum_{i=1}^{N} R_i = \sum_{i=1}^{N} \phi_i B_i^b a_i + \sum_{j=1}^{M} \sum_{i=1}^{N} \phi_i \psi W \log_2 \left(1+\gamma_{rlj}\right) \tag{7.8}$$

RL_j rölesinin PT'den hasat ettiği maksimum enerji $E_j = P^T h_{r,j}(1-\alpha)\eta$ ile ifade edilir. Ortalama sinyal iletim gücü ise aşağıdaki gibi bulunur.

$$P_{rj} = \frac{E_j}{\phi_i} \tag{7.9}$$

Yukarıdaki eşitlik kullanılarak RL_j için sinyal-gürültü oranı yazılabilir.

$$\gamma_{rlj} = \frac{P_{rj} g_{rj,SR}}{\sigma^2} \tag{7.10}$$

SR alıcısındaki gürültü gücü σ^2 ile temsil edilir. ST_i kullanıcısı DSS'den kendisine gelen radyo frekans sinyalini kullanarak enerji hasadı yapar. Depolanan bu enerji kullanıcıların AVİM modunda kullanması için yeterli değildir. Düşük seviyedeki bu güç, geri saçılım için gerekli az miktardaki enerjide kullanılır. Bu sebeple geri saçılım haberleşmenin başrolde olduğu ve rölelerin aktif olarak çalıştığı GSRA modunda devre enerji tüketimi için gereken enerji matematiksel denklemlerde dikkate alınmamıştır [8].

Zaman çerçevesinde belirlenen TDMA senaryosu için her bir ST_i kullanıcısının birincil sistemdeki PT vericisinden hasat ettiği güç aşağıdaki eşitlik ile verilir.

$$P_{ST_i}^{PT} = \frac{P^T G_T G_i^R \lambda^2 \varepsilon}{\left(4\pi d_{n,i}\right)^2} \tag{7.11}$$

ST_i kullanıcısının kendi düğümünde bulunan DSS kaynağından hasat ettiği güç, Eş. 7.12 ile ifade edilmiştir.

$$P_{ST_i}^{DSS} = \frac{P_{DSS}^T G_{DSS,T} G_i^R \lambda^2 \varepsilon}{\left(4\pi d_i^{DSS}\right)^2} \tag{7.12}$$

Böylece ST_i tarafından hasat edilen toplam güç ve enerji sırasıyla Eş. 7.13 ve Eş. 7.14'teki gibi tanımlanabilir.

$$P_{ST_i} = P_{ST_i}^{PT} + P_{ST_i}^{DSS} \tag{7.13}$$

$$E_i^h = \left(P_{ST_i}^{PT} + P_{ST_i}^{DSS}\right)\left(1-\alpha-\phi_i-\beta\right) \tag{7.14}$$

ST_i tarafından gönderilen sinyalin iletim gücü Eş. 7.15'te verilmiştir.

$$P_i^{tr} = \frac{E_i^h}{\tau_i} \tag{7.15}$$

Böylece birincil kanaldaki vericinin susup yayın yapmadığı AVİM süresince ST_i tarafından iletilen bit hızı aşağıdaki Eş. 7.16'da verilen kanal kapasitesi formülü ile bulunur.

$$r_i^h = K_i W \log_2\left(1+\frac{P_i^{tr}}{P_i^0}\right) \tag{7.16}$$

Yukarıda verilen ifade de $P_i^0 = \frac{N_0}{g_{i,SR}}$, ($N_0$: Gürültü gücü) dür. AVİM süresince ST_i tarafından iletilen bit sayısı Eş. 7.17 ile bulunur.

$$R_i^h = \tau_i K_i W \log_2\left(1+\frac{\left(P_{ST_i}^{PT} + P_{ST_i}^{DSS}\right)\left(1-\alpha-\phi_i-\beta\right)}{\tau_i P_i^0}\right) \tag{7.17}$$

AVİM süresince sistem modelindeki tüm ST'ler tarafından SR'ye iletilen toplam bit sayısı Eş. 7.18'de gösterilmiştir.

$$R_{toplam_2} = \sum_{i=1}^{N} \tau_i K_i W \log_2\left(1+\frac{\left(P_{ST_i}^{PT} + P_{ST_i}^{DSS}\right)\left(1-\alpha-\phi_i-\beta\right)}{\tau_i P_i^0}\right) \tag{7.18}$$

Sistem modelinde TDMA tekniği kullanıldığı takdirde, T = 1 saniye tam periyodu referans alınarak GSRA ve AVİM durumunda ikincil kanal tarafından SR'ye iletilen toplam bit sayısı Eş. 7.19'da verilmiştir.

$$R_{toplam} = \sum_{i=1}^{N} \phi_i B_i^b a_i + \sum_{j=1}^{M} \sum_{i=1}^{N} \phi_i \psi W \log_2\left(1+\gamma_{rlj}\right) + \sum_{i=1}^{N} \tau_i K_i W \log_2\left(1+\frac{\left(P_{ST_i}^{PT}+P_{ST_i}^{DSS}\right)\left(1-\alpha-\phi_i-\beta\right) g_{i,SR}}{\tau_i N_0}\right) \tag{7.19}$$

Ele aldığımız problemde amacımız, SR'ye iletilen toplam bit sayısını maksimize etmektir. Bu sebeple sistem modelinde TDMA yaklaşımıyla iletişimin gerçekleştirildiği senaryo dikkate alındığında, bazı kısıtlara sahip optimizasyon problemi Eş. 7.20'de verilmiştir.

$$\max_{\bar{\phi},\bar{\tau}} R_{toplam} \rightarrow s.t \begin{cases} \sum_{i=1}^{N} \phi_i \le 1-\alpha-\beta \\ \phi_i \ge 0 \\ \sum_{i=1}^{N} \tau_i \le \alpha \\ \tau_i \ge 0 \end{cases} \tag{7.20}$$

Eş. 7.20'deki problemin çözümünü bulmak için öncelikle amaç fonksiyonu R_{toplam}'ın içbükey bir fonksiyon olduğunu ispatlamamız gerekmektedir. Aşağıda verilen matematiksel çıkarımlarda, Eş. 7.20'deki optimizasyon probleminin amaç fonksiyonunun ϕ ve τ'ya göre içbükey bir fonksiyon olduğu gösterilmiştir. Problemdeki bütün kısıtların da afin (affine) olduğu kolayca görülebilir. Bu sebeple içbükey bir fonksiyon, dışbükey optimizasyon teknikleri ile çözülebilmektedir. Denklemlerde kullanılacak bazı değişkenler tanımlanarak problem analiz edilebilir.

$$y_1 = B_i^b a_1 \tag{7.21}$$

$$y_2 = \psi W \tag{7.22}$$

$$y_3 = K_i W \tag{7.23}$$

$$y_4 = \frac{P_{ST_i} g_{i,SR}}{N_0} \tag{7.24}$$

$$y_5 = 1 - \alpha - \beta \tag{7.25}$$

$$z_j = \frac{E_j g_{r_j,SR}}{\sigma^2}, \left(z_1 = z_2 = ... = z_M = z\right) \tag{7.26}$$

Burada y_1, y_2, y_3, y_4, y_5 *ve* z_j değişkenleri negatif olmayan sayılardır. Optimizasyon probleminin temelini oluşturan ve karakteristiği belirleyen geri saçılım ve aktif veri iletim süreleri vektör olarak ifade edilirse Eş. 7.27 tanımlanabilir.

$$\bar{x} = \left[x_1, ..., x_N, x_{N+1}, ..., x_{N+N}\right]^T = \left[\phi_1, ..., \phi_N, \tau_1, ..., \tau_N\right]^T \tag{7.27}$$

Yeni değişken tanımlamalarına göre Eş. 7.20'deki problemin amaç fonksiyonu yeniden yazılırsa Eş. 7.28 elde edilir.

$$R_{toplam}(\bar{x}) = \sum_{i=1}^{N} y_1 x_i + \sum_{j=1}^{M}\sum_{i=1}^{N} y_2 x_i \log_2\left(1 + \frac{z}{x_i}\right) + \sum_{i=1}^{N} y_3 x_{N+i} \log_2\left(1 + \frac{\left(y_5 - x_i\right) y_4}{x_{N+i}}\right) \tag{7.28}$$

Amaç fonksiyonunun gradyan vektörü Eş. 7.29'da gösterilmiştir.

$$\nabla R_{toplam}(\bar{x}) = \left[\frac{\partial R_{toplam}}{\partial x_1}, ..., \frac{\partial R_{toplam}}{\partial x_N}, \frac{\partial R_{toplam}}{\partial x_{N+1}}, ..., \frac{\partial R_{toplam}}{\partial x_{N+N}}\right] \tag{7.29}$$

TDMA tekniğinin referans alındığı zaman çerçevesinde, organize edilen geri saçılım zamanının ve röle kullanıcılarının aktif olduğu sürelerin bulunması için amaç fonksiyonunun önce x_1 değişkenine göre türevi alınır.

$$\begin{aligned}\frac{\partial R_{toplam}}{\partial x_1} &= y_1 + \left(\frac{y_3 x_{N+1}}{\mathrm{In2}}\left(\frac{-y_4}{x_{N+1} + \left(y_5 - x_1\right) y_4}\right)\right) \\ &+ M\left\{y_2 \log_2\left(1 + \frac{z}{x_1}\right) + y_2 x_1 \log_2 e\left(\frac{-z}{x_1\left(x_1 + z\right)}\right)\right\}\end{aligned} \tag{7.30}$$

R_{toplam} fonksiyonu x_N değişkenine göre türevlenirse Eş. 7.31 elde edilir.

$$\frac{\partial R_{toplam}}{\partial x_N} = y_1 + \left(\frac{y_3 x_{N+N}}{\text{In2}} \left(\frac{-y_4}{x_{N+N} + \left(y_5 - x_N\right) y_4} \right) \right) + M \left\{ y_2 \log_2 \left(1 + \frac{z}{x_N} \right) + y_2 x_N \log_2 e \left(\frac{-z}{x_N \left(x_N + z\right)} \right) \right\} \tag{7.31}$$

AVİM durumunda her kullanıcıya ayrı ayrı tahsis edilen aktif veri iletim süreleri için R_{toplam} fonksiyonunun x_{N+1} değişkenine göre türevi alınırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\frac{\partial R_{toplam}}{\partial x_{N+1}} = \frac{y_3}{\text{In2}} \left(\frac{-\left(y_5 - x_1\right) y_4}{\left(x_{N+1}\right) + \left(y_5 - x_1\right) y_4} \right) + y_3 \log_2 \left(1 + \frac{\left(y_5 - x_1\right) y_4}{\left(x_{N+1}\right)} \right) \tag{7.32}$$

R_{toplam} fonksiyonu x_{N+N} değişkenine göre türevlenirse Eş. 7.33 elde edilir.

$$\frac{\partial R_{toplam}}{\partial x_{N+N}} = \frac{y_3}{\text{In2}} \left(\frac{-\left(y_5 - x_N\right) y_4}{\left(x_{N+N}\right) + \left(y_5 - x_N\right) y_4} \right) + y_3 \log_2 \left(1 + \frac{\left(y_5 - x_N\right) y_4}{\left(x_{N+N}\right)} \right) \tag{7.33}$$

R_{toplam} fonksiyonunun Hesse matrisi Eş. 7.34 gibi yazılabilir.

$$\text{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 R}{\partial^2 x_1} & \cdots & \frac{\partial^2 R}{\partial x_1 \partial x_N} & \cdots & \frac{\partial^2 R}{\partial x_1 \partial x_{N+N}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 R}{\partial x_1 \partial x_N} & \cdots & \frac{\partial^2 R}{\partial^2 x_N} & \cdots & \frac{\partial^2 R}{\partial x_N \partial x_{N+N}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 R}{\partial x_{N+N} \partial x_1} & \cdots & \frac{\partial^2 R}{\partial x_{N+N} \partial x_N} & \cdots & \frac{\partial^2 R}{\partial^2 x_{N+N}} \end{bmatrix}_{\text{2N X 2N}} \tag{7.34}$$

Hesse matrisi simetri özelliğine sahip olduğundan aşağıdaki eşitlikleri yazmamız yeterlidir.

$$\frac{\partial^2 R}{\partial^2 x_1} = M \left\{ \frac{-2 y_2 z}{\left(\text{In2}\right) x_1 \left(x_1 + z\right)} + \frac{y_2 x_1 z}{\text{In2}} \left(\frac{2x_1 + z}{\left(x_1^2 + x_1 z\right)^2} \right) \right\} + \frac{-y_3 y_4^2 \left(x_{N+1}\right)}{\text{In2} \left(x_{N+1} + \left(y_5 - x_1\right) y_4 \right)^2} \tag{7.35}$$

$$\frac{\partial^2 R}{\partial^2 x_N} = M\left\{\frac{-2y_2 z}{(\mathrm{In2})x_N(x_N+z)} + \frac{y_2 x_N z}{\mathrm{In2}}\left(\frac{2x_N+z}{\left(x_N^2+x_N z\right)^2}\right)\right\} + \frac{-y_3 y_4^2\left(x_{N+N}\right)}{\mathrm{In2}\left(x_{N+N}+\left(y_5-x_N\right)y_4\right)^2} \tag{7.36}$$

$$\frac{\partial^2 R}{\partial^2 x_{N+1}} = \frac{-y_3\left(y_5-x_1\right)y_4}{\mathrm{In2}\left(x_{N+1}\right)\left(x_{N+1}+\left(y_5-x_1\right)y_4\right)} + \frac{y_3\left(y_5-x_1\right)y_4}{\mathrm{In2}\left(x_{N+1}+\left(y_5-x_1\right)y_4\right)^2} \tag{7.37}$$

$$\frac{\partial^2 R}{\partial^2 x_{N+N}} = \frac{-y_3\left(y_5-x_N\right)y_4}{\mathrm{In2}\left(x_{N+N}\right)\left(x_{N+N}+\left(y_5-x_N\right)y_4\right)} + \frac{y_3\left(y_5-x_N\right)y_4}{\mathrm{In2}\left(x_{N+N}+\left(y_5-x_N\right)y_4\right)^2} \tag{7.38}$$

$$\frac{\partial^2 R}{\partial x_1 \partial x_{N+1}} = \frac{\partial^2 R}{\partial x_{N+1}\partial x_1} = \frac{-y_4^2 y_3}{\mathrm{In2}}\left(\frac{y_5-x_1}{\left(x_{N+1}+\left(y_5-x_1\right)y_4\right)^2}\right) \tag{7.39}$$

$$\frac{\partial^2 R}{\partial x_N \partial x_{N+N}} = \frac{\partial^2 R}{\partial x_{N+N}\partial x_N} = \frac{-y_4^2 y_3}{\mathrm{In2}}\left(\frac{y_5-x_N}{\left(x_{N+N}+\left(y_5-x_N\right)y_4\right)^2}\right) \tag{7.40}$$

Rastgele gerçel bir vektör tanımlandığı takdirde Eş. 7.41 yazılabilir.

$$\bar{v} = \left[v_1,\cdots,v_N,v_{N+1},\cdots,v_{N+N}\right]^T \tag{7.41}$$

Optimizasyon probleminin karakteristiğini belirlemek için Eş. 7.41'de tanımlanan vektör ile Hesse matrisi arasındaki ilişki aşağıda yazılmıştır.

$$\begin{aligned}\bar{v}^T\,\mathrm{H}\,\bar{v} = &\left(\frac{v_1^2\partial^2 R}{\partial^2 x_1} + \frac{(v_1)(v_{N+1})\partial^2 R}{\partial x_{N+1}\partial x_1}\right) + \cdots + \left(\frac{v_N^2\partial^2 R}{\partial^2 x_N} + \frac{(v_N)(v_{N+N})\partial^2 R}{\partial x_{N+N}\partial x_N}\right) \\ &+ \left(\frac{v_{N+1}^2\partial^2 R}{\partial^2 x_{N+1}} + \frac{(v_1)(v_{N+1})\partial^2 R}{\partial x_{N+1}\partial x_1}\right) + \cdots + \left(\frac{v_{N+N}^2\partial^2 R}{\partial^2 x_{N+N}} + \frac{(v_N)(v_{N+N})\partial^2 R}{\partial x_{N+N}\partial x_N}\right)\end{aligned} \tag{7.42}$$

Hesse matrisinin simetrik olma özelliğinden dolayı bu kadar eşitlik yazmamız yeterli olmaktadır. Eş. 7.42'de gerekli düzenlemeler yapıldığı takdirde Eş. 7.43 elde edilir.

$$\bar{v}^{T}\,\mathrm{H}\,\bar{v} = -\frac{y_3 y_4^2 \left\{\left(v_1 x_{N+1}\right)+\left(v_{N+1}\left(y_5 - x_1\right)\right)\right\}^2}{\mathrm{In}2\left(x_{N+1}\right)\left(x_{N+1}+\left(y_5 - x_1\right)y_4\right)^2} - \frac{v_1^2 M y_2 z^2 x_1}{\mathrm{In}2(x_1^2 + x_1 z)^2} \tag{7.43}$$

Eş. 7.43'e dikkatli bir şekilde bakıldığında $v^{-}Hv \leq 0$ olduğu görülmektedir. Bu sonuca bağlı olarak **H** matrisinin negatif yarı-kesin matris olduğu söylenebilir. Problemdeki amaç fonksiyonu sistem değişkenlerine göre analiz edildiğinde, içbükey bir fonksiyon olduğu söylenebilir. Dolayısıyla dışbükey optimizasyon teknikleri ile analiz yapılıp optimal çözüm bulunur.

Sistem modelinde NOMA tekniği kullanıldığı takdirde, ST kullanıcıları aynı anda ve α süresi boyunca SR'ye bit aktarımını gerçekleştirmektedir. Bu senaryoda her bir ST_i kullanıcısı tarafından hasat edilen enerji Eş. 7.44 ile verilir.

$$E_i^h = \varepsilon\left(P^T\left(1-\alpha-\phi_i-\beta\right)\left(h_{n,i}\right)+P_{DSS}^T\left(1-\alpha-\phi_i-\beta\right)h_i^{DSS}\right) \tag{7.44}$$

ST_i' nin veri iletim gücü Eş. 7.45'de tanımlanmıştır.

$$P_i^{tr} = \frac{E_i^h}{\alpha} \tag{7.45}$$

Birincil kanalın sessizde kaldığı AVİM durumunda, ST_i tarafından iletilen bit sayısı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir.

$$R_i^h = \alpha K_i W \log_2\left(1+\frac{\left(P_i^{tr}\right)g_{i,SR}}{\left(\sigma^2+\sum_{j=i+1}^{N}\left(P_j^{tr}g_{j,SR}\right)\right)}\right) \tag{7.46}$$

Sistem modelinde NOMA tekniği kullanıldığı takdirde, T = 1 saniye tam periyodu referans alınarak GSRA ve AVİM durumunda ikincil kanal tarafından SR'ye iletilen toplam bit sayısı Eş. 7.47'de verilmiştir.

$$R_{toplam} = \sum_{i=1}^{N} \phi_i B_i^b a_i + \sum_{j=1}^{M} \sum_{i=1}^{N} \phi_i \psi W \log_2\left(1+\gamma_{rlj}\right) + \sum_{i=1}^{N} \alpha K_i W \log_2 \left(1 + \frac{P_i^{tr} g_{i,SR}}{\left(\sigma^2 + \sum_{j=i+1}^{N} \left(P_j^{tr} g_{j,SR} \right) \right)} \right) \quad (7.47)$$

TDMA senaryosuna benzer şekilde NOMA senaryosuna ait optimizasyon problemi Eş. 7.48'deki gibi düzenlenebilir.

$$\max_{\bar{\phi},\bar{\tau}} R_{toplam} \rightarrow s.t \begin{cases} \sum_{i=1}^{N} \phi_i \leq 1-\alpha-\beta \\ \phi_i \geq 0 \\ \alpha \geq 0 \end{cases} \quad (7.48)$$

Eş. 7.20'deki optimizasyon probleminin içbükey olduğunu ispatlamak için kullandığımız yöntem ve matematiksel adımlar, Eş. 7.48'e de benzer şekilde uygulanabilir. Bu nedenle problem çözümünde dışbükey optimizasyon teknikleri kullanılır. Tanımlanan tüm formülasyonlara bağlı olarak aşağıda verilen algoritma, önerilen TDMA/NOMA senaryosu için ele alınan problemi çözmede kullanılabilir.

Çizelge 7.2. Birden çok ST ve röle kullanıcısının olduğu işbirlikçi sistem modelinde TDMA ve NOMA senaryosu için kullanılabilecek algoritma tablosu

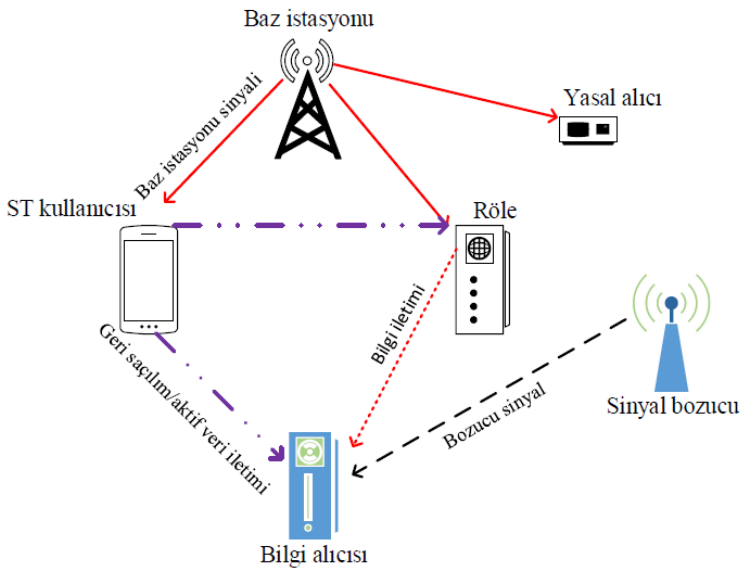
TDMA ve NOMA senaryosu için kullanılan algoritma	
Adım 1	GSRA periyodunda röle kullanıcısına iletilen bit sayısı, önceden tayin edilen eşik değeri ile karşılaştırılır. Eğer $R_j^s = \beta B_i^b \gamma_i g_{ij} \geq R_t$ ise, o zaman röle aktiftir. Değilse röle pasiftir ve bilgi aktarımında görev almaz.
Adım 2	GSRA modunda SR'ye iletilen bit sayısı hesaplanarak $R_{toplam1}$ bulunur.
Adım 3	AVİM modunda SR'ye iletilen bit sayısı hesaplanarak $R_{toplam2}$ bulunur.
Adım 4	$R_{toplam} = R_{toplam1} + R_{toplam2}$ değeri, $\bar{\tau}$ ve $\bar{\phi}$ sistem değişkenleri üzerinden maksimize edilerek hesaplanır.

7.2. Röle ve Sinyal Bozucu altında Çevresel Geri Saçılım Tabanlı Bilişsel Radyo Ağı

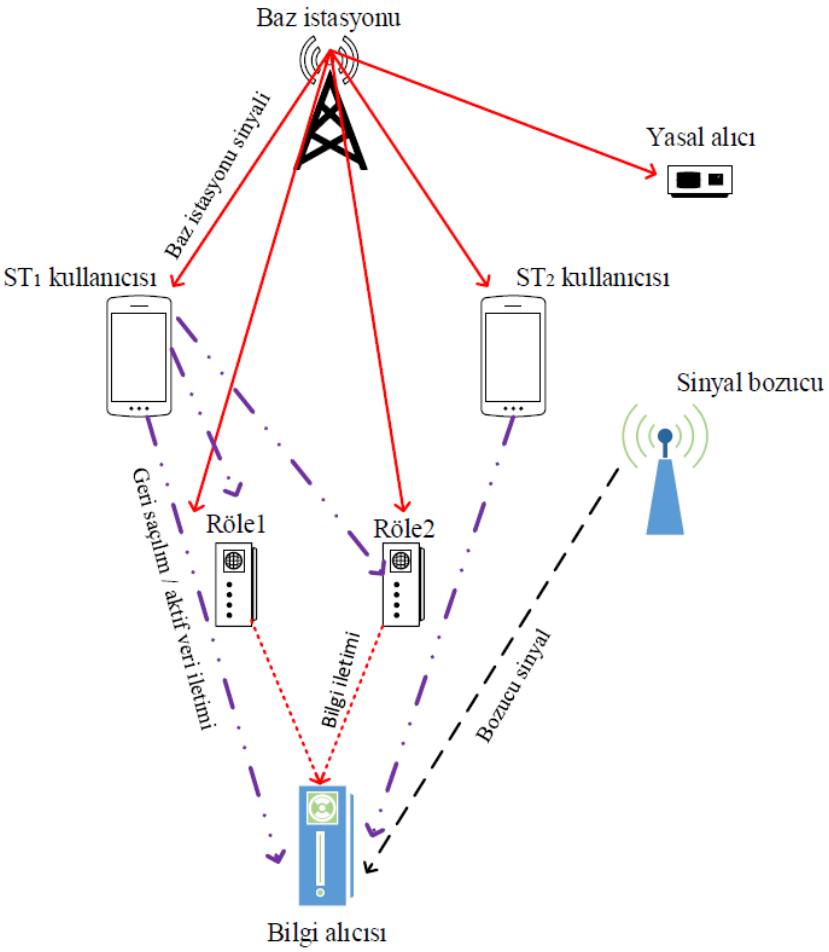
Bu bölümde geri saçılım haberleşmenin uygulandığı bilişsel radyo ağlarında, sinyal bozucunun varlığında sistem performansının nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Öncelikle ST ve rölenin olduğu iki kullanıcılı bir ağ oluşturulmuştur. Bu ağ, ikincil kanalı temsil etmektedir. Daha sonra iki adet ST ve iki adet röle olmak üzere dört kullanıcılı bir sistem tasarlanmıştır. Düşünülen her iki sistem için kullanıcılar, baz istasyonunun etrafa yaydığı sinyal ile enerji hasat edip bataryalarını doldurabilmektedir. Geri saçılım haberleşmenin dahil edildiği bu tip bilişsel radyo ağlarında sisteme eklenen sinyal bozucu, alıcıya iletilen sinyalin güç seviyesini ve kalitesini bozmaktadır. Bu yüzden röle kullanıcısı ST'den saçılan sinyali çözerek ikincil kanalın alıcısına bu bilgiyi göndermede yardım ederken, ST sensörü geri saçılım ve aktif veri iletim yoluyla bit aktarımını yapmaktadır. ST ve röle kullanıcısının sinyal bozucu varlığında birlikte çalıştığı bu sistemde amacımız, kullanıcıların ne kadar süre aktif iletim, enerji depolama ve geri saçılım yapacağını bulup birincil sistemin altyapısını kullanan ikincil kanalın alıcısına ulaşan bit sayısını maksimize etmektir. Bu yaklaşımla öncelikle nümerik analizler yapılmış, daha sonra sistem parametreleri bulunarak toplam bit sayısı hesaplanmıştır. Her iki senaryo, birbirleriyle ve farklı durumlardaki mevcut sistem modelleri ile karşılaştırılmış ve önerdiğimiz ağ modelinin üstünlükleri gösterilmiştir. Bulunan sonuçlarda sinyal bozucunun olduğu bu tip haberleşme sistemlerinde, röle ve ST sayısının artmasıyla ağ başarımının net bir şekilde iyileştiğinin görülmesi literatüre mühim bir katkı olarak görülebilir.

Önerilen her iki sistem modeli Şekil 7.3 ve Şekil 7.4'te gösterilmektedir. Bilişsel ağda bulunan ve ana sistemi oluşturan birincil kanalın baz istasyonu, kendi yasal alıcısına (birincil alıcı) bilgisini göndermektedir. Baz istasyonundan gönderilen sinyali kullanarak enerji hasadı yapan ve bu enerjiyi kullanarak geleneksel haberleşme yöntemleriyle veri aktarımını gerçekleştiren ST, aynı zamanda geri saçılım haberleşme tekniğinden de faydalanmaktadır. Önerilen her iki sistemde ikincil alıcıdaki sinyal-gürültü oranını (SNR) düşüren ve bir tam haberleşme periyodunda kesintisiz çalışan bir sinyal bozucu bulunmaktadır. Sistemin performansını artırmaya yönelik kullanılan rölenin ise iki antene sahip olduğu kabul edilmiştir. Birinci anten ile birincil kanalın sinyali kullanılarak enerji depolanırken, diğer anten sayesinde ST'den gelen bilgi önce çözülüp daha sonra ikincil kanalın alıcısına iletilir.

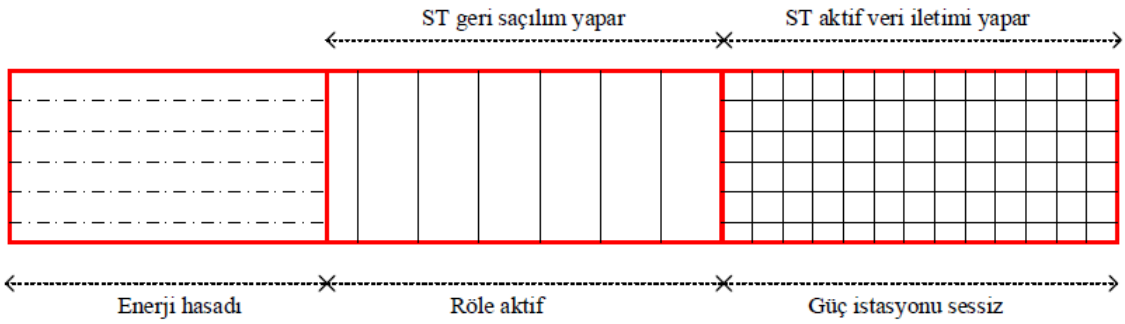
Tek ST ve röleye sahip haberleşme ağı için düzenlenen zaman çerçevesi Şekil 7.5'te verilmiştir. İki adet ST ve iki adet röle bulunduran iletişim sistemi için verilen zaman çerçevesi ise Şekil 7.6'da gösterilmiştir. Zaman çerçevelerinin başında enerji hasadı için ayrılmış süre δ_h ile ifade edilmiştir. Bu süre boyunca ST ve röle, daha sonra aktif veri iletiminde kullanmak üzere baz istasyonu sinyalinden enerji hasat eder. Hasat edilen enerji röle tarafında δ_{br} süresinde ST kullanıcısının sinyalini bilgi alıcısına göndermede kullanılırken, ST'nin de baz istasyonunun sessiz kaldığı θ_b süresince aktif veri iletimi yapabilmesine imkan tanır. Sistem modelinde performansı artırmada görev alan röle için kritik nokta şudur ki, röle depoladığı tüm enerjiyi δ_{br} süresince kullanır ve θ_b süresince ortamda birincil kanalın sinyali olmadığından pasif hale geçer. Bu sebeple belirtilen sürelerin optimal değerlerinin hesaplanıp kullanıcılara tahsisi, sistem başarımı açısından çok mühimdir. Bahsi geçen iletişim protokolü, sunulan ikinci sistem modeli için de söylenebilir. Tek fark iki adet ST ve iki adet röle kullanılmasıdır. İkinci sistemde ST_1 kullanıcısı için geri saçılım haberleşmeye ayrılacak süre δ_{br1}, ST_2 kullanıcısı için geri saçılım haberleşmeye ayrılacak süre δ_{br2} dir. ST_1 ve ST_2 geri saçılım süresince ayrı zamanlarda çalışırken her iki rölenin de aktif olarak çalıştığı kabul edilmiştir. Sistemdeki iki ST kullanıcısı θ_b süresince verilerini bilgi alıcısına aynı anda ileterek NOMA haberleşme tekniğinden faydalanmıştır. Literatürde NOMA tekniği ile kurulan iletişim sistemlerinde alıcıya ulaşan bilginin düzgün bir şekilde çözülmesi için ardışık girişim giderici (successive interference cancellation, SIC) yöntemi oldukça fazla kullanılmaktadır. Bu yüzden önerilen ikinci sistem için bilgi alıcısının SIC yöntemi ile ST_1 ve ST_2 verilerini çözdüğü kabul edilmiştir [3].



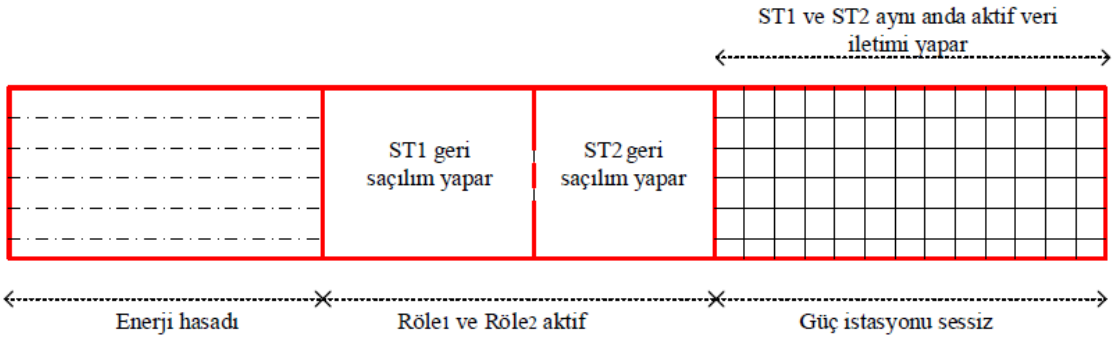
Şekil 7.3. Tek röle ve tek ST kullanıcısına sahip birinci sistem modeli.



Şekil 7.4. İki röle ve iki ST kullanıcısına sahip ikinci sistem modeli.



Şekil 7.5. Tek röle ve tek ST kullanıcısına sahip birinci sistem modeli için zaman çerçevesi.



Şekil 7.6. İki röle ve iki ST kullanıcısına sahip ikinci sistem modeli için zaman çerçevesi.

Tek ST ve röleye sahip birinci sistem modeli

Geri saçılım yapılacak δ_{br} süresince ST kullanıcısı tarafından bilgi alıcısına gönderilen veri sayısı Eş. 7.49 ile tanımlanır.

$$R_{ST}^{b} = \varepsilon_b \delta_{br} W \log_2\left(1+\frac{\alpha_g P g_{ST}}{P_0 + P_I}\right) \tag{7.49}$$

Yukarıdaki denklemde ST kullanıcısına gelen sinyal gücünün ne kadarlık kısmının geri saçılacağını belirleyen güç yansıma katsayısı α_g, birincil kanalın sistem bant genişliği W, tasarlanacak geri saçılım devre yapısı ile ilişkili olan geri saçılım verimliliği $\varepsilon_b \in [0,1]$, baz istasyonu sinyal iletim gücü P, baz istasyonu ve ST/röle arasındaki kanalın kazancı ise g_{ST} ile verilmiştir. Sinyal dalga boyu λ, baz istasyonu ve ST/röle arasındaki mesafe d_{nr}, baz istasyonu ve ST/röle anten kazançları $G^T = G^R$ olmak üzere kanal kazancı g_{ST}, Eş. 7.50 ile tanımlanabilir.

$$g_{ST} = \frac{G^T G^R \lambda^2}{\left(4\pi d_{nr}\right)^2} \tag{7.50}$$

Bilgi alıcısındaki gürültü gücünün, ST/röle-bilgi alıcısı arasındaki mesafeye bağlı olarak değişen kanalın kazancına oranı şeklinde tanımlanan P_0, Eş. 7.51'deki gibi verilmiştir.

$$P_0 = \frac{N_0}{h_{ST}} \tag{7.51}$$

İkincil kanalın alıcısı olarak görev yapan bilgi alıcısı ile P_{jp} gücüne sahip sinyal bozucunun arasındaki kanal kazancı h_{jp} olarak tanımlanırsa, Eş. 7.52'deki P_I değeri kolaylıkla yazılabilir.

$$P_I = P_{jp} h_{jp} \tag{7.52}$$

Rölenin ST tarafından kendisine gelen iletilen sinyali önce çözüp, daha sonra bilgi alıcısına doğru aktardığı toplam bit sayısı Eş. 7.53'de gösterilmiştir.

$$R_{rl} = \delta_{br} k_r W \log_2 \left(1+\gamma\right) \tag{7.53}$$

Yukarıdaki eşitlikte $k_r \in [0,1]$ aralığında olup rölenin bit iletim verimliliğidir. Baz istasyonunun sinyal iletimi yaptığı süre boyunca enerji hasadı yapan rölenin toplam depo ettiği güç P_{rl} olarak ifade edilirse aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$\gamma = \frac{P_{rl}}{P_0 + P_t} = \frac{P g_{ST} \left(1-\theta_b\right)}{\delta_{br} \left(P_0 + P_t\right)} \tag{7.54}$$

ST kullanıcısı, baz istasyonunun sinyal iletimini kestiği θ_b süresince aktif veri aktarımı yapar. İletilen bit sayısı Eş. 7.55'de verilmiştir.

$$R_{ST}^a = \theta_b W \log_2 \left(1+\frac{P_{ST}}{P_0 + P_I}\right) \tag{7.55}$$

ST'nin hasat ettiği güç aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$P_{ST} = \frac{\left(1-\alpha_g\right) P g_{ST} \left(1-\theta_b-\delta_{br}\right)}{\theta_b} \tag{7.56}$$

Tanımlanan tüm eşitliklere bağlı olarak önerilen birinci sistem modeli için bilgi alıcısına gönderilen toplam veri sayısı Eş. 7.57'deki gibi verilebilir.

$$R_{s1} = R_{ST}^{b} + R_{rl} + R_{ST}^{a}$$
$$R_{s1} = \varepsilon_b \delta_{br} W \log_2\left(1+\frac{\alpha_g P g_{ST}}{P_0 + P_I}\right) + \delta_{br} k_r W \log_2\left(1+\gamma\right) + \theta_b W \log_2\left(1+\frac{P_{ST}}{P_0 + P_I}\right) \quad (7.57)$$

Buradaki amacımız, Eş. 7.57'yi, $\delta_{br} + \theta_b \leq 1 - \delta_h$ ve $\delta_{br}, \theta_b, \delta_h \geq 0$ kısıtları altında maksimize etmektir.

İki ST ve iki röleye sahip ikinci sistem modeli

Sistem modelinde yer alan iki ST kullanıcısının geri saçılım haberleşme sürecinde bilgi alıcısına ilettiği toplam bit sayısı aşağıdaki gibi verilebilir.

$$R_{ST}^{b} = \sum_{k=1}^{2} \varepsilon_b \delta_{br_k} W \log_2\left(1+\frac{\alpha_g P g_{ST}}{P_{o_1} + P_I}\right) \quad (7.58)$$

Burada P_{0_1}, alıcı taraftaki gürültü gücünün ST/bilgi alıcısı arasındaki kanal kazancına oranı olarak verilmiştir ve aşağıdaki eşitlik ile bulunur.

$$P_{0_1} = \frac{N_0}{h_1} \quad (7.59)$$

Sistemdeki her iki röle kullanıcısı δ_h süresince yaptıkları enerji hasadını, aktif olduklarında kullanırlar. Hasat edilen bu enerjinin δ_{br1} süresi boyunca λ kadarı kullanılırken, 1- λ'lık kısmı δ_{br2}'de harcanır. İki rölenin δ_{br1} süresince alıcıya gönderdiği toplam bit sayısı Eş. 7.60'ta verilmiştir.

$$R_{rl}^{1} = \sum_{l=1}^{2} \delta_{br1} k_r W \log_2\left(1+\gamma_l^1\right) \quad (7.60)$$

Eş. 7.60'taki ifadede $\gamma_1^1 = \gamma_2^1$ olup SNR değeri aşağıdaki ifade ile bulunur.

$$\gamma_1^1 = \gamma_2^1 = \frac{P_{rl}}{P_{0_2} + P_I} = \frac{P g_{ST}\left(\delta_{br1} + \lambda \delta_h\right)}{\delta_{br1}\left(P_{0_2} + P_I\right)} \quad (7.61)$$

İki röle-bilgi alıcısı arasındaki kanalın kazancı h_2 olmak üzere P_{0_2} değeri Eş. 7.62'deki gibi tanımlanır.

$$P_{0_2} = \frac{N_0}{h_2} \tag{7.62}$$

İki rölenin δ_{br2} süresince alıcıya gönderdiği toplam bit sayısı Eş. 7.63'te gösterilmiştir.

$$R_{rl}^2 = \sum_{l=1}^{2} \delta_{br2} k_r W \log_2\left(1+\gamma_l^2\right) \tag{7.63}$$

Eş.7.61'e benzer şekilde Eş. 7.64 kolaylıkla yazılabilir.

$$\gamma_1^2 = \gamma_2^2 = \frac{P_{rl}}{P_{0_2}+P_I} = \frac{Pg_{ST}\left(\delta_{br2}+(1-\lambda)\delta_h\right)}{\delta_{br2}\left(P_{0_2}+P_I\right)} \tag{7.64}$$

Birincil kanalın yayın yaptığı süre boyunca kullanıcılar tarafından bilgi alıcısına gönderilen toplam veri sayısı aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{aligned} R_{s1} &= R_{ST}^b + R_{rl}^1 + R_{rl}^2 \\ R_{s1} &= \sum_{k=1}^{2} \varepsilon_b \delta_{br_k} W \log_2\left(1+\frac{\alpha_g Pg_{ST}}{P_{o_1}+P_I}\right) + \sum_{l=1}^{2} \delta_{br1} k_r W \log_2\left(1+\gamma_l^1\right) + \sum_{l=1}^{2} \delta_{br2} k_r W \log_2\left(1+\gamma_l^2\right) \end{aligned} \tag{7.65}$$

Birincil kanalın yayın yapmayı kestiği θ_b süresi boyunca sadece ST_1 ve ST_2, bit iletimi yapar. Veri aktarımını alıcıya doğru aynı anda gerçekleştiren bu kullanıcılar, NOMA tekniğinden yararlandıkları için Eş. 7.66 yazılabilir.

$$R_{s2} = \theta_b W \log_2\left(1+\frac{P_{ST_1}}{P_{o_1}+P_I}\right) + \theta_b W \log_2\left(1+\frac{P_{ST_2}}{(P_{o_1}+P_I)+P_{ST_1}}\right) \tag{7.66}$$

Tanımlanan tüm eşitliklere bağlı olarak önerilen ikinci sistem modeli için bilgi alıcısına gönderilen toplam veri sayısı Eş. 7.67'deki gibi tanımlanabilir.

$$R_s = R_{s1} + R_{s2}$$

$$R_s = \sum_{k=1}^{2} \varepsilon_b \delta_{br_k} W \log_2\left(1+\frac{\alpha_g P g_{ST}}{P_{o_1}+P_I}\right) + \sum_{l=1}^{2} \delta_{br1} k_r W \log_2\left(1+\gamma_l^1\right) + \sum_{l=1}^{2} \delta_{br2} k_r W \log_2\left(1+\gamma_l^2\right) \quad (7.67)$$

$$+\theta_b W \log_2\left(1+\frac{P_{ST_1}}{P_{o_1}+P_I}\right) + \theta_b W \log_2\left(1+\frac{P_{ST_2}}{(P_{o_1}+P_I)+P_{ST_1}}\right)$$

Buradaki amacımız Eş. 7.67'yi, $\delta_{br1} + \delta_{br1} + \theta_b \leq 1 - \delta_h$ ve $\delta_{br1}, \delta_{br2}, \theta_b, \delta_h \geq 0$ kısıtları altında maksimize etmektir.

7.3. Çift Yönlü Erişim Noktasının Bulunduğu Hücresel Ağ Yapısı

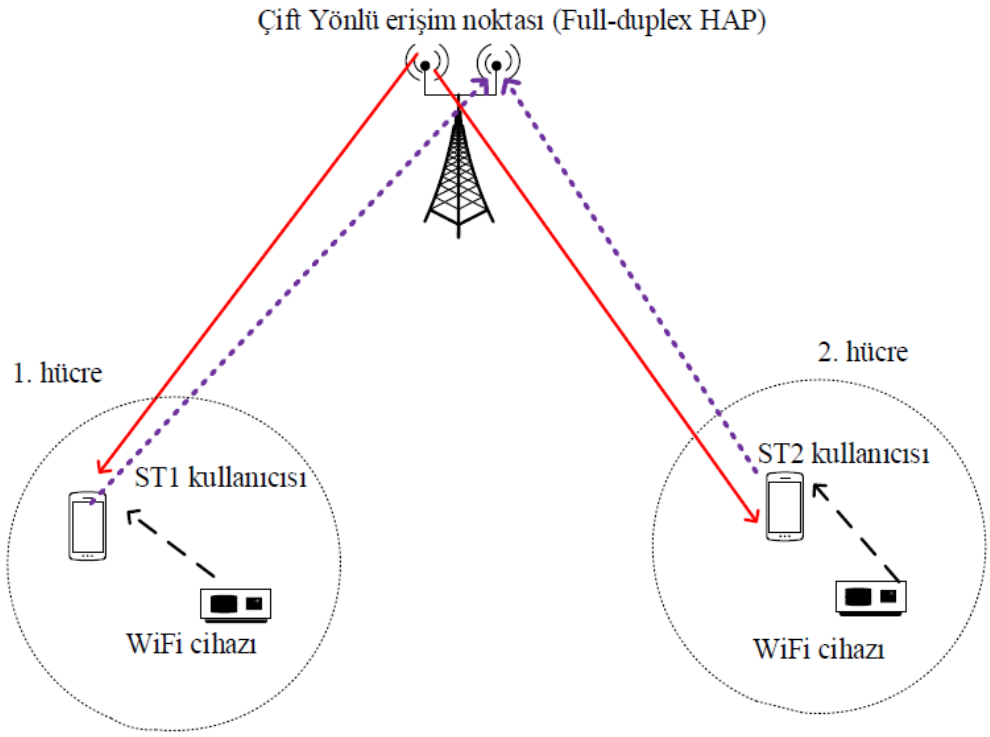
Literatürde geri saçılım haberleşme ve enerji hasadı sonrası aktif veri iletiminin gerçekleştirildiği karma ağ modellerinde güç istasyonunun genellikle tek antenli olduğu varsayılmıştır. Dolayısıyla iletişim sistemine harici bir alıcı tahsis edilerek kullanıcılardan gelen bilgiler toplanmıştır. Önerilen bu model ile elde edilen bulgular, 5G ve ötesi ağ yapılarında birden çok kullanıcının yer alacağı bu tür karma haberleşme sistemlerinin temelini teşkil edebilecek bazı sonuçları ortaya koymuştur.

Daha önceki bölümlerde ele alınan sistemlerden farklı olarak güç/baz istasyonu yerine çift yönlü erişim noktasına (full duplex, HAP) sahip bir ağ modeli düşünülmüştür. Önerilen iletişim sisteminde iki hücre olup her bir hücrede kullanıcıya sürekli sinyal gönderimi sağlayan WiFi cihazı bulunmaktadır. İki antene sahip olan HAP, bir anteniyle sürekli sinyal gönderimi yaparken diğer anteniyle ST_1 ve ST_2 kullanıcılarından gelen bilgiyi almaktadır. Dolayısıyla önerilen bu modelde HAP, hem bir sinyal kaynağı olarak çalışmakta hem de bir alıcı gibi görev yapmaktadır.

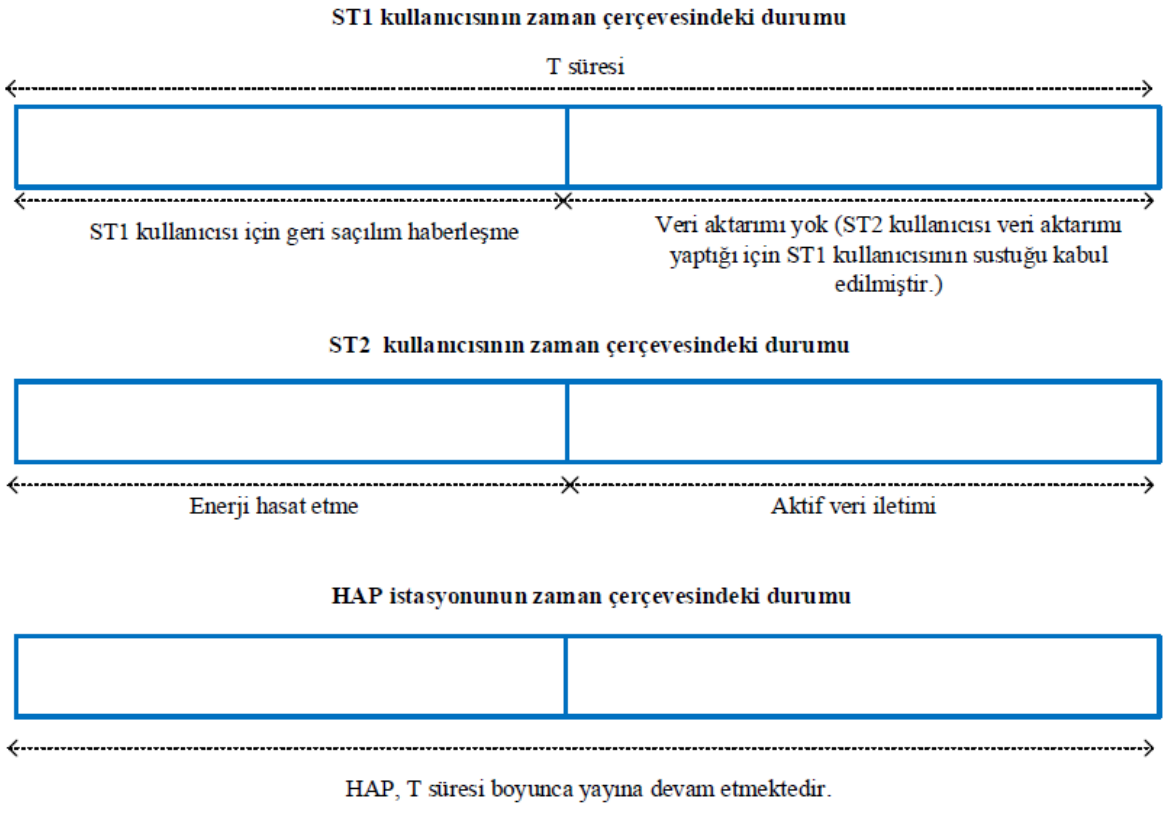
Birinci hücredeki ST_1 kullanıcısı, kendisine tahsis edilen sürede sadece geri saçılım yapmaktadır. Zaman çerçevesinin diğer kısımlarında veri iletimi yapmamaktadır. İkinci hücredeki ST_2 kullanıcısının ise enerji hasadı yapabilecek bir devre yapısına sahip olduğu düşünülmüştür. Bu sebeple HAP'tan gelen sinyalin enerjisini kullanarak hasat yapabilmektedir. ST_2 daha sonra hasat ettiği bu enerjiyi kullanarak HAP'a kendi bilgisini iletmektedir.

Kullanıcılar tarafından HAP'a iletilen toplam bit sayısının maksimize edilmeye çalışıldığı bu sistemde, optimum enerji hasadı, geri saçılım ve aktif veri iletim süreleri KKT (Karush-Kuhn-Tucker) koşulları uygulanarak bulunmuştur. Sistemin matematiksel formata dönüştürülmüş halinde, farklı sistem parametre değerlerinin performansa etkisi grafiksel olarak gösterilmiştir.

Sistem modeli Şekil 7.7'de gösterilmiştir. İletişim sisteminde, bir anteniyle zaman çerçevesinin bir tam periyodu boyunca sinyal iletimi yapan, diğer anteniyle ST_1 ve ST_2 kullanıcılarından gelen bilgileri alan iki antenli HAP ve iki adet hücre vardır. Birinci hücrede ST_1, ikinci hücrede ST_2 yer almaktadır. WiFi cihazı her iki hücreye de konumlandırılmıştır. ST_1 kullanıcısı enerji hasat devresine sahip olmasa da geri saçılım için kendi iç devre yapısındaki gereken düşük miktardaki enerjiyi WiFi cihazından sağlamaktadır. ST_2 kullanıcısı ise WiFi cihazı ve HAP'tan gönderilen sinyalden faydalanarak enerji hasat edip bataryasını doldurmaktadır. Şekil 7.8'de her bir kullanıcının zaman çerçevesindeki rolü gösterilmiştir. ST_1 kullanıcısı x_{11} süresince HAP'a doğru geri saçılım yaparken, ST_2 kullanıcısı y_{11} süresince HAP istasyonu tarafından gönderilen sinyal ile enerji hasat eder ve bu işlem süresi en fazla x_{11} kadardır. Geri saçılım yapan ST_1 kullanıcısı daha sonra susar ve kendini pasif olarak beklemeye alır. ST_1'in kendini beklemeye aldığı y_{22} süresi boyunca ST_2, hasat ettiği enerjiyi kullanarak aktif veri iletimi yapar. Zaman çerçevesinde bir tam periyot T = 1 saniye olarak normalize edilmiştir.



Şekil 7.7. Çift yönlü erişim noktasına sahip sistem modeli.



Şekil 7.8. ST_1, ST_2 ve HAP istasyonunun zaman çerçevesindeki durumları.

Eşitliklerin karmaşıklığını azaltmak için HAP istasyonunun sahip olduğu iki anten arasında tam bir izolasyon durumunun olduğu kabul edilip birbirlerine girişim oluşturmadıkları farzedilmiştir [83]. ST_1 kullanıcısının x_{11} süresince HAP'a doğru geri saçılım yaparak gönderdiği bit sayısı aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$R_{ST_1} = x_{11}\psi B_b \tag{7.68}$$

Yukarıdaki eşitlikte kullanıcının geri saçılım hızı B_b, geri saçılım verimliliği ise ψ olarak verilmiştir. ST_1/ST_2 ve HAP arasındaki uzaklık (d_{11}) eşit olup kanal kazancı g_{11}, Friis denklemi ile modellenebilir.

$$g_{11} = \frac{G_t G_r \lambda^2}{\left(4\pi d_{11}\right)^2} \tag{7.69}$$

Basitlik olması açısından sistemdeki tüm kullanıcıların anten kazançları eşit kabul edilmiştir ($G_t = G_r$). HAP'ın sinyal iletim gücü P_{HAP}, ST_2'nin enerji hasat etme verimliliği ϵ olmak üzere ST_2 kullanıcısının HAP'tan yayılan sinyal ile hasat ettiği güç, Eş. 7.70'de tanımlanmıştır.

$$P_{h_1} = \varepsilon P_{HAP} g_{11} \tag{7.70}$$

ST_2 kullanıcısının WiFi cihazından yayılan sinyal ile hasat ettiği güç, Eş. 7.71'de verilmiştir.

$$P_{h_2} = \varepsilon P_{WiFi} g_{22} \tag{7.71}$$

Burada WiFi cihazının sinyal iletim gücü P_{wifi}, ST_2-WiFi cihazı arası kanal kazancı g_{22} ile ifade edilmiştir. Kanal kazancı g_{22}, Eş. 7.69'a benzer şekilde bulunur. ST_2 tarafından hasat edilen toplam güç aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} P_h &= P_{h_1} + P_{h_2} \\ P_h &= \varepsilon P_{HAP} g_{11} + \varepsilon P_{WiFi} g_{22} \end{aligned} \tag{7.72}$$

ST_2 tarafından hasat edilen toplam enerji ise aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\begin{aligned} E_h &= y_{11}P_h + E_i \\ E_h &= y_{11}\left(\varepsilon P_{HAP} g_{11} + \varepsilon P_{WiFi} g_{22}\right) + E_i \end{aligned} \tag{7.73}$$

E_i değeri, ST_2 kullanıcısının bataryasında bulunan başlangıç enerjisi olarak kabul edilmiştir. Enerji hasat devresini kullanarak ortamdaki sinyallerden elde edilen bu enerji, y_{22} süresince kullanılır. ST_2'nin ortalama verici gücü aşağıda gösterilmiştir.

$$P_t = \frac{E_h}{y_{22}} \tag{7.74}$$

Sonuç olarak ST_2 kullanıcısı tarafından HAP alıcı antenine gönderilen bit sayısı Eş. 7.75 ile tanımlanır.

$$R_{ST_2} = y_{22} W \log_2\left(1 + \frac{P_t g_{11}}{\sigma^2}\right) \tag{7.75}$$

Gerekli düzenlemeler yapıldığı takdirde Eş. 7.76 yazılabilir.

$$\begin{aligned} R_{ST_2} &= y_{22} W \log_2\left(1 + \frac{y_{11}k_{11} + k_{22}}{y_{22}}\right) \\ k_{11} &= \frac{P_h g_{11}}{\sigma^2} \\ k_{22} &= \frac{E_i g_{11}}{\sigma^2} \end{aligned} \tag{7.76}$$

Sistem modeli için verilen tüm eşitliklere bağlı olarak HAP'a gönderilen toplam veri sayısı aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\begin{aligned} R &= R_{ST_1} + R_{ST_2} \\ R &= x_{11}\psi B_b + y_{22} W \log_2\left(1 + \frac{y_{11}k_{11} + k_{22}}{y_{22}}\right) \end{aligned} \tag{7.77}$$

Eş. 7.77'deki ifade dışbükey bir optimizasyon problemi olup KKT yöntemiyle *R* ifadesi bulunabilir. Yukarıdaki denklemde fonksiyonun maksimum değerini elde edebilmek için $y_{11} = x_{11}$ eşitliğinin sağlanması gerekmektedir. Dolayısıyla Eş. 7.77 ifadesi tekrar yazılarak Eş. 7.78 elde edilir.

$$R(x_{11}, y_{22}) = x_{11}\psi B_b + y_{22} W \log_2\left(1 + \frac{x_{11}k_{11} + k_{22}}{y_{22}}\right) \tag{7.78}$$

Eş. 7.78'i çözmeye başlamadan önce aşağıdaki vektör tanımlanabilir.

$$\bar{z} = \begin{bmatrix} x_{11} & y_{22} \end{bmatrix}^T \tag{7.79}$$

KKT çözümü için Lagrange çarpanı *l* olarak tanımlanırsa, Eş. 7.80'deki Lagrange fonsiyonu yazılabilir.

$$L\left(\bar{z}, l\right) = R\left(\bar{z}\right) - l\left(x_{11} + y_{22} - T\right) \tag{7.80}$$

KKT koşullarını, sistemin amaç fonksiyonunu oluşturan Eş. 7.78 için yazarsak aşağıdaki denklemler bütünü elde edilir.

$$\begin{aligned} & x_{11}^* + y_{22}^* \le T \\ & l^*\left(x_{11}^* + y_{22}^* - T\right) = 0 \\ & \frac{\partial R\left(\bar{z}\right)}{\partial z_i} - l^* = 0 \end{aligned} \tag{7.81}$$

Eş. 7.81'de yazılan x_{11}^* ve y_{22}^* değişkenleri optimal değerlerdir. KKT koşulları kapsamında yazılan son denklemde, R fonksiyonunun hem z_1 hem de z_2'ye göre türevi alınmaktadır. Öncelikle z_1'e göre türev alınırsa Eş. 7.82 elde edilir.

$$\frac{\psi B_b}{W} In2 + \frac{y_{22}k_{11}}{y_{22} + x_{11}k_{11} + k_{22}} = \frac{l^*}{W} In2 \tag{7.82}$$

Daha sonra z_2'ye göre türev alınırsa Eş. 7.83 elde edilir.

$$\alpha^{+} In(\alpha^{+}) - \alpha^{+} + 1 = \frac{l^{*} In2}{W} \alpha^{+} \tag{7.83}$$

Yukarıdaki ifadede yer alan α^{+} değeri, Eş. 7.84'te verilmiştir.

$$\alpha^{+} = 1 + \frac{x_{11} k_{11} + k_{22}}{y_{22}} \tag{7.84}$$

Eş. 7.82'deki ifade, Eş. 7.83'te yerine yazılıp gerekli düzenlemeler yapıldığı takdirde aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$f\left(\alpha^{+}\right) = \alpha^{+} In(\alpha^{+}) - \left(1 + \frac{\psi B_b}{W} In2\right) \alpha^{+} + 1 = k_{11} \tag{7.85}$$

Zaman çerçevesinde $x_{11}^{*} + y_{22}^{*} = T$ olduğu kabul edildiği takdirde, R amaç fonksiyonunu maksimize edecek en uygun x_{11}^{*} ve y_{22}^{*} değerleri bulunabilir.

$$\begin{aligned} x_{11}^{*} &= \max\left\{0, \frac{(\alpha^{+} - 1)T - k_{22}}{\alpha^{+} + k_{11} - 1}\right\} \\ y_{22}^{*} &= \min\left\{\frac{k_{11} T + k_{22}}{\alpha^{+} + k_{11} - 1}, T\right\} \end{aligned} \tag{7.86}$$

Ele alınan problem dışbükey bir karakteristiğe sahip olduğundan $f(\alpha^{+})$ fonksiyonunu minimize edecek tek bir nokta bulunabilir. Burada dikkat edilmesi gereken husus, $f(\alpha^{+}) = k_{11}$ eşitliğinin iki farklı α^{+} değeri ile elde ediliyor olmasıdır. Zaman parametrelerinin negatif değerli durumu sistem için anlamsız olacağından, x_{11}^{*} ve y_{22}^{*} değerini pozitif yapmanın yolu, fonksiyonu minimize eden α^{*} değerinin sağ tarafında kalan α^{+} değerini kullanmaktan geçmektedir.

7.4. Çevresel Geri Saçılım Tabanlı Altına Kurulan Bilişsel Radyo Ağı Yapısı

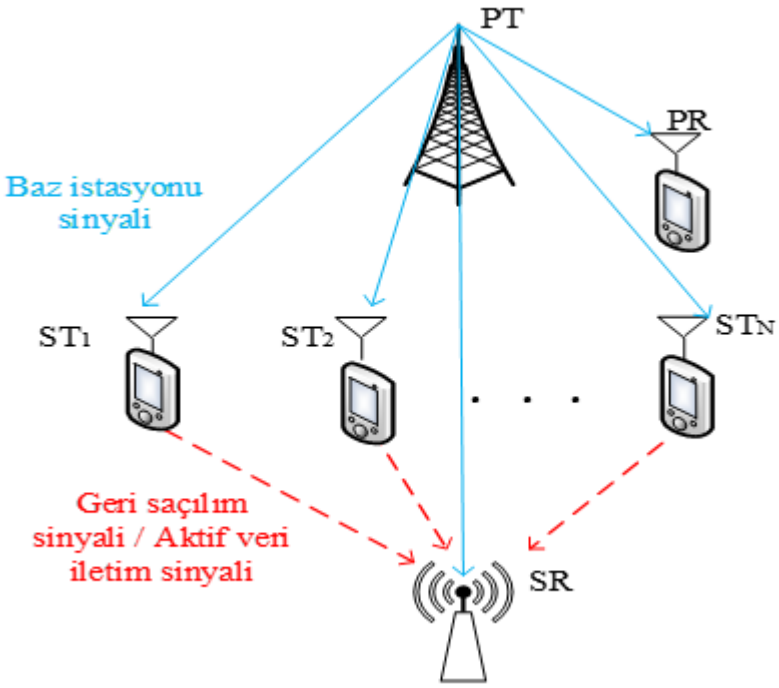
Bu bölümde ele alınan sistem modeli, çevresel geri saçılım tabanlı altına kurulan bilişsel radyo ağlarıyla ilgilidir. İkincil alıcıya iletilen toplam bit sayısı, kullanıcılara verilecek en uygun haberleşme süreleri ile maksimize edilip sistem performansı incelenmiştir. Altına kurulan bilişsel radyo ağlarında birincil kanal, zaman çerçevesinin bir tam periyodu boyunca aktif olup, birincil verici kendi alıcısına bilgisini göndermektedir. Dolayısıyla birincil kanalın iletişim altyapısını kullanarak bilgi alışverişini devam ettirmeye çalışan ikincil kanalın, birincil alıcıya girişim oluşturmaması gerekmektedir. Bu durum dikkate alınarak, ikincil kanaldaki birden çok ST kullanıcısının hem PT'den gelen sinyali geri saçarak SR'ye veri iletebildiği, hem de enerji hasadı yapıp daha sonra bu enerji ile kabul edilebilir bir düzeyde girişim eşik seviyesinin altındaki bir değerde aktif veri iletimi gerçekleştirebildiği bir haberleşme sistemi sunulmuştur.

Önerilen sistem modeli, matematiksel denklemler ile ifade edildikten sonra belli kısıtlara sahip bir optimizasyon problemine dönüştürülmüştür. Problemin amaç fonksiyonunu maksimum değere getirecek sistem parametreleri nümerik analizler ile bulunmuştur. Daha sonra farklı senaryolar altında sistem performansı karşılaştırmalı olarak grafiklerde gösterilmiştir.

Sistem modeli, Şekil 7.9'da gösterilmiştir. Bilişsel ağın birincil kanalını PR ve PT oluştururken, ikincil kanalında SR ve birden çok ST kullanıcısı bulunmaktadır. İkincil kanala özel tahsis edilmiş bir sinyal yayıcı bulunmadığından, ST kullanıcıları PT'den yayılan sinyalden faydalanmaktadır. Dolayısıyla PT'den yayılan sinyalin frekansı ve birincil kanalın kullandığı bant genişliği, ikincil kanal için de ortak olan parametrelerdir. Çalışma [24]'te burada önerilen modele benzer bir senaryo, üstüne kurulan bilişsel bir radyo ağı üzerinden incelenmiştir. Yazarlar önerdikleri modelde, PT'nin yayını belli bir süre kestiğini kabul edip bu perspektiften ikincil kanalın performansını incelemiştir. Tez çalışması kapsamında önerilen bu model, bilişsel radyo ağının farklı bir türünün kullanılmasıyla birlikte elde edilen sonuçlar bakımından da söz konusu çalışmadan ayrılmıştır.

İkincil kanalda verici görevinde olan ST'nin, hem geri saçılım haberleşme ile bilgi aktarımını gerçekleştirebilecek hem de enerji hasadı yapabilecek bir elektronik devre yapısına sahip olduğu kabul edilmiştir. Hasat edilen bu enerji geleneksel haberleşme

sistemlerinde kullanılan aktif veri iletim yoluyla gerçekleştirilen bit aktarımı sürecinde kullanılabilmektedir.



Şekil 7.9. ÇGSH tabanlı altına kurulan bilişsel radyo sistem modeli.

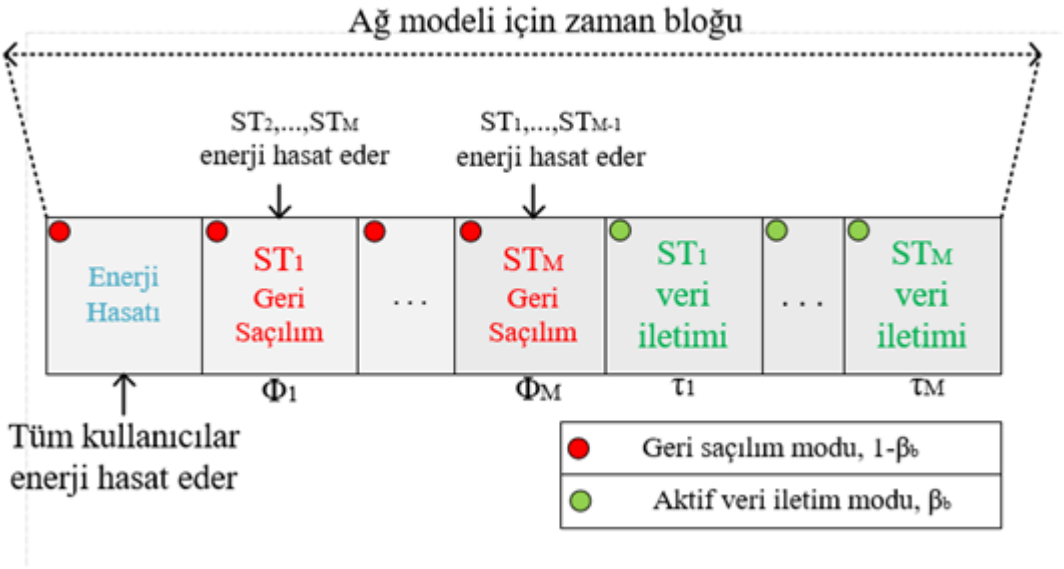
Şekil 7.10'da sistem modeli için önerilmiş zaman çerçevesi verilmiştir. ST kullanıcıları geri saçılım modunda ($1-\beta_b$) süresince çalışırken, β_b süresi boyunca aktif veri iletim modunda kalmaktadırlar. Her bir kullanıcıya ayrı süreler tahsis edilmiş olup birbirlerine girişim yapmaları engellenmiştir. ST_m kullanıcısı ($m = 1, 2, \ldots, M$), ϕ_m süresince geri saçılım haberleşme ile veri aktarımı yaparken, $(1 - \phi_m - \tau_m)$ süresince enerji hasat eder. Bu enerji aktif veri iletim modundaki τ_m zamanında kullanılır. Verilen sistem modeli için gereken bazı kısıtlar Eş. 7.87 ve Eş. 7.88'de tanımlanmıştır.

$$\sum_{m=1}^{M} \phi_m \leq 1 - \beta_b \tag{7.87}$$

$$\sum_{m=1}^{M} \tau_m \leq \beta_b \tag{7.88}$$

Eş. 7.87'deki kısıt ile tüm zaman parametrelerinin toplamının 1 saniyeyi geçmemesi garanti altına alınmıştır. Bu sayede zaman çerçevesi periyodu T = 1 saniyeye normalize edilerek her

bir kullanıcının saniyede gönderdikleri bit sayıları rahatlıkla bulunabilmektedir. Eş. 7.88'deki kısıt, kullanıcıların toplam aktif veri iletim sürelerinin β_b'yi geçemeyeceğini ifade etmektedir.



Şekil 7.10. ÇGSH tabanlı altına kurulan bilişsel radyo ağı için zaman çerçevesi.

Birincil kanalın, zaman çerçevesinin bir tam periyodu boyunca kesintisiz yayın yaptığı çevresel geri saçılım haberleşme tabanlı bilişsel bu ağda temel amacımız, ikincil kanaldaki vericilerin ikincil alıcıya gönderdikleri bit sayısını maksimize etmektir. ST_m kullanıcısının geri saçılım yoluyla aktardığı bit sayısı R_m^b, aktif veri iletim yoluyla gönderdiği bit sayısı R_m^h olmak üzere, SR'ye iletilen toplam bit sayısı Eş. 7.89'daki gibi tanımlanabilir.

$$R_s = \sum_{m=1}^{M} \left(R_m^b + R_m^h \right) \tag{7.89}$$

Geri saçılım modu

Zaman çerçevesinde geri saçılım modu ($1-\beta_b$) süresi kadar yer kaplamaktadır. ST_m kullanıcısı bu durumda kendisine tahsis edilmiş ϕ_m süresince geri saçılım yaparak SR'ye bilgisini gönderir. ST_m tarafından SR'ye geri saçılım haberleşme tekniğiyle iletilen bit sayısı Eş. 7.90'da gösterilmiştir.

$$R_m^b = \phi_m B_m^b \tag{7.90}$$

Yukarıdaki ifadede B_m^b, ST_m kullanıcısının geri saçılım hızıdır. Kullanıcı iç devre yapısında bulunan RC devresi ve onun farklı değerlere sahip elektronik elemanlarının kullanımı sayesinde geri saçılım hızı ayarlanabilmektedir.

Geri saçılım haberleşme için kullanıcılara gereken düşük seviyedeki enerji, birincil kanalın sinyali ile sağlanmaktadır. ST_m, PT'nin yaydığı sinyali hem geri saçılım yoluyla bilgi iletiminde kullanmakta hem de enerji hasadı yaparak bu enerjiyi kendi iç devresi için harcamaktadır. $(1-\beta_b)$ süresince hasat edilen bu enerji çok düşük miktarda olduğundan aktif veri iletimini gerçekleştirecek düzeyde değildir. Zaman çerçevesinin ilk fazında depo edilen bu enerjiden dolayı geri saçılım durumundaki devre enerji tüketimi eşitliklerde ele alınmamıştır.

Aktif veri iletim modu (Enerji hasadı-sonra-ilet modu)

İkincil kanaldaki ST_m kullanıcısının aktif veri iletim modunda bilgi aktarımı yapabilmesi için geri saçılım modunda enerji hasadı yapması gerekmektedir. Modelde bir kullanıcı geri saçılım yaparken diğer kullanıcılar da enerji hasadı yaparak bataryalarını doldurmaktadırlar. Her bir kullanıcının depo ettiği güç Eş. 7.91 ile verilebilir.

$$P_m^R = \delta_m \frac{P^T G^T G_m^R \lambda^2}{\left(4\pi d_m\right)^2} \tag{7.91}$$

Eş. 7.91'de, birincil kanal verici gücü P^T, sinyal dalga boyu λ, PT'nin anten kazancı G^T, ST_m kullanıcısının anten kazancı G_m^R, PT-ST_m arası uzaklık d_m, enerji hasat verimliliği ise δ_m ile temsil edilmiştir. ST_m kullanıcısının hasat ettiği enerji aşağıdaki eşitlikle verilir.

$$\begin{aligned} E_m^h &= P_m^R\left(1-\phi_m-\tau_m\right) \\ E_m^h &= \delta_m \frac{P^T G^T G_m^R \lambda^2}{\left(4\pi d_m\right)^2}\left(1-\phi_m-\tau_m\right) \end{aligned} \tag{7.92}$$

Önerilen modelin [24]'teki çalışmadan farkından daha önceki paragraflarda bahsedilmişti. PT'nin yayın kesmemesi, ST_m kullanıcısının gönderdiği sinyal iletim gücünü kontrol altında tutmasını gerektirirken, daha da fazla enerji hasadı yapmasına olanak tanımaktadır. ST_m'nin

hasat ettiği bu enerji τ_m süresince kullanılır. Sonuç olarak ST_m kullanıcısının sinyal iletim gücü Eş. 7.93'deki gibi gösterilebilir.

$$P_m^{tr} = \frac{E_m^h}{\tau_m} \tag{7.93}$$

Birincil kanal aktif iken ikincil kanaldaki kullanıcılar boşta beklemeyip enerji hasadı yapmaktadırlar. Literatürde yapılan çalışmalarda, sadece geri saçılım haberleşme yoluyla iletilen bit hızlarının düşük olmasından ötürü, ST_m'den PR'ye bozucu bir girişimin olmadığı gözlemlenmiştir [8]. Bu yüzden birincil kanal meşgul iken ikincil kanalın sadece geri saçılımı kullanması kabul edilebilir bir senaryodur. Buna karşın aktif veri iletim modunda her bir kullanıcının sinyal iletim gücü, geri saçılım haberleşmeye göre daha yüksek olduğundan bu durum PR'de SNR değerinin düşmesine neden olmaktadır. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için ST_m kullanıcısının sinyal iletim gücünü, önceden tayin edilen bir eşik seviyesinin altında tutmak gerekmektedir. Bu durum aşağıdaki eşitsizlik ile gösterilmiştir.

$$P_m^{tr} \leq P^{++} \tag{7.94}$$

P^{++}, önceden tayin edilen bir güç eşik seviyesi değeridir. İkincil kanal kullanıcıları, birincil kanalın alıcısında girişim oluşturmamak için bu değeri aşamazlar. ST_m tarafından SR'ye aktif veri iletim durumunda iletilen bit hızı Eş. 7.95'te gösterilmiştir.

$$r_m^h = K_m W \log_2\left(1+\frac{P_m^{tr}}{P_m^0}\right) \tag{7.95}$$

K_m, aktif veri iletim verimliliği olup $K_m \in (0,1]$ arasında bir değere sahiptir. PT sinyal bant genişliği W olmak üzere, P_m^0 aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir.

$$P_m^0 = \frac{N_0}{h_m} \tag{7.96}$$

Denklemde N_0 gürültü gücü olup, kanal kazanç katsayısı ise h_m şeklinde ifade edilmiştir. ST_m tarafından SR'ye aktif veri iletim moduyla gönderilen bit sayısı Eş. 7.97'de tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned} R_m^h &= \tau_m K_m W \log_2\left(1+\frac{P_m^{tr}}{P_m^0}\right) \\ &= \tau_m K_m W \log_2\left(1+\frac{E_m^h}{P_m^0 \tau_m}\right) \\ &= \tau_m K_m W \log_2\left(1+\frac{P_m^R\left(1-\phi_m-\tau_m\right)}{P_m^0 \tau_m}\right) \\ &= \tau_m K_m W \log_2\left(1+\frac{\delta_m P^T G^T G_m^R \lambda^2 \left(1-\phi_m-\tau_m\right)}{P_m^0 \tau_m \left(4\pi d_m\right)^2}\right) \\ &= \tau_m x \log_2\left(1+y\frac{\left(1-\phi_m-\tau_m\right)P_m^R}{\tau_m}\right) \end{aligned} \tag{7.97}$$

Yukarıdaki denklemde $x = K_m W$, $b = \frac{1}{P_m^0}$ ile tanımlanmaktadır. Tek bir ST kullanıcısı tarafından bir tam periyotta gönderilen bit sayısı Eş. 7.98'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} R_m &= R_m^b + R_m^h \\ R_m &= \phi_m B_m^b + \tau_m x \log_2\left(1+y\frac{\left(1-\phi_m-\tau_m\right)P_m^R}{\tau_m}\right) \end{aligned} \tag{7.98}$$

İkincil kanaldaki tüm kullanıcılar tarafından SR'ye gönderilen toplam bit sayısı Eş. 7.99'da tanımlanmıştır.

$$R_s = \sum_{m=1}^{M}\left[\phi_m B_m^b + \tau_m x \log_2\left(1+y\frac{\left(1-\phi_m-\tau_m\right)P_m^R}{\tau_m}\right)\right] \tag{7.99}$$

ST_m kullanıcısının servis kalitesini (QoS) sağlaması hususu göz önünde bulundurulduğunda, aktarması gereken bit sayısının önceden belirlenen bir değere eşit olması ya da o değerden daha büyük olması gerekir. Dolayısıyla aşağıdaki eşitsizlik yazılabilir.

$$R_m \geq R_m^{++} \tag{7.100}$$

Sonuç olarak, tüm sistem bir optimizasyon problemine dönüştürülerek Eş. 7.101 yazılabilir.

$$\max_{\bar{\phi},\bar{\tau}} R_s \rightarrow s.t. \begin{cases} \sum_{m=1}^{M} \phi_m \leq 1-\beta_b \\ \sum_{m=1}^{M} \tau_m \leq \beta_b \\ \phi_m, \tau_m \geq 0 \\ R_m \geq R_m^{++} \\ P_m^{tr} \leq P^{++} \end{cases} \tag{7.101}$$

8. SİMÜLASYON ÇIKTILARI VE ELDE EDİLEN BULGULAR

Bu kısımda, yedinci bölümde verilen ağ modelleri için benzetim sonuçları, ele alınan dört farklı sistem için ayrı başlıklarda sunulmuştur. Ayrıca ÇGSH tabanlı heterojen bilişsel radyo ağlarında röleli işbirlikçi haberleşme modeli, röle ve sinyal bozucu altında ÇGSH tabanlı bilişsel radyo ağı, çift yönlü erişim noktasının bulunduğu sistem ve altına kurulan ağ yapısının ayrıntılı analizleri yapılarak literatüre kazanımları açıkça belirtilmiştir.

8.1. Çevresel Geri Saçılım Tabanlı Heterojen Bilişsel Radyo Ağlarında Röleli İşbirlikçi Haberleşme Modeli için Parametre Değerleri ve Performans Analizi

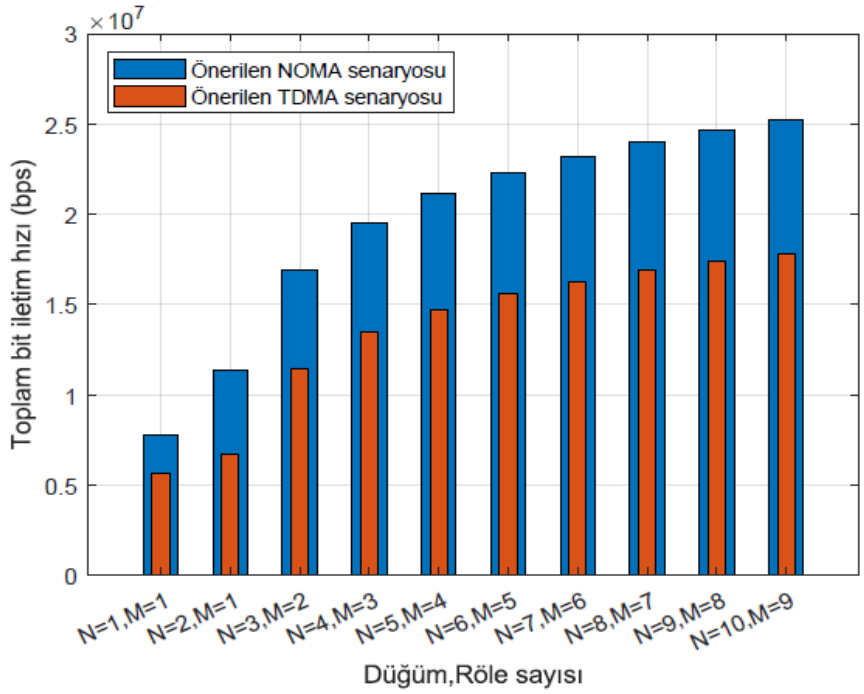
Öncelikle, önerilen sistem modelindeki ST/röle sayısı ve boşta kalma süresi değişiminin SR'ye iletilen toplam bit sayısı üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Daha sonra benzetim sonuçları literatürdeki [7] ve [8] çalışmalarıyla karşılaştırılmıştır. [7]'de kullanıcılar verileri yalnızca AVİM durumunda iletir (sadece enerji hasadı-sonra-veri iletimi). Bu durum "Sadece AVİM-TDMA/NOMA" ile ifade edilmiştir. [8]'de ise kullanıcılar verileri yalnızca geri saçılım iletişimi yoluyla iletir. Bu model de "Sadece GSRA-TDMA/NOMA" olarak adlandırılmıştır. Literatürde karşılaştırılması yapılan bu çalışmalarda röle kullanılmamakta olup sadece ST ile veri alışverişi gerçekleştirilmiştir. Tüm bunlara ek olarak kablosuz iletişim sistemlerinin sistem performansını değerlendirmek için kullanılan ve zaman çerçevesi boyunca alıcıya iletilen toplam bit sayısının sistem tarafından tüketilen toplam enerjiye oranı olarak tanımlanan enerji verimliliği (EE), simülasyon sonuçlarında analiz edilmiştir [84]. Yazılım ve benzetim sonuçları için Matlab CVX ortamından faydalanılmış olup, aksi belirtilmediği sürece Çizelge 8.1'de verilen simülasyon parametre değerleri kullanılmıştır. Hem TDMA hem de NOMA için ele alınan zaman çerçevelerinin süresi T = 1 saniye olarak kabul edilmiştir. Kanal güç kazancı $g_{ij} = 10^{-1}\theta d_{ij}^{-\varphi}$ ile tanımlanır. Burada θ ve φ sırasıyla kanalın kısa süreli sönümleme ve yol kaybı üssünü temsil eder. Önerdiğimiz modelde sadece uzun süreli sönümleme dikkate alındığından θ = 1 olarak ayarlanmıştır. Diğer tüm kanal kazanç değerleri için θ ve φ değerleri aynı olup, mesafeye bağlı olarak kanal kazanç katsayıları bulunmuştur. Yol kaybı üssü değeri φ = 1 dir. ST_i ve RL_j arasındaki uzaklık d_{ij} = 3 (i = j) metredir. SR ile RL_j arasındaki mesafe $d_{rj,SR}$ = 4 metre, ST_i ve SR arasındaki mesafe $d_{i,SR}$ = 5 metre olarak ayarlanmıştır.

Çizelge 8.1. Birden çok ST/röle kullanıcısının olduğu işbirlikçi sistem modeli için kullanılan simülasyon parametre değerleri.

Parametre	Değer	Parametre	Değer
B_i^b	300 kbps	α	0,3
β	0,1 saniye	γ_i	0,7
R_t	0,5 kbps	W	6 MHz (TV kulesi)
f	915 MHz	P^T	17 kW
η	0,8	$\sigma^2 = N_0$	133,59 μW
ϵ	0,7	K_i	0,5
ψ	0,3	$G_T = G_i^R$	6 dBi
P_{DSS}^T	10 dBm	f_{DSS}	2,4 GHz
$d_{n,i} \cong d_{r,j}$	5,16 mil (8,304 km)	d_i^{DSS}	0,5 metre

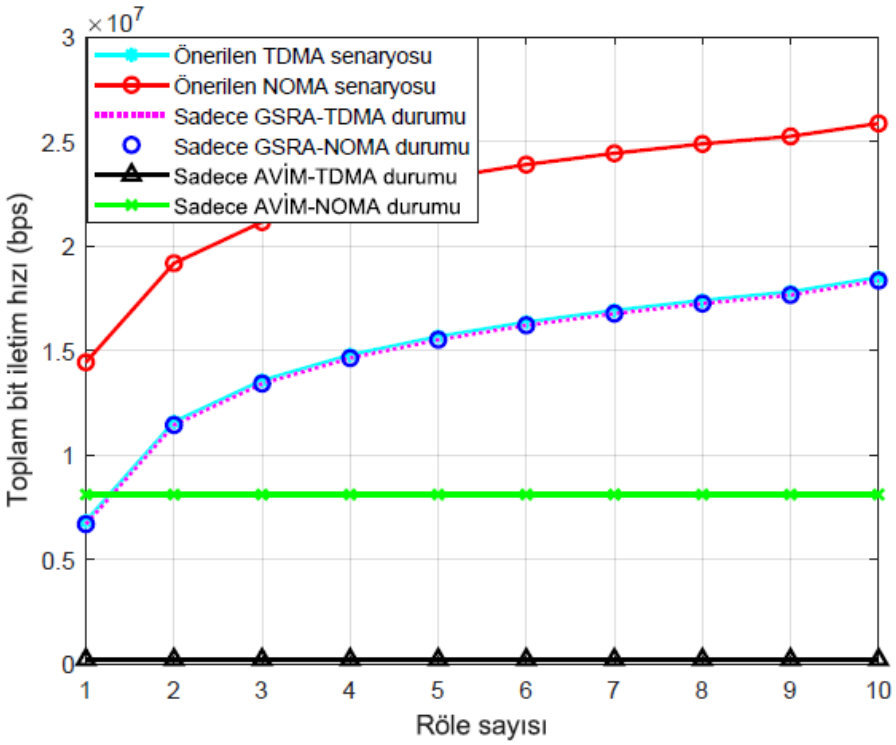
Şekil 8.1'de N = 1, M = 1 durumunda NOMA senaryosunun TDMA senaryosuna göre saniyede yaklaşık 1,38 kat daha fazla veri ilettiği görülmektedir. Bunun sebebi, tek kullanıcılı NOMA senaryosunda aktif veri iletiminin α = 0,3 saniye boyunca gerçekleşmesi ve $\sum_{j=i+1}^{N}\left(P_j^{tr} g_{j,SR}\right)$ ifadesinin sıfır olması şeklinde açıklanabilir. Bu ifadenin sıfır olması sistemde kullanıcılar arasında herhangi bir girişim olmadığını gösterir. N = 1, M = 1 durumundaki TDMA senaryosu, iletilen bit sayısını maksimum seviyeye çıkarmak için sadece GSRA modunu tercih eder. N = 2, M = 1 için TDMA senaryosu, hem GSRA hem de AVİM modunu kullanır. NOMA senaryosunda ikinci kullanıcıya herhangi bir girişim olmadığından geri saçılım haberleşme süresi kısa tutularak aktif veri iletimi sırasında iletilen bit sayısı artırılmaktadır. Eğer ϕ_2 süresi kısa olursa, ikinci kullanıcı daha fazla enerji hasadı yapar ve bu enerji α süresince kullanılır. ST_i tarafından aktif hale getirilen röle sayısına göre her bir kullanıcıya geri saçılım süresi tahsis edilir. N = 2, M = 1 durumunda NOMA ile TDMA arasındaki bit sayısı farkı 1,69 kata çıkmıştır. Röle sayısının sabit kalması ve α süresi boyunca aktif olarak veri ileten yeni bir kullanıcının sisteme dahil olması NOMA ile TDMA senaryosu arasındaki performans farkını arttırmıştır. N = 3, M = 2'den, N = 10, M = 9'a kadar iki senaryo arasındaki performans farkı azalarak N = 10, M = 9 için 1,42 olmaktadır. Röle sayısı arttıkça TDMA senaryosu GSRA modunu daha etkin kullanmaya başlar. Böylece birim zamanda SR'ye iletilen veri sayısında daha hızlı bir artış gözlenir. NOMA senaryosunda artışın daha yavaş olmasının nedeni, kullanıcıların birbirine oluşturduğu girişimdir. Kullanıcı ve röle sayısının artması, SR'ye iletilen bit sayısı bakımından

performansı artırmıştır. Modele yeni röle ve ST kullanıcısının eklenmesi, kullanıcılar arasındaki mesafeyi kısaltır. Bu durumda ST_i tarafından aktif edilebilecek röle sayısı da artar. Ancak hem TDMA hem de NOMA zaman çizelgelerinde her kullanıcıya ayrılan ϕ_i ve τ_i süreleri kısalacağından alıcıya ulaşan toplam bit sayısındaki artış oranı Şekil 8.1'de görüldüğü gibi azalmaktadır.



Şekil 8.1. Düğüm/Röle sayısının değişimine göre toplam bit iletim hızı

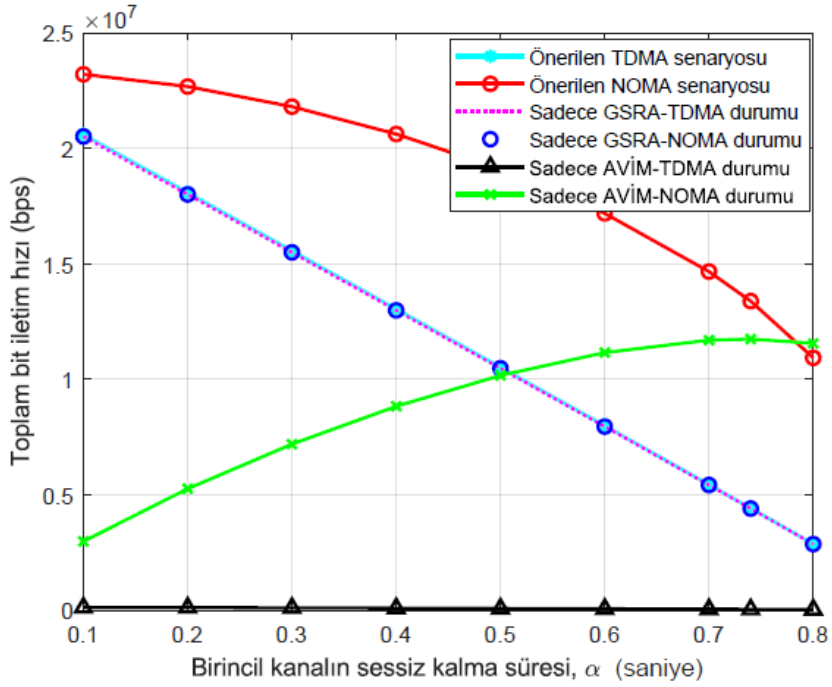
Şekil 8.2' de toplam veri aktarım hızının röle sayısına göre değişimi gösterilmektedir. $M = 1$ iken NOMA senaryosu TDMA senaryosuna göre 2,11 kat daha fazla bit aktarımı sağlarken, $M = 10$ olduğunda bu fark 1,39'a kadar düşmektedir. Bu sonuç bize TDMA durumunda kullanıcıların (ST_i) röleleri (RL_j) daha etkin kullandığını açık bir şekilde göstermektedir. Önerilen NOMA senaryosu tüm olası durumlar için en iyi performansı göstermektedir. $M =$ 2'den sonra önerilen TDMA modelinde, sadece GSRA ve sadece AVİM moduna kıyasla daha yüksek bit hızlarına ulaşılmıştır. Eş. 7.19 ve Eş. 7.47'den görülmektedir ki sadece GSRA-TDMA ile sadece GSRA-NOMA senaryosunda elde edilen performans aynı çıkmıştır. Sadece AVİM durumunda ST_i kullanıcısı geri saçılım haberleşme yapamayacağından $1 - \alpha$ boyunca enerji hasadı yapar. Sadece AVİM-TDMA ve sadece AVİM-NOMA modelinde sistem performansı röle sayısına bağlı olmadığından sabit kalır.



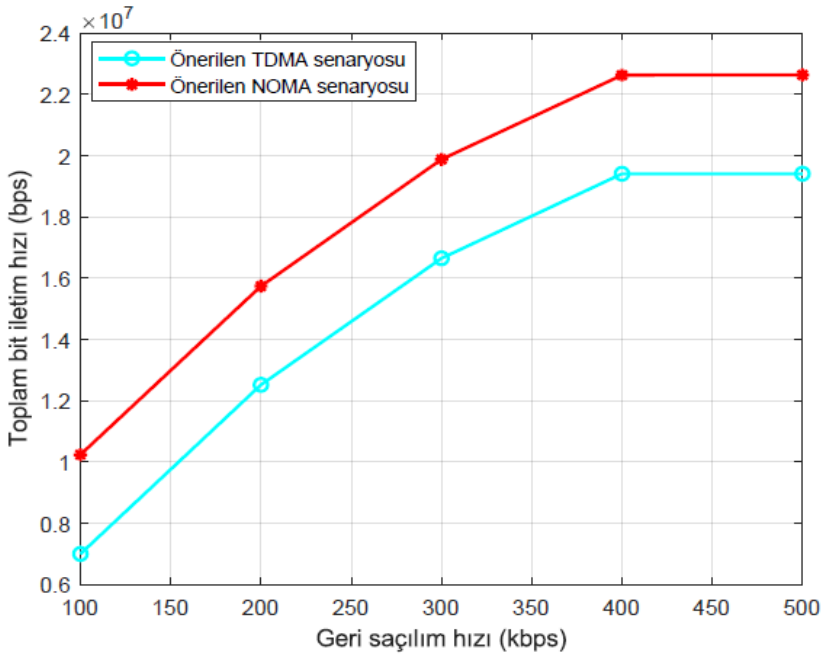
Şekil 8.2. Röle sayısının değişimine göre bütün durumlardaki toplam bit iletim hızı değişimi

Şekil 8.3'te sistem modeli $N = 5$, $M = 5$ olarak kabul edilmiş olup, birincil kanalın boşta kalma (sessiz kalma) süresine göre toplam veri iletim hızı değişimi gösterilmiştir. Önerilen NOMA senaryosu, birincil kanalın boşta kalma süresi tüm zaman bloğunun %78,26'sına ulaşıncaya kadar en iyi performansı verir. Ancak $\alpha = 0.78$ kritik değerinden 0,8'e kadar geçen sürede sadece AVİM-NOMA senaryosu en yüksek veri hızına sahiptir ($\alpha = 0.78$ kritik değerinde önerilen NOMA senaryosu ile sadece AVİM-NOMA durumu aynı bit hızına sahiptir). Önerilen TDMA senaryosu, sadece GSRA-TDMA/NOMA durumlarına göre α süresinin her değeri için biraz daha yüksek veri hızına sahiptir. Bununla birlikte $\alpha = 0,51$ kritik noktasına kadar NOMA senaryosu hariç diğer bütün durumlara göre en iyi performansı haberleşme sisteminde önerilen TDMA senaryosu göstermiştir. Kritik değer olan $\alpha = 0,51$ noktasında sadece AVİM-NOMA ile önerilen TDMA senaryosu eşit veri hızına sahiptir. Sadece AVİM-NOMA ile sadece GSRA-TDMA/NOMA senaryosu $\alpha = 0,5$ değerinde aynı performansa sahiptir. Sadece AVİM-NOMA senaryosunda bit hızındaki artış $\alpha = 0,74$ değerine kadar devam eder. Ancak bu değerden sonra birim zamanda alıcıya ulaşan bit sayısında bir miktar azalma görülür. Alıcıya iletilen bit sayısının maksimize edilmesi probleminde sadece AVİM-TDMA ele alındığında veri iletim hızının 116,29 kbps'den 29,52 kbps'ye düştüğü tespit edilmiştir. Sistem modeli için önerdiğimiz iki farklı senaryo karşılaştırıldığında, α süresinin değişimi açısından TDMA'nin NOMA'ya kıyasla daha hızlı

performans düşüşü gösterdiği Şekil 8.3'ten net bir şekilde görülebilmektedir. Önerilen TDMA senaryosunda α = 0,1 de R_{toplam} = 20,59 Mbps, α = 0,8 de R_{toplam} = 2,87 Mbps, önerilen NOMA senaryosunda α = 0,1 de R_{toplam} = 23,2 Mbps, α = 0,8 de R_{toplam} = 10,92 Mbps elde edilmiştir. Bu sonucun nedeni şu şekilde açıklanabilir: α = 0,1 değerinde ST_i'nin hasat ettiği enerjiyi kullanmaya yetecek kadar aktif veri iletim süresi yoktur. Dolayısıyla GSRA modu, hem ST_i hem de RL_j tarafından etkin bir şekilde kullanılır. Birincil kanalın sessiz kaldığı süre artıkça ST_i, AVİM periyodundan faydalanmaya başlar. NOMA'da tüm ST kullanıcıları α süresince alıcıya veri iletimini gerçekleştirir. Önerilen NOMA senaryosu, TDMA tekniğine göre zaman çerçevesindeki AVİM zamanını daha çok tercih etmekte ve etkin kullanmaktadır. Bu nedenle α artıkça NOMA, TDMA'ye göre veri iletim hızı bakımından daha yavaş azalmaktadır. Birincil kanalın sessiz kalıp PT'nin yayın yapmadığı süre artarsa, sistemdeki kullanıcıların GSRA modunda enerji hasat etme süreleri azalır. Dolayısıyla α'nın artmasına karşılık hasat edilen enerji azaldığı için AVİM periyodunda alıcıya iletilen bit sayısı azalır. GSRA periyodunun süresi daraldıkça veri sayısında ciddi azalmalar gözlenmektedir. Önerilen TDMA, GSRA modunu daha etkin bir şekilde kullandığından veri sayısındaki azalış, NOMA'ya göre daha fazladır.



Şekil 8.3. Birincil kanalın sessiz kalma süresine göre tüm durumlardaki iletim hızı değişimi

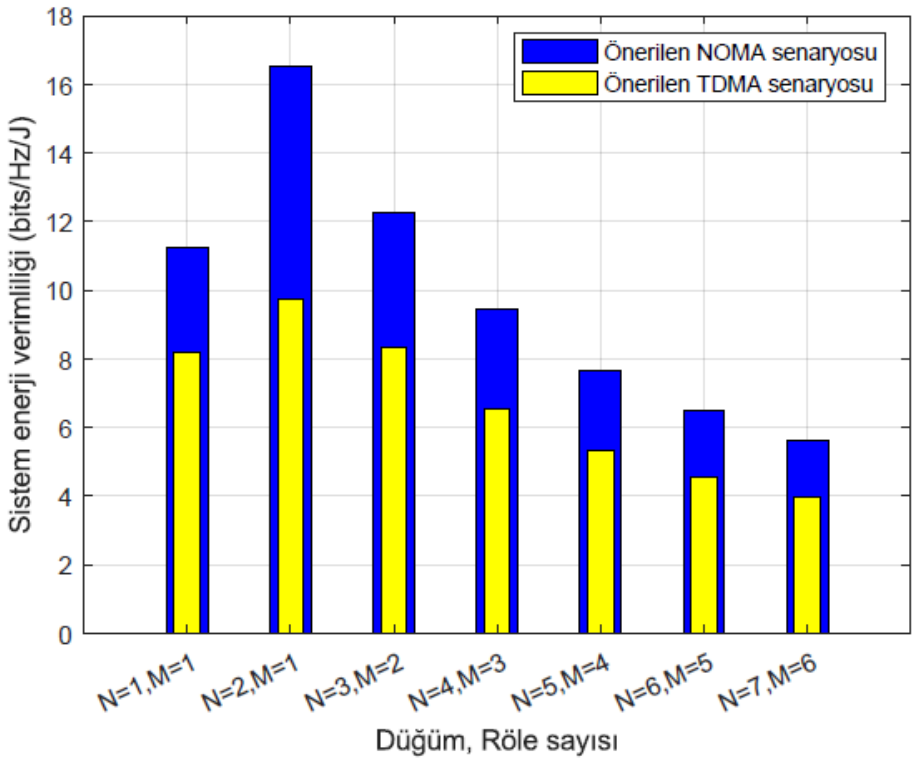


Şekil 8.4. Farklı geri saçılım hızı altında toplam bit iletim hızı değişimi

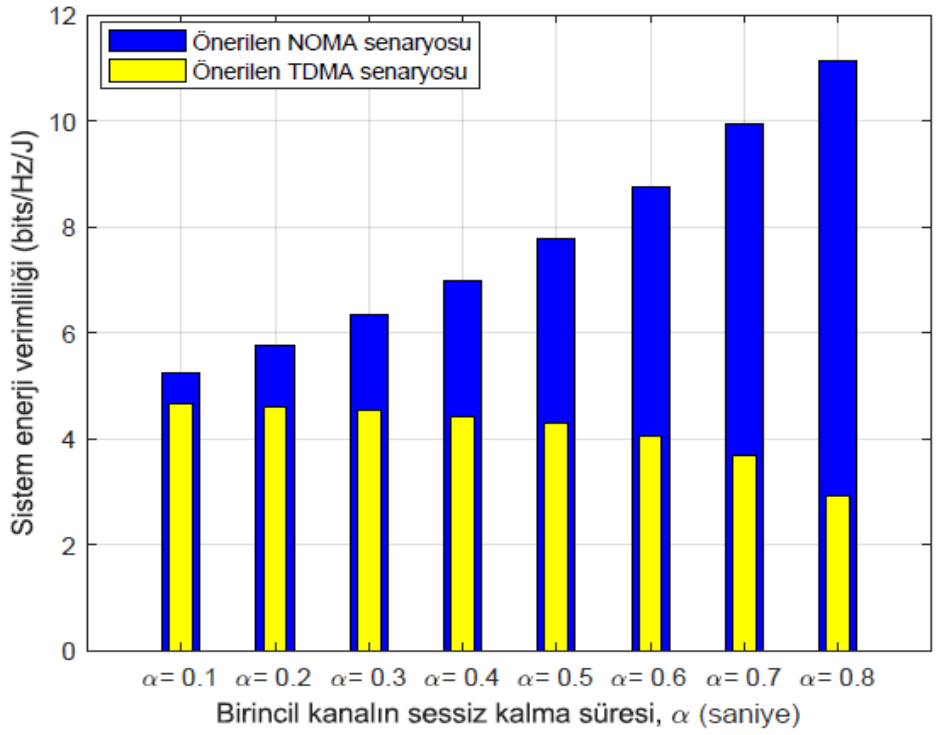
Şekil 8.4'te sistem modeli $N = 8$, $M = 8$ olarak kabul edilmiştir. ST_i ve RL_j arasındaki uzaklık $d_{ij} = 0{,}7 \quad (i = j)$ metredir. SR ile RL_j arasındaki mesafe $d_{rj,SR} = 1{,}5$ metre, ST_i ve SR arasındaki mesafe ise $d_{i,SR} = 2$ metre olarak ayarlanmıştır. Rölenin aktif hale gelmesi için ulaşılması gereken eşik değer $Rt = 1$ kbps dır. ST_i kullanıcısının geri saçılım hızının artması aktif röle sayısını artıracağından, $\sum_{j=1}^{M} \phi_1 \psi W \log_2(1 + \gamma_{rlj})$ terimi ile sistem performansı artar. Önerilen TDMA senaryosu röle kanal kullanımında daha fazla zaman harcadığı için geri saçılım hızı $B_i^b = 100$ kbps ve $B_i^b = 500$ kbps iken iki senaryo arasındaki fark sırasıyla 1,46 ve 1,16 kat olmaktadır. $R_t = 1$ kbps ve $N = 8$, $M = 8$ için bütün röleler aktif olduğundan, $B_i^b = 400$ kbps değerinden sonra veri hızında çok az bir artış gözlemlenmiştir.

Şekil 8.5'te sistemin enerji verimliliğinin düğüm/röle sayısına göre değişimi gösterilmektedir. Şekil 8.1'de görüldüğü gibi önerilen NOMA'da alıcıya iletilen veri sayısı TDMA'ya göre daha fazladır. Bu nedenle NOMA'da her durum için daha yüksek enerji verimliliği elde edilmiştir. $N = 2$, $M = 1$ durumunda alıcıya ulaşan bit sayısı arttığından her iki durum için en yüksek enerji verimliliği ortaya çıkmıştır. Eklenen yeni düğüm ve röle ile birlikte kullanıcıların sistemde tükettiği toplam enerji artar. Alıcıya ulaşan toplam veri iletim hızının artış hızı yavaşladığından enerji verimliliğinde düşüşler gözlemlenir. TDMA'de röle kanalın daha etkin kullanılması ve rölelerin tükettiği enerjinin artmasından ötürü NOMA'ya kıyasla daha düşük enerji verimliliği kaydedilmiştir.

Şekil 8.6'da α süresine göre sistem enerji verimliliğinin değişimi verilmektedir. Bu simülasyon sonucu için sistem $N = 5$, $M = 5$ olarak planlanmıştır. Birincil kanalın sessiz kalma süresi artıkça NOMA senaryosu için enerji verimliliği artarken, TDMA için enerji verimliliği azalmaktadır. Şekil 8.3'e dikkatli bakıldığında röle kullanıcılarının aktif kalma süreleri kısaldığı için önerilen TDMA modelindeki veri sayısı, NOMA 'ya kıyasla çok hızlı bir şekilde azalmaktadır. Ortamda kullanılabilir bir radyo frekans sinyalinin bulunmaması, sistemin hasat ettiği toplam enerjiyi ve tüketilen enerjiyi azaltır. Bu durum alıcıya iletilen bit sayısını ciddi oranda azaltarak TDMA'nın enerji verimliliğini düşürmektedir. NOMA'da elde edilen toplam veri hızı ise yavaş bir şekilde azalmaktadır. Bununla birlikte NOMA, AVİM periyodunu daha etkin bir şekilde kullandığı için α süresinin artması enerji verimliliğinde de artışa neden olmaktadır.



Şekil 8.5. Düğüm/Röle sayısının değişimine göre sistem enerji verimliliği.



Şekil 8.6. Birincil kanalın sessiz kalma süresine göre sistem enerji verimliliği değişimi.

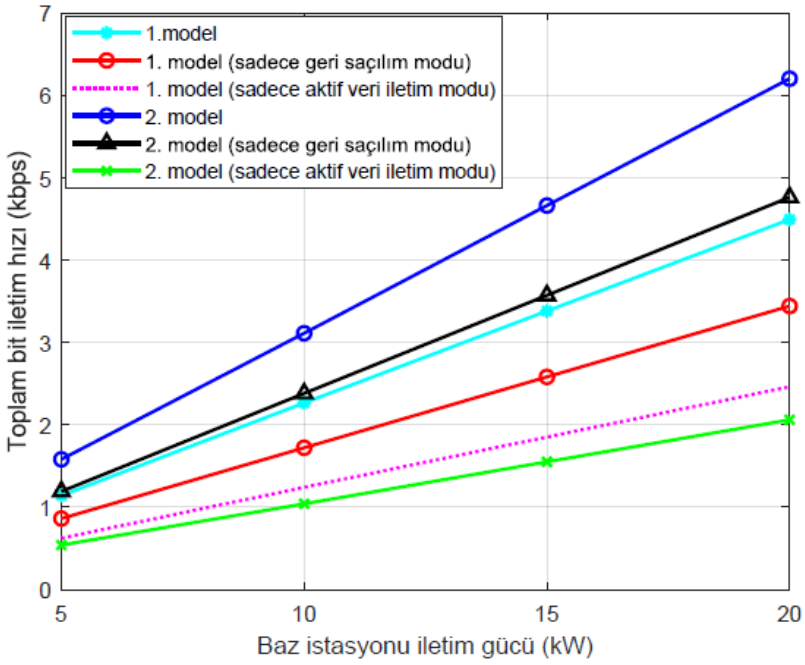
8.2. Röle ve Sinyal Bozucu Altında Çevresel Geri Saçılım Tabanlı Bilişsel Radyo Ağı için Parametre Değerleri ve Performans Analizi

Önerilen iki sistem modeli için de elde edilen amaç fonksiyonu, dışbükey bir optimizasyon problemidir. Bu bölümde ele alınan ağda zaman parametrelerinin optimum değerleri bulunarak amaç fonksiyonu maksimize edilmiştir. Ortaya konan sonuçlar sadece geri saçılım modu ve sadece aktif veri iletim modu uygulandığı zamanki senaryolarla karşılaştırılmış ve grafiklerde gösterilmiştir. Simülasyon parametreleri Çizelge 8.2'de verilmiştir.

Şekil 8.7'de baz istasyonunun sinyal iletim gücüne göre alıcıya ulaşan toplam veri iletim hızı değişimi verilmiştir. Sonuçlardan görüleceği üzere en iyi başarım analizini ikinci model vermiştir. Birinci modelin ikinci modelin sadece geri saçılım modunda çalıştığı zamanki durumundan daha düşük performans göstermesinin nedeni, tek ST ve röleye sahip olmasıdır. Sisteme yeni rölenin eklenmesi, kullanılan mod sayısı (geri saçılım modu - aktif veri iletim modu) azalsa bile birinci modelden daha yüksek bit hızı elde edilmesine sebep olmuştur.

Çizelge 8.2. Sinyal bozucunun yer aldığı her iki sistem modeli için kullanılan simülasyon parametre değerleri.

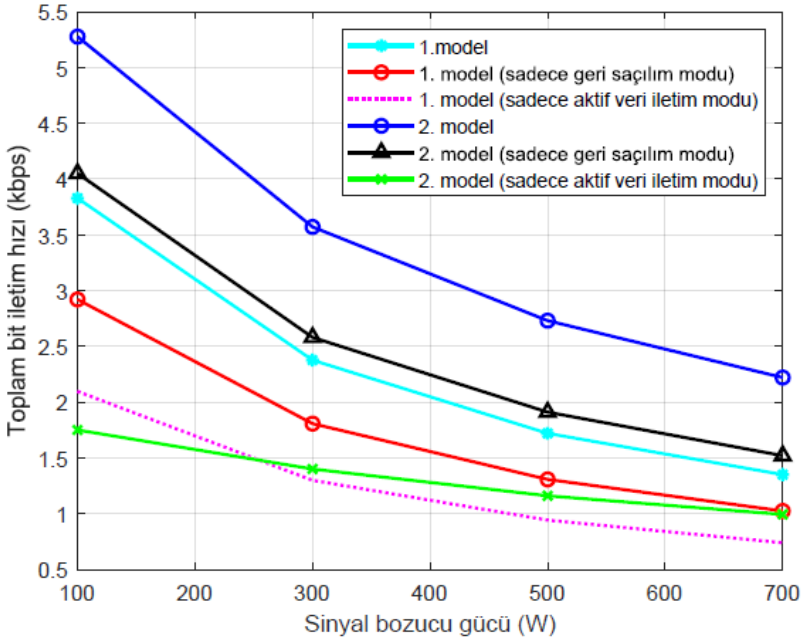
Parametre	Değer
W	6 MHz
f	915 MHz
k_r	0,5
ε_b	0,8
α_g	0,4
$G^T = G^R$	6 dBi
P	17 kW
d_{nr}	8,3 km
N_0	133,56 μW
h_{ST}	0,03
h_{jp}	20×10^{-6}
P_{jp}	100W
λ	0,4
h_1	0.01
h_2	0.03



Şekil 8.7. Baz istasyonu sinyal iletim gücüne göre toplam bit iletim hızı değişimi.

Sisteme eklenen yeni ST ve röle kullanıcısı baz istasyonunun yaydığı sinyalin enerjisini kullanarak sistem tarafından hasat edilen toplam enerjiyi artırmaktadır. Bu da performansa olumlu katkı sağlamaktadır. Her iki model için sadece aktif veri iletim modu kullanıldığı takdirde düşük bit hızları görülmüştür. Sadece aktif veri iletim modunda çevrede kullanılabilecek bir baz istasyonu sinyali olmadığından röle çalışamaz. Bu yüzden güç istasyonu iletim gücünün artması ST için bir yarar sağlasa da genel manada sistem performansı bakımından elde edilen toplam bit iletim hızı, diğer senaryolara kıyasla düşük kalmaktadır. Birinci model için sadece aktif veri iletim durumunun kullanılması, ikinci modelin sadece aktif veri iletim durumuna kıyasla biraz daha iyi performans göstermiştir. Çünkü iki kullanıcının birbirlerine yaptıkları girişim SNR değerini düşürmektedir.

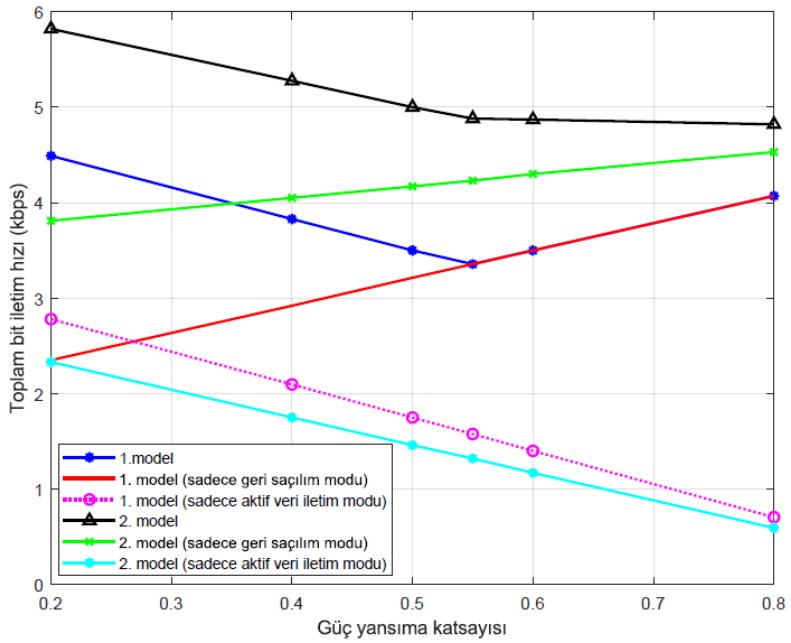
Şekil 8.8'de sinyal bozucu gücüne göre toplam bit iletim hızındaki değişim analiz edilmiştir. Grafikten görüleceği üzere sinyal bozucunun varlığı sistemi olumsuz etkilemektedir. Gücün artmasına bağlı olarak bütün senaryolarda, ikincil kanalın alıcısına iletilen bit sayısında azalma tespit edilmiştir. Sinyal bozucu, baz istasyonu sinyal gücünün %0,6-4 seviyelerindeki değerlerinde güce sahipken tüm senaryolardaki sistem performansının değişimi incelendiğinde, bilgi alıcısı tarafında SNR değeri azalarak toplam bit iletim hızında düşüşler gözlemlenmiştir.



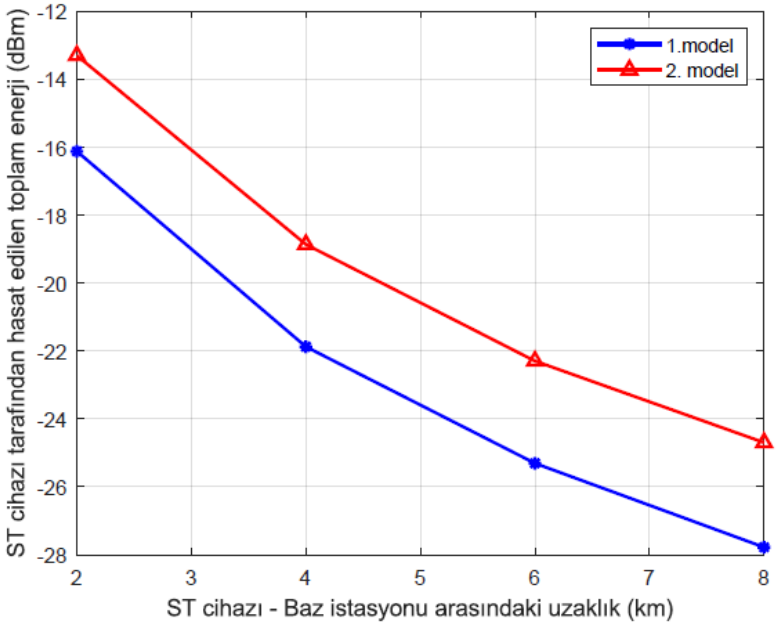
Şekil 8.8. Sinyal bozucunun gücüne göre toplam bit iletim hızı değişimi

Şekil 8.9'da sistem performansını ciddi manada etkileyebilecek güç yansıma katsayısı α_g değerinin değişimine göre başarım analizi yapılmıştır. Güç yansıma katsayısının artışı demek ST kullanıcısının geri saçılım haberleşme tekniğine daha fazla zaman ayırıp bu yöntemle bit iletim hızını artırması demektir. Bunun sonucu olarak aktif veri iletim yoluyla gönderilen bit sayısında azalış görülmektedir. Grafik incelendiğinde sunulan her iki model için sadece geri saçılım modu kullanıldığı takdirde ST kullanıcılarının güç yansıma katsayısının artışı, alıcıya iletilen toplam veri sayısını artırmıştır. Eş. 7.49 ve Eş. 7.58'e bakıldığında α_g değerinin artışının sistem performansına pozitif etkisi net bir şekilde görülebilmektedir. Sadece aktif veri iletim modu tercih edildiğinde Eş. 7.56'daki $(1 - \alpha_g)$ terimi ile hasat edilen enerji azalır. Bu azalış alıcıya iletilen bit sayısını azaltır. $\alpha_g = 0{,}55$ kritik değerinden sonra ikinci sistem modelinin performansındaki azalış yavaşlarken, birinci sistem modelinde artış yaşanmıştır. Çünkü birinci sistem sadece geri saçılım modunda çalışmayı tercih etmiştir.

Şekil 8.10'da ST-baz istasyonu arasındaki mesafeye bağlı olarak ST kullanıcısı tarafından depo edilen toplam enerjinin değişimi verilmiştir. Eş. 7.50'deki g_{ST} değeri uzaklığın karesi ile ters orantılı olduğundan hasat edilen enerji her iki sistem için ciddi bir şekilde azalmaktadır. Ancak ikinci sistem modelinde ST_1 ve ST_2'nin bulunması, hasat edilen enerjiyi birinci modele kıyasla daha fazla yapmaktadır.



Şekil 8.9. ST kullanıcısının güç yansıma katsayısına göre toplam bit iletim hızı değişimi.



Şekil 8.10. ST-baz istasyonu arasındaki mesafeye göre ST tarafından hasat edilen enerji.

8.3. Çift Yönlü Erişim Noktasının bulunduğu Hücresel Ağ Yapısı için Parametre Değerleri ve Performans Analizi

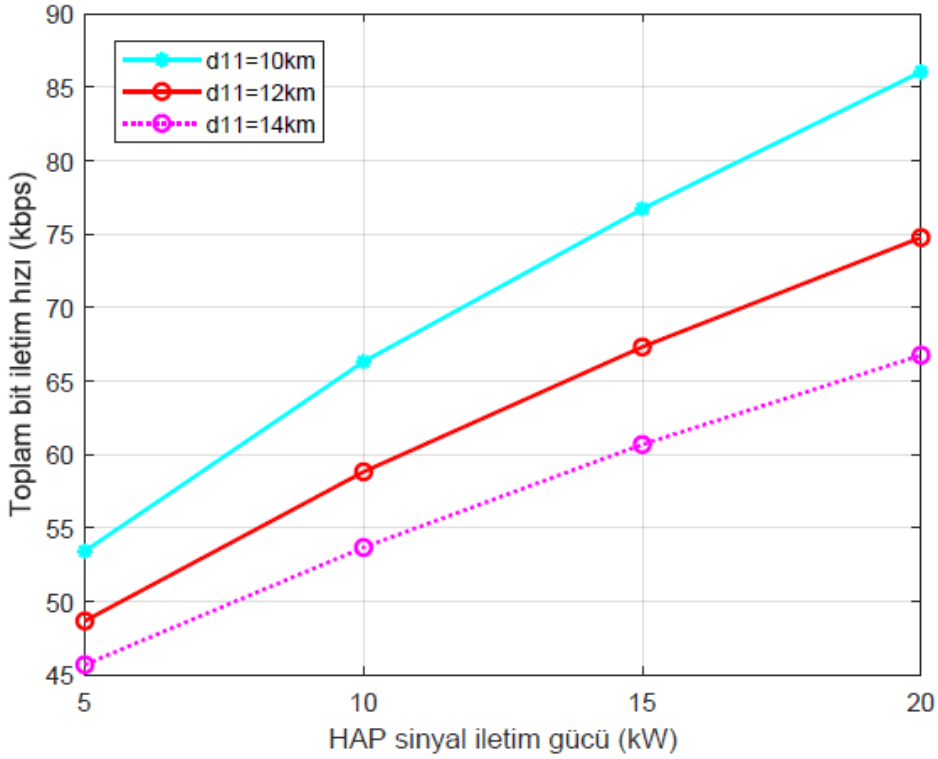
Alıcıya ulaşan bit sayısının maksimize edilmeye çalışıldığı bu haberleşme ağında, sistem değişkenlerinin durumuna göre nümerik analizler yapılmış olup çıkan sonuçlar grafiksel olarak gösterilmiştir.

Çizelge 8.3. Çift yönlü erişim noktasına sahip sistem için kullanılan parametre değerleri

Parametre	Değer
W	100 kHz
f_1 (HAP sinyal frekansı)	100 MHz
T	1 saniye
d_{11}	10 km
B_b	33 kbps
P_{HAP}	10 kW
$G_t = G_r$	8 dBi
ψ	0,8
ϵ	0,6
$P_0 = \sigma^2 / g_{11}$	-41 dB
E_i	10 μJ
d_{22} (WiFi-ST_2 arası uzaklık)	5 m
P_{WiFi}	10 dBm
f_2 (WiFi sinyal frekansı)	2,4 GHz

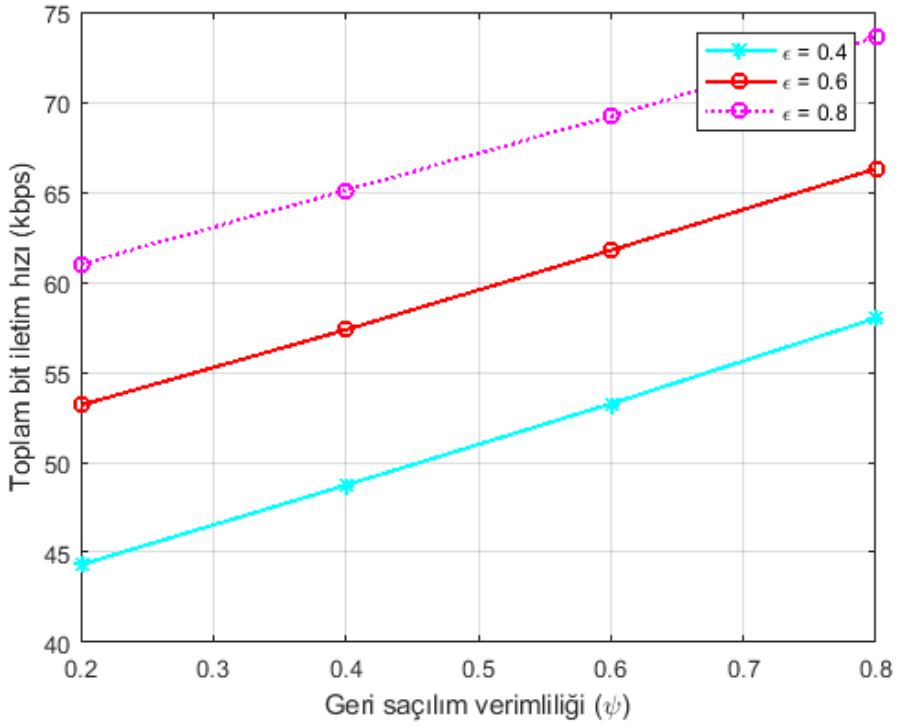
Şekil 8.11'de HAP istasyonu tarafından iletilen sinyal gücüne göre kullanıcılardan tekrar HAP alıcı antenine gönderilen toplam bit sayısının değişimi incelenmiştir. Ek olarak sonuçlar, farklı d_{11} değerlerine göre karşılaştırılmıştır. Sinyal iletim gücünün artması, Eş.

7.70'e göre ST_2 tarafından hasat edilen toplam gücü artırdığından y_{22} süresince iletilen bit sayısı da artar. Dolayısıyla sistem performansında bir artış gözlemlenir. ST_1/ST_2 – HAP arasındaki uzaklığın artması hem g_{11} kanal kazancını hem de Friis denklemiyle hasat edilen enerji miktarını azaltacağından d_{11} = 14 km iken elde edilen performans, ele alınan diğer senaryolara göre daha düşük kalmıştır.

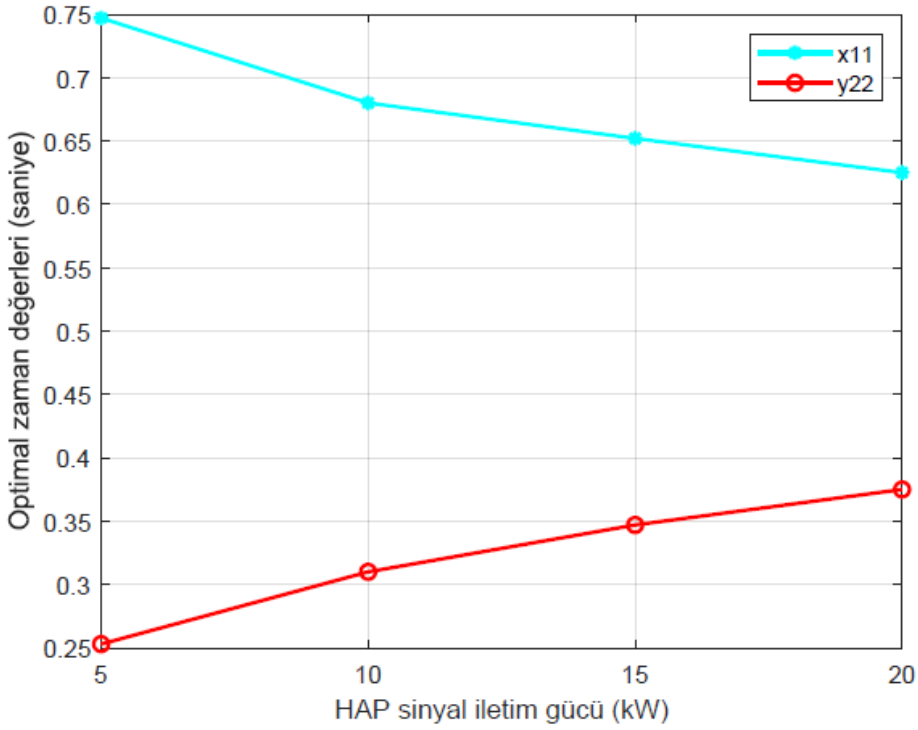


Şekil 8.11. HAP istasyonunun sinyal iletim gücüne göre toplam veri iletim hızı.

Şekil 8.12'de ST_1 kullanıcısının geri saçılım verimliliği ψ'ye göre toplam bit iletim hızındaki değişim, farklı ε değerlerinde gösterilmiştir. Geri saçılım verimliliği artarsa, ST_1 kullanıcısının x_{11} süresince gönderdiği bit sayısı artar. Bu süreyi aktif kullanan ST_1'e, sistem tarafından kendisine geri saçılım haberleşme için daha fazla zaman tahsis edilerek ST_2'nin daha fazla süre enerji hasadı yapmasına imkân tanınır. Her ne kadar x_{11} süresindeki artış, y_{22} süresinde azalış oluştursa da, ST_2 kısa olan veri iletim süresini yüksek sinyal iletim gücü ile yapacağından sistem performansında artış gözlemlenir. Ayrıca ST_2 kullanıcısının enerji hasat verimliliğinin artması, Eş. 7.72'ye göre P_h değerini artırır. Bu da sistem performansında artışa sebep olur.

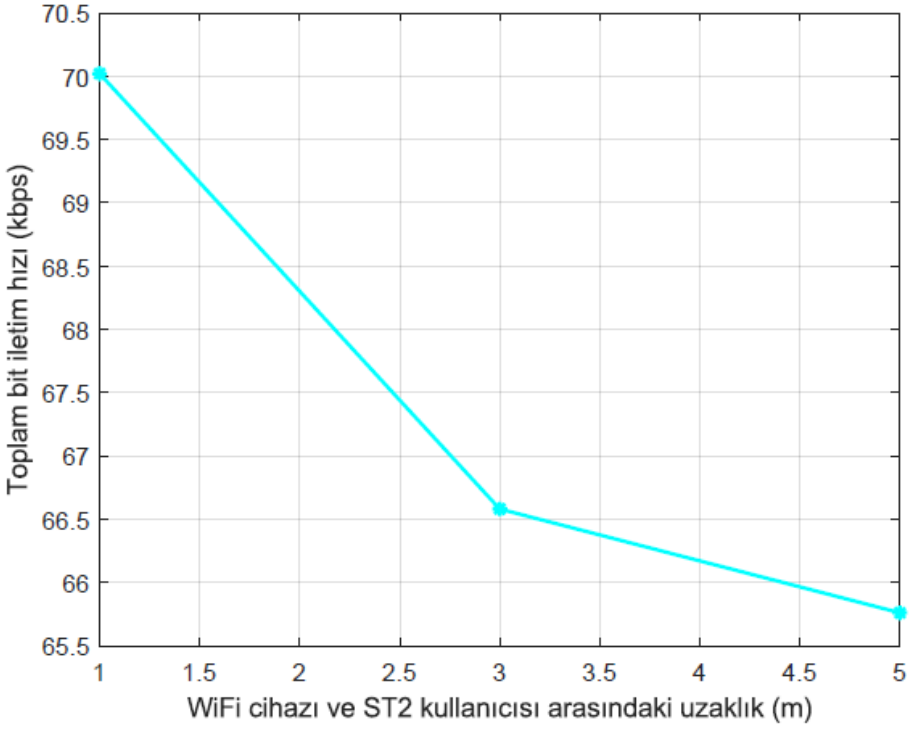


Şekil 8.12. ST_1 geri saçılım verimliliğine göre toplam bit iletim hızı.



Şekil 8.13. HAP istasyonunun sinyal iletim gücüne göre en uygun zaman değerleri.

Şekil 8.13'te, HAP istasyonu tarafından iletilen sinyal gücüne göre R (x_{11}, y_{22}) amaç fonksiyonunu maksimize edecek en uygun x_{11} ve y_{22} değerlerinin değişimi gösterilmiştir. Şekil 8.11 ve Şekil 8.12'deki sonuçlarda ifade edildiği gibi ST_2 kullanıcısının bit aktarımı yapması için kendisine tahsis edilen süreyi, HAP sinyal iletim gücünün artması uzatır. Bu yüzden $x_{11}^* + y_{22}^* = T$ eşitliği ile ST_1'in geri saçılım yapacağı süre de kısalır. Şekil 8.14'te ikinci hücrede bulunan WiFi cihazı ile ST_2 kullanıcısı arasındaki mesafeye göre toplam veri iletim hızı değişimi verilmiştir. Friis denkleminden görüleceği üzere hasat edilen toplam güç, uzaklığın karesi ile ters orantılı bir şekilde azalış gösterdiğinden HAP alıcı antenine doğru gönderilen bit sayısında hızlı bir düşüş görülmüştür. Grafiğe dikkatli bakıldığında d_{22} = 3 metreye kadar performansta hızlı bir azalış görülürken, bu kritik değerden sonra performanstaki azalış yavaşlamaktadır. WiFi cihazının yaydığı sinyalin frekansı, HAP sinyal frekansına göre çok yüksek olduğundan ST_2 kullanıcısı bataryasını daha çok HAP tarafından aktarılan sinyal ile doldurmaktadır. d_{22} = 3 metreye kadar WiFi cihazı sistem üzerinde etkin bir rol oynarken, ST_2 ile arasındaki mesafe artınca ve frekansının da yüksek olması dikkate alındığında g_{22} değerinde ciddi düşüş gözlemlenir. Dolayısıyla WiFi sinyalinin sistem performansı üzerine etkisi kaybolmaya başlar. Bu durum d_{22} = 3 metreden sonra sistem performansının yavaş azalışına sebebiyet verir.



Şekil 8.14. WiFi cihazı-ST_2 arasındaki uzaklığa bağlı olarak toplam veri iletim hızı.

8.4. Çevresel Geri Saçılım Tabanlı Altına Kurulan Bilişsel Radyo Ağ Yapısı için Parametre Değerleri ve Performans Analizi

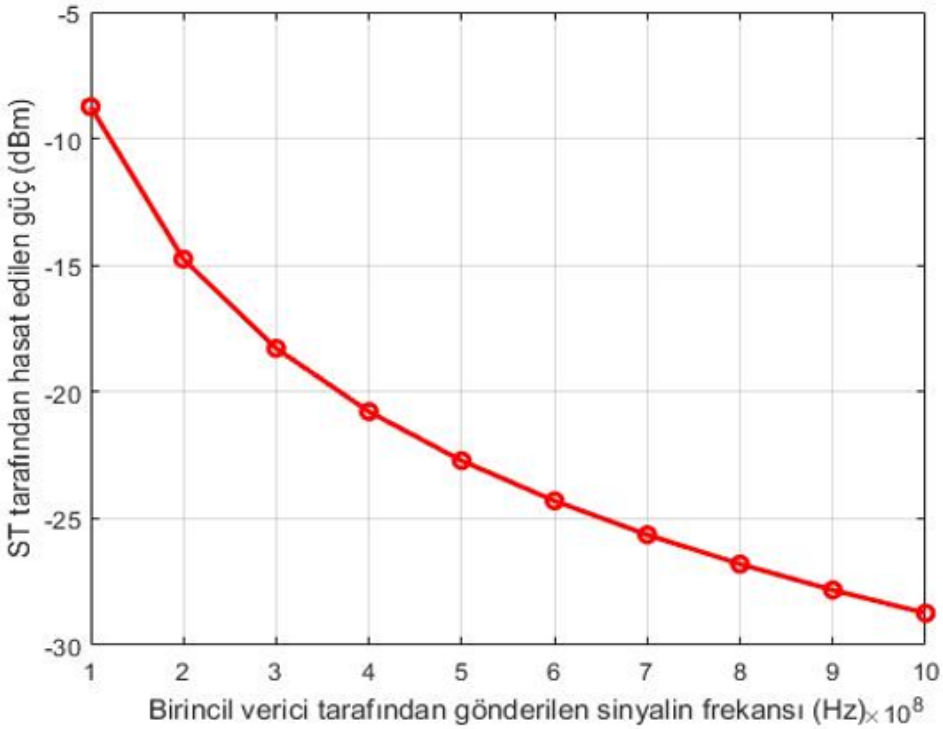
Bu bölümde SR'ye iletilen toplam bit sayısı bakımından ikincil kanalın performansı incelenmiştir. R_s fonksiyonunun maksimize edilebilmesinin yolu, zaman değişkenlerinin en uygun değerlerinin bulunmasından geçmektedir. Problem çözümü için Matlab CVX ortamı kullanılmış olup, matematiksel olarak ifade edilen sistem kodlama diline çevrildikten sonra sonuçlar elde edilmiştir. Sistem başarımı açısından elde edilen sonuçlar, sadece geri saçılım durumunda [8] ve sadece enerji depola-sonra-ilet modunda bilgi alışverişini gerçekleştiren [7] iletişim sistemleriyle karşılaştırılarak test edilmiştir. Simülasyonlarda kullanılan sistem parametre değerleri Çizelge 8.4'te verilmiştir.

Çizelge 8.4. Altına kurulan bilişsel radyo ağı için kullanılan parametre değerleri

Parametre	Değer
W	100 kHz
f	100 MHz
P^T	17 kW
$G^T = G_m^R$	6 dBi
d_m	8,3 km
ST_m-SR arası uzaklık	1 metre
$\delta_m = K_m$	0,6
B_m^b	20 kbps
β_b	0,3
P_m^0	133,59 x 10^{-6}

Şekil 8.15'te PT'nin sinyal frekansı değişimine göre ST kullanıcıları tarafından hasat edilen toplam güç gösterilmiştir. Eş. 7.91'e göre her bir kullanıcı tarafından hasat edilen güç, frekansın karesiyle ters orantılıdır. Bu yüzden frekansın artması, ikincil kanalın performansı

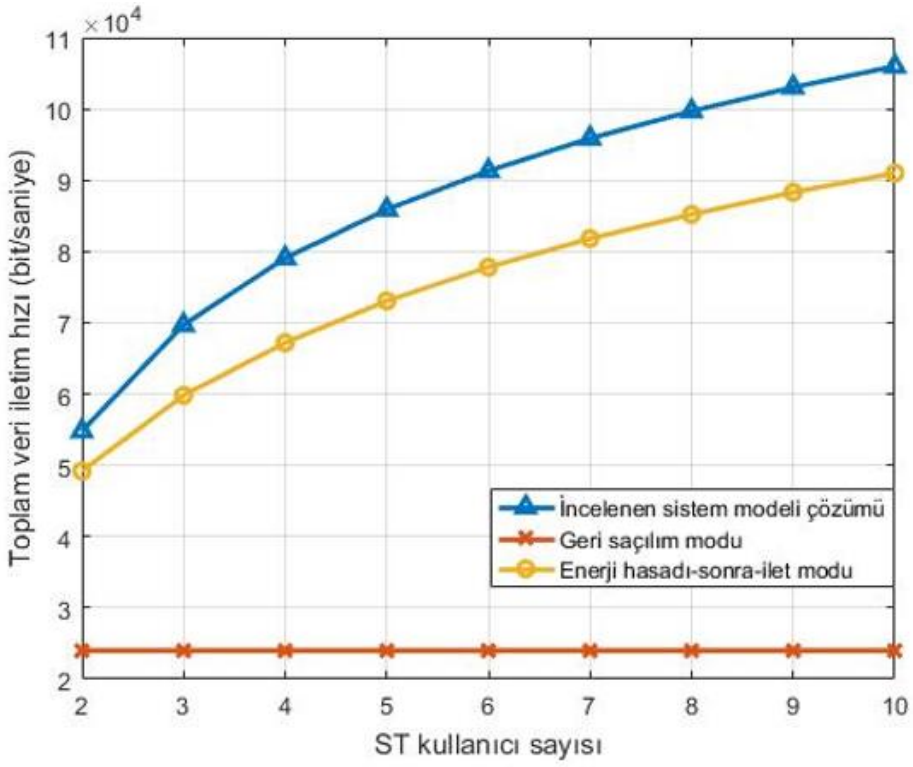
açısından olumsuz bir durumdur. ÇGSH tabanlı bu tür bilişsel radyo ağlarında birincil kanalın vericisi konumundaki PT'nin ne tür bir yapıya sahip olduğu çok önemlidir. Eğer PT, yüksek sinyal iletim gücüne sahip bir TV kulesi değil de düşük sinyal iletim gücüne sahip WiFi erişim noktası olarak kabul edilirse, bu durumda ikincil kanalın performansı ciddi manada düşebilir. Bu sebeple sistemi, farklı bir şekilde tasarlayarak performans iyileştirmesi yapmak gerekir.



Şekil 8.15. PT'nin sinyal frekansına göre ST kullanıcıları tarafından hasat edilen güç.

Şekil 8.16'da ST_m sayısına göre SR'ye iletilen bit sayısı değişimi gösterilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken husus, bütün kullanıcıların geri saçılım hızlarının aynı olmasıdır. B_m^b = 24 kbps değerine ayarlanarak sonuçlar elde edilmiştir. PT'nin sinyali kullanılarak veri iletiminin yapıldığı bu tür kablosuz güç aktarımlı haberleşme sistemlerinde, hasat edilen enerji miktarını yüksek seviyelere getirmek için kullanıcı sayısını artırmak mantıklı bir işlemdir. Kullanıcı sayısının artması her bir kullanıcıya tahsis edilecek τ_m süresini kısaltacağından Eş. 7.93'teki P_m^{tr} değeri artar. Ancak altına kurulan bilişsel radyo ağı olarak düşünülen bu sistem, PR'de oluşabilecek girişimi kontrol altında tutması gerektiğinden Eş. 7.94'te sağlanmalıdır. Sunulan bu modelde PT'nin yayını hiç kesmediği düşünüldüğünden mevcut sistem, çalışma [24] ile kıyaslandığında elde edilen bulgular, daha yüksek bit hızları

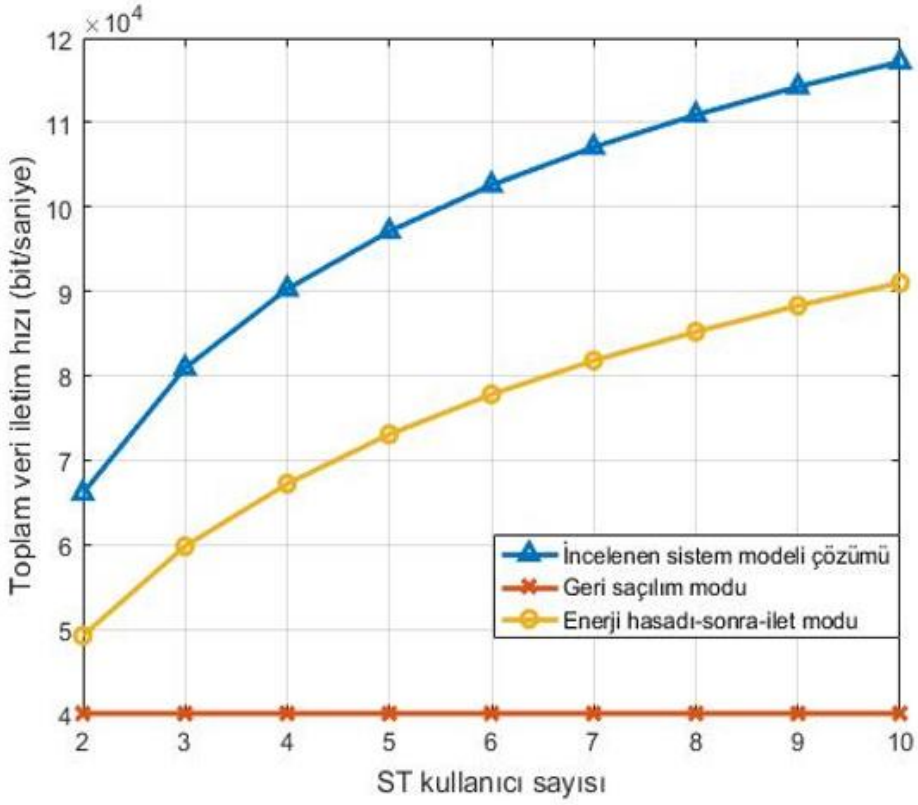
elde edildiği yönündedir. β_b süresince birincil kanalın haberleşmesi devam ettiğinden sadece geri saçılım modunda tüm ST kullanıcıları, zaman bloğunun bir tam periyodu boyunca kendilerine tahsis edilen sürede geri saçılım haberleşme ile kendi alıcılarına bilgi gönderimi yapmaktadır. Sadece geri saçılım modu için $\sum_{m=1}^{M} \emptyset_m \leq 1$ eşitsizliği yazılabilir. Her bir ST_m kullanıcısının SR'ye aktardığı veri sayısı $R_m^b = (1/M)B_m^b$ ile tanımlanır. Bu eşitlik, tüm kullanıcıların geri saçılım hızlarının aynı olmasından dolayı her birisine tahsis edilecek sürenin de eşit olacağı anlamına gelmektedir. Sonuç olarak $\sum_{m=1}^{M} R_m^b$ denklemi ile iletilen toplam bit sayısı değişmez.



Şekil 8.16. Aynı geri saçılım hızına sahip ST kullanıcıların sayısına göre bit iletim hızı.

Şekil 8.17'de elde edilen sonuçlarda farklı geri saçılım hızına sahip ST kullanıcıları bulunmaktadır. [24]'teki benzetimlerle uyumlu olması açısından ST kullanıcılarından birinin geri saçılım hız sabiti 24 kbps iken diğerlerinin B_m^b = 40 kbps olarak kabul edilmiştir. SR'ye ulaşan bit sayısını maksimize etmeye çalıştığımız bu sistemde geri saçılım hızı 24 kbps olan ST kullanıcısına geri saçılım haberleşme ile veri aktarması için kısa bir süre verilir. Bu durum o kullanıcının geri saçılım modunda iken daha fazla enerji hasadı yapmasına olanak tanır. Depolanan bu enerji, düşük geri saçılım hızına sahip kullanıcıya daha uzun τ_m süresi tahsis edilerek kullanılır. ST kullanıcılarından birinin geri saçılım hız

sabiti 40 kbps iken diğerlerinin B_m^b = 24 kbps olarak kabul edilmesi sonucu değiştirmemektedir. Çünkü kullanıcılara zaman tahsisi bu duruma uyumlu bir şekilde yapılmaktadır. Şekil 8.16 ve Şekil 8.17'ye dikkatli bakıldığında, sadece aktif veri iletim modundaki senaryoda kullanıcıların geri saçılım hızlarının farklı oluşunun SR'ye iletilen bit sayısını değiştirmediği görülebilmektedir. ST_m kullanıcısının aktif veri iletim modunda alıcıya ilettiği veri sayısını ifade eden Eş. 7.97, τ_m'ye göre artan bir fonksiyondur. Kullanıcı sayısının sürekli artması, bir süre sonra alıcıya iletilen bit sayısındaki artış hızının yavaşlamasına sebebiyet verir. Çünkü her bir kullanıcının τ_m süresi kısalmaktadır. Ayrıca $R_m \geq R_m^{++}$ kısıtı sağlanamayacağından servis kalitesinde birtakım düşüşler gözlemlenebilir.



Şekil 8.17. Farklı geri saçılım hızına sahip ST kullanıcıların sayısına göre bit iletim hızı.

9. SONUÇ

Bu tez kapsamında önerilen ilk modelde, ÇGSH tabanlı bilişsel radyo ağlarında ikincil kanalın performansını geliştirmek için birden çok ikincil verici (ST) ve röleye (Relay) sahip işbirlikçi yeni bir ağ modeli geliştirilmiştir. Bu sistemde PT, zaman çerçevesinin belirli bir bölümünde sessiz kalırken, ST ise kendisine ait verisini hem ikincil alıcıya (SR) hem de röleye geri saçar ve zaman çerçevesinde bulunan meşgul periyodu süresince birincil verici (PT) tarafından yayılan sinyalden enerji hasat eder. Sinyalin geri saçılması ile ST tarafından aktif hale getirilen röle, kendisine aktarılan bilgiyi kodu çöz-sonra-ilet (decode-then-forward) protokolünü kullanarak SR'ye iletir. PT'nin yayın yapmadığı ve sessiz kaldığı boşta kalma süresince ST'nin enerji depolama ünitesi ile çevreden hasat enerjiyi kullanarak aktif veri iletimini gerçekleştirdiği bu sistemde amacımız, SR cihazına iletilen bit sayısını maksimum seviyeye çıkarmaktır. Birden çok ST ve röleye sahip bu modelde kullanıcılar, zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA) ve dikgen olmayan çoklu erişim (NOMA) tekniğini kullanarak SR'ye bilgi aktarımı yapmaktadırlar. Bu iki teknik sayesinde, çok kullanıcıya sahip bu tür işbirlikçi sistemlerde her bir ST kullanıcısının ele alınan zaman çerçevesince bir tam periyotta ne kadar süre geri saçılım, enerji hasadı ve aktif veri iletimini gerçekleştireceğinin bulunması problemi kolaylaşmaktadır. Matematiksel olarak modellenen sistem, optimizasyon problemine dönüştürüldükten sonra nümerik analizle sonuçlar elde edilmiştir. Sayısal sonuçlar, önerilen NOMA senaryosunun TDMA'ya göre daha başarılı sonuçlar verdiğini göstermektedir. Ek olarak sistem, ST'nin sadece enerji toplayıp aktif olarak veri iletebildiği veya sadece çevresel geri saçılım haberleşme ile veri aktarımı yaptığı literatürdeki mevcut yaklaşımlarla karşılaştırıldığında daha iyi performans göstermiştir. Her iki iletişim tekniğinin uygulandığı bu haberleşme sisteminde, kablosuz sensör ağları ve akıllı ev/şehir gibi nesnelerin interneti (IoT) uygulamalarının yer aldığı literatürdeki benzer yaklaşım ve sistemlerden daha yüksek veri hızlarına ulaşılmıştır.

İkinci modelde, röle ve sinyal bozucu altında ÇGSH tabanlı bilişsel bir radyo ağı önerilmiştir. Geri saçılım haberleşme sistemlerinde saçılan sinyalin genlik değeri düşüktür ve pasif bir iletişim gerçekleştirilmektedir. Bu yüzden sistem, özellikle dışarıdan gelebilecek herhangi bir saldırıya karşı savunmasızdır. Literatürde bu tür modellerin performansını analiz eden yaklaşımlar oldukça azdır. Dolayısıyla üzerinde daha fazla çalışılması gereken bir problem olarak karşımızda durmaktadır. Mevcut problemin çözümüne katkı sağlamak

adına bu bölümde literatürdeki mevcut çalışmalardan farklı olarak öncelikle ST ve rölenin olduğu iki kullanıcılı bir ağ düşünülmüştür. Bu ağ, ikincil kanalı temsil etmektedir. Daha sonra iki adet ST ve iki adet röle olmak üzere dört kullanıcılı bir sistem tasarlanmıştır. Düşünülen her iki sistem için kullanıcılar, baz istasyonunun etrafa yaydığı sinyal ile enerji hasat edip bataryalarını doldurabilmektedir. Geri saçılım haberleşmenin dahil edildiği bu tip bilişsel radyo ağlarında sisteme eklenen sinyal bozucu, alıcıya iletilen sinyalin güç seviyesini ve kalitesini bozmaktadır. Bu yüzden röle kullanıcısı ST'den saçılan sinyali çözerek ikincil kanalın alıcısına bu bilgiyi göndermede yardım ederken, ST sensörü geri saçılım ve aktif veri iletim yoluyla bit aktarımını yapmaktadır. ST ve röle kullanıcısının sinyal bozucu varlığında birlikte çalıştığı bu sistemde amacımız, kullanıcıların ne kadar süre aktif iletim, enerji depolama ve geri saçılım yapacağını bulup birincil sistemin altyapısını kullanan ikincil kanalın alıcısına ulaşan bit sayısını maksimize etmektir. Bu yaklaşımla öncelikle nümerik analizler yapılmış, daha sonra sistem parametreleri bulunarak toplam veri sayısı hesaplanmıştır. Her iki senaryo, birbirleriyle ve farklı durumlardaki mevcut sistem modelleri ile karşılaştırılmış ve önerdiğimiz ağ modelinin üstünlükleri gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlarda sinyal bozucunun varlığında röle ve ST sayısının artmasıyla ağın performansı daha yüksek seviyelere çıkmıştır. Sinyal bozucunun olduğu bu tip haberleşme sistemlerinde, röle ve ST sayısının artmasıyla ağ başarımının net bir şekilde iyileştiğinin görülmesi literatüre mühim bir katkı olarak görülebilir.

Üçüncü modelde, çift yönlü erişim noktasına sahip hücresel bir ağ yapısı ele alınmıştır. Literatürde geri saçılım haberleşme ve enerji hasadı sonrası aktif veri iletiminin gerçekleştirildiği karma ağ modellerinde güç istasyonu genellikle tek antenli varsayılmıştır. Dolayısıyla iletişim sistemine harici bir alıcı tahsis edilerek kullanıcılardan gelen bilgiler toplanmıştır. Önerilen bu modelde, daha önceki bölümlerde ele alınan sistemlerden farklı olarak güç/baz istasyonu yerine çift yönlü erişim noktasına (full duplex, HAP) sahip bir ağ modeli düşünülmüştür. Bu sistemde iki hücre olup her bir hücrede kullanıcıya sürekli sinyal gönderimi sağlayan WiFi cihazı bulunmaktadır. İki antene sahip olan HAP, bir anteniyle sürekli sinyal gönderimi yaparken diğer anteniyle ST_1 ve ST_2 kullanıcılarından gelen bilgiyi almaktadır. Dolayısıyla HAP, hem bir sinyal kaynağı olarak çalışmakta hem de bir alıcı gibi görev yapmaktadır. Birinci hücredeki ST_1 kullanıcısı, kendisine tahsis edilen sürede sadece geri saçılım yapmaktadır. Zaman çerçevesinin diğer kısımlarında veri iletimi yapmamaktadır. İkinci hücredeki ST_2 kullanıcısının ise enerji hasadı yapabilecek bir devre yapısına sahip olduğu düşünülmüştür. Bu sebeple HAP'tan gelen sinyalin enerjisini

kullanarak hasat yapabilmektedir. ST_2 daha sonra hasat ettiği bu enerjiyi kullanarak HAP'a kendi bilgisini iletmektedir. Kullanıcılar tarafından HAP'a iletilen toplam bit sayısının maksimize edilmeye çalışıldığı bu sistemde, optimum enerji hasadı, geri saçılım ve aktif veri iletim süreleri KKT (Karush-Kuhn-Tucker) koşulları uygulanarak bulunmuştur. Sistemin matematiksel formata dönüştürülmüş halinde, farklı sistem parametre değerlerinin performansa etkisi grafiksel olarak gösterilmiştir. Önerilen bu model ile elde edilen bulgular, 5G ve ötesi ağ yapılarında birden çok kullanıcının yer alacağı bu tür karma haberleşme sistemlerinin temelini teşkil edebilecek sonuçları ortaya koymuştur.

Tez kapsamında önerilen son model, ÇGSH tabanlı altına kurulan bilişsel radyo ağlarıyla ilgilidir. Bilişsel radyo ağının farklı bir türünün ele alındığı bu sistemde ikincil alıcıya iletilen toplam bit sayısı, kullanıcılara verilecek en uygun haberleşme süreleri ile maksimize edilip sistem performansı incelenmiştir. Altına kurulan bilişsel radyo ağlarında birincil kanal, zaman çerçevesinin bir tam periyodu boyunca aktif olup, birincil verici kendi alıcısına bilgisini göndermektedir. Dolayısıyla birincil kanalın iletişim altyapısını kullanarak bilgi alışverişini devam ettirmeye çalışan ikincil kanalın, birincil alıcıya girişim oluşturmaması gerekmektedir. Bu durum dikkate alınarak, ikincil kanaldaki birden çok ST kullanıcısının hem PT'den gelen sinyali geri saçarak SR'ye veri iletebildiği, hem de enerji hasadı yapıp daha sonra bu enerji ile kabul edilebilir bir düzeyde girişim eşik seviyesinin altındaki bir değerde aktif veri iletimi gerçekleştirebildiği bir haberleşme sistemi sunulmuştur. Önerilen sistem modeli, matematiksel denklemler ile ifade edildikten sonra belli kısıtlara sahip bir optimizasyon problemine dönüştürülmüştür. Problemin amaç fonksiyonunu maksimum değere getirecek sistem parametreleri nümerik analizler ile bulunmuştur. Daha sonra farklı senaryolar altında sistem performansı karşılaştırmalı olarak grafiklerde gösterilmiştir.

5G ve ötesi sistemler için mevcut konu özelinde birçok çalışma yapılmaya devam edilmektedir. Özellikle sistemin düşük enerji ile yüksek veri hızına ulaşması hususunda farklı ağ yapıları önerilmekte ve analizleri yapılmaktadır. Konu özelinde ele alınan modeller daha çok teorik yaklaşım ve simülasyon açısından düşünülmüştür. Ağ tasarımlarının ve farklı haberleşme protokollerinin pratik uygulamalara entegre edilmesi, üzerinde daha çok çalışılması gereken konular arasındadır. Sistemin kanal kapasitesini artırmak, enerji tasarrufu için ağ yapılarını genişletmek, çok girişli çok çıkışlı sistem modelleri tasarlayıp günlük hayata uygulanabilirliği konusunda ortaya çıkabilecek problemleri belirlemek ve çözüm yöntemleri geliştirmek dikkate alınması gereken başlıklar arasındadır.

KAYNAKLAR

1. Akyıldız, I. F., Kak, A., Nie, S. (2020). 6G and beyond: The future of wireless communications systems. *IEEE Access*, 8, 133995-134030.

2. Wu, W., Wang, X., Hawbani, A. (2022). A survey on ambient backscatter communications: Principles, systems, applications and challenges. *Computer Networks*, 216, 1-17.

3. Diamantoulakis, P. D., Pappi, K. N., Ding, Z. (2016). Wireless powered communications with non-orthgonal multiple access. *IEEE Transactions on Wireless Communication*, 15(12), 8422-8436.

4. Varshney, L. R. (2008). *Transporting information and energy simultaneously*, in Proceedings IEEE International Symposium Information Theory, Toronto, 1612-1616.

5. Lu, X., Wang, P., Niyota, Kim, D. I., and Han, Z. (2015). Wireless networks with RF energy harvesting: A contemporary survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 17(2), 757-789.

6. Perera, T. D. P., Jayakody, D. N. K., Sharma, S. K., Chatzinotas, S., and Li, J. (2018). Simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT): Recent advances and future challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 20(1), 264-302.

7. Ju, H., Zhang, R. (2014). Throughput maximization in wireless powered communication networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 13(1), 418-428.

8. Liu, V., Parks, A., and Talla, V., et al. (2013). Ambient backscatter: Wireless communication out of thin air. *Association for Computing Machinery*, 43(4), 39-50.

9. Xu, C., Yang, L., and Zhang, P. (2018). Practical backscatter communication systems for battery-free internet of things: A tutorial and survey of recent research. *IEEE Signal Processing Magazine*, 35(5), 16-27.

10. Bletsas, A., Alevizos, P. N., and Vougioukas, G. (2018). The art of signal processing in backscatter radio for μW (or Less) internet of things: Intelligent signal processing and backscatter radio enabling batteryless connectivity. *IEEE Signal Processing Magazine*, 35, 28-40.

11. Huynh, N. V., Hoang, D. T., Lu, X., et al. (2018). Ambient backscatter communications: A contemporary survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 20(4), 2889-2922.

12. Lyu, B., Yang, Z., Gui, G., et al. (2017). Wireless powered communication networks assisted by backscatter communication. *IEEE Access*, 5, 7254-7262.

13. Sirojuddin, A., Nzima, V., Singh, K., et al. (2021). Backscatter aided relaying for next generation wireless communications with SWIPT. *IEEE Access*, 9, 159093-159104.

14. Liu, X., Gao, Y., Hu, F. (2019). Optimal time scheduling scheme for wireless powered ambient backscatter communications in IoT networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(2), 2264-2272.

15. Muratkar, T. S., Bhurane, A., Sharma, P., et al. (2021). Ambient backscatter communication with mobile RF source for IoT-based applications. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 141, 1-11.

16. Onay, M. Y., Dülek, B. (2019). *Performance analysis of TV, FM and WiFi signals in backscatter communication networks*. 27th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Sivas, 1-4.

17. Sun, J., Zhang, S., and Chi, K. (2021). Optimal time allocation for throughput maximization in backscatter assisted wireless powered communication networks. *IET Communications*, 15(12), 1620-1631.

18. Kim, S. H., Kim, D. I. (2017). Hybrid backscatter communication for wireless-powered heterogeneous networks. *IEEE Transactions Wireless Communication*, 16(10), 6557-6570.

19. Lyu, B. T., Yang, Z., Gui, G., et al. (2017). Optimal time allocation in backscatter assisted wireless powered communication networks. *Sensors*, 17(6), 1-11.

20. Lu, X., Niyato, D., Jiang, H., et al. (2018). Ambient backscatter assisted wireless powered communications. *IEEE Wireless Communications*, 25(2), 170-177.

21. Hoang, D. T., Niyato, D., Wang, P., et al. (2017). Ambient backscatter: A new approach to improve network performance for RF-powered cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Communication*, 65(9), 3659-3674.

22. Kishore, R., Gurugopinath, S., Sofotasios, P. C., et al. (2019). Opportunistic ambient backscatter communicaion in RF-powered cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 5(2), 413-426.

23. Li, Q. (2022). Sum-throughput maximization in backscatter communication-based cognitive networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022, 1-11.

24. Hoang, D. T., Niyato, D., Wang, P., et al. (2017). *Optimal time sharing in RF-powered backscatter cognitive radio networks*. In IEEE International Conference on Communications (ICC), Paris, 1-6.

25. Mitola, J., Maguire, G. Q. (1999). Cognitive radio: Making software radios more personal. *IEEE Personal Communications*, 6(4), 13-18.

26. Goldsmith, A., Jafar, S. A., Maric, I., Srinivasa, S. (2009). Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: An information theoretic perspective. *Proc. IEEE*, 97(5), 894-914.

27. Shafie, A. E., Al-Dhahir, N., Hamila, R. (2015). A sparsity-aware cooperative protocol for cognitive radio networks with energy-harvesting primary user. *IEEE Transactions Communication*, 63(9), 3118-3131.

28. Ren, J., et al. (2018). RF energy harvesting and transfer in cognitive radio sensor networks: Opportunities and challenges. *IEEE Commun. Magazine,* 56(1), 104-110.

29. Altinel, D., Kurt, G. K. (2019). Modeling of multiple energy sources for hybrid energy harvesting IoT systems. *IEEE Internet Things Journal*, 6(6), 10846-10854.

30. Shim, Y., Park, H., Shin, W. (2021). Joint time allocation for wireless energy harvesting decode-and-forward relay-based IoT networks with rechargeable and nonrechargeable batteries. *IEEE Internet Things Journal*, 8(4), 2792-2801.

31. Gao, X., Niyato, D., Yang, K., et al. (2022). Cooperative scheme for backscater-aided passive relay communications in wireless-powered D2D networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(1), 152-164.

32. Lyu, B. T., Yang, Z., Xie, T., et al. (2018). *Optimal time allocation in relay assisted backscatter communication systems*. In IEEE 87th Vehicular Technology Conference, Porto, 1-5.

33. Lyu, B., Yang, Z., Guo, H., Tian, F., Gui, G. (2019). Relay cooperation enhanced backscatter communication fot Internet of things. *IEEE Internet Things Journal*, 6(2), 2860-2871.

34. Li, D. (2020). Backscatter communication via harvest-then-transmit relaying. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69, 6843-6847.

35. Chen, H., Li, Y., Rebelatto, J. L., et al. (2015). Harvest-then-cooperate: Wireless-powered cooperative communications. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 63(7), 1700-1711.

36. Hussain, Q., Sohaib, S. (2020). Full duplex relaying in non orthogonal multiple access system with advanced successive interference cancellation. *Radioengineering*, 29, 654-663.

37. Yunida, Y., Muharar, R., Away, Y., et al. (2020). Efficient relay selection algorithm for non orthgonal amplify and forward cooperatşve systems over block-fading channels. *Radioengineering*, 29, 386-396.

38. Nguyen, K.-T., Do, D.-T., Voznak, M. (2017). An optimal anaylsis in wireless powered full-duplex relaying network. *Radioengineering*, 26, 369-375.

39. Dai, L., Wang, B., Yuan, Y., Han, S., et al. (2015). Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends. *IEEE Communications Magazine*, 53(9), 74-81.

40. Nazar, A. W., Hassan, S.A., Jung, H. (2020). *BER analysis of a NOMA enhanced backscatter communication system*. IEEE Global Communications Conference, Taipei, 1-6.

41. Boyer, C., Roy, S. (2014). Backscatter communication and RFID: Coding, energy and MIMO analysis. *IEEE Transactions Communication*, 62(3), 770-785.

42. Kim, Y.-H., Yoon, C., Ahn, H.-S., and Lim, S.-O. (2019). *Implementation of multi-level modulated-backscatter communication system using ambient wifi signal.* IEEE International Conference on RFID Technology and Applications, Pisa, 476-479.

43. Usman, M., Koo, I. (2014). Access strategy for hybrid underlay-overlay cognitive radios with energy harvesting. *IEEE Sensors*, 14(9), 3164-3173.

44. Balanis, C. A. (2005). *Antenna Theory: Analysis and Design*. Hoboken, NJ, USA: Wiley-Intersci.

45. Lu, X., Wang, P., Niyato, D., Kim, D. I., Han, Z. (2015). Wireless networks with RF energy harvesting: A contemporary survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(2), 757-789.

46. Bi, S., Ho, C. K., Zhang, R. (2015). Wireless powered communication: opportunities and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 53(4), 117-125.

47. Lu, X., Wang, P., Niyato, D., Kim, D. I., Han, Z. (2016). Wireless charging technologies: Fundamentals, standards, and network applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(2), 1413-1452.

48. Pinuela, M., Mitcheson, P.D., Lucyszyn, S. (2013). Ambient RF energy harvesting in urban and semi-urban environments. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 61(7), 2715-2726.

49. Lee, S., Zhang, R., Huang, K. (2015). Opportunistic wireless energy harvesting in cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7(2), 4788-4799.

50. He, S., Chen, J., Jiang, F., Yau, D. K. Y., Xing, G., Sun, Y. (2013). Energy provisioning in wireless rechargeable sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 12(10), 1931-1942.

51. Yan, J., Liu, Y. (2017). A dynamic SWIPT approach for cooperative cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(12), 11122-11136.

52. Al-Habob, A. A., Salhab, M., Zummo, S. A., and Alouini, M.-S. (2017). Multi-destination cognitive radio relay network with SWIPT and multiple primary receivers. *Proc. WCNC*, 1-6.

53. Shah, S. T., Choi, K. W., Lee, T.-J., Chung, M. Y. (2018). Outage probability nad throughput analysis of SWIPT enabled cognitive relay network with ambient backscatter. *IEEE Internet Things Journal*, 5(4), 3198-3208.

54. Wang, Y., Zhou, F., Wu, Y., Zhou, H. (2017). Resource allocation in wireless powered cognitive radio networks based on a practical nonlinear energy harvesting model. *IEEE Access*, 5, 17618-17626.

55. Wang, B., Liu, K. J. R. (2011). Advances in cognitive radio networks: A survey. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 5(1), 5-23.

56. Wang, W.-J., Xu, K., Yan, Y., et al. (2022). Relay selection-based cooperative backscatter transmission with energy harvesting: Throughput maximization. *IEEE Wireless Communications Letters* 11(7), 1533-1537.

57. Nasir, A. A., Zhou, X., Durrani, S., Kennedy, R. A. (2013). Relaying protocols for wireless energy harvesting and information processing. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 12(7), 3622-3636.

58. Bletsas, A., Shin, H., Win, M. Z. (2007). Cooperative communications with outage-optimal opportunistic relaying. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 6(9), 3450-3460.

59. Huynh, N. V., Nguyen, D. N., Hoang, D. T., Dutkiewicz, E., Mueck, M. (2020). Ambient backscatter: A novel method to defend jamming attacks for wireless networks. *IEEE Wireless Communications Letters*, 9(2), 175-178.

60. Wang, A., Iyer, V., Talla, V., Smith, J. R., Gollakota, S. (2017). *FM Backscatter: Enabling connected cities and smart fabrics*. 14th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 17), Boston, 243-258.

61. Kellogg, B., Talla, V., Gollakota, S., Smith, J. R. (2016). *Passive Wi-Fi: Bringing low power to Wi-Fi transmissions*. 13th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 16), Santa Clara, 151-164.

62. Kimionis, J., Bletsas, A., Sahalos, J. N. (2012). *Bistatic backscatter radio for tag read-range extension*. IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications, Nice, 356-361.

63. Kim, S., Vyas, R., Bito, J., et al. (2014). Ambient RF energy-harvesting technologies for self-sustainable standalone wireless sensor platforms. *Proceedings of the IEEE*, 102(11), 1649-1666.

64. Kamalinejad, P., Mahapatra, C., Sheng, Z., Mirabbasi, S., et al. (2015). Wireless energy harvesting for the Internet of Things. *IEEE Communications Magazine*, 53(6), 102-108.

65. Miorandi, D., Sicari, S., Pellegrini, F. D., Chlamtac, I. (2012). Internet of things: Vision, applications and research challenges. *Ad hoc networks*, 10(7), 1497-1516.

66. Yang, Z., Hussein, J. A., Xu, P., Chen, G., Wu, Y., Ding, Z. (2023). A novel hybrid successive interference cancellation for uplink wireless power transfer NOMA in internet of hhings. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 72(5), 6090-6102.

67. Khan, W. U., Li, X., Zeng, M., Dobre, O. A. (2021). Backscatter-enabled NOMA for future 6G systems: A new optimization framework under imperfect SIC. *IEEE Communications Letters*, 25(5), 1669-1672.

68. Kim, D.-Y., Park, J., Kim, S. (2022). Data transmission in backscatter IoT networks for smart city applications. *Journal of Sensors*, 2022, 1-9.

69. Zheng, C., Zhou, W., Lu, X. (2022). Energy efficiency maximization in the wireless-powered backscatter communication networks with DF relaying. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022, 1-12.

70. Yang, H., Ye, Y., Chu, X., Sumei, S. (2022). Energy efficiency maximization for UAV-enabled hybrid backscatter-harvest-then-transmit communications. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 21(5), 2876-2891.

71. Lyu, B., Hoang, D. T., Yang, Z. (2019). User cooperation in wireless-powered backscatter communication networks. *IEEE Wireless Communications Letters*, 8(2), 632-635.

72. Zheng, C., Cheng, W., Zhang, H. (2019). Optimal resource allocation for two-user and single-DF-relay network with ambient backscatter. *IEEE Access*, 7, 91375-91389.

73. Lu, X., Li, G., Jiang, H., Niyato, D., Wang, P. (2018). *Performance analysis of wireless-powered relaying with ambient backscattering*. 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC), Kansas City, 1-6.

74. Lyu, B., Hoang, D. T., Yang, Z. (2020). Backscatter then forward: A relaying scheme for batteryless IoT networks. *IEEE Wireless Communications Letters*, 9(4), 562-566.

75. Nguyen, T. L. N., Kim, J.-Y., Shin, Y. (2020). Ambient backscattering-enabled SWIPT relaying system with a nonlinear energy harvesting model. *Sensors*, 20(16), 4534.

76. Zhuang, Y., Li, X., Ji, H., Zhang, H.(2022). Exploiting hybrid SWIPT in ambient backscatter communication-enabled relay networks: Optimize power allocation and time scheduling. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(24), 24655-24668.

77. Jiang, R., Liu, M., Wang, X., Xu, Y. (2021). Fairness-aware resource allocation in full-duplex backscatter-assisted wireless powered communication networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2021, 1-10.

78. Ge, H., Zheng, K., Chi, K., Liu, X.(2022). The maximal secondary throughput in cognitive radio networks with energy harvesting. *IET Communications*, 17(3), 336-347.

79. Zhou, W.-G. (2020). Max-Min throughput in hybrid of wireless powered NOMA and backscatter communications. *IEEE Access*, 8, 204459-204470.

80. Zhao, Z., Cai, Y., Hong, W., Jiang, J., Peng, M., Quek, T. Q. S. (2022). On the design of backscatter communications with retransmissions. *IEEE Wireless Communications Letters*, 11(12), 2555-2559.

81. Chi, K., Sun, J., Zhang, S., Huang, L. (2023). Secrecy rate maximization for multicarrier-based cognitive radio networks with an energy harvesting jammer. *IEEE Sensors Journal*, 23(3), 3220-3232.

82. Huang, Q., Mei, Y., Wang, W., Zhang, Q. (2016). *Battery-free sensing platform for wearable devices: The synergy between two feet*. The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications, San Francisco, 1-9.

83. Kang, X., Ho, C. K., Sun, S. (2015). Full-duplex wireless-powered communication network with energy causality. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 14(10), 5539-5551.

84. Mili, M. R., Musavian, L., Hamdi, K. A., et al. (2016). How to increase energy efficiency in cognitive radio networks. *IEEE Transactions on communications*, 64(5), 1829-1843.



Gazili olmak ayrıcalıktır