T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOKLU PROTOKOLLÜ KABLOSUZ İÇ ORTAM AĞLARDA GİRİŞİM YÖNETİMİ

Ejmel TERZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektronik Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Haberleşme Programı

Danışman

Prof. Dr. M. S. Ufuk TÜRELİ

Haziran, 2020

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOKLU PROTOKOLLÜ KABLOSUZ İÇ ORTAM AĞLARDA GİRİŞİM YÖNETİMİ

Ejmel TERZİ tarafından hazırlanan tez çalışması 29.06.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı, Haberleşme Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. M. S. Ufuk TÜRELİ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. M. S. Ufuk TÜRELİ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Hacı İLHAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Aktül KAVAS, Üye
Fatih Sultan Mehmet Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. M. S. Ufuk TÜRELİ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Çoklu Protokollü Kablosuz İç Ortam Ağlarda Girişim Yönetimi" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

EJMEL TERZİ

imza

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın planlanması ve geliştirilmesi süresince çok değerli bilgi, tecrübe ve emeğini esirgemeyen sayın danışman hocam Prof. Dr. M. S. Ufuk TÜRELİ'ye ve hem maddi hem de manevi destekleri ile her zaman yanımda olan sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, bu süreçte anlayışları, kolaylaştırıcı tutumları ve katkılarından dolayı Bartın Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölüm başkanı sayın hocam Dr. Faruk UGRANLI'ya, Bilgisayar Mühendisliği bölümü Araş. Gör. Furkan AYAZ'a teşekkürü borç bilirim.

Ejmel TERZİ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vi
KISALTMA LİSTESİ viii
ŞEKİL LİSTESİ x
TABLO LİSTESİ xi
ÖZET xii
ABSTRACT xiv
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 5
1.3 Hipotez 6
2 802.15.4 VE 802.11n STANDARTLARI 7
2.1 Genel Özellikleri ve Gelişimi 7
2.1.1 802.15.4 7
2.1.2 802.11n 8
2.2 Fiziksel Katman 10
2.2.1 802.15.4 Standardı O-QPSK Fiziksel Katmanı 10
2.2.2 802.11n Standardı Fiziksel Katmanı 14
3 EŞ ZAMANLI İLETİMİN NEDENLERİ VE ETKİLERİ 24
3.1 Eş Zamanlı İletimin Nedenleri 25
3.1.1 Sınırlı Spektrum ve Geniş Wi-Fi Kanalları 25
3.1.2 Asimetrik Girişim 26
3.1.3 Farklı Paket Yapıları 26
3.2 Deneysel Sonuçlar 26
4 OYUN TEORİSİ 32
4.1 Oyun Teorisi ve Genel Kavramları 32
4.1.1 Mahkûmlar Çıkmazı Oyunu 33
4.1.2 Statik Oyunlar 35
4.1.3 Dinamik Oyunlar 35
4.1.4 Karar Mekanizmaları 39
4.1.5 İşbirliksiz Oyunlar 40
4.1.6 İşbirlikli Oyunlar 40
4.2 Strateji ve Denge Noktası Kavramları 41

4.2.1 Pür Strateji ve Nash Dengesi ... 41
4.2.2 Karma Strateji ve Nash Dengesi ... 43
4.2.3 Baskın Strateji Denge Noktası ... 44
4.3 Bağdaşık Denge ... 46
4.4 Kaba Bağdaşık Denge ... 50
4.5 Nash Dengesinin Varlığı ... 51
4.5.1 Sonlu Geliştirme Özelliği ... 53
4.5.2 Potansiyel Oyunlar ... 53
4.5.3 Zayıfça Döngüsel Olmayan Oyunlar ... 55
5 OYUNLARDA ÖĞRENME VE DENGE 57
5.1 Öğrenme Süreci ... 57
5.2 Regret Matching Algoritması ... 58
5.2.1 Öğrenme Kuralı ... 58
5.2.2 Ham Bağdaşık Denge İlişkisi ... 60
6 MELEZ BİR AĞDA GİRİŞİM YÖNETİMİ OYUNU 62
6.1 Ağ Modeli ... 62
6.2 Senaryo ... 63
6.3 Girişim Modeli ... 64
6.4 Verici Hüzme Şekillendirici Vektörlerinin Belirlenmesi ... 64
6.5 802.15.4 Cihazları Çıkış Gücü Belirleme ... 66
6.6 Oyun Teorisi Yaklaşımı ... 67
6.7 Benzetim ve Sonuçlar ... 68
6.7.1 SINR Etkisi ... 74
6.7.2 Anten Sayısı Etkisi ... 74
7 SONUÇ VE ÖNERİLER 76
KAYNAKÇA 76
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 80

SİMGE LİSTESİ

B_R	Alıcı bant genişliği
Z	Bağdaşık dengede hamle profillerinin oynanma olasılık dağılımı
H	Bilgi boyutu
N	Bir oyunda mevcut olan oyuncu sayısı
α	Birleşik karma strateji profili
D	Cihazların konumlandırıldığı karesel alanın bir kenar uzunluğu
P	Çıkış gücü birleşik hamle profili
T_c	Çip oluşma süresi
$d(t)$	Darbe şekillendirme fonksiyonu
Ω	Durum uzayı
P_G^{eff}	Etkili girişim gücü
f	Frekans
P_G	Girişim kaynağı çıkış gücü
B_G	Girişim kaynağının bant genişliği
s	Hamle profili
γ	Hamle hattı
s^k	Hamle hattı üzerinde *k.* aşamada oynanan hamle profili
s^m	Hamle hattı sonlanma hamle profili
γ_0	Hedef SINR
i_{STS}	*i.* uzay zaman veri akış dizini
i_{TX}	İletim zinciri verisi
$X_k^{i_{STS}}$	i_{STS}'de *k*. alt taşıyıcı ile taşınacak olan karmaşık değerli veri
N_{TX}	İletim zinciri sayısı
p_k	Karma stratejide k hamlesinin oynanma olasılığı
α^*	Karma strateji Nash dengesi hamle profili
$H_{m,m}$	MIMO Kanal matrisi
$H_{m,n}$	SIMO Kanal matrisi
$H_{n,m}$	MISO Kanal matrisi
$H_{n,k}$	SISO Kanal matrisi
$[Q_k]$	*k*. alt taşıyıcı uzamsal eşleme matrisi
z^s	Mekanizmanın *s* hamle profiline atadığı oynanma olasılığı
w_m	*m*. 802.11n bağlantısı alıcı çeşitleme vektörü
t_m	*m.* 802.11n bağlantısı verici hüzme şekillendirici vektörü
θ_m	*m.* 802.11n bağlantısı verici hüzme şekillendirici hamle kümesi
r_m	*m.* 802.11n bağlantısı alıcısında toplanan sinyal
b_m	*m.* 802.11n bağlantısından iletilen karmaşık değerli sembol
n_m	*m.* 802.11n bağlantısı antenlerinden alınan girişim vektörü
R_m	*m.* 802.11n bağlantısı girişim ve gürültü gücü kovaryans matrisi
P_m	*m.* bağlantı çıkış gücü
Γ_m	*m.* 802.11n bağlantısı alıcısında elde edilen SINR seviyesi
U_n	*n*. oyuncunun fayda fonksiyonu
α_n	*n*. oyuncunun karma stratejisi
α_{-n}	*n*. oyuncu dışındaki oyuncuların birleşik karma stratejisi
$R_n^{s_n}$	*n.* oyuncunun s_n hamlesinden duyduğu pişmanlık
c_n	*n.* 802.15.4 bağlantısından iletilen karmaşık değerli sembol

P_{inf}	*n.* 802.15.4 bağlantısı alıcısında hissedilen girişim gücü
S_n	*n*. oyuncunun hamle hümesi
$f_n(\cdot)$	*n.* oyuncunun karar veya öğrenme mekanizması fonksiyonu
S	Oyundaki hamle profilleri kümesi
Δ_F	OFDM modülasyonu alt taşıyıcı bant genişliği
$p_n^{s_n}$	Ölçülen pişmanlığa göre *n.* oyuncunun s_n hamlesini seçme olasılığı
s^*	Pür strateji Nash dengesi hamle profili
$\Theta(\cdot)$	Potansiyel fonksiyon
s_n	s hamle profilinde *n*. oyuncunun hamlesi
s_{-n}	s hamle profilinde *n*. oyuncu dışındaki oyuncuların birleşik hamlesi
$p(s)$	*s* hamle profilinin oynanma olasılığı
$z^{s_{-n}}$	s_n hamlesinin oynanması durumunda s_{-n} profilinin koşullu olasılığı
$z_{-n}^{s_{-n}}$	s_{-n} birleşik hamle profilinin marjinal oynanma olasılığı
$[\cdot]^+$	Sadece pozitif değerlerin dikkate alındığını belirten ifade
f_c	Taşıyıcı frekansı
N_{STS}	Uzay zaman veri akışı dizini sayısı
ϕ	Verici hüzme şekillendirici birleşik hamle profili
σ^2	Varyans
Ψ	Verici hüzme şekillendirici hamle kümesinin boyutu
$d_{x,y}$	*x* ve *y* cihazları arasındaki mesafe
L_T	802.1.5.4 bağlantısı vericisi
L_R	802.1.5.4 bağlantısı alıcısı
W_T	802.11n bağlantısı vericisi
W_R	802.11n bağlantısı alıcısı
T	802.11n bağlantısı anten sayısı

KISALTMA LİSTESİ

ACK	Acknowledgement
AP	Access Point
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BCC	Binary Convolutional Coding
CCA	Clear Channel Assignment
CSD	Cyclic Shift Delay
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance
D2D	Device to Device
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FIP	Finite Improvement Property
GI	Guard Interval
HT-GF	High Throughput-Greenfield
HT-MF	High Throughput-Mixed Format
IEEE	The Institue of Electrical and Electronics Engineering
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
IoT	Internet of Things
ISI	Inter Symbol Interference
ISM	Industrial Science and Medical
LECIM	Low Energy Critical Infrastructure Monitoring
LDPC	Low Density Parity Check
LTF	Long Training Field
LR-WPAN	Low Rate-Wireless Personal Area Network
M2M	Machine to Machine
MAC	Medium Access Control
MCS	Modulation and Coding Scheme
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MISO	Multiple-Input Single-Output
MVDR	Minimum Variance Distortionless Response
MU-MIMO	Multi User-MIMO
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
O-QPSK	Orthogonal-Quadrature Phase Shift Keying
PHO	Paket Hata Olasılığı
PHR	Packet Header
PN	Pseudo Noise
PPDU	Physical Protocol Data Unit
PSDU	Physical Service Data Unit
PSD	Power Spectral Density
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RCC	Rail Communication and Control
SHR	Synchronization Header
SIMO	Single-Input Multiple-Output
SINR	Signal to Interference Plus Noise Ratio
SISO	Single-Input Single-Output

STA	Station
STBC	Space Time Block Coding
STF	Short Training Field
SUN	Smart Utility Network
UDP	User Datagram Protocol
Wi-Fi	Wireless Fidelity

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Akıllı ev uygulaması melez ağ modeli 2
Şekil 2.1 O-QPSK fiziksel katmanı PPDU yapısı 11
Şekil 2.2 O-QPSK fiziksel katmanı iletim blok diyagramı 11
Şekil 2.3 O-QPSK modülasyonu 12
Şekil 2.4 802.11n standardı PPDU paket yapısı 15
Şekil 2.5 802.11n iletim blok diyagramı 17
Şekil 2.6 Verici hüzme şekillendirme işlemi 22
Şekil 2.7 802.11n güç spektral yoğunluğu grafiği 23
Şekil 3.1 ISM bandında 802.11n ve 802.15.4 kanallarının yerleşimi 25
Şekil 3.2 Deney ağ kurgusu-1 27
Şekil 3.3 Deney ağ kurgusu-2 28
Şekil 3.4 Deney ağ kurgusu-3 30
Şekil 3.5 Farklı modeller için MCS derecesinin 802.15.4 üzerindeki girişime etkisi 31
Şekil 4.1 Genişleyen biçim gösterimi 36
Şekil 4.2 Myerson kart oyunu 37
Şekil 4.3 Aşamalı oyun modeli 38
Şekil 4.4 Arayüz seçme oyunu 42
Şekil 4.5 Döngüsel ve döngüsel olmayan oyun modelleri 53
Şekil 4.6 Fayda ve potansiyel fonksiyon ilişkisi 54
Şekil 4.7 Zayıfça döngüsel ve döngüsel oyun modelleri 55
Şekil 4.8 Zayıfça döngüsel olmayan, sıradan ve tam potansiyel oyunlar arasındaki ilişki 56
Şekil 6.1 Melez ağ modeli 62
Şekil 6.2 Benzetimde dikkate alınan kanal yerleşimi 63
Şekil 6.3 Oyunun her bir periyodunda gerçekleşen aşamalar 67
Şekil 6.4 Matlab benzetiminde tanımlanan ağ topolojisi 70
Şekil 6.5 Hüzme şekillendirici karma stratejisi değişimi T=3, SINR=10 dB 71
Şekil 6.6 Verici hüzme şekillendirici karar süreci T=3, SINR=10 dB 72
Şekil 6.7 Toplam çıkış gücünün değişimi T=3, SINR=10 dB 73
Şekil 6.8 Verici hüzme şekillendirici karar süreci T=4, SINR=10 dB 75

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 O-QPSK fiziksel katmanı genel özellikleri 10
Tablo 2.2 O-QPSK fiziksel katmanı spektrum güç limitleri 12
Tablo 2.3 O-QPSK fiziksel katmanı alıcı hassasiyeti 13
Tablo 2.4 802.11n standardı fiziksel katmanı genel özellikleri 14
Tablo 2.5 802.11n minimum alıcı hassasiyeti 24
Tablo 3.1 802.11n veri hızının 802.15.4 üzerindeki girişime etkisi 27
Tablo 3.2 802.11n alıcısı konumunun 802.15.4 üzerindeki girişime etkisi 29
Tablo 3.3 Deney-2'de kullanılan cihazlar ve parametreler 30
Tablo 4.1 Mahkumlar çıkmazı oyunu 33
Tablo 4.2 Arayüz seçme oyunu stratejik biçim matrisi 43
Tablo 4.3 Mutlak baskın stratejili bir oyunun stratejik biçim matrisi 45
Tablo 4.4 Baskılanan hamleleri çıkarılmış bir oyunun stratejik biçim matrisi 46
Tablo 4.5 Hawk-Dove oyunu stratejik biçim matrisi 48
Tablo 4.6 Hawk-Dove oyunu hamle profili olasılık dağılımı-1 48
Tablo 4.7 Hawk oyunu hamle profili olasılık dağılımı-2 49
Tablo 4.8 Hawk-Dove oyunu bilgi yapısı 49
Tablo 6.1 Benzetimde kullanılan çıkış gücü setleri 69
Tablo 6.2 Çıkış güçleri T=3, SINR=10 dB 72
Tablo 6.3 Optimum profilde çıkış güçleri T=3, SINR=10 dB 73
Tablo 6.4 Çıkış güçleri T=3, SINR=15 dB 74
Tablo 6.5 Çıkış Güçleri T=4, SINR=10 dB 75

ÖZET

Çoklu Protokollü Kablosuz İç Ortam Ağlarda Girişim Yönetimi

Ejmel TERZİ

Elektronik Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. M. S. Ufuk TÜRELİ

Son yıllarda gelişen akıllı teknolojiler ve uygulamaları nedeniyle artan haberleşme ihtiyacının karşılanması, mevcut haberleşme sistemlerinin geliştirilmesinin yanında kaynakların optimum şekilde kullanımını da gerektirmektedir. Ancak bu uygulamalarda kullanılan protokollerin fiziksel katman kabiliyetlerindeki dengesizlik kaynaklardan optimum düzeyde faydalanmayı zorlaştırmaktadır. Bu durum, özellikle belirtilen uygulamalarda yaygın olarak tercih edilen 802.11 ve 802.15.4 standartlarına tabi protokoller arasında görülmektedir. 802.11n standardı, yüksek çıkış gücünün yanında çoklu anten kullanımını desteklerken, 802.15.4 standardı tek anten üzerinden düşük güç ile haberleşmeyi desteklemektedir. Bu kapsamda, tez çalışmasında 802.11n ve 802.15.4 standartları ile tanımlı protokollerin çakışan zaman ve spektrum dilimlerinde haberleştiği bir melez ağ modeli dikkate alınmıştır. Ağ modelinde, 802.11n cihazları verici hüzme şekillendirici vektörünü optimum şekilde belirleyerek hedef servis kalitesini minimum güç ile elde etmeyi amaçlamaktadırlar. Buna karşın, 8021.5.4 cihazları sadece çıkış güçlerini güncelleyerek hedef servis kalitesini minimum güç ile korumaya çalışmaktadırlar. Sistemde durağan bir verici hüzme şekillendirici ve çıkış gücü profilinin varlığı oyun teorisi yaklaşımı ile analiz edilmiştir. 802.11n

bağlantılarında koşulan regret matching algoritması ile hüzme şekillendirici denge noktası dağıtık olarak elde edilmiştir. Oyunda amaç, bu denge noktasının oyuncuların kapasiteleri çerçevesinde ve minimum toplam çıkış gücü ile başarılmasıdır. Matlab ortamında yapılan benzetim çalışması sonucunda, regret matching algoritmasının kaba bağdaşık denge olarak tanımlanan karar profiline yakınsadığı gösterilmiştir. İlgili profilde oluşan çıkış gücü denge noktasında ise özellikle 802.15.4 cihazlarının sınırlı güç kapasitelerini aşmadan hedef servis kalitelerini koruyabildikleri görülmüştür. Ayrıca ağdaki toplam çıkış gücünün optimal çözüme yakın olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kablosuz melez ağlar, hüzme şekillendirme, güç kontrolü, oyun teorisi, dağıtık optimizasyon

ABSTRACT

Interference Management in Multiprotocol Wireless Indoor Networks

Ejmel TERZİ

Department of Electronic Communication Engineering

Master Thesis

Advisor: Prof. Dr. M. S. Ufuk TÜRELİ

The increase of communication needs due to the smart technologies and applications developed in recent years requires the optimum use of resources as well as the development of existing communication systems. However, the discrepancy in the physical capabilities of the protocols which are widely preferred in the specified applications makes it difficult to use the resources at the optimum level. This situation is especially seen among the protocols that are specified by 802.11 and 802.15.4 standards. While the 802.11n standard supports the use of multiple antennas besides its high output power, the 802.15.4 standard supports low power communication over a single antenna. In this thesis, a heterogeneous network in which the two standard devices operate simultaneously in coinciding spectrums is taken into consideration. In the network model, 802.11n devices aim to achieve the target service quality with minimum power by optimally determining the transmit beamformer vector. However, 802.15.4 devices try to maintain their target service quality with minimum power by updating their output power only. In the game, the existence of a transmit beamformer and output power equilibrium points was analyzed by the game theoretic approach. With the regret matching algorithm run on 802.11n connections, the transmit

beamformer equilibrium profile was obtained in distributed manner. The aim is to achieve this equilibirum point within the capacity of the players and with a minimum total output power. The results of the simulation in Matlab show that the regret matching algorithm converges to the transmit beamformer decision profile, which is defined as the coarse correlated equilibrium. In the related equilibrium profile, especially 802.15.4 devices were found to be able to maintain the target service quality without exceeding their limited power capacities. It was also concluded that the total output power in the network is the near optimal solution.

Keywords: Heterogeneous networks, beamforming, power control, game theory, distributed optimization

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

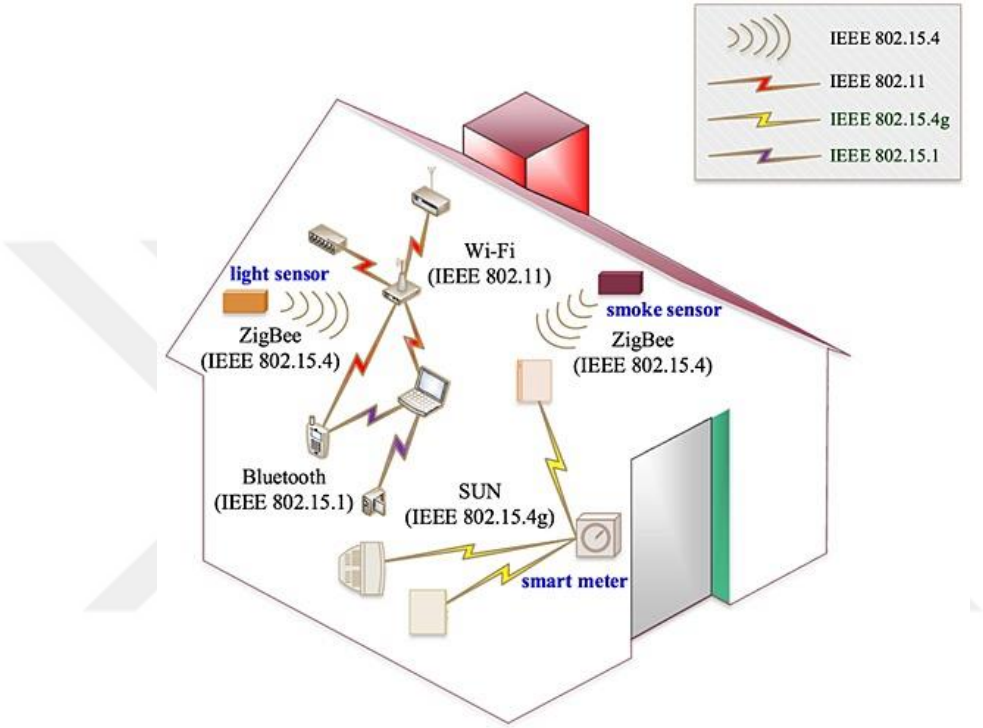
Son yıllarda hızla gelişen akıllı ev, endüstri ve şebeke uygulamaları [1], [2]; elektronik cihazların, makinelerin, altyapı kaynaklarının uzaktan yönetimini ve gözlenmesini mümkün kılmaktadır. 5G teknolojisi, bu uygulamaların daha kolay ve verimli yapılabilmesinin önünü açmıştır [3]. Cihazdan cihaza (Device to Device, D2D) ve makineden makineye (Machine to Machine, M2M) haberleşmeler ile bağlantılar merkezi bir erişim noktasına ihtiyaç duymadan doğrudan verici ve alıcı arasında kurulabilmektedir. Bu nedenle, hali hazırda sınırlı kaynağa sahip olan haberleşme sistemlerinde veri iletimi pratik şekilde yapılabilmektedir. Bunlara ek olarak, nesnelerin interneti (Internet of Things, IoT) teknolojisi ise bu hareket kabiliyetini mekândan bağımsız hale getirmiştir [4]. IoT teknolojisi ile farklı konumlardaki cihazlar internet üzerinden birbirleri ile haberleşebilmektedirler.

Belirtilen teknoloji ve uygulamaların kullanımına paralel olarak kullanıcı sayısı ve haberleşme ihtiyacı günümüzde giderek artmaktadır. Bu nedenle, bu uygulamalarda yaygın olarak tercih edilen IEEE 802.15.4 standardı [5] ile tanımlı düşük veri hacimli kişisel alan ağlarının (Low Rate-Wireless Personal Area Networks, LR-WPAN) ve IEEE 802.15.1 standardı ile tanımlı Bluetooth teknolojisinin [6] günümüz haberleşmesindeki payı hızlı bir şekilde artmaktadır [7]. Yoğun veri trafiğinin yaşanacağı yeni nesil ağlarda, Bluetooth protokolü ve 802.15.4 standardı özelinde geliştirilen protokollerin oluşan trafiğe önemli bir katkı sağlayacakları görülmektedir.

IEEE 802.11 standardı [8] ile tanımlı kablosuz bağlantı (Wireless Fidelity, Wi-Fi) teknolojisi günümüzde kullanıcılara üst düzey veri hızı ve kapsama kapasitesi sunmaktadır. Gelişmiş özellikleri ile Wi-Fi teknolojisi, yerel alanlarda internet erişimi amacıyla en yaygın olarak kullanılan kablosuz haberleşme protokolü olma özelliğini sürdürmektedir. İnternet hizmetine ek olarak, akıllı teknoloji

sistemlerinde de yaygın olarak tercih edilmektedir. Belirtilen nedenlerle, Wi-Fi ve LR-WPAN protokollerinin yakın gelecekte özellikle ev, iş yeri ve endüstri gibi yerel alanlarda birlikte haberleşiyor olması kaçınılmaz bir senaryodur.

Verilen bilgiler ışığında, gelecek yeni nesil ağlar birden fazla protokolün aynı ortamda bulunduğu çok protokollü melez ağlar olarak tanımlanmaktadır. Akıllı ev uygulamasında görülebilecek bir melez ağ modeli Şekil 1.1'de gösterilmektedir.



Şekil 1.1 Akıllı ev uygulaması melez ağ modeli [9]

Bluetooth protokolü ve 802.15.4 standardı özelinde geliştirilen protokollerin birçoğu 2.4 GHz Endüstriyel, Bilim ve Sağlık (Industrial, Science and Medical, ISM) bandını kullanmaktadır. Wi-Fi protokolünün de ISM bandında haberleşiyor olması, birlikte çalışma durumunun önemini artırmaktadır [10]. Bu protokollerin aynı spektrumu kullanıyor olması dolayısıyla eş mekân ve zaman dilimlerinde başlatılan haberleşmeler, oluşan karşılıklı girişim sonucu servis kalitelerinin düşmesine neden olmaktadır. Ayrıca, bu protokollerin güç ve bant genişliği açısından orantısız özelliklere sahip olması nedeniyle girişim etkisi daha kritik sonuçlar doğurmaktadır. Bluetooth teknolojisi, frekans atlamalı yayma spektrumu (Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS) tekniğini kullanması nedeniyle

girişimden az etkilenmektedir. Ancak 802.15.4 standardı doğrudan sıralı yaygın spektrum (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS) tekniğini kullanmakta ve Wi-Fi girişiminden etkilenmektedir. Bu açıdan, sistem performansının oldukça verimsiz noktalara gitmesi, düşük güçlü 802.15.4 protokollerinin yüksek güç ile haberleşebilen Wi-Fi kullanıcıları tarafından bastırılarak haberleşemeyecek duruma gelmesi muhtemel bir senaryodur [11]–[14]. Aynı zamanda Wi-Fi kullanıcılarına göre çok daha kalabalık olan 802.15.4 ağları Wi-Fi bağlantıları üzerinde etki oluşturabilmektedir.

Oyun teorisi, mevcut bir kaynağın paylaşımı gibi rekabet ortamının olduğu durumlarda, kullanıcıların aldıkları kararların hem kendi hem de diğer kullanıcılara olan etkilerini modellemek ve karar denge noktasının varlığını incelemek amacıyla kullanılan matematiksel bir araçtır [15]–[18]. Girişim sınırlı olan kablosuz ağlarda cihazların haberleşme parametrelerinde yaptıkları güncellemeler, diğer cihazlar üzerinde oluşan girişimi olumlu veya olumsuz yönde etkilemektedir. Bu doğal etkileşim nedeniyle oyun teorisi; farklı kablosuz sitemler için spektrum, kanal erişimi, çıkış gücü gibi kaynakların paylaşımı noktasında ele alınarak çalışılmıştır [19]–[22].

Birlikte çalışma durumunda, cihazlar çakışmayan zaman ve spektrumlarda haberleşmeyi denerler. Optimum kanal paylaşımı veya kanala erişim zamanlaması, ağdaki girişimi en aza indirerek kaynaklardan optimum şekilde yararlanılmasını sağlar [23]–[27]**.** Ancak günümüz ağlarının kalabalıklığı düşünüldüğünde, çakışan spektrum ve zaman dilimlerinde haberleşmek kaynakların verimli kullanımı açısından bir ihtiyaç haline gelmiştir. Bu nedenle, fiziksel katmanda yapılacak olan güç kontrolü ağdaki girişimi yönetme açısından önemli ve yaygın olarak tercih edilen bir parametredir [28]–[31].

Güç kontrolüne ek olarak Wi-Fi teknolojisinin 802.11n sürümü ile desteklediği çoklu-giriş çoklu-çıkış (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) tekniği, haberleşme sistemlerinde hem veri hacminin artırılması hem de spektral olarak girişimin yönetilmesinde etkili bir tekniktir [32]. MIMO ile haberleşme sistemlerinin kazanımlarından olan hüzme şekillendirme (beamforming) tekniği, antenlerin ışıma desenlerinin belirlenmesi suretiyle diğer cihazlar üzerinde oluşturulan

girişimin yönetilmesi açısından oldukça önemlidir [33], [34]. Ancak bencil olarak yapılan hüzme şekillendirici işlemi ağdaki diğer oyunculara istenmeyen girişim etkisi yaratabilmektedir. Bu durum, kablosuz haberleşme sistemlerinde farklı ağ modelleri için oyun teorisi bakış açısıyla çalışılmıştır [35]–[38].

Verici alıcı çiftinin doğrudan haberleştiği dağıtık bir sistemde verici, alıcı tarafından sınırlı geri bildirim kanalları üzerinden iletilen bilgiye göre verici hüzme şekillendirici vektörünü güncelleyebilmektedir [39]. [40], çoklu antene sahip verici alıcı çiftlerinin haberleştiği bir ad hoc ağ modelini dikkate almıştır. Optimum verici hüzme şekillendirici bilgisi, alıcı tarafından belirlenerek sınırlı geri bildirim kanalı üzerinden vericiye iletilmektedir. Her bağlantının hedef servis kalitesini minimum güç ile elde etmek amacıyla verici hüzme şekillendirici vektörü ve çıkış gücünü belirlediği oyun işbirlikli ve işbirliksiz olarak modellenerek denge noktasının varlığı incelenmiştir. Potansiyel oyun olarak tanımlanan işbirlikli modelde ulaşılan dengenin optimum olduğu gösterilmiştir. Buna karşın, işbirliksiz oyun modelinde regret matching öğrenme algoritması ile ulaşılan dengede optimuma yakın bir sonuç alınmış, ancak işbirlikli modele göre daha az iterasyon ve bilgi alışverişine ihtiyaç duyulduğu gösterilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, [41]'de geliştirilerek hem işbirlikli hem de işbirliksiz oyunlarda daha az iterasyon ile denge noktasının başarımı sağlanmıştır. Ancak bu çalışmalarda, bağlantılar eşit güç ve bant genişliği özelliğine sahiptirler. Günümüz ağlarında oluşabilecek bir melez ağ modelinde ise bu pek mümkün görünmemektedir. Diğer taraftan, her bağlantının MIMO yeteneğine sahip olması da mümkün değildir. Bu nedenle, farklı fiziksel katman özelliklerine sahip protokollerin eş zamanlı haberleşmesinde verici hüzme şekillendirici vektörü ile çıkış gücü denge noktalarının varlığı ve performanslarının analizi gerekmektedir.

IEEE 802.19 çalışma grubu, kablosuz bağlantıların lisanssız spektrumlarda birlikte çalışma durumu için analitik metotlar geliştirmiş ve standart belirlemiştir [42]. Bu metot 802.15.4 ve 802.11 standartlarının birlikte çalıştığı senaryolara uyarlanmış, hem fiziksel hem de MAC katmanında sonuçlar elde edilmiştir [43]. Ancak çalışmada iki standart arasındaki rekabet ortamında denge noktasının varlığı ve performansı oyun teorisi ile analiz edilmemiştir.

1.2 Tezin Amacı

ISM bant üzerinde 802.15.4 ve 802.11n standartlarına tabi protokollerin birlikte çalıştığı durumlar diğer senaryolardan farklı ve kritik bir öneme sahiptir. Bu standartlar; bant genişliği, maksimum çıkış gücü kapasitesi ve kullanıcı sayısı gibi parametrelerde birbirlerine göre orantısız özelliklere sahiptirler. Literatürdeki mevcut çalışmalara göre; bu standartlara tabi olan protokollerin eş zaman ve spektrum diliminde aktif olması durumunda, tüm bağlantıların hedef servis kalitesini başarabileceği kararlı bir çalışma noktasının varlığı analiz edilmemiştir.

Verilen bilgiler ve öngörü çerçevesinde bu çalışmada, 802.15.4 ve 802.11n standardı bağlantılarının aynı ortamda çakışan spektrum ve zaman dilimlerinde haberleştiği senaryolar incelenmiştir. Fiziksel katman özelinde her iki standart cihazlarının çıkış güçleri ve ayrıca 802.11n cihazlarının verici hüzme şekillendirici vektörü seçiminin, diğer kullanıcılar üzerindeki girişim etkisi oyun teorisi yaklaşımı ile analiz edilmiştir. Her kullanıcı için belirli bir hizmet kalitesinin minimum düzeyde toplam güç harcanarak elde edildiği bir çıkış gücü ve verici hüzme şekillendirici karar denge noktasının varlığı incelenmiştir. Ayrıca, ilgili denge noktasının 802.11n cihazlarında koşulan regret matching öğrenme algoritması ile dağıtık ve işbirliksiz olarak elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda;

1. bölümde, çalışmada dikkate alınan standartların fiziksel katman özellikleri belirtilmiştir.
2. bölümde, birlikte çalışmayı gerektiren etkenler ve standartların birbiri üzerindeki girişim etkileri literatürdeki deneysel çalışmalar üzerinden ortaya koyulmuştur.
3. bölümde, mevcut senaryoda çözümün varlığı noktasında matematiksel bir araç olarak kullanılan oyun teorisi yaklaşımı verilmiştir.
4. bölümde, öğrenme algoritmasının işleyişi ve denge noktası ile ilişkisi açıklanmıştır.
5. bölümde, bir arada çalışma senaryosu oluşturulmuş ve oyun modellenmiştir. Bağlantıların karar alma süreçleri ve fayda fonksiyonları matematiksel olarak

açıklanmıştır. Son olarak, Matlab ortamında yapılan benzetim sonuçları sunulmuştur.

1.3 Hipotez

802.11n ve 802.15.4 standartlarına tabi protokollerin çakışan spektrum ve zaman dilimlerinde haberleşmesi durumunda, her kullanıcının hedeflediği servis kalitesini elde edebileceği bir güç ve verici hüzme şekillendirici karar denge noktası dağıtık olarak elde edilebilir. Ayrıca, kullanılan öğrenme algoritması ile denge noktası kullanıcılar arası bilgi alışverişi gerektirmeden işbirliksiz olarak başarılabilir. Oyun teorisi açısından kaba bağdaşık denge olarak adlandırılan karar profilinde ağda harcanan toplam güç en iyi duruma yakın bir değer almaktadır.

2
802.15.4 ve 802.11n STANDARTLARI

2.1 Genel Özellikleri ve Gelişimi

2.1.1 802.15.4

LR-WPAN teknolojisi; nesnelerin interneti gibi düşük veri hacmi gerektiren haberleşmeleri, düşük güç tüketimi ve az maliyet ile gerçekleştirmek amacıyla geliştirilmektedir. Bu amaçla geliştirilen protokollerin fiziksel ve ortam erişim kontrolü (Medium Access Control, MAC) katmanlarının kapsamı 802.15.4 standardı ile belirlenmektedir. Zaman içerisinde veri hızı, güvenlik, kapsama gibi farklı parametrelerde sunduğu performanslar ile ön plana çıkan uygulamaları da kapsayan sürümleri çıkarılmıştır.

802.15.4 standardının temelinde kısa mesafeli haberleşmeler yer almaktadır. Ancak zaman içerisinde gelişen teknoloji ile geniş alana yayılmış çok sayıda cihaz içeren bir ağ topolojisine sahip uygulamalar da kapsama dâhil olmuştur. Bu uygulamalardan biri olan ve 802.15.4k standardı ile tanımlanan düşük enerjili kritik altyapı izleme (Low Energy Critical Infrastructure Monitoring, LECIM); su, elektrik veya hava kirliliği gibi önem arzeden kaynak ve alt yapıların takibinin yapıldığı uygulamalardır. Akıllı şebekeler ile müşteri takibi hizmetlerinin sağlandığı akıllı fayda ağları (Smart Utility Network, SUN) uygulamaları 802.15.4g standardı ile tanımlanmaktadır. 802.15.4p standardı ise 600 km/sn araç hızına varan demir yolu haberleşme ve kontrol (Rail Communication and Control, RCC) uygulamaları özelinde oluşturulmuştur. 802.15.4 standardının belirlediği ölçütler çerçevesinde gerçekleştirilen uygulamalar genel haliyle şu şekilde sıranalabilir;

- Nesnelerin internet uygulamaları ile ev ve bina otomasyonları
- Endüstriyel ve ticari alanlarda sistemlerin uzaktan kontrolü ve ortamın izlenmesi
- Akıllı şebekeler uygulamaları ile enerji sistemlerinin kontrolü ve ücretlendirme

- Akıllı şehir uygulamaları
- Yanardağ ve madenler gibi kritik ve tehlike arz eden alanların takibi
- Kritik öneme sahip su, gaz ve elektrik alt yapı sistemleri ve kaynaklarının izlenmesi
- Tarım ürünlerinde verimi artıracak ürün takip sistemleri
- Güvenlik
- Hava kirliliği ölçümü gibi çevre takip uygulamaları

Yukarıda belirtilen uygulamalar için geliştirilen birçok protokol bulunmaktadır. Bu protokoller, 802.15.4 standardının belirlediği fiziksel ve MAC katman yapısının üzerine geliştirdikleri üst katman özellikleri ile farklılaşmaktadırlar. 802.15.4 standardı temelinde geliştirilen ve 2.4 GHz bandını destekleyen bazı protokoller şu şekilde sıralanabilir;

- ZigBee
- WirelessHART
- MiWi
- ISA100.11a
- 6LowPAN

802.15.4 standardı, kullanılan spektrum yayma tekniği ve modülasyon türüne göre farklı fiziksel katmanları desteklemektedir. Fiziksel katman haberleşmenin yapıldığı ortam ve uygulamaya göre tercih edilmektedir. Özellikle yukarıda belirtilen 8020.15.4k/g/p sürümleri ile LECIM, SUN VE RCC uygulamaları için yeni fiziksel katmanlar standarda eklenmiştir. Bu çalışmada, belirtilen protokollerden en yaygını olan ZigBee [44] tarafından kullanılan ve 2.4 GHz ISM bandında yapılan haberleşmelerde desteklenmesi zorunlu olan dikgen-dörtlü faz kaydırmalı anahtarlama (Orthogonal Phase Shift Keying, O-QPSK) fiziksel katmanı dikkate alınmıştır.

2.1.2 802.11n

Kablosuz internet ihtiyacını karşılayan ilk teknolojilerden olan Wi-Fi teknolojisi, günümüz cihazlarının hemen hepsinde temel haberleşme arayüzü olarak bulunmaktadır.

İlk olarak 1997 yılında geliştirilen Wi-Fi teknolojisinin kullanımı 1999 yılında 802.11b sürümü ile yaygınlaşmıştır. DSSS tekniği ile 11 Mb/sn veri hızı sunan 802.11b Wi-Fi cihazları günümüz ağlarında aktif olarak kullanılmaktadırlar. Aynı dönemde çıkarılan ve 5 GHz bandında dikgen frekans bölmeli çoğullama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) tekniği ile 54 Mb/sn veri hızı sunan 802.11a sürümü ise artan veri hızına rağmen 802.11b kadar kabul görmemiştir. Bunun nedeni, 5GHz bandında artan sinyal sönümlemesi dolayısıyla kapsama alanının oldukça düşmesidir. Bu durumu aşmak için 2003 yılında 802.11b kapsama alanı ve 802.11a veri hızı kapasitelerini birleştiren 802.11g sürümü çıkarılmıştır. 802.11g, günümüz ağlarında özellikle son kullanıcı cihazlarda en yaygın olarak kullanılan Wi-Fi sürümüdür.

Wi-Fi teknolojisi hem veri hızı hem de kapsama performansındaki en önemli kazanımını 2009 yılında geliştirilen 802.11n sürümü ile yapmıştır [45]. MIMO tekniği [46] ile Wi-Fi cihazları, aynı kanalda çoklu antenler üzerinden birbirinden bağımsız veri dizinlerini paralel olarak iletebilme kabiliyeti kazanmıştır. Ayrıca artan modülasyon derecesi ve kanal genişlikleri eski sürümlere göre veri hızının katlanmasını sağlamıştır. 802.11n sürümü, 4 uzamsal veri akışı (spatial stream) sayısı, 40 MHz kanal genişliği ve 64- dördün genlik modülayonu (Quadrature Amplitude Modulation, QAM) ile 600 Mb/sn'ye kadar veri hızını desteklemektedir. Kazanılan bu yeni yetenekler 2013 yılında 802.11ac sürümü ile geliştirilmiştir. Bu sürüm ile 8 uzamsal veri akışı sayısı, 160 MHz kadar kanal genişliği ve 256-QAM modülasyonunu destekleyen Wi-Fi cihazları 7Gb/sn 'ye kadar veri hızı sağlamaya başlamışlardır. Ayrıca çoklu kullanıcı MIMO (MU-MIMO) tekniği ile son kullanıcıya göre daha fazla antene sahip olan erişim noktası cihazları, sahip olduğu antenleri farklı kullanıcılar için ayırarak aynı kanalda eş zamanlı olarak birden fazla kullanıcıya hizmet verebilmektedirler. 802.11n ve 802.11ac sürümlerinin yaygınlaşması ticari nedenlerle özellikle son kullanıcı cihazlarda zaman almaktadır. Bununla birlikte, gelişen anten teknolojisi ve küçülen boyutları çoklu anten kullanımının telefon ve diğer cihazlara da eklenmesini hızlandırmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, çok yakın gelecekte 802.11n ve 8020.11ac standartları büyük ölçüde son kullanıcı cihazlarda temel Wi-Fi haberleşme standardı olarak desteklenecekleridir. 802.11ac standardı 5 GHz bandında haberleşiyor olmasına

karşın, 802.11n standardı her iki bandı da desteklemektedir. Bu nedenle, 2.4 GHz bandında birlikte çalışma performansının incelenmesi açısından 802.11n standardı temel olarak alınmış ve incelenmiştir.

2.2 Fiziksel Katman

Fiziksel katman, cihaz ile iletim ortamı arasında fiziksel temasın doğrudan kurulduğu katmandır. Fiziksel katmanın görevleri genel olarak şu şekilde sıralanabilir;

- Alıcı ve verici işlemlerinin başlatılması veya durdurulması
- İletim ortamında mevcut sinyal enerjisinin ölçülmesi
- Kanalın meşguliyet bilgisinin çıkarımı ve MAC katmanına bildirilmesi
- Kanal seçimi
- Kanal kestirimi
- Bağlantı kalitesinin belirlenmesi

2.2.1 802.15.4 Standardı O-QPSK Fiziksel Katmanı

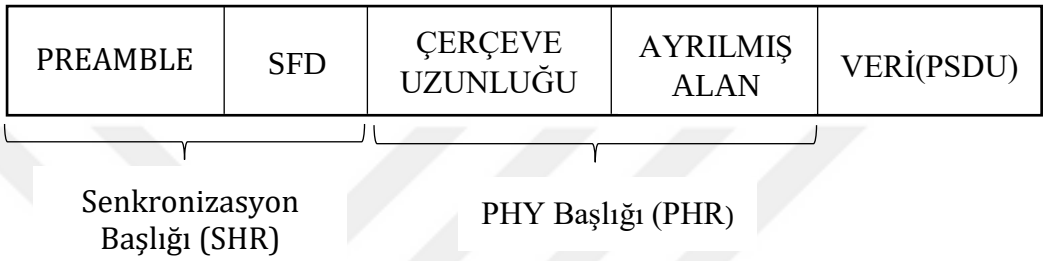
O-QPSK fiziksel katmanının genel özellikleri Tablo 2.1'de belirtilmektedir.

Tablo 2.1 O-QPSK fiziksel katmanı genel özellikleri

Parametre	**802.15.4 standardı desteği**
Bant genişliği	2 MHz
Kanallar arası koruma bandı	3 MHz
Veri hızı	250 kb/sn
Sembol hızı	62.5 ks/sn
Modülasyon	O-QPSK
Yayma tekniği	DSSS
Darbe şekillendirici	Yarım sinus darbe şekillendirici

2.2.1.1 Paket Formatı

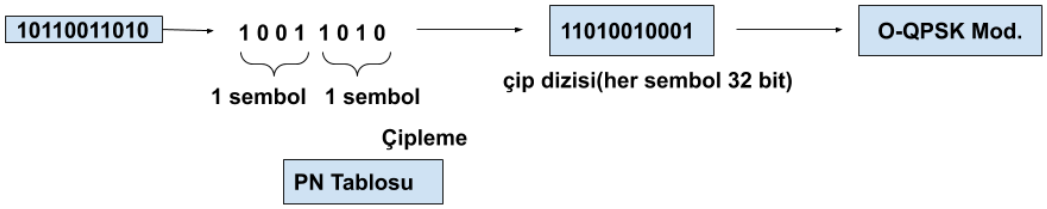
Fiziksel protokol veri ünitesi (Physical Protocol Data Unit, PPDU), Şekil 2.1'de gösterilen bit bloklarından meydana gelmektedir. Başlangıçta yer alan başlangıç/ön bilgi (preamble) bitleri alıcıda çip ve sembol senkronizasyonunun başarımını sağlar. Ardından, çerçeve başlangıcı (Start Frame Delimiter, SFD) bitleri ile alıcıya senkronizasyon başlığı (Synchronization Header, SHR) alanının bittiği ve paket başlığı (Packet Header, PHR) alanının başladığı bildirilir. PHR bloğunda, iletilen verinin boyutu oktet cinsinden belirtilir.



Şekil 2.1 O-QPSK fiziksel katmanı PPDU yapısı

2.2.1.2 Paketlerin Oluşturulması

PPDU bit dizisi, iletim ortamına aktarılmadan önce preamble bitlerinden başlayarak Şekil 2.2'de verilen işlemlerden geçmektedir.



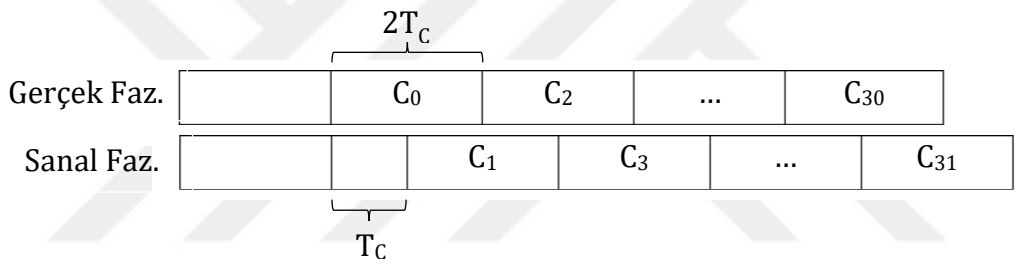
Şekil 2.2 O-QPSK fiziksel katmanı iletim blok diyagramı

İlk olarak, preamble bitlerinden başlayarak sırasıyla her bir oktet b_0, b_1, b_2, b_3 az anlamlı bitleri bir sembol, en anlamlı b_4, b_5, b_6, b_7 bitleri ise ikinci bir sembol olacak şekilde 4 bitlik 2 sembole ayrılır. Sembolleme işleminin ardından, 2 sembolden oluşan her bir oktet yayma ve modülasyon işlemine sokulur. DSSS yayma tekniğini kullanan O-QPSK fiziksel katmanında her bir sembol 32 çipten oluşan kısmen dikgen yapay rasgele gürültü (Pseudo Random Noise, PN) dizisi ile kodlanır. Temel

bantta elde edilen çip dizisi 2.4 GHz O-QPSK modülasyonu ile taşıyıcı frekansa çıkartılmadan önce (2.1)'de verilen yarım sinüs darbesi ile şekillendirilir.

$$d(t) = \begin{cases} \sin\left(\pi \frac{t}{2T_c}\right), 0 \leq t \leq 2T_c \\ 0 \quad , diğer \end{cases} \tag{2.1}$$

(2.1)'de verilen T_c, çip oluşma süresidir. Bu işlem ile her bir çip $2T_c$ genişliğe sahip yarım sinüs darbesi ile ifade edilir. Bunun nedeni ise Şekil 2.3'te görüldüğü gibi, her bir sembolün çift indeksli $c_0, c_2, \ldots c_{30}$ çiplerinin O-QPSK modülasyonu ile taşıyıcının gerçek bileşenine, tek indeksli $c_1, c_3, \ldots c_{31}$ çiplerinin ise taşıyıcının sanal bileşenine bindirilerek iletim ortamına yayılmasıdır. Taşıyıcının gerçek ve sanal bileşenleri arasında ofset oluşturmak amacıyla sanal bileşende iletilen çip dizisi T_c süresi kadar bekletilmektedir.



Şekil 2.3 O-QPSK modülasyonu

2.2.1.3 İletim Gücü ve Güç Yoğunluk Limitleri

O-QPSK fiziksel katmanını kullanan 802.15.4 cihazları en az -3 dBm çıkış gücünü desteklemek zorundadırlar. Piyasada bulunan 802.15.4 cihazlarına bakıldığında ise iç ortam için ortalama 3 dBm, dış ortamlar için ortalama 18 dBm'e kadar çıkış gücü kapasitesine sahiptirler. Standart tarafından belirlenen güç spektral yoğunluğu (Power Spectral Density, PSD) sınırları Tablo 2.2'de verilmektedir.

Tablo 2.2 O-QPSK fiziksel katmanı spektrum güç limitleri

Frekans aralığı	İlişkili sınır	Kesin sınır
$\lvert f - fc \rvert > 3.5$ MHz	-20 dB	-30 dB

Ortalama spektral güç, kanal taşıyıcı frekansından ±3.5 MHz bandını aşan spektrumlarda -30 dBm seviyesini geçmemelidir. Ek olarak, taşıyıcı frekansı referans alındığında ±1 MHz frekans bandı içerisindeki maksimum ortalama spektral güç değerine göre minimim -20 dB zayıflamış olmalıdır.

2.2.1.4 Alıcı Hassasiyeti ve Boş Kanal Ataması

Kanalın uygunluk durumu, 802.15.4 cihazları fiziksel katmanında yapılan ve boş/temiz kanal ataması (Clear Channel Assignment, CCA) olarak adlandırılan işlem sonucunda belirlenir. 802.15.4 standardına göre kanal uygunluk durumu dört farklı türde belirlenebilir:

- CCA1: Kanalda enerji eşik değeri üzerinde sinyal algılandığında kanal meşgul olarak atanır.
- CCA2: Alınan paketin standart, modülasyon ve yayma tekniğinin eşleşmesi durumunda kanal meşgul olarak atanır.
- CCA3**:** Kanalın uygunluğu hem enerji ölçümü hem de modülasyon ve yayma tekniği gözetilerek belirlenir.
- CCA4 (ALOHA): Kanal, durumuna bakılmaksızın doğrudan boş olarak atanır.

CCA1 işleminde belirli bir eşik değerinin üzerinde sinyal gücü algılandığında kanal meşgul olarak tanımlanır. Eşik değeri, minimum alıcı hassasiyet değerinin en fazla 10 dB üzerinde olabilmektedir. Tablo 2.3'te, 802.15.4 standardı O-QPSK fiziksel katmanı için minimum alıcı hassasiyet değeri ve ölçümün yapıldığı şartlar verilmektedir.

Tablo 2.3 O-QPSK fiziksel katmanı alıcı hassasiyeti

Minimum alıcı gücü hassasiyeti	**Sağlanması gereken şart**	**Ölçümün yapıldığı şartlar**
-85 dBm	Paket hata olasılığı (PHO) < 1%	20 oktet veri ve 50kb/sn veri hızı

2.2.2 802.11n Standardı Fiziksel Katmanı

802.11n standardı ile 802.11a/g standartlarında var olan OFDM fiziksel katmanına MIMO yeteneği kazandırılmıştır. Bu yetenek sayesinde, birbirinden bağımsız veri dizinlerinin farklı antenler üzerinden paralel olarak iletimini esas alan uzamsal çoğullama (spatial multiplexing) ile haberleşme veri hızı oldukça artırılmaktadır. Diğer taraftan, uzamsal çeşitleme (spatial diversity) olarak adlandırılan işlem ile aynı veri dizini vericide çoklu anten üzerinden iletilip, alıcıda da aynı şekilde çoklu anten üzerinden toplanarak sönümlemeli kanal (fading) etkisi giderilmektir. Alıcı tarafta yapılan çeşitlemede, aynı sinyalin farklı antenler üzerinden alınan kopyalarının kalitelerine göre uygun ölçülerde değerlendirilmesi ile sinyalin en iyi şekilde kazanımı esas alınmaktadır. İletim aşamasında yapılan uzamsal çeşitlemede ise toplam iletim gücü değiştirilmeden MIMO kanalı bilgisine göre her bir antenin çıkış gücü ayarlanarak aynı şekilde alıcı tarafta sönümlemeli kanal etkisinin giderilmesi sağlanmaktadır. Böylece alıcı tarafta sinyal gücünün girişim ve gürültü gücü toplamına oranı (Signal to Interference Plus Noise Ratio, SINR) artırılmaktadır.

802.11n standardının bant genişliği, modülasyon, kodlama gibi genel özellikleri ve Wi-Fi teknolojisine getirdiği yenilikler Tablo 2.4'te verilmektedir.

Tablo 2.4 802.11n standardı fiziksel katmanı genel özellikleri

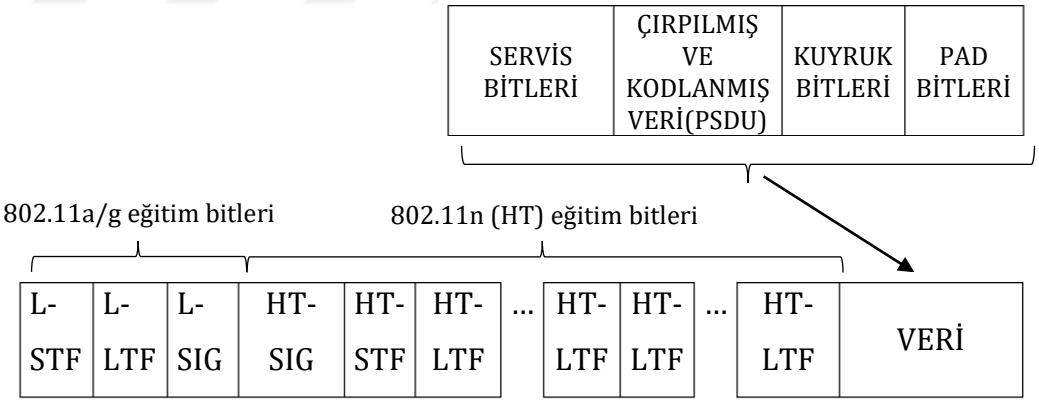
Özellikler	**802.11n desteği**
Bant genişliği	20 MHz, 40 MHz
Uzamsal veri akış dizini sayısı	Maksimum 4 dizin
Modülasyon	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Hata kodlama	BCC $\{1/2, 2/3, 3/4, 5/6\}$
Seçmeli olarak sunulan özellikler	LDPC kodlama, Hüzme şekillendirme, STBC, HT-greenfield PPDU format, 400 ns GI (kısa)

2.2.2.1 Paket Formatı

802.11n standardının desteklediği paket formatları; yüksek veri hacimli-karma format (High Throughput-Mixed Format, HT-MF), yüksek veri hacimli olmayan (NON-HT) format ve HT-greenfield (HT-GF) format olarak sıralanmaktadır. HT-MF ve HT olmayan formatlar zorunlu iken HT-GF format seçmeli olarak sunulmaktadır.

- HT olmayan format: 802.11n standardı, eski 802.11a ve 802.11g sürümleri ile uyumlu çalışabilmektedir. 802.11a/g standardı üzerinden haberleşen bir cihaz ile bağlantı kurulacağı zaman bu paket formatı kullanılır.
- HT-MF format: 802.11n standardının gerektirdiği formattır. Ancak bu formatta hazırlanan paketlerin preamble kısmında HT olmayan alıcılar (802.11a/g) için de bit blokları mevcuttur.
- HT-GF format: Seçimli olarak sunulan paket formatıdır. HT olmayan format ile uyumluluğu mevcut değildir.

802.11n standardının getirdiği kazanımları destekleyen HT-MF PPDU formatının yapısı Şekil 2.4'te gösterilmektedir.



Şekil 2.4 802.11n standardı PPDU paket yapısı

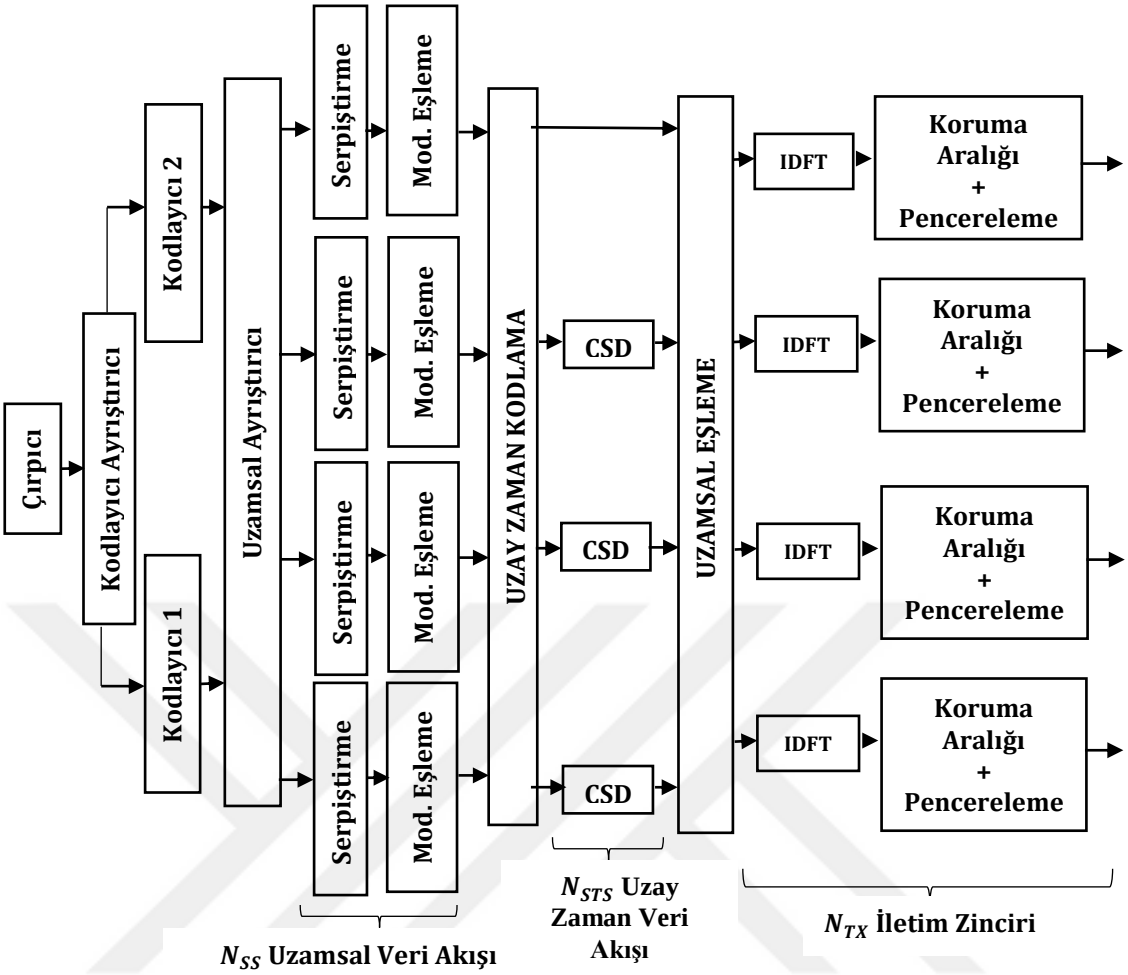
- HT olmayan kısım**:** Bu kısımdaki kısa eğitim alanı (Short Training Field, STF) ve uzun eğitim alanı (Long Training Field, LTF); kanal kestirimi, taşıyıcı frekansının ve zamanlama başarımının elde edilmesi görevini görür. L-SIG alanı ise 80211a/g Wi-Fi sürümlerinde veri hızı, paket uzunluğu gibi yapılan haberleşme ile ilgili bilgileri tutan kısımdır. 802.11a/g standardını

destekleyen cihazlar, HT format bir paket aldıklarında L-SIG alanını çözerek çarpışma önlemeli taşıyıcı algılamalı çoklu erişim (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance, CSMA/CA) mekanizması gereğince kanalı meşgul olarak algılayıp paket gönderimini ertelerler. Ek olarak, eski sürüm cihazlar HT paketin veri kısımlarını okuyamazlar.

- HT kısım: HT format eğitim bitleri, verinin sağlıklı olarak okunabilmesi için MIMO kanalının kestirilmesi ve kanalda meydana gelen değişikliklerin öğrenilmesi işlevini görür. HT-SIG alanı ise alınan verinin alıcıda doğru demodülasyonu için iletim tarafında yapılan HT işlem bilgisini (modülasyon, kodlama, bant genişliği, uzamsal veri akış sayısı) içerir.

2.2.2.2 İletim Blok Diyagramı

802.11n paketinin veri kısmına iletim öncesi yapılan tüm işlemler Şekil 2.5'te verilmektedir.



Şekil 2.5 802.11n iletim blok diyagramı

Yapılan işlemler aşağıda kısaca açıklanmaktadır:

- Çırpıcı: Aynı bitlerin uzun bir şekilde yan yana geldiği bit blokları DC bir darbe oluştururlar. Bu durum alıcıda zamanlama bilgisinin edinimini zorlaştırır. Bu şekildeki bitler, çırpma işlemi ile veri dizininin çeşitli kısımlarına dağıtılırlar.
- Kodlayıcı Ayrıştırıcı: Vericide ikili konvolüsyonel kodlama (Binary Convolutional Coding, BCC) yapıldığı takdirde ve birden fazla BCC kodlayıcı kullanıldığında, bitler belirli bir düzende kodlayıcılara dağıtılırlar.
- İleri Hata Kodlaması: Kanalda meydana gelebilecek etkilerden dolayı oluşabilecek bit hatalarını alıcıda düzeltebilmek ve veriyi geri kazanabilmek amacıyla veri kodlanarak iletilir. 802.11n standardı için BCC kodlama zorunlu tutulmuş olup 300 Mb/sn üzeri hızlar için 2 BCC kodlayıcı

kullanılmaktadır. Düşük yoğunluklu eşlik denetim (Low Density Parity Check, LDPC) kodlama ise seçimli olarak sunulmaktadır.

- Uzamsal Ayrıştırıcı: Her bir kodlayıcıda kodlanan bit dizileri, çoklu veri akışı haline getirilerek eş zamanlı ve paralel olarak serpiştirme (interleaving) ve modülasyon işlemine gönderilirler. Ayrıştırıcı, 1 ile 4 arasında çıkışa sahip olabilmektedir.
- Serpiştirme: İleri hata kodlayıcıları rasgele dağıtık şekilde oluşan bit hatalarını gidermede iyi sonuç vermektedir. Ancak bit dizininin bazı bölümlerinde oluşan blok hatalar (peşi sıra oluşan bit hataları) alıcı taraftaki kodlayıcıların veriyi geri kazanımını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, bitler dizin içerisinde farklı konumlara dağıtılmaktadır. Herhangi bir blok hata oluşması halinde hatalı bit kümesi, bit dizinindeki asıl konumlarına döndürülerek blok hatası rasgele ve birbirinden bağımsız bit hatalarına dönüşmektedir. LDPC kodlama uygulandığı takdirde serpiştirici işlemi uygulanmamaktadır.
- Modülasyon Eşlemesi: Uygulanan modülasyon derecesine göre bit blokları karmaşık sayılarla kodlanırlar.
- Uzay Zaman Blok Kodlama: Aıcıda SINR değerini artırmak için verici tarafta yapılan uzamsal çeşitleme tekniklerinden biridir. Uzamsal veri akış dizinindeki bir sembol önceden belirlenmiş uzay zaman blok kodlama (Space Time Block Coding, STBC) tablosuna göre işlenerek uzay zaman veri akış dizinlerine aktarılır. Böylece aynı OFDM sembolü farklı zaman dilimlerinde farklı antenlerden (uzay) alıcıya iletilir. En önemli özelliği kanal bilgisi gerektirmemesidir. Çıkışta oluşturduğu uzay zaman veri akış dizini sayısı, girişteki uzamsal veri akış dizini sayısından daha fazladır.
- Uzamsal Eşleme: Veri akış dizinlerindeki OFDM sembollerinin $k.$ alt taşıyıcı ile iletilecek olan karmaşık değerli x_k verisi, Q_k matrisi ile toplam iletim gücünü değiştirmeden çeşitli şekillerde ölçeklenerek veya kopyalanarak paralel olarak iletilmek üzere iletim zincirlerine (transmit chains) aktarılır. Çıkıştaki iletim zinciri sayısı girişindeki veri akış dizini sayısına eşit veya fazla olmalıdır.

- Döngüsel Kaydırma (CSD): Aynı sinyalin hüzme şekillendirme tekniği ile birden fazla anten üzerinden iletilen türevlerinin birbirleri üzerindeki istenmeyen etkilerini engellemek amacıyla sinyalin kopyaları arasında belirli bir süre geciktirme yapılır. Uzay zaman veri akış dizinleri üzerinde ve uzamsal eşleme işlemi esnasında ayrı ayrı CSD işlemi yapılabilir.
- Ters Ayrık Fourier Dönüşümü (IDFT): 802.11n standardı OFDM tekniğini kullanmakta ve iletim birbirine dik alt taşıyıcılar ile yapılmaktadır. Her bir iletim zincirinde, OFDM sembolünü oluşturan karmaşık değerli veriler atandığı alt taşıyıcı girişine gönderilir ve sembol ters ayrık fourier dönüşümü ile zaman uzayında elde edilir.
- Koruma Aralığı: İletilecek olan OFDM sembolü, kendinden önce iletilen sembol ile çakışmasını (Inter Symbol İnterference, ISI) engellemek için koruma aralığı (Guard Interval, GI) kadar geciktirilir.
- Pencereleme: Her OFDM sembolü zaman uzayında ilgili OFDM süresi kadar darbe genişliğine sahip bir dikdörtgen pencereleme fonksiyonu ile çarpılarak sınırlandırılır.

2.2.2.3 Uzamsal Eşleme

Uzamsal eşleme (spatial mapping) işlemi, veri akış dizinlerindeki OFDM sembollerinin antenlerden farklı güç ve gecikmelerle iletilmesini sağlar. Uzay zaman blok kodlamanın yapıldığı varsayıldığında, her bir i_{STS} uzay zaman veri akış dizinindeki OFDM sembolünün k indeksli alt taşıyıcı ile taşınacak olan karmaşık değerli verisi $X_k^{i_{STS}}$, $[Q_k]$ matrisi ile ölçeklenerek ilgili iletim zincirlerine gönderilir. Uzamsal eşleme matrisi olarak adlandırılan $[Q_k]$ matrisi, N_{TX} satır ve N_{STS} sütun sayısına sahiptir. N_{TX} ve N_{STS} sırayla toplam iletim zinciri ve uzay zaman veri akışı dizini sayılarıdır. i_{STS} uzay zaman veri akış dizininden gelen $X_k^{i_{STS}}$ verisi, ilgili i_{TX} iletim zincirine aktarılmadan önce $[Q_k]$ matrisinin $Q_k(i_{TX}, i_{STS})$ indeksli elemanı ile çarpılır. Uzamsal eşleme 3 şekilde yapılabilmektedir.

- **Doğrudan eşleme**

Bu işlem (2.2)'de verilen $[Q_k]$ =I köşegen matrisi ile gerçekleştirilir. Q_k matrisinin köşegen olması, uzay zaman dizin sayısının iletim zinciri sayısına eşit olduğu

anlamına gelmektedir. Matrisin köşegeni üzerindeki $Q_k(n,n)$ elemanlarının 1 değeri alması ise her bir i_{STS} dizininin bir iletim zinciri ile eşleştirildiğini ve verilerin ölçeklenmeden doğrudan ilgili iletim zincirine aktarıldığını belirtmektedir.

$$[Q_k]_{i_{TX},i_{STS}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.2}$$

Matristen anlaşıldığı gibi, *n.* uzay zaman veri akış dizininden gelen veri doğrudan *n.* iletim dizinine aktarılmaktadır.

- **Uzamsal Genişleme**

Bazı durumlarda iletim zinciri sayısı veri akış dizini sayısından fazla olmaktadır. Bunun nedeni ise kanalın belirli sayıda uzamsal iletime kadar izin veriyor olmasıdır. Bu durumda, çıkış gücünden maksimum düzeyde faydalanmak adına tüm iletim zincirleri (tüm antenler) üzerinden iletim yapılmak istenebilir. Böyle bir durumda, her bir uzay zaman veri akış dizininden gelen $x_k^{i_{STS}}$ verisi birden fazla anten ile iletilebilir. (2.3)'te verilen Q_k matrisi, 2 uzay zaman veri akış dizininden gelen verinin 4 iletim zincirine aktarımı durumunda kullanılabilecek uzamsal eşleme matrisini göstermektedir. Her bir uzay zaman veri akış dizini (sütun) $\frac{1}{\sqrt{\frac{N_{TX}}{N_{STS}}}}$ normalizasyon faktörü ile ölçeklenmektedir.

$$Q_k = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

Uzamsal genişleme işleminde farklı uzay zaman veri akış dizinlerinden gelen veriler aynı iletim zincirlerine aktarılmazlar. Diğer bir açıdan, Q_k matrisinin sütünları birbirine dikgen (ortogonal) olmalıdır. Matrisden anlaşıldığı üzere, 1. uzay zaman dizininden gelen *k.* alt taşıyıcı verisi $\frac{1}{\sqrt{2}}$ ile çarpılarak 1. ve 3. iletim zincirlerine, 2. uzay zaman veri akış dizininden gelen veri ise 2. ve 4. iletim zincirlerine aktarılmaktadır.

Uzamsal eşleme sonrasında aynı sinyalin farklı antenlerden iletilen kopyaları arasında istenmeyen bir etkinin oluşmaması için sinyal kopyaları arasında gecikme yapılır. Örnek olarak, (2.3)'te verilen $[Q_k]$, CSD matrisi ile çarpılarak (2.4)'te verilen forma dönüştürülür.

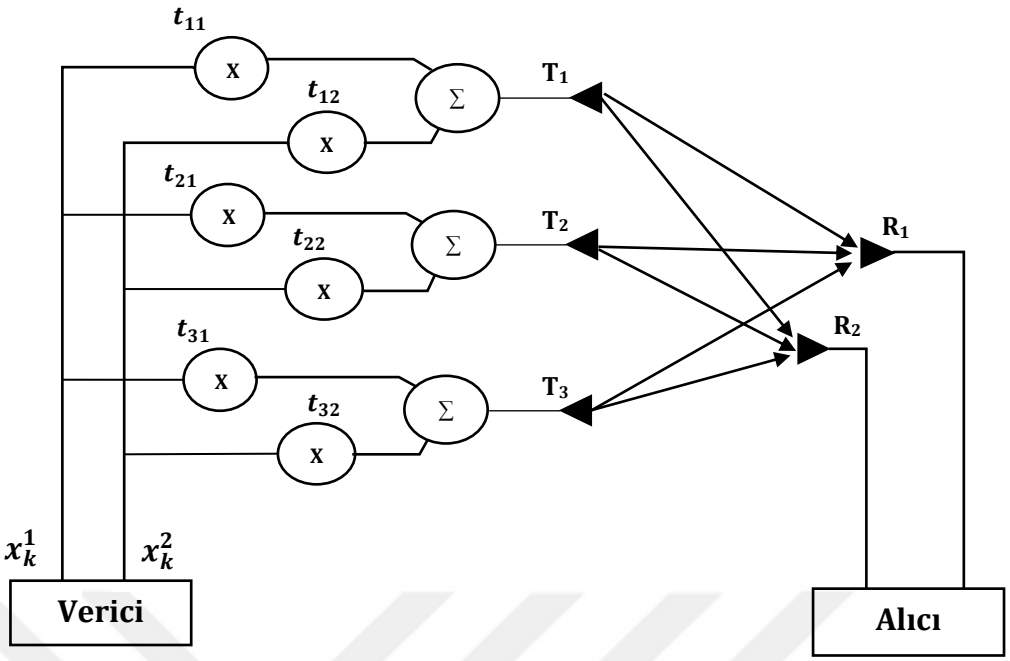
$$Q_k = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ e^{-j2\pi k \Delta_F(-200\ ns)} & 0 \\ 0 & e^{-j2\pi k \Delta_F(-200\ ns)} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Matristen anlaşılabildiği gibi, aynı veri farklı iletim dizinlerine 200 ns gecikme ile aktarılmaktadır.

- **Hüzme şekillendirme**

Her bir uzay zaman veri akış dizinindeki OFDM sembolü vektör halinde tüm iletim zincirlerine iletilmek üzere gönderilir. Böylece i_{STS} uzay zaman veri akış dizininden gelen k. alt taşıyıcı verisi $x_k^{i_{STS}}$, tüm iletim zincirlerine toplam gücü değişmeyecek şekilde Q_k matrisi ile ölçeklenerek eş zamanlı olarak iletilir. Hüzme şekillendirme işlemi, verici ve alıcı arasındaki kanal durumuna göre Q_k matrisinin elemanlarının belirlenmesi ile gerçekleştirilir. Kanal bilgisi ise vericinin kendisi ya da alıcıdan gelen dönüş çerçevesinde kestirilir. Q_k matrisi, elde edilen MIMO kanal bilgisine göre güncellenir. Toplam çıkış gücünü değiştirmeden, daha yüksek kanal performansı sunan antenlerin çıkış güçleri artırılırken diğer antenlerin çıkış güçleri azaltılır. Böylece alıcı tarafta SINR seviyesi artırılır.

Her bir iletim zincirinde iletilecek olan i_{TX} verisi, her bir uzay zaman veri akış dizinindeki OFDM sembolünün k. alt taşıyıcı $x_k^{i_{STS}}$verisinin farklı genlik ve faza sahip olan ağırlık değerleri ile çarpılarak toplanması ile elde edilir. 2 uzay zaman veri akışı ve 3 iletim zinciri ile yapılan verici hüzme şekillendirme işlemi Şekil 2.6'da gösterilmektedir.



Şekil 2.6 Verici hüzme şekillendirme işlemi

Yapılan hüzme şekillendirme işleminin matris gösterimi (2.5)'te verilmektedir.

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ . \\ . \\ i_{N_{TX}} \end{bmatrix}_{N_{TX}} = \begin{bmatrix} t_{1,1} & . & t_{1,N_{STS}} \\ . & . & . \\ . & . & . \\ t_{N_{TX},1} & . & t_{N_{TX},N_{STS}} \end{bmatrix}_{N_{TX},N_{STS}} \begin{bmatrix} x_k^1 \\ x_k^2 \\ . \\ x_k^{N_{STS}} \end{bmatrix}_{N_{STS}} \quad (2.5)$$

n. iletim zincirinde elde edilen veri ise (2.6)'da gösterildiği gibi yazılır.

$$i_n = x_k^1 t_{n,1} + x_k^2 t_{n,2} + \ldots + x_k^{N_{STS}} t_{n,N_{STS}} \quad (2.6)$$

2.2.2.4 Modülasyon ve Kodlama Şeması

İletim aşamasında yapılan işlemlerin türü ve derecesi, 0 ile 76 arasında değer alan bir indeks tarafından kodlanarak HT-SIG alanında alıcıya iletilir. Böylece, alıcı tarafta paketin iletim özellikleri çıkarılarak demodüle ve hata düzeltme işlemleri yapılabilir. İlgili indeks değeri, yapılan operasyona göre modülasyon ve kodlama şemasından (Modulation and Coding Scheme, MCS) seçilir.

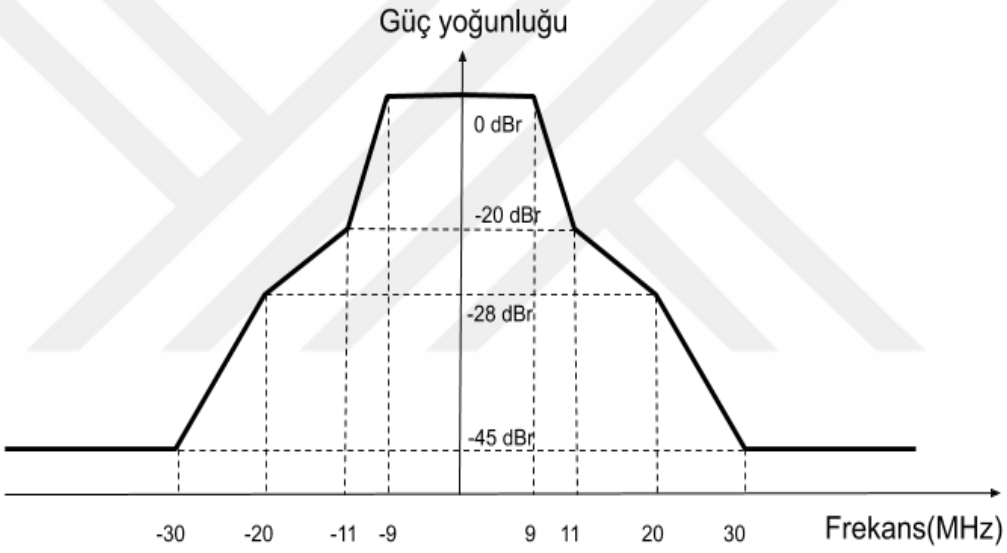
2.2.2.5 İletim Gücü ve Maskesi

- **İletim Gücü**

802.11n standardı çıkış gücü sınırları avrupa ve ülkemiz için Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü (ETSI) tarafından belirlenmektedir. Bunun yanında, her ülke kendi kural ve kısıtlamalarını getirebilmektedir. Genel itibari ile Wi-Fi cihazları ortalama 20 dBm'e kadar güç ile haberleşebilmektedirler.

- **İletim Maskesi**

İletim gücü spektral yoğunluğu, çıkış gücünün maksimum olduğu değer temel alınarak belirlenir. Grafikte verilen dBr değerleri, maksimum güç değerinin taban olarak alındığı desibel ölçümü anlamına gelir. Güç spektral yoğunluğunun gösterildiği Şekil 2.7'de, maksimum gücün taşıyıcı frekansında olduğu görülmektedir.



Şekil 2.7 802.11n güç spektral yoğunluğu grafiği

Güç, taşıyıcı frekansından $|f - fc| \geq 9$ MHz bandı için 0 dBr, $|f - fc| \geq 11$ MHz bandı için -20 dBr, $|f - fc| \geq 20$ MHz bandı için -28 dBr seviyesinde olmalıdır. Ayrıca $|f - fc| \geq 30$ MHz için -45 dBr ve maksimum 53 dBm/MHz gücü aşmamalıdır. Ek olarak, 20 MHz kanal genişliğinde yapılan haberleşmelerde -16 ile -1 ve 1 ile +16 arası indeks numarasına sahip alt taşıyıcıların ortalama enerji seviyeleri en fazla ±4 dB değişiklik göstermelidir. -28 ile -17 ve 17 ile 28 arasında indeks numarasına sahip olan alt taşıyıcılar ise 16 ile -1 ve 1 ile +16 arası indeks numarasına sahip alt taşıyıcıların ortalama enerji seviyelerinden en fazla +4 dB veya -6 dB değişiklik göstermelidir.

2.2.2.6 Minimum Alıcı Hassasiyeti ve CCA1 Eşik Değeri

Minimum alıcı hassasiyet değerleri 20 MHz kanal genişliği için farklı modülasyon ve kodlama türlerine göre Tablo 2.5'te verilmektedir.

Tablo 2.5 802.11n minimum alıcı hassasiyeti

Modülasyon	Kodlama oranı	Eşik değeri (dBm)
BPSK	1/2	-82
QPSK	1/2	-79
QPSK	3/4	-77
16-QAM	1/2	-74
16-QAM	3/4	-70
64-QAM	2/3	-66
64-QAM	3/4	-65
64-QAM	5/6	-64

Wi-Fi cihazı, minimum hassasiyet eşik değeri olan -82 dBm veya üzeri bir güç seviyesi algıladığında 90% olasılıkla 4 μs içerisinde kanalı meşgul olarak belirleyebilir. Ayrıca -82 dBm'in 20 dB üzeri olan -62 dBm ve üzeri bir güç algılandığında doğrudan kanalı meşgul olarak algılar.

3
EŞ ZAMANLI İLETİMİN NEDENLERİ VE ETKİLERİ

802.11n ve 802.15.4 cihazlarının eş zamanlı haberleşmesine neden olan birkaç etken mevcuttur;

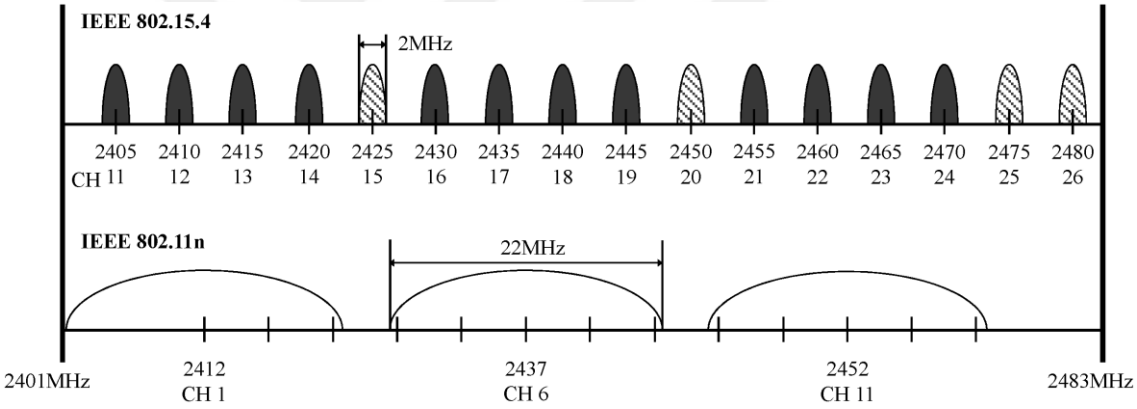
- ❖ Sınırlı kaynakların hızla büyüyen yeni nesil ağlarda ihtiyacı karşılamaması ve eş zamanlı haberleşme ihtiyacının doğması
- ❖ CCA2 mekanizması
- ❖ CCA1 mekanizmasına rağmen oluşan asimetrik girişim durumu

Bu bölümde, yukarıda belirtilen etkenler açıklanmaktadır. Ek olarak, eş zamanlı haberleşme durumunda iki standardın birbirleri üzerindeki girişim etkisini deneysel olarak inceleyen bazı çalışmalara yer verilmektedir.

3.1 Eş Zamanlı İletimin Nedenleri

3.1.1 Sınırlı Spektrum ve Geniş Wi-Fi Kanalları

2.4 GHz ISM bandı, 2402 MHz ile başlayan ve 2485 MHz ile biten sınırlı bir frekans aralığına sahiptir. Bu nedenle, bu kaynaktan en iyi şekilde yararlanmak önem arz etmektedir.



Şekil 3.1 ISM bandında 802.11n ve 802.15.4 kanallarının yerleşimi [47]

Şekil 3.1'de görüldüğü gibi, yalnızca üç tane üst üste çakışmayan 802.11n kanalı mevcuttur**.** Bu durumda, eş zamanlı haberleşme başlatan üç Wi-Fi cihazı, çakışmayan kanallarda haberleşerek yaklaşık olarak tüm spektrumu işgal edebilir. 802.11n ve 802.15.4 standartlarının her ikiside MAC operasyonları için CSMA/CA mekanizmasını kullanmaktadır. Böyle bir senaryoda CSMA/CA mekanizması gereğince 15, 20, 25 ve 26. kanallar dışında 802.15.4 cihazları kanalı meşgul olarak algılayıp haberleşemeyecektir. Sonuç olarak, spektrumun büyük bir çoğunluğu yalnızca 3 Wi-Fi bağlantısına atanmış olur. Gittikçe artan kullanıcı sayısı dikkate alındığında, bu durum kaynakların verimsiz ve adil olmayan bir şekilde

kullanılması demektir. Üstelik önemli veri toplayan sensörlerin kanala erişememesi veya paketleri hatalı iletmesi tehlikeli sonuçlar doğurabilmektedir. Bu nedenle spektrumun farklı protokoller ve fazla sayıda kullanıcı tarafından verimli bir şekilde kullanılması için Wi-Fi ve 802.15.4 cihazlarının belirli bir servis kalitesini sağlamak şartıyla eş zamanlı haberleşebilmesi bir zorunluluk haline gelmiştir.

3.1.2 Asimetrik Girişim

Haberleşme başlatmak isteyen bir cihaz, CCA1 işlemi ile kanaldaki enerji değerini ölçer ve kanal durumu CSMA/CA mekanizmasına aktarılır. Eşik değerinin altında enerji algılanırsa belirli bir süre bekledikten sonra haberleşme başlatılır. Aksi durumda, kanal meşgul olarak CSMA/CA mekanizmasına bildiririlir ve rasgele bir süre ile haberleşme askıya alınır. Bu bilgiler doğrultusunda, diğer cihazlardan alınan sinyal gücü eşik değerinin altında kaldığında eş zamanlı iletim kaçınılmazdır. Özellikle 802.15.4 cihazları, çok daha düşük güce sahip olması nedeniyle yol kayıpları da göz önünde bulundurulduğunda Wi-Fi cihazları tarafından duyulamayabilirler. *Asimetrik girişim* olarak adlandırılan bu durumda, Wi-Fi ve 802.15.4 sinyalleri çakışmakta ve özellikle 802.15.4 cihazlarının haberleşme performansı oldukça düşmektedir.

3.1.3 Farklı Paket Yapıları

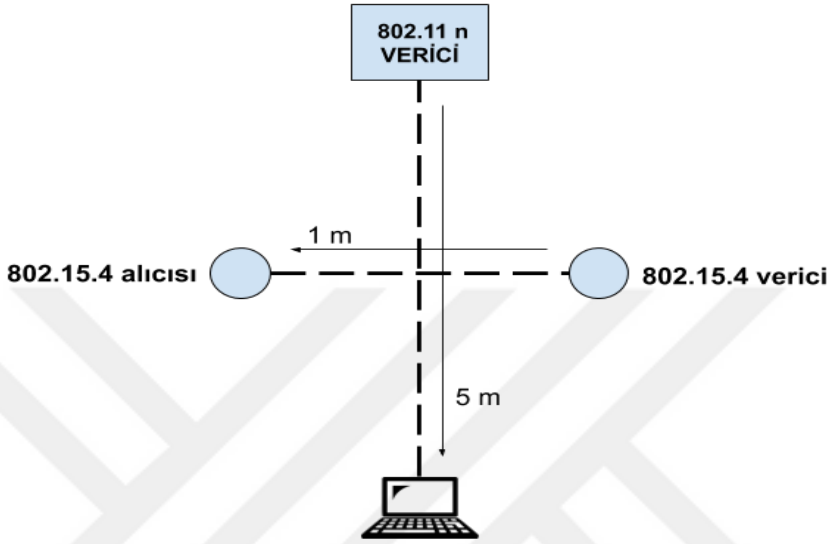
CCA1 işlemi ile kanaldaki enerji seviyesinin algılanması dışında, CCA2 veya CCA3 işlemleri ile de kanal durumu belirlenebilir. Bu durumda, alınan paketin modülasyon ve spektrum tekniğine göre iletim yapılmakta olan standart dişinda bir paket olması halinde kanal boş olarak algılanır. CCA2 veya CCA3 işlemi uygulayan bir 802.15.4 alıcısı, preamble bitlerine bakarak 802.11n paketinin farklı bir standart tarafından üretildiğini analiz eder ve kanal durumunu boş olarak belirler. Bunun sonucunda da iki standardın paketleri çakışır.

3.2 Deneysel Sonuçlar

802.11n ve 802.15.4 standartlarının birbirleri üzerindeki etkileri Wi-Fi teknolojisinin eski sürümlerine göre literatürde daha az ele alınmıştır. Bu

çalışmalardan bazılarında yapılan analizler ve elde edilen sonuçlara bu kısımda yer verilmektedir.

Araştırmacılar, 802.11n standardının iletim hızı ve uzamsal çeşitliliği gibi parametrelerinin 802.15.4 cihazları üzerinde oluşturduğu girişim etkilerini çeşitli topoloji ve analizler çerçevesinde incelemişlerdir [12].



Şekil 3.2 Deney ağ kurgusu-1

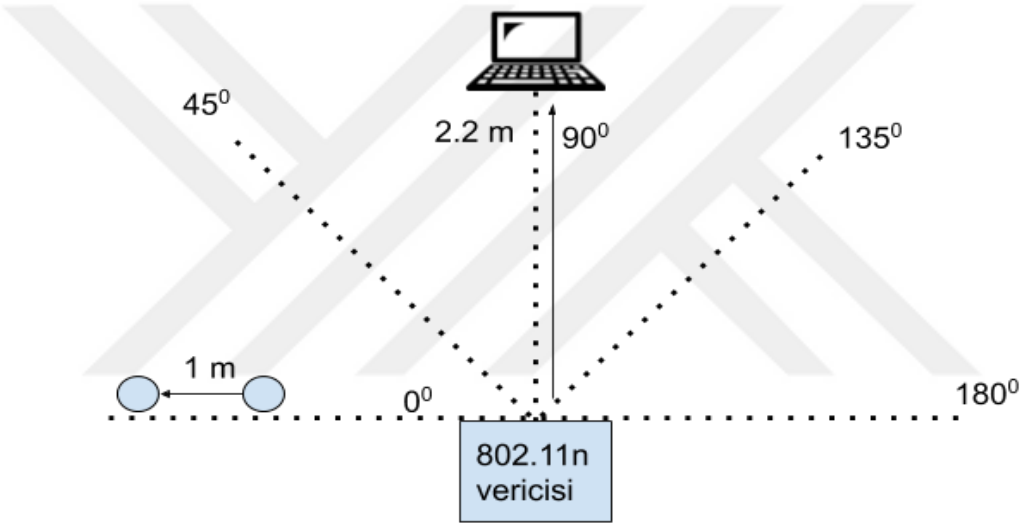
İlk olarak Wi-Fi ve 802.15.4 haberleşme bağlantıları Şekil 3.2'de gösterildiği gibi kurulmuştur. 802.11n bağlantısı, 2452 MHz taşıyıcı frekansı ve 40 MHz bant genişliğindeki 9. kanalda maximum 16 dBm güç ile 1472 byte boyuta sahip UDP paketleri göndererek arka plan girişimi yaratmaktadır. 802.15.4 cihazları ise maksimum 0 dBm çıkış gücüne sahiptirler. Her ölçümde 802.15.4 vericisi 26 ms aralıklar ile 2000 paket iletecek şekilde programlanmış ve alıcı tarafta ise başarılı şekilde alınan paketler sayılmıştır. Farklı uzunluklara sahip 802.15.4 paketlerinin değişen Wi-Fi iletim hızına göre 21. kanalda başarılı bir şekilde aktarım oranı Tablo 3.1'de verilmektedir.

Tablo 3.1 802.11n veri hızının 802.15.4 üzerindeki girişime etkisi

802.15.4 paket uzunluğu (byte)	**Paket iletimi başarım oranı (%)**			
	25 Mb/sn	**50 Mb/sn**	**75 Mb/sn**	**150 Mb/sn**

26	37.9	21.4	7.7	0.2
116	5.1	8.5	0.8	0.5

Görüldüğü gibi, Wi-Fi cihazının iletim hızı artıkça 802.15.4 bağlantısında gönderilen paketlerin doğru bir şekilde iletilme oranı azalmaktadır. İletim hızının 150 Mb/sn olduğu değerlerde başarılı bir şekilde alınan paket oranı neredeyse 0% olarak görülmektedir. Buna daha kalabalık ağlar için hem komşu kanallardan gelen hem de aynı standart ile yayın yapan diğer cihazlardan gelen girişim de dâhil olduğunda 802.15.4 performansı daha düşük seviyelerde olacaktır. Diğer taraftan kısa paketlerde paket başarım oranının daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 3.3 Deney ağ kurgusu-2

Çalışmada ayrıca Şekil 3.3'te verilen topoloji üzerinden Wi-Fi bağlantısının uzamsal çeşitlilik ve hüzme şekillendirme işlemlerinin 802.15.4 bağlantısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. 802.11n bağlantı mesafesi sabit tutularak sadece alıcı bilgisayarın vericiye göre farklı açılarla konumlandırılması sağlanmıştır. Deney-1'de yer alan parametreler değiştirilmeden Wi-Fi bağlantısının iletim hızı 70 Mb/sn ile sabitlenmiştir. Alıcı bilgisayarın farklı konumları için bir spektrum analizör yardımı ile 802.15.4 alıcısının maruz kaldığı girişim gücü izlenmiştir. Yapılan deney sonucunda, en düşük girişim gücü ve bununla orantılı olarak en yüksek paket başarım oranı 90^o açı ile yapılan konumlandırmada elde edilmiştir. İkinci en iyi performans 180^o ile yapılan konumlandırmada oluşmuştur. Ayrıca 90^o

ve 0^o ile konumlandırmalarda oluşan girişim güçleri arasında 15 dBm'e kadar fark mevcuttur. 9. Wi-Fi kanalı ile çakışan 21. ve çakışmayan 25. 802.15.4 kanallarının paket başarım yüzdeleri Tablo 3.2'de farklı açılardaki konumlandırmalar için verilmektedir.

Tablo 3.2 802.11n alıcısı konumunun 802.15.4 üzerindeki girişime etkisi

Kanal	**Paket iletimi başarım oranı (%)**				
	0^o	**45^o**	**90^o**	**135^o**	**180^o**
21	18	25	25	10	29
25	38	38	68	33	68

Görüldüğü gibi, girişim işaretlerinin açısı ve anten ışıma deseni 802.15.4 bağlantısının maruz kaldığı girişim gücünde önemli etkiye sahiptir. Ek olarak, 0^0 gibi yakın kanumlandırılmalarda Wi-Fi haberleşmesinin sağlandığı 9. kanal ile çakışmayan 25. ve 26. 802.15.4 kanallarında dahi paket kayıpları yaşanmaktadır. Bu nedeni komşu kanallara olan sızmalardır. Böyle durumlarda uzamsal çeşitlilik ile birlikte yapılacak olan güç kontrolü bant dışı sızmaların daha az seviyelerde olmasını sağlayacaktır. Ayrıca CCA eşik değeri de önemli bir etkendir. Düşük enerji eşik değerine sahip cihazlar girişime hassas olduklarından dolayı kanal dışına sızan Wi-Fi girişimi nedeniyle kanalı meşgul olararak algılayıp paket göndermemektedirler. Bu durumda ortalama paket oranı düşmektedir.

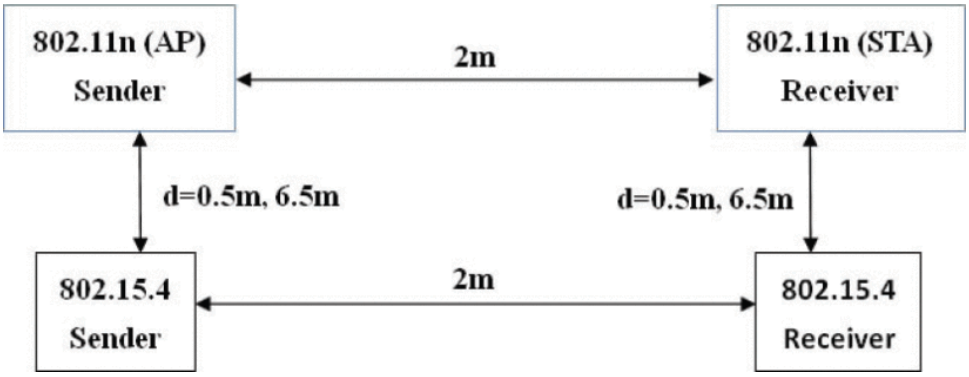
Literatürdeki bir diğer çalışmada yazarlar, 802.11n ve 802.15.4 cihazlarının birbiri üzerindeki girişim etkisini simetrik ve asimetrik girişim durumları için incelemiştirler [13]. Her iki durum için karşılıklı girişim etkilerinin sonuçları yaygın olarak tercih edilen iki 802.11n cihaz modeli ile farklı MCS operasyonları için analiz edilmiştir.

Simetrik durumlarda her iki standart cihazı da birbirini duyabilmektedir. Bu nedenle, paket kayıpları ağırlıklı olarak kanala erişim noktasındaki kayıplardan kaynaklanmaktadır. Asimetrik durumlarda ise Wi-Fi cihazları 802.15.4 haberleşmesini algılayamamaktadırlar. Bu durum iki standardın eş zamanlı iletim

yapmasına ve paketlerinin çakışmasına neden olmaktadır. Bu nedenle paket kayıpları ağırlıklı olarak iletim anında oluşmaktadır. Standartların fiziksel katman kabiliyetlerinin dikkate alınması nedeniyle bu çalışmada iki standardın eş zamanlı iletim gerçekleştirdiği asimetrik girişim sonuçları sunulmaktadır. Deneyde kullanılan haberleşme parametreleri ve cihaz modelleri Tablo 3.3'te verilmektedir.

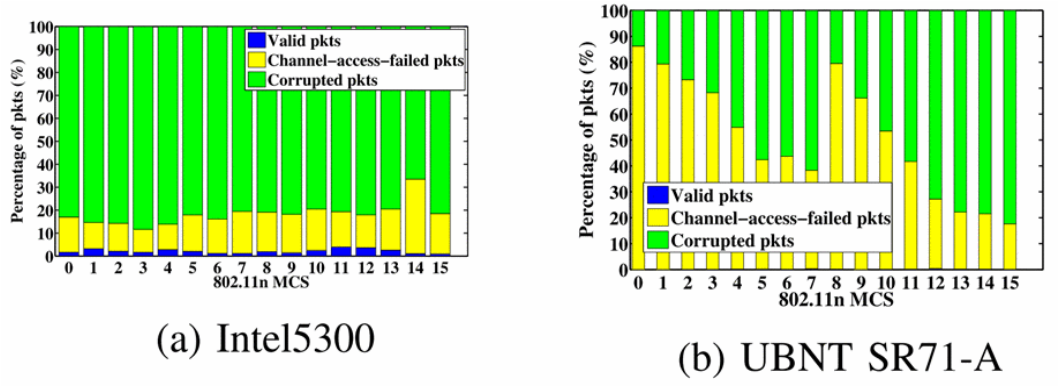
Tablo 3.3 Deney-2'de kullanılan cihazlar ve parametreler

Parametre		**Benzetimde kullanılan değer veya özellik**
802.11n	Cihaz modeli	Intel 5300, UBNT SR71-A
	Paket yükü ve türü	1500 byte UDP paketi
	Çalışma kanalı	11. kanal
	MCS tablosu	0-15 (uzun koruma aralığı)
802.15.4	Cihaz modeli	Jennic 802.51.4 uyumlu radyo
	Paket yükü	100 byte
	Toplam gönderilen paket sayısı	10000
	Çalışma kanalları	19-26 Kanal bandı



Şekil 3.4 Deney ağ kurgusu-3

Şekil 3.4'te gösterilen toplojide, bağlantı mesafesi asimetrik senaryolar için 6.5 metreye ayarlanarak 802.15.4 cihazının Wi-Fi tarafından duyulmaması sağlanmıştır. 802.15.4 cihazlarında alıcı tarafta paket başarım oranının belirlenmesi amacıyla "alındı (Acknowledgement, ACK)" sinyali kapatılarak kaybolan paketlerin tekrar gönderimi engellenmiştir.



Şekil 3.5 Farklı modeller için MCS derecesinin 802.15.4 üzerindeki girişime etkisi

802.5.4 cihazının paket kayıp oranları Şekil 3.5'te her iki Wi-Fi modeli girişimi altında verilmektedir. 802.15.4 bağlantısının Wi-Fi girişiminden ağır olarak etkilendiği ve başarılı bir şekilde iletilen paket sayısının neredeyse sıfıra indiği görülmektedir. Diğer taraftan, Intel 5300 cihazı girişimi altında 802.15.4 paket kayıpları ağırlıklı olarak iletim anındaki bozulmalardan kaynaklanmakta ve MCS derecesinden bağımsızdır. Artan modülasyon derecesi ile girişim duyarlı ve kanala erişim noktasında daha seçici olan UBNT SR71-A cihazı ise 802.15.4 cihazına daha fazla kanal erişim şansı vermekte ancak daha sonra iletimi ertelemediğinden çakışmalar meydana gelmektedir.

Yazarlar, asimetrik girişim durumunda 802.15.4 girişiminin 802.11n paketlerini bozmaya yetecek güce sahip olmadığı sonucunu çıkarmışlardır. Çalışmada bir Wi-Fi ve bir 802.15.4 cihazı kullanılması dolayısıyla bu makul bir sonuçtur. Ancak bir Wi-Fi kanalı birden fazla 802.15.4 kanalı ile çakışması nedeniyle oluşan toplam 802.15.4 girişiminden etkilenebilir.

4
OYUN TEORİSİ

4.1 Oyun Teorisi ve Genel Kavramları

Günümüzde birçok mühendislik sistemi, yaptığı gözlem ve ölçümler sonucunda mevcut çalışma parametrelerini kendi kendine güncelleyebilen karar alıcılardan meydana gelmektedir. Ancak bu tür sistemlerin en önemli özelliği kullanıcılar arasında etkileşimin olmasıdır. Bir kullanıcı, mevcut çalışma parametresini değiştirmesi sonucunda kendi faydasının yanında diğer cihazların da fayda seviyesini olumlu veya olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Örneğin, kablosuz

olarak haberleşen bir cihaz kendi veri hızını artırmak amacıyla çıkış gücünü yükselttiğinde diğer cihazlar üzerindeki girişimi artırarak haberleşme hızlarının düşmesine neden olmaktadır. Bu durum, etkilenen kullanıcıların da performanslarını korumak amacıyla yeni kararlar almasına sebep olur ve sonuç olarak sistemde ardışık olarak devam eden bir kararlar zinciri oluşur. Oyun teorisi, verilen örnekteki gibi çıkarların ters düştüğü rekabet durumlarında karar alıcıların davranışlarını ve birbirleri üzerindeki karşılıklı etkileşimi modelleyen matematiksel bir araçtır. Oyun teorisinde amaç, sistemde her karar alıcıyı memnun edecek durağan bir karar noktasının varlığı ve optimalliğini araştırmak ya da sistemi bu şekilde tasarlamaktır.

4.1.1 Mahkûmlar Çıkmazı Oyunu

Mahkûmlar çıkmazı oyunu en bilinen oyun modellerinden biridir. Oyunda belirli bir suçtan aranan iki şüpheli yakalanarak farklı odalarda sorguya çekilmektedir. Her şüpheliye yapılan teklif şu şekildedir: Kendisi işledikleri suçu itiraf eder ve arkadaşı suçlamaları reddederse kendisi serbest bırakılacak, arkadaşı ise 6 yıl hapis yatacaktır. Diğer taraftan, kendisi reddeder ve arkadaşı itiraf ederse kendisi 6 yıl yatacak arkadaşı ise serbest kalacaktır. Her ikiside itiraf ederse dörder yıl, her ikiside reddderse birer yıl hapis yatacaklardır. Oyunun matris gösterimi Tablo 4.1'de verilmektedir.

Tablo 4.1 Mahkumlar çıkmazı oyunu

1.oyuncu/2.oyuncu	**İtiraf et**	**Reddet**
İtiraf et	-4,-4	0,-6
Reddet	-6,0	-1,-1

Oyunda *1.* ve *2*. olmak üzere 2 oyuncu bulunmakta ve her oyuncunun *İtiraf et* ve *Reddet* olmak üzere iki hamlesi mevcuttur. Satırlar *1.* oyuncunun sütunlar ise *2.* oyuncunun hamlelerini, matrisin hücreleri ise yapılan hamleler sonucunda oluşan hamle profillerini göstermektedir. İlgili hamle profilini gösteren hücre içerisinde alınan fayda veya zarar değerleri sırasıyla *1.* ve *2.* oyuncu için verilmektedir. Örneğin, *1*. oyuncu *Reddet* ve *2*. oyuncu *İtiraf et* hamlelerini oynadığında oluşan

hamle profilinde *1.* oyuncunun 6 yıl ceza aldığı, *2.* oyuncunun serbest kaldığı görülmektedir.

Mahkûmlar çıkmazı oyunu, bir oyunu modellemek için gerekli olan 3 temel unsur ile matematiksel olarak $G = \{N, S_{n\in N}, U_{n\in N}\}$ biçiminde gösterilir. *N,* oyuncu kümesi olup S_n *ve* U_n sırasıyla *n.* oyuncunun hamle kümesi ve fayda değeridir. Ek olarak, oyunda oluşabilecek tüm hamle profilleri kümesi *S,* oyuncuların hamle profillerinin kartezyen çarpımı olup $S = S_1 \times S_2 \times \ldots \times S_N$ şeklinde oluşmaktadır.

Fayda her ne kadar doğrudan hapis süresi olarak verilse de bir parametrenin fonksiyonu olarak oluşabilmektedir. Mahkûmlar çıkmazı oyununda her şüpheli kişisel olarak aynı hapishane süresinden farklı etki görebilir. Bu durumda, her oyuncu girdisi zaman çıktısı ise fayda değeri olan kendi öz fayda fonksiyonuna sahip olur. Ancak oluşturulacak olan fonksiyon oyuncunun tercihlerini yansıtmalıdır. Örnek olarak, bir oyuncu mevcut *a, b* ve *c* hamle profillerini $a < b < c$ sıralaması ile oynamayı tercih edebilir. Diğer bir tabiri ile oyuncu mümkün olduğunca oyunun *c* hamle profilinde oynanmasını istemektedir. Bu durumda kullanılacak olan fayda fonksiyonu oyuncunun tercihi ile tutarlı olacak şekilde $U(c) > U(b) > U(a)$ sıralaması ile fayda üretmelidir.

Oyun teorisinde karar almak için ilk olarak diğer oyuncuların yapacağı hamle hakkında öngörü sahibi olunmalıdır. Diğer oyuncuları tanıyor olmak, tercihlerini bilmek hangi hamleleri yapacaklarını kestirmeyi kolaylaştıracaktır. Ancak bu durum her zaman mümkün olmayabilir. Diğer taraftan, oyunculara sunulan seçenekler de önemlidir. Mahkûmlar çıkmazı oyununda şüpheliler arkadaş olmasına rağmen serbest kalma düşüncesi her ikisini de itiraf etmeye teşvik eder. Ayrıca arkadaşının reddetmek yerine itiraf etmesi durumunda oyuncunun düşeceği enayi durumu ve yatacağı 6 yıl oldukça caydırıcı etki yaratmakta ve iki arkadaşın birbirine güvenmemesini sağlamaktadır. Nitekim toplamda daha az cezayı veren *(Reddet-Reddet)* yerine *(İtiraf et-İtiraf et)* hamle profilininin oynanması sonucu şüpheliler dörder yıl hapisle cezalandırılırlar. Ayrıca oyunda *(Reddet-Reddet)* profili hiçbir oyuncuyu memnun edecek bir seçenek değildir. Bunun nedeni ise arkadaşının *Reddet* oynayacağını öngören her oyuncunun *İtiraf et* oynayacak olmasıdır. Oyunda görüldüğü üzere şüphelilerin yatacağı süre hem

kemdi hem de arkadaşının kararına bağlı olarak oluşmaktadır. Bu durum, giriş kısmında da vurgulandığı gibi oyun teorisinin temelini oluşturmaktadır.

İnsanlar aldıkları kararlarda her zaman rasyonel olmayabilir, mantıksız kararlar alabilirler. Ancak bu durum bilgisayar dünyasında böyle değildir. Bilgisayarlar aldıkları kararları önceden girilen pararmetreler ve fonksiyonlar doğrultusunda alırlar. Bu bağlamda, oyun teorisinin ilk kabulü olan her karar alıcının rasyonel olduğu varsayımı yapılabilmektedir.

4.1.2 Statik Oyunlar

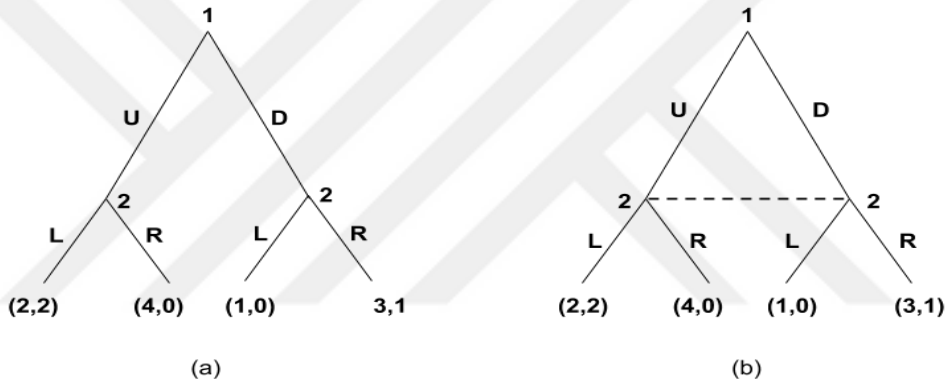
Statik oyunlarda her oyuncu 1 kez hamle yapma hakkına sahiptir. Oyuncular hamlelerini birbirlerinden bağımsız ve diğer oyuncuları gözlemlemeden yaparlar. Bu durum oyuncuların eş zamanlı veya zamanın farklı anlarında birbirlerinden yalıtımlı olarak oynamasıyla sağlanır. Statik oyunlar, matematiksel analizinin daha kolay olması sebebiyle, yaygın olarak kullanılmakta ve *normal* veya *stratejik biçim* olarak adlandırılan matris gösteriminde sunulmaktadırlar. Mahkûmlar çıkmazı oyunu statik oyun özelliği taşımaktadır. İki şüpheli de farklı odalarda birbirinden bağımsız olarak 1 kez karar vermektedir. Oyunun sunulduğu Tablo 4.1 ise stratejik biçim matrisidir.

4.1.3 Dinamik Oyunlar

Statik oyunların aksine zamanın önemli bir kavram olduğu dinamik oyunlarda, oyuncular hamlelerini zaman içerisinde belirli bir sıra veya düzende yapmaktadırlar. Oyunun her aşamasında oyuncu veya oyuncu grubu hamle yapmak üzere yetkilendirilir. Oyunun k aşamasında hamle yapacak olan oyuncular, geçmiş her aşamada oynayan oyuncuları ve oynanan hamle profillerini kendi kapasiteleri ölçüsünde gözlemleyebilirler. Oyuncular, geçmiş tecrübelerinden öğrenerek hem ilgili aşama hem de gelecek aşamalardaki faydalarını dikkate alarak yeni hamleler yapabilirler. Dinamik oyunlarda, ilgili k aşamasında hangi oyuncunun karar alacağı zamanlama mekanizmaları kullanılarak belirlenir. Bu mekanizmalar şu şekildedir:

- Sıralı: Oyunda yer alan tüm oyuncular önceden belirlenmiş bir sıra ile dönüşümlü oynarlar. N oyuncunun bulunduğu bir oyunda $n \in N$ oyuncusu $|N|$ periyoduyla hamle yapma şansı bulur.
- Rasgele zamanlama: Oyuncular sıralı olarak oynarlar. Ancak her aşamada oynayacak olan oyuncu $n = rand(N)$ şeklinde rasgele olarak belirlenir.
- Eş zamanlı olmayan: Her aşamada oynayacak olan $(n \in Y) \subset N$ oyuncu kümesi rasgele olarak belirlenir. Diğer bir açıdan, her oyuncu *k* aşamasında bir olasılık dâhilinde oynamaya karar verir.
- Eş zamanlı: Tüm oyuncular ilgili aşamada eş zamanlı oynarlar.

Dinamik oyunlar *ağaç* veya *genişleyen biçim* olarak adlandırılan biçimlerde sunulurlar (şekil 4.1).



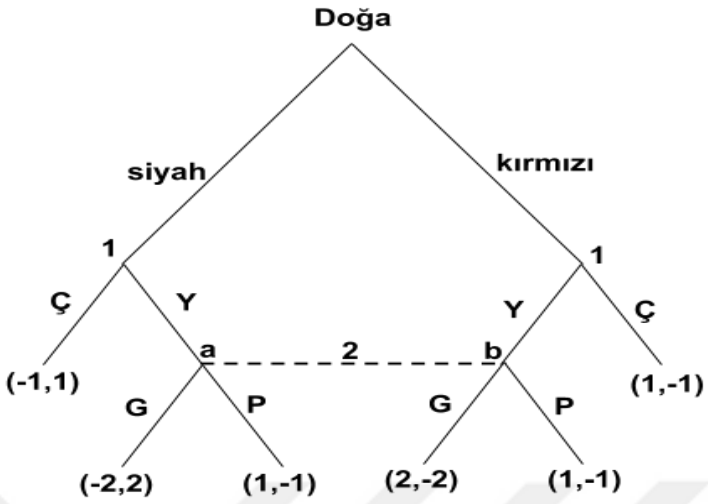
Şekil 4.1 Genişleyen biçim gösterimi

Sıralı bir oyunun genişleyen biçimde gösterildiği Şekil 4.1a'da oyuncular sırayla oynamakta ve *1*. oyuncunun hamlesi *2.* oyuncu tarafından gözlenmektedir. Ardından *2.* oyuncu karşı hamle yapmaktadır.

Şekil 4.1b'de *2.* oyuncunun karar aşamasındaki noktalı gösterim, *1.* oyuncunun yaptığı hamlenin *2.* oyuncu tarafından gözlenemediğini belirtmektedir. Bu durum *mükemmel olmayan bilgi* olarak adlandırılır. Bu açıdan bakıldığında, her statik oyun mükemmel olmayan bilgili oyundur.

Diğer bir bilgi türü ise *tam veya eksik bilgidir*. Şekil 4.2'de gösterilen Myerson kart oyununda ilk olarak bir kart çekilmekte ve *1.* oyuncu çekilen kartın rengine göre

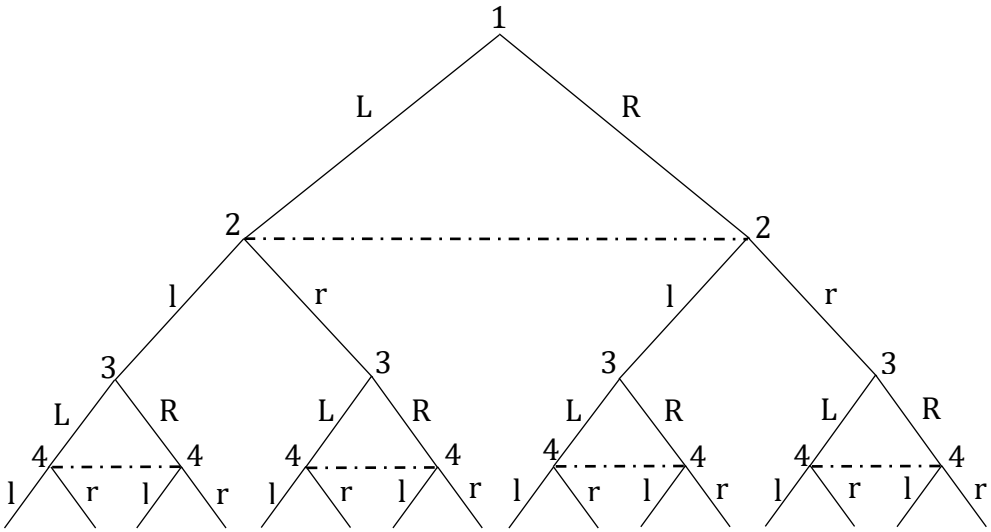
Yükselt veya *Çekil* hamlelerinden birini oynamaktadır. Ardından *2.* oyuncu karşı hamlesini oynamaktadır.



Şekil 4.2 Myerson kart oyunu

2. oyuncu çekilen kartın rengini göremediğinden karar alması için gerekli bilgi eksiktir. Eğer *1.* oyuncu yükselt hamlesini oynarsa, *2.* oyuncu bunu gözlemler ancak *a* veya *b* karar noktalarından hangisinde olduğunu bilemez. (*mükemmel ve eksik bilgili oyun)*. Görüldüğü gibi, eksik olan bu bilgi *2.* oyuncunun alacağı karar neticesinde elde edeceği faydayı etkilemektedir. Bu durumda, *2*. oyuncu kendi inanışı çerçevesinde *a* ve *b* durumlarına bir olasılık atayarak maksimum beklenen faydayı elde edeceği hamleyi oynar. Bu duruma örnek olarak, haberleşmek istenilen kanaldaki diğer cihazların sayısı, kabiliyetleri veya kapasitelerinin bilinmemesi verilebilir.

Şekil 4.3'te verilen oyun modeli ise 2 aşamadan meydana gelmektedir. İlk aşamada *1.* ve *2.* oyuncular eş zamanlı hamle yaparlar. Ardından *3*. ve *4*. oyuncular yapılan hamleleri gözlemler ve kendi hamlelerini aynı şekilde eş zamanlı olarak yaparlar. Diğer bir açıdan, iki statik oyun ardı sıra oynanmaktadır. Oyun sonunda oluşan hamle profilinde her oyuncunun faydası kendi fayda fonksiyonları ile belirlenir.



Şekil 4.3 Aşamalı oyun modeli

Bu oyun modeli çok aşamalı olarak adlandırılmakta, oyunlar *T* veya sonsuz aşamaya sahip olabilmektedirler. Sonsuz aşamadan kasıt, oyuncuların oyunun ne zaman sonlanacağını bilmemeleridir. Oyun teorisinde iki aşamadan oluşan ve *Lider&Takipçi* olarak da bilinen *Stackelberg oyunu* bu şekilde modellenmektedir. Ayrıca, Şekil 4.1a'da verilen oyun modeli her aşamada yalnız bir oyuncunun oynadığı çok aşamalı oyun gibi düşünülebilir.

Dinamik oyunların diğer bir önemli türü olan ve çok aşamalı oyunlardan türeyen *Tekrarlı oyunlar* ise mevcut bir oyunun tekrar ederek birden fazla kez oynandığı oyunlardır. Örnek olarak, Şekil 4.3'te verilen oyun periyodik olarak tekrarlanabilir. Her periyotta iki aşamalı olarak ilgili oyuncu grubu hamlelerini yaparlar. Her periyodun sonunda oyuncular oluşan hamle profiline göre fayda elde ederler. Her periyot birbirinden bağımsız oyunlardır. Ancak oyuncular geçmiş periyotları gözlemleyerek karşı oyuncuların davranışlarını analiz edebilirler. Öğrenme olarak adlandırılan bu işlem ile oyuncular, hem devam eden hem de gelecek periyotlarda karşı oyuncuların hamlelerini kestirerek maksimum faydayı elde edecekleri hamleleri oynamayı amaçlarlar. Öğrenme mekanizmaları bölüm 5'te açıklanmaktadır.

4.1.4 Karar Mekanizmaları

Diğer oyuncular tarafından yapılan hamlelere nasıl yanıt verileceğini belirleyen mekanizma veya kurallardır, $f_n: S \longrightarrow S_n$. Karar mekanizması gereğince, oyunda oynanmış olan son hamle profili dikkate alınabileceği gibi diğer oyuncuların geçmiş aşamalardaki davranışları da alınacak olan kararda etkili olabilir. Oyuncular kendi gözlem ve işlem kapasiteleri doğrultusunda mekanizmanın türünü belirlerler. Bu kısımda, oyundaki güncel hamle profilini dikkate alarak reaksiyon veren karar mekanizmaları açıklanmaktadır. Bu tür mekanizmalar ile karar alan bir oyuncu, oyundaki güncel hamle profiline "en iyi yanıtı ver" veya "daha iyi bir yanıt ver" anlayışıyla hareket eder.

4.1.4.1 En İyi Yanıt Mekanizması

Oyunda oynanmakta olan $s = (s_n, s_{-n})$ hamle profilini gözlemleyen *n.* oyuncu en iyi hamlesini, $f_n(s)$, yapar. (4.1)'de belirtildiği gibi f_n genelde tek bir çıkış verir. Ancak bazı durumlarda birden fazla en iyi yanıt mevcut olabilir. Böyle durumlarda oyuncular bir tanesini doğrudan veya rasgele oynarlar.

$$f_n(s) \in \{b_n \in S_n : U_n(b_n, s_{-n}) \geq U_n(s_n, s_{-n})\}, \quad \forall_{s_n} \in S_n \tag{4.1}$$

4.1.4.2 Daha İyi Yanıt Mekanizması

Oyuncu oynanan hamle profiline vereceği yanıtı $B_n(s)$ kümesinden seçer, $f_n(s) \in B_n(s)$. Bu küme, güncel hamle profiline yanıt olarak oynanması halinde daha yüksek fayda verecek olan hamleleri içermektedir (4.2).

$$B_n(s) = \{b_n \in S_n : U_n(b_n, s_{-n}) > U_n(s_n, s_{-n})\} \tag{4.2}$$

$B_n(s)$ kümesi içerisinden oynanacak olan hamle rasgele veya doğrudan belirlenebilir.

4.1.4.3 Rasgele Daha İyi Yanıt Mekanizması

Oyuncu hamle kümesi üzerinde düzgün veya düzgün olmayan bir olasılık dağılımı oluşturur. Her bir hamle p_k olasılığı ile seçilmektedir. Bu olasılık dâhilinde seçilen bir hamle fayda değerini artıracak olması durumunda oyuncu tarafından oynanır.

Bu mekanizma diğer mekanizmalara göre daha işlevseldir. Bunun nedeni ise diğerlerinin hamle kümesi üzerinde detaylı bir analiz gerektirmesidir.

4.1.5 İşbirliksiz Oyunlar

İşbirliksiz oyunlarda temel özellik oyuncular arasında herhangi bir bilgi paylaşımı veya organizasyonun olmamasıdır. Her ne kadar işbirliksiz oyunlar oyuncuların bencil olduğu ve diğer oyuncuların faydasını dikkate almadıkları oyunlar olarak düşünülse de önemli olan nokta, diğer oyunculara yapılan etkinin öğrenilmesi için diğer oyuncularla haberleşme içinde olunmaması veya bu bilginin kestirim veya geçmişteki tecrübelerden öğrenerek elde edilmeye çalışılmasıdır. Mahkûmlar çıkmazı oyunu işbirliksiz oyunlara örnektir. Şüpheliler arasında yakalanmadan önce veya sorgu sırasında herhangi bir bilgi alışverişi veya anlaşma yapılmamaktadır.

Haberleşme sistemleri açısından bakıldığında, kaynakların herhangi bir bilgi paylaşımı için ayrılması sınırlı kaynaklara sahip olan kablosuz ağlarda istenmeyecek bir durumdur. Bu açıdan, işbirliksiz ağlar modern kablosuz haberleşme sistemleri için oldukça önem arz etmekte ve yapılan çalışmalarda ön plana çıkmaktadır. Diğer taraftan, haberleşme kanallarının dinamik ve kalabalık olduğu düşünüldüğünde, bir oyuncunun hamle sonucunda diğer oyunculara olan etkisini kendi kendine öğrenmesi veya kestirmesi zor ve üzerinde çalışılması gereken bir konudur.

4.1.6 İşbirlikli Oyunlar

İşbirliksiz oyunlardaki durumun aksine oyuncular arasında haberleşme ve bilgi aktarımı mevcuttur. Oyuncular yapılan hamle ve görülen etkiyi birbirleri ile paylaşarak optimum ve adaletli bir çalışma noktasını yakalamaya çalışırlar. Haberleşme sistemlerinde bu durum belirli bir spektrumun haberleşme kanalı olarak atanmasıyla veya belirli anlaşmalar çerçevesinde hareket edilerek yapılabilir. Her ne kadar işbirliksiz ağlara göre optimum veya yakın sonuçlar üretse de, oyuncular arasındaki koordinasyon sistemin sabit bir karar noktası üretmesini geciktirmekte, yoğun ve dinamik ağlarda bu çözümler yavaş kalabilmektedir. Diğer taraftan, optimizasyon merkezi bir otorite tarafından

sağlanabilir. Ancak geniş ağların tek merkezden yönetilmesi oldukça karmaşık işlem yükü yaratmaktadır.

4.2 Strateji ve Denge Noktası Kavramları

Hamle doğrudan fiziksel ortama yapılan etkiler iken strateji bu etkilerin hangi durumlarda ve ne sıklıkla yapılacağının belirlendiği planlamalardır. Strateji belirli bigiler ışığında koşan bir program, hamle ise programın çıktısı olarak tanımlanabilir. Örneğin, geziye gitmeyi planlayan bir kişinin giyebileceği iki farklı elbisesi mevcut ise bu elbiselerden birinin seçilip giyilmesi hamledir. Ancak giyilecek olan elbiseye hava durumu ve ortam bilgisine göre karar vermek stratejidir. Yaptığımız stratejiler çerçevesinde, mevcut hamleler doğrudan seçilebilir veya belirli bir sıklık ve düzende oynanabilir.

Oynanan hamleler sonucunda oluşan hamle profillerinde elde edilen fayda değerleri her oyuncu için tatmin edici olmayabilir. Oyuncu mevcut hamlesini değiştirerek veya hamlelerini farklı bir strateji ile oynayarak daha yüksek fayda elde etmeyi amaçlayabilir. Ancak bu değişiklik diğer oyuncuların fayda değerlerini etkileyerek onların da mevcut hamle veya stratejisini güncellemesine neden olur ve bu durum ardışık olarak devam eder. Bu durumda herkesin memnun kalacağı, farklı bir hamle veya strateji güderek daha yüksek fayda elde edemeyeceği kararlı bir denge noktasının varlığı önem arz etmektedir. Ek olarak, ulaşılan denge noktası optimum çalışma noktası olmayabilir veya birden fazla denge noktasının varlığı söz konusu olabilir. Böyle durumlarda oyun, denge noktası optimum veya optimuma yakın olacak şekilde tasarlanmalı; birden fazla denge noktasının varlığında ise optimum olan denge noktasında oynanmaya zorlanmalıdır**.**

Oyun teorisinde 3 tür strateji mevcuttur: Pür (pure), karma (mixed) ve baskın (dominant) strateji. Bu stratejilerin oynanması ile elde edilen denge noktaları da (equilibrium point) pür strateji Nash dengesi, karma strateji Nash dengesi ve baskın strateji denge noktası olarak adlandırılır.

4.2.1 Pür Strateji ve Nash Dengesi

Pür (pure) strateji güden bir oyuncu diğer oyuncuların yapacağı hamleler hakkındaki öngörüsü çerçevesinde hamle kümesinden bir hamleyi doğrudan 100%

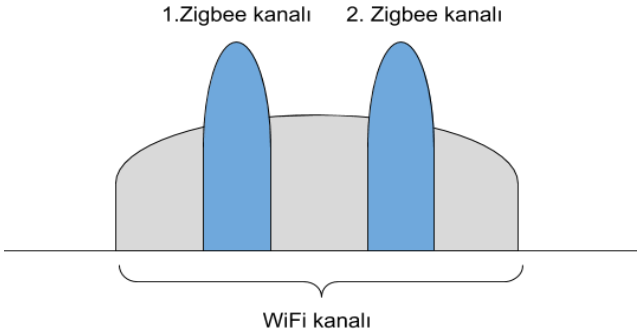
olasılıkla seçmektedir. Diğer bir tabirle, oyuncu mevcut hamlelerini belirli bir sıklık ile gerçekleşecek şekilde uzun vadeli planlamamakta, kararlarını doğrudan ilgili karar noktası için almaktadır. Nash dengesi [48] ise adını bu kavramı bulan matematik profesörü *John Nash*'den almıştır ve hiçbir oyuncunun mevcut stratejisini değiştirerek fayda değerini yükseltemediği strateji profillerini tanımlamaktadır. Verilen bilgiler ışığında *pür strateji Nash dengesi* şu sekilde tanımlanır.

Tanım 2.1. Tüm oyuncuların hamlelerini pür strateji güderek oynadıkları bir oyunda, hiçbir oyuncunun hamlesini değiştirmek suretiyle daha yüksek fayda elde edemediği strateji profili *pür strateji Nash dengesi* olarak adlandırılır ve matematiksel olarak (4.3)'teki gibi tanımlanır.

$$U_n(s_n^*, s_{-n}^*) \geq U_n(s_n, s_{-n}^*), \quad s^* = (s_n^*, s_{-n}^*), \quad \forall_{s_n} \in S_n, \quad \forall_n \in N, \quad s^* \in S \tag{4.3}$$

Denklemde verilen s_n^*, Nash dengesinin oluştuğu s^* hamle profilinde *n.* oyucunun hamlesini, s_{-n}^* ise ilgili profilde *n.* oyuncu dışındaki tüm oyuncuların oluşturduğu hamle profillini belirtmektedir. Denklemde görüldüğü gibi, *n.* oyuncu s_n^* hamlesinden vazgeçerek oynadığı hiçbir s_n hamlesi ile Nash dengesi profilinde elde ettiği faydayı artıramamaktadır.

Şekil 4.4'te kablosuz olarak haberleşmek isteyen iki cihazın seçtikleri standarda göre farklı veri hızı elde ettikleri *arayüz seçme oyunu* gösterilmektedir.



Şekil 4.4 Arayüz seçme oyunu

Her iki cihaz geniş kanallarda yüksek güç ile haberleşen *Wi-Fi* ve düşük kanal genişliğinde düşük güç ile haberleşen *ZigBee* standartlarını desteklemektedir. Tablo 4.2'de stratejik biçimi verilen oyunda cihazlardan biri Wi-Fi arayüzü ile

haberleşir diğeri ZigBee arayüzünü seçerse, Wi-Fi cihazı 21 Mb/sn hızlara erişirken ZigBee cihazına yüksek girişim uygular ve 3.2 Mb/sn hızla haberleşmesini sağlar. Her iki cihaz ZigBee arayüzünü seçmeleri durumunda Şekil 4.4'te görüldüğü gibi boş kanallarda haberleşmeyi tercih eder. Bu durumda, girişim oluşmayacağı için 9.6 Mb/sn hızlara ulaşırlar. Diğer taraftan cihazlar Wi-Fi arayüzünü seçerlerse, oluşan karşılıklı yüksek girişimden dolayı her ikisi de 7 Mb/sn hız ile haberleşir.

Tablo 4.2 Arayüz seçme oyunu stratejik biçim matrisi

1.oyuncu/2.oyuncu	**Wi-Fi**	**ZigBee**
Wi-Fi	(7), (7)	(21), (3.2)
ZigBee	(3.2), (21)	(9.6), (9.6)

Oyunda *(Wi-Fi*, *Wi-Fi)* hamle profili pür strateji Nash dengesi noktasıdır. Hiçbir oyuncu mevcut haberleşme arayüzünü *ZigBee* ile değiştirerek daha yüksek veri hızı elde edememektedir.

4.2.2 Karma Strateji ve Nash Dengesi

Oyuncular pür strateji oynayarak her hamleyi doğrudan seçmek yerine hamlelerini bir olasılık dâhilinde oynamayı tercih edebilirler. Böylece oyuncular hamlelerini belirli bir sıklık ile oynamayı planlamış olur ve bu stratejiye *karma (mixed) strateji* adı verilir. Yukarıda verilen örnekte bir oyuncu Wi-Fi ve ZigBee arayüzlerini $^1/_2$ olasılıkla oynamayı tercih edebilir. Diğer bir tabirle, oyuncuya *k* sefer karar hakkı tanındığında iki hamleyi de $^k/_2$ kez oynayacak şekilde strateji yapmaktadır. Karma strateji oynayan *n.* oyuncunun stratejisi (4.4)'te verildiği gibi S_n hamle kümesi üzerinde olasılık yoğunluk dağılımıdır.

$$\alpha_n = \{p_1, p_2, \dots p_{|S_n|}\}, \qquad \sum_{k=1}^{K=|S_n|} (p_k) = 1 \tag{4.4}$$

Karma stratejide p_k, *k.* pür hamleye atanan olasılık değeridir. Diğer bir açıdan bakıldığında ise herhangi bir hamleye 1 olasılık atamak pür strateji oynamak

anlamına gelmektedir. Her oyuncu karma stratejisini oynadığında oluşan $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, .., \alpha_N)$ karma strateji profilinde, oyundaki S hamle kümesi üzerinde olasılık dağılımı elde edilir. Bu durumda *n.* oyuncunun elde ettiği beklenen fayda değeri (4.5)'te verildiği gibi hesaplanır.

$$U_n(\alpha) = \sum_{s=1, s \in S}^{S} \left(\prod_{j=1}^{N} \alpha_J(s_j) \right) U(s), \quad s = (s_n, s_{-n}) \tag{4.5}$$

Denklemde verilen s_j, ilgili $s \in S$ hamle profilinde *j.* oyuncunun oynadığı hamle olup $\alpha_J(s_j)$ oyuncunun s_j hamlesine atadığı olasılık değeridir. Bu nedenle, *s* hamle profilinin oynanma olasılığı $p(s)$, her oyuncunun *s* profilinde oynayacağı hamleye atadığı $\alpha_J(s_j)$ olasılık değerlerinin çarpımıdır. $U_n(s_n, s_{-n})$ ise *n.* oyuncunun *s* profilinde elde ettiği beklenen fayda değeridir. Örnek olarak; arayüz seçme oyununda her iki oyuncunun da Wi-Fi ve ZigBee hamlelerini $1/2$ olasılıkla oynadıkları düşünüldüğünde her bir hamle profilinin oynanma olasılığı $1/4$ olmaktadır. Bu durumda *1.* oyuncunun beklenen fayda değeri (4.6)'daki gibi hesaplanır.

$$\sum_{s=1}^{S} p(s) * U_1(s) = \frac{1}{4}(7 + 21 + 3.2 + 9.6) = 10.2 \ Mb/sn \tag{4.6}$$

Tanım 2.2. Tüm oyuncuların karma strateji oynadığı bir oyunda hiçbir oyuncunun daha yüksek beklenen fayda elde edemeyeceği karma strateji profili α^* *karma strateji Nash dengesidir*. Diğer bir açıdan, denge noktasında hiçbir oyuncu karma stratejisini değiştirmek suretiyle *S* olası hamle profili kümesi üzerinde oluşacak yeni olasılık dağılımı ile beklenen faydasını artıramamaktadır. Bu denge şartı matematiksel olarak (4.7) ile gösterilmektedir.

$$U_n(\alpha_n^*, \alpha_{-n}^*) \geq U_n(\alpha_n, \alpha_{-n}^*), \quad \alpha^* = (\alpha_n^*, \alpha_{-n}^*), \quad \forall_{\alpha_n} \in \sum_n \tag{4.7}$$

4.2.3 Baskın Strateji Denge Noktası

Bazı oyunlarda karşı oyuncuların hamlelerinden bağımsız olarak oyuncular kendi hamleleri arasında rasyonel bir tercihte bulunabilirler. Bu durumda oyuncular,

baskın (dominat) strateji olarak adlandırılan stratejiyi güderek her durumda bir diğer hamleye göre daha düşük fayda veren hamleleri elerler. Böylece muhtemel hamle profilleri azalan oyun daha kolay analiz edilebilir, hatta oyunun denge noktası doğrudan elde edilebilir.

Tanım 2.3. Karşı oyuncuların davranışlarından bağımsız olarak bir diğer hamleye göre her zaman daha yüksek fayda veren hamlelere *mutlak baskın (strictly dominant) hamleler* denir. Bir s_n hamlesinin diğer s_n' hamlesine zayıf baskınlık şartı (4.8) ile gösterilir.

$$U_n(s_n, s_{-n}) > U(s_n', s_{-n}) \quad s_n, s_n' \in S_n \ , \forall_{s_{-n}} \in S_{-n} \tag{4.8}$$

Tanım 2.4. Karşı oyuncuların hamlelerine bağlı olarak bir diğer hamleye göre eşit veya yüksek fayda sağlayan hamleler *zayıf baskın (weakly dominant) hamlelerdir*. Bir s_n hamlesinin diğer s_n' hamlesine zayıf baskınlık şartı (4.9) ile gösterilir.

$$U_n(s_n, s_{-n}) \geq U_n(s_n', s_{-n}) \quad s_n, s_n' \in S_n \ , \forall_{s_{-n}} \in S_{-n} \tag{4.9}$$

Tanım 2.5. Tüm oyuncuların baskın strateji uygulaması ile doğrudan ulaşılan denge noktasına *baskın strateji denge noktası* denir.

Tablo 4.3 Mutlak baskın stratejili bir oyunun stratejik biçim matrisi

1.oyuncu/2.oyuncu	**L**	**R**
L	5,1	4,2
R	3,1	3,2
U	2,1	4,2
D	4,3	5,4

Tablo 4.3'te matris gösterimi verilen oyun mutlak baskın stratejilerin yer aldığı bir oyundur. Oyunda *2*. oyuncu için *R* hamlesi, *1*. oyuncunun her hamlesi için L'ye mutlak baskındır. *1.* oyuncu için *L* hamlesi *R*'ye, *D* ise *U*'ya mutlak baskındır. Baskılanan hamleler oyundan çıkarıldığında oyun Tablo 4.4'te verilen biçime dönüşür.

Tablo 4.4 Baskılanan hamleleri çıkarılmış bir oyunun stratejik biçim matrisi

1.oyuncu/2.oyuncu	**R**
L	4,2
D	5,4

Elde edilen yeni oyun profilinde ise *1.* oyuncu için *D* hamlesinin *L*'ye mutlak baskın olduğu görülmektedir. Bu durumda *(D,R)* profili mutlak baskın strateji denge noktası olarak elde edilmektedir. Diğer taraftan, *2*. oyuncu için *R* hamlesinin baskın olduğu *1*. oyuncu tarafından da gözlemlenmektedir. Bu durumda *2.* oyuncunun *R* oynayacağını bilen *1.* oyuncu için *D* hamlesi diğer tüm hamlelere mutlak baskındır. Böylece, *(D,R)* profili doğrudan baskın strateji denge noktası olarak analiz edilebilmektedir.

Mutlak baskın stratejinin var olduğu oyunlarda, hamlelerin elenme sırası oluşan denge noktasını değiştirmez. Diğer bir tabiri ile baskın strateji denge noktası özgün ve tektir. Ancak zayıf baskın strateji ile ulaşılan denge noktası hamlelerin elenme sırasına bağlı olarak değişebilmektedir.

4.3 Bağdaşık Denge

Karma strateji oynayan oyuncular hamlelerini birbirlerinden bağımsız olarak rassallaştırırlar. Bağdaşık dengede (correlated equilibrium) ise karma stratejinin aksine oyunculara hamle profillerini belirli bir *Z* olasılık dağılımına göre oynatan mekanizmanın varlığı esas alınır. Oyuncular, ilgili aşamada oynanacak olan hamle profili ve ilgili profilde oynaması gereken hamle hakkında mekanizma tarafından bilgilendirilir. Mekanizmalar matematiksel olarak $(\Omega, \{H\}, Z)$ üçlü bilgi yapısı ile gösterilir. Bu yapı; Ω durum uzayı, *H* bigi boyutu ve *Z* olasılık dağılımından oluşur. Bu parametreler, mekanizmanın trafik lambası olduğu bir örnekte aşağıdaki gibi açıklanabilir:

- Durum uzayı (Ω): Mekanizmanın olası çıkış kümesidir ve ortak bilgi olarak her oyuncu tarafından bilinmektedir. Verilen örnekte durum uzayı Ω=(Yeşil, Sarı, Kırmızı) şeklindedir. Her bir çıktı oyunculara ilgili aşamada oynanacak olan hamle profilini belirtmektedir.

- Bilginin boyutu (H): Oyuncuların mekanizmanın çıktısı hakkında nasıl bilgilendirileceğini gösteren kümedir. Her oyuncunun bilgi boyutu ortak bilgidir. Mekanizmanın olası çıktısı hakkında *n*. oyuncu $H_n = \{(Y), (S), (K)\}$ şeklinde tam veya $H_n = \{(Y, S), (K)\}$ şeklinde kısmi olarak bilgilendirilebilir. Kısmi bilgi kümesinde, yeşil ve sarı ışıklarda *n.* oyuncu, *yeşil veya sarı ışık yandı* şeklinde bilgilendirilmiş olur. Diğer taraftan, oyuncuların mekanizma tarafından bilgilendirilmediği durumlar ise her oyuncunun bağımsız olarak oynadığı pür veya karma strateji ile eşdeğer olup oyunda oluşabilecek denge noktaları sadece Nash denge noktalarıdır.
- Olasılık kümesi (Z): Hamle profillerinin mekanizma tarafından oynanma olasılık dağılımıdır. Her oyuncu için ortak bilgidir.

Mekanizma tarafından önerilen hamleyi oynamak oyuncunun kararıdır. Her oyuncu mekanizma tarafından önerilen hamleden cayması halinde oynayabileceği her bir hamle için elde edeceği marjinal beklenen faydasını hesaplar. Ancak oyuncunun önerilen hamle profilini terketmesi durumunda daha düşük bir beklenen fayda elde edecek olması, bağdaşık denge noktasının temel şartıdır.

Tanım 3.1. Her oyuncu için mekanizma tarafından önerilen hamle ile elde edilecek beklenen fayda, mevcut diğer hamlelerden elde edilebilecek marjinal beklenen fayda değerinden büyük veya eşit ise her oyuncu mekanizmanın önerisini oynamayı tercih eder ve *bağdaşık denge* sağlanmış olur. Bağdaşık denge şartı matematiksel olarak (4.10)'da gösterilmektedir.

$$\sum_{s_{-n} \in S_{-n}} U_n(s_n^*, s_{-n}) z^{S_{-n}} \geq \sum_{s_{-n} \in S_{-n}} U_n(s_n, s_{-n}) z^{S_{-n}} \quad s_n, s_n^* \in S_n \tag{4.10}$$

Denklemde verilen $z^{(S_{-n})}$, mekanizmanın s_n^* hamlesini önermesi halinde diğer oyuncuların oynayabileceği $s_{-n} \in S_{-n}$ hamle profilinin şartlı olasılık değeridir. Denklemde görüldüğü gibi, *n.* oyuncu hiçbir s_n hamlesini oynayarak mekanizma tarafından önerilen s_n^* hamlesinden daha fazla beklenen fayda elde edememektedir.

Tablo 4.5'te *Hawk-Dove* oyununun matris gösterimi verilmektedir. Oyunda *(Hawk, Hawk)* ve *(Dove, Dove)* olmak üzere iki pür strateji Nash dengesi ve her oyuncunun

hamlelerini $\alpha_n = (1/2, 1/2)$ dağılımı ile eşit olasılıkla oynadığı bir karma strateji Nash dengesi mevcuttur. Karma strateji sonucu her iki oyuncu da 2.5 fayda elde etmektedir.

Tablo 4.5 Hawk-Dove oyunu stratejik biçim matrisi

1.oyuncu/2.oyuncu	**Hawk**	**Dove**
Hawk	5,1	0,0
Dove	4,4	1,5

Oyuncular hamlelerini birbirlerinden bağımsız şekilde yapmak yerine bir mekanizma ya da gözlemlenebilir bir bilgi sinyali ile önerilen profilleri oynamayı tercih edebilirler. Örneğin, mekanizma $1/2$ olasılıkla yazı veya tura sonucu veren bir para atışı olabilir. Oyuncular, yazı tura atışının sonucunu gözlemleyerek, sonuç yazı ise *(Hawk, Hawk)*, tura ise *(Dove, Dove)* profilini oynayacakları konusunda anlaşırlar. Bu durumda, hamle profillerinin oynanma olasılığı Tablo 4.6'da verilmektedir.

Tablo 4.6 Hawk-Dove oyunu hamle profili olasılık dağılımı-1

1.oyuncu/2.oyuncu	**Hawk**	**Dove**
Hawk	$1/2$	0
Dove	0	$1/2$

Tabloda görüldüğü gibi, mekanizma sadece pür Nash denge profillerini önerdiği için hiçbir oyuncu önerilen profilden cayamamaktadır. Mekanizmanın önerilerinin takip edilmesi halinde her oyuncu için ortalama fayda değeri ise (4.11)'deki gibi hesaplanır. Elde edilen ortalama fayda neticesine bakıldığında, oyuncuların bağdaşık denge noktasında pür stratejiye göre daha adil, karma stratejiye göre ise daha yüksek fayda elde ettiği anlaşılmaktadır.

$$U_n = 1/2 * 5 + 1/2 * 1 = 3 \qquad (4.11)$$

Hawk-Dove oyununda diğer bir bağıntılı denge noktası ise Tablo 4.7'de verilen olasılık dağılımıdır. İlk oyunun aksine durum uzayında *Ω=(A,B,C)* olmak üzere 3 durum mevcuttur.

Tablo 4.7 Hawk oyunu hamle profili olasılık dağılımı-2

1.oyuncu/2.oyuncu	**Hawk**	**Dove**
Hawk	$^1/_3$	0
Dove	$^1/_3$	$^1/_3$

İki oyuncunun bilgi boyutu ve oyundaki olasılık dağılımı Tablo 4.8'de verilmektedir.

Tablo 4.8 Hawk-Dove oyunu bilgi yapısı

Durum uzayı	*A=(H,H), B=(D,H), C=(D,D)*	
Olasılık dağılımı	$Z = \{A = {}^1/_3, B = {}^1/_3, C = {}^1/_3\}$	
Bilgi boyutu	$H_1 = \{(A), (B, C)\}$	$H_2 = \{(C), (A, B)\}$

Bu oyunda dikkat edilmesi gereken durum, *(Dove, Dove)* profilinin önerilmesi halinde oyuncuların bu profilden cayarak daha yüksek fayda verecek olan *Hawk* hamlesini oynayacak olmalarıdır. Oyuncuların önerilen profile uymasını sağlamak için eksik bilgiden faydalanılmaktadır. Cihaz, *1.* oyuncuyu *A* durumu için tam bilgi ile bilgilendirmekte ancak *B* ve *C* durumlarından herhangi biri gerçekleştiğinde sadece "*B veya C*" bilgisini iletmektedir. Ayrıca *1*. oyuncuya *A* durumunda *Hawk*, *(B,C)* bilgisi için ise *Dove* oynaması önerisini yapmaktadır. *2.* oyuncu ise *C* durumunda tam bilgili, *A* ve *B* durumlarında "*A* veya *B*" şeklinde bilgilendirilmektedir. *2.* oyuncuya *C* durumunda *Dove, (A,B)* bilgisinde ise *Hawk* oynaması önerilmektedir.

1. oyuncu, *(B,C)* durumu ile bilgilendirdiğinde *2*. oyuncunun *(A,B)* ve *C* durumlarından hangisiyle bilgilendirildiğini çözemez. Bu durumda, *1.* oyuncuya

göre *2.* oyuncu $^1/_2$ olasılıkla *Hawk* veya *Dove* oynayacaktır. Böylece *1.* oyuncunun her bir hamle için beklenen fayda değerleri (4.12) ve (4.13)'te hesaplanmaktadır.

$$U_1(Hawk) = {}^1/_2 * 5 + {}^1/_2 * 0 = 2.5 \tag{4.12}$$

$$U_1(Dove) = {}^1/_2 * 4 + {}^1/_2 * 1 = 2.5 \tag{4.13}$$

Denklemlerde görüldüğü gibi, *1.* oyuncu hamlesini *Dove* olarak değiştirerek fayda değerini artıramamaktadır ve cihazın önerisini oynamak zorundadır. Bu durum, *2.* oyuncu için de aynı şekilde oluşmaktadır. Oyun sonucunda her bir oyuncunun aldığı ortalama fayda (4.14)'teki gibi hesaplanır.

$$U_n = {}^1/_3 * 5 + {}^1/_3 * 4 + {}^1/_3 * 1 = {}^{10}/_3. \tag{4.14}$$

Görüldüğü gibi, pür strateji Nash dengesi olmayan hamle profilleri bağdaşık denge dâhilinde belirli bir olasılık ile oynanmaktadır. Böylece oyuncuların ortalama faydası artırılmaktadır.

Bağdaşık denge noktalarında elde edilebilecek fayda değerleri, oyundaki Nash denge noktalarında elde edilen fayda değerlerinin konveks birleşimi üzerindedir. Verilen ilk *Hawk-Dove* oyunu örneğinde (Tablo 4.6), bağdaşık denge noktası sonucu oluşan fayda değeri, iki pür Nash denge noktasının karmaşık kombinasyonu olup yine konveks birleşimi üzerinde oluşmaktadır. Ancak bilginin özel veya belirsiz olduğu oyunlarda (Tablo 4.7), elde edilebilecek fayda değerleri oyundaki Nash denge noktalarında elde edilen fayda değerlerinin konveks birleşimi üzerinde oluşmamaktadır.

4.4 Kaba Bağdaşık Denge

Bağdaşık denge noktasının sağlanmasında mekanizma tarafından yapılan önerilere oyuncular tarafından riayet edilmesi esas alınmaktadır. *Kaba bağdaşık denge (coarse correlated equilibrium)* noktasında ise oyuncular mekanizmanın önereceği hamleyi henüz öneri yapılmadan kabul etmektedirler. Her oyuncu mekanizmanın hamle profili kümesi üzerine atadığı olasılık dağılımı *Z* bilgisine sahiptir. Diğer bir

açıdan, her oyuncu mekanizmanın hamle profillerini hangi olasılıkla oynattığını bilmektedir. Bu bilgi ile oyuncular, mekanizma önerisini yapmadan önce hamle kümesindeki herhangi bir s_n hamlesini oynaması halinde elde edeceği beklenen faydasını hesaplar. Her oyuncu için belirli bir hamleyi oynamak, mekanizmanın sunabileceği herhangi bir öneriyi oynamaktan daha büyük fayda vermediği durumda mekanizmanın önerisi uygulanır. Böylece kaba bağdaşık denge sağlanmış olur.

Tanım 4.1. Her oyuncunun mekanizmanın oynatacağı olası hamle profilinden cayarak daha yüksek ortalama fayda sağlayamadığı hamle profili olasılık dağılımı *Z, kaba bağdaşık denge noktası* olarak adlandırılır ve matematiksel olarak (4.15) ile tanımlanır.

$$\sum_{s \in S} U_i(s)\, z^s \geq \sum_{s_{-n} \in S_{-n}} U_n(s_n, s_{-n}) z_{-n}^{s_{-n}}, \quad s_n' \in S_n \tag{4.15}$$

Denklemde verilen $z_{-n}^{s_{-n}}$, diğer oyuncuların oynayabileceği herhangi bir $s_{-n} \in S_{-n}$ hamle profilinin marjinal oynanma olasılığıdır.

Yukarıda belirtilen mekanizmalar kablosuz haberleşme sistemlerinde baz istasyonları veya erişim noktaları olabilirler. Bu cihazlarda koşan algoritmalar hamle profillerini bir olasılık dâhilinde oynatarak oyuncuları hangi hamleyi yapacakları konusunda yönlendirebilir. Ayrıca öğrenme algoritmaları son kullanıcı cihazlarda koşturularak bağdaşık veya kaba bağdaşık denge noktası dağıtık olarak elde edilebilir.

4.5 Nash Dengesinin Varlığı

Oyun teorisinde oyunun modellenmesi ve analizinde en önemli husus oyunda bir denge noktasının varlığıdır. Modellenecek olan bir sistemde (oyun), belirli bir karar denge noktasının olması sistemin durağan olarak çalışabilmesi açısından gereklidir. Daha önce belirtildiği gibi, denge noktası pür bir hamle profili olabileceği gibi belirli hamle profillerinin belirli bir olasılıkla oynanması şeklinde de olabilmektedir. Diğer taraftan, pratikte sistemler pür olarak tek bir hamle profilinde dengeye gelmeyi tercih ederler. Bu açıdan oyunda ilk olarak pür Nash

dengesinin var olması istenir. Ancak bu durum her oyun modeli için mümkün olmamakla beraber, oyunda pür Nash dengesinin varlığı oyuncuların hamle kümeleri ve fayda fonksiyonlarının yapısına bağlıdır [49].

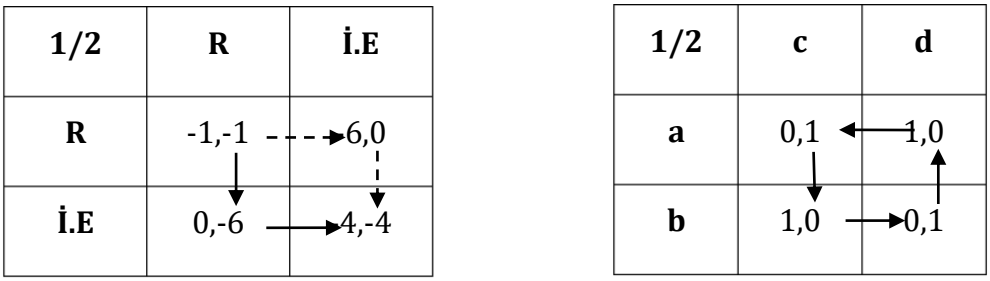
Oyun teorisinde, *sonlu geliştirme özelliği (Finite Improvement Property, FIP)* olarak adlandırılan ve oyunlarda pür Nash dengesinin varlığını garanti eden bir özellik mevcuttur [50]**.** Oyun teorisinin özel oyun modellerinden olan *potansiyel oyunlar,* bu özelliği sağlamaları yönüyle her alanda olduğu gibi haberleşme mühendisliğinde de oldukça ilgi çekmekte ve üzerinde çalışılmaktadır [22], [51]. FIP ve potansiyel oyunlar arasındaki ilişki ortaya koyulmadan önce bazı terimlerin anlaşılması gerekmektedir.

- Sonlu Hamle Hattı: $G = \{N, S, U_{n\in N}\}$ ile gösterilen *sıralı* bir oyunda, oyuncuların belirli bir sıra düzeninde karar almaları sonucu oynanan hamle profillerinin zaman içerisindeki gelişimini gösteren desendir. Her karar aşamasında yalnızca bir oyuncu hamlesini güncellemektedir. Oyunda $\gamma = s^0, s^1, s^k, \ldots, s^m$ ile gösterilen hat üzerinde s^0 başlangıç hamle profili, s^m ise sonlanma hamle profilidir. s^k, oyuncular tarafından *k.* aşamada oynanan hamle profilini göstermektedir. (4.16)'da gösterildiği gibi, *k.* ve *(k-1).* aşamalarda oynanan s^k ve s^{k-1} hamle profilleri yalnızca *k*. aşamada karar alan *n.* oyuncunun hamlesi doğrultusunda farklılaşırlar.

$$s^k = (s_n', s_{-n}), \quad s^{k-1} = (s_n, s_{-n}), \quad \forall_{s_n \neq s_n'} \in S_n, \forall_{s_{-n}} \in S_{-n} \tag{4.16}$$

- Geliştirme Hattı**:** Karar alan her oyuncunun, mevcut hamle profiline daha iyi yanıt dinamiğini kullanarak (deterministik veya rasgele) reaksiyon verdiği hamle hattıdır. Bu nedenle, (4.17) ile belirtildiği gibi hamle hattı boyunca her oyuncu faydasını artırıcı yönde karar almaktadır. Mahkûmlar çıkmazı oyunu, biri düz çizgili diğeri ise kesikli çizgili oklarla gösterilen iki farklı sonlu geliştirme hattı içermektedir (Şekil 4.5a).

$$U_n(s^k) > U_n(s^{k-1}) \qquad \forall_{s^k \neq s^{k-1}} \in S \tag{4.17}$$



a- Döngüsel olmayan oyun b-Döngü

Şekil 4.5 Döngüsel ve döngüsel olmayan oyun modelleri

- Döngü: Her γ geliştirme hattı, s^0 başlangıç noktası ve s^m sonlanma karar noktası ile sonlu olarak modellenememektedir**.** Geliştirme hattı üzerindeki bir hamle profilinin tekrarlanması suretiyle karar alma süreci döngüye girebilmektedir (Şekil 4.5b). Döngülerde, (4.18)'de verildiği gibi başlangıç ve sonlanma terminalleri aynı olmaktadır.

$$\gamma = s^0, s^1, s^k, \ldots, s^0 \tag{4.18}$$

4.5.1 Sonlu Geliştirme Özelliği

Oyundaki hiçbir geliştirme hattının döngüye girmediği ve tümünün bir başlangıç ve bitiş hamle profili ile tanımlanabildiği durumlardır. Bir geliştirme hattının s^m hamle profili ile sonlanıyor olması, (4.19)'da verildiği gibi ilgili profilde hiçbir oyuncunun faydasını artıracak bir hamleye sahip olmadığı anlamına gelmektedir.

$$U_n(s_n^m, s_{-n}^m) \geq U_n(s_n', s_{-n}^m) \quad \forall_{s_n^m, s_n' \in} S_n\,, \ \forall_{n \in} N \tag{4.19}$$

Bu durumda, s^m hamle profili pür Nash dengesi olarak oluşmaktadır. Böylece FIP'ye sahip oyunlarda şu çıkarım yapılabilir:

Teorem 5.1. FIP özelliği taşıyan oyunlarda en az bir pür Nash dengesi mevcuttur.

4.5.2 Potansiyel Oyunlar

Potansiyel oyunlar, mevcut hamlesini değiştiren bir oyuncunun fayda değerinde oluşan değişimin miktarını veya eğilimini yansıtan bir fonsiyonun tanımlanabildiği oyunlardır [52]. Fonksiyon, her bir hamle profiline karşılık gerçek bir sayı üretmektedir, $\Theta: S \longrightarrow \mathbb{R}$.

Fayda değişiminin miktarını doğrudan yansıtan oyunlar *tam potansiyel oyunlar (exact potential game)* olarak adlandırılmaktadır. (4.20)'de görüldüğü gibi, diğer oyuncuların hamlelerini sabit tuttuğu varsayılarak *n.* oyuncunun s_n' hamlesini s_n hamlesine tercih etmesi sonucu elde ettiği fayda değişimi, girdisi aynı hamle profilleri olan bir fonksiyonun sonucundaki değişim ile eşdeğerdir (4.20).

$$U_n(s_n', s_{-n}) - U_n(s_n, s_{-n}) = \Theta(s_n', s_{-n}) - \Theta(s_n, s_{-n}), \quad \forall_{s_n \neq s_n'} \in S_n \tag{4.20}$$

Şekil 4.6'da stratejik biçimi ve örnek bir potansiyel fonksiyon değer tablosu verilen mahkûmlar çıkmazı oyunu (4.20)'de verilen ilişkiyi yansıtmaktadır.

1/2	**R**	**İ.E**
R	-1,-1	-6,0
İ.E	0,-6	-4,-4

a-Stratejik biçim

1/2	**R**	**İ.E**
R	1	2
İ.E	2	4

b-Potansiyel fonksiyon

Şekil 4.6 Fayda ve potansiyel fonksiyon ilişkisi

1. oyuncu *itiraf et* hamlesini oynayarak oyunu *(R, R)* hamle profilinden *(İ.E,R)* hamle profiline taşıdığında elde ettiği fayda artış miktarı potansiyel fonksiyonun davranışında da gözlemlenmektedir (4.21). Fayda artış miktarını doğrudan yansıtmasından dolayı verilen oyun tam potansiyel oyundur.

$$U_1(R, R) - U_1(I.E, R) = \Theta(R, R) - \Theta(I.E, R) = +1 \tag{4.21}$$

Diğer taraftan, (4.22)'de verildiği gibi, oyuncuların fayda değişiminin sadece eğilimini yansıtan potansiyel fonksiyonlar da mevcuttur. Bu tür fonksiyonları ihtiva eden oyunlar *sıradan potansiyel oyunlar (ordinal potential game)* olarak adlandırılırlar. Bu yönüyle bakıldığında tam potansiyel oyunlar, sıradan potansiyel oyunların özel bir durumudur.

$$U_n(s_n', s_{-n}) > U_n(s_n, s_{-n}) \leftrightarrow \Theta(s_n', s_{-n}) > \Theta(s_n, s_{-n}), \quad \forall_{s_n \neq s_n'} \in S_n \tag{4.22}$$

Oyuncuların S_n hamle kümelerinin sonlu olduğu bir potansiyel oyunda, $S = S_1 \times S_2 \times \ldots \times S_N$ hamle profili kümesi de sınırlı elemana sahiptir. Bu nedenle, $\Theta(\cdot)$ potansiyel fonksiyonu bazı $s \in S$ hamle profillerinde maksimum tepe noktalarına sahiptir. Bu noktalar, (4.22) gereğince oyuncuların hamle yaparak faydasını artıramayacağı pür Nash denge noktalarıdır. Bu kapsamda potansiyel oyunlar için şu çıkarım yapılabilmektedir:

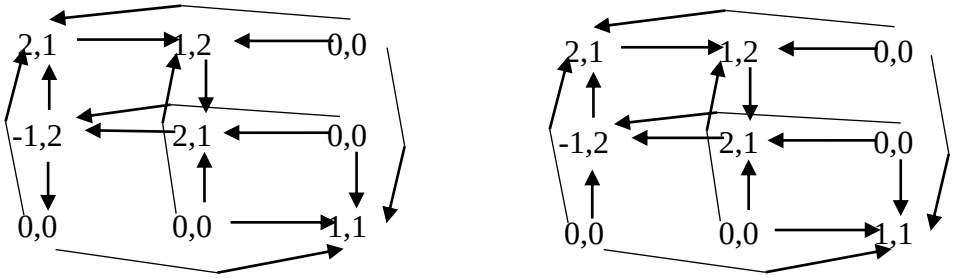
Teorem 5.2. Sonlu hamle profili uzayına sahip sıradan potansiyel oyunlar en az bir pür Nash dengesine sahiptirler.

Geliştirme hattı üzerinde peşi sıra hamleler yapan oyuncular, her aşamada potansiyel fonksiyonu $U_n(s^k) - U_n(s^{k-1})$ ölçüsünde artırmaktadırlar. Bu durumda potansiyel fonksiyon, geliştirme hattı boyunca monoton sürekli artan bir fonksiyondur. Daha önce belirtildiği gibi, oyundaki hamle kümesinin sınırlı olmasından dolayı potansiyel fonksiyonun artışı bir noktada maksimum değere erişecek ve ilgili hamle profili geliştirme hattının sonlanma profili olacaktır. Bu açıdan potansiyel oyunlar için şu çıkarım yapılabilmektedir:

Teorem 5.3. Sonlu hamle profili uzayına sahip tüm sıradan potansiyel oyunlar FIP ihtiva etmektedirler.

4.5.3 Zayıfça Döngüsel Olmayan Oyunlar

Bu oyun modellerinde de her hamle profilini Nash dengesine taşıyan bir geliştirme hattı tanımlanabilmektedir. Ancak potansiyel oyunlardan farklı olarak oyuncunun kararı doğrultusunda oyunun döngüye girme ihtimali de mevcuttur (Şekil 4.7a).



a-Zayıfça döngüsel olmayan oyun modeli

b-Döngüsel oyun modeli

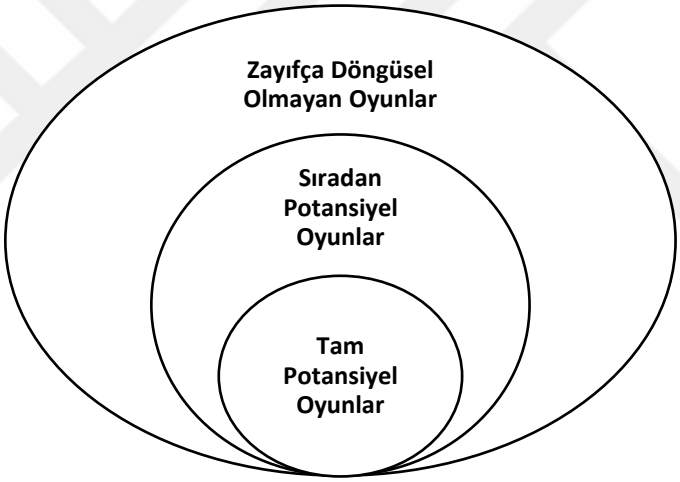
Şekil 4.7 Zayıfça döngüsel ve döngüsel oyun modelleri

Zayıf sonlu geliştirme özelliği (Weak FIP) olarak tanımlanan bu duruma sahip oyunlar *zayıfça döngüsel olmayan oyunlar (weakly acyclic game)* olarak adlandırılırlar [50].

Oyunda belirlenebilecek bir potansiyel fonksiyon, $\Theta: S \longrightarrow \mathbb{R}$, tüm oyuncuların fayda fonksiyonunun karakteristiğini yansıtmamaktadır. Ancak oyunda herhangi bir $s^k = (s_n, s_{-n})$ hamle profiline karşı daha iyi yanıta sahip olan oyunculardan en az bir tanesinin fayda değişim karakteristiğini yansıtan bir potansiyel fonksiyondan bahsedilebilmektedir (4.23).

$$U_n(s'_n, s_{-n}) > U_n(s) \leftrightarrow \Theta(s'_n, s_{-n}) > \Theta(s), \quad (\forall_n \in Y) \subset N \tag{4.23}$$

Bu açıdan bakıldığında potansiyel oyunlar zayıf döngüsel olmayan oyunların özel bir durumudur (Şekil 4.8).



Şekil 4.8 Zayıfça döngüsel olmayan, sıradan ve tam potansiyel oyunlar arasındaki ilişki

5
OYUNLARDA ÖĞRENME VE DENGE

5.1 Öğrenme Süreci

Aşamalı veya tek seferlik oyunların periyodik olarak tekrarlanması ile elde edilen tekrarlı oyun modellerinin temel özelliği, oyuncuların her periyotta yapılan hamleleri gözlemleyerek karşı oyuncuların davranışları hakkında öngörü sahibi olmalarıdır. Oyunda geçmiş periyotlarda oynanmış olan hamle profilleri olasılık uzayı olarak tanımlandığında, her bir hamle profilinin bu uzayda tekrarlanma miktarı oynanma olasılığını vermektedir. Böylece, *n.* oyuncu geçmişe bakarak gelecek periyotlarda karşı oyuncuların davranışı hakkında bir olasılık modeli oluşturabilir. Öğrenme olarak tanımlanan bu işlem ile oyuncular, elde ettikleri tecrübeler doğrultusunda stratejilerini güncelleyerek bir sonraki periyotta beklenen faydalarını artırmayı amaçlarlar.

$$\alpha_n(k) = f_n(s_{-n}(0), s_{-n}(1), .., s_{-n}(k-1); U_n) \tag{5.1}$$

Öğrenme mekanizması genel anlamıyla (5.1)'de verilen formda gösterilebilir. Formülde verilen $s_{-n}(0), s_{-n}(1), .., s_{-n}(k-1)$, kararın verileceği k periyoduna kadar karşı oyuncuların oynadığı hamle profilleri bilgisidir. U_n, *n.* oyuncunun fayda fonksiyonudur. $f_n(\cdot)$ ise elde edilen bilginin işlenerek mevcut stratejinin güncellendiği öğrenme kuralıdır. Her ne kadar formülde genel anlamıyla belirtilmiş olsa da mevcut öğrenme mekanizmaları şu hususlarda farklılık göstermektedir:

- Gözlemlenen bilginin kapsamı ve türü $s_{-n}(\tau), U_n$
- Karar mekanizmasında bilginin işlenmesi $f_n(\cdot)$

Farklı öğrenme algoritmaları için *n.* oyuncunun ihtiyaç duyabileceği bilgiler şu şekilde verilebilir:

- Faydanın fonksiyonel formu, U_n
- Diğer oyuncuların ilgili periyotlarda yaptıkları hamleler, $s_{-n}(\tau)$

- Geçmiş periyotlarda oynanan hamle yerine herhangi bir s_n alternatif hamlesinin oynanması halinde elde edilebilecek olan fayda değeri, $U_n\left(s_n(\tau), s_{-n}(\tau)\right)$
- Elde edilen faydanın rakamsal (gözlemsel) değeri

Oyunda elde edilen bilginin kapasitesi hem ortam şartlarına hem de cihazların kabiliyetlerine bağlıdır. Özellikle günümüz ağlarının kalabalıklığı düşünüldüğünde diğer oyuncuların geçmiş periyotlarda oynadıkları hamleleri gözlemlemek oldukça zordur. Ayrıca sensörler gibi basit işlemsel kapasitelere sahip olan cihazlar için olabildiğince az gözlem ve basit $f(\cdot)$ öğrenme kuralları ile karar almak hem enerji verimliliği hem de maliyet açısından önem taşımaktadır. Bu nedenle, kullanılacak olan öğrenme algoritmasının belirlenmesinde oyunun oynandığı ortam ve cihaz kapasiteleri etkili olmaktadır.

5.2 Regret Matching Algoritması

Regret matching, sıfır pişmanlık (no-regret) olarak adlandırılan öğrenme algoritmalarının bir türüdür [53]. Pişmanlık, öğrenilmesi amaçlanan bilgi ile mevcut bilgi arasındaki farklılığı belirtmektedir. Bu nedenle, algoritmanın amacı olan sıfır pişmanlık öğrenmenin tamamlandığı anlamına gelmektedir. Regret matching algoritmasının aşağıda belirtilen avantajları kablosuz ağlarda tercih edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır**:**

- Gerektirdiği işlem ve bilgi yükünün sınırlı olmasından dolayı özellikle geniş ağlarda kolay uygulanabilir olması.
- Tüm oyuncuların uygulaması durumunda sıfır pişmanlığın elde edildiği kaba bağdaşık denge noktasına yakınsaması.

5.2.1 Öğrenme Kuralı

Tekrarlı bir oyunda oyuncular, her periyotta oynanan hamle profilinin sonucunda $U_n\left(s(\tau)\right)$ faydasını elde ederler. Buna ek olarak, regret matching algoritmasının oyuncular tarafından uygulandığı bir oyunda, her oyuncu yapmış olduğu hamleye alternatif olarak farklı bir s_n hamlesini oynaması durumunda elde edebileceği $U_n\left(s_n(\tau), s_{-n}(\tau)\right)$ faydasını da rakamsal olarak gözlemler. Bu nedenle oyuncu,

diğer oyuncular tarafından yapılan hamleleri gözlemlemeye ve fayda fonksiyonunun matematiksel formuna ihtiyaç duymaz.

Oyunda *k.* periyotta karar alacak olan *n.* oyuncu öncelikle geçmiş periyotlarda oynadığı stratejiden duyduğu pişmanlığı hesaplar. Bu amaçla, (5.2)'de gösterildiği gibi her bir s_n hamlesinin tüm geçmiş periyotlarda pür olarak tercih edilmesi halinde ortalama faydasına etkisini belirler. Oluşan pozititif veya negatif fark ilgili hamleyi geçmiş periyotlarda tercih etmemesi nedeniyle duyulan pişmanlığı yansıtır.

$$R_n^{s_n}(k) = \frac{1}{k-1}\sum_{\tau=1}^{k-1}\left(U_n\left(s_n, s_{-n}(\tau)\right) - U_n(s(\tau))\right) \tag{5.2}$$

Pozitif pişmanlık, s_n hamlesinin karşı oyunculara karşı ortalamada daha etkili olduğunu ve daha sıklıkla oynanması gerektiğini göstermektedir. Bu sıklığın derecesi ise ilgili hamlenin oynanma olasılığının (5.3)'teki gibi güncellenmesi ile belirlenir.

$$p_n^{s_n}(k) = Pr[(s_n(k) = s_n] = \frac{\left[R_n^{s_n}(k)\right]^+}{\sum_{\widetilde{s_n}\in S_n}\left[R_n^{\widetilde{s_n}}(k)\right]^+} \tag{5.3}$$

Formülde kullanılan $[\cdot]^+$ ifadesi sadece pozitif pişmanlık duyulan hamlelerin dikkate alındığını göstermektedir. Bunun nedeni ise sıfır veya negatif pişmanlığın hali hazırda elde edilmiş olan ortalama faydaya etkisinin olmadığı veya ortalamayı düşürdüğü anlamına gelmesidir. Görüldüğü gibi, herhangi bir s_n hamlesinin oynanma olasılığı toplam pozitif pişmanlıktaki payına göre belirlenmektedir.

Regret matching algoritmasında, oyuncular pişmanlık seviyesini her periyotta (5.2)'de verildiği gibi ölçmezler. Pişmanlık, her bir periyot sonucunda elde edilen fayda değerleri ile (5.4)'teki gibi güncellenir.

$$R_n^{s_n}(k+1) = \frac{k-1}{k}R_n^{s_n}(k) + \frac{1}{k}\left(U_n\left(s_n, s_{-n}(k)\right) - U_n(s(k))\right) \tag{5.4}$$

5.2.2 Ham Bağdaşık Denge İlişkisi

Ham bağdaşık dengede belirtildiği gibi, oyundaki hamle profillerini bir olasılık dâhilinde oynatan mekanizma öğrenme algoritmaları olabilmektedir. Mekanizmanın oyundaki hamle profillerini hangi olasılık dâhilinde oynattığı bilgisi ise bir sinyal yerine oyuncular tarafından geçmiş periyotlarda yapılan gözlemler sonucunda öğrenilmektedir. Oyunda *k.* periyotta *s* hamle profilinin oynanma olasılığı (5.5)'teki gibi bulunur.

$$z^{s}(k) = \frac{1}{k-1}\sum_{\tau=1}^{k-1} I\{s(\tau) = s\} \tag{5.5}$$

Karşı oyuncuların oynayabileceği her bir hamle profilinin, $s_{-n} \in S_{-n}$, marjinal oynanma olasılığı ise (5.6)'daki gibi belirlenir.

$$z_{-n}^{s_{-n}}(k) = \frac{1}{k-1}\sum_{\tau=1}^{k-1} I\{s_{-n}(\tau) = s_{-n}\} \tag{5.6}$$

Bu bilgiler ile oyunun *k.* periyodunda karar alacak olan *n.* oyuncunun mekanizmanın sağladığı oyun davranışına uyduğu takdirde elde edeceği beklenen faydası (5.7) ile hesaplanır. Beklenen faydanın regret matching algoritmasında oyuncunun geçmiş periyotlarda elde ettiği faydaların ortalaması olduğu görülmektedir.

$$U_n\big(z(k)\big) = \sum_{s\in S} U_n(s)\, z^{s}(k) = \frac{1}{k-1}\sum_{\tau=1}^{k-1} U_n(s(\tau)) \tag{5.7}$$

Ek olarak, ham bağdaşık denge oyunlarında her oyuncu diğer alternatif hamleleri oynaması halinde elde edeceği ortalama faydayı da (5.8)'deki gibi hesaplar. Aynı şekilde, her bir s_n hamlesi için elde edilebilecek ortalama fayda, oyuncunun geçmiş periyotlarda ilgili hamleyi oynaması halinde elde edebileceği faydaların ortalama değeridir.

$$U_n\big(s_n, z_{-n}(k)\big) = \sum_{s_{-n} \in S_{-n}} U_n(s_n, s_{-n})\, z_{-n}^{s_{-n}}(k) = \frac{1}{k-1} \sum_{\tau=1}^{k-1} U_n(s_n, s_{-n}(\tau)) \qquad (5.8)$$

Bu durumda, oyuncunun hiçbir s_n hamlesini seçerek ortalama faydasını artıramayacağı (5.9)'da verildiği gibi tanımlanır.

$$U_n\big(s_n, z_{-n}(k)\big) - U_n\big(z(k)\big) \leq 0 \qquad (5.9)$$

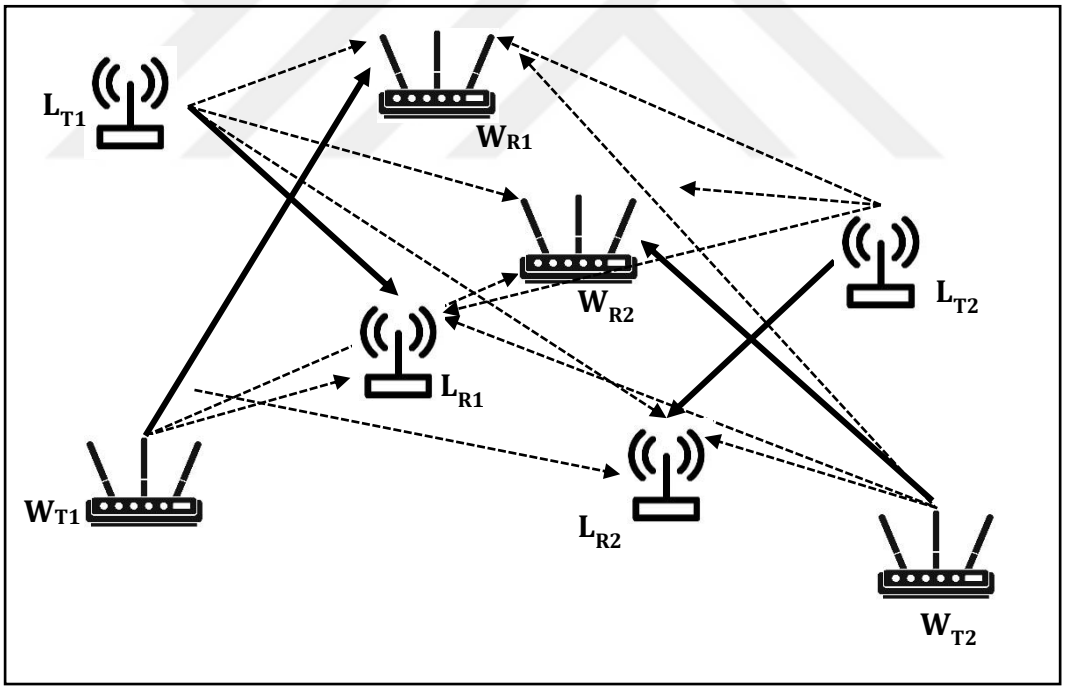
Bu durum, regret matching algoritmasında verilen her bir s_n hamlesi için hesaplanan $R_n^{s_n}(k)$ pişmanlık değerinin sıfır veya negatif olması ile eşdeğerdir. Bu nedenle, regret matching algoritmasının uygulandığı bir oyunda tüm oyuncuların tüm hamleleri için sıfır pişmanlık elde ettiği hamle profili olasılık dağılımı kaba bağdaşık denge noktasıdır.

6
MELEZ BİR AĞDA GİRİŞİM YÖNETİMİ OYUNU

Bu bölümde, 802.15.4 ve 802.11n standartlarına tabi protokoller üzerinden eş zamanlı haberleşen cihazların yer aldığı bir melez ağ modellenmektedir. 802.15.4 ve 802.11n cihazlarının sahip olduğu fiziksel katman kabiliyetlerinin matematiksel analizi yapılarak verici hüzme şekillendirici ve çıkış gücü denge noktasının varlığı oyun teorisi yaklaşımı ile incelenmektedir. Son olarak, Matlab ortamında yapılan benzetim çalışmasının sonuçları değerlendirilmektedir.

6.1 Ağ Modeli

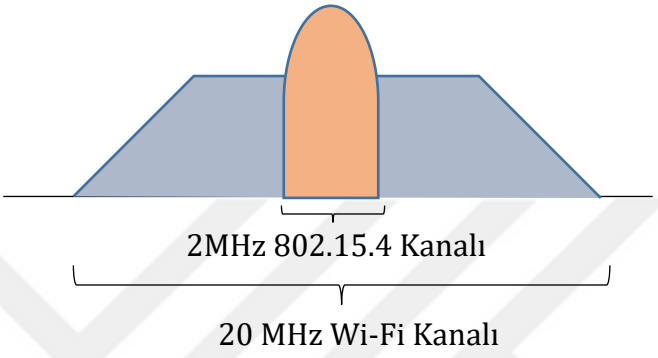
Çalışmada Şekil 6.1'de gösterilen ad hoc ağ modeli dikkate alınmıştır.



Şekil 6.1 Melez ağ modeli

M adet 802.11n ve N adet 802.15.4 haberleşme bağlantısı $D \times D$ boyutlarına sahip bir alanda rasgele konumlandırılmıştır. Her bağlantı, bir verici ve alıcıdan oluşmaktadır. Sırasıyla W_T ve W_R 802.11n bağlantısının verici ve alıcısını L_T ve L_R

ise 802.15.4 bağlantısının verici ve alıcısını belirtmektedir. Bağlantı haberleşme yönleri düz kalın çizgili oklarla, diğer vericilerden gelen girişim sinyalleri ise kesikli oklarla gösterilmektedir. MIMO yeteneğine sahip olan Wi-Fi cihazları, T adet anten ile haberleşmektedirler. Buna karşın 802.15.4 cihazları ise tek anten ile haberleşmektedirler. En kötü senaryonun analizi amacıyla, Wi-Fi ve 802.15.4 cihazları Şekil 6.2'de gösterildiği gibi tümüyle çakışan kanallarda eş zamanlı ve sürekli olarak iletim yapmaktadırlar.



Şekil 6.2 Benzetimde dikkate alınan kanal yerleşimi

6.2 Senaryo

Wi-Fi bağlantıları, birim norma sahip olan verici ve alıcı hüzme şekillendirme vektörlerini, $w_m, t_m \in \mathbb{C}^T$, optimum şekilde belirleyerek hedef SINR seviyesini minimum çıkış gücü ile elde etmeyi amaçlamaktadırlar. Oyunun herhangi bir anında iletim ortamını dinleyerek MIMO kanalını kestiren *m.* Wi-Fi bağlantısı alıcısı, optimum alıcı hüzme şekillendirme vektörünü belirler. Ardından SINR değerini maksimum seviyeye taşıyacak verici hüzme şekillendirme vektörünü, $\theta_m = \{t_m^1, t_m^2, \ldots t_m^\Psi\}$ hamle kümesinden seçerek uygulanmak üzere vericiye gönderir. Buna ek olarak, ilgili verici hüzme şekillendirme vektörünün seçilmesi halinde birim çıkış gücünde elde edilecek SINR seviyesi de, normalize SINR, vericiye iletilir. Verici, gelen bilgiler doğrultusunda ilgili vektörü seçer ve hedef SINR seviyesini sağlayacak minimum çıkış gücünü belirler.

MIMO yeteneğine sahip olmayan *n.* 802.15.4 cihazı, ortamdaki mevcut girişim seviyesine sadece anten çıkış gücünü güncelleyerek reaksiyon verir. Çıkış gücünü hedef SINR seviyesini sağlayacak minimum güç olarak belirler.

6.3 Girişim Modeli

Kablosuz cihazlar, filtreleme işleminden dolayı yalnızca çalıştıkları bant üzerine düşen sinyal gücünü algılarlar. Bu nedenle herhangi bir girişim kaynağından alınan girişim gücü, kaynağın PSD fonksiyonunun ilgili bant aralığında integrali ile hesaplanır. Şekil 6.2'de belirtilen kanal yerleşimi dikkate alındığında, girişim etkisi şu şekilde modellenebilir [42]: Girişim kaynağı bant genişliğinin alıcı cihazın bant genişliğine eşit veya küçük olması durumunda, etkin girişim gücü (6.1)'de verildiği gibi hesaplanır.

$$P_G^{eff} = P_G\,, \qquad B_G \leq B_R \tag{6.1}$$

Girişim kaynağı bant genişliğinin alıcı cihazın bant genişliğinden büyük olması durumunda ise etkin girişim gücü (6.2)'deki gibi hesaplanır.

$$P_G^{eff} = \frac{B_R}{B_G} P_G, \;\; B_G > B_R \tag{6.2}$$

Verilen formüllerden, 2 MHz bant genişliği ile 802.15.4 cihazlarının 20 MHz bant genişliğinde haberleşen Wi-Fi girişimini $^1/_{10}$ oranında algılayacağı anlaşılmaktadır. Diğer bir bakış açısıyla, 802.15.4 cihazları için Wi-Fi cihazları $^1/_{10}$ oranında çıkış gücüne sahiptirler. Bu nedenle, çalışmanın devam eden kısımlarında girişim kaynağı etkin çıkış gücü, girişim kaynağı gerçek çıkış gücünün (6.1) veya (6.2) kullanılarak ölçeklenmiş halini yansıtmaktadır.

6.4 Verici Hüzme Şekillendirici Vektörlerinin Belirlenmesi

Oyunda *(k-1)*. periyot sonu itibari ile M adet 802.11n bağlantısının $\phi = \{t_1, t_2, .., t_M\}$ verici hüzme şekillendirici hamle profilini seçtikleri varsayılsın. Ayrıca hem 802.11n hem de 802.15.4 bağlantılarının $P = \{P_1, P_2, .. P_M \; . \; . \; , P_{M+N}\}$ çıkış gücü hamle profilini oynadıkları varsayılsın. Bu durumda *k.* periyotta *m.* 802.11n bağlantısı alıcısında alınan sinyal (6.3)'teki gibi yazılır**.**

$$r_m = \sqrt{P_m} H_{m,m} t_m b_m + \sum_{i=1, i \neq m}^{M} \sqrt{P_i}\, H_{m,i} t_i b_i + \sum_{n=1}^{N} \sqrt{P_n}\, H_{m,n} c_n + n_m \qquad (6.3)$$

Görüldüğü gibi, alınan sinyal 4 ifadenin toplamı şeklinde oluşmaktadır. 1. ifade *m.* 802.11n bağlantısının vericisi tarafından gönderilen asıl sinyali tanımlamaktadır. 2. ve 3. ifadeler, sırasıyla diğer 802.11n ve 802.15.4 vericilerinin neden olduğu girişim sinyallerini vermektedir. 1. ve 2. ifadelerde geçen P_m ve P_i ibareleri, ilgili 802.11n vericilerinin çıkış güçlerinin (6.1) ile ölçeklenmiş halini tanımlamaktadır. $H_{m,m}$ ve $H_{m,i}$ ibareleri ise *T×T* boyunlarındaki MIMO kanal matrisleridir. $b_m, b_i \in \mathbb{C}$, vericiden iletilen ve ortalama birim güce sahip, $E\{|b_m|\} = 1$, karmaşık değerli sembollerdir. Denklemde 3. ifadede yer alan P_n, 80.15.4 çıkış gücünün (6.1) ile ölçeklenmiş halidir. $H_{m,n}$, tek antenli 802.15.4 vericisi ve T antene sahip 802.11n alıcısı arasındaki *T×1* boyutlarında tekli-giriş çoklu-çıkış (Single-input Multiple-Output, SIMO) kanal matrisidir. c_n, 802.15.4 vericisinden iletilen ve ortalama birim güce sahip olan sembollerdir. $n_m \in \mathbb{C}^T$, antenlerde toplanan $T \times 1$ boyutlarında toplanır beyaz gauss gürültüsü sinyalidir.

Alıcıda oluşan girişim ve gürültü sinyalleri toplamının kovaryans matrisi (6.4)'teki gibi hesaplanır.

$$R_m(\phi_{-m}, P_{-m}) = \sum_{i=1, i \neq m}^{M} P_i\, H_{m,i} t_i t_i^H H_{m,i}^H + \sum_{n=1}^{N} P_n\, H_{m,n} H_{m,n}^H + \sigma^2 I \qquad (6.4)$$

Denklemde verilen ϕ_{-m}, *m.* 802.11n bağlantısı dışındaki 802.11n vericilerinin seçmiş oldukları hüzme şekillendirici vektörü hamle profilidir. Aynı şekilde P_{-m}, *m.* 802.11n vericisi dışında hem 802.11n hem de 802.15.4 vericilerinin çıkış gücü hamle profilidir. Son olarak, σ^2 gürültü gücü, I ise *T×T* boyunlarında birim matrisidir.

MIMO yeteneğine sahip olan 802.11n bağlantılarında alıcı tarafta çeşitleme işlemi ile alınan girişim ve gürültü gücü minimum seviyelere indirgenir. Böylece SINR'ın artırılması sağlanır. Birim norma sahip w_m vektörü, $\|w_m\|^2 = 1$, her bir antenden alınan sinyalin hangi oranda dikkate alınacağını göstermektedir. Optimum $\overline{w_m}$

vektörü, minimum varyans bozunumsuz yanıt (Minimum Variance Distortionless Response, MVDR) hüzme şekillendirme [54] ile (6.5)'te verildiği gibi belirlenir.

$$\overline{w_m} = R_m^{-1} H_{m,m} t_m \tag{6.5}$$

$\overline{w_m}$, (6.6)'da normalize edilmektedir.

$$w_m = \frac{\overline{w_m}}{\|w_m\|'} \tag{6.6}$$

SINR değerinin maksimum seviyeye çıkarılması, (6.7)'de görüldüğü gibi seçilen w_m, t_m hüzme şekillendirme vektör çiftine ve çıkış gücüne bağlıdır.

$$\Gamma_m = \frac{P_m \left| w_m^H H_{m,m} t_m \right|^2}{\sum_{i=1, i\neq m}^{M} P_i \left| w_m^H H_{m,i} t_i \right|^2 + \sum_{n=1}^{N} P_n \left| w_m^H H_{m,n} \right|^2 + \sigma^2} \tag{6.7}$$

MVDR sonucu (6.6)'da elde edilen normalize w_m vektörünün (6.7)'de yerine koyulması ve Lagrange optimizasyon yönteminin uygulanması ile hedef SINR değeri, γ_0, (6.8)'de P_m ve t_m'ye bağlı olarak ifade edilmektedir.

$$\gamma_0 = P_m t_m^H H_{m,m}^H R_m^{-1} H_{m,m} t_m \tag{6.8}$$

(6.8)'de verilen $t_m^H H_{m,m}^H R_m^{-1} H_{m,m} t_m$ ifadesi normalize edilmiş SINR değeridir. Optimum t_m vektörünün seçilmesi halinde hedef SINR'ın minimum güç ile elde edileceği (6.9)'da görülmektedir.

$$P_m(\phi, P_{-m}) = \frac{\gamma_0}{(t_m^H H_{m,m}^H R_m^{-1} H_{m,m} t_m)} \tag{6.9}$$

Alıcı, SINR değerini maksimize eden ve birim norma sahip olan t_m vektörü bilgisini, $\|t_m\|^2 = 1$, seçilmek üzere sınırlı geri besleme kanalı [39] üzerinden vericiye gönderir. Ayrıca, vericiye ilgili hüzme şekillendirici vektörünün seçilmesi durumunda elde edilecek normalize edilmiş SINR değeri de iletilir. Bilgiyi alan verici, ilgili t_m vektörünü seçer ve hedef SINR'ın elde edilmesi için gerekli minimum çıkış gücünü (6.9)'da verildiği gibi belirler.

6.5 802.15.4 Cihazları Çıkış Gücü Belirleme

Tek anten üzerinden haberleşen *n.* 802.15.4 standardı bağlantısı alıcısının kanalda algıladığı girişim gücü (6.10) ile ifade edilir.

$$P_{inf} = \sum_{m=1}^{M} P_m \left|H_{n,m} t_m\right|^2 + \sum_{k=1,k\neq n}^{N} P_k \left|H_{n,k}\right|^2 + \sigma^2 \qquad (6.10)$$

Denklemde 1. ifade 802.11n girişimini, 2. ifade ise diğer 802.15.4 bağlantılarının oluşturduğu girişim gücünü tanımlamaktadır. P_m, 802.11n vericisi çıkış gücünün (6.2) ile ölçeklenmiş halidir. P_k ise 802.15.4 çıkış gücünün (6.1) ile ölçeklenmiş halidir. $H_{n,m}$ $1\times T$ boyutlarında çoklu-giriş tekli-çıkış (Multiple-Input Single-Output, MISO), $H_{n,k}$ ise tekli-giriş tekli-çıkış (Single-Input Single-Output, SISO) kanal matrisleridir.

Oyunun *k*. periyodunda *n.* 802.15.4 bağlantısı alıcısında elde edilen SINR değeri; mevcut girişim gücü, verici çıkış gücü ve kanal katsayısına bağlı olarak (6.11)'de ifade edilmektedir.

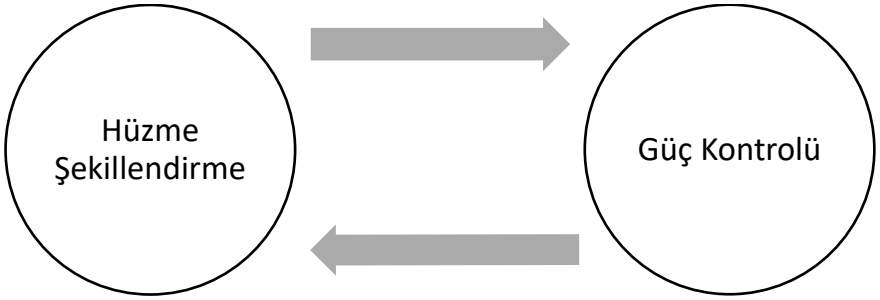
$$\Gamma_n = \frac{P_n \left|H_{n,n}\right|^2}{P_{inf}} \qquad (6.11)$$

Ortamdaki girişimin artması ile birlikte SINR'ın hedef seviyenin altına düştüğü durumda, verici çıkış gücü (6.12)'de verildiği gibi güncellenir.

$$P_n = \frac{\gamma_0 P_{inf}}{\left|H_{n,n}\right|^2} \qquad (6.12)$$

6.6 Oyun Teorisi Yaklaşımı

Tekrarlı olarak oynanan oyunun bir periyodu Şekil 6.3'te verilmektedir.



Şekil 6.3 Oyunun her bir periyodunda gerçekleşen aşamalar

Oyunun her *k.* periyodunda, ilk aşama olarak Wi-Fi bağlantıları verici hüzme şekillendirici vektörünü regret matching algoritması ile eş zamanlı şu şekilde seçerler: Her oyuncu, geçmiş tecrübeleri doğrultusunda pişmanlık vektörünü (5.2)'deki gibi belirler. Ardından, hamle kümesi üzerindeki olasılık dağılımını (karma strateji) (5.3)'te verildiği gibi günceller. Wi-Fi bağlantıları, hüzme şekillendirici hamle profilindeki bir hamleyi belirlenen olasılık dahilinde oynar ve ilgili çıkış gücünü belirler.

Wi-Fi bağlantilarinin ilgili fayda fonksiyonu (6.13)'te verilmektedir. Görüldüğü gibi, fayda fonksiyonu (6.8)'de elde edilen normalize edilmiş SINR seviyesinin logaritmasıdır.

$$U_m(t_m, t_{-m}) = log(t_m^H H_{m,m}^H R_m^{-1} H_{m,m} t_m) \qquad (6.13)$$

Oluşan yeni hüzme şekillendirme profili sonucunda, ağdaki oyuncular üzerinde girişim etkisi değişir. Bu nedenle, hem 802.15.4 hem de Wi-Fi bağlantıları hedef SINR seviyelerini korumak adına çıkış gücü kontrolü yaparlar. Diğer bir açıdan güç kontrolü, sabit ϕ hüzme şekillendirici hamle profili altında oynanan bir alt oyundur**.** Nash dengesinin var olması durumunda, sabit bir SINR seviyesinin hedeflendiği her güç kontrolü oyunu pür Nash dengesine yakınsamaktadır [55]. Bu nedenle, her periyodun ilk aşamasında oluşan ϕ profilini takiben ikinci aşamada bir çıkış gücü dengesi oluşmaktadır. Böylece *k.* periyot sonunda Wi-Fi bağlantıları için oluşan fayda değeri, ilgili periyotta oluşan ϕ hüzme şekillendirici ve P güç profiline bağlı olarak (6.13) ile belirlenir. Wi-Fi bağlantıları, İlgili fayda değerini bir sonraki periyotta pişmanlığın hesaplanması amacıyla hafızalarında tutarlar. Buna ek olarak, diğer her hüzme şekillendirici hamlesini seçmesi halinde elde edebileceği fayda değerini de belirleyerek hafızalarında tutarlar.

Oyun periyodik olarak oynandıkça, Wi-Fi bağlantılarının pişmanlık düzeyi asimtotik olarak sıfıra yakınsar. Sıfır pişmanlık noktasında, Wi-Fi bağlantıları verici hüzme şekillendirici hamle profilleri kümesi üzerindeki olasılık dağılımı sabitlenir. Böylece kaba bağdaşık denge noktası başarılmış olur.

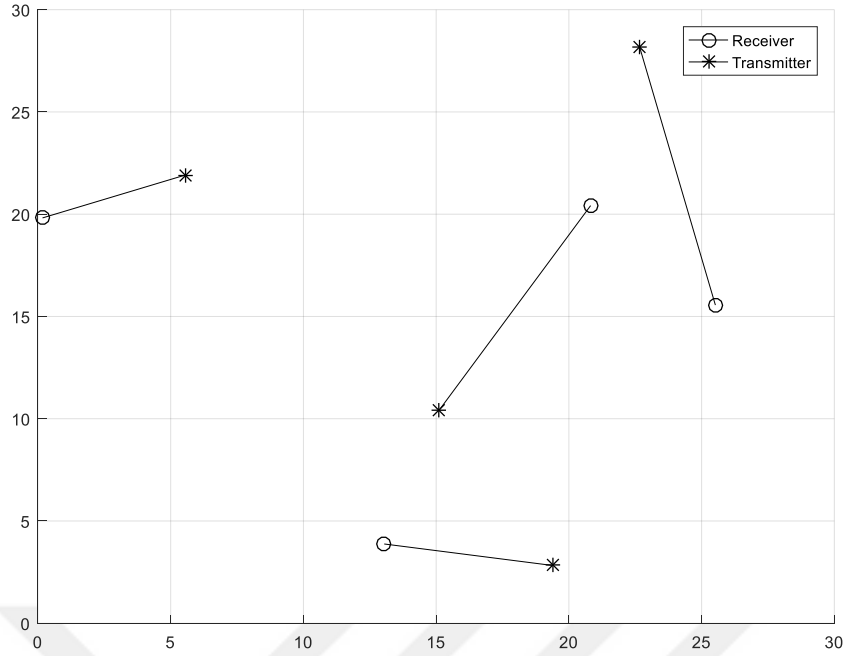
6.7 Benzetim ve Sonuçlar

Benzetimde, iki Wi-Fi ve iki 802.15.4 bağlantısı tanımlanmıştır. Tüm alıcı ve vericiler, Wi-Fi bağlantısı mesafesi 7-15 m, 802.15.4 bağlantısı mesafesi ise 5-7 m olacak şekilde 30 m × 30 m alanda rasgele konumlandırılmıştır. Hüzme şekillendirici vektör kümesi olarak 16 ve 64 elemanlı Grassmanian kod çizelgeleri [56] sırasıyla 3 ve 4 antenli analizler için kullanılmıştır. Kanal katsayılarının durağan ya da oyunun yakınsama süresinden daha yavaş değiştiği varsayılmaktadır. MIMO kanal matrisi elemanları; birbirinden bağımsız, sıfır ortalama ve birim varyansa sahip karmaşık değerli özdeş gaussian dağılımına sahiptirler. Buna ek olarak, yol kaybı parametresi, $d_{x,y}^{-4}$, kanal katsayısına çarpan olarak eklenmiştir. $d_{x,y}$, ilgili terminaller arasındaki mesafeyi belirtmektedir. Termal gürültü gücü, 20 MHz kanal genişliğine sahip Wi-Fi bağlantıları için 1×10^{-13} W (-100 dBm), 2 MHz kanal genişliğine sahip 802.15.4 bağlantıları için 1×10^{-14} W (-110 dBm) olarak tanımlanmıştır. Tablo 6.1'de verilen çıkış gücü seviyeleri, her bir standart için piyasada var olan modüller dikkate alınarak belirlenmiştir [57].

Tablo 6.1 Benzetimde kullanılan çıkış gücü setleri

Standart	**Güç seviyeleri**
802.11n	P={ 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 100 mW}
802.15.4	P={1 µw, 3 µW, 5 µW, 10 µW, 30 µW, 100 µW, 0.30 mw, 0.60 mw, 1 mw, 1.5 mw, 1.75 mw, 2 mW }

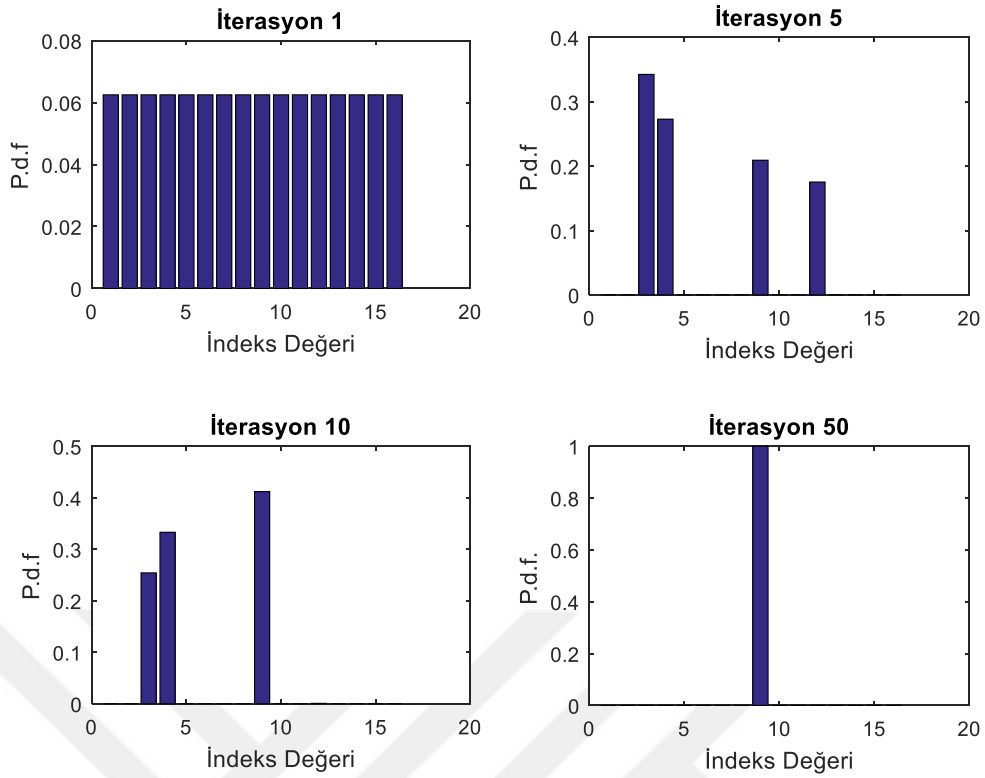
Maksimum 200 iterasyona izin verilen benzetimde ağ topolojisinin Matlab çıktısı Şekil 6.4'te gösterilmektedir.



Şekil 6.4 Matlab benzetiminde tanımlanan ağ topolojisi

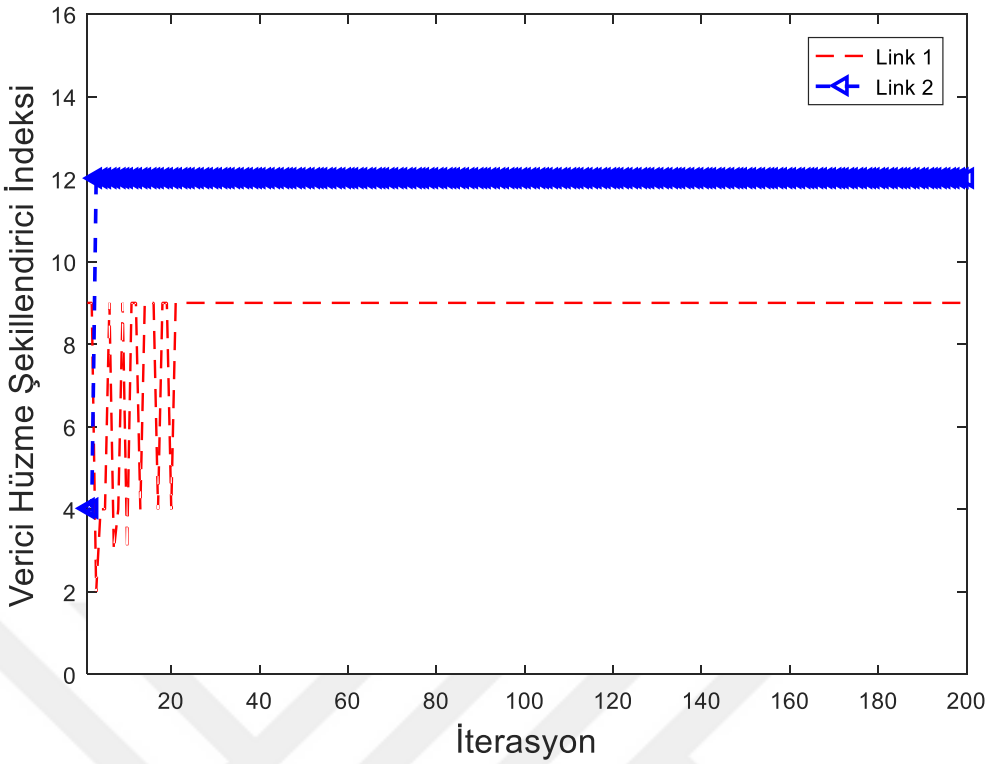
Sonuçlar, ilk olarak 10 dB SINR seviyesinin hedeflendiği ve 3 antenin kullanıldığı senaryo için sunulmuştur. Ardından 15 dB SINR seviyesinin ve 4 anten kullanımının sonuçlara etkisi ayrı olarak gösterilmiştir.

Benzetim sonucunda, 1. Wi-Fi bağlantısının hüzme şekillendirici hamle kümesi üzerindeki olasılık dağılımının zamanla değişimi Şekil 6.5'te gösterilmektedir. Benzetim başlangıç koşulu olarak, tüm hüzme şekillendirici vektörleri eşit olasılıkla seçilmektedir.



Şekil 6.5 Hüzme şekillendirici karma stratejisi değişimi T=3, SINR=10 dB

Görüldüğü gibi Wi-Fi bağlantısı, oluşan pişmanlık derecesine göre her periyotta hamle kümesi üzerindeki karma stratejisini güncellemiştir. Zaman içerisinde bazı hamleleri elemiş ve bir karara varmıştır. 1. Wi-Fi bağlantısı 26. iterasyonda 9. verici hüzme şekillendirici vektörü indeksinde karar kılmıştır. 2. Wi-Fi bağlantısı ise 4. iterasyonda öğrenme işlemini tamamlayarak 12. verici hüzme şekillendirici indeksinde durağan bir karara varmıştır. Tüm WiFi bağlantılarının seçtikleri hüzme şekillendirici vektörü indekslerinin periyodik olarak değişimi Şekil 6.6'da gösterilmektedir.



Şekil 6.6 Verici hüzme şekillendirici karar süreci T=3, SINR=10 dB

Her periyotta oluşan verici hüzme şekillendirici hamle profili ardından tüm bağlantılar tarafından güç kontrolü yapılmaktadır. Güç kontrolü aşamasında, başlangıç koşulu olarak her cihaz maksimum çıkış gücünü seçmektedir. Verici hüzme şekillendirici denge profili ardından oluşan güç profili Tablo 6.2'de verilmektedir. İlgili profilde, 802.15.4 bağlantılarının hedef SINR seviyesini mevcut güç kapasitesi dâhilinde başarabildiği görülmektedir.

Tablo 6.2 Çıkış güçleri T=3, SINR=10 dB

Bağlantı Numarası	**802.11n**	**802.15.4**	**Toplam Çıkış gücü**
Bağlantı-1	10 mW	5 µW	20.035 mW
Bağlantı-2	10 mW	30 µW	

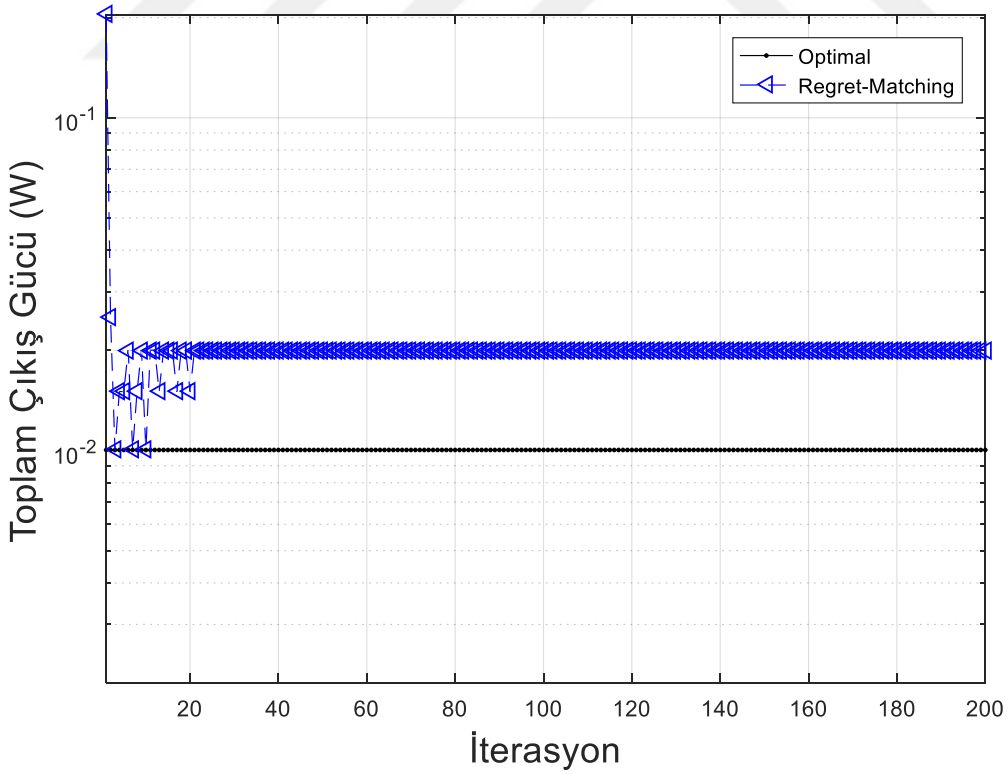
Elde edilen denge noktası, ağdaki toplam çıkış gücü açısından optimum değildir ancak optimale yakın bir performans ortaya koymaktadır. Bu durum daha önce belirtildiği gibi regret matching algoritmasının optimum hamle profiline

yakınsamayı garanti etmemesi ile ilgilidir. Ayrıca optimum hüzme şekillendirici vektörü profili başarılsa bile, ilgili profilde alt oyun olarak oynanan güç kontrolünün de optimum güç profiline yakınsaması gerekir. Optimum hüzme şekillendirici hamle profili 1. ve 2. Wi-Fi bağlantılarının sırasıyla 2. ve 3. verici hüzme şekillendirici indekslerini seçmesi durumunda oluşmaktadır. İlgili optimum profilde oluşan çıkış güçleri ise Tablo 6.3'te verilmektedir.

Tablo 6.3 Optimum profilde çıkış güçleri T=3, SINR=10 dB

Bağlantı Numarası	**802.11n**	**802.15.4**	**Toplam Çıkış gücü**
Bağlantı-1	5 mW	5 μW	10.035 mW
Bağlantı-2	5 mW	30 μW	

Toplam çıkış gücünün zaman içerisindeki değişimi ve optimum verici hüzme şekillendirici hamle profilinde ağda oluşacak toplam çıkış gücü Şekil 6.7'de verilmektedir.



Şekil 6.7 Toplam çıkış gücünün değişimi T=3, SINR=10 dB

6.7.1 SINR Etkisi

Sistem performansı daha yüksek haberleşme kalitesi amaçlayan bağlantıların varlığı varsayılarak analiz edilmiştir. Bu nedenle, benzetim tüm bağlantılar için 15 dB SINR seviyesi ile tekrarlanmıştır. Oyunda hüzme şekillendirici profili açısından sonuçlar değişmemiştir. Ancak Tablo 6.4'te verildiği gibi, çıkış güçlerinde farklılık olmuştur. Bunun nedeni ise her oyuncunun belirlediği hüzme şekillendirici vektörü için 10 dB SINR seviyesine göre daha yüksek çıkış gücüne ihtiyaç duymasıdır.

Tablo 6.4 Çıkış güçleri T=3, SINR=15 dB

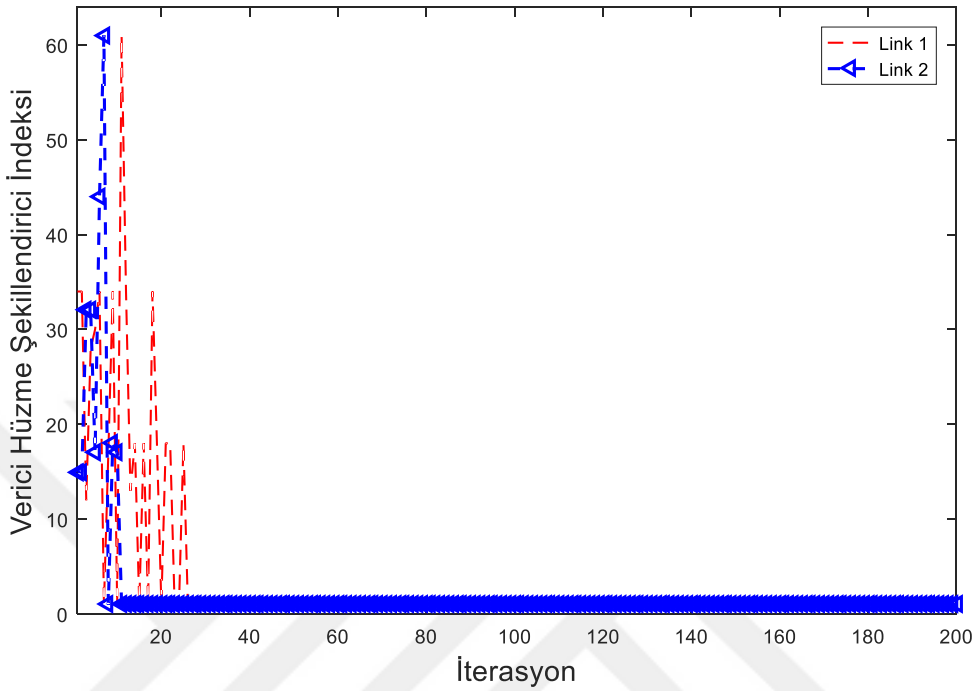
Bağlantı Numarası	802.11n	802.15.4	Toplam Çıkış Gücü
Bağlantı-1	10 mW	10 μW	25.040 mW
Bağlantı-2	15 mW	30 μW	

15 dB SINR seviyesinde optimum verici hüzme şekillendirici hamle profili 1. ve 2. 802.11n bağlantılarının sırasıyla 13. ve 14. indeksleri seçtiği profilde gerçekleşmektedir. İlgili profilde toplam çıkış gücü ise 10.040 mW olarak oluşmaktadır.

6.7.2 Anten Sayısı Etkisi

Benzetimde ayrıca anten sayısının sistem performansına etkisi de incelenmiştir. Wİ-Fi bağlantılarının 4 anten ile haberleştiği senaryoda 64 elemanlı Grassmanian kod çizelgesi, oyunculara geniş bir uzamsal çeşitlilik sunmaktadır. Artan uzamsal çeşitlilik kullanıcıların birbirleri üzerinde olabildiğince az girişime neden olarak hedef SINR seviyesini daha düşük güç ile yakalamalarına fırsat vermektedir. Bu durum, fazla kullanıcıya sahip ağlarda daha net bir şekilde gözlemlenir. Ancak 4 anten kullanımı, kullanıcıların karar aşamasında işlem yükünü artırmaktadır. Bu durum maliyet ve pratiklik açısından istenmeyen bir durumdur. Kalabalık ağlarda 64 farklı hüzme şekillendirici hamlesi içerisinden karar vermek zordur ve denge noktasına erişmek için gerekli iterasyon sayısı artmaktadır. Bu nedenle, geniş

hamle kümesi oldukça dinamik olan kablosuz ağlarda hantallık yaratarak durağan bir çalışma noktasına yakınsamayı zorlaştırmaktadır.



Şekil 6.8 Verici hüzme şekillendirici karar süreci T=4, SINR=10 dB

Wi-Fi bağlantılarının hüzme şekillendirici vektör karar süreci Şekil 6.8'de gösterilmektedir. 1. Wi-Fi bağlantısının kararı, 32. iterasyonda 1. hüzme şekillendirici indeksinde durağan bir hal almıştır. 2. Wi-Fi bağlantısı ise 19. iterasyonda aynı şekilde 1. hüzme şekillendirici indeksinde karar kılmıştır. Görüldüğü gibi her iki bağlantının karar süreci 3 antenin kullanıldığı senaryoya göre artmıştır.

Tüm cihazların çıkış güçleri ise Tablo 6.5'te verilmektedir. Görüldüğü gibi, ağdaki toplam çıkış gücü seviyesi 3 anten kullanımına göre düşük seviyededir.

Tablo 6.5 Çıkış Güçleri T=4, SINR=10 dB

Bağlantı Numarası	**802.11n**	**802.15.4**	**Toplam Çıkış gücü**
Bağlantı-1	5 mW	5 µW	15.035 mW

Bağlantı-2	10 mW	30 μW	

7
SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, 802.15.4 ve 802.11n standardı ile tanımlı protokollerin eş zamanlı ve çakışan spektrumlarda haberleşme başlattığı melez bir ağda oluşan karşılıklı girişim etkisi oyun teorisi yöntemiyle incelenmiştir. Belirli bir SINR seviyesinin tüm cihazlar tarafından minimum güç ile elde edilmeye çalışıldığı senaryoda, fiziksel katman kabiliyetleri çerçevesinde 802.11n cihazları verici hüzme şekillendirici vektörü karar denge noktasının ve tüm cihazlarda çıkış gücü denge profilinin dağıtık olarak başarımı amaçlanmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar bu amacı desteklemektedir. Verici hüzme şekillendirici karar denge profili, regret matching öğrenme algoritması kullanılarak dağıtık olarak elde edilmiştir. Kaba bağdaşık denge olarak tanımlanan profili takiben elde edilen güç profilinde, özellikle 802.15.4 cihazlarının kapasitelerini zorlamadan hedef servis kalitesini yakalayabildikleri görülmüştür. Bu durum düşük güç kapasitesine sahip olan bu cihazlar için önemli ve olumlu bir sonuçtur.

Belirtilen senaryoda iki temel unsur önem taşımaktadır;

- Ulaşılan denge noktasının verimliliği ve adilliği
- Dengeye ulaşmak için gerekli iterasyon sayısı

Çalışmada ulaşılan denge profilleri en verimli çözümü sunmamaktadırlar. Her ne kadar ağda oluşan toplam çıkış gücü optimum çözüme yakın olsa da daha yoğun ağlarda bu fark artacaktır. Bu nedenle, sistemi optimum denge noktasına taşıyacak mekanizmalar ve öğrenme algoritmaları üzerinde çalışılmalıdır. Bu mekanizma ve algoritmalar olabildiğince az bilgi alışverişi ve işlemsel yük gerektirecek şekilde tasarlanmalıdır. Ancak bencil oyunculardan oluşan bir oyunun optimum noktaya yakınsaması pek mümkün görünmemektedir. Bu nedenle, oyuncuları kendi

faydasından ziyade ağdaki toplam faydayı gözetmeye zorlayacak oyun teorisi yaklaşımları gerekmektedir. Diğer taraftan, diğer oyuncular hakkında bilgi toplanmasını gerektiren bu durum, bir haberleşme kaynağının ayrılmasından ziyade istatiksel yöntemler ve öğrenme algoritmaları ile başarılmalıdır.

Yukarıda belirtilen unsurlardan ikincisi ise sistemin var olan denge profiline en kısa sürede yakınsamasıdır. Hali hazırda oldukça dinamik ve kalabalık olan kablosuz ağlarda bu durum önem arz etmektedir. Aksi takdirde sistem hiçbir zaman durağan bir karar noktasına erişemeyecektir. Bu nedenle, her bir karar döneminde hangi oyuncunun karar almak üzere yetkilendirileceği bu performansta etkili olacaktır. Ayrıca karar ve öğrenme algoritmalarının da bu performansta payı oldukça büyüktür.

Yukarıda verilen bilgiler dâhilinde gelecek çalışmalarda;

- En kısa sürede dengeye yakınsamak için her aşamada doğru kullanıcıların karar vermesi sağlanmalıdır.
- Optimum hamle profillerinin denge noktası ihtiva etmesi sağlanmalıdır.
- Oyuncuları toplam faydayı gözetmeye zorlayacak oyun teorisi yaklaşımları çalışılmalıdır.
- Optimum denge noktasına minimum düzeyde bilgi alışverişi ile yakınsanması sağlanmalıdır. Bu bilgi istatiksel veya öğrenme algoritmaları ile elde edilmelidir.
- Farklı öğrenme algoritmalarının performansı incelenmelidir.

KAYNAKÇA

[1] J. J. Martin Wollschlager, Thilo Sauter, "The future of industrial Communication: Automation Networks in the Era of the Internet of Things and Industry 4.0," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 11, no. 1, pp. 17–27, 2017.

[2] V. C. Gungor *et al.*, "A Survey on smart grid potential applications and communication requirements," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 9, no. 1, pp. 28–42, 2013.

[3] M. Agiwal, A. Roy, and N. Saxena, "Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 18, no. 3, pp. 1617–1655, 2016.

[4] Jie Lin, Wei Yu, Nan Zhang, Xinyu Yang, Hanlin Zhang, Wei Zhao"A Survey on Internet of Things: Architecture, Enabling Technologies, Security and Privacy, and Applications," *IEEE INTERNET THINGS J.*, vol. 4, no. 5, pp. 1125–1142, 2017.

[5] "IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks," *IEEE Std 802.15.4™-2015*, 2015.

[6] "Bluetooth Core Specification Version 5.2," *Core Version 5.2*, 2019.

[7] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, "Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, 2015.

[8] "IEEE Standard for Information technology— Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks— Specific requirements Part 11: Wireless Lan Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," *IEEE Std 802.11™-2016*, 2016.

[9] Teng-Hui Wang and Hsiao-Hwa Chen, "Channel discovery algorithms for interference avoidance in smart grid communication networks: a survey," *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 16, pp. 427–440, 2016.

[10] N. Azmi *et al.*, "Interference issues and mitigation method in WSN 2.4GHz ISM band: A survey," in *2nd International Conference on Electronic Design, ICED*, 2014, pp. 403–408.

[11] B. Polepalli, W. Xie, D. Thangaraja, M. Goyal, H. Hosseini, and Y. Bashir, "Impact of IEEE 802.11n operation on IEEE 802.15.4 operation," in *International Conference on Advanced Information Networking and*

Applications, AINA, 2009, pp. 328–333.

[12] M. Petrova, L. Wu, P. Mähönen, and J. Riihijärvi, "Interference measurements on performance degradation between colocated IEEE 802.11 g/n and IEEE 802.15.4 networks," *Proc. Sixth Int. Conf. Networking, ICN'07*, 2007.

[13] Z. Zhao, X. Wu, X. Zhang, J. Zhao, and X. Y. Li, "ZigBee vs WiFi: Understanding issues and measuring performances of their coexistence," *IEEE 33rd Int. Perform. Comput. Commun. Conf. IPCCC*, 2014.

[14] N. J. Lasorte, S. A. Rajab, and H. H. Refai, "Experimental assessment of wireless coexistence for 802.15.4 in the presence of 802.11g/n," in *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2012, pp. 473–479.

[15] K. Leyton-Brown and Y. Shoham, *Essentials of game theory*. 2008.

[16] F. Drew and J. Tirole, *Game Theory. Cambridge, MA: MIT Press*. 1991.

[17] Y. Ensar, *Oyun Teorisi*. Literatür Yayınları, 2016.

[18] L. Samson and T. Hamidou, *Game Theory and Learning for Wireless Networks Fundamentals and Applications*. Elsevier B.V., 2011.

[19] Z. Han, D. Niyato, W. Saad, T. Basar, and A. Hjorungnes, *Game Theory in Wireless and Communication Networks*. 2011.

[20] Y. Zhang and M. Guizani, *Game Theory for Wireless Communications and Networking*. 2011.

[21] D. E. Charilas and A. D. Panagopoulos, "A survey on game theory applications in wireless networks," *Comput. Networks*, vol. 54, no. 18, pp. 3421–3430, 2010.

[22] K. Yamamoto, "A comprehensive survey of potential game approaches to wireless networks," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E98B, no. 9, pp. 1804–1823, 2015.

[23] E. Ahmed, A. Gani, S. Abolfazli, L. J. Yao, and S. U. Khan, "Channel assignment algorithms in cognitive radio networks: Taxonomy, open issues, and challenges," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 18, no. 1, pp. 795–823, 2016.

[24] N. Nie and C. Comaniciu, "Adaptive channel allocation spectrum etiquette for cognitive radio networks," *Multibody Syst. Dyn.*, vol. 16, no. 4, pp. 779–797, 2006.

[25] Y. Xu, Q. Wu, J. Wang, L. Shen, and A. Anpalagan, "Opportunistic spectrum access using partially overlapping channels: Graphical game and uncoupled learning," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 9, pp. 3906–3918, 2013.

[26] S. Maghsudi and S. Stanczak, "Joint channel allocation and power control for underlay D2D transmission," *IEEE Int. Conf. Commun.*, vol. 2015-Septe, pp. 2091–2096, 2015.

[27] Q. W. and Z. G. Jinlong Wang, Yuhua Xu, Alagan Anpalagan, "Optimal distributed interference avoidance: potential game and learning," *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.*, vol. 23, 2012.

[28] C. U. Saraydar, N. B. Mandayam, and D. J. Goodman, “Efficient power control via pricing in wireless data networks,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, no. 2, pp. 291–303, 2002.

[29] A. Ghosh, L. Cottatellucci, and E. Altman, “Normalized Nash Equilibrium for Power Allocation in Cognitive Radio Networks,” *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, vol. 1, no. 1, pp. 86–99, 2015.

[30] U. O. Candogan, I. Menache, A. Ozdaglar, and P. A. Parrilo, “Near-optimal power control in wireless networks: A potential game approach,” *Proc. - IEEE INFOCOM*, pp. 1–9, 2010.

[31] H. H. Nguyen, M. Hasegawa, and W. J. Hwang, “Distributed Resource Allocation for D2D Communications Underlay Cellular Networks,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 20, no. 5, pp. 942–945, 2016.

[32] A. J. Paulraj, D. A. Gore, R. U. Nabar, and H. Bölcskei, “An overview of MIMO communications - A key to gigabit wireless,” *Proc. IEEE*, vol. 92, no. 2, pp. 198–217, 2004.

[33] F. Rashid-farrokhi, K. J. R. Liu, S. Member, and L. Tassiulas, “Transmit Beamforming and Power Control for Cellular Wireless Systems,” *IEEE J. Sel. AREAS Commun.*, vol. 16, no. 8, pp. 1437–1450, 1998.

[34] P. Daniel, M. A. Lagunas, and J. M. Cioffi, “Optimum Linear Joint Transmit-Receive Processing for MIMO Channels with QoS Constraints,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 52, no. 5, pp. 1179–1197, 2004.

[35] C. Liang and K. R. Dandekar, “Power Management in MIMO Ad Hoc Networks : A Game-Theoretic Approach,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 6, no. 4, pp. 1164–1170, 2007.

[36] Sigen Ye and R. S. Blum, “Optimized Signaling for MIMO Interference Systems With Feedback,” *IEEE Trans. SIGNAL Process.*, vol. 51, no. 11, pp. 2839–2848, 2003.

[37] D. N. Nguyen and M. Krunz, “Power Minimization in MIMO Cognitive Networks using Beamforming Games,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 31, no. 5, pp. 916–925, 2013.

[38] F. Zhao, B. Li, H. Chen, and X. Lv, “Joint Beamforming and Power Allocation for Cognitive MIMO Systems Under Imperfect CSI Based on Game Theory,” *Wirel. Pers Commun*, vol. 73, pp. 679–694, 2013.

[39] D. J. Love, R. W. Heath, V. K. N. Lau, D. Gesbert, B. D. Rao, and M. Andrews, “An Overview of Limited Feedback in Wireless Communication Systems,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 26, no. 8, pp. 1341–1365, 2008.

[40] E. Zeydan, D. Kivanc, U. Tureli, and C. Comaniciu, “Joint iterative beamforming and power adaptation for MIMO ad hoc networks,” *Eurasip J. Wirel. Commun. Netw.*, pp. 1–12, 2011.

[41] A. K. Khiarullah, U. Tureli, and D. Kivanc, “Optimized Intelligent Design for Smart Systems Hybrid Beamforming and Power Adaptation Algorithms for Sensor Networks Decision-Making Approach,” *Int. J. Comput. Intell. Syst.*, vol.

12, no. 2, pp. 1436–1445, 2019.

[42] S. J. Shellhammer, “Estimation of Packet Error Rate Caused by Interference using Analytic Techniques – A Coexistence Assurance Methodology,” *IEEE P802.19 Wirel. Coexistence*, 2005.

[43] R. Natarajan, P. Zand, and M. Nabi, “Analysis of coexistence between IEEE 802.15.4, BLE and IEEE 802.11 in the 2.4 GHz ISM band,” *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.*, pp. 6025–6032, 2016.

[44] S. Farahani, *ZIGBEE WIRELESS NETWORKS AND TRANSCEIVERS*. 2008.

[45] E. Perahia and R. Stacey, *Next Generation Wireless LANs 802.11n and 802.11ac*. 2013.

[46] A. Sibille, C. Oestges, and A. Zanella, *MIMO From theory to implementation*. 2011.

[47] C. Y. Chang, C. H. Kuo, J. C. Chen, and T. C. Wang, “Design and Implementation of an IoT Access Point for Smart Home,” *Appl. Sci.*, vol. 5, no. 4, pp. 1882–1903, 2015.

[48] J. Nash, “Non-Cooperative Games,” *Ann. Math.*, vol. 54, no. 2, pp. 286–295, 1951.

[49] J. O. D. Neel, “Analysis and Design of Cognitive Radio Networks and Distributed Radio Resource Management Algorithms Analysis and Design of Cognitive Radio Networks and Distributed Radio Resource Management Algorithms,” *Design*, p. 385, 2006.

[50] J. O. D. Neel, “Analysis and Design of Cognitive Radio Networks and Distributed Radio Resource Management Algorithms Analysis and Design of Cognitive Radio Networks and Distributed Radio Resource Management Algorithms,” 2006.

[51] Q. D. L. · Y. H. C. B.-H. Soong, *Potential Game Theory Applications in Radio Resource Allocation*. 2016.

[52] Monderer D and Shapley L, “Potential Games,” *Games Econ. Behav.*, vol. 14, no. 1, pp. 124–143, 1996.

[53] J. R. Marden, G. Arslan, and J. S. Shamma, “Regret based dynamics: Convergence in weakly acyclic games,” *Proc. Int. Conf. Auton. Agents*, no. January 2007, pp. 194–201, 2007.

[54] R. A. Iltis, S. J. Kim, and D. A. Hoang, “Noncooperative iterative MMSE beamforming algorithms for Ad Hoc networks,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 54, no. 4, pp. 748–759, 2006.

[55] R. D. Yates, “A Framework for Uplink Power Control in Cellular Radio Systems,” *IEEE J. Sel. AREAS Commun.*, vol. 13, no. 7, pp. 1341–1347, 1995.

[56] D. J. Love, R. W. Heath, and T. Strohmer, “Grassmannian beamforming for multiple-input multiple-output wireless systems,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 49, no. 10, pp. 2735–2747, 2003.

[57] “PAN4620 IEEE® 802.15.4 and Bluetooth® Low Energy Module Product

Specification Rev. 0.1," *Panasonic*. 2017.

Tezden Üretilmiş Yayınlar

İletişim Bilgisi: ejmelterzi@gmail.com

Konferans Bildirileri

1. E. Terzi, M. S. U. Türeli, and D. Kıvanç Türeli, "A Game Theoretic Study for Distributed Multiprotocol Coexistence in ISM Band ," *19th International Symposium INFOTEH-JAHORINA,* 18-20 March 2020