

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

HETEROJEN AĞLARDA OFDMA İLE KAYNAK TAHSİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik - Elektronik Müh. Erdal GÜRSOY

**MAYIS 2023
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

HETEROJEN AĞLARDA OFDMA İLE KAYNAK TAHSİSİ

Elektrik - Elektronik Müh. Erdal GÜRSOY

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"ELEKTRONİK YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 / 04 / 2023

Tezin Savunma Tarihi : 17 / 05 / 2023

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Gökçe HACIOĞLU

ORCID : - - -

Trabzon 2023

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışmasının hazırlanarak amacına ulaşması süreci boyunca bana yol gösteren, her zaman anlayış, sabır ve hoşgörü ile yaklaşan, değerli bilgi ve görüşlerini esirgemeyen danışmanım Doç. Dr. Gökçe HACIOĞLU'na, tüm bu süreç boyunca yanımda olan, beni destekleyen her zaman motive eden sevgili babam ve anneme ayrıca yakın arkadaşım Arş. Gör. Abdulgazi YIKICI'ya teşekkürlerimi saygı ve minnetle sunarım.

ERDAL GÜRSOY

Trabzon, 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Dikgen Frekans Bölmeli Çoklu Erişimde Heterojen Ağlarda Kaynak Tahsisi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Gökçe HACIOĞLU’nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri / örnekleri kendim topladığımı, deneyleri / analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı / yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

17.05.2023

Erdal GÜRSOY

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Literatür Taraması.....	3
1.3. Kablosuz Haberleşme (Wireless).....	8
1.3.1. Kablosuz Haberleşmeyi Olumsuz Etkileyen Unsurlar.....	9
1.3.1.1. Yol Kaybı (Path Loss)	10
1.3.1.2. Gölgeleme (Shadowing)	10
1.3.1.3. Doppler Etkisi	11
1.3.1.4. Semboller Arası Girişim (Inter Symbol Interference)	11
1.3.1.5. Düz Sönümleme ve Frekans Seçici Sönümleme (Fading).....	12
1.3.1.6. Toplanır Beyaz Gauss Gürültüsü (AWGN)	12
1.4. Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (FDMA)	14
1.5. Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (TDMA).....	15
1.6. Kod Bölmeli Çoklu Erişim (CDMA).....	17
1.7. Dikgen Frekans Bölmeli Çoklama (OFDM).....	20
1.7.1. Dikgenlik.....	22

1.7.2.	Çok Taşıyıcılı Haberleşme.....	23
1.7.3.	OFDM Ayırık Fourier Dönüşümü	25
1.7.4.	OFDM Döngüsel Ön Ek	26
1.7.5.	OFDM Matris Gösterimi.....	28
1.8.	Dikgen Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (OFDMA).....	31
1.8.1.	OFDMA Tanımı.....	31
1.8.2.	Geniş Bantlarda Niçin OFDMA Kullanılır	32
1.8.3.	OFDMA'nın Diğer Yöntemler ile Karşılaştırılması	34
1.8.4.	OFDMA Sistem Modeli.....	35
1.9.	Dikgen Olmayan Çoklu Erişim (NOMA).....	36
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR	38
2.1.	Giriş.....	38
2.2.	Kaynak Tahsisi.....	38
2.3.	Heterojen Ağlar (HetNet).....	40
2.3.1.	HetNets Tanımı ve Genel Özellikleri.....	40
2.3.2.	HetNets Hücre Tipleri ve Haberleşme Senaryoları	43
2.3.2.1.	HetNets Hücre Tipleri.....	43
2.3.2.2.	HetNets Haberleşme Senaryoları	44
2.4.	Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO).....	46
2.4.1.	PSO Tanımı.....	46
2.4.2.	PSO Ana Parametreleri	49
2.4.2.1.	Popülasyonun Büyüklüğü	49
2.4.2.2.	İterasyon Sayısı	49
2.4.2.3.	Hızlanma Katsayıları	50
2.4.2.4.	Eylemsizlik Ağırlığı.....	50
2.4.2.5.	Uygunluk Fonksiyonu.....	50

2.4.2.6.	Parçacık Hızı	51
2.5.	Ayrık Parçacık Sürü Optimizasyonu (DPSO).....	51
2.5.1.	DPSO Tanımı.....	51
2.5.2.	DPSO Kullanım Şekli	52
2.6.	İki Katmanlı Femtocell Ağları İçin Sözde Aktarma Tabanlı Güç ve Alt Kanal Uyarlaması (İki Katmanlı Femtocell Ağ Metodu).....	57
3.	BULGULAR.....	58
3.1.	Giriş.....	58
3.2.	Sistem Modeli	60
3.3.	Genel HetNets Ağ Modeli	61
3.4.	Kullanıcı Sayısına Göre Ews, Enet ve Toplam Hız Değişimleri	62
3.5.	Kaynak Blok Sayısına Göre Ews, Enet ve Toplam Hız Değişimleri.....	65
3.6.	Femto Baz İstasyonu Sayısına Göre Ews, Enet ve Toplam Hız Değişimleri	68
3.7.	Statik Güç Değişimine Göre Ews, Enet ve Toplam Hız Değişimleri	70
3.8.	Femto Baz İstasyonu Güç Değişimine Göre Ews, Enet ve Toplam Hız Değişimleri.....	73
3.9.	Makro Baz İstasyonu Güç Değişimine Göre Ews, Enet ve Toplam Hız Değişimleri.....	75
3.10.	DPSO ve İki Katmanlı Ağ Metodu Koşma Zamanları	78
3.11.	DPSO'daki İterasyon Sayısına WSEE Maksimum Olacak Şekilde Ews, Enet ve Toplam Hız Değişimleri	80
3.12.	DPSO'daki İterasyon Sayısına NEE Maksimum Olacak Şekilde Ews, Enet ve Toplam Hız Değişimleri	82
3.13.	Kullanıcılar Tarafından Her Kaynak Bloğun Kullanılma Sayıları	85
4.	SONUÇLAR	90
5.	KAYNAKÇA.....	92

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans

ÖZET

HETEROJEN AĞLARDA OFDMA İLE KAYNAK TAHSİSİ

Erdal GÜRSOY

Karadeniz Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Gökçe HACIOĞLU

2023, 98 Sayfa

Bu tezde; yüksek bant genişlikli haberleşmeye olan talebin karşılanmasına yönelik sistemlerden olan Heterojen ağlarda kaynak tahsisine üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla, çalışmada Dikgen Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (OFDMA) ile kaynak tahsisine yapılmıştır. Heterojen Ağların (HetNets) temel özellikleri, makro hücre ağlarında, küçük hücrelerin birlikte çalışmasına izin vererek mekânsal kaynakların tekrar kullanım olanağını artırmak ve kullanıcıların hizmet kalitesini iyileştirmektir. Ancak HetNets’lerde sınırlı sayıda kaynağın olması ve farklı kullanıcılar arasındaki girişimin, spektrum paylaşımının ve parazitinin azaltılması için verimli Kaynak Tahsis (RA) şemalarının kullanılması gerekmektedir. Kaynak tahsis problemi Ayrık Parçacık Sürü Optimizasyonu (DPSO) ile incelenmiştir. Bu incelemede baz istasyonlarından kullanıcılara olan (downlink) haberleşme göz önünde bulundurulmuştur. Kaynak tahsisinde kullanılan DPSO algoritması şu durumlar için kullanılmıştır: Belli sayıda kullanıcıların haberleşme hızlarını, Ağ Enerji Verimliliğini (NEE) veya kullanıcıların Ağırlıklı Enerji Etkinliği Toplamını (WSEE) en yüksek yapacak şekilde kaynak tahsisine yapılmıştır. Toplam hız, NEE ve WSEE başarımı; baz istasyonu sayısı, kullanıcı sayısı, verici gücü ve baz istasyonlarında harcanan statik güç gibi birçok parametreden etkilense de, çalışmada kullanılan DPSO kaynak tahsisine, bunların hepsi için oldukça iyi bir başarımla göstermiştir. Özellikle, ağdaki kullanıcı sayısı arttıkça ve kaynakların sayısı sınırlı hale geldiğinde, bu kaynak tahsisinin kullanımı, daha önemli hale gelir. Ayrıca, bu kaynak tahsisine, kullanıcılar arasındaki eşitlik ilkesini sağlamak için de kullanılabilir. Sonuç olarak heterojen ağlarda kaynak tahsisine, ağın performansını ve enerji verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için oldukça önemlidir. Kaynak tahsisine ağın daha iyi yönetilmesine yardımcı olur ve kullanıcıların deneyimini iyileştirir.

Anahtar Kelimeler: OFDMA, HetNets, DPSO, RA, NEE, WSEE

Master Thesis

SUMMARY

RESOURCE ALLOCATION WITH OFDMA IN HETEROGENEOUS NETWORKS

Erdal GÜRSOY

Karadeniz Technical University

The Graduate School of Natural and Applied Sciences

Electrical and Electronics Engineering Graduate Program

Supervisor: Assoc. Prof. Gökçe HACIOĞLU

2023, 98 Pages

In this thesis; studies have been carried out on resource allocation in heterogeneous networks, which are systems to meet the demand for high-bandwidth communication. For this purpose, resource allocation was made with Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA). The main features of Heterogeneous Networks (HetNets) are to increase the reuse of spatial resources and improve the service quality of users by allowing small cells to work together in macro cell networks. However, HetNets require a limited number of resources and efficient Resource Allocation (RA) schemes to reduce interference, spectrum sharing and interference between different users. The resource allocation problem was investigated by Discrete Particle Swarm Optimization (DPSO). In this review, downlink communication from base stations to users has been considered. The DPSO algorithm used in resource allocation is used for the following situations: Resource allocation is made to maximize the communication speed of a certain number of users, Network Energy Efficiency (NEE) or Weighted Energy Efficiency Sum (WSEE) of users. Total speed, NEE and WSEE performance; although the number of base stations is affected by many parameters such as the number of users, the transmitter power and the static power consumed at the base stations, the DPSO resource allocation used in the study showed a very good performance for all of them. In particular, the use of this resource allocation becomes more important as the number of users in the network increases and the number of resources becomes limited. In addition, this resource allocation can be used to ensure the principle of equality among users. As a result, resource allocation in heterogeneous networks is very important to maximize network performance and energy efficiency. Resource allocation helps better manage the network and improves users' experience.

Key Words: OFDMA, HetNets, DPSO, RA, NEE, WSEE

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1.	FDMA’da koruma bant gösterimi..... 15
Şekil 1.2.	Zaman bölmeli çoklu erişim gösterimi 17
Şekil 1.3.	Kod bölmeli çoklu erişim gösterim..... 20
Şekil 1.4.	OFDM sistemi temel blok diyagramı 21
Şekil 1.5.	Periyodik ön ek yapısı..... 27
Şekil 1.6.	OFDMA’nın gösterim şekli 32
Şekil 1.7.	Olası dikgen olmayan çoklu erişim çözümü gösterimi..... 37
Şekil 2.1.	Parçacık sürü optimizasyonu akış diyagramı..... 48
Şekil 2.2.	DPSO algoritması pseudo kodu 55
Şekil 2.3.	DPSO algoritması ile kullanıcılara kaynak blok ataması 56
Şekil 3.1.	OFDMA HetNets’te aşağı yönlü bağlantı iletim senaryosu 60
Şekil 3.2.	Baz istasyonları ve kullanıcıların HetNets ağı üzerindeki random dağılımı 62
Şekil 3.3.	Kullanıcı sayısı ve Ews değişim grafiği..... 63
Şekil 3.4.	Kullanıcı sayısı ve Enet değişim grafiği 64
Şekil 3.5.	Kullanıcı sayısı ve toplam hız değişim grafiği 65
Şekil 3.6.	Kaynak blok sayısı ve Ews değişim grafiği 66
Şekil 3.7.	Kaynak blok sayısı ve Enet değişim grafiği 67
Şekil 3.8.	Kaynak blok sayısı ve toplam hız değişim grafiği..... 67
Şekil 3.9.	Femto baz istasyonu sayısı ve Ews değişim grafiği..... 69
Şekil 3.10.	Femto baz istasyonu sayısı ve Enet değişim grafiği 69
Şekil 3.11.	Femto baz istasyonu sayısı ve toplam hız değişim grafiği 70
Şekil 3.12.	Statik güç ve Ews değişim grafiği 71
Şekil 3.13.	Statik güç ve Enet değişim grafiği 72
Şekil 3.14.	Statik güç ve toplam hız değişim grafiği 72

Şekil 3.15.	Femto baz istasyonu güç ve Ews değişim grafiği.....	74
Şekil 3.16.	Femto baz istasyonu güç ve Enet değişim grafiği	74
Şekil 3.17.	Femto baz istasyonu güç ve toplam hız değişim grafiği.....	75
Şekil 3.18.	Makro baz istasyonu güç ve Ews değişim grafiği	76
Şekil 3.19.	Makro baz istasyonu güç ve Enet değişim grafiği	77
Şekil 3.20.	Makro baz istasyonu güç ve toplam hız değişim grafiği	77
Şekil 3.21.	Femto baz istasyonu sayısına göre DPSO Metodu ile koşma zamanı değişim grafiği.....	79
Şekil 3.22.	Femto baz istasyonu sayısına göre İki Katmanlı Ağ Metodu ile koşma zamanı değişim grafiği.....	79
Şekil 3.23.	WSEE maksimum olacak şekilde iterasyon sayısı ve Ews değişim grafiği	81
Şekil 3.24.	WSEE maksimum olacak şekilde iterasyon sayısı ve Enet değişim grafiği	81
Şekil 3.25.	WSEE maksimum olacak şekilde iterasyon sayısı ve toplam hız değişim grafiği.....	82
Şekil 3.26.	NEE maksimum olacak şekilde iterasyon sayısı ve Ews değişim grafiği ...	83
Şekil 3.27.	NEE maksimum olacak şekilde iterasyon sayısı ve Enet değişim grafiği ...	84
Şekil 3.28.	NEE maksimum olacak şekilde iterasyon sayısı ve toplam hız değişim grafiği.....	85
Şekil 3.29.	DPSO Metodu ile kullanıcılar tarafından kaynak blokların kullanılma sayıları değişim grafiği	86
Şekil 3.30.	İki Katmanlı Ağ Metodu ile kullanıcılar tarafından kaynak blokların kullanılma sayıları değişim grafiği	87
Şekil 3.31.	DPSO Metodu ile kullanıcılar tarafından kullanılan kaynak blok sayıları değişim grafiği	88
Şekil 3.32.	İki Katmanlı Ağ Metodu ile kullanıcılar tarafından kullanılan kaynak blok sayıları değişim grafiği	89

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 3.1.	Random dağılıma göre HetNets ağı matlab programı simülasyon parametreleri	61
Tablo 3.2.	Kullanıcı sayısı değişimlerine göre HetNets ağı matlab programı simülasyon parametreleri	63
Tablo 3.3.	Kaynak blok sayısı değişimlerine göre HetNets ağı matlab programı simülasyon parametreleri	66
Tablo 3.4.	Femto baz istasyonu sayısı değişimlerine göre HetNets ağı matlab programı simülasyon parametreleri	68
Tablo 3.5.	Statik güç değişimlerine göre HetNets ağı matlab programı simülasyon parametreleri	71
Tablo 3.6.	Femto baz istasyonu güç değişimlerine göre HetNets ağı matlab programı simülasyon parametreleri	73
Tablo 3.7.	Makro baz istasyonu güç değişimlerine göre HetNets ağı matlab programı simülasyon parametreleri	76
Tablo 3.8.	DPSO ve İki Katmanlı Ağ Metodu koşma zamanlarına göre HetNets ağı matlab programı simülasyon parametreleri	78
Tablo 3.9.	WSEE maksimum olacak şekilde iterasyon sayısına göre HetNets ağı matlab programı simülasyon parametreleri	80
Tablo 3.10.	NEE maksimum olacak şekilde iterasyon sayısına göre HetNets ağı matlab programı simülasyon parametreleri	83
Tablo 3.11.	Kullanıcılar tarafından her kaynak bloğun kullanılma sayılarına göre HetNets ağı matlab programı simülasyon parametreleri	86
Tablo 3.12.	Kullanıcılar tarafından kullanılan kaynak blok sayılarına göre HetNets ağı matlab programı simülasyon parametreleri	88

SEMBOLLER DİZİNİ

ABS:	Almost Blank Sub-frames (Neredeyse Boş Alt Çerçeveler) New-USP: new User Scattered Pilot (Yeni Kullanıcı Dağınık Pilot)
AP:	Access Point (Erişim Noktası)
AWGN:	Additive White Gaussian Noise (Toplanır Beyaz Gauss Gürültüsü)
BBU:	Baseband Unit (Temel Bant Birimi)
CDMA:	Code Division Multiple Access (Kod Bölmeli Çoklu Erişim)
C-HetNet:	Cache Enabled Heterogeneous Cellular Network (Önbellek Etkin Heterojen Hücresel Ağ)
CP:	Caching Phase (Önbelleğe Alma Aşaması)
CP:	Cyclic Prefix (Döngüsel Ön Ek)
CRAN:	Cloud Radio Access Network (Bulut Radyo Erişim Ağı)
CSI:	Channel State Information (Kanal Durum Bilgisi)
DFT:	Discrete Fourier Transform (Ayrık Fourier Dönüşümü)
DP:	Delivery Phase (Teslim Aşaması)
DPSO:	Discrete Particle Swarm Optimization (Ayrık Parçacık Sürü Optimizasyonu)
EC:	Energy Consumption (Enerji Tüketimi)
EE:	Energy Efficiency (Enerji Verimliliği)
FBS:	Femto Base Station (Femto Baz İstasyonları)
FBs:	Frequency Bands (Frekans Bandları)
FDM:	Frequency Division Multiplexing (Frekans Bölmeli Çoğullama)

FDMA:	Frequency Division Multiple Access (Frekans Bölmeli Çoklu Erişim)
FFR:	Fractional Frequency Reuse (Frekans Yeniden Kullanımı)
FFT:	Fast Fourier Transform (Hızlı Fourier Dönüşümü)
FU:	Femtocell User (Femto Hücre Kullanıcısı)
GSM:	Global System for Mobile Communications (Mobil İletişimler için Küresel Sistem)
H-CRAN:	Heterogeneous CRAN (Heterojen CRAN)
HetNet:	Heterogeneous Network (Heterojen Ağlar)
HomNet:	Homogeneous Network (Homojen Ağlar)
ICI:	Inter Cell Interference (Hücre İçi Girişim)
ICIC:	Inter Cell Interference Coordination (Hücreler Arası Girişim Koordinasyonu)
IDFT:	Inverse Discrete Fourier Transform (Ters Ayırık Fourier Dönüşümü)
IFFT:	Inverse Fast Fourier Transform (Ters Hızlı Fourier Dönüşümü)
IP:	Internet Protocol
IS-136:	Interim Standard-136 (Geçici Standart -136)
ISI:	Inter-Symbol Interference
LTE:	Long Term Evolution
MAI:	Multiple Access Interference (Çoklu Erişim Girişimi)
MBS:	Macro Cell Base Station (Makro Hücreli Baz İstasyonu)
MIMO:	Multiple Input Multiple Output
MINLP:	Mixed Integer Non Linear Program (Karma Tamsayılı Doğrusal Olmayan Program)

MMF:	Min – Max Fairness (Minimum ve Maksimum Adalet)
MSINR:	Maximum Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (Maksimum Sinyal-Parazit- artı - Gürültü Oranı)
MU:	Macro Cell Users (Makro Hücre Kullanıcıları)
MU:	Mobil User (Mobil Kullanıcı)
MU-MIMO:	Multiuser MIMO
NEE:	Network Energy Efficiency (Ağ Enerji Verimliliği)
NOMA:	Non Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Ortogonal olmayan Frekans Bölmeli Çoğullama)
OFDM:	Orthogonal Frequency - Division Multiple (Ortogonal Frekans Bölmeli Çoğullama)
OFDMA:	Orthogonal Frequency - Division Multiple Access (Ortogonal Frekans Bölmeli Çoklu Erişim)
OMA:	Orthogonal Multiple Access (Dikgen Çoklu Erişim)
PAPR:	Peak to Average Power Ratio
PDC:	Personal Digital Cellular (Kişisel Dijital Hücresel Ağ)
PF :	Proportional Fairness (Orantılı Adelet)
PSK:	Phase Shift Keying (Faz Kaydırmalı Anahtarlama)
PSO:	Particle Swarm Optimization (Parçacık Sürü Optimizasyonu)
QAM:	Quadrature Amplitude Modulation (Karesel Genlik Modülasyonu)
QoS:	Quality of Service
RF:	Radio Frequency (Radyo Frekansı)
RU:	Resource Unit (Kaynak Birimi) 802.11ax: Wi-Fi 6
SBS:	Small Cell Base Station (Küçük Hücreli Baz İstasyonu)
SC:	Superposition Coding (Süperpozisyon Kodlaması)

SC-FDMA:	Single Carrier FDMA
SE:	Spectrum Efficiency (Spektrum Verimliliği)
SIC:	Successive Interference Cancellation (Ardışık Girişim Giderici)
SNR:	Signal to Noise Ratio (Sinyal Gürültü Oranı)
SR:	Spectral Resource (Spektral Kaynak)
SSMA:	Spread Spectrum Multiple Access (Yayılı Spektrum Çoklu Erişim)
SU:	Small Cell Users (Küçük Hücre Kullanıcıları)
TDMA:	Time Division Multiple Access (Zaman Bölmeli Çoklu Erişim)
UE:	User Equipment (Kullanıcı Ekipmanı)
UHF:	Ultra High Frequency (Ultra Yüksek Frekans)
US:	User Terminal (Kullanıcı Terminali)
VLSI:	Very Large Scale Integration (Çok Geniş Ölçekli Tümleşim)
WSEE:	Weighted Sum Energy Efficiency (Ağırlıklı Toplam Enerji Verimliliği)

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Yüksek bant genişlikli haberleşmeye yönelik ihtiyacın gittikçe arttığı günümüz dünyasında insanlar büyük bir yoğunlukla işlerini internet üzerinden takip etmekte ve haberleşmesini de video, ses ve görüntü iletimi ile yine internet üzerinden gerçekleştirmektedir. Gelişen teknoloji, özel olarak da mobil cihazların yaygınlaşması haberleşmeye olan bu talebi daha da artırmaktadır. Sesin yanında görüntü aktarımının da önem kazanması ve veri iletimi talebi kablosuz haberleşme alanında yapılan çalışmaların hızlanmasını beraberinde getirmektedir. Bunun sonucunda kbps hız seviyelerinde olan kablosuz haberleşme hızları, günümüzde Gbps seviyelerine erişmiş ve söz konusu seviyeyi daha da ileriye taşımaya yönelik çalışmalar devam etmektedir (Rajagopal vd., 2012). Bu çalışmaların yoğunluk kazanmasında, diğer bir deyişle kablosuz veri transferi teknolojilerinin geliştirilmesinde ve çeşitli alanlarda uygulanmak istenmesinde, iş dünyasında geniş bant internet hizmetinin yoğun bir şekilde kullanılması etkili olmuştur. Hizmet alımının kablolarla bağımlı bir yapıda bulunması ve bu kablolu yerel ağların istenen düzeye genişletilmek istenmesi, yüksek mali harcamaları da beraberinde getirmektedir.

Bu ihtiyaçtan hareketle kablosuz ağlara ilişkin çeşitli ağ standartları oluşturulmaya başlanmıştır. Günümüzde veri transferinde kullanılan kızılötesi, bluetooth, mikrodalga noktadan - noktaya veri transferine; IEEE 802.11x ve IEEE 802.16 ise noktadan - çoklu noktaya veri transferine örnek olarak gösterilebilir.

Telekomünikasyon sistemlerinde, “Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM)” (*Orthogonal Frequency Division Multiple*), bir çeşit dijital verileri çoklu taşıyıcı frekanslarla kodlama veya dijital iletim yöntemidir. Aynı zamanda OFDM hem modülasyon türü hem de çoğullama tekniği olarak da kabul edilmektedir (Hara ve Prasad, 2003). DSL internet erişimi, kablosuz ağlar, dijital televizyon ve ses yayını, güç hattı ağları ve 4G / 5G mobil iletişim uygulamalarında kullanılan OFDM geniş bant dijital iletişim için bir şema haline gelmiştir (Ergen, 2009). OFDM, tüm alt taşıyıcıların birbirlerine dik konumda olduğu çok taşıyıcılı bir iletim şeklinin özel bir halidir. OFDM’nin performansı,

kullanıcılara olduğu kadar alt taşıyıcı atamasına da bağlıdır. OFDM kabul edilebilir bir karmaşıklıkla ve hassasiyette yüksek kullanıcı veri hızı ve iletim kapasitesi sunmaktadır (Tarokh, 2009). Bundan dolayı günümüzde birçok alanda OFDM kullanılmaktadır. OFDM'nin çalışma mantığı ise şu şekilde özetlenebilir. OFDM sahip olunan frekans spektrumlarını alt kanallara bölerek, paralel iletim yapılmasını ve dolayısıyla veri hızının önemli ölçüde artırılmasını sağlamaktadır. Ayrıca alt kanalların birbirlerine dik bir şekilde olması, bant genişliği açısından büyük ölçüde tasarruf sağlamaktadır (Goldsmith, 2005).

Mobil, televizyon ve web taraması gibi multimedya hizmetlerine olan taleplerin artmasıyla birlikte, çok noktaya yayın iletimi ve OFDMA sistemleri önem kazanmıştır. Tek “noktaya yayın” (*unicast*) sistemleri için yapılan çalışmalarda başarı elde edilirken, “çok noktaya yayın” (*multicast*) sistemlerinde hala istenilen noktaya varılamamıştır (Armstrong vd., 2014). Kaynakları tüketmeden; karmaşık kanal koşullarını ve orantılı tarafsızlık gerekliliğini de dikkate alarak tüm gruplara gerekli “servis kalitesi (QoS)” (*Quality of Service*)’ni sağlama noktasında karşılaşılan en büyük zorluk, alt kanalların tüm gruplanmış uygun kullanıcılara tahsis edilmesine ilişkin “dışbükey olmayan” (*non-convex*) problemi çözmektir. Ayrıca çok sayıda küçük hücreli “baz istasyonunun” (BS) hizmet verdiği son kullanıcı sayısı hızlı bir şekilde artmaktadır (Ding vd., 2014). Farklı türdeki küçük hücreler arasında, femtocell; küçük form faktörü, IP tabanlı olması ve herhangi bir ağ planlaması ve saha araştırması olmadan son kullanıcılar tarafından desteklenmesi gibi benzersiz özellikleri nedeniyle belki de en popüler olanıdır. Son araştırmalar, mobil verilerin %70’inin ve ses hizmetlerinin %50’sinin iç mekan femtocell BS’lerinden kaynaklandığını göstermektedir (Saqib vd., 2013). Femtocell “heterojen ağlar (HetNets)” (*Heterogeneous Networks*)’ı, femto hücrelerin geleneksel makrosellerin üzerinde mevcut bir alanda konuşlandırılmasıdır (Miao vd., 2012). Böyle bir mimari, daha yüksek kapsama alanı ve düşük güçle iletim, geliştirilmiş ağ kapasitesi, azaltılmış makro hücre yüklemesi ve maliyet avantajları gibi birçok fayda sağlayabilir. Sonuç olarak, yoğun küçük hücreli HetNet’ler, beşinci nesil (5G) sistemler için ana ağ mimarisi olacaktır (Osseiran vd., 2014). Öte yandan, OFDMA teknolojisinin, hücre içi girişim olmadan sistem kapasitesini iyileştirmesi beklenmektedir. Toplu olarak, yoğun OFDMA femtocell Hetnet’lerin yakın gelecekte en çok kullanılan ağ olması muhtemeldir (Lim vd., 2014). Hetnet’lerde enerji verimli kaynak tahsisi, farklı pratik gereksinimleri de hesaba katarak yapılmalıdır. BS’lerdeki iletim gücü bütçesinin yanı sıra, gecikmeye duyarlı kullanıcılar için minimum veri hızı ve gecikmeye toleranslı kullanıcılar arasındaki tarafsızlık dikkate alınmalıdır.

Bu çalışmada HetNet’lerde “Dikgen Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (OFDMA)” (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) ile kaynak tahsisi üzerine araştırma yapılmıştır. OFDMA kaynak tahsisi kapsamında hazırlanan bu çalışmada orantısız tarafsızlıkla birlikte düşük karmaşıklıkla kaynakların tahsisi, aşırı yoğun femtocell ağlar için kümelenmiş girişim temelli verimli alt ağların tahsisi ve heterojen ağlarda enerji verimli kaynak tahsisi gibi konular ele alınacaktır. Tez çalışması kapsamında öncelikle ilgili sistemlerin bilgisayar ortamında benzetimleri yapılacaktır. Benzetimleri yapılan sistemler için kaynak tahsisinde parçacık sürüsü optimizasyonu gibi metaherüstik yaklaşımlar kullanılacaktır.

Buradan hareketle çalışmanın birinci bölümünde öncelikle tez konusu ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar irdelenecektir. Ardından tez konusu ile doğrudan bağlantılı olan “wireless” (*kablosuz haberleşme*)’de kaynak tahsisi, OFDM, OFDMA, NOMA, TDMA ve HetNet” kavramları hakkında teorik bilgilere yer verilecektir.

Çalışmanın ikinci bölümünde bir kaynak tahsisi sorunsalı ele alınmıştır. Söz konusu sorunsalın analizinde “Ayrık Parçacık Sürü Optimizasyonu (DPSO)” (*Discrete Particle Swarm Optimization*) algoritması ve İki Katmanlı Ağ Metodu kullanılmıştır. Bu çerçevede OFDMA ile kaynak tahsisi yapılmıştır.

Çalışmanın üçüncü ve son bölümünde ise yapılan analizlerin sonuçları ortaya konulmuş ve bu sonuçlar üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır. Bu analizler sayesinde, her iki yöntemin de farklı parametrelerdeki performanslarının belirlenmesi ve en uygun parametrelerin belirlenmesi sağlanmıştır.

1.2. Literatür Taraması

Wong vd. (1999) tüm kullanıcıların aynı ortalama sinyal-gürültü oranlarına sahip olduğunu varsaydıkları çalışmalarında iletim gücünü en aza indiren OFDM iletimi çoklu erişim şemasını ele almışlardır. Bu bağlamda alt taşıyıcı tahsis algoritmaları ile klasik atama arasındaki benzerlik araştırılmış ve zayıflamalı kanalın zaman değişimini karşılamak için optimal bir tahsis yöntemi olan yapıcı atama ve yinelemeli iyileştirmeye dayalı gerçek zamanlı bir sezgisel alt taşıyıcı tahsis yöntemi önerilmiştir. Simülasyon sonuçlarından

hareketle önerilen tahsis yönteminin optimal çözüme çok yakın bir çözüm sağladığını ortaya koymuşlardır. Bu konuda benzer bir çalışma Zhang ve Letaief (2004) tarafından yapılmıştır. Söz konusu çalışmada uyarlanabilir kaynak tahsisi, geleceğin kablosuz sistemlerinde sınırlı güç ve spektrumun verimli kullanımını sağlamak için kilit teknolojilerden biri olarak tanımlanmış ve çok kullanıcı bir ortamda hücreler ortogonal frekans bölmeli çoğullama sistemleri için uyarlanabilir bir kaynak tahsis metodolojisi önerilmiştir. Buradan hareketle spektral verimliliği en üst düzeye çıkarmak için çok kullanıcı bir alt taşıyıcı ve bit yükleme şeması geliştirilmiştir. Ayrıca, aşırı yükleme ve düzgün olmayan trafik yoğunluğu problemiyle baş edebilmek için dinamik bir hücre seçim şeması oluşturulmuştur. Sayısal sonuçlar, sunulan algoritmanın çoklu kullanıcılar ve hücreler arası çeşitlilikten faydalanan bir şekilde, spektral verimlilikte önemli bir ilerleme kaydettiğini göstermektedir.

Büyük bant genişliğinde “milimetre dalgası” (*mmWave*) formunun kullanılması ve heterojen ağların “heterojen ağlar (HetNets)” (*Heterogenous Network*) konumlandırılmasının, 5G ağlarının veri hızı gereksinimlerinin giderilmesine yardımcı olması beklenmektedir. Fakat, *mmWave* frekans bandında gölgelenme, yüksek yol kaybı ve ağ yoğunluğu nedeniyle HetNets’lerde oluşan yüksek miktarda parazitlerin ve çeşitli hava etkilerinin çözülmesi gerekmektedir. Niknam vd. (2016) makro hücrelerin hizmet alanı içerisinde *mmWave* küçük hücrelerin konumlandırıldığı, röle tabanlı çok bantlı OFDMA HetNet’i ele almışlardır. Özellikle, verimli kaynak tahsisi yoluyla ağın genel veri hızını en üst düzeye çıkarmak için, *mmWave* bantlarının (60 Ghz – V- bandı ve 70-80 Ghz – E – bandı) ve uzun vadeli evrim bandının farklı yayılma özelliklerinden yararlanmaya çalışmışlardır. Bu doğrultuda HetNet yapısında farklı yayılma özelliklerine sahip *mmWave* frekans bantlarının kullanımı için yeni bir şema önerilmiştir. Ayrıca LTE bandı, alt taşıyıcı eşleştirmesi, alt taşıyıcı tahsisi ve röle seçimi ile beraber E- bandı ve V- bandının kullanımını içeren bir kaynak tahsisi problemi ele almışlardır. Önerilen şema ile beraber küçük *mmWave* BS’ler ile birleştirilmiş bir makro BS’ye sahip bir HetNet’in aşağı bağlantı senaryosuna uygulamışlardır. Sonuç olarak simülasyon sonuçlarında, önerdikleri şemanın geleneksel şemalardan çok daha iyi performans sergilediğini göstermişlerdir. Ayrıca E ve V bantlarının *mmWave* frekans seviyelerinde kullanımının, yayılma sorunlarının çözümünde önemli bir etkisi olduğunu saptamışlardır.

HetNet’lerde, “çok evli” (*Multihomed*) “kullanıcı ekipmanı (UE)” (*User Equipment*), çoklu “erişim seçeneklerini (AO)” (*Access Options*) aynı anda kullanır ve medya akışı benzeri uygulamayı desteklemek için farklı AO’lardan sunulan kaynakları toplar (Kuntz vd., 2013). Bu durumda kaynak optimizasyonunun iki önemli zor kısmı vardır. Bunlardan birinci, UE’ler ve AO’lar arasındaki bağlantı sonuçlarının belirlenmesi iken, ikincisi AO’ların ve UE’lere tahsis etmesi gereken radyo kaynaklarının belirlenmesidir. Wu vd. (2016) çalışmasında OFDMA tabanlı çok ana hatlı HetNet için enerji verimli kaynak optimizasyonunu araştırmışlardır. Kaynak optimizasyonuna çözüm olarak kesirli bir programlama teorisi tarafından bir dışbükey optimizasyon problemine dönüştüren içbükey olmayan bir EE maksimizasyon problemi olarak formüle etmişlerdir. Bu bağlamda, dışbükey optimizasyon problemini sırasıyla kombinasyon optimizasyon ve karma tam sayılı doğrusal olmayan optimizasyon olduğu kanıtlanmış bir topoloji oluşturma problemine ve kaynak tahsis problemine ayırmışlardır. Daha sonra, iki problemin çözümü için ilk olarak Markov yaklaşım çerçevesini ve ikinci olarak süreklilik gevşetme yöntemini kullanmışlardır. Sonuç olarak, çok girişli medya iletimini enerji verimli bir şekilde yapmak için ortak topoloji oluşturmuş ve kaynak tahsisi algoritmasını geliştirmişlerdir.

Son yıllarda, yüksek veri hızı ve düşük gecikme süreli multimedya hizmetlerine yönelik taleplerin karşılanması için kablosuz kenar önbelleğe alma teknolojisi ortaya çıkmıştır. (Bastug vd., 2014). Rezvani vd. (2019) iki farklı aşamada çalışan OFDMA tabanlı “önbellek etkin heterojen hücresel ağ (C-HetNet)” (*Cache Enabled Heterogeneous Cellular Network*) için verimli önbellek yerleştirme ve dağıtım yapmaya çalışmışlardır. Bunlar: “önbellekleme aşaması (CP)” (*Caching Phase*) ve “teslim aşaması (DP)” (*Delivery Phase*)’dır. “Mobil kullanıcılar (MU)” (*Mobile Users*) arasında, önbellek destekli kablosuz ağlarda adaleti garantilemek için “orantılı adalet (PF)” (*Proportional Fairness*) ve “minimum -maksimum adalet (MMF)” (*Min - Max Fairness*) olarak gecikmeye dayalı adalet planı önermişlerdir. Bu bağlamda PF planı, MU’ların toplam ağırlıklı gecikmesini en aza indirmeyi hedeflerken, MMF ise aralarındaki maksimum gecikmeyi en aza indirmeyi amaçlar. Ayrıca CP’de ana taşıyıcı iletimden ve esnek kablosuz erişim den faydalanarak her bir hedef adalet planına denk gelen yeni bir adalet ve iletme karşı hassas önbellek yerleştirme stratejisi önermişlerdir. Sonuç olarak PF ve MMF şemalarındaki her aşama için bir optimizasyon problemi önermişlerdir. Daha sonra spesifik olarak, PF şemasında, MU’ların toplam ağırlıklı gecikmesini ve MMF şemasında, sistemdeki MU’ların maksimum gecikmesini en aza indirmişlerdir. Yaptıkları simülasyon

sonuçlarında hem kanal koşullarının hem de fiziksel kaynakların depolama ve radyo olarak ortak tahsis edilmesinin faydalı olduğunu ortaya çıkarmışlardır.

Abdelnasser ve Hossain (2013) iki katmanlı OFDMA tabanlı bir HetNet'te alt kanal ve güç tahsisi problemini, ortak katman ve çapraz katman üzerindeki kısıtlamaların yanı sıra minimum veri hızı ihtiyaçlarının femtocell'lerin konuşlandırılmasındaki etkilerini incelemişlerdir. Ayrıca femtocell'lerin ayrık gruplar halinde kümelenmesinin (veya işbirliğinin) femtocell'lerin toplam hız kapasitesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Daha sonra problemi “karma tam sayılı doğrusal olmayan program (MINLP)” (*Mixed Integer Non Linear Program*) olarak formüle etmişlerdir ve problemi iki aşamada çözmüşlerdir. İlk aşamada, verilen güç tahsis için alt kanal tahsisi gerçekleştirmişlerdir. Bunun için değişen karmaşıklıkta alt kanal tahsisi önermişlerdir. İkinci aşama da ise alt kanal tahsisini bilerek, güç tahsisini gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak, sıkı girişim kısıtlamaları içeren femtocell'lerin yoğun yerleşiminde, kümelemenin çok verimli bir teknik olduğunu göstermişlerdir. Bu çalışmanın bir benzerinde García-Morales vd. (2015) hem makro hem de femto kullanıcıların ayarlanmasında, kullanıcı adaletini ve kanal durumunu dikkate alarak, OFDMA tabanlı iki katmanlı HetNet'lerin, aşağı bağlantı performansını etkileyecek şekilde, “kesirli frekans yeniden kullanımı (FFR)” (*Fractional Frequency Reuse*) ile beraber yeni bir çerçeve oluşturmuşlardır. Femtocell katmanının koordinasyonsuz olduğu ve makro hücreler üzerinde de ortak kanal konuşlandırıldığı var sayılmıştır. Önerdikleri çerçeve, katmanlar arası ve ortak katman etkileri tarafından üretilen etkiyi hesaba katarak hem makro hem de femto katmanda kaynak bloğu politikasının performans değerlendirmesine izin vermiştir. Sonuç olarak makro katmanla ilgili olarak, özel MSINR durumu için ve daha az olacak şekilde PF kuralı için makro hücre çıktı iyileştirmesinin, çok kullanıcıli çeşitliliğinin çok daha fazla kullanılmasıyla daha da vurgulandığı gösterilmiştir. Ayrıca makro hücre başına düşen “femto baz istasyonlarının (FBS)” (*Femto Baz Station*) sayısının artırılmasının, katmanlar arası girişimi artırdığını ve böylece herhangi bir zamanlama politikası için karşılaştırılabilir büyüklükte olduğu bulunan makro hücre veriminde önemli bir bozulmaya neden olduğunu göstermişlerdir. Femtocell katmanını da göz önüne aldıklarında da artan sayıda femto ile gözlenen bozulmaya, gelişmiş katman içi girişim düzeyinin neden olduğunu saptamışlardır.

LTE, yüksek spektral verimlilik, yüksek tepe veri hızlarının yanı sıra frekans ve bant genişliğinde esneklik elde etmek için kablosuz iletişim için bir standarttır (Pauli vd., 2010). LTE ağlarında frekansın yeniden kullanılması ile yüksek spektral verimlilik elde edilir. Bununla beraber, frekansın yeniden kullanılmasından kaynaklanan “hücreler arası girişim (ICI)” (*Inter Cell Interference*) bu ağlardaki temel sınırlamadır. Elfadil vd. (2015) hücre kenarı verimini artırmak için hücre kenarına düşük güçlü piko düğümleri yerleştirirken, hücre merkezine yüksek güçte iletim yapan bir makro düğümün yerleştirildiği bir makro – piko dağıtımı tasarlamışlardır. Makro ve piko bant genişliği bölümü hassas olduğu için farklı tahsis şemaları kullanmışlardır. Sonuç olarak makro ve piko arasında bant genişliği bölündüğünde veya piko tüm bant genişliğini kullanırken makro sadece bir kısmını kullandığında, hücre kenarı veriminin arttığını bulmuşlardır. Fakat bu, dahili kullanıcı veriminin azalmasına sebep olmuştur. Ayrıca piko düğümlerinin veri ilettiği “neredeyse boş alt çerçeveler (ABS)” (*Almost Blank Sub-frames*) kullanılarak verimin daha da artırılabilceğini saptamışlardır.

OFDMA sisteminde, iletişim bağlantısı 2 kısma sahiptir. Bunlar yukarı bağlantı ve aşağı bağlantıdır. OFDMA iletişiminde, yukarı bağlantıda tüm kullanıcılar bilgi sinyallerini aynı anda baz istasyonuna göndermektedir. Ayrıca, gerçek yer-uydu OFDMA bağlantı sisteminde, iletim sinyali, N noktalı IFFT tarafından gerçekleştirilmeden önce dönüştürücü çıkışındaki örtüşmeyi engellemek için M veri alt taşıyıcısının her iki tarafına 0 dolgulu olarak eklenmektedir. Bu sayede, baz istasyonundaki kanallar tahmin edildikten sonra N , M 'den büyük ve sınır etkisine sahip olmaktadır (Mata vd., 2015). Kullanıcı ve baz istasyonu arasındaki her kanalın, baz istasyonunda alınan birleştirilmiş sinyallerden tahmin edilmesi gerekmektedir. Aiempo vd. (2017) tarafından N nokta IFFT / FFT'nin M veri alt taşıyıcısından ($N > M$) daha büyük olduğu ve kanal tahmini için daha fazla doğruluk gerçekleştirebilen gerçek yukarı bağlantı OFDMA sistemi için bir kanal tahmin yöntemi önermişlerdir. Bu yöntem “yeni kullanıcı dağınık pilot (new-USP)” (*new User Scattered Pilot*)’dır. Bu sayede, $N > M$ olduğunda bile daha yüksek kanal tahmin doğruluğu gerçekleştirilebileceği görülmektedir. Bu nedenle, önerdikleri yöntemle, yüksek hızlı mobil ortam altında dahi gerçek yukarı bağlantı OFDMA sistemi ($N > M$) için tüm kanal bağlantılarını tam olarak tahmin etmeyi başarmışlardır.

Günümüzde sayıları oldukça artan erişim noktaları dikkate alındığında, gelecekteki iletişim sistemlerinin ekonomik / çevresel uygulanabilirliği ancak enerji tüketiminin

azaltılması ile mümkün olabilir. Sonuç olarak son yıllardaki araştırmalarda enerji verimli / yeşil iletişim sistemlerine yönelik çalışmalar artmıştır (Zhang vd., 2010; Jiang vd., 2013). Ayrıca bununla birlikte güç sınırlamasına odaklanılmıştır. Mobil cihazlar ve hücresel ağ sistemleri buna örnek olarak gösterilebilir (Correia vd., 2010; Auer vd., 2011). Enerji verimliliği, yeni nesil mobil ağlar için kritik bir parametre haline gelmiştir. Héliot vd. (2015) tarafından OFDMA ile iki katmanlı HetNet aşağı bağlantısı için bir EE problemi ele almışlardır. Mevcut araştırmaların aksine, belirli bir katman yerine tüm HetNet için enerji verimliliğini maksimuma çıkarmak için bir yeşil planlama şeması önermişlerdir. Çalışmalarında girişimin akıllı bir yaklaşımını kullanarak, bir kullanıcı bazında, alt taşıyıcı tahsisinin, zamanlama sürecinin karmaşıklığını azaltabileceğini ve doğrudan bir kullanıcı grubu için gerçekleştirilebileceğini göstermişlerdir. Sonuç olarak, yeşil programlama şemasına benzer bir EE performansı elde edebileceklerini saptamışlardır, fakat normal bir HetNet ortamında da her kullanıcı için daha az hesap karmaşıklığı ve daha adil oran elde etmişlerdir.

Son olarak başka bir çalışmada Kosta vd. (2013) tarafından çok hücreli OFDMA ağları için dağıtılmış, enerji verimli “hücreler arası girişim koordinasyonu (ICIC)” (*Inter Cell Interference Coordination*) şeması sunulmuştur. Ayrıca baz istasyonu tarafında, toplam ortalama iletim gücünü en aza indirmenin yanında genel sistemin kullanıcı adalet performansını da en üst düzeye çıkarmayı amaçlamışlardır. Bu yüzden baz istasyonu kısmında tüketilen gücü (*devre elemanlarında harcanan güç dahil*) hesaba katarak gerçekçi bir güç modeli tasarlamışlardır. Sonuç olarak dinamik ICIC şemalarının, femto hücrelerinde, kullanıcı deneyimini büyük ölçüde bozabilecek güçlü girişimlerden ötürü daha uygun olduğunu gözlemlemişlerdir.

1.3. Kablosuz Haberleşme (Wireless)

Kablosuz iletişim, günümüzde iletişim alanındaki konuların başında gelmektedir. 1960’lardan bu yana söz konusu alana ilgi duyulmakla birlikte, günümüzde bu ilgi gözle görülür bir şekilde artmaktadır. Bu durumun ortaya çıkmasında, birkaç faktörün yanı sıra kablosuz kanallar üzerinden nasıl iletişim kurulacağına dair teknolojik araştırmalar teşvik edici bir rol oynamaktadır (Tse ve Viswanath, 2005: 1). Teknoloji ile birlikte bilgisayar

ağlarının da gelişmesi “kablosuz” (*wireless*) ağların yaygınlaşmasını beraberinde getirmiştir. Kablosuz ağların yaygınlaşması, maliyetlerinin düşmesi ve bant genişliklerinin artması ile birlikte 3 - 4 bilgisayarın bulunduğu ofislerde bile kablosuz ağ kullanımı mümkün hale gelmiştir. Ofis içinde ve iş seyahatleri dolayısıyla sürekli hareket halinde olan çalışanlar başta olmak üzere tüm kullanıcılar için kablosuz ağlar en optimal ve kullanışlı bağlantı yöntemi niteliği kazanmıştır. Dolayısıyla kablosuz ağlara yönelik talep hızla artmış ve bu da söz konusu ağların giderek yaygınlaşmasına zemin hazırlamıştır.

Kablosuz ağ ile bir alıcı bilgisayarın kablosuz olarak bir vericiye bağlanarak iletişimi başlatması ifade edilmektedir. Kablo çekilmesinin uygun olmadığı veya yüksek maliyetlere yol açma potansiyeli taşıdığı yerlerde kablosuz ağ kurulması optimal bir çözüm imkanı sağlamaktadır (Onireti vd., 2011). Mevcut yararlarının yanı sıra kablosuz iletişimin etkisini azaltan iki temel faktör bulunmaktadır. Bunlardan ilki “sönümlleme olgusu” (*phenomenon of fading*); ikincisi ise parazittir (Tse ve Viswanath, 2005: 1). Bu iki temel yön ve bu bağlamda ortaya çıkan alt sorunlar kablolu iletişimde önemli olmasa da kablosuz haberleşmenin kalitesini ve niteliğini olumsuz etkileme potansiyeli taşımaktadır.

1.3.1. Kablosuz Haberleşmeyi Olumsuz Etkileyen Unsurlar

Diğer teknolojilerde olduğu gibi kablosuz haberleşme vasıtasıyla da ulaşılmak istenen bazı kazanımlar bulunmaktadır. Bunlar; yüksek spektral verimlilik, yüksek veri hızı, az gecikme ve uzun batarya ömrü şeklinde sıralanabilir (Nee ve Prasad, 2000). Söz konusu kazanımların elde edilmesi uzun süreli ve sürekli çalışmaların bir sonucudur. Bu noktada ise kanal karakteristiğinin bilinmesi son derece büyük bir önem arz etmektedir. Ancak kablosuz iletişimden beklenen çıktılar her zaman optimum düzeyde gerçekleşmez. Çünkü bunu engelleyen çeşitli faktörler bulunmaktadır. Söz konusu faktörler aşağıda ele alınmaktadır.

1.3.1.1. Yol Kaybı (Path Loss)

Radyo dalgalarının vericiden alıcıya iletilmesi, bu dalgaların fiziksel bir ortamdan geçmesini gerekli kılmaktadır. Söz konusu fiziksel ortam, dalgaların enerjisini ve etkisini zayıflatmaktadır. Bu yüzden bir alıcı antene gelen orijinal enerjinin oranı, verici ve alıcı antenler arasındaki mesafeyle ters orantılı olarak değişir. Boşlukta alınan enerji, uzaklığın karesiyle (d metre) ters orantılı olacaktır. Karasal sinyaller için alınan enerji de mesafe ile ters orantılı olarak değişir ($\frac{1}{d^\alpha}$ olarak), ancak çeşitli çevresel faktörlerde bu değer $\alpha > 2$ ile sonuçlanır. Çoğu hücresel ortamda da bu değer $3.5 \leq \alpha \leq 4.5$ arasında yer almaktadır. Yönlü antenlerden iletilen sinyaller, alınan enerji ve mesafe arasında da benzer bir ilişki vardır. Ancak orantı sabiti, verici ve alıcı antenlerin doğası tarafından belirlenen anten kazanımlarına bağlıdır (Myung ve Goodman, 2008: 16-17).

1.3.1.2. Gölgeleme (Shadowing)

Eğer yol kaybı sinyali zayıflatan tek faktör kabul edilseydi, bu durumda eşit uzaklıktaki alıcı ve vericilerin enerji seviyelerinin eşit olması gerekirdi. Oysa hat üzerinde farklı unsurlar, diğer bir deyişle çeşitli engeller yer almaktadır. Bu bağlamda sinyali etkileyen diğer bir unsur “gölgeleme” (*shadowing*)’dir.

Bu konuda yürütülen çalışmalar, gölge zayıflaması nedeniyle dB cinsinden ölçülen sinyal gücü dağılımının bir Gauss rastgele değişkeni olarak doğru bir şekilde temsil edilebileceğini ortaya çıkarmıştır. Söz konusu değişkenin ortalama değeri sıfırdır ve σ standart sapma değerinin belirlenmesi ise, ki bu değişken genellikle $6\text{dB} \leq \sigma \leq 10\text{dB}$ aralığında değer alır, hücresel servis bölgesinin değişkenliği ile doğrudan bağlantılıdır. Standart sapma değerleri kentsel alanlarda yüksek; kırsal alanlarda ise kentlere göre nispeten daha düşük çıkmaktadır. Bir konumdan diğerine hareket ettikçe gölgeleme etkileri kademeli olarak değişir ve bu hareket mesafesi boyunca önemli bir korelasyon gözlemlenmektedir. Buradan hareketle gölge sönümlenmenin ortaya çıkması için belirli bir mesafe kat edilmesi gerekmektedir ve bu durum “yavaş sönme” (*slow fading*) kavramı ile ifade edilmektedir (Myung ve Goodman, 2008: 18).

1.3.1.3. Doppler Etkisi

Doppler etkisi, dalga hareketinin, kaynağından veya gözlemleyenden uzaklaşması veya yaklaşması durumunda ortaya çıkan frekans değişikliğini ifade eder. Örneğin; iletilen sinyalin bir sinüs dalgası, verici veya alıcının da hareket halinde olması ile bu durumda alınan sinyal içindeki, tek bir ışının frekansı, iletilen sinyalin frekansından farklıdır. Bu fark ise Doppler kayması terimi ile nitelendirilmektedir. Frekans farkı, ışının geliş açısının kosinüsü ile de orantılıdır. Hücresel sistemlerde saçılma, alınan sinyalin, alınan anten üzerine düşen farklı açılardan gelen birçok ışının bir bileşimi olmasına neden olur (Myung ve Goodman, 2008: 17-18).

1.3.1.4. Semboller Arası Girişim (Inter Symbol Interference)

Bir kaynaktan gönderilen sinyaller, çalışma ortamının özelliklerinden dolayı, iletilen sinyalin bileşenleri, zeminden, çevredeki doğal ve yapay yapılar üzerindeki yansımalarından sonra alıcıya ulaşır. Bu durum çok yollu yayılım şeklinde tanımlanır ve söz konusu yayılım şekli hücresel sinyal iletiminde yaygın bir olgudur. İlave olarak bu yayılım türünde kanalın dürtü yanıtı, farklı sinyal bileşenlerinin yol uzunluklarıyla orantılı olarak göreceli gecikmelerle gelen bir dizi darbe olarak modellenenebilir. Bir alıcıya gönderilen sinyalin süresinin T saniye olduğunu varsayarsak, alıcıya bu sinyalin T saniyeden daha geç ulaşan kopyaları (saçılma ve yansımalarından kaynaklı) semboller arası girişim oluşmasına sebep olur. Bu durumun iletim sistemleri üzerindeki etkisi, kanal darbe yanıtı süresinin artma eğilimi göstermesidir. Semboller arası girişimin en yaygın ölçüsü “rms gecikme yayılımı” (*rms delay spread*), τ_{rms} saniyedir. Bu gecikme yayılımı, aynı zamanda darbe yanıtının bileşenlerinin büyüklüklerinin ve zaman farklılıklarının bir fonksiyonudur. Beklenen maksimum gecikme yayılımı, τ_{max} saniye, en kısa ve en uzun sinyal yolu arasındaki gecikme farkıdır ve yol uzunluğundaki farkla orantılıdır. Yol uzunluğu farklılaşmasında ise hücresel hizmet alanının fiziksel özellikleri belirleyici olmaktadır (Myung ve Goodman, 2008: 19).

1.3.1.5. Düz Sönümlleme ve Frekans Seçici Sönümlleme (Fading)

Bir cep telefonunun bir servis alanı içerisinde hareketi boyunca, baz istasyonu tarafından alınan sinyallerin gücünde hızlı dalgalanmalar olmaktadır. Buna etki eden olay sinyal saçılması ve çok yollu iletimdir. Bu değişimin sebebi, iletilen sinyalin taşıyıcı frekansının aralıklı konumlarda dalga boyu sırasına göre belli aralıklardaki konumlarda alınan sinyal güçlerindeki farklılıklardır. Bu olaya genellikle, gölgeleme sönümllemesinden ayırt etmek için hızlı solma, diğer bir deyişle *sönümlenme* denir. Bu iki olayda sinyal güçlerindeki farklılıklar değişiklik göstermektedir. Gölgeleme sönümlenmesinde sinyaller metrelik alanlarda etkiliyken, hızlı sönümlleme de sinyaller santimetrelik alanlarda etkilidir. Hızlı sönümllemenin, alınan hücrel sinyaller üzerindeki etkisi, kanalın frekans tepkisinin genişliği ile kanalın sinyal bant genişliği arasındaki ilişkiye bağlıdır. Frekans tepkisi, dürtü tepkisinin Fourier dönüşümüdür. Frekans tepkisinin genişliği, çok yollu biçimin rms gecikme yayılımıyla ters orantılıdır. Sinyal bant genişliği, baz istasyonu frekans yanıtının (Hz) genişliğine oranla küçük olduğu durumda, hızlı sönümlleme “düz” (*flat*) olarak isimlendirilir. Çünkü iletilen sinyalin tüm frekans bileşenleri yaklaşık olarak eşit zayıflatılır. Aksi halde hızlı sönümlleme “frekans seçici” (*frequency-selective*)’dir (Myung ve Goodman, 2008: 19).

1.3.1.6. Toplanır Beyaz Gauss Gürültüsü (AWGN)

İlk olarak “Toplanır Beyaz Gauss Gürültüsü (AWGN)” (*Additive White Gaussian Noise*), sinyalin iletişim kanalında, ilerlemesi sırasında sinyale eklenen rastgele gürültüdür. Bu gürültü, Gauss dağılımına sahip olur ve “beyaz” olarak adlandırılır. Bunun sebebi tüm frekanslarda düz bir güç spektral yoğunluğu olmasıdır. AWGN, sinyal gücünün sabit bir ortalama değerine sahip olduğunu ve gürültünün normal dağılımlı olduğunu varsayar. Gauss olasılık dağılımı genel olarak normal dağılım şeklinde de bilinir.

AWGN kanal modeli, gerçek ortamlarda sinyal yayılmasını tam olarak yansıtmaz. Fakat, sistemin performansını tahmin etmek ve hata oranlarını azaltmak için kullanılması

yararlıdır (Forney ve Ungerböck, 1998). Özellikle, sistemlerin gürültüye karşı duyarlılığını ölçmek için kullanılabilir.

AWGN kanalı, modülasyon işlemlerinin analizlerinin yapılmasında kullanılan bir kanal modelidir. Bu modelde, kanalı kullanan sinyale beyaz Gauss gürültüsü eklenir. Bu modelin matematiksel gösterimi aşağıdaki gibidir.

$$Y_i = s_i + n \quad (1.1)$$

Yukarıdaki bağıntı (1.1.)' deki denklemde s_i ; modüle edilmiş sinyali, Y_i ise alıcıya gelen sinyal ve n ; AWGN gürültü sinyali olarak gösterilmektedir.

AWGN kanalının Gauss olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıda matematiksel olarak gösterilmiştir.

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad -\infty \leq x \leq \infty \quad (1.2)$$

Gerçek ortamlarda, sinyal yayılması sırasında ortama eklenen gürültünün türü ve miktarı değişebilir. Örneğin; elektrikli cihazlar veya sistemler arasındaki gürültü, AWGN modelinde tanımlanmış olan beyaz Gauss gürültüden farklı olabilir. Bu nedenle, gerçek ortamlarda sistemlerin performansını tahmin etmek ve hata oranlarını azaltmak için daha kapsamlı veya uyarlanmış modeller kullanılabilir.

Bu Gauss gürültüsü, birçok sistemde kabul edilebilir düzeyde olmasına rağmen, haberleşme sistemlerinde olumsuz etkilere yol açabilir.

AWGN'nin, haberleşme sistemlerinde olumsuz etkileri şu şekilde ortaya çıkabilir:

1.Bit hata oranını artırır: AWGN, haberleşme sisteminde kullanılan veri sinyallerinin gürültü altında kalmasına neden olur. Bu, veri sinyallerinin alıcıda yanlış olarak algılanmasına ve böylece bit hata oranının artmasına neden olabilir.

2.Verimliliği düşürür: AWGN, haberleşme sistemi verimliliğini düşürebilir, çünkü veri sinyallerinin gürültü altında kalmasını engellemek için sistem daha fazla güç harcamak zorunda kalır.

3.Bant genişliği artırır: AWGN, haberleşme sistemi için daha geniş bir bant genişliği gerektirebilir ancak, daha fazla bant genişliği kullanmanın enerji ve güç gereksinimlerini de artırabileceği dikkate alınmalıdır.

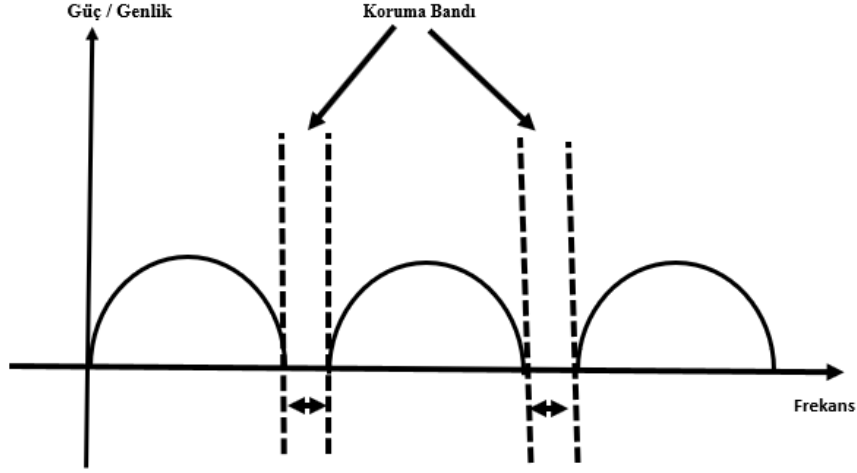
AWGN gibi gürültülerin etkilerini azaltmak için haberleşme sistemlerinde tercih edilen teknikler arasında sıklıkla kullanılanı, sinyal / gürültü oranını artırmak için kodlama veya gürültü azaltıcı filtreler kullanmaktır (Geng ve Nair, 2014).

AWGN'nin "sönümleme" (*fading*)'den farkı, sönümlemenin tahmin edilebilir ve modellenilebilir olması, AWGN'nin ise rastgele bir etkisi olduğu ancak istatistiksel olarak modellenilebilir olmasıdır (Krishna vd., 2016). Sönümleme, beamforming, çeşitlilik ve hata düzeltme gibi teknikler kullanarak azaltılabilirken, AWGN, sistemin SNR değeri artırılarak düzeltilir.

1.4. Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (FDMA)

İlk olarak kısaca "Frekans Bölmeli Çoğullama (FDM)" (*Frequency Division Multiplexing*)'dan bahsederek; FDM, düşük bant genişliğine sahip kanalları yüksek bant genişliğine sahip bir kanal üzerinden ileten fiziksel bir katman tekniğidir. Buna örnek olarak çok sayıda düşük hızlı sinyali iletmek için fiber optik kablonun kullanılması verilebilir.

"Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (FDMA)" (*Frequency Division Multiple Access*) ise bir kanal erişim yöntemidir. FDMA, spektrumun frekans bileşenini, bir kullanıcının kanallardan birinde iletmeye ve alma yapmasına izin verecek şekilde birkaç kanala bölmeye dayanır (Ergen, 2009: 56). Bu kanallardan sızıntıyı önleme için her kanal arasına bir frekans aralığı konur; fakat bu durum FDMA'yı çok verimsiz hale getirir. Eğer bir kanal boşta ise yeni bir kullanıcıya tahsis edilir. Buna rağmen, FDMA aynı anda sadece birkaç kullanıcıyı desteklediğinden dolayı sadece birinci nesil hücresel sistemlerde kullanılmaktadır. FDMA'da koruma bandı gereklidir ve bu bant Şekil 1.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. FDMA’da koruma bant gösterimi

FDMA sistemleri ortalama gecikme yayılımına göre daha düşük bit hızları kullandığından aşağıdaki avantajları sunar:

- Semboller arası girişim azaltılır.
- Eşitleme gerekli değildir.
- FDMA sistemleri kolayca uygulanabilir.
- İletim sürekli olacağından çerçeveleme ve senkronizasyon için daha az miktarda bit gerekmektedir.

Sayılan avantajlarının yanı sıra FDMA sistemlerinin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlardan birkaç tanesi aşağıda sıralanmıştır:

- Kanal başına maksimum akış hızı sabit ve küçüktür.
- Kanallar arasında bulunan koruma bantları kapasitenin verimsiz kullanılmasına yol açar.
- Donanım açısından, VLSI’da gerçekleştirilemediğinden dolayı maliyeti artıran dar bant filtreleri gerektirir.

1.5. Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (TDMA)

“Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (TDMA)” (*Time Division Multiple Access*), dijital hücresel telefon ve mobil radyo iletişimde kullanılan bir erişim yöntemidir (Boukerche

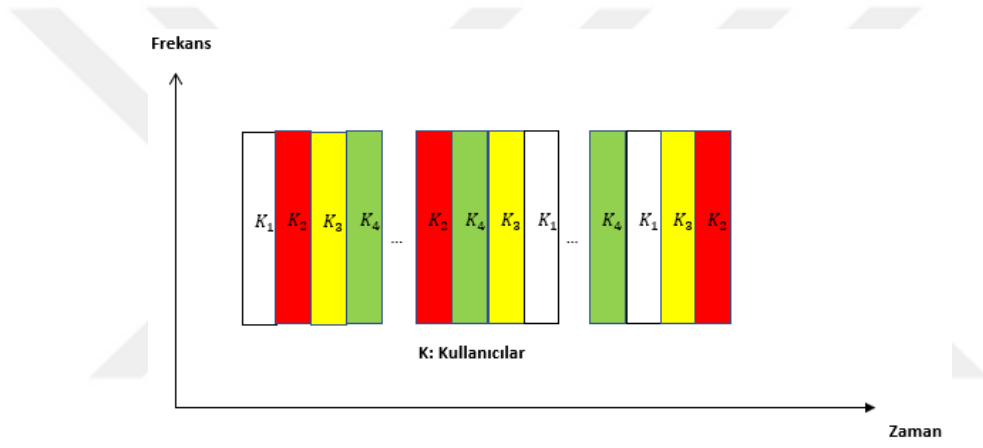
ve Dash, 2003). En basit biçimde TDMA, her bir hücresele kanalı, farklı zaman dilimlerine ayırarak, birden fazla kullanıcının aynı frekans bandını paylaşmasına imkan sağlamaktadır. Gerçekte, tek bir frekans, çoklu ve eş zamanlı veri kanallarını desteklemektedir. Böylece, iki zamanlı bir TDMA ile 2 kullanıcı aynı frekansı paylaşırken 3 zamanlı bir TDMA sisteminde 3 kullanıcı aynı frekans bandını paylaşabilmektedir.

TDMA’da kullanıcılar, her biri kendi zaman dilimini kullanarak hızlı bir biçimde art arda iletim yapmaktadır (Chen vd., 2008). Bu işlemler o kadar hızlıdır ki, her bir kullanıcı aynı anda aynı “radyo frekansı (RF)” (*Radio Frequency*) kanalını işgal ettiğini düşünür. TDMA, her kullanıcı için ayrı bir bant genişliği tahsis ederek kanal üzerinden iletebilecek veri miktarını artırırken, eş zamanlı konuşmalara izin vermektedir.

TDMA’da sistem boyutları zaman eksenini boyunca örtüşmeyen kanallara bölünür ve her kullanıcıya döngüsel olarak tekrarlanan farklı zaman dilimleri atanmaktadır. Bu TDMA kanalları; tipik bir şekilde, geniş bant olan tüm sistem bant genişliğini işgal eder, bu sebeple bir tür ISI azaltması gerekmektedir (Jakllari vd., 2012). Çevrimsel olarak tekrar eden zaman aralıkları, veri aktarımının herhangi bir kullanıcı için sürekli olmadığını ifade eder. Bu nedenle, tamponlamaya izin veren iletişim teknikleri gereklidir. İletimin devamlı olmaması, kanal tahmini gibi genel giderleri basitleştirir, çünkü bu işlevler diğer kullanıcılar tarafından kullanılan zaman aralıklarında gerçekleştirilebilir. TDMA’nın avantajlarından birisi de tek bir kullanıcıya birden çok zaman dilimi atayarak birden çok kanal atamanın basit hale gelmesidir.

TDMA’nın yukarı bağlantı kanalları için önemli bir zorluğu, farklı kullanıcılar arasında senkronizasyon gerekliliğidir. Spesifik olarak, bir aşağı bağlantı kanalında, tüm sinyaller aynı vericiden çıkar ve aynı kanaldan herhangi bir alıcıya geçer. Bu sebeple, düz sönümlemeli kanallar için, eğer kullanıcılar ortogonal zaman aralıklarında iletim yaparsa, alınan sinyal bu ortogonallığı koruyacaktır. Bununla beraber, yer-uydu bağı kanalında kullanıcılar, farklı gecikmelerle farklı kanallar üzerinden iletim yapmaktadırlar. Alınan sinyallerde ortogonal zaman aralıklarını korumak için, farklı yer uydu hattı vericileri, ilgili kanalların iletiminden sonra, alınan sinyallerin zamanda ortogonal olacak şekilde senkronize olmasını sağlamalıdır. Bu senkronizasyon tipik olarak baz istasyonu veya erişim noktası tarafından koordine edilir ve önemli miktarda ek yüke neden olmaktadır (Jindal ve Goldsmith, 2005). Çok yönlü gecikmeler bir zaman aralığının önemli bir kısmını oluşturuyorsa, çok yönlülük ayrıca hem yukarı bağlantılarda hem de aşağı bağlantılarda

zaman bölmeli ortogonallığı yok edebilir. Bu sebeple, TDMA kanalları, senkronizasyon hatalarını ve çoklu yolu telafi etmek için genellikle aralarında koruma bantlarına sahiptir. TDMA'daki bu koruma bantları; koruma süresi yani boş süredir. (Stavroulakis, 2003). TDMA'nın başka bir zorluğu da döngüsel olarak tekrar eden zaman dilimleri ile kanal özelliklerinin her döngüde değişmesidir. Bu sebeple, eşitleme gibi kanal tahminleri gerektiren alıcı fonksiyonları, her döngüde kanalı yeniden tahmin etmelidir. İletim sürekli devam ettiğinde kanal izlenebilir ve bu daha verimli olur. TDMA, GSM, PDC ve IS-136 dijital cep telefonu standartlarında kullanılmaktadır (Pätzold, 2002). TDMA'nın frekans ve zaman domeninde gösterimine Şekil 1.2.'de yer verilmiştir.



Şekil 1.2. Zaman bölmeli çoklu erişim gösterimi

1.6. Kod Bölmeli Çoklu Erişim (CDMA)

Kod Bölmeli Çoklu Erişim (CDMA)” (*Code Division Multiple Access*) çeşitli sinyallerin tek bir iletim kanalını kullanmasını kolay hale getiren bir tür çoğullama tekniğidir (Madhow ve Honig, 1994). Mevcut bant genişliği kullanımını optimize eder. Genel olarak 800 Mhz ile 1.9 GHz arasında değişen bantlar olan “ultra yüksek frekanslı (UHF)” (*Ultra High Frequency*) cep telefonu sistemlerinde kullanılmaktadır (Verdú ve Shamai, 1999).

CDMA sistemi, zaman ve frekans çoğullamadan çok farklıdır. Bu sistem içerisinde bir kullanıcının tüm süre boyunca tüm bant genişliğine erişimi vardır (Wu vd., 2002). Bu nedenle yayılı “spektrum çoklu erişim” (SSMA)” (*Spread Spectrum Multiple Access*)

olarak da ifade edilir. Temel ilke, farklı kullanıcıları ayırt edebilmek için farklı CDMA kodlarının kullanılmasıdır.

CDMA’da doğrudan dizi yayılma spektrumu tekniği kullanılarak, her kullanıcı sinyalini, tüm bant genişliğine yaymaktadır. Böylece herhangi bir kullanıcının verilerinin demodüle edilmesi sırasında diğer kullanıcılardan gelen sinyallerde sözde beyaz gürültü olarak görünmektedir. Bu sayede, aynı hücredeki tüm kullanıcılar tüm zaman-frekans serbestlik derecelerini paylaşmakla kalmaz, benzer şekilde farklı hücrelerdeki kullanıcılar da paylaşır. CDMA sisteminin önemli özelliklerinden biri de frekans aralıklarının yeniden kullanılmasıdır.

Genel olarak, CDMA sistemlerinin temel mantığı şu şekildedir;

İlk olarak, herhangi bir kullanıcının etkilendiği parazit, beyaz Gauss gürültüsüne olabildiğince benzetilir ve bu girişimin gücü, mümkün olduğunca minimum seviyede ve tutarlı biçimde tutulur. Bu şu şekilde sağlanır:

- Her kullanıcının alınan sinyalini mümkün olabildiğince rastgele hale getirmek.
- Her kullanıcının aldığı gücün demodülasyon için gereken minimum seviyeden fazla olmamasını sağlamak için aynı hücredeki kullanıcılar arasında güç kontrolünün yapılması. Bu sayede baz istasyonlarına daha yakın olan kullanıcılardan gelen parazitlerin daha uzaktaki kullanıcıları çok etkilememesi için yapılır. (yakın-uzak sorunu olarak adlandırılır)
- Yakındaki hücrelerde coğrafi olarak dağılmış birçok kullanıcının müdahalesinin ortalamasının alınması. Bu ortalama, yalnızca toplam girişimin Gauss gibi görünmesini sağlamakla kalmaz, daha da önemlisi, parazitlerin değişen konumlarından dolayı girişim seviyesinin rastgeleliğini azaltır ve böylece bağlantı güvenirliliğini artırır. Frekans aralıklarının yeniden kullanımının geniş bantlı bir sistemde mümkün olmasına karşın dar bantlı bir sistemde imkansız olmasının temel nedeni budur.

Frekans aralıklarının yeniden kullanımı, tüm hücrelerdeki kullanıcıların, sistemin tam bant genişliğine ulaşımını veya serbestlik derecesini alması anlamına gelir. Dar bantlı sistemlerde, kullanıcı başına serbestlik derecesi sayısı, hem bir hücre içinde kaynakları paylaşan kullanıcı sayısı hem de frekans yeniden kullanım faktörü tarafından indirilir. Bununla beraber, bir CDMA sisteminin kullanıcısı başına serbestlik derecelerindeki bu

artış, bireysel bağlantıların serbestlik derecesi başına daha düşük bir sinyal parazit artı SNR pahasına gelmektedir (Veeravalli ve Mantravadi, 2002).

Bir kullanıcının performansı sadece toplu girişim düzeyine bağlı olduğundan, CDMA yaklaşımı otomatik olarak kullanıcıların kaynak değişkenliğinden yararlanır; bir kullanıcı veri iletimini durdurursa, toplam parazit düzeyi otomatik olarak düşer ve diğer tüm kullanıcılara fayda sağlar. Kullanıcıların etkinliklerinin birbirinden bağımsız olduğunu varsayarsak, bu, sistemin her kullanıcının sürekli iletim yapması durumunda mümkün olandan daha fazla kullanıcıyı barındırmasını sağlamak için istatistiksel bir çoğullama etkisi sağlar. Dar bant sistemlerinden farklı olarak, zaman ve frekans dilimlerinin açık bir şekilde yeniden atanması gerekmez.

Dar bantlı bir sistemde, zaman-frekans yuvaları bittiğinde yeni kullanıcılar bir ağı kabul edilemez. Bu, sisteme sabit bir kapasite sınırı getirir. Buna karşılık, bir CDMA sistemindeki kullanıcı sayısını artırmak, toplam girişim düzeyini artırmaktadır. Bu, bir sistemin performansında daha az bir düşüşe izin verir ve sistem üzerinde esnek bir kapasite sınırı sağlamaktadır (Gelabert vd., 2008).

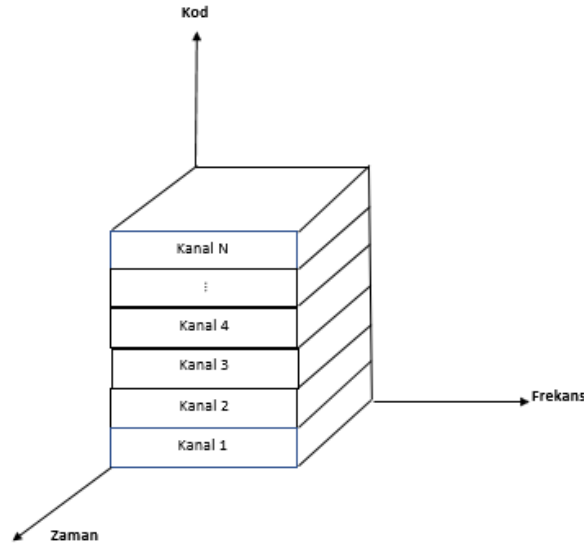
Tüm hücreler ortak bir spektrumu paylaştığından, bir hücrenin ucundaki bir kullanıcı, alımı iyileştirmek için iki veya daha fazla baz istasyonundan sinyal alabilir ve iletebilir. Buna yumuşak geçiş denir ve yine başka bir çeşitlilik tekniğidir, ancak ağ seviyesindedir (bazen makro çeşitlilik olarak ifade edilir) (Khan vd., 2015). CDMA sistemlerinin kapasitesini artırmak için önemli bir mekanizmadır.

Bunun yanında CDMA'nın eksik yönlerinden bahsetmek gerekirse;

- Kod uzunluğu önem arz etmektedir. Çünkü büyük bir kod uzunluğu gecikmeye veya girişime neden olabilir.
- Zaman senkronizasyonu gereklidir.
- Kademeli aktarım, radyo kaynaklarının kullanımını artırır ve kapasiteyi azaltabilir.

Bir CDMA sisteminde, kullanıcılar birbirlerine neden oldukları girişim yoluyla etkileşime girerler. Bu sebeple sistemin performansı bu girişimin yönetilmesine bağlıdır.

CDMA'nın frekans, zaman ve kod ekseninde gösterimi aşağıda Şekil 1.3.'te gösterilmiştir.

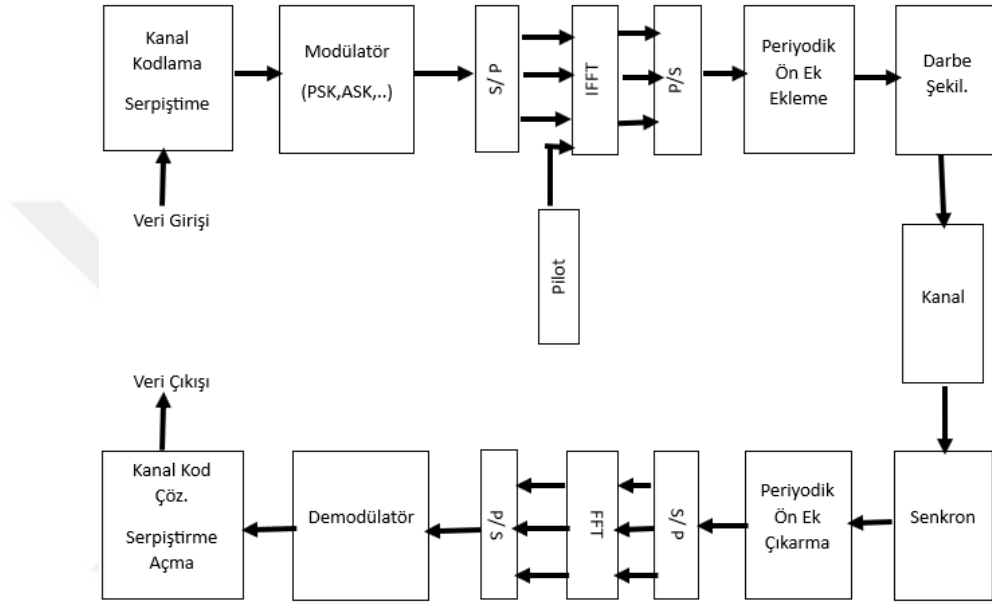


Şekil 1.3. Kod bölmeli çoklu erişim gösterim

1.7. Dikgen Frekans Bölmeli Çoklama (OFDM)

OFDM, tek bir bilgi iletiminin, tek bir geniş bant kanal frekansının kullanılması yerine birden fazla birbirine yakın aralıklarda dar bant alt kanal frekanslarına bölündüğü bir veri iletim yöntemidir (Wang vd., 2004). Genellikle kablosuz veri aktarımında kullanılır, fakat fiber optik ve kablolu iletişimde de kullanılabilir. Çoklu yol yayılımlarından kaynaklanacak gecikme yayılımlarını küçültebilmek için toplam bant genişlikleri dar bantlı alt kanallara bölünür. OFDM'nin tercih sebeplerinden bazıları dar bant girişimine karşı direnci artırması veya frekans seçici sönmülemesidir. Bundan farklı olarak birbirlerine dik olan alt taşıyıcılar, bant genişliğini en verimli şekilde kullanmaktadırlar. OFDM yönteminin avantajlarının yanında, sistem tasarımına önem verilmediğinde sistemin olumsuz şekilde etkilenebileceği problemleri de bulunmaktadır. OFDM sisteminin tek taşıyıcılı bir sistemle kıyaslanmasındaki en önemli nokta, frekans ve zaman, eş-zamanlama hatalarına karşı hassas olmasıdır. Sistemi optimum hale getirebilmek, frekans ve zaman hatalarına karşı sistemi korumak için eş-zamanlama işlemine ihtiyaç vardır. OFDM sisteminde alıcının ve vericinin frekansları aynı ise, OFDM alıcısı alt taşıyıcıları demodüle etmeden önce iki eş zamanlama işlemi gerçekleştirmelidir. İlk aşamada, sembollerin başlangıç yeri belirlenmeli, ikinci aşamada ise alınan işaretin taşıyıcı frekans kaymalarının belirlenmesi sağlanmalıdır (Stuber vd., 2004). Bu frekans ve

zaman, eş-zamanlama hataları onarılmadığı zaman “semboller arası girişim (ISI)” (*Inter-Symbol Interference*) ve “taşıyıcılar arası girişim (ICI)” (*Inter Carrier Interference*) oluşur ve bu sebeple sistem düzgün bir biçimde çalışmayacaktır. OFDM sisteminde verici kısmına pilot işaretler göndererek eş-zamanlama ayarlaması yapılır. Bu durum Şekil 1.4.’te belirtilmiştir.



Şekil 1.4. OFDM sistemi temel blok diyagramı

OFDM, birden fazla alt taşıyıcının modüle edilerek paralel veri iletişiminin yapıldığı bir yöntemdir. Mevcut bant genişliği bu alt taşıyıcılara bölünür ve her alt taşıyıcının frekans bandı birbirinden ayrılarak alt taşıyıcıların birbirlerine dik olması sağlanır. Bu taşıyıcıların arasındaki dikgenliğin anlamı; her alt taşıyıcının bir sembol periyodu üzerinde tam sayı periyotlara sahip olmasıdır. Bununla birlikte her taşıyıcının spektrumu, diğer taşıyıcıların merkez frekanslarında sıfır olacaktır. Bu durum taşıyıcılar arasında spektral kesişme neden olmasına karşın bir girişim meydana getirmeyecektir. Taşıyıcıların birbirleri arasındaki bu ayrılık teorikte minimum olacak ve bu sayede spektral verimlilik daha iyi şekilde sağlanacaktır. OFDM sistemleri genel olarak frekans seçimli çoklu yolun meydana getirdiği ISI probleminin çözümünün de kullanılan bir yöntemdir. OFDM sisteminin temel blok diyagramı Şekil (1.4.)’te gösterilmektedir. OFDM, kullanılacak modülasyon ve giriş verisi ile birlikte gereken spektrumun seçilmesiyle meydana getirilir. Sistem için gereken

taşıyıcı ve genlik fazı modülasyon işlemine (BPSK, QPSK, QAM) göre hesaplanır. Bundan sonra “ters fourier dönüşümü (IIFT)” (*Inverse Fast Fourier Transform*) ile spektrumu zaman uzayına; “hızlı fourier dönüşümü (FFT)” (*Fast Fourier Transform*) ile de zaman uzayından frekans uzayındaki bir işarete çevirir. IFFT ve FFT vektörünün boyutu, çoklu yol kanalı ile meydana gelen hatalara karşı sistemin direncini belirler. Vektörün boyutu, alınan çoklu yol işaretindeki yankılanmaların maksimum gecikmesinden büyük olacak şekilde seçilir.

OFDM’de koruma bandına ihtiyaç yoktur ve OFDM’nin spektral verimi FDMA’ya göre yüksektir.

1.7.1. Dikgenlik

Dikgenlik ifadesi matematiksel olarak taşıyıcı frekanslar arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. Genel olarak normal frekans bölmeli çoklama işlemlerinde farklı taşıyıcılar arasında koruma bantları olması gerekir. Periyodik ön ek’in kullanıldığı bu durumlarda spektrum verimi azalmaktadır (Bahai, 2004).

OFDM’de taşıyıcıların birbirlerine dik olarak kullanılmasının temel sebebi; birbirleri üzerine bindirilen ardışık taşıyıcılar arasında, girişimin oluşmasını engellemektir. Aşağıdaki (1.3) numaralı bağıntıda sinyallerin dikgenlik ifadesi gösterilmektedir.

$$\int_a^b \Psi_p(t) \Psi_q^*(t) dt = f(x) = \begin{cases} D, & p = q \\ 0, & x \neq q \end{cases} \quad (1.3)$$

Bağıntı (1.3)’deki denklemin matematiksel olarak gösteriminde, Ψ_p ifadesi kümenin p. elemanını; Ψ ifadesi ise sinyal kümesini göstermektedir. Kompleks eşlenik işlemi ‘*’ işareti ile ifade edilmektedir. Sembol periyodu ise [a, b] aralığı olarak gösterilmektedir. Dikgenlik kullanılarak sinyallerin taşıyıcılarda tekrar kullanılması mümkün hale gelmektedir.

1.7.2. Çok Taşıyıcılı Haberleşme

İletim kanalında meydana gelebilecek istenmeyen durumlar, sinyalin üretilmesi ve bilginin alıcıda daha anlaşılır duruma gelmesi için matematiksel ifadelerin ve tanımlarının bilinmesi gerekmektedir. OFDM yapısında veriler frekans düzleminde birbirlerine çok yakın olacak şekilde ve çok sayıda dar bant içererek iletilmektedir. Bu sistemlerde sayısal işaret işleme teknikleri kullanılmaktadır (Madawala, 2011). Doğrusal modüle edilmiş sistemde bant genişliği B , veri hızı da R kabul edilmiştir. Bu sistem alt taşıyıcılara bölündüğü durumda alt taşıyıcılara ait bant genişliği $B_N = \frac{B}{N}$ 'dir. Alt taşıyıcıların veri hızı ise $R_N \approx \frac{R}{N}$ 'dir. Sembol zamanı olan T_N ile alt taşıyıcı genliği $\frac{1}{B_N}$ birbirleriyle orantılıdır. Aralarındaki ilişki şu şekildedir; $T_N \approx \frac{1}{B_N} \gg T_m$. Buradaki T_m ifadesi kanaldaki gecikme yayılımını göstermektedir. Alt taşıyıcılardaki ISI bozulmasını azaltmak için N değeri oldukça büyük seçilmelidir. Yükseltilmiş kosinüs darbesi $c(t)$ olarak varsayılmaktadır. Alt kanalların sembol zamanı $T_N = \frac{1+\beta}{B_N}$ şeklinde ifade edilmektedir. Bağtıda yer alan β ifadesi darbe şekline yuvarlama faktörünü göstermektedir. İletilen sinyali meydana getirmek için alt kanallarda modüle edilen sinyaller toplanır. Matematiksel gösterim aşağıdaki (1.4) bağıntısında gösterilmektedir.

$$s(t) = \sum_{i=0}^{N-1} s_k c(t) \cdot \cos(2\pi f_i t + \phi_i) \quad (1.4)$$

Bu gösterimdeki s_k , i 'ninci alt taşıyıcının sahip olduğu karmaşık sembolleri ifade etmektedir. ϕ_i , i 'ninci faz kaymasını göstermektedir.

Aşağıda ise $\frac{\epsilon}{T_N}$ zaman sınırlamalı darbe şekilleri sebebiyle gerekli ek bant genişliğini ifade etmektedir. Örtüşmeyen alt kanallara ait gereken toplam bant genişliği aşağıdaki (1.5) bağıntısında ifade edilmektedir.

$$B = \frac{N(1 + \beta + \epsilon)}{T_N} \quad (1.5)$$

Bu durum çok taşıyıcılı modülasyonlarda spektral verimsizliğe neden olabilmektedir. Bu sebeple ideale yakın alçak geçiren filtre tasarımlarının kullanılması alt taşıyıcıların dikgenliğini korumak için uygun gözükmemektedir.

Çok taşıyıcılı modülasyonda ayrılmış olan alt kanalları üst üste bindirerek spektrum verimliliği artırılabilir. Fakat bu durumda alıcı kısmın da ayrılabilmesi için alt taşıyıcıların birbirlerine dik olması gerekir. Alt taşıyıcılar $\cos\left(2\pi\left(f_0 + \frac{i}{T_N}\right)t + \phi_i\right)$, $i = 0, 1, 2 \dots$ biçiminde ifade edilebilir.

$$\int_0^{T_N} \cos\left(2\pi\left(f_0 + \frac{i}{T_N}\right)t + \phi_i\right) \cdot \cos\left(2\pi\left(f_0 + \frac{j}{T_N}\right)t + \phi_j\right) dt \quad (1.6)$$

$$= \int_0^{T_N} 0.5 \cos\left(\frac{2\pi(i-j)t}{T_N} + \phi_i - \phi_j\right) dt = 5T_N \delta(i-j) \quad (1.7)$$

Alt taşıyıcılarda $[0, T_N]$ aralığında dikgenlik ifadesinin bozulmaması için istenen minimum frekans ayrımı $\frac{1}{T_N}$ olması gerekmektedir. Dikgenliğin bozulmadığı durumlarda alt taşıyıcılar birbiri üstüne binmiş olsalar dahi alıcı tarafta ayırt edilebilmektedir. Birbiri üstüne gelen alt kanalların toplamdaki bant genişliği aşağıdaki (1.8) bağıntısında gösterilmektedir.

$$B = \frac{N + \beta + \epsilon}{T_N} \approx \frac{N}{T_N} \quad (1.8)$$

Kanalın $h(t)$ ve gürültünün $n(t)$ ihmal edilmesiyle gerçekleşen hesaplamalarda alıcı tarafta elde edilen $s(t)$ için her sembol ayrıştırıcısının girişi;

$$\hat{s}_i \int_0^{T_N} \left(\sum_{j=0}^{N-1} s_j c(t) \cdot \cos(2\pi f_i t + \phi_i) \right) \cdot c(t) \cos(2\pi f_i t + \phi_i) dt = \sum_{j=0}^{N-1} s_j \delta(j-i) = s_i \quad (1.9)$$

Kanal etkisini ve gürültüyü eklediğimizde i 'ninci alt kanal, kanal kazancını ifade eden $a_i = H(f_i)$ ile orantılı hale gelir. Buradaki H genlik cevabını ve f_i i 'ninci alt kanalın merkez frekansını temsil eder. Bu ifade, kanalın frekans bağımlılığını ifade ederek, her bir alt kanalın bant genişliği üzerindeki etkisini belirtir. Bu durumda $\tilde{s}_k = a_i s_k + n_{gi}$ ile gösterilir. Bu ifadede g_{gi} , AWGN'dir. Kanalların birbiri üzerine geldiği sistemler kanalları örtüşmeyen sistemlere kıyasla çok daha verimli bant genişliği kullanımına imkan tanımaktadır.

1.7.3. OFDM Ayırık Fourier Dönüşümü

OFDM sistemleri birbirinden farklı modülasyon teknikleri ile modüle olmuş alt taşıyıcıların toplamlarından meydana gelmektedir. Duruma göre “faz kaydırmalı anahtarlama (PSK)” (*Phase Shift Keying*) veya “karesel genlik modülasyonu (QAM)” (*Quadrature Amplitude Modulation*) kullanılmaktadır. $x[n]$, $0 \leq n \leq N-1$ ayırık zaman dizisini ifade etmektedir. N noktasında $x[n]$ 'in ayırık fourier dönüşümü aşağıdaki bağıntı (1.10)'daki matematiksel denklemde görülmektedir.

$$DFT\{x[n]\} = X[i] \triangleq \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\frac{2\pi ni}{N}}, \quad 0 \leq i \leq N-1 \quad (1.10)$$

Bu denklemde $x[n]$ dizisi ters ayırık fourier dönüşümü ile DFT' den kurtarılmaktadır.

$$IDFT\{X[i]\} = x[n] \triangleq \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=0}^{N-1} X[i] e^{j\frac{2\pi ni}{N}}, \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (1.11)$$

Donanım kısmında yapılan bu işlemler FFT ve IFFT olarak gerçekleştirilmektedir. Bu sistemlerde elde edilen $y[n]$ çıktısı, ayrık zamanlı bir kanal $h[n]$ ile girdisi $x[n]$ tarafından hesaplanmaktadır.

$$y[n] = h[n] * x[n] = x[n] * h[n] = \sum_k h[k]x[n-k] \quad (1.12)$$

Bu denklemden $x[n]$ ve $h[n]$ 'e ait N noktalı dairesel evrişimin gösterimi aşağıdaki (1.13) bağıntısındaki gibidir.

$$y[n] = h[n] \otimes x[n] = x[n] \otimes h[n] = \sum_k h[k] x[n-k]_N \quad (1.13)$$

Bağıntı (1.13)'deki denklemde $[n-k]_N$, $[n-k]$ 'nin N periyodu ile periyodik bir çeşididir. Bu ifade $[n-k]_N$ modüle N'yeyi göstermektedir. Buradaki ifadede zaman domenindeki dairesel evrişim frekans, domenindeki çarpmaya çevrilmiştir.

$$DFT\{y[n] = x[n] \otimes h[n]\} = X[i]H[i], 0 \leq i \leq N-1 \quad (1.14)$$

Kanalın dairesel biçimde evrişim gösterdiği ve alıcı taraftaki $h[n]$ 'nin bilinmesi halinde gönderilen veri $x[n]$, $\frac{Y[i]}{H[i]}$ 'nin IDTF'si alınarak elde edilebilmektedir. Fakat kanalın dairesel evrişim olmadığı durumlarda, doğrusal evrişime koruma ağırlığı ekleyerek dairesel evrişime çevrilebilmektedir.

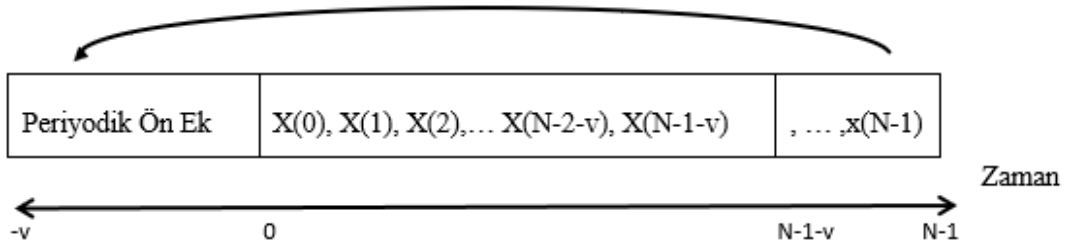
1.7.4. OFDM Döngüsel Ön Ek

“Döngüsel ön ek (CP)” (*Cyclic Prefix*) kullanımı, OFDM sinyalinin güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlayan temel bir unsurdur (Zhang vd., 2017). CP, her OFDM simgesinden önce aynı sembolün uç kısmının bir kopyası olacak şekilde oluşturulur. Döngüsel ön ek; OFDM sinyallerini, semboller arasında meydana gelen girişimden

korumak için bir tampon bölge veya koruma aralığı görevi sağlar. Bu durum, çok taşıyıcılı OFDM sinyalinde iletilen çok daha küçük düşük veri hızlarında dahi bazı durumlarda sorun çıkarabilir. Bu ön ek taşıyıcı sinyallerin dikgenliğine etki etmemektedir. Döngüsel ön ek tarafından getirilen koruma aralığı, semboller arasında oluşacak, semboller arası girişimin etkilerinin azaltılmasına yardımcı olur. Fakat pratik uygulamalarda ISI tam olarak engellenememiştir. Tam olarak OFDM sembolünün bant sınırlı olmaması, kanalların diğer kanallara enerji yayması ve yolluluk etkileri ISI' nın meydana gelmesine neden olmaktadır (Huck vd., 2005). CP halihazırda aktarılmakta olan verileri tekrar ilettiği için sistemin kapasitesini kaplar ve genel veri hızını düşürür aynı zamanda iletilen veri kapasitesini azaltmaktadır. Sistemde kullanılan bir ön ek, sistem için ek bir yükür bu yüzden daha fazla işlenmeden alıcı tarafında atılır.

CP'yi oluşturmak için sembolün uç kısmından v uzunlukta bir parça alınarak dizinin baş tarafına eklenir ve sonraki durumda verici tarafından gönderilen sinyalden, alıcı tarafta eklenen CP kaldırılmaktadır. CP uzunluğunun belirlenmesi ISI meydana getirmeyecek şekilde en fazla kanal gecikme yayılımından daha uzun veya eşit olacak şekilde seçilmelidir.

OFDM'de döngüsel önek kullanımı standarttır ve yansıma düzeylerinin ve çok yollu yayılımların yüksek olduğu durumlarda bile performansın korunmasını sağlar. Periyodik Ön Ek yapısına Şekil 1.5.'te yer verilmiştir.



Şekil 1.5. Periyodik ön ek yapısı

$x[n]$ işareti darbe tepkesi $h[n]$ olan bir kanal üzerinden iletiildiği düşünülüğünde kanal çıkışı $y[n]$, $0 \leq n \leq N - 1$ matematiksel olarak aşağıda gösterilmiştir.

$$y[n] = x[n] * h[n] = \sum_{k=0}^{\mu-1} h[k] x[n-k] = \sum_{k=0}^{\mu-1} h[k] x[n-k]_N = x[n] \otimes h[n] \quad (1.15)$$

Bu kısımda sisteme döngüsel bir ön ek dahil edilerek sistem doğrusal evrişimden döngüsel evrişimli biçime getirilmektedir. Sistemde gürültü olmaması ve DFT işlemi uygulandığında aşağıdaki bağıntı (1.16)'daki matematiksel denklem elde edilir.

$$Y[i] = DFT\{y[n] = x[n] \otimes h[n]\} = X[i]H[i], 0 \leq i \leq N-1 \quad (1.16)$$

Sistemde sinyalin iletildiği kanalın $h[n]$ bilindiği durumlarda $y[n]$ kullanarak $x[n]$ verisi elde edilebilmektedir.

$$x[n] = IDFT\left\{\frac{Y[i]}{H[i]}\right\} = IDFT\left\{\frac{DFT\{y[n]\}}{DFT\{h[n]\}}\right\} \quad (1.17)$$

1.7.5. OFDM Matris Gösterimi

Matris gösterimi OFDM'nin farklı gösterim şekillerinden biridir. Ayrık zamanlı bir kanalda “sonlu bir dürtü yanıtı (FIR)” (*Finite Impulse Response*) $h[n]$, $0 \leq n \leq \mu$, $x[n]$ giriş işareti, $n[n]$ gürültü ve $y[n] = x[n] * h[n] + n[n]$ çıkışı göstermektedir. Gösterilen dizinin n 'inci elemanı $h_n = h[n]$, $x_n = x[n]$, $n_n = n[n]$ ve $y_n = y[n]$ göstermektedir. OFDM sisteminin matris biçimi aşağıdaki bağıntı (1.18)'deki şekildedir. İletilen sinyal bağıntı (1.19)'deki gibidir.

$$\begin{bmatrix} y_{N-1} \\ y_{N-2} \\ \vdots \\ y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 & \dots & h_\mu & 0 & \dots & 0 \\ 0 & h_0 & \dots & h_{\mu-1} & h_\mu & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & h_0 & \dots & h_{\mu-1} & h_\mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{N-1} \\ \vdots \\ x_0 \\ x_{-1} \\ \vdots \\ x_{-\mu} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{N-1} \\ n_{N-2} \\ \vdots \\ n_0 \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

Basit olarak bağıntı (1.19)'deki şekildedir.

$$y = Hx + n \quad (1.19)$$

Alıcı tarafına iletilen semboller kendinden önceki veri bloğunda ISI'dan etkilendiklerinden dolayı çıkartılmaktadır.

$$\begin{bmatrix} y_{N-1} \\ y_{N-2} \\ \vdots \\ \vdots \\ y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 & \dots & h_\mu & 0 & \dots & 0 \\ 0 & h_0 & \dots & h_{\mu-1} & h_\mu & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & h_0 & \dots & h_{\mu-1} & h_\mu \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_2 & h_3 & \dots & h_{\mu-2} & \dots & h_0 & h_1 \\ h_1 & h_2 & \dots & h_{\mu-1} & \dots & 0 & h_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{N-1} \\ x_{N-2} \\ \vdots \\ \vdots \\ x_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{N-1} \\ n_{N-2} \\ \vdots \\ \vdots \\ n_0 \end{bmatrix} \quad (1.20)$$

Basit olarak, bağıntı (1.21)'de yer alan denklemdeki şekildedir.

$$y = \tilde{H}x + n \quad (1.21)$$

Sisteme dahil edilen döngüsel ön ek, N x N boyutlu $\tilde{H}$ matrisinin döngüsel evrişimli şeklindeki modellenmesine olanak sağlamaktadır. Bu matris bir öz değer ayrıştırmasına sahiptir.

$$\tilde{H} = M\Lambda M^H \quad (1.22)$$

Yukarıdaki denklemde Λ öz değerlerin köşegen matrisini göstermektedir. M^H ise $\tilde{H}$ matrisine ait öz vektörleri gösteren üniter bir matristir. Aşağıdaki denklemde DFT'nin $x[n]$ üzerindeki işlemi gösterilmektedir.

$$X = Qx \quad (1.23)$$

$$Q = \frac{1}{\sqrt{N}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & W_N & W_N^2 & \dots & W_N^{N-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & W_N^{N-1} & W_N^{2(N-1)} & \dots & W_N^{(N-1)^2} \end{bmatrix} \quad (1.24)$$

Yukarıdaki bağıntıda $W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$ için;

$$Q^{-1} = Q^H \quad (1.25)$$

$$x = Q^{-1}X = Q^H X \quad (1.26)$$

Sistemde öz değer λ , öz vektör v ile ifade edildiğinde $\lambda v = H v$ biçimde ifade edilmektedir.

Üniter matris ifadesi M^H , H 'ın öz vektör satırlarını içerir. DFT matrisi Q 'nın satırlarının $Q = M^H$ ve $Q^H = M$ açıkladığı $\tilde{H}$ 'ın öz vektörleri olduğu aşağıdaki denklemde gösterilmektedir.

$$Y = Qy = Q[\tilde{H}x + v] = Q[\tilde{H}Q^H X + v] = Q[M\Lambda M^H Q^H X + v] = QM\Lambda M^H Q^H X + Qv \quad (1.27)$$

$$= M^H M \Lambda M^H M X + Qv = \Lambda X + v_Q \quad (1.28)$$

Yukarıdaki matematiksel ifadelerde Q üniter matris olduğu için v_Q ve Qv aynı gürültü matrisine sahiptir. Bu sebeple gürültü halen AWGN'dir ve aynıdır. Bir döngüsel ön

ek ekleyerek ve DFT işlemini kullanarak OFDM'nin N adet alt kanala bölündüğü ve bunun için H bilgisinin lazım olmadığı görülmektedir.

1.8. Dikgen Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (OFDMA)

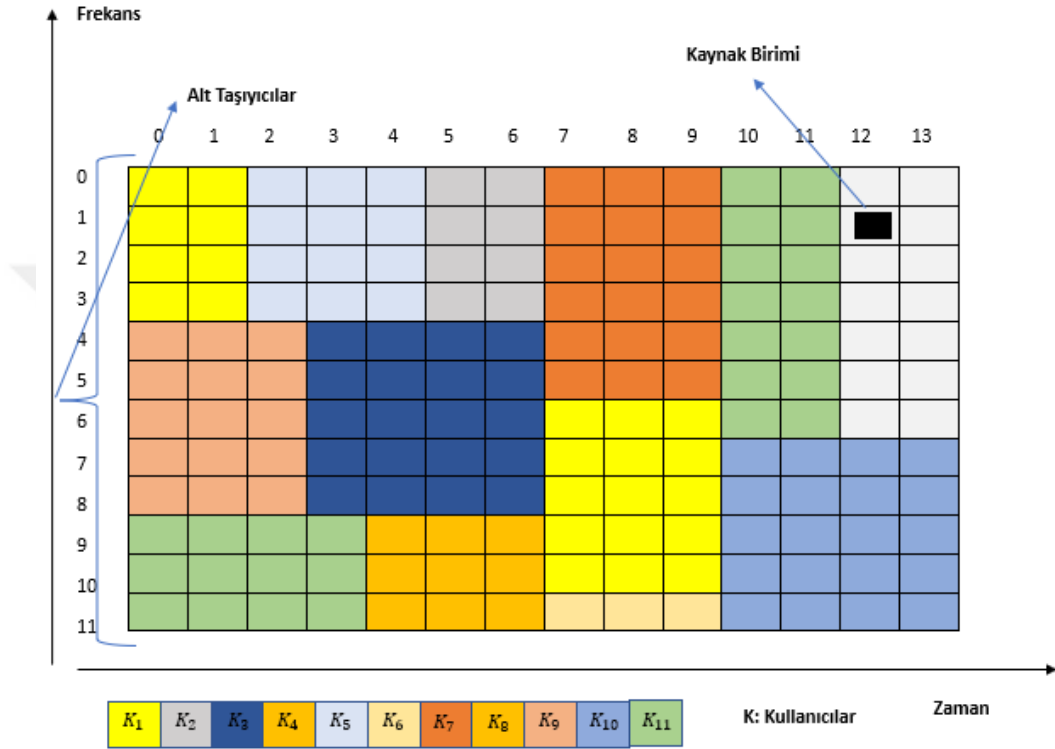
1.8.1. OFDMA Tanımı

“Dikgen Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (OFDMA)” (*Dikgen Frekans Bölmeli Çoklu Erişim*), OFDM dijital modülasyon teknolojisinin çok kullanıcı bir versiyonudur (Sari, 1997). 802.11a/g/n/ac radyoları şu an 802.11 frekans bandında tek kullanıcı veri aktarımı için OFDM kullanmaktadır. OFDMA, bir kanalı “kaynak birimleri (RU)” (*Resource Unit*) olan daha küçük sabit boyutlu zaman - frekans tahsislerine böler (Ha ve Le, 2014). Bir kanalı daha küçük alt kanallara bölerek eş zamanlı olarak veri iletimini gerçekleştiren bir teknolojik altyapıya sahip olan OFDMA (López-Pérez vd., 2009), bu özelliği aracılığıyla oluşturduğu küçük çerçeveler sayesinde birden fazla kullanıcıya paralel iletimle eş zamanlı olarak veri iletimi yapar. OFDMA kullanarak, bir 802.11ax AP aynı anda küçük frameleri dokuz 802.11ax istemcisine iletebilir. OFDMA'lar daha küçük frameler için iletim ortamının daha verimli bir şekilde kullanılmasıdır.

Ayrıca OFDMA, Wi-Fi 6'nın tartışmasız en önemli özelliğidir. Kısaca, mevcut bant genişliğini paylaşarak birden fazla istemcinin bir “erişim noktası (AP)” (*Access Point*)'ndan aynı anda iletim veya alım yapmasına imkan tanır. OFDMA'nın spektral verimliliği, iletim gecikmesini veya orta ya da yüksek tıkanıklık seviyesine sahip RF ortamındaki gecikmeyi iyileştirir (Kaneko vd., 2016). Ek olarak, çarpışmalarda ve çekişme süresinde azalma nedeniyle belirli Wi – Fi 6 dağıtımlarında verimi de artıracaktır.

Bu teknolojinin çalışma mantığını şu şekilde açıklamak mümkündür: Farklı kullanıcılara alt taşıyıcılar atayarak ve OFDM sistemine çoklu erişim ekleyerek kanal kaynaklarının çok kullanıcı çoklu erişim yapmasını sağlar. OFDMA, bir kanal bant genişliğindeki alt taşıyıcıların “kaynak birimleri (RU)” (*Resource Unit*) adı verilen daha küçük bölümler halinde gruplandırılmasına izin verir. Her RU en az 26 alt taşıyıcıyı içerir ve bir kullanıcı, zaman – frekans RU'ya göre ayırt edilir (Lai vd., 2016). Bu modda, kullanıcı verileri her RU'da taşınır. Bu bağımsız RU'lar farklı istasyonlara atanır ve bu,

erişim noktalarının, yukarı bağlantı ve aşağı bağlantı iletimleri sırasında onlara aynı anda hizmet vermesine imkan sağlar. Bu sayede, toplam zaman – frekans kaynakları açısından, Şekil 1.6.’da gösterildiği gibi, birden çok kullanıcı her zaman diliminde aynı anda veri gönderebilir.



Şekil 1.6. OFDMA'nın gösterim şekli

OFDMA, OFDM için çoklama şemasıdır. OFDMA, OFDM'nin bütün avantaj ve dezavantajlarını devralır ve bazı yeni özellikler gösterir. Çoklama, birçok kullanıcı paketinin yukarı bağlantı ve aşağı bağlantı için tek bir çerçeveye paketlenmesini sağlar. Sonuç olarak, çoğullama şeması çerçeveler arası boşluktan kaynaklanan genel giderlerin en aza indirilmesi anlamında çok verimli hale gelir.

1.8.2. Geniş Bantlarda Niçin OFDMA Kullanılır

OFDMA 4G hücresel sistemlerin spektrum erişimi için seçilmiştir. OFDMA'nın dikeyliği hücre içi girişimi yok ettiğinden dolayı daha yüksek kapasite sunmaktadır.

Viterbi (1995)'nin de çalışmasında değindiği üzere bir CDMA sisteminin, C_{CDMA} 'nın kapasitesi, hücre içi girişim ve hücreler arası girişimin toplamı olan toplam girişim ile sınırlıdır. Ortalama hücreler arası ve hücre içi girişim güçlerinin oranına eşit bağıl girişim faktörü f ile gösterilir. OFDMA'da hücre içi girişim ortadan kaldırıldığı için, bir yaklaşım olarak kapasitesi yükseltilir.

$$C_{OFDMA} = \frac{1+f}{f} C_{CDMA} \quad (1.29)$$

f değeri, kullanıcının baz istasyonlarına nasıl bağlı olduğuna ve kablosuz kanala bağlıdır. Normal bir senaryoda, $f \approx 0.5$ ile 1 arasındadır.

OFDMA'nın en belirgin özelliklerinin başında, geniş sinyal dinamik aralığıyla çoğullanmasına imkan tanınmasıdır. Kablosuz haberleşmenin yapısı gereği, baz istasyonlarının yakın çevrelerindeki kullanıcıların, baz istasyonlarına uzaktaki kullanıcılara göre daha yüksek bir kanal kazancına sahip olmasıdır. OFDMA'da, yakındaki kullanıcıdan alınan yer-uydu hattı sinyali, uzaktaki kullanıcıdan alınandan daha güçlü olabilir, bu sebeple çok fazla sistem kaynağına gerekmeksizin yüksek bir veri hızı elde edilebilir. Bununla beraber, dikgenlik olmadan, alınan sinyaller benzer seviyelere ulaşabilmek için güç kontrollü olmalıdır, aksi takdirde yakındaki kullanıcıdan gelen güçlü sinyal, uzaktaki kullanıcıda gelen zayıf sinyalleri bastıracaktır. Sonuç olarak, performans en kötü kanal durumu ile sınırlıdır. Baz istasyonunun, uzaktaki kullanıcı için harcayacağı iletim gücü tarafından bastırılmadan yakındaki kullanıcı için sadece küçük bir iletim gücü tahsil edilebilmesi, bu duruma benzer bir gözleme örnektir.

OFDMA'nın ikinci bir özelliği, bant genişliği kaynağının ince ayrıntı düzeyi, OFDMA'nın bant genişliği kaynağını esnek bir biçimde kullanmasını ve tahsis etmesini sağlar. Bant genişliği kaynak birimi, OFDMA sembolündeki bir tondur. Esneklik, paket anahtarlama programların zamanla değişen trafik ihtiyaçlarına ve kanal dalgalanmalarına hızlı bir biçimde yanıt vermesini sağlar. Sonuç olarak gecikmeye duyarlı uygulamalar için düşük gecikme süresidir.

OFDMA'nın üçüncü bir özelliği, kablosuz kanalı, her biri tek dokunuşlu bir kanal tepkisi ile karakterize edilen, frekansta bir dizi paralel düz alt kanallara ayırır. Bu, MIMO

gibi daha gelişmiş sinyal işleme tekniklerinin uygulamalarını basit hale getirir ve ayrıca hem girişimin hem de kanalın seçiciliğinden faydalanmaya yardımcı olur. Buna ek olarak, tek tonlu bir sinyal, ince ayarlı zaman ve frekans senkronizasyonu olmadan kolayca algılanabilir ve bu sayede sistem belirlemeyi ve geçiş başlatmayı kolaylaştırır.

1.8.3. OFDMA'nın Diğer Yöntemler ile Karşılaştırılması

Genel olarak baktığımızda FDMA, TDMA, CDMA, OFDMA ve SDMA için çoğullama yöntemleri benzerdir. Her durumda, çok sayıda iletişim kanalı, tek bir iletişim kanalı oluşturmak için birlikte çoğullanır. İletişim kanalları daha sonrasında her biri farklı olacak şekilde bir kullanıcıya atanan çok sayıda alt kanala bölünür. Çoğullama, birden çok sinyali tek bir sinyalde çoğullayan veya birleştiren bir iletişim tekniğidir (Radunovic ve Le Boudec, 2004).

OFDMA, TDMA ve FDMA şemalarının avantajlarını devralır. Paket boyutları açısından da CDMA'daki gibi esneklik sağlar. Kullanıcının iletilecek paketi varsa, sadece ne kadar iletmesi gerektiğine göre dinamik olarak programlanır.

OFDMA'daki çerçeve boyutu TDMA ve FDMA'daki gibi sabittir, fakat çerçeve kullanıcılar tarafından paylaşılır. Sonuç olarak, verimlilik önemli ölçüde artar ve kullanıcıların trafik modelinden izole edilir. Sofistik yaklaşımlarda QoS zamanlaması, çok çeşitli uygulamalara, veri hızlarına vb. göre gerçekleştirilebilir.

CDMA'da ise bir verici, sinyalini tüm sistem bant genişliğine yaymak için benzersiz bir yayma kodu kullanır. Farklı kullanıcılar; frekans aralıklarının yeniden kullanımı elde etmek için farklı yayılma bantları kullanır ve bu sayede sinyallerin tümü, aynı toplam bant genişliğini kullanabilmektedir.

Frekans aralıklarının tekrardan kullanımı, CDMA'nın FDMA'ya göre önemli bir avantajıdır çünkü hücre başına kullanılabilir spektrum, K faktörü kadar artar. En kötü durumda ortak kanal girişim senaryoları gerçekleşir. Diğer yandan bu ikisinin OFDMA gibi dikgen olmamasından dolayı, aynı hücre içindeki kullanıcılar birbirleri ile etkileşime girmektedir.

OFDMA, çok daha fazla kullanıcı için aynı anda düşük veri hızı iletimini desteklerken, OFDM yalnızca belirli bir zaman aralığında bir kullanıcıyı destekler.

Sonuç olarak OFDMA'nın temel amacı çok yüksek veri hızları ve daha geniş kanallar elde etmek değil aksine bant genişliğinin daha iyi ve daha verimli kullanılmasıdır. Temel amacımız yüksek verimliliklidir. Bir başka ifadeyle daha iyi ve daha verimli trafik yönetimidir.

1.8.4. OFDMA Sistem Modeli

Bu kısımda sadece OFDMA sistemi özetlenmemekte, aynı zamanda kaynak tahsis problemi de anlatılmaktadır. Noktadan noktaya OFDM sisteminden farklı olarak, K kullanıcı N alt taşıyıcıyı paylaşmak için OFDMA sistemine dahil olur. Fark FFT bloğunun oluşturulmasında ortaya çıkar. Geri kalan kısım OFDM sistemindeki ile aynıdır. Her kullanıcıya, kullanıcı başına alt taşıyıcı sayısının $J(k)$ olduğu örtüşmeyen S_k alt taşıyıcıları tahsis edilir. Kullanıcı k 'ya ait FFT bloğunun l . alt taşıyıcısını belirtmek için $X_k(l)$ kullanılır. Bağıntı (1.30)'daki denklemde, $X_k(l)$, ISI'yı ortadan kaldırmak için eklenen koruma ön eki L ile birlikte $(N + L)$ uzunluğundaki OFDM sembolünü oluşturmak üzere çoğullanır. OFDM sembolü aşağıdaki şekilde oluşturulur.

$$x(l) = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{n=0}^{J(k)-1} X_k(n) e^{j \frac{2\pi}{N} (I_k(n))l}, \quad (1.30)$$

$n = -L, \dots, N - 1$ ile burada $I_k(n)$ k . kullanıcıya atanan alt taşıyıcıyı belirtir. Alt taşıyıcılar kümesini, kendilerine farklı bitler yüklenmiş kullanıcılarla ilişkilendirirken bir kaynak tahsisi sorunu ortaya çıkmaktadır. Kullanıcı j den alınan sinyal şu şekildedir:

$$y_j(l) = x(l) \otimes h_j(l) + w(l), \quad (1.31)$$

Burada $h_j(t)$, “baz istasyonu (BS)” (*Base Station*) ile j . kullanıcı arasındaki kanalın temel bant darbe yanıtıdır. Üstteki denklemde, $1/T$ hızında örneklenen alınan sinyal $y(t)$ ’dir. İlk L örnekleri atılır ve N noktalı FFT hesaplanır. Sonuç olarak, j . kullanıcının verileri

$$Y_{j(n)} = \begin{cases} X_j(n) H_j(i_j(n) + W(n) & \text{if } i_j(n) \in S_j \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}, \quad (1.32)$$

Buradaki $H_j(n)$, k . kullanıcının kanalının frekans yanıtıdır. $H_j(n)$ ifadesi aşağıda gösterilmiştir.

$$H_j(n) = \sum_i h_j(i) \exp(j2 \frac{\pi}{N} ni) \quad (1.33)$$

1.9. Dikgen Olmayan Çoklu Erişim (NOMA)

Son yıllarda, gelişmiş uygulama ve hizmetlerin büyümesi sebebiyle bant genişliği kullanımı hızla artmaktadır. Böylece çoklu erişim sorunları ortaya çıkmaktadır. Temel olarak birden fazla kullanıcıya radyo kaynağında sınırlı (veya kıt) serbestlik dereceleriyle hizmet verilecek olması durumunda ortaya çıkar. Bu sebeple, spektrum verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için çeşitli çoklu erişim tekniklerine bağlı olmak gerekmektedir. Bu tekniklerden biri de “Dikgen Olmayan Çoklu Erişim (NOMA)” (*Non Orthogonal Multiple Access*)’dir. Gelecekteki kablosuz teknolojiler için spektrum kullanımını artırmak için NOMA daha etkili bir teknik olarak kabul edilmektedir.

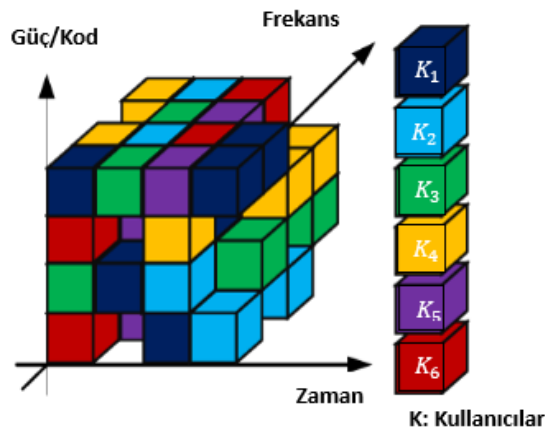
Son zamanlarda NOMA, daha iyi spektral verimlilik, “nesnelerin interneti (IoT)” (*Internet of Things*) için büyük bağlantı, yüksek bağlantı yoğunluğu ve çok daha az gecikme elde etmek için 5G için temel bir çoklu erişim teknolojisine dönüşmüştür (Dai vd., 2018).

NOMA tekniğindeki temel fikir, kullanıcılara ait olan sinyallerin aynı zaman ve frekans aralığında farklı güç katsayıları ile iletilmesidir. Yani güç domeinde kullanıcılara farklı güç bileşenleri atanarak yapılan gönderilme işlemidir. NOMA tekniğinde, verici

tarafıta tüm kullanıcılarıa ait semboller “süperpozisyon kodlaması (SC)” (*Superposition Coding*) yöntemi kullanılarak, farklı güç bileşenleri ile çarpılıp toplanarak veri iletimi sağlanmaktadır. Alıcı tarafıta ise, kullanıcıların her biri kendinden daha fazla güç bileşenine sahip olan kullanıcıların verilerini sezdikten sonra elde edilen bu bilgiyi alıcı tarafıta alınan toplam işarettten çıkararak kendi sembolünü elde etmektedir. Gerçekleşen bu işlem “ardışık girişim giderici (SIC)” (*Successive Interference Cancellation*) olarak ifade edilir (Maraqa vd., 2020).

NOMA’da güç paylaşımı kullanıcılar arasında oldukça önem arz etmektedir. Güç paylaşımı, kullanıcılar ve verici arasındaki kanal durumuna göre belirlenir. Bu sebeple, bilgi teorisine göre, kanal şartlarının durumuna göre güç paylaşımı yapılır. Yani kanal durumu diğer kullanıcıların kanal durumundan daha iyi ise bu kanala sahip kullanıcılara daha düşük güç paylaşırlıyorken, kanal şartları diğer kullanıcıların kanal durumundan daha kötü olan kullanıcılara da daha yüksek güç paylaşırlılır (Cai vd., 2017).

Son olarak ortogonal olmayan yapı nedeniyle, çok kullanıcılı çoğullama için kesin kanal geri bildirimi ve programlama gerekliliği azaltılır, hatta bazı senaryolarda ortadan kaldırılır. NOMA’nın genel bir örneği aşağıdaki Şekil 1.7.’de açıklanmakta olup, burada farklı kullanıcılar üç domende; zaman, frekans ve güç / kod çoğullanmıştır. Bu sayede kullanıcıların herhangi bir alanda tek başına dikgen olmadığı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, uygun kod tasarımı ve zaman / frekans işgal kalıpları uygulanarak “dikgen çoklu erişim (OMA)” (*Orthogonal Multiple Access*)’e kıyasla daha iyi genel performans elde edilirken, kullanıcıların kodu verimli bir şekilde çözülebilir / ayrılabilir.



Şekil 1.7. Olası dikgen olmayan çoklu erişim çözümü gösterimi

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Bu kısımda, “Dikgen Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (OFDMA)” (*Dikgen Frekans Bölmeli Çoklu Erişim*)’de “kaynak tahsisi (RA)” (*Resource Allocation*)’ın tanımı ve çeşitleri ve hangi durumlarda nerelerde kullanıldığına dair bilgiler verilmektedir. Ayrıca “heterojen ağlar (HetNet)” (*Heterogeneous Network*)’ın tanımı ve türleri ve sistemin, hangi durumlarda daha verimli olarak, ağın yapısını, nasıl oluşturulacağına dair bilgiler içermektedir. Sonuç olarak OFDMA’da HetNet ağların oluşturulmasında, kaynak tahsisinin en optimum olması için “Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)” (*Particle Swarm Optimization*)’dan ve diğer optimizasyon türlerinden de bahsedilmiştir. Optimizasyon algoritmalarının tanımları ve kullanım amaçları belirtilmiştir. Bu konuların açıklanması ve örneklendirilmesinde literatür de yer alan çalışmalardan yararlanılmıştır.

2.2. Kaynak Tahsisi

Kaynak tahsisi, bir sistemde belirli kaynakların belirli amaçlar için nasıl kullanılacağına planlanmasıdır. Kaynak tahsisi, sistemdeki kaynakları daha etkili ve verimli kullanmak için gereklidir. Her yeni nesilde (1G, 2G, 3G, ...) bant sıkıntısını hafifletmek ve verimlilik düzeyini yükseltmek amacıyla bant genişliğinin artırılması, paralel olarak kaynak tahsis yöntemlerini de popüler hale getirmektedir (Hyung vd., 2008).

Haberleşme sistemlerinde de kaynak tahsisi yapılır. Örneğin, bir kablosuz haberleşme heterojen ağ sisteminde, fiziksel kanallar, frekans bantları, baz istasyonları gibi kaynaklar, belirli kullanıcılar veya hizmetler için nasıl tahsis edileceğinin planlanmasıdır.

Kaynak tahsisi yapılırken kullanılan yöntemler arasında statik atama, dinamik atama, çoklu erişim yöntemleri ve coğrafi tahsis gibi, yöntemler bulunur. Ayrıca, yapay zeka ve makine öğrenmesi gibi teknolojiler de kaynak tahsisi yaparken kullanılmaktadır. Örneğin,

yapay zeka kullanılarak ağ kullanımı önceden tahmin edilebilir ve kaynaklar bu tahminlere göre tahsis edilebilir.

Heterojen ağlarda kaynak tahsisi için birkaç yöntem kullanılır. Bunlardan bazıları aşağıda sıralanmıştır:

Statik Atama: Bu yöntemde, kaynaklar önceden belirlenmiş kurallar veya politikalar doğrultusunda sabit olarak atanır. Örneğin, bir kablosuz haberleşme ağında belirli bir bant genişliği sadece belirli bir cihaz için kullanılabilir.

Dinamik Atama: Bu yöntemde, kaynaklar kullanım durumuna göre dinamik olarak atanır. Örneğin, bir kablosuz ağda, cihazlar o anki ihtiyaçlarına göre bant genişliğini veya frekans bandını dinamik olarak alabilirler.

Çoklu Erişim Yöntemleri: Bu yöntemde, farklı ağ teknolojileri arasında kaynakların paylaşımı sağlanır. Örneğin, bir kablolu ağda kullanılan bant genişliği, kablosuz ağda da kullanılabilir.

Coğrafi Tahsis: Bu yöntemde, kaynaklar coğrafi bölgelere göre atanır. Örneğin, bir şehirde belirli bir bölgede kullanılacak olan frekans bantları önceden belirlenir.

Haberleşme sistemlerinde kaynak tahsisi, ağların verimli ve etkili bir biçimde kullanılabilmesi açısından önemli bir işlemdir. Bu kaynak tahsisi işleminde çeşitli faktörler dikkate alınmalıdır. Söz konusu faktörlerden bazılarını aşağıda yer verilmiştir:

Ağ Kapasitesi: Ağın, belirli bir zamanda hangi kaynakları kullanabileceği bilgisini verir.

Bant Genişliği: Bant genişliği, haberleşmenin hızını ve verimliliğini belirler. Bu sebeple, bant genişliği, kaynaklarının doğru bir şekilde tahsisi açısından çok önemlidir.

Frekans bandı: Haberleşme sistemleri için kullanılan frekans bantları sınırlıdır. Bu yüzden, frekans bantlarının tahsisi önemlidir.

Kullanıcı İhtiyaçları: Kullanıcıların ne kadar kaynağa ihtiyaç duyduğu ve bu ihtiyacı gidermek için kaynakların tahsisini belirler.

Hizmet Kalitesi: Haberleşme hizmetlerinin kalitesi, kaynak tahsisi yaparken dikkate alınması gereken önemli bir faktördür. Kullanıcıların ihtiyacı olan hizmet kalitesini sağlamak için kaynaklar tahsis edilir.

Enerji Verimliliği: Haberleşme sistemlerinde, günümüz haberleşme sistemlerinin ihtiyaçlarının artmasından dolayı birçok baz istasyonu ve aracı birçok cihaz kullanılmaktadır. Bu yüzden bu cihazların, haberleşme anında yüksek miktarda güç tüketmesinden dolayı, enerjinin verimliliği son derece önemli bir konu haline gelmektedir. Temelde sistemin optimum koşulları sağlayacak şekilde tasarımını sağlayarak enerjinin verimliliği sağlanmış olur.

Sonuç olarak, kaynak tahsisi ağların etkili ve verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamak için önemlidir. Fakat, bu süreç zaman içinde değişebilir ve güncellenmelidir. Bu nedenle, kaynak tahsisi yapılırken kullanılan yöntem ve teknolojilerin sürekli olarak geliştirilmesi gerekmektedir.

2.3. Heterojen Ağlar (HetNet)

2.3.1. HetNets Tanımı ve Genel Özellikleri

Beşinci nesil (5G) kablosuz iletişim sistemlerinde, farklı iletişim ortamları altında çeşitli gereksinimlerin karşılanması beklenmektedir. Bu nedenle yeni bir evrim ağ yapısı olarak, “heterojen ağlar (HetNet)” (*Heterogeneous Network*) son yıllarda haberleşme sistemlerinde yaygınlaşmıştır (Hu ve Qian, 2014). Geleneksel homojen ağların aksine, HetNet’in temel özelliği, küçük hücrelerin makro hücre ağlarında birbirleri ve makro hücre ile beraber çalışmasına izin vererek mekânsal kaynakların yeniden kullanım fırsatlarını artırmak ve kullanıcıların hizmet kalitesini iyileştirmektir (Manap vd., 2020). Bununla beraber, HetNet’lerde farklı kullanıcılar arasındaki karşılıklı girişim ve sınırlı kaynak bulunduğundan, etkin “kaynak tahsisi (RA)” (*Resource Allocation*) şemaları, girişimi azaltmak ve spektrum paylaşımını düzenlemek için oldukça önemlidir (Kuang vd., 2016).

Ağ mimarileri göz önünde bulundurulduğunda, kablosuz ağların yapısının “homojen ağlar (HomNet)” (*Homogeneous Network*)’dan HetNet’lere doğru bir değişim seyri gösterdiği dikkat çekmektedir (3GPP TR 36.932 (V12.1.0), 2013). Yani temelde, HetNet, “spektrum verimliliği (SE)” (*Spectrum Efficiency*)’ni büyük ölçüde iyileştiren ve kapsama

boşluklarını azaltan, aynı konum veya spektrum bandındaki birbirleri ile örtüşen makro hücre ağlarını ve içerdikleri birçok küçük hücrenin bir arada olmasına izin verir.

Genel olarak HetNet'ler ile ilgili 3 farklı spektrum stratejisi vardır (Wu vd., 2002). Bunlar:

1-Yer Paylaşımlı Spektrum Paylaşımı: “Makro hücre kullanıcıları (MU)” (*Macro Cell Users*) tarafından kullanılmayan “frekans bantları (FBs)” (*Frequency Bands*)’nın, “küçük hücre kullanıcıları (SU)” (*Small Cell Users*) tarafından kullanılmasına izin verilmesidir.

2-Underlay Spektrum Paylaşımı: MU’ların ve SU’ların eş zamanlı olarak FB’leri kullanmasına imkan tanımaktadır. Fakat, katmanlar arasında oluşabilecek girişim gücü kısıtlaması ile her bir MU alıcısına yönelik girişim dikkatli bir şekilde yönetilmelidir.

3-Hibrit Spektrum Paylaşımı: FB’ler iki türden oluşur. Bunlar sadece SU’lar tarafından kullanılan alt kanallar (örneğin; yüksek veri hızı destekleyen) ve MU’lar ve SU’lar tarafından paylaşılan alt kanallar (örneğin; yüksek spektrum kullanımı destekleyenler). Başka bir ifade ile, özel FB’lere sahip SU’ların, MU’lardan ortak kanal girişimi olmaması nedeniyle daha fazla güç tahsisi yaparak daha iyi bir sistem performansı elde etmektir. Ayrıca düşük veri hızına sahip SU’ların, dış iletimi desteklemek amacıyla FB’leri MU’larla paylaşabilir.

HetNets’ler erişim modları açısından ise iki çeşittir: açık erişim ve kapalı abone grupları (Parkvall vd., 2011).

1- Açık Erişim: Bu erişim türünde, kullanıcıların, kapsama alanlarına göre “küçük hücreli baz istasyonları (SBS)” (*Small Cell Base Station*) veya “makro hücreli baz istasyonları (MBS)” (*Macro Cell Base Station*) ile ilişki kurmasına izin verilmektedir. Örneğin; bir “kullanıcı terminali (UT)” (*User Terminal*) küçük hücreli bir ağı kapsama alanı içerisindeyse, genelde bu ağa erişilmesine izin verilmektedir. Başka bir durumda ise yani, bu UT küçük hücrenin kapsama alanı dışında fakat makro hücre ağı içindeyse, MBS ile ilişki kurabilir.

2-Kapalı Abone Grupları: Bu erişim türünde, küçük hücreli baz istasyonlarına sadece abone olan UT’ler (yani SU’lar) bağlantı kurabilmektedir. Fakat abone olmayan MU’lar

küçük hücreli baz istasyonlarının kapsama alanı içinde olsun ya da olmasın sadece makro hücre ağlarına erişebilir.

Son olarak HetNet'in, HomNet'den farklı ve benzersiz özellikleri aşağıda sıralanmıştır:

1- Sistem Kapasitesinin Önemli Ölçüde Artırılması: Farklı erişim yöntemlerine sahip birden fazla kullanıcının aynı fiziksel alanda beraber bulunmasına izin vermektedir. Bu sayede iletişim sisteminin kapasitesi geliştirilebilir.

2-Ultra Yoğunluk: Farklı güç seviyelerine sahip birden çok kullanıcının küçük bir alana yerleştirilmesi ile ağa daha fazla kullanıcının erişmesi sağlanır.

3- Azaltılmış İletişim Kör Bölgesi: Çeşitli küçük hücrelerin (örneğin; mikro hücre, piko hücre, femto hücre) ağ sistemine dağıtılması ile, kapsama alanlarını azaltmak ve bazı küçük AP'ler yerleştirilerek iletişim aralığını artırmak mümkündür. Bu iyileştirme yapılan yer altı otoparkları, tüneller ve metrolar örnek olarak verilebilir.

4- Azaltılmış Bağlantı Kaybı ve Gecikmeler: Küçük hücrelerin olmadığı geniş alan iletişim senaryolarında, “kullanıcı ekipmanı (UE)” (*User Equipment*) ile MBS arasındaki bağlantı kaybı ve kanal kazançları, farklı cihazların birbirlerine olan uzak mesafelerinden dolayı bozulmaktadır. MBS ve UE'ler arasına SBS'ler konumlandırılırsa, UE'lerden MBS'ye ana taşıyıcı sinyali küçük bir yol kaybıyla elde edilebilmektedir.

5- Spektrum Verimliliğini İyileştirme: Geleneksel HomNet'lerin sınırlı SE'ye sahip olması nedeniyle, SE'yi iyileştirme yolları bulmak daha önemlidir (Niu vd., 2015). Yüksek FB altında iletim yarıçapı küçük olduğunda, RF biriminin yeniden tasarımı yapılması gerekmektedir. Bu sayede HetNet, SE'nin gelişiminde önemli ölçüde etkilidir. Ayrıca HetNet'in farklı ağ türlerini içermesi ve bir arada bulundurması sayesinde her yerde ve her zaman sürekli iletişim kalitesi sağlamaktadır.

2.3.2. HetNets Hücre Tipleri ve Haberleşme Senaryoları

2.3.2.1. HetNets Hücre Tipleri

HetNet'lerin potansiyel bir iletişim yolu olması, SE'yi ve iletim kapasitesini önemli ölçüde geliştirebilir. Farklı iletişim aralıklarına ve uygulama senaryolarına göre, ağ türleri 4 sınıfa ayrılabilir. Bunlar:

1-Makro Hücre Ağlar: Makro hücre ağı, geleneksel bir hücresel iletişim ağıdır. Yüksek güçlü bir BS kullanarak mevcut iletişim sistemlerinde bir kapsama alanı sağlanabilmektedir. Makro hücre ağlarının özellikleri şunlardır:

a- MBS her zaman çevredeki binalar ve engeller üzerinde net bir görüş alanı sunan, örnek olarak gökdelenlerin tepesi veya dağ gibi yüksek yerlerde bulunmaktadır.

b- Hücre yarıçapının 1 km'den 25 km'ye yaklaşabileceği geniş bir kapsama alanına ve uzun bir iletim mesafesine sahiptir. İki komşu MBS arasındaki mesafe oldukça uzaktır.

c- Genelde, hücre kenarında kalan kullanıcıların QoS'i, gölge sönmüleme ve çok yollu girişimden oldukça fazla etkilenmektedir.

d- Düzgün bir şekilde dağıtılmayan hizmet talepleri yüzünden kapsam dışında kalan noktalar vardır, bu nedenle iç mekan kullanıcılarının QoS'i uzaktaki MBS tarafından sunulduğunda oldukça kötüdür.

2- Mikro Hücre Ağları: Mikro hücre ağlarına çoğu zaman düşük güçteki BS ile hizmet verilmektedir. Bu nedenle alışveriş salonları, tren istasyonları, spor salonları gibi yoğun nüfusa sahip kentsel alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, bu ağdaki iletim yarıçapı sadece 200 m'den 1 km'ye yaklaşabilmektedir yani makro hücre ağından daha küçüktür. Bunlara ilaven, düşük güce sahip mikro hücre BS'lerinin ağ başına kanal sayısı ve trafik yoğunluğu önemli ölçüde artmaktadır.

3- Piko Hücre Ağları: Küçük bir hücresel ağ olan piko hücre ağı genelde ofisler, eğitim binaları, metro istasyonu gibi çok daha küçük alanları (örneğin: 100 m -200 m arası) kapsar. Genelde kullanım amaçları iç mekan iletişim senaryolarında açıkta kalan yerleri azaltabilmek ve iç mekan alanlarının kapsamını genişletmek için kullanılmaktadır.

4- Femto Hücre Ağları: Femto hücre (ayrıca ev BS'leri olarak da adlandırılır) ağı, ev ve küçük iş yerlerinde iletişimi sağlamak için kullanılan düşük güçlü ve küçük bir BS'ye sahiptir. Örneğin 10 m ve 50 m aralığında iletişim sağlayabilmektedir. Ayrıca geniş bant teknolojisi aracılığı ile ev BS'sine bağlanarak iç mekan kullanıcılarının QoS'sini iyileştirmek için kullanılan tipik bir ağıdır. Buna ek olarak femto hücre ağlarının kurulumu makro hücrelere kıyasla daha kolay ve karlıdır. Ayrıca femto hücreler piko hücrelerin boşluklarını kapatabilir ve binalardaki sinyal kaybını ortadan kaldırabilir. Femto hücrelerinin piko hücrelerden en temel farkı, femto hücrelerdeki kullanıcı sayısının piko hücrelerdeki kullanıcı sayısından oldukça az olmasıdır, örneğin 4 veya 8 kullanıcı (evler) ve hücre başına 8 veya 16 kullanıcı küçük işletme binaları örnek olarak gösterilebilir.

Ayrıca femto hücrelerinin açık erişim, kapalı erişim ve hibrit erişim olmak üzere 3 farklı erişim yöntemi vardır (Lee vd., 2014).

1-Açık Erişim Modu: Alışveriş merkezi ve işletmeler gibi alt ağlar arasında bir miktar veri paylaşımının olduğu senaryolarda uygulanmaktadır. Bu modda, tüm yasal kullanıcılar ek erişim izni olmadan ağa erişebilmektedir.

2- Kapalı Erişim Modu: Çoğunluk olarak yetkisiz kullanıcıların ağ iletişimine erişimin olmadığı evler veya ofisler gibi özel yerlerde kullanılır.

3- Hibrit Erişim: Açık ve kapalı erişimin birleştirilmesi ile meşru kullanıcıların çıkarlarını korumaktadır. Diğer bir ifade ile ağ boştayken, kullanıcıların kimlik doğrulama yoluyla ağa erişilmesine izin verilmektedir.

2.3.2.2. HetNets Haberleşme Senaryoları

Farklı ağların farklı sistem modellerine sahip olmasından dolayı, belirli iletişim senaryoları farklı hücre türleri de kullanılarak bu bölümde anlatılacaktır.

1- Geleneksel HetNets: Bu ağ senaryosunda, her bir BS ve her UE, röle kullanmadan birbirleri ile iletişim kurmak için tek bir antene sahiptir. Bu ağ yapısı, makro hücre ve küçük hücre (örneğin: femto hücre, piko hücre, mikro hücre) olmak üzere en az iki farklı hücresel ağ türüne sahiptir. Spesifik açıdan, ilk ağ olarak makro hücreli ağ, FB'lerin sahibidir. İkinci olarak küçük hücre ağları aynı "spektral kaynak (SR)" (*Spectral*

Resource)’a yerleştirilir ve kullanıcılar, MU’ların QoS’sini önemli ölçüde etkilemekten kaçınmak için iletim güçlerini kontrol etmektedir. MBS, geniş bir kapsama alanı sağlamak için yukarı bağlantı / aşağı bağlantı iletimi sayesinde birçok MU’ya hizmet vermektedir. Bununla beraber, küçük alt hücreler, iç mekan haberleşmelerinde kullanıcıların QoS gereksinimlerini karşılamak ve daha yüksek verim elde edebilmek için kullanılmaktadır. Bu sayede, sadece sistem kalitesini artırmaz, aynı zamanda farklı hücrelerin ağ birlikteliğini de sağlamaktadır.

2- OFDMA Tabanlı HetNets: Farklı alt kanallar arasındaki girişimi azaltmak ve SE’yi iyileştirmek için Nee ve Prasad (2000) tarafından orijinal FB’yi çoklu dikgenleştirilmiş alt taşıyıcılara bölerek OFDM önerildi. OFDM, kullanıcıların taleplerine göre dinamik olarak RA gerçekleştirmek amacıyla esnek alt taşıyıcı tahsisine izin verebilmektedir. Bununla beraber HetNet’de aday teknoloji olarak, OFDMA tabanlı HetNet’ler araştırmacılar tarafından incelenmiştir ve OFDMA tabanlı HetNet’lerin geleneksel HetNet’lerden temel farkı, aynı hücredeki kullanıcılar arasında karşılıklı “çoklu erişim girişimi (MAI)” (*Multiple Access Interference*) olmaması için dikgen alt taşıyıcıların (alt kanallar) kullanılmasıdır (Peng vd., 2015).

3- NOMA Tabanlı HetNets: OMA sistemlerinde (örneğin: OFDMA sistemi) kullanıcılar arasında herhangi bir girişim olmamasına rağmen, mevcut dikgen kaynakların sayısı sınırlıdır. Bu sebeple Saito vd. (2013) tarafından yapılan çalışmada ağlara daha fazla kullanıcının erişebilmesi için NOMA teknolojisi önerilmiştir. NOMA’daki temel mantık, alıcı taraftaki artan karmaşıklığa rağmen, farklı kullanıcılar arasında dikgen olmayan RA elde edebilmektir (Dai vd., 2015). NOMA tabanlı HetNet’lerde “femto hücre kullanıcı (FU)” (*Femtocell User*)’ların NOMA yoluyla kaynakları kullandığı HetNet’te bir makro hücre ve birden çok femto hücre vardır.

4- İşbirlikçi HetNets: Ortak iletişim yani röle iletişimi olarak da bilinmektedir. Bu şekilde ağın kapsamı etkili bir şekilde genişletilebilmektedir. Sonuç olarak birçok araştırmacı HetNet’leri rölelerle birleştirerek daha geniş bir kapsama alanı ve daha yüksek sistem verimi elde eden heterojen bir röle ağı oluşturmaktadır. Bu şekilde, aktarmasız ağdan farkı, bu ağın sinyal iletimine rölelerin yardımcı olmasıdır. Bu yüzden iletim yolu karmaşık ve değişken olmasına rağmen iletim modu daha esnektir. Rölelerin kullanımı ile RA, röle seçimi ve iletim yöntemleri daha kompleks hale gelmektedir.

5- H-CRANs: Son yıllarda SE'yi iyileştirmek ve “enerji tüketimini (EC)” (*Energy Consumption*) azaltmak amacıyla H-CRAN kullanılmaktadır (Peng vd., 2014). Yeni bir ağ türü olarak, bulut bilgi işlem ve HetNet'in avantajlarını birleştiren H-CRAN, daha fazla verim ve daha geniş kapsama alanları sunmaktadır. Ayrıca kontrollü ve verimli bir şekilde büyük ölçekli verileri kullanabilmektedir. H-CRAN, ağ kaynaklarını koordine etmek için buluttaki “temel bant birimi (BBU)” (*Base Band Unit*) havuzunu kullanmaktadır. Ayrıca SE ve EE'nin iyileştirilebilmesi için katmanlar arasındaki girişimler düzenlenmeli ve yok edilmelidir.

6- Çok Antenli HetNets: HetNet'lerin farklı bir biçimi olan ve sistem kapasitesini ve SE'yi iyileştirebilen bir HetNet türüdür. Tek anten kanalından farklı tarafı, çok antenli HetNet'lerdeki doğrudan parazit bağlantılarının farklı özelliklere sahip olmasıdır. Temelde amaç paraziti azaltmak ve sistem performansını iyileştirmektir.

2.4. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)

2.4.1. PSO Tanımı

“Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)” (*Particle Swarm Optimization*), çok çeşitli optimizasyon problemlerine uygulanabilen, oldukça özelleştirilebilir, fakat nispeten basit bir arama algoritmasıdır. James Kennedy ve Russel Eberhart tarafından ortaya atılmış PSO algoritmasının temelinde, kuş ve balık sürülerinin hareketlerinden yola çıkılarak doğrusal olmayan sistemler ve problemler için optimum sonuçlar elde etmeyi amaçlayan popülasyon tabanlı stokastik bir optimizasyon yöntemidir (Kennedy ve Eberhart, 1995).

PSO'da, her parçacık optimize edilecek problemin olası bir çözümünü temsil eder (Mohammed vd., 2020). Her parçacık bir konum ve hız değerine sahiptir. Konum, parçacığın o anki çözüm pozisyonunu ifade eder ve hız değeri de parçacığın ilerleyiş hızına karşılık gelir. Parçacıkların konumları, problem için çözüm alanının sınırları içinde rastgele olarak oluşturulur ve her parçacık başlangıçta farklı bir konuma sahip olur. Bu sayede algoritma farklı çözüm fonksiyonlarını aramaya başlar ve en iyi çözümü bulmaya çalışır.

PSO algoritması, her bir parçacık için konum ve hız değişkeni kullanarak çalışır. Konum değişkeni $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ve hız değişkeni $v = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ olarak tanımlanır. Her bir parçacık için en iyi konum $p_{best} = \{p_{best1}, p_{best2}, \dots, p_{bestn}\}$ şeklinde ifade edilirken, global en iyi konumda g_{best} şeklinde ifade edilir.

Konum ve hız değişkenleri, aşağıdaki formül kullanılarak güncellenir.

$$v_i(t+1) = w * v_i(t) * c1 * rand1 * (p_{best_i} - x_i(t)) + c2 * rand2 * (g_{best} - x_i(t)) \quad (2.1)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (2.2)$$

Yukarıdaki (2.1) ve (2.2) bağıntısında yer alan denklemlerdeki parametreler; t iterasyon sayısı, w atalet ağırlık değeri, $c1$ ve $c2$ hiperparametreler, $rand1$ ve $rand2$ rastgele sayılar, $v_i(t)$ ve $x_i(t)$ i . parçacığın hızı ve konumu, (t . iterasyon için) ve son olarak p_{best_i} ve g_{best} i . parçacığın en iyi konumunu ve sürünün en iyi konumunu ifade etmektedir.

Formül içinde kullanılan w parametresi algoritmanın eski hızının ne kadar etkili olacağını yani hızın ne kadar yavaşlamasını sağladığını, kontrol eder. Ayrıca $c1$ ve $c2$ parametreleri ise, parçacığın en iyi konumuna ve sürünün en iyi konumuna olan yakınlığını kontrol eder. Başka bir deyişle kişisel en iyi pozisyon ve global en iyi pozisyonların etkisini belirler. Son olarak $rand1$ ve $rand2$, 0 ile 1 arasında rastgele sayılardır ve her parçacık için farklı olmalıdır.

PSO algoritmasının çalışma prensibi aşağıdaki adımlar da anlatılmıştır.

Adım 1: Parçacıkların başlangıçtaki konum ve hızları rastgele üretilerek başlangıç popülasyonu oluşturulur.

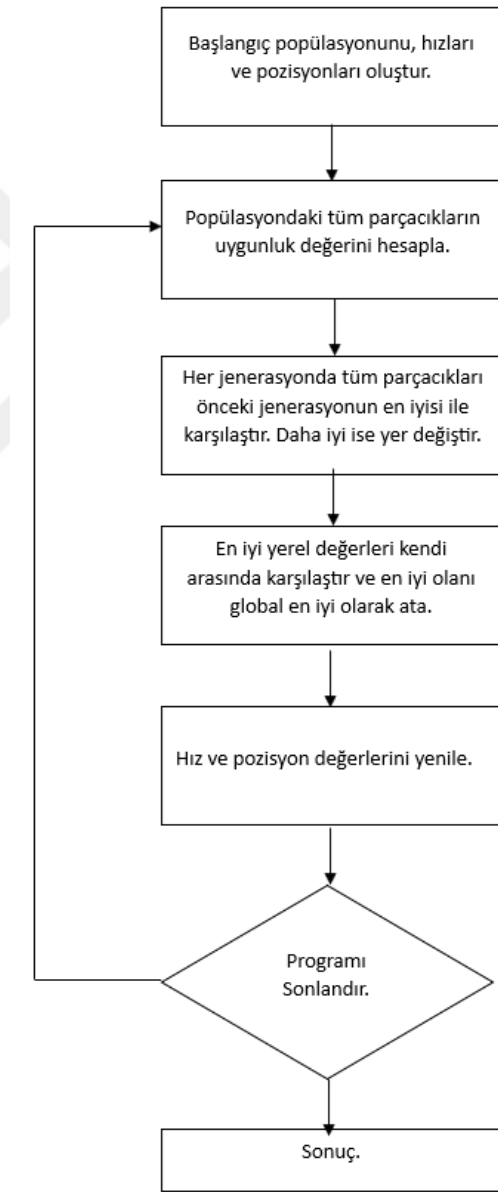
Adım 2: Popülasyondaki tüm parçacıkların uygunluk değerleri hesaplanmaktadır.

Adım 3: Parçacığın sahip olduğu konumun uygunluk değeri, kendi yerel en iyi konumunun uygunluk değerinden daha iyi ise, parçacık konumu yerel en iyi konumu p_{best} olarak güncellenir.

Adım 4: Parçacıklardan, yerel en iyi parçacık vektöründe, en iyi uygunluk değerine sahip parçacık, global en iyi parçacık g_{best} olarak güncellenir.

Adım 5: Parçacıkların sahip oldukları hız ve konumlar, bağıntı (2.1) 'deki denklem ve bağıntı (2.2)'deki denkleme göre tekrardan güncellenir.

Adım 6: Algoritma, çalışmasını, sonlandırma kriterine ulaşıncaya kadar, 2. adımdan itibaren tekrarlanır.



Şekil 2.1. Parçacık sürü optimizasyonu akış diyagramı

Şekil 2.1.'de akış şeması verilen PSO algoritması birçok probleme kısa süre içerisinde çözüm üretebilme potansiyeline sahiptir. Bu yüzden birçok problemde kullanılmaktadır.

2.4.2. PSO Ana Parametreleri

2.4.2.1. Popülasyonun Büyüklüğü

Popülasyonun sahip olduğu toplam parçacık sayısıdır. Her iterasyonda çözüme daha çok yaklaşılabilmesi için popülasyonun çok sayıda parçacık içermesi önemlidir. Ayrıca parçacık sayısının çokluğu az parçacık içermesine göre daha az iterasyonda çözüme ulaşılmasını sağlar.

Popülasyonların daha büyük aralıklar içermesi daha fazla keşif imkanı sunmaktadır. Fakat çok parçacığın olması her iterasyonda hesaplama zorluğunu beraberinde getirir. Genel olarak problemlerin çözümünde 20 ile 40 arasında parçacık kullanılmaktadır (Liu vd, 2014). Daha az parçacık kullanılarak da birçok problemin çözümüne ulaşılmaktadır.

2.4.2.2. İterasyon Sayısı

Genel olarak bir problemin en uygun çözümünü bulabilmek için gerekli iterasyon sayısı, problemin kendisine bağlı olarak değişmektedir. PSO algoritmasında iterasyon sayısının düşük tutulması problemi çözmek için yetersiz kalabilir. Buna karşılık yüksek iterasyon sayısı işlem hacmini artıracığı için hesaplama zorluğunu da beraberinde getirmektedir.

2.4.2.3. Hızlanma Katsayıları

Bilişsel ve sosyal bileşenleri etkileyen bu hızlanma katsayıları $c1$ ve $c2$ 'dir. Yerel olarak arama yapmayı sağlayan bilişsel bileşen, global olarak arama yapmayı sağlayan sosyal bileşendir. Bu katsayılardan $c1$, parçacıkların bulunduğu yerel en iyi konumlarına göre, $c2$ katsayısı ise popülasyondaki en iyi parçacığın konumuna göre ilerlemesini sağlamaktadır. Bu hızlanma katsayılarının 0 olduğu durumlarda, parçacıklar arama bölgelerindeki, sahip oldukları hızlarla, ilerlemelerine devam etmektedirler.

2.4.2.4. Eylemsizlik Ağırlığı

PSO algoritmalarında bu değer, arama süreçlerinde, yani global arama ve yerel arama arasında dengeyi sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Global arama başarısı için büyük eylemsizlik ağırlığı, yerel arama başarısı için küçük eylemsizlik ağırlığı başarı oranlarını artırmaktadır. Bu sebeple eylemsizlik ağırlığı, arama bölgesinde global araştırma ve yerel araştırma arasındaki dengeyi ayarlar. Bu sayede en az iterasyon sayısı ile optimum çözüme ulaşmayı sağlamaktadır.

2.4.2.5. Uygunluk Fonksiyonu

Bu fonksiyon, algoritmanın her iterasyonda o anki popülasyondaki parçacıkların durumunu yani kalitesini değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır. Uygunluk fonksiyonu ile popülasyondaki parçacıkların ne kadar çözüme uygun olduğu değerlendirilir. Maksimum iterasyon sayısına gelindiğinde ya da uygunluk değeri istenilen seviyeye ulaştığında algoritma sonlandırılır.

2.4.2.6. Parçacık Hızı

PSO'da, parçacıkların hızları parçacıkların daha iyi bir çözüme doğru ilerlemesini temsil etmektedir. Her parçacık, başlangıç anında bir hız değeri ile başlar ve her iterasyonun sonunda bu hız değeri güncellenir. Bu güncelleme, parçacığın mevcut pozisyonu ve en iyi bilinen pozisyon arasındaki farka dayanmaktadır. Bu sayede parçacık, daha iyi bir çözüm elde etmek için; hızlandırılır ya da yavaşlatılır. Yani algoritma çözüm alanında daha iyi çözümler aramaya devam eder.

2.5. Ayrık Parçacık Sürü Optimizasyonu (DPSO)

2.5.1. DPSO Tanımı

“Ayrık Parçacık Sürü Optimizasyonu (DPSO)” (*Discrete Particle Swarm Optimization*), farklı sorunları çözebilmek için PSO'nun bir uzantısı olarak geliştirilmiştir (Eberhart ve Kennedy, 1995). DPSO algoritması, kesikli değerlerde optimizasyon problemlerini çözebilmek amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Bu algoritma, normal PSO algoritmasına benzer şekilde çalışır fakat parçacıkların konumları ve hızları kesikli değerlerle veya ikili değerler gibi ayrık değişkenlerle temsil edilir. Bu, parçacıkların sadece belirli değerler arasında hareket edebileceği anlamına gelir. Bu sayede kesikli değerli optimizasyon problemleri çözmek için daha uygun bir yöntem sunmaktadır.

Ayrıca, DPSO algoritması, parçacıkların konumlarını değerlendirmek için farklı bir fonksiyon kullanır. Bu fonksiyon, parçacıkların konumlarının gerçek değerlere yakınlığını ölçer. Bu sayede algoritma, gerçek değerlere daha yakın konumları ölçer. Başka bir ifade ile sürekli değerleri tam sayı değerlerine yuvarlayarak tam sayı değerleri üzerinden işlem yaparak optimum çözümü elde etmeye çalışır.

DPSO algoritması, PSO algoritmasındaki random hareketleri daha az kullanır. Bu sayede algoritma, daha kesin sonuçlar elde etmek için daha az zamana ihtiyaç duyar.

DPSO'nun avantajı olduğu gibi dezavantajı da bulunmaktadır. Söz konusu dezavantaj ayrık değişkenler üzerindeki optimizasyonların sürekli değişkenler üzerindeki optimizasyonlardan daha zor izlenebilir olmasıdır (Rardin, 1998).

2.5.2. DPSO Kullanım Şekli

Bu kısımda DPSO algortimasının projemizde nasıl kullanıldığı açıklanacaktır. İlk olarak DPSO algoritmasının formülü verilip daha sonra formülün proje ile olan ilişkisi anlatacağıdır.

DPSO algoritması, aşağıdaki denklemleri kullanır;

$$v_m = v_m + c_1 * r_1 * (pbest_m - x_m) + c_2 * r_2 * (gbest - x_m) \quad (2.3)$$

$$s(v_m) = \frac{1}{1 + e^{-v_m}} \quad (2.4)$$

$$x_m = \begin{cases} 1 & \text{if } rand() \leq s(v_m) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.5)$$

Yukarıdaki (2.3) bağıntısı 3 terimden oluşmaktadır. İlk terim v_m parçacığın mevcut hızını temsil eder ve bir momentum katsayısı (winer) ile çarpılır. Bu terim parçacığın mevcut hareket yönünü korumaya yardımcı olur. İkinci terim $c_1 * r_1 * (pbest_m - x_m)$, kişisel en iyi konumu ile parçacığın mevcut konumu arasındaki farkın bir sabit katsayı c_1 ve random sayı olan r_1 ile çarpımıdır. Bu terim, parçacığın kişisel en iyi konumuna doğru hareket etmesine yardımcı olur. Üçüncü terim ise $c_2 * r_2 * (gbest - x_m)$, kümedeki herhangi bir parçacığın şimdiye kadar bulduğu en iyi konum ile parçacığın mevcut konumu arasındaki farkın sabit katsayı c_2 ve random sayı r_2 ile çarpımıdır. Bu terim, parçacığın kümenin en iyi konumuna doğru hareket etmesine yardımcı olur.

Yukarıdaki (2.4) bağıntısında ise Sigmoid fonksiyonu $s(v_m)$ kullanılmıştır. Bu fonksiyonun temel amacı sınırlı çıkış aralığı oluşturmaktır. Ayrıca fonksiyon genel olarak 0 ile 1 arasında değer üretmektedir. $s(v_m)$ ifadesinde v_m değeri hız vektörünün bir bileşenini temsil etmektedir. Bu değer Sigmoid fonksiyonuna verilerek 0 ile 1 arasında bir çıkış elde edilmektedir. Bu çıkış değeri, hız bileşeninin güncellenmiş değeri olarak kullanılır. Yani $s(v_m)$ ifadesi, hız bileşeninin Sigmoid fonksiyonu tarafından dönüştürülen değerini ifade eder. Bu dönüşüm, hız bileşeninin sınırlarını belirlemek ve daha kontrollü bir güncelleme sağlamak amacıyla kullanılır.

Son olarak (2.5) bağıntısında *if* $rand() \leq s(v_m)$ ise 1, yani ilgili bit 1 olarak güncellenir. Diğer durumlarda ise 0 olarak güncellenir. Bu işlem, her bir bitin belirli bir olasılıkla 1 veya 0 olarak güncellenmesini sağlar. Bu işlemin sonucunda x_m olarak adlandırılan bit dizisi $s(v_m)$ fonksiyonunun çıkışına bağlı olarak rastgele bir şekilde güncellenir. Bu parçacığın konumunu temsil eden bit dizisinde değişiklik yaparak, yeni bir konum ve çözüm aramada çeşitlilik sağlamaktadır.

Yukarıdaki (2.3) bağıntısındaki v_m , $pbest_m$, x_m , $gbest$ bu değerler binary, diğer c_1 , r_1 , c_2 , r_2 'ler ondalık olarak hesaplanır. (2.4.) bağıntısında ise v_m , $s(v_m)$ değerleri binary olarak hesaplanır. Son olarak (2.5) bağıntısındaki x_m , 1 ve 0 olarak hesaplanmaktadır.

Projede kullanılan statik güç bir cihazın veya sistem bileşeninin çalışırken sabit güç miktarını ifade eder. Yani bir baz istasyonu için statik güç, filtreler, soğutucular ve frekans sentezleyicilerdir. Aşağıda (2.6) bağıntısında denklem ifadesi olarak gösterilmiştir.

$$pkstatik = 10^{\frac{30}{10}}(10^{-3}) \text{ (watt)} \quad (2.6)$$

Projede kullanılan yol kaybı (2.7) bağıntısındaki denklemde gösterilmiştir. Buradaki d km cinsinden mesafeyi göstermektedir.

$$path \text{ loss} = 128.1 + 37.6 \log_{10}(d) \text{ [dB]} \quad (2.7)$$

Projede 3 tane amaç fonksiyonu vardır. Bunlar Ews, Enet ve toplam hız'dır. Bu ifadelerin detaylı anlatımı 3.1. Giriş bölümünde açıklanmıştır. Bu kısımda denklemleri yer alacaktır. Aşağıda bağıntı (2.8), (2.9) ve (2.10)'da denklemler halinde gösterilmiştir.

$$Ews = \sum_{gp=1}^{bazs} \sum_{mkl=1}^{sayi} \frac{(u(K(gp).id(mkl)).Rku)_{gp,mkl}}{(K(gp).gk)_{gp,mkl} + pkstatik} \quad (2.8)$$

Yukarıdaki Ews için (2.8) bağıntısındaki denklemde *bazs* baz istasyonu sayısı, *sayi* ise o baz istasyonuna bağlı kullanıcı sayısını ifade eder. Daha sonra *id* kullanıcı *id*'si (kullanıcı numarası), $(u(K(gp).id(mkl)).Rku)_{gp,mkl}$ bu ifade ise her baz istasyonu için ayrı ayrı o baz istasyonuna bağlı olan kullanıcıların hızlarını, $(K(gp).gk)_{gp,mkl}$ 'de ayrı ayrı o baz istasyonundaki harcanan gücü verir. Son olarak *pkstatik* ise (2.6) bağıntısındaki sabit harcanan güçtür.

$$Enet = \frac{\sum_{k=1}^{ks} (u.Rku)_k}{\sum_{m=1}^{bazs} (K.gk)_m + pkstatik} \quad (2.9)$$

Yukarıdaki Enet için (2.9) bağıntısındaki denklemde *u* kullanıcıları, *ks* kullanıcı sayısını, *bazs* baz istasyonu sayısı, *u.Rku* kullanıcılardaki hızı, *K.gk* baz istasyonundaki harcanan gücü ifade etmektedir. Ayrıca *pkstatik* ise (2.6) bağıntısındaki sabit harcanan güçtür. Yani *Enet* ifadesi kullanıcı hızları toplamının baz istasyonu enerji tüketimleri toplamına oranını vermektedir.

$$hiz = \sum_{gp=1}^{ks} \log_2 \left(1 + \frac{u(gp).atama}{u(gp).isi + pn} \right) \quad (2.10)$$

Yukarıdaki (2.10) bağıntısı toplam kullanıcı hızını değil sadece kullanıcının hızının nasıl elde edildiğini göstermektedir. Ayrıca (2.10) bağıntısındaki denklemde ks kullanıcı sayısını, pn gürültü gücü, $u(gp).isi$ kullanıcıdaki girişim gücü, $u(gp).atama$ kullanıcıya atanan gücü ifade etmektedir.

DPSO algoritması ile kaynak blok atamalarının pseudo kodu Şekil 2.2. de gösterilmiştir.

```

DÖNGÜ(iter):
  DÖNGÜ(parsay):
    DÖNGÜ(bazs):
       $K(uyt).gk = 0$ 
       $pap = par(kmm).matp$ 
      DÖNGÜ(ks):
         $u(hjk).atama(1:N) = 0$ 
         $u(hjk).atama2(1:N) = 0$ 
        DÖNGÜ(bazs):
           $bx = pap(mk,:)$ 
           $ax = K(mk).id$ 
          DÖNGÜ(N):
            EĞER  $bx(jk) \neq 0$  İSE:
               $q(mk,jk) = ax(bx(jk))$ 
            DEĞİLSE:
               $q(mk,jk) = 0$ 

```

Şekil 2.2. DPSO algoritması pseudo kodu

Şekil 2.2.'deki pseudo kod, algoritmanın adımlarını basit bir dilde ifade eder. Burada *iter*, *parsay* ve *bazs* döngüleri üzerinden geçer ve her bir döngü adımında $K.gk$, $u.atama$ ve $u.atama2$ değerleri sıfırlanır. Sonrasında bx ve ax değişkenleri kullanılarak q matrisi güncellenir. Kod üzerindeki $K.gk$ değişkeni, her bir kaynak bloğun kullanılabilirlik durumunu temsil eder. Daha sonra $par(kmm).matp$ değişkeni ise

parçacığın kaynak bloklara yaptığı atamaları içeren bir matristir. Bu matris, kaynak blokların numaralarını temsil eder. Her bir kaynak bloğun atama ve kullanılabilirlik durumları ise $u(hjk).atama(1:N)$ ve $u(hjk).atama2(1:N)$ ile sıfırlanır. Buradaki bx ve ax değişkenleri, ilgili kaynak bloğun atama matrisi ve bloğun gerçek kullanıcılarını içerir. Her bir kullanıcı için, bx matrisindeki değere bakılır. Eğer değer sıfırdan farklı ise, kullanıcı gerçek kullanıcıdır ve ilgili bloğa atanmıştır. Bu durumda q matrisi güncellenir ve kullanıcı bloğa atanmış olarak işaretlenir. Eğer değer sıfır ise, kullanıcı herhangi bir kaynak bloğa atanmamıştır. Kod üzerinde $q = 0$ ise o kaynak bloğun kullanılmadığı anlamına gelir. Her bir döngü adımında, verilerin düzenlenmesi ve q matrisinin oluşturulması için gerekli işlemler gerçekleştirilir. Bu elde ettiğimiz q matrisi Şekil 2.3.'deki örnek tablo halinde q matrisleri oluşturmaktadır.

Örnek olarak DPSO algoritmasının projeye uygulanmasından sonra şu şekilde bir tablo elde ederiz. Kullanıcıların, kaynak blokları ve baz istasyonları içerisinde nasıl dağılım gösterdiği aşağıdaki Şekil 2.3. 'de yer almaktadır.

	Femto Baz İstasyonları				Kaynak Blok Numaraları										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	4	0	5	0	5	0	0	5	4	4	4	4	5	0
2	9	0	0	3	3	0	6	6	0	6	9	6	6	6	0
3	8	1	0	8	2	0	0	8	2	0	1	1	2	0	0
4	0	7	10	7	10	0	0	7	10	0	0	0	10	10	7

Kullanıcılar

Şekil 2.3. DPSO algoritması ile kullanıcılara kaynak blok ataması

Şekil 2.3.'ün gösterdiği gibi, kullanıcıların bağlandıkları baz istasyonlarına göre birbirlerine en az girişim yapacak şekilde, kaynak blokların kullanıcılara atandığı gözlemlenmiştir. Şekil 2.3.'deki tabloda 15 tane kaynak blok, 4 tane baz istasyonu kullanılmıştır. Bu 4 baz istasyonunun 3'ü femto, birtanesi makro baz istasyonudur. Tablonun içinde ise 10 tane kullanıcı yer almaktadır. Tablonun içinde sıfır olan kısımlar ise oraya kullanıcı atanmadığını göstermektedir.

2.6. İki Katmanlı Femtocell Ağları İçin Sözde Aktarma Tabanlı Güç ve Alt Kanal Uyarlaması (İki Katmanlı Femtocell Ağ Metodu)

İki katmanlı femtocell ağı, kısa mesafe menziline ve femtocell noktalarına sahip bir makro hücreden oluşmaktadır. Frekans aralıklarının yeniden kullanımı nedeniyle, bu tür yeni sistem mimarisi, kaynak tahsisi ve müdahale yöntemleri gibi farklı sorunları da beraberinde getirmektedir. Bu problemlere çözüm olabilmek için aşağıdaki katkılar yapılmıştır.

1-) OFDMA aşağı bağlantı tabanlı femto hücreler için yeni bir ortak güç ve alt kanal tahsis problemi, Femto BS'lerin ışıma girişimini en aza indirme öncülüğünde formüle edilmiştir.

2-) Çakışma girişimlerini önlemek amacıyla sözde aktarmaya dayalı bir programlama ile bilgi alışverişi yapılmıştır.

3-) Alt kanal tahsisi ve güç kontrolü yinelemeli bir şekilde kullanılmıştır.

İki Katmanlı Femtocell Ağ Metodu'nda alt kanal ve güç tahsis şemalarının ana prosodürü şu şekildedir.

1-) Toplam gücü makro ve femto baz istasyonlarına bağlı farklı alt kanallar arasında rastgele dağıtarak bir FBS'nin güç tahsisi başlatılır.

2-) Belirli bir güç tahsisi için, alt kanal tahsisi, farklı alt kanallarda farklı UE'ler tarafından alınan ve FUE'ler tarafından FBS'lere bildirilen girişim gücü dikkate alınarak optimize edilir.

3-) Verilen alt kanal ataması için güç kontrol aşamasında FBS, tahsis edilen alt kanalların iletim gücünü FUE'lerin veri hızı gereksinimlerine göre en aza indirir.

4-) Kaynak tahsisi yakınsayana kadar 2. ve 3. adımlar yinelenir.

3. BULGULAR

3.1. Giriş

Bu kısımda, “heterojen ağlar (HetNet)” (*Heterogeneous Network*)’da “Dikgen Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (OFDMA)” (*Dikgen Frekans Bölmeli Çoklu Erişim*) tekniği kullanılarak “kaynak tahsisi (RA)” (*Resource Allocation*) yapılmıştır. Ayrıca HetNet ağların oluşturulmasında ve kaynak tahsisinin en optimum şekilde olması içinde “Ayrık Parçacık Sürü Optimizasyonu (DPSO)” (*Discrete Particle Swarm Optimization*) metodu ve İki Katmanlı Femtocell Ağ Metodu’ndan yararlanılmıştır.

Son zamanlarda, “enerji verimliliği (EE)” (*Energy Efficiency*) kablosuz haberleşmede sürdürülebilirlik amacıyla sistem tasarlamanın ana kriterlerinden biri haline gelmiştir. Yoğun küçük hücreli HetNet’lerde, fazla sayıda baz istasyonlarının çalıştırılması çok büyük enerji harcayacağından EE tasarımları önemli hale gelmiştir. EE için 2 ortak ölçüm vardır: ağ çıkışlarındaki toplam tüketilen güç ve bireysel EE’nin ağırlıklı toplamı. İlk olan “ağ enerji verimliliği (NEE)” (*Network Energy Efficiency*) ağın performansına odaklanırken, ikincisi “bireyin ağırlıklı toplamı (WSEE)” (*Weighted Sum Energy Efficiency*) farklı baz istasyonlarının bireysel EE’lerini dengeler.

Bu çalışmada, NEE, WSEE ve toplam kullanıcı hızlarını maksimize etmeye çalıştık.

NEE gösterimi Enet, WSEE gösterimi Ews ile yapılmıştır. Bu ifadelerdeki Ews, her baz istasyonu için ayrı ayrı o baz istasyonuna bağlı olan kullanıcıların hızları toplamının o baz istasyonunda harcanan güce oranlarının toplamı, Enet ise kullanıcı hızları toplamının enerji tüketimleri toplamına oranı şeklinde açıklanmıştır.

Bu ifadeleri daha geniş anlatmak gerekirse:

İlk olarak NEE: tüm bireysel verimlilikleri toplam tüketilen güç ile karşılaştırarak ağın enerji verimliliğini değerlendirir. Yani, tüm baz istasyonlarının toplam iletim hızlarına göre ne kadar enerji tükettiklerini ölçer. NEE, ağın enerji verimliliğini optimize etmek için kullanılan bir metriktir.

NEE değerinin artmasını değlendirecek olursak:

NEE'nin yüksek olması, daha iyi bir enerji verimliliğı anlamına gelir. Yani, NEE'nin artması, ağı daha az güç tüketerek daha yüksek bir toplam iletim hızı elde etmesi demektir. Dolayısıyla, NEE'nin artması istenen bir durumdur çünkü daha yüksek NEE değeri daha sürdürülebilir ve enerji tasarruflu bir ağı göstergesidir. Kısaca NEE ağı enerji verimliliğı'dir.

İkinci olarak WSEE: farklı baz istasyonlarının enerji verimliliklerini dengeleyerek enerji verimliliğini adil bir şekilde dağıtmayı hedefler. Yani, her baz istasyonunun enerji verimliliğine, ağırlıklı olarak önem verilir ve bunların toplamıyla bir ölçüm yapılır. Bu metrik, enerji verimliliğı açısından farklı baz istasyonlarının eşit derecede performans göstermesini amaçlamaktadır.

WSEE değerin artmasını değlendirecek olursak:

WSEE'nin artması, daha iyi bir enerji verimliliğı adil dağılımını gösterir. Yani, WSEE'nin artması, farklı baz istasyonlarının enerji verimliliklerinin daha dengeli bir şekilde dağıldığını gösterir. Sonuç olarak artması iyidir. Çünkü bu, enerji verimliliğı açısından daha dengeli ve adil bir sistem olduğunu gösterir. Kısaca WSEE enerji verimliliğı adillığı'dir.

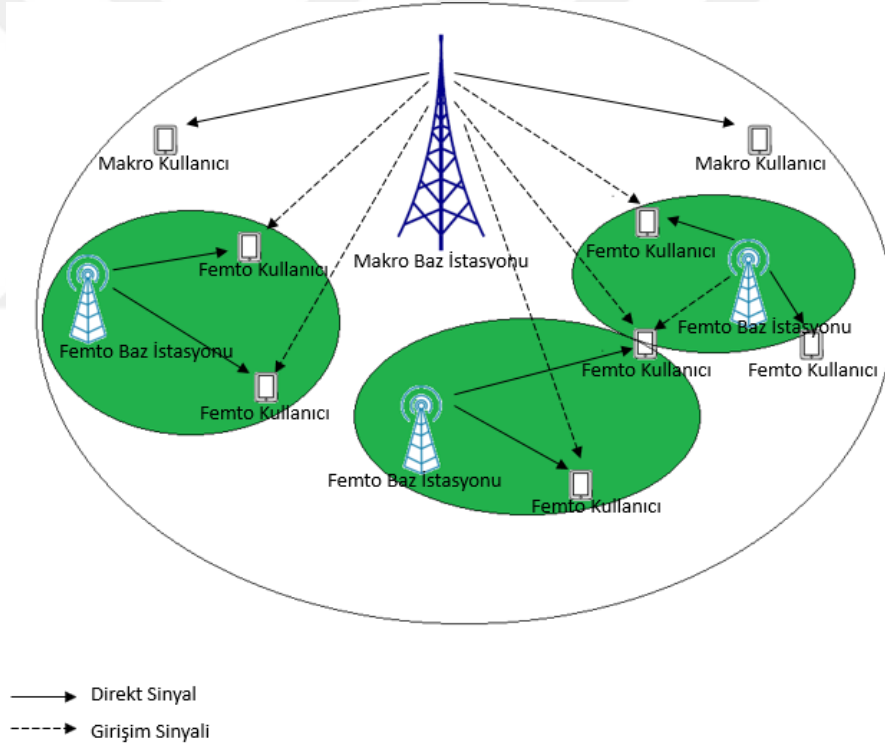
Bu bölümdeki tablolarda, yapılacak hesaplamalarda kullanılan parametrelere yer verilmiştir. Analizi farklı değerler üzerinden yapmak için söz konusu tablolarda yer verilen parametrelerin değerlerinde değişiklikler yapılmış ve bunlar koyu punto (bold) ile gösterilmiştir.

NEE, WSEE ve toplam kullanıcı hızları iki metot dahilinde incelenmiştir. Bunlardan ilki DPSO ikincisi ise İki Katmanlı Femtocell Ağ Metodu'dur. Bu durumların farklı parametre girdilerindeki çıkış değişimleri, metotlar kullanılarak, Matlab programı üzerinde simülasyon yaparak elde edilmiştir.

3.2. Sistem Modeli

Bu bölümde, bir iletişim sisteminin genel ifadesi şekiller üzerinden anlatılmaktadır. Sistemde, makro baz istasyonları, femto baz istasyonları ve kullanıcılar bulunmaktadır. Veri yönü aşağı yönlüdür, yani veriler baz istasyonlarından kullanıcılara aktarılmaktadır.

Sistemde, baz istasyonları ve kullanıcılar arasında iki tür sinyal bulunmaktadır: doğrudan sinyal ve girişim sinyali. Doğrudan sinyal, kullanıcının en yakın baz istasyonundan aldığı ve haberleştiği sinyal türüdür. Girişim sinyali ise diğer baz istasyonlarının en yakın baz istasyonu ile haberleşen kullanıcıya yaptığı girişim sonucunda oluşan sinyaldir.



Şekil 3.1.OFDMA HetNets'te aşağı yönlü bağlantı iletim senaryosu

Şekil 3.1. baz istasyonları ve kullanıcılar arasındaki bağlantıları ve veri akış yönlerini belirtir. Kapsama alanları, bir baz istasyonunun belirli bir alandaki kapsama alanını ifade eder ve bu alan içindeki kullanıcılar bu baz istasyonuna bağlanabilirler.

Bu tür bir diyagram, iletişim ağların tasarımı ve analizi için önemlidir ve ağın performansını, kapsama alanlarını, bağlantıları ve veri akışını görselleştirmeye yardımcı

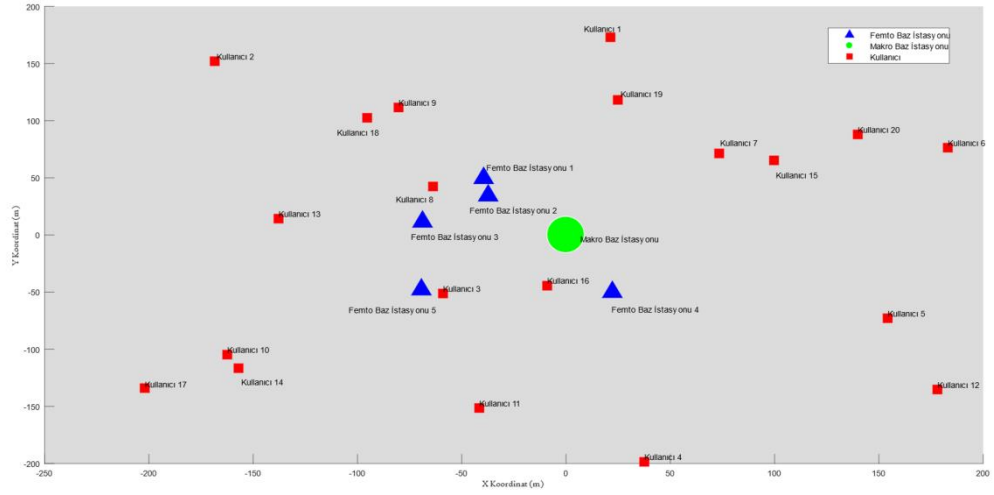
olur. Ayrıca, ağı iyileştirilmesi ve genişletilmesi için kullanılan stratejileri de yardımcı olmaktadır.

3.3. Genel HetNets Ağ Modeli

Bu kısımda Tablo 3.1.'deki verilerden hareketle Şekil 3.2.'deki belirtilen HetNets ağ üzerindeki random dağılımına göre baz istasyonları ve kullanıcıları içeren bir model oluşturulmuştur.

Tablo 3.1. Random dağılıma göre HetNets ağın matlab programı simülasyon parametreleri

Parametre	Değer
Kullanıcı Sayısı	20
Makro Baz İstasyonu Sayısı	1
Femto Baz İstasyonu Sayısı	5
Kaynak Blok Sayısı	50
Makro Baz İstasyonu Kapsama Çapı	150m
Kullanıcıların Makro Baz İstasyonuna Olan Minimum Uzaklığı	40m
Kullanıcıların Femto Baz İstasyonuna Olan Minimum Uzaklığı	3m
İki Femto Baz İstasyonu Arasındaki Minimum Uzaklık	5m
Bant Genişliği	180e3
Gürültü Gücü Yoğunluğu	-174dbm/Hz
Statik Güç	30dBm
Makro Baz İstasyonu Gücü	46dBm
Femto Baz İstasyonu Gücü	24dBm
DPSO Ceza Katsayısı	1e15
DPSO Parçacık Sayısı	20
DPSO İterasyon Sayısı	1000



Şekil 3.2. Baz istasyonları ve kullanıcıların HetNets ağı üzerindeki random dağılımı

Tablo 3.1.'deki veriler üzerine temellenen Şekil 3.2.'nin oluşturulmasında aşağıdaki adımlar izlenmiştir.

- 1.-) Öncelikle, kullanılacak olan alan belirlenmiştir.
- 2-) Ardından, bu alandaki mevcut baz istasyonları ve bunların özellikleri belirlenmiştir.
- 3-) Sonrasında, bu mevcut baz istasyonlarına ek olarak, rastgele konumlandırılacak olan küçük hücrelerin sayısı ve konumları belirlenmiştir.
- 4-) Ağın kapasitesini artırmak için, küçük hücrelerin kapsama alanları daha küçük tutulmuştur.
- 5-) Son olarak, bu parametreler kullanılarak HetNets ağına random dağılımına göre bir modeli oluşturulmuştur.

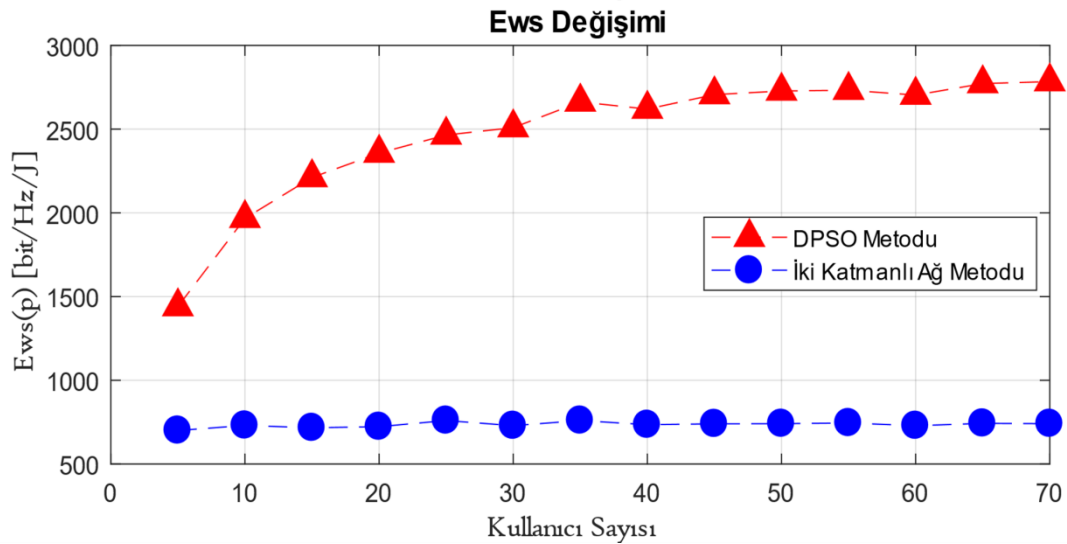
3.4. Kullanıcı Sayısına Göre Ews, Enet ve Toplam Hız Değişimleri

Bu kısımda Tablo 3.2.'deki verilerden hareketle Şekil 3.3., Şekil 3.4. ve Şekil 3.5. grafikleri elde edilmiştir. Bu grafikler ile beraber Matlab programı kullanılarak yapılan

hesaplamalar sonucunda elde edilen verilerin analizi de yapılmıştır. Bu analizler sayesinde, her iki yöntemin de farklı parametrelerdeki performanslarının belirlenmesi ve en uygun parametrelerin belirlenmesi sağlanmıştır.

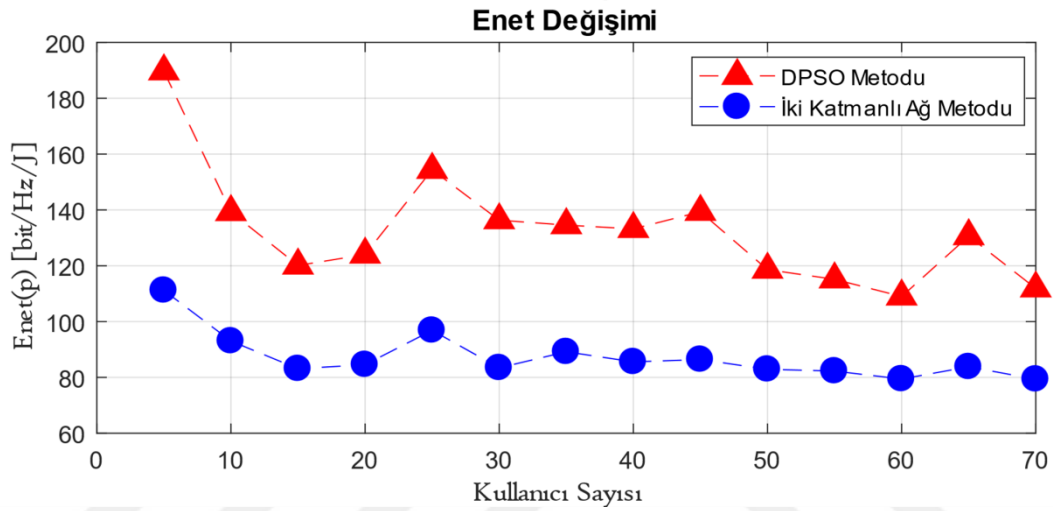
Tablo 3.2. Kullanıcı sayısı değişimlerine göre HetNets ağı matlab programı simülasyon parametreleri

Parametre	Değer
Kullanıcı Sayısı	5:5:70
Makro Baz İstasyonu Sayısı	1
Femto Baz İstasyonu Sayısı	4
Kaynak Blok Sayısı	50
Makro Baz İstasyonu Kapsama Çapı	150m
Kullanıcıların Makro Baz İstasyonuna Olan Minimum Uzaklığı	40m
Kullanıcıların Femto Baz İstasyonuna Olan Minimum Uzaklığı	3m
İki Femto Baz İstasyonu Arasındaki Minimum Uzaklık	5m
Bant Genişliği	180e3
Gürültü Gücü Yoğunluğu	-174dbm/Hz
Statik Güç	30dBm
Makro Baz İstasyonu Gücü	46dBm
Femto Baz İstasyonu Gücü	24dBm
DPSO Ceza Katsayısı	1e15
DPSO Parçacık Sayısı	20
DPSO İterasyon Sayısı	1000



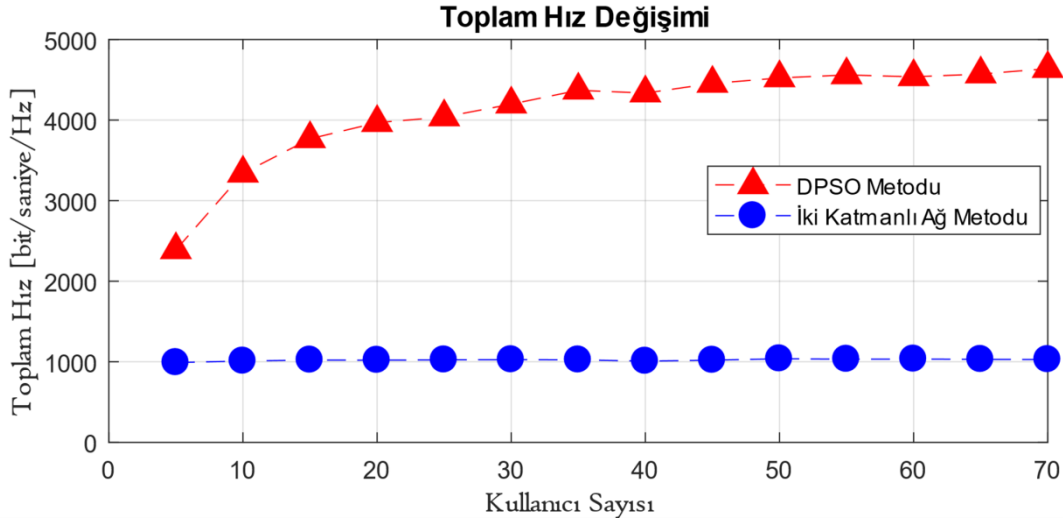
Şekil 3.3. Kullanıcı sayısı ve Ews değişim grafiği

Şekil 3.3.'de Kullanıcı sayısı ile Ews değişimi incelenmiştir. Yapılan incelemede, DPSO Metodu ile yapılan hesaplamada kullanıcı sayısı artarken Ews değeri de artış göstermiştir. En uygun değerlere kullanıcı sayısı 40'tan sonra ulaşılmıştır. İki Katmanlı Ağ Metodu ile yapılan hesaplama da ise kullanıcı sayısı artışı Ews üzerinde çok fazla bir değişikliğe sebep olmamıştır. Fakat maksimum değerine kullanıcı sayısı 25 ve 35 değerlerinde ulaşmıştır.



Şekil 3.4. Kullanıcı sayısı ve Enet değişim grafiği

Şekil 3.4.'de Kullanıcı sayısı ile Enet değişimi incelenmiştir. Yapılan incelemede, DPSO Metodu ile yapılan hesaplamada genel olarak kullanıcı sayısı artışına bağlı olarak Enet değeri düşmektedir. Fakat kullanıcı sayısı 25,45 ve 65 'te yerel maksimum değerine ulaşmıştır. İki katmanlı Ağ Metodu ile yapılan hesaplamada ise genel olarak kullanıcı sayısı artışına bağlı olarak Enet değerinde düşme gözlenmiştir. Buna rağmen kullanıcı sayısı 25,35 ve 65'te yerel maksimum değerine ulaşmıştır.



Şekil 3.5. Kullanıcı sayısı ve toplam hız değişim grafiği

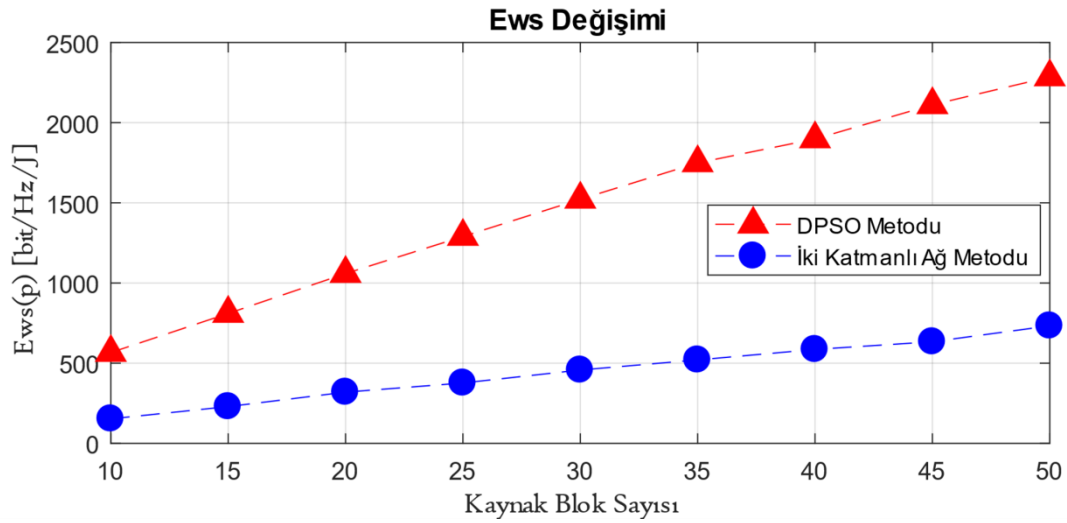
Şekil 3.5.'de Kullanıcı sayısı ile kullanıcıların toplam hızlarının değişimi incelenmiştir. Yapılan incelemede, DPSO Metodu ile kullanıcı sayısı artarken toplam hız değerinin arttığı gözlenmiştir. Maksimum hız değerlerine ise kullanıcı sayısı 50'den sonra ulaştığı gözlemlenmiştir. İki katmanlı Ağ Metodu ile yapılan hesaplamada ise kullanıcı sayısının artmasının toplam hız değerinde çok fazla bir değişikliğe neden olmadığı görülmüştür.

3.5. Kaynak Blok Sayısına Göre Ews, Enet ve Toplam Hız Değişimleri

Bu kısımda Tablo 3.3.'deki verilerden hareketle Şekil 3.6., Şekil 3.7. ve Şekil 3.8. grafikleri elde edilmiştir. Bu grafikler ile beraber Matlab programı kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen verilerin analizi de yapılmıştır. Bu analizler sayesinde, her iki yöntemin de farklı parametrelerdeki performanslarının belirlenmesi ve en uygun parametrelerin belirlenmesi sağlanmıştır.

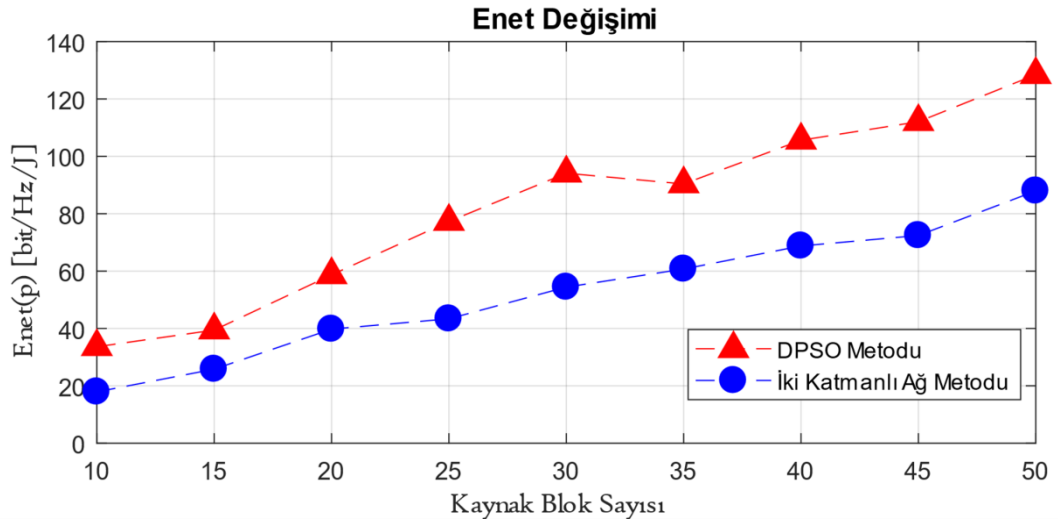
Tablo 3.3. Kaynak blok sayısı değişimlerine göre HetNets ağı matlab programı simülasyon parametreleri

Parametre	Değer
Kullanıcı Sayısı	20
Makro Baz İstasyonu Sayısı	1
Femto Baz İstasyonu Sayısı	4
Kaynak Blok Sayısı	10:5:50
Makro Baz İstasyonu Kapsama Çapı	150m
Kullanıcıların Makro Baz İstasyonuna Olan Minimum Uzaklığı	40m
Kullanıcıların Femto Baz İstasyonuna Olan Minimum Uzaklığı	3m
İki Femto Baz İstasyonu Arasındaki Minimum Uzaklık	5m
Bant Genişliği	180e3
Gürültü Gücü Yoğunluğu	-174dbm/Hz
Statik Güç	30dBm
Makro Baz İstasyonu Gücü	46dBm
Femto Baz İstasyonu Gücü	24dBm
DPSO Ceza Katsayısı	1e15
DPSO Parçacık Sayısı	20
DPSO İterasyon Sayısı	1000



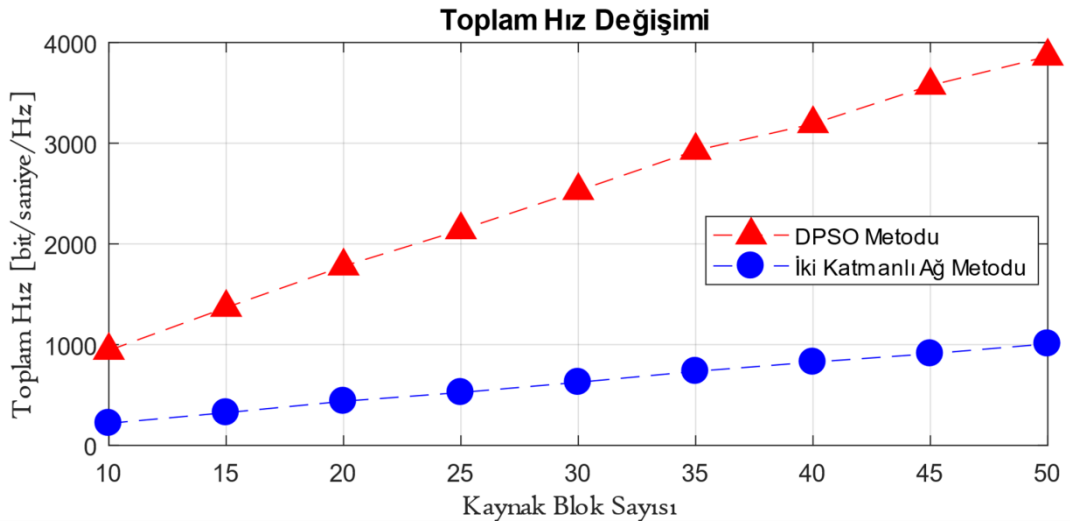
Şekil 3.6. Kaynak blok sayısı ve Ews değişim grafiği

Şekil 3.6.'da Kaynak blok sayısı ile Ews değişimi incelenmiştir. Yapılan incelemede, DPSO Metodu ile yapılan hesaplamada kullanıcı sayısı artarken Ews değeri de artış göstermiştir. Ayrıca İki Katmanlı Ağ Metodu ile yapılan hesaplamada da kaynak blok sayısı artışı Ews üzerinde artış meydana getirmiştir. Sonuç olarak kaynak blok sayısının artması her iki metot içinde Ews değerlerini arttırmıştır.



Şekil 3.7. Kaynak blok sayısı ve Enet değişim grafiği

Şekil 3.7.'de Kaynak blok sayısı ile Enet değişimi incelenmiştir. Yapılan incelemede, DPSO Metodu ile yapılan hesaplamada kullanıcı sayısı artarken Enet değeri de genel olarak artış göstermiştir. Fakat kaynak blok sayısı 35' te Enet değeri yerel minimum değerine ulaşmıştır. İki Katmanlı Ağ Metodu ile yapılan hesaplamada ise kaynak blok sayısı artışı Enet değeri üzerinde sürekli bir artış meydana getirmiştir.



Şekil 3.8. Kaynak blok sayısı ve toplam hız değişim grafiği

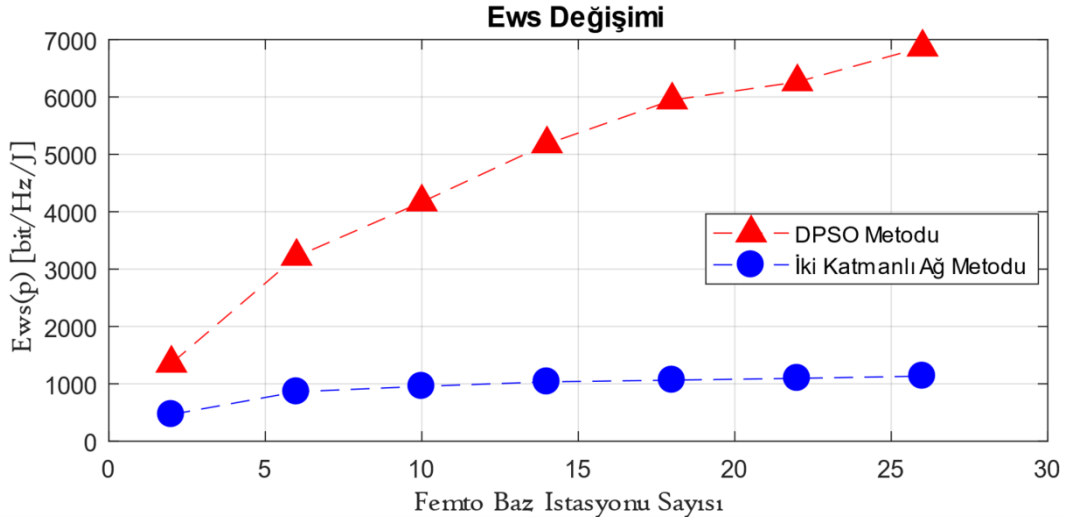
Şekil 3.8.'de Kaynak blok sayısı ile toplam hız değişimi incelenmiştir. Yapılan incelemede, DPSO Metodu ile yapılan hesaplamada kaynak blok sayısı artarken toplam hız değeri de artış göstermiştir. Ayrıca İki Katmanlı Ağ Metodu ile yapılan hesaplamada da kaynak blok sayısı artışı toplam hız değerinde artırmıştır.

3.6. Femto Baz İstasyonu Sayısına Göre Ews, Enet ve Toplam Hız Değişimleri

Bu kısımda Tablo 3.4.'deki verilerden hareketle Şekil 3.9., Şekil 3.10. ve Şekil 3.11. grafikleri elde edilmiştir. Bu grafikler ile beraber Matlab programı kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen verilerin analizi de yapılmıştır. Bu analizler sayesinde, her iki yöntemin de farklı parametrelerdeki performanslarının belirlenmesi ve en uygun parametrelerin belirlenmesi sağlanmıştır.

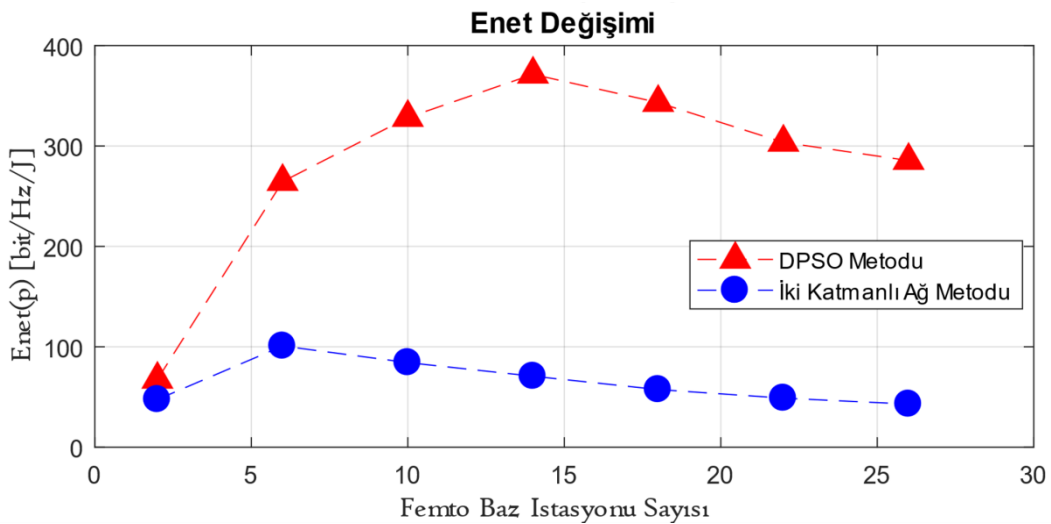
Tablo 3.4. Femto baz istasyonu sayısı değişimlerine göre HetNets ağı matlab programı simülasyon parametreleri

Parametre	Değer
Kullanıcı Sayısı	20
Makro Baz İstasyonu Sayısı	1
Femto Baz İstasyonu Sayısı	2:4:26
Kaynak Blok Sayısı	50
Makro Baz İstasyonu Kapsama Çapı	150m
Kullanıcıların Makro Baz İstasyonuna Olan Minimum Uzaklığı	40m
Kullanıcıların Femto Baz İstasyonuna Olan Minimum Uzaklığı	3m
İki Femto Baz İstasyonu Arasındaki Minimum Uzaklık	5m
Bant Genişliği	180e3
Gürültü Gücü Yoğunluğu	-174dbm/Hz
Statik Güç	30dBm
Makro Baz İstasyonu Gücü	46dBm
Femto Baz İstasyonu Gücü	24dBm
DPSO Ceza Katsayısı	1e15
DPSO Parçacık Sayısı	20
DPSO İterasyon Sayısı	1000



Şekil 3.9. Femto baz istasyonu sayısı ve Ews değişim grafiği

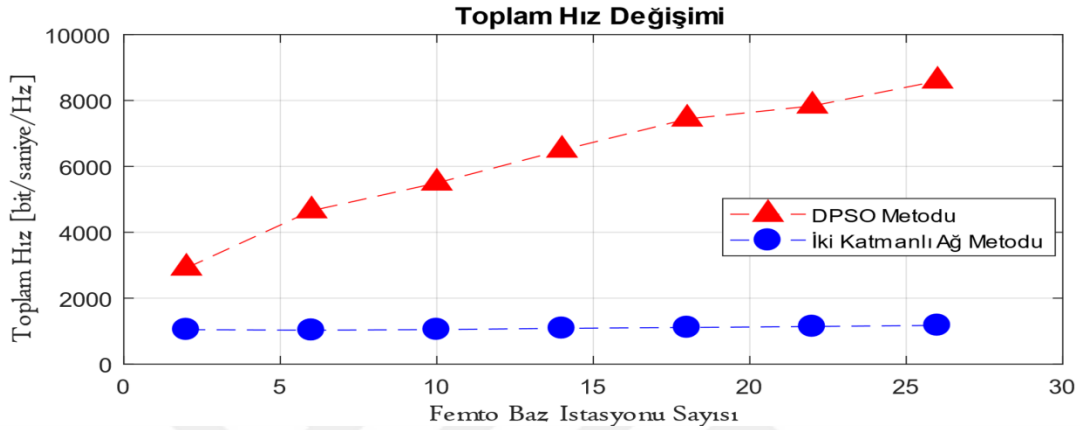
Şekil 3.9.'da Femto baz istasyonu sayısı ile Ews değişimi incelenmiştir. Yapılan incelemede, DPSO Metodu ile yapılan hesaplamada femto baz istasyonu sayısı artarken Ews değeri de artış göstermiştir. İki Katmanlı Ağ Metodu ile yapılan hesaplamada ise femto baz istasyonunun sayısının 6'dan sonra, Ews değeri üzerinde çok fazla bir değişim meydana getirmemiştir.



Şekil 3.10. Femto baz istasyonu sayısı ve Enet değişim grafiği

Şekil 3.10.'da Femto baz istasyonu sayısı ile Enet değişimi incelenmiştir. Yapılan incelemede, DPSO Metodu ile yapılan hesaplamada femto baz istasyonu sayısı 14'e kadar

Enet değeri artarken bu değerden sonra Enet değeri düşüşe geçmiştir. İki katmanlı Ağ Metodu'nda ise femto baz istasyonu sayısı 6'ya kadar Enet değeri artarken bu değerden sonra düşüşe geçmiştir. Sonuç olarak DPSO Metodu'nda femto baz istasyonu sayısı 14'te, İki Katmanlı Ağ Metodu'nda ise 6'da maksimum Enet değerlerine ulaşılmıştır.



Şekil 3.11. Femto baz istasyonu sayısı ve toplam hız değişim grafiği

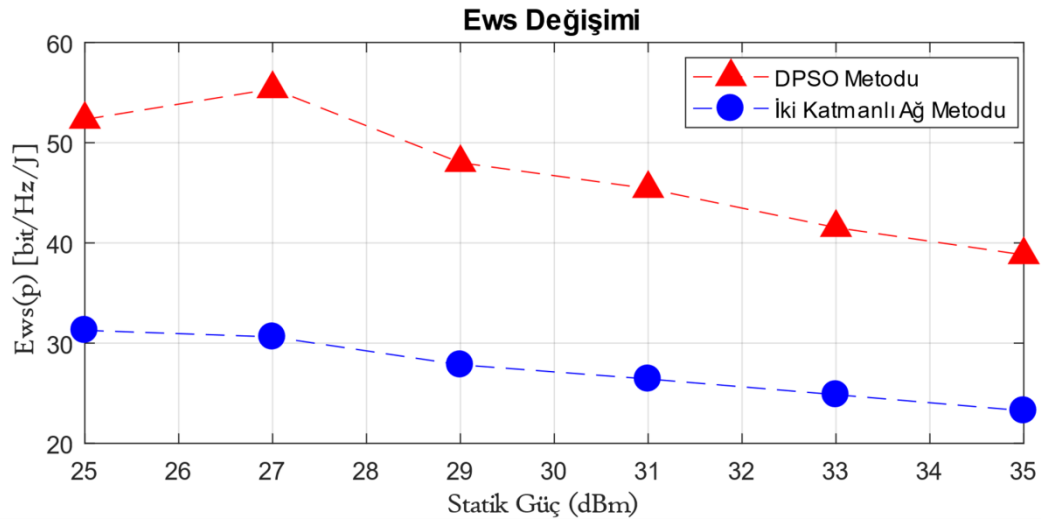
Şekil 3.11.'de Femto baz istasyonu sayısı ile toplam hız değişimi incelenmiştir. Yapılan incelemede, DPSO Metodu ile yapılan hesaplamada femto baz istasyonu sayısı artarken, toplam hız değeride sürekli artmıştır. İki Katmanlı Ağ Metodu'nda ise femto baz istasyonu sayısının değişimi toplam hız üzerinde çok fazla bir değişiklik meydana getirmemiştir.

3.7. Statik Güç Değişimine Göre Ews, Enet ve Toplam Hız Değişimleri

Bu kısımda Tablo 3.5.'deki verilerden hareketle Şekil 3.12., Şekil 3.13. ve Şekil 3.14. grafikleri elde edilmiştir. Bu grafikler ile beraber Matlab programı kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen verilerin analizi de yapılmıştır. Bu analizler sayesinde, her iki yöntemin de farklı parametrelerdeki performanslarının belirlenmesi ve en uygun parametrelerin belirlenmesi sağlanmıştır.

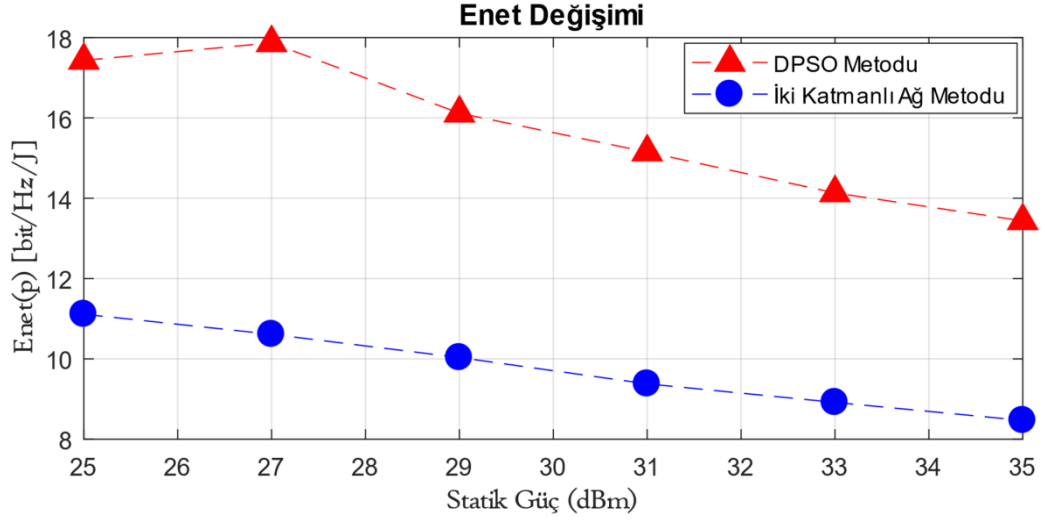
Tablo 3.5. Statik güç değişimlerine göre HetNets ağı matlab programı simülasyon parametreleri

Parametre	Değer
Kullanıcı Sayısı	4
Makro Baz İstasyonu Sayısı	1
Femto Baz İstasyonu Sayısı	2
Kaynak Blok Sayısı	50
Makro Baz İstasyonu Kapsama Çapı	150m
Kullanıcıların Makro Baz İstasyonuna Olan Minimum Uzaklığı	40m
Kullanıcıların Femto Baz İstasyonuna Olan Minimum Uzaklığı	3m
İki Femto Baz İstasyonu Arasındaki Minimum Uzaklık	5m
Bant Genişliği	180e3
Gürültü Gücü Yoğunluğu	-174dbm/Hz
Statik Güç	25:2:35 dBm
Makro Baz İstasyonu Gücü	46dBm
Femto Baz İstasyonu Gücü	24dBm
DPSO Ceza Katsayısı	1e15
DPSO Parçacık Sayısı	20
DPSO İterasyon Sayısı	1000



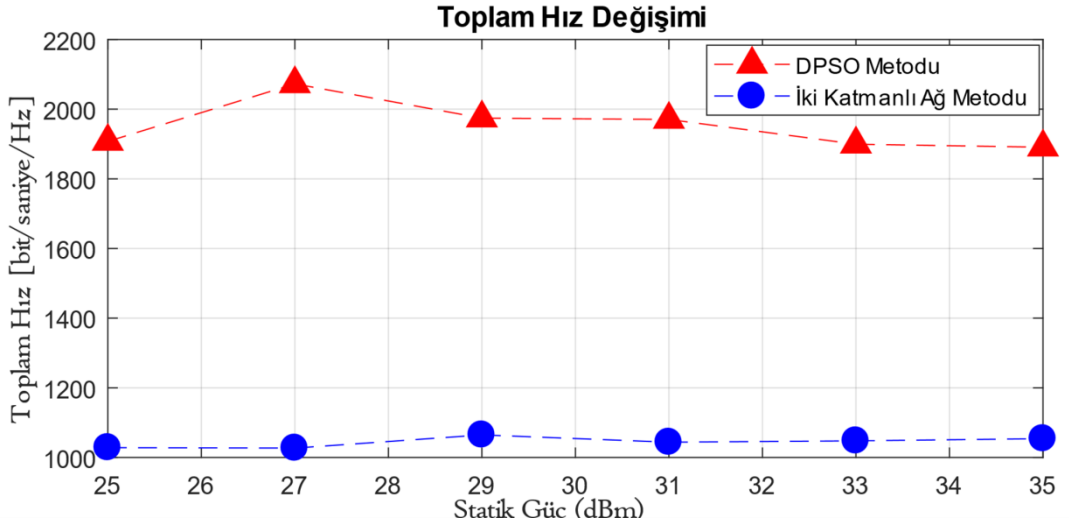
Şekil 3.12. Statik güç ve Ews değişim grafiği

Şekil 3.12.'de Statik güç ile Ews değişimi incelenmiştir. Yapılan incelemede, DPSO Metodu ile yapılan hesaplamada statik güç değeri 27 dBm'den sonra Ews değeri sürekli düşüşe geçmiştir. İki Katmanlı Ağ Metodu'nda da statik güç değeri 27 dBm'den sonra Ews değerinde sürekli bir düşüş gerçekleşmiştir. Sonuç olarak iki metotda da 27 dBm statik güç değerinde maksimum Ews değeri elde edilmiştir.



Şekil 3.13. Statik güç ve Enet değişim grafiği

Şekil 3.13.'de Statik güç ile Enet değişimi incelenmiştir. Yapılan incelemede, DPSO Metodu ile yapılan hesaplamada statik güç değeri 27 dBm'den sonra Enet değeri sürekli düşüşe geçmiştir. İki Katmanlı Ağ Metodu'nda da statik güç değeri arttıkça Enet değerinde sürekli düşüş meydana gelmiştir.



Şekil 3.14. Statik güç ve toplam hız değişim grafiği

Şekil 3.14.'de Statik güç ile toplam hız değişimi incelenmiştir. Yapılan incelemede, DPSO Metodu ile yapılan hesaplamada statik güç değeri 27 dBm'den sonra toplam hız değeri sürekli düşüşe geçmiştir. İki Katmanlı Ağ Metodu'nda da statik güç değeri 29

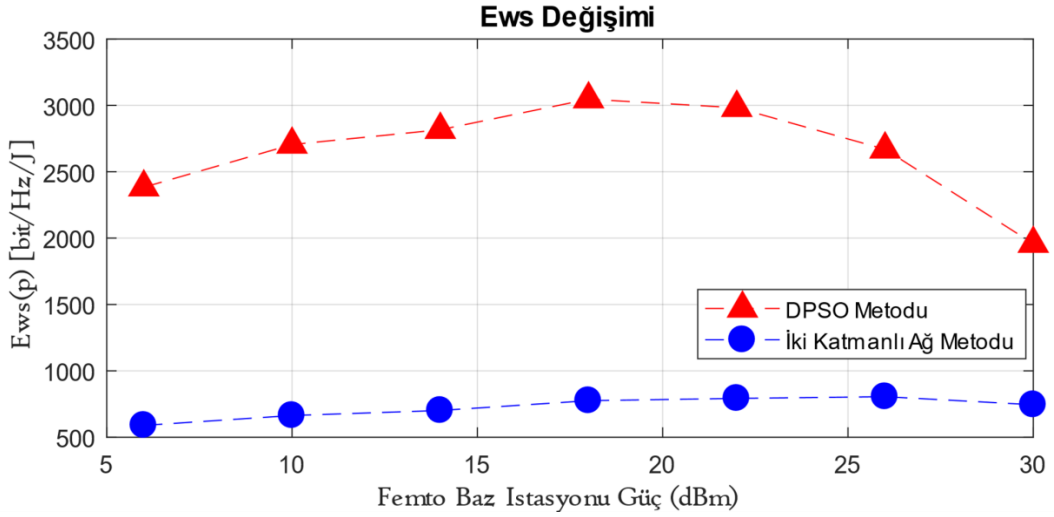
dBm'e kadar toplam hızda artışa neden olmuştur. Daha sonrasında toplam hızda düşüş meydana gelmiştir.

3.8. Femto Baz İstasyonu Güç Değişimine Göre Ews, Enet ve Toplam Hız Değişimleri

Bu kısımda Tablo 3.6.'deki verilerden hareketle Şekil 3.15., Şekil 3.16. ve Şekil 3.17. grafikleri elde edilmiştir. Bu grafikler ile beraber Matlab programı kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen verilerin analizi de yapılmıştır. Bu analizler sayesinde, her iki yöntemin de farklı parametrelerdeki performanslarının belirlenmesi ve en uygun parametrelerin belirlenmesi sağlanmıştır.

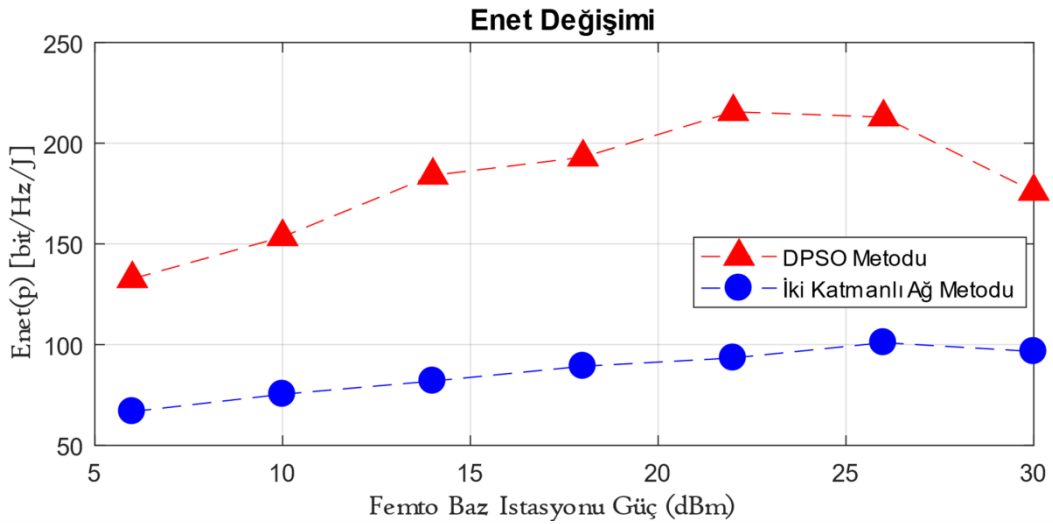
Tablo 3.6. Femto baz istasyonu güç değişimlerine göre HetNets ağıın matlab programı simülasyon parametreleri

Parametre	Değer
Kullanıcı Sayısı	20
Makro Baz İstasyonu Sayısı	1
Femto Baz İstasyonu Sayısı	5
Kaynak Blok Sayısı	50
Makro Baz İstasyonu Kapsama Çapı	150m
Kullanıcıların Makro Baz İstasyonuna Olan Minimum Uzaklığı	40m
Kullanıcıların Femto Baz İstasyonuna Olan Minimum Uzaklığı	3m
İki Femto Baz İstasyonu Arasındaki Minimum Uzaklık	5m
Bant Genişliği	180e3
Gürültü Gücü Yoğunluğu	-174dbm/Hz
Statik Güç	30dBm
Makro Baz İstasyonu Gücü	46dBm
Femto Baz İstasyonu Gücü	6:4:30 dBm
DPSO Ceza Katsayısı	1e15
DPSO Parçacık Sayısı	20
DPSO İterasyon Sayısı	1000



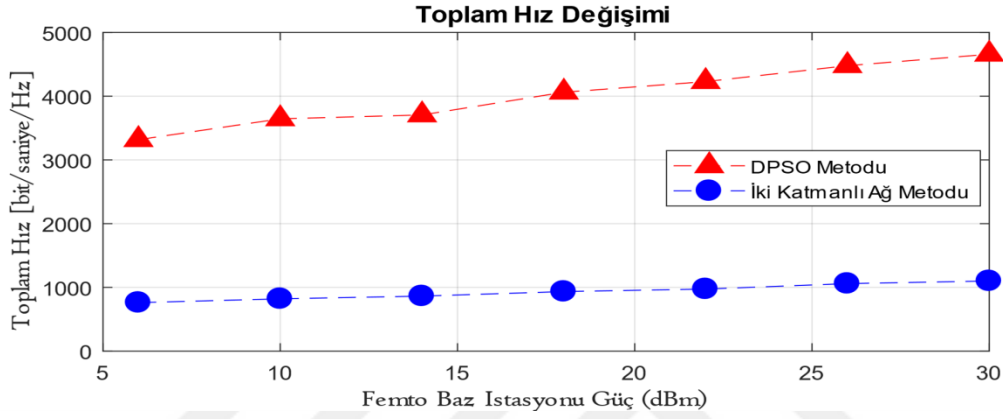
Şekil 3.15. Femto baz istasyonu güç ve Ews değişim grafiği

Şekil 3.15.'de Femto baz istasyonu güç ile Ews değişimi incelenmiştir. Yapılan incelemede, DPSO Metodu ile yapılan hesaplamada femto baz istasyonu gücü 18 dBm'e kadar Ews değerinde sürekli artış meydana getirmiştir. Bu değerden sonra Ews değerinde sürekli bir düşüş meydana gelmiştir. İki Katmanlı Ağ Metodu'nda ise femto baz istasyonu gücü 18 dBm değerine kadar sürekli artarken bu değerden sonra çok fazla değişiklik göstermemiştir.



Şekil 3.16. Femto baz istasyonu güç ve Enet değişim grafiği

Şekil 3.16.'da Femto baz istasyonu güç ile Enet değişimi incelenmiştir. Yapılan incelemede, DPSO Metodu ile yapılan hesaplamada femto baz istasyonu gücü 22 dBm'e kadar Enet değerinde sürekli artış meydana getirmiştir. Bu değerden sonra Enet değerinde düşüş başlamıştır. İki Katmanlı Ağ Metodu'nda ise femto baz istasyonu gücü 26 dBm'e kadar Enet değerinde sürekli bir artış meydana getirmiştir. Bu değerden sonra düşüşe geçmiştir.



Şekil 3.17. Femto baz istasyonu güç ve toplam hız değişim grafiği

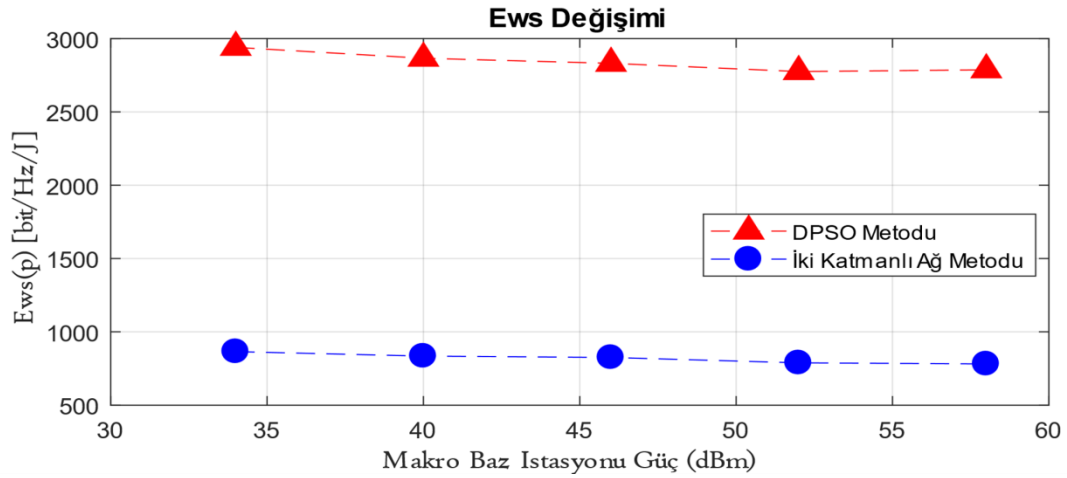
Şekil 3.17.'de Femto baz istasyonu güç ile toplam hız değişimi incelenmiştir. Yapılan incelemede, DPSO Metodu ile yapılan hesaplamada femto baz istasyonu gücü artışına göre toplam hız değerinde de artış gözlenmiştir. İki Katmanlı Ağ Metodu'nda da femto baz istasyonu gücü artışına göre toplam hız değerinde de artış gözlenmiştir.

3.9. Makro Baz İstasyonu Güç Değişimine Göre Ews, Enet ve Toplam Hız Değişimleri

Bu kısımda Tablo 3.7.'deki verilerden hareketle Şekil 3.18., Şekil 3.19. ve Şekil 3.20. grafikleri elde edilmiştir. Bu grafikler ile beraber Matlab programı kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen verilerin analizi de yapılmıştır. Bu analizler sayesinde, her iki yöntemin de farklı parametrelerdeki performanslarının belirlenmesi ve en uygun parametrelerin belirlenmesi sağlanmıştır.

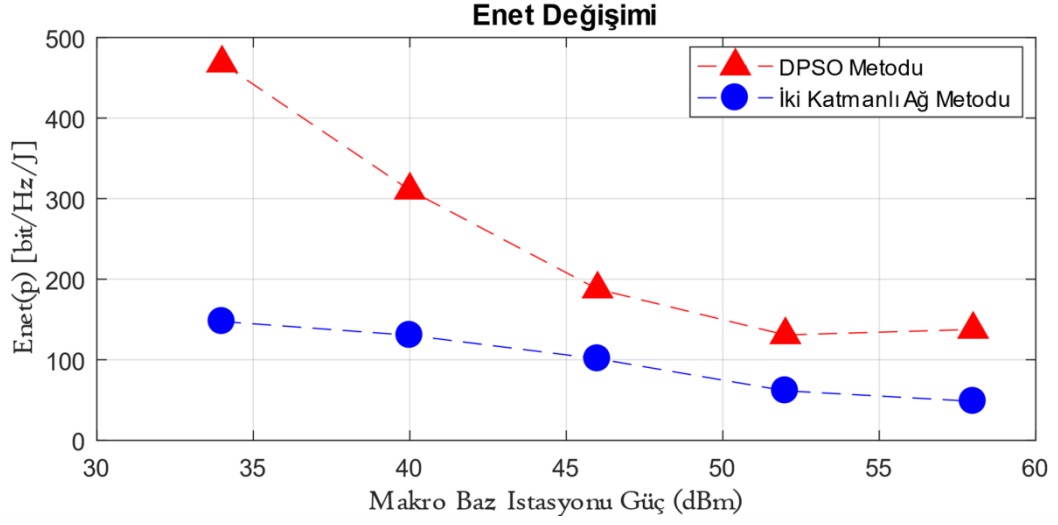
Tablo 3.7. Makro baz istasyonu güç değişimlerine göre HetNets ağı matlab programı simülasyon parametreleri

Parametre	Değer
Kullanıcı Sayısı	20
Makro Baz İstasyonu Sayısı	1
Femto Baz İstasyonu Sayısı	5
Kaynak Blok Sayısı	50
Makro Baz İstasyonu Kapsama Çapı	150m
Kullanıcıların Makro Baz İstasyonuna Olan Minimum Uzaklığı	40m
Kullanıcıların Femto Baz İstasyonuna Olan Minimum Uzaklığı	3m
İki Femto Baz İstasyonu Arasındaki Minimum Uzaklık	5m
Bant Genişliği	180e3
Gürültü Gücü Yoğunluğu	-174dbm/Hz
Statik Güç	30dBm
Makro Baz İstasyonu Gücü	34:6:58 dBm
Femto Baz İstasyonu Gücü	24dBm
DPSO Ceza Katsayısı	1e15
DPSO Parçacık Sayısı	20
DPSO İterasyon Sayısı	1000



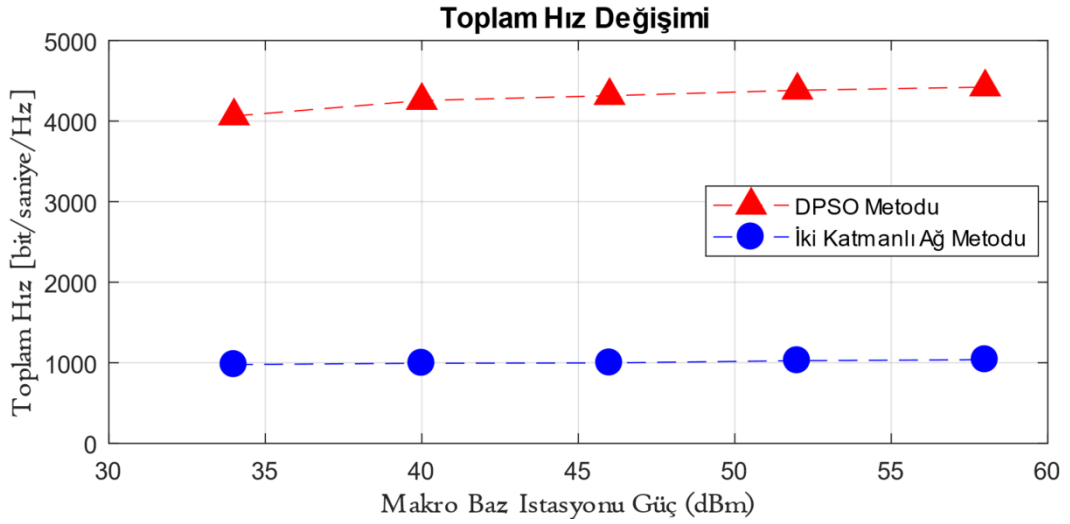
Şekil 3.18. Makro baz istasyonu güç ve Ews değişim grafiği

Şekil 3.18.'de Makro baz istasyonu güç ile Ews değişimi incelenmiştir. Yapılan incelemede, DPSO Metodu ile yapılan hesaplamada makro baz istasyonu güç değeri 46 dBm'e kadar Ews değerinde düşüşe neden olurken bu değerden sonra Ews değerinde çok fazla bir değişiklik olmamıştır. İki Katmanlı Ağ Metodu'nda da makro baz istasyonu güç değeri 46 dBm'e kadar Ews değerinde artış gösterirken bu değerden sonra Ews değerinde çok az bir düşüş meydana gelmiştir.



Şekil 3.19. Makro baz istasyonu güç ve Enet değişim grafiği

Şekil 3.19.'da Makro baz istasyonu güç ile Enet değişimi incelenmiştir. Yapılan incelemede, DPSO Metodu ile yapılan hesaplamada makro baz istasyonu güç değeri 52 dBm değerine kadar Enet üzerinde bir düşüşe neden olurken bu değerden sonra Enet değeri çok az olacak şekilde tekrar artışa geçmiştir. İki Katmanlı Ağ Metodu'nda da makro baz istasyonu güç değeri 52 dBm'e kadar Enet değerinde hızlı bir düşüş meydana getirirken bu değerden sonra Enet değişimi çok az olacak şekilde düşüş gerçekleşmiştir.



Şekil 3.20. Makro baz istasyonu güç ve toplam hız değişim grafiği

Şekil 3.20.'de Makro baz istasyonu güç ile toplam hız değişimi incelenmiştir. Yapılan incelemede, DPSO Metodu ile yapılan hesaplamada makro baz istasyonu güç değeri artışı toplam hız üzerinde çok az olacak şekilde bir artış meydana getirmiştir. İki Katmanlı Ağ Metodu'nda da makro baz istasyonu güç değeri artışı toplam hız üzerinde belirgin bir değişiklik meydana getirmemiştir.

3.10. DPSO ve İki Katmanlı Ağ Metodu Koşma Zamanları

Bu kısımda Tablo 3.8.'deki verilerden hareketle Şekil 3.21. ve Şekil 3.22. grafikleri elde edilmiştir. Bu grafikler ile beraber Matlab programı kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen verilerin analizi de yapılmıştır. Bu analizler sayesinde, her iki yöntemin de farklı parametrelerdeki performanslarının belirlenmesi ve en uygun parametrelerin belirlenmesi sağlanmıştır.

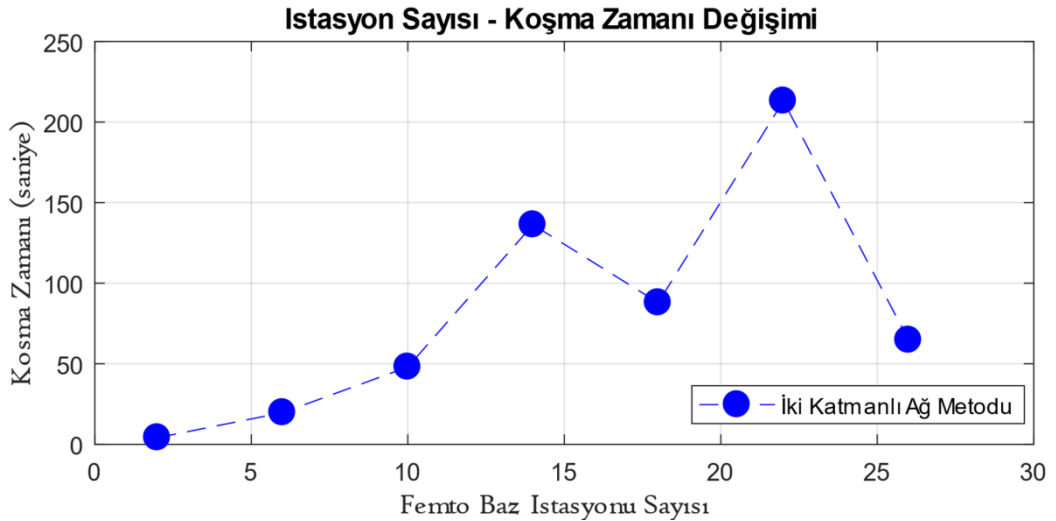
Tablo 3.8. DPSO ve İki Katmanlı Ağ Metodu koşma zamanlarına göre HetNets ağı matlab programı simülasyon parametreleri

Parametre	Değer
Kullanıcı Sayısı	20
Makro Baz İstasyonu Sayısı	1
Femto Baz İstasyonu Sayısı	2:4:26
Kaynak Blok Sayısı	50
Makro Baz İstasyonu Kapsama Çapı	150m
Kullanıcıların Makro Baz İstasyonuna Olan Minimum Uzaklığı	40m
Kullanıcıların Femto Baz İstasyonuna Olan Minimum Uzaklığı	3m
İki Femto Baz İstasyonu Arasındaki Minimum Uzaklık	5m
Bant Genişliği	180e3
Gürültü Gücü Yoğunluğu	-174dbm/Hz
Statik Güç	30dBm
Makro Baz İstasyonu Gücü	46dBm
Femto Baz İstasyonu Gücü	24dBm
DPSO Ceza Katsayısı	1e15
DPSO Parçacık Sayısı	20
DPSO İterasyon Sayısı	1000



Şekil 3.21. Femto baz istasyonu sayısına göre DPSO Metodu ile koşma zamanı değişim grafiği

Şekil 3.21.'de Femto baz istasyonu sayısı ile koşma zamanı değişimi incelenmiştir. Yapılan incelemede, DPSO Metodu ile yapılan hesaplamada femto baz istasyonu sayısı arttıkça sistemin koşma zamanında sürekli bir artış meydana gelmiştir. Sonuç olarak femto baz istasyonu sayısının artması sistemin optimizasyonunu zorlaştırmaktadır.



Şekil 3.22. Femto baz istasyonu sayısına göre İki Katmanlı Ağ Metodu ile koşma zamanı değişim grafiği

Şekil 3.22.'de Femto baz istasyonu sayısı ile koşma zamanı değişimi incelenmiştir. Yapılan incelemede, İki Katmanlı Ağ Metodu ile yapılan hesaplamada femto baz istasyonu

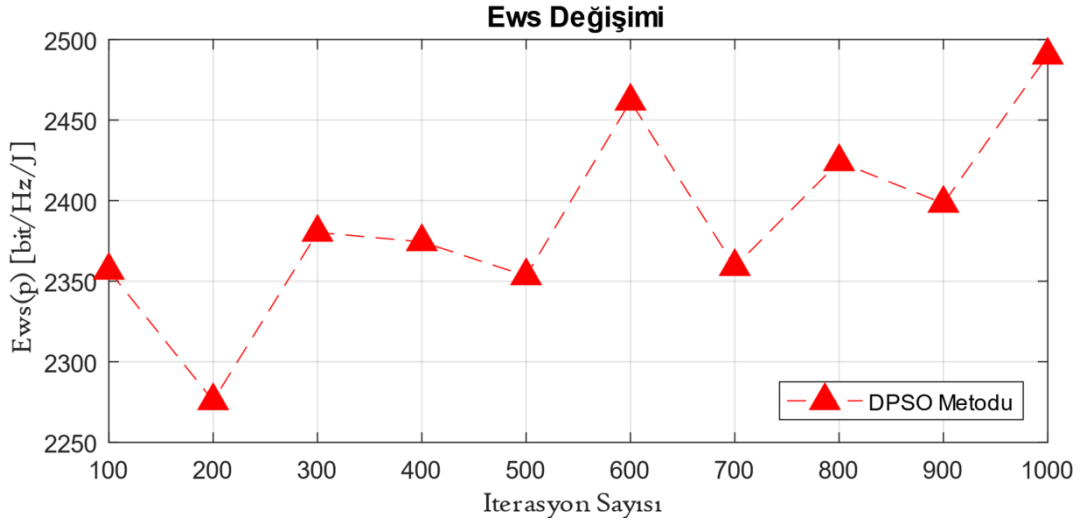
sayısı 14'e kadar koşma zamanında artış meydana getirirken femto baz istasyonu sayısı 18 ve 26'da koşma zamanında düşüş gerçekleşmiştir. Sonuç olarak femto baz istasyonu sayısı 22'de sistemin koşma süresi en fazla olmuştur. Yani bu değerle sistem optimizasyonu zorlanmaktadır.

3.11. DPSO'daki İterasyon Sayısına WSEE Maksimum Olacak Şekilde Ews, Enet ve Toplam Hız Değişimleri

Bu kısımda Tablo 3.9.'deki verilerden hareketle Şekil 3.23., Şekil 3.24 ve Şekil 3.25. grafikleri elde edilmiştir. Bu grafikler ile beraber Matlab programı kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen verilerin analizi de yapılmıştır. Bu analizler sayesinde, her iki yöntemin de farklı parametrelerdeki performanslarının belirlenmesi ve en uygun parametrelerin belirlenmesi sağlanmıştır.

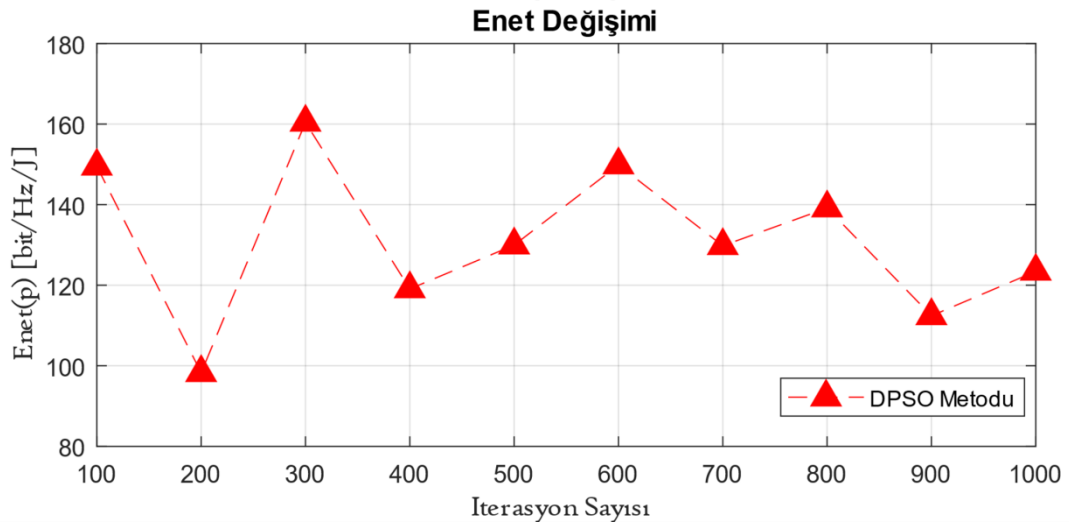
Tablo 3.9. WSEE maksimum olacak şekilde iterasyon sayısına göre HetNets ağı için matlab programı simülasyon parametreleri

Parametre	Değer
Kullanıcı Sayısı	20
Makro Baz İstasyonu Sayısı	1
Femto Baz İstasyonu Sayısı	4
Kaynak Blok Sayısı	50
Makro Baz İstasyonu Kapsama Çapı	150m
Kullanıcıların Makro Baz İstasyonuna Olan Minimum Uzaklığı	40m
Kullanıcıların Femto Baz İstasyonuna Olan Minimum Uzaklığı	3m
İki Femto Baz İstasyonu Arasındaki Minimum Uzaklık	5m
Bant Genişliği	180e3
Gürültü Gücü Yoğunluğu	-174dbm/Hz
Statik Güç	30dBm
Makro Baz İstasyonu Gücü	46dBm
Femto Baz İstasyonu Gücü	24dBm
DPSO Ceza Katsayısı	1e15
DPSO Parçacık Sayısı	20
DPSO İterasyon Sayısı	100:100:1000



Şekil 3.23. WSEE maksimum olacak şekilde iterasyon sayısı ve Ews değişim grafiği

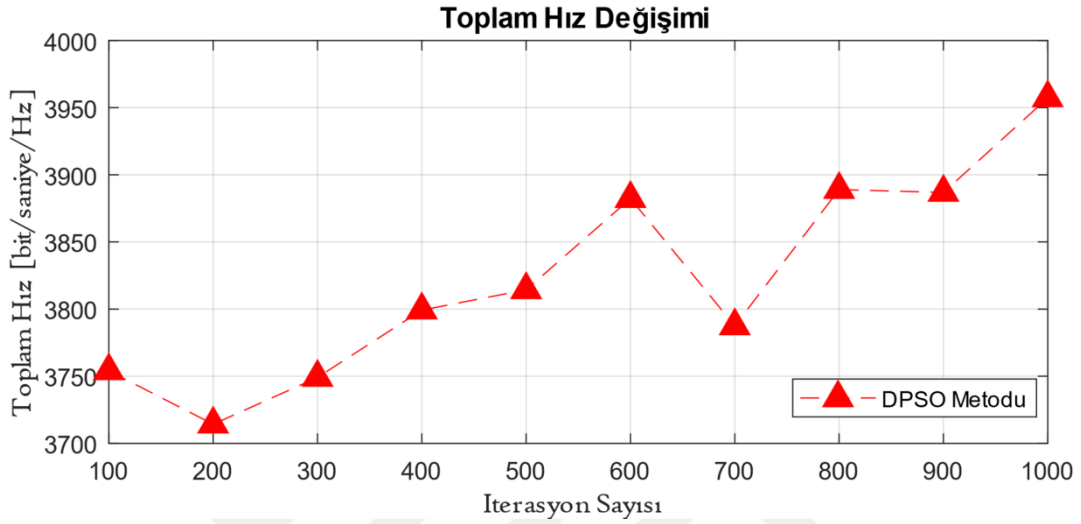
Şekil 3.23.'de WSEE Maksimum olacak şekilde iterasyon sayısı ve Ews değişimi incelenmiştir. Yapılan incelemede, DPSO Metodu ile yapılan hesaplamada iterasyon sayısı 200,500,700 ve 900'de Ews değeri düşmüştür. 1000 iterasyon değerinde maksimum Ews değeri elde edilmiştir. Sonuç olarak iterasyon sayısı artışı Ews değerinde genel bir artış meydana getirmiştir.



Şekil 3.24. WSEE maksimum olacak şekilde iterasyon sayısı ve Enet değişim grafiği

Şekil 3.24.'de WSEE Maksimum olacak şekilde iterasyon sayısı ve Enet değişimi incelenmiştir. Yapılan incelemede, DPSO Metodu ile yapılan hesaplamada iterasyon sayısı

200,400,700 ve 900’de Enet değeri düşmüştür. 300 iterasyon değerinde maksimum Enet değeri elde edilmiştir. Sonuç olarak sürekli iterasyon artışı Enet değeri üzerinde çok fazla bir artış meydana getirmemiştir.



Şekil 3.25. WSEE maksimum olacak şekilde iterasyon sayısı ve toplam hız değişim grafiği

Şekil 3.25.’de WSEE Maksimum olacak şekilde iterasyon sayısı ve toplam hız değişimi incelenmiştir. Yapılan incelemede, DPSO Metodu ile yapılan hesaplamada iterasyon sayısı 200,700 ve 900’da toplam hız değeri düşmüştür. İterasyon sayısı 600’e kadar toplam hız değerinde sürekli bir artış gerçekleşirken maksimum hız değerine 1000 iterasyon değerinde ulaşmıştır. Sonuç olarak iterasyon sayısı artışı toplam hız üzerinde artış meydana getirmiştir.

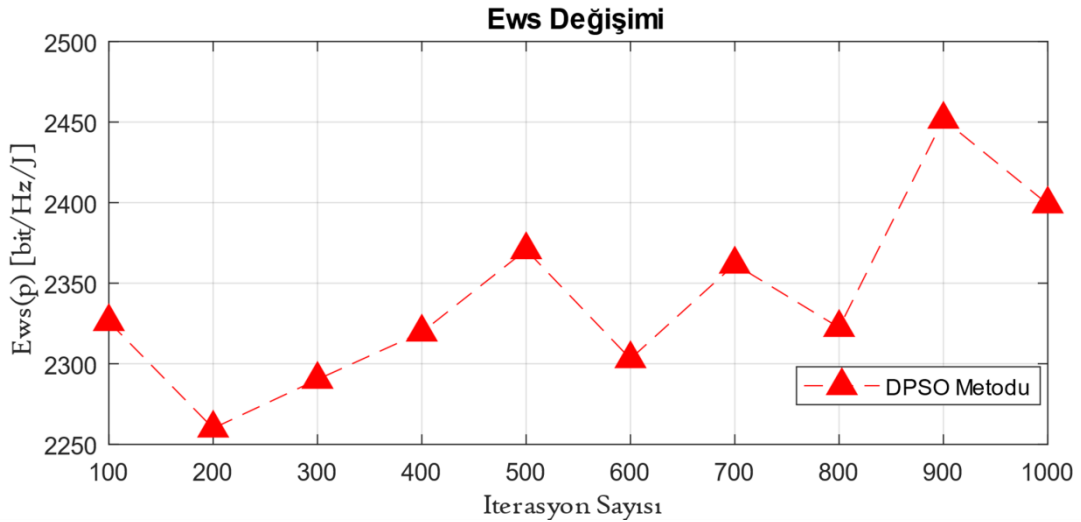
3.12. DPSO’daki İterasyon Sayısına NEE Maksimum Olacak Şekilde Ews, Enet ve Toplam Hız Değişimleri

Bu kısımda Tablo 3.10.’daki verilerden hareketle Şekil 3.26., Şekil 3.27 ve Şekil 3.28. grafikleri elde edilmiştir. Bu grafikler ile beraber Matlab programı kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen verilerin analizi de yapılmıştır. Bu analizler

sayesinde, her iki yöntemin de farklı parametrelerdeki performanslarının belirlenmesi ve en uygun parametrelerin belirlenmesi sağlanmıştır.

Tablo 3.10. NEE maksimum olacak şekilde iterasyon sayısına göre HetNets ağı matlab programı simülasyon parametreleri

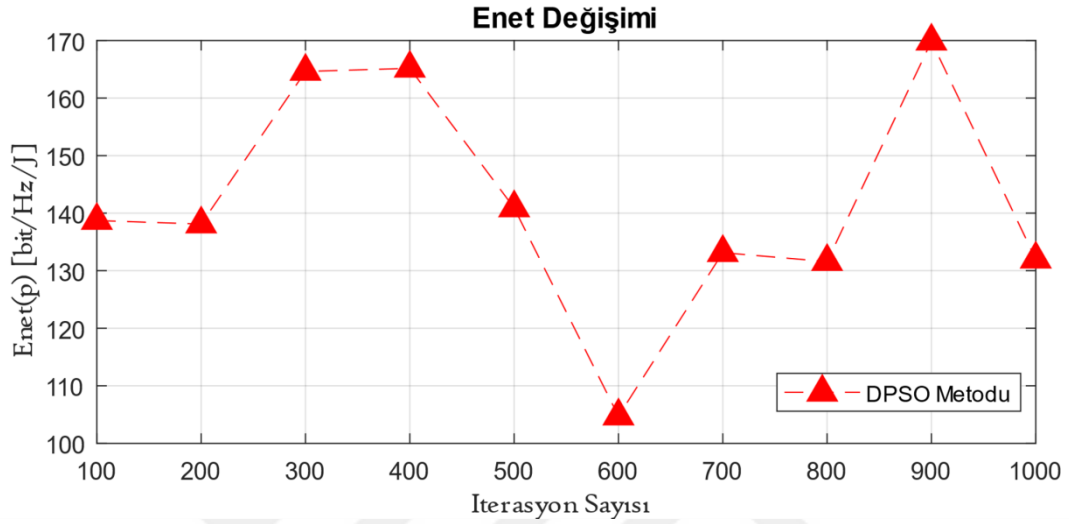
Parametre	Değer
Kullanıcı Sayısı	20
Makro Baz İstasyonu Sayısı	1
Femto Baz İstasyonu Sayısı	4
Kaynak Blok Sayısı	50
Makro Baz İstasyonu Kapsama Çapı	150m
Kullanıcıların Makro Baz İstasyonuna Olan Minimum Uzaklığı	40m
Kullanıcıların Femto Baz İstasyonuna Olan Minimum Uzaklığı	3m
İki Femto Baz İstasyonu Arasındaki Minimum Uzaklık	5m
Bant Genişliği	180e3
Gürültü Gücü Yoğunluğu	-174dbm/Hz
Statik Güç	30dBm
Makro Baz İstasyonu Gücü	46dBm
Femto Baz İstasyonu Gücü	24dBm
DPSO Ceza Katsayısı	1e15
DPSO Parçacık Sayısı	20
DPSO İterasyon Sayısı	100:100:1000



Şekil 3.26. NEE maksimum olacak şekilde iterasyon sayısı ve Ews değişim grafiği

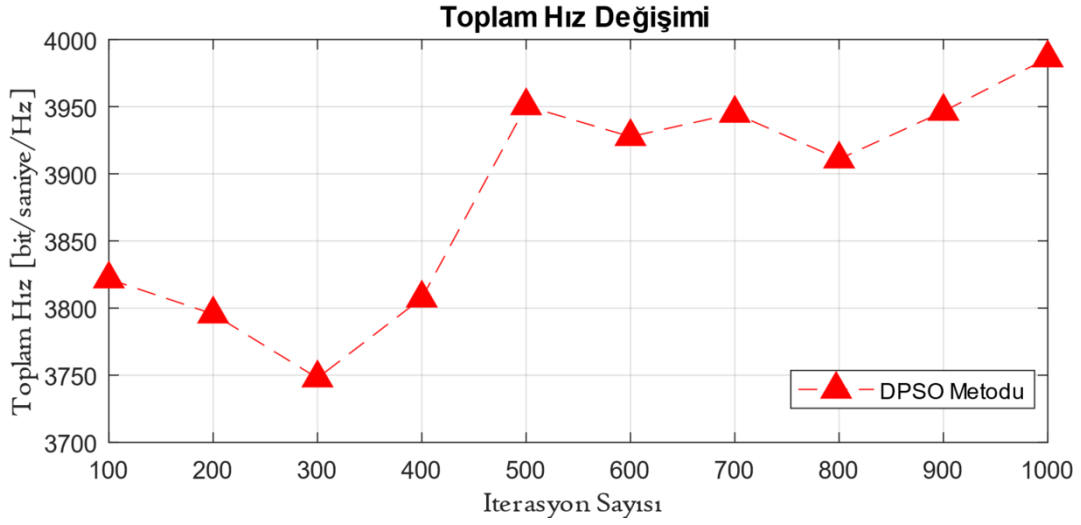
Şekil 3.26.'da NEE Maksimum olacak şekilde iterasyon sayısı ve Ews değişimi incelenmiştir. Yapılan incelemede, DPSO Metodu ile yapılan hesaplamada iterasyon sayısı

200,600,800 ve 1000’de Ews değeri düşmüştür. 900 iterasyon değerinde maksimum Ews değeri elde edilmiştir. Sonuç olarak iterasyon sayısı artışı Ews değerinde genel bir artış meydana getirmiştir.



Şekil 3.27. NEE maksimum olacak şekilde iterasyon sayısı ve Enet değişim grafiği

Şekil 3.27.’de NEE Maksimum olacak şekilde iterasyon sayısı ve Enet değişimi incelenmiştir. Yapılan incelemede, DPSO Metodu ile yapılan hesaplamada iterasyon sayısı 200,600,800 ve 1000’de Enet değeri düşmüştür. 900 iterasyon değerinde maksimum Enet değeri elde edilmiştir. Sonuç olarak iterasyon sayısı değişimi bazı değerlerde çok fazla düşüş meydana getirmiş olsa da iterasyon sayısı artışı Enet değerinde genel bir artış meydana getirmiştir.



Şekil 3.28. NEE maksimum olacak şekilde iterasyon sayısı ve toplam hız değişim grafiği

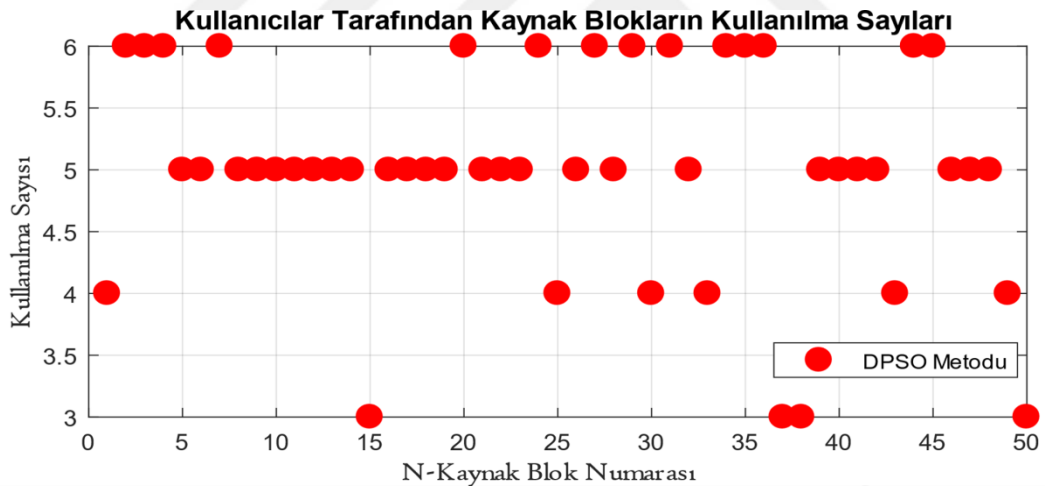
Şekil 3.28.'de NEE Maksimum olacak şekilde iterasyon sayısı ve toplam hız değişimi incelenmiştir. Yapılan incelemede, DPSO Metodu ile yapılan hesaplamada iterasyon sayısı 300,600 ve 800'de toplam hız değeri düşmüştür. 1000 iterasyon değerinde maksimum toplam hız değeri elde edilmiştir. Sonuç olarak iterasyon sayısı 300'de toplam hız değerinde çok fazla bir düşüş meydana getirmiş olsa da iterasyon sayısı artışı toplam hız değerinde sürekli bir artış meydana getirmiştir.

3.13. Kullanıcılar Tarafından Her Kaynak Bloğun Kullanılma Sayıları

Bu kısımda Tablo 3.11.'deki verilerden hareketle Şekil 3.29. ve Şekil 3.30. grafikleri elde edilmiştir. Bu grafikler ile beraber Matlab programı kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen verilerin analizi de yapılmıştır. Bu analizler sayesinde, her iki yöntemin de farklı parametrelerdeki performanslarının belirlenmesi ve en uygun parametrelerin belirlenmesi sağlanmıştır.

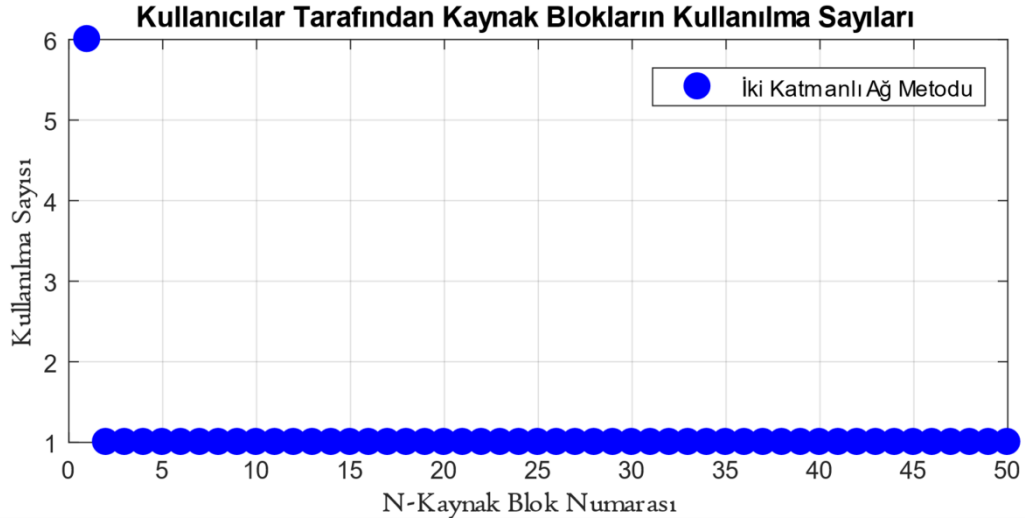
Tablo 3.11. Kullanıcılar tarafından her kaynak bloğun kullanılma sayılarına göre HetNets ağıın matlab programı simülasyon parametreleri

Parametre	Değer
Kullanıcı Sayısı	30
Makro Baz İstasyonu Sayısı	1
Femto Baz İstasyonu Sayısı	6
Kaynak Blok Sayısı	50
Makro Baz İstasyonu Kapsama Çapı	150m
Kullanıcıların Makro Baz İstasyonuna Olan Minimum Uzaklığı	40m
Kullanıcıların Femto Baz İstasyonuna Olan Minimum Uzaklığı	3m
İki Femto Baz İstasyonu Arasındaki Minimum Uzaklık	5m
Bant Genişliği	180e3
Gürültü Gücü Yoğunluğu	-174dbm/Hz
Statik Güç	30dBm
Makro Baz İstasyonu Gücü	46dBm
Femto Baz İstasyonu Gücü	24dBm
DPSO Ceza Katsayısı	1e15
DPSO Parçacık Sayısı	20
DPSO İterasyon Sayısı	1000



Şekil 3.29. DPSO Metodu ile kullanıcılar tarafından kaynak blokların kullanılma sayıları değişim grafiği

Şekil 3.29.'da DPSO Metodu ile kullanıcılar tarafından kaynak blokların kullanılma sayıları değişimi incelenmiştir. Yapılan incelemede, DPSO Metodu ile yapılan hesaplamada genel olarak her kaynak blok ortalama 5 kez kullanılmıştır. Sonuç olarak kaynak blokların dağıtımında, her kaynak bloğun eşit derecede kullanılmaya çalışıldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.30. İki Katmanlı Ağ Metodu ile kullanıcılar tarafından kaynak blokların kullanılma sayıları değişim grafiği

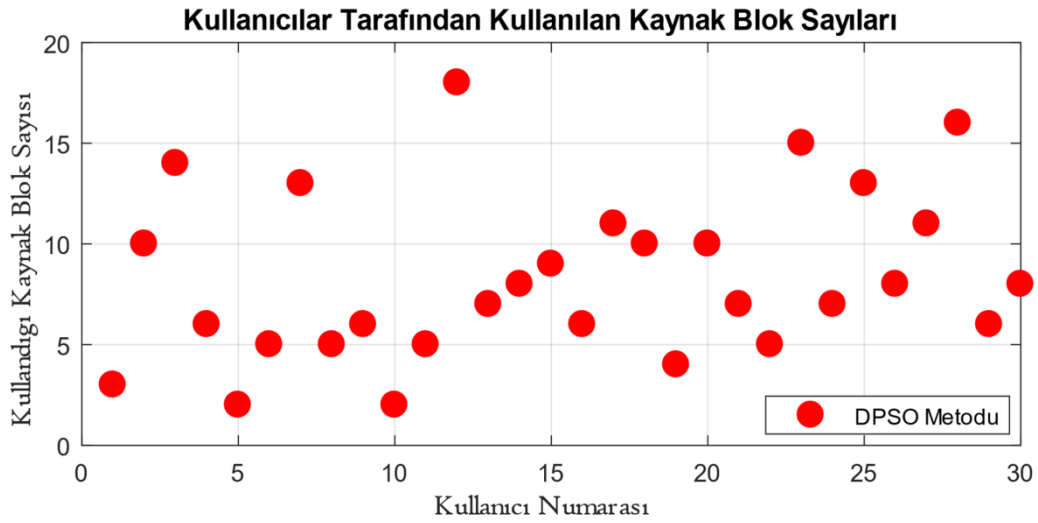
Şekil 3.30.'da İki Katmanlı Ağ Metodu ile kullanıcılar tarafından kaynak blokların kullanılma sayıları değişimi incelenmiştir. Yapılan incelemede, İki Katmanlı Ağ Metodu ile yapılan hesaplamada genel olarak her kaynak blok ortalama 1 kez kullanılmıştır. Sonuç olarak kullanılan kaynak bloğun, tekrar kullanılmadığı gözlemlenmiştir.

3.14. Kullanıcılar Tarafından Kullanılan Kaynak Blok Sayıları

Bu kısımda Tablo 3.12.'deki verilerden hareketle Şekil 3.31. ve Şekil 3.32. grafikleri elde edilmiştir. Bu grafikler ile beraber Matlab programı kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen verilerin analizi de yapılmıştır. Bu analizler sayesinde, her iki yöntemin de farklı parametrelerdeki performanslarının belirlenmesi ve en uygun parametrelerin belirlenmesi sağlanmıştır.

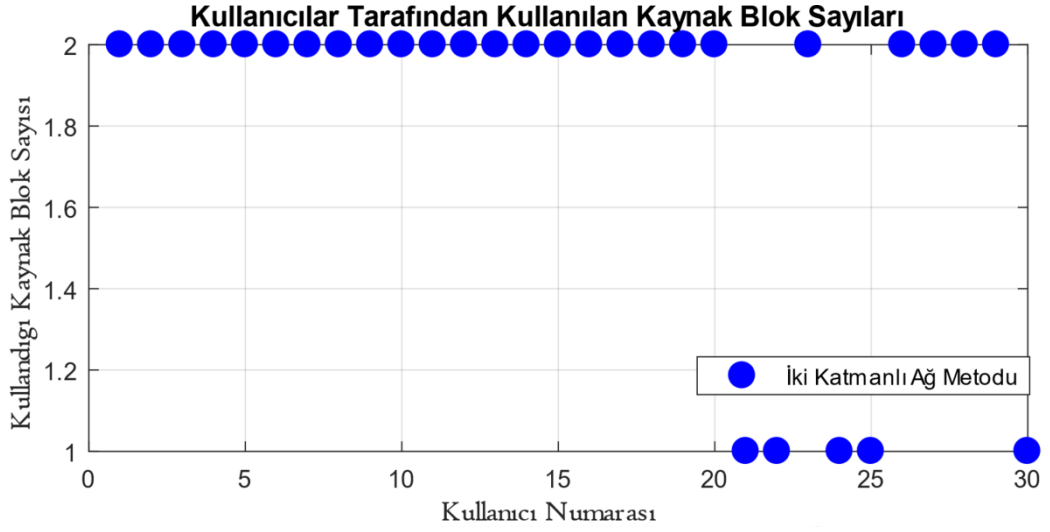
Tablo 3.12. Kullanıcılar tarafından kullanılan kaynak blok sayılarına göre HetNets ağı matlab programı simülasyon parametreleri

Parametre	Değer
Kullanıcı Sayısı	30
Makro Baz İstasyonu Sayısı	1
Femto Baz İstasyonu Sayısı	6
Kaynak Blok Sayısı	50
Makro Baz İstasyonu Kapsama Çapı	150m
Kullanıcıların Makro Baz İstasyonuna Olan Minimum Uzaklığı	40m
Kullanıcıların Femto Baz İstasyonuna Olan Minimum Uzaklığı	3m
İki Femto Baz İstasyonu Arasındaki Minimum Uzaklık	5m
Bant Genişliği	180e3
Gürültü Gücü Yoğunluğu	-174dbm/Hz
Statik Güç	30dBm
Makro Baz İstasyonu Gücü	46dBm
Femto Baz İstasyonu Gücü	24dBm
DPSO Ceza Katsayısı	1e15
DPSO Parçacık Sayısı	20
DPSO İterasyon Sayısı	1000



Şekil 3.31. DPSO Metodu ile kullanıcılar tarafından kullanılan kaynak blok sayıları değişim grafiği

Şekil 3.31.'de DPSO Metodu ile kullanıcılar tarafından kullanılan kaynak blok sayıları değişimi incelenmiştir. Yapılan incelemede, DPSO Metodu ile yapılan hesaplamada genel olarak her kullanıcı eşit miktarda kaynak blok kullanmıştır. Sonuç olarak kaynak blok tahsisi optimum olacak şekilde ayarlandığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.32. İki Katmanlı Ağ Metodu ile kullanıcılar tarafından kullanılan kaynak blok sayıları değişim grafiği

Şekil 3.32.'de İki Katmanlı Ağ Metodu ile kullanıcılar tarafından kullanılan kaynak blok sayıları değişimi incelenmiştir. Yapılan incelemede, İki Katmanlı Ağ Metodu ile yapılan hesaplamada genel olarak her kullanıcı 2 adet kaynak blok kullanmıştır. Sonuç olarak kaynak blok tahsisi optimum olacak şekilde ayarlandığı gözlemlenmiştir.

4. SONUÇLAR

Bu tez çalışması, Heterojen Ağlarda Dikgen Frekans Bölmeli Çoklu Erişim ile Kaynak Tahsisi teknolojisi üzerinde yoğunlaşmıştır. Heterojen ağlar az enerji gereksinimi olan femto baz istasyonları ve büyük enerji gereksinimi olan makro baz istasyonlarından meydana gelmektedirler. İncelenen heterojen ağda, 1 adet makro baz istasyonu ve birden fazla femto baz istasyonu ve kullanıcılar yer almaktadır. Kaynak tahsis işlemi, Ayrık Parçacık Sürü Optimizasyonu (DPSO) ve İki Katmanlı Ağ Metodu olmak üzere iki yöntemle ele alınmıştır. Bu iki yöntem arasındaki veriler, kaynak tahsisinin etkinliğini ve performansını değerlendirmek için hesaplanmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

Kullanıcı sayısı artışına göre bakıldığında DPSO Metodu'nda Ews ve toplam hız artarken, Enet değeri azalmıştır. İki Katmanlı Ağ Metodu'nda ise Ews ve toplam hız çok az değişim gösterirken, Enet değeri azalmıştır.

Kaynak blok sayısı artışına göre bakıldığında DPSO Metodu'nda Ews, Enet ve toplam hız artmıştır. İki Katmanlı Ağ Metodu'nda da Ews, Enet ve toplam hız artmıştır.

Femto baz istasyonu sayısı artışına göre bakıldığında DPSO Metodu'nda Ews, Enet ve toplam hız artmıştır. İki Katmanlı Ağ Metodu'nda ise Ews artmış, Enet artıp azalmış ve toplam hız çok az değişim göstermiştir.

Statik güç artışına göre bakıldığında DPSO Metodu'nda Ews, Enet azalmış ve toplam hız çok az değişim göstermiştir. İki Katmanlı Ağ Metodu'nda ise Ews, Enet azalmış ve toplam çok az değişmiştir.

Femto baz istasyonu güç artışına göre bakıldığında DPSO Metodu'nda Ews, Enet önce artıp daha sonra azalmıştır, toplam hız ise artmıştır. İki Katmanlı Ağ Metodu'nda ise Ews, Enet ve toplam hız değeri artmıştır.

Makro baz istasyonu güç artışına göre bakıldığında DPSO Metodu'nda Ews çok az, Enet ise çok fazla azalmıştır, toplam hız ise çok az artmıştır. İki Katmanlı Ağ Metodu'nda ise Enet azalmış, Ews ve toplam hız değeri ise çok az değişmiştir.

Femto baz istasyonu sayısı artışına göre DPSO Metodu koşma zamanına bakıldığında koşma zamanı artmıştır. İki Katmanlı Ağ Metodu'nda ise koşma zamanı önce artmış daha sonra azalmıştır.

DPSO Metodu'ndaki iterasyon sayısı artışına göre WSEE maksimum olacak şekilde incelendiğinde Ews, toplam hız artmıştır, Enet ise azalmıştır.

DPSO Metodu'ndaki iterasyon sayısı artışına göre NEE maksimum olacak şekilde incelendiğinde Ews, toplam hız artmıştır, Enet ise önce artmış daha sonra azalmıştır. Son değeri ise ilk değere göre çok az değişmiştir.

Kullanıcılar tarafından kullanılan kaynak blokların, kullanılma sayısına göre bakıldığında DPSO Metodu'nda ortalama sayı 5'tir. Yani genel olarak kaynak bloklar yakın sayıda kullanılmaya çalışılmıştır. İki Katmanlı Ağ Metodu'nda ise genel olarak her kaynak blok 1 kere kere kullanılmıştır.

Kullanıcılar tarafından kullanılan kaynak blok sayılarına göre bakıldığında DPSO Metodu'nda genel olarak her kullanıcı birbirine yakın sayıda kaynak blok kullanmıştır. İki Katmanlı Ağ Metodu'nda ise her kullanıcı genel olarak eşit sayıda yani 2 kaynak blok kullanmıştır.

Sonuç olarak, her iki yöntem de başarılı sonuçlar vermiştir, ancak DPSO Metodu, daha yüksek verimlilik ve daha az kaynak kullanımı sağlayarak daha iyi performans göstermiştir. Bu tez, heterojen ağlarda kaynak tahsisi alanında yeni araştırmalara ışık tutabilir ve ileride bu alandaki çalışmaların geliştirilmesine katkı sağlayabilir.

5. KAYNAKÇA

- 3GPP TR 36.932 (V12.1.0), 2013. Scenarios and requirements for small cell enhancements for E-UTRA and E-UTRAN (Release 12).
- Abdelnasser, A. ve Hossain, E., 2013. Subchannel and Power Allocation Schemes for Clustered Femtocells in Two-Tier OFDMA Hetnets, In 2013 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC), 1129-1133, IEEE.
- Aiempo, P., Boonsrimuang, P., Mata, T. ve Anunvapong, P., 2017. An efficient uplink OFDMA channel estimation under high-speed mobile environment, In 2017 14th International Conference on Electrical Engineering / Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 167-170, IEEE.
- Armstrong, M., Brooks, M., Churnside, A., Evans, M., Melchior, F. ve Shotton, M., 2014. Object-Based Broadcasting-Curation, Responsiveness and User Experience, in Proc. IBC Conf., 1-8.
- Auer, G., Giannini, V., Dessel, C., Godor, I., Skillermark, P., Olsson, M., ... ve Fehske, A., 2011. How Much Energy is Needed to Run a Wireless Network, IEEE Wireless Communications, 18, 5, 40-49.
- Bahai, A.R., Saltzberg, B.R. ve Ergen, M., 2004. Multi-Carrier Digital Communications:
- Bastug, E., Bennis, M. ve Debbah, M., 2014. Living on The Edge: The Role of Proactive Caching in 5G Wireless Networks, IEEE Commun. Mag., 52, 8, 82-89.
- Boukerche, A. ve Dash, T., 2003. A Performance Analysis of a Refined Hybrid TDMA / CDMA Protocol for Wireless Networks with QoS Adaptations, Proceedings of the 22nd IEEE International Performance Computing Communications Conference, 369-374.
- Cai, Y., Qin, Z., Cui, F., Li, G.Y. ve McCann, J.A., 2017. Modulation and Multiple Access for 5G Networks, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 20, 1, 629-646.
- Chen, X., Chen, Z. ve Wu, Y., 2008. Leveraging Pseudo-TDMA to a Controllable and Bandwidth-Efficient Village area WiFi Networks, Proc. Int. Conf. Wireless Commun. Netw. Mobile Comput., 1-5.
- Correia, I. M., Zeller, D., Blume, O., Ferling, D., Jading, Y., God'or, I., Auer, G. ve Perre, L. V. D., 2010. Challenges and Enabling Technologies for Energy Aware Mobile Radio Networks," IEEE Commun. Mag., 48, 11, 66-72.
- Dai, L., Wang, B., Ding, Z., Wang, Z., Chen, S. ve Hanzo, L., 2018. A Survey of Non-Orthogonal Multiple Access for 5G, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 20, 3, 2294-2323.
- Dai, L., Wang, B., Yuan, Y., Han, S., Chih-Lin, I. ve Wang, Z., 2015. Non-Orthogonal Multiple Access for 5G: Solutions, Challenges, Opportunities, and Future Research Trends, IEEE Communications Magazine, 53, 9, 74-81.

- Ding, Z., Yang, Z., Fan, P. ve Poor, H. V., 2014. On The Performance of Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems with Randomly Deployed Users, *IEEE Signal Processing Letters*, 21, 12, 1501-1505.
- Eberhart, R. C. ve Kennedy, J., 1995. A New Optimizer Using Particle Swarm Theory, *Proc. of Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, 39-43, IEEE.
- Elfadil, H. E., Ali, M. A. I. ve Abas, M., 2015. Performance evaluation of Heterogeneous Networks schemes in LTE networks, In *2015 International Conference on Computing, Control, Networking, Electronics and Embedded Systems Engineering (ICCNEEE)*, 401-408, IEEE.
- Ergen, M., 2009. *Mobile Broadband: Including WiMAX and LTE*, Springer Science & Business Media.
- Forney, G. D. ve Ungerböck, G. 1998. Modulation and Coding for Linear Gaussian channels, *IEEE Transactions on Information Theory*, 44, 6, 2384-2415.
- García-Morales, J., Femenias, G. ve Riera-Palou, F., 2015. Channel-Aware Scheduling in FFR-Aided OFDMA-Based Heterogeneous Cellular Networks, In *2015 IEEE International Conference on Computer and Information Technology; Ubiquitous Computing and Communications; Dependable, Autonomic and Secure Computing; Pervasive Intelligence and Computing*, 44-51, IEEE.
- Gelabert, X., Pérez-Romero, J., Sallent, O. ve Agusti, R., 2008. A Markovian Approach to Radio Access Technology Selection in Heterogeneous Multiaccess/Multiservice Wireless Networks, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 7, 10, 1257-1270.
- Geng, Y. ve Nair, C., 2014. "The Capacity Region of the Two-Receiver Gaussian Vector Broadcast Channel with Private and Common Messages, *IEEE Trans. Inf. Theory*, 60, 4, 2087-2104.
- Goldsmith, A., 2005. *Wireless Communications*, Cambridge.
- Ha, V. N. ve Le, L. B., 2013. Fair Resource Allocation for OFDMA Femtocell Networks with Macrocell Protection, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 63, 3, 1388-1401.
- Hara, S. ve Prasad, R., 2003. *Multicarrier Techniques for 4G Mobile Communications*, Artech House.
- Héliot, F., Yang, T. ve Foh, C. H., 2015. Low-Complexity Green Scheduling for the Coordinated Downlink of HetNet System, In *2015 IEEE 20th International Workshop on Computer Aided Modelling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, 216-220, IEEE.
- Hu, R. Q. ve Qian, Y., 2014. An Energy Efficient and Spectrum Efficient Wireless Heterogeneous Network Framework for 5G Systems, *IEEE Communications Magazine*, 52, 5, 94-101.
- Huck, T., Schirmer, J., Hogenmuller, T. ve Dostert, K., 2005. Tutorial About the Implementation of a Vehicular High Speed Communication System, *International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, Vancouver, BC, Canada, 162-166.

- Jakllari, G., Neufeld, M. ve Ramanathan, R., 2012. A framework for frameless TDMA using slot chains, *Proc. IEEE Int. Conf. Mobile Adhoc Sensor Syst. (MASS)*, 56-64.
- Jiang, J., Peng, M., Zhang, K. ve Li, L., 2013. Energy-Efficient Resource Allocation in Heterogeneous Network with Cross-tier Interference Constraint, In *2013 IEEE 24th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC Workshops)*, 168-172, IEEE.
- Jindal, N. ve Goldsmith, A., 2005. DPC vs. TDMA for MIMO Broadcast Channels, *IEEE Trans. Inform. Theory*, 1783-94.
- Kaneko, M., Nakano, T., Hayashi, K., Kamenosono, T. ve Sakai, H., 2016. Distributed Resource Allocation with Local CSI Overhearing and Scheduling Prediction for OFDMA Heterogeneous Networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66, 2, 1186-1199.
- Kennedy, J. ve Eberhart, R. C., 1995. Particle Swarm Optimization, *Proc. of IEEE International Conference on Neural Networks*, 4, 1942-1948, IEEE.
- Khan, M. A., Umair, M. ve Choudhry, M. A. S., 2015. GA Based Adaptive Receiver for MC-CDMA System, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 23, 1, 2267-2277, 2015.
- Kosta, C., Hunt, B., Quddus, A. U. ve Tafazolli, R., 2013. Distributed Energy-Efficient Inter-cell Interference Coordination (ICIC) in Multi-Cell Hetnets, In *2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 1-5, IEEE.
- Krishna, P., Kumar, T. A. ve Rao, K. K., 2016. M-QAM BER and SER Analysis of Multipath Fading Channels in Long Term Evolutions (LTE). *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, 9, 1, 361-368.
- Kuang, Q., Utschick, W. ve Dotzler, A., 2016. Optimal Joint User Association and Multi-Pattern Resource Allocation in Heterogeneous Networks, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 64, 13, 3388-3401.
- Kuntz, R., Montavont, J. ve Noel, T., 2013. Multihoming in IPv6 Mobile Networks: Progress, Challenges, and Solutions, *IEEE Commun. Mag.*, 51, 1, 128-135.
- Lai, W. S., Chang, T. H. ve Lee, T. S., 2016. Joint Power and Admission Control for Spectral and Energy Efficiency Maximization in Heterogeneous OFDMA Networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 15, 5, 3531-3547.
- Lee, Y. L., Chuah, T. C., Loo, J. ve Vinel, A., 2014. Recent Advances in Radio Resource Management for Heterogeneous LTE/LTE-A Networks, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16, 4, 2142-2180.
- Lim, G., Xiong, C. ve Cimini, L., 2014. Energy-Efficient Resource Allocation for OFDMA-Based multi-RAT Networks, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 13, 5, 2696–2705.
- Liu, C., Du, W. B. ve Wang, W. X., 2014. Particle Swarm Optimization with Scale-Free Interactions, *PloS One*, 9, 5, e97822.

- López-Pérez, D., Valcarce, A., De La Roche, G. ve Zhang, J., 2009. OFDMA Femtocells: A Roadmap on Interference Avoidance, *IEEE Communications Magazine*, 47, 9, 41-48.
- Madawala, U.K. ve Thrimawithana, D.J., 2011. A Bidirectional Inductive Power Interface for Electric Vehicles in V2G Systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58, 10, 4789-4796.
- Madhow, U. ve Honig, M. L., 1994. MMSE Interference Suppression for Directsequence Spread-Spectrum CDMA, *IEEE Transactions on Communications*, 42, 12, 3178-3188.
- Manap, S., Dimyati, K., Hindia, M. N., Talip, M. S. A. ve Tafazolli, R., 2020. Survey of Radio Resource Management in 5G Heterogeneous Networks, *IEEE Access*, 8, 131202-131223.
- Maraqa, O., Rajasekaran, A.S., Al-Ahmadi, S., Yanikomeroglu, H. ve Sait, S.M., 2020. A Survey of Rate-Optimal Power Domain NOMA with Enabling Technologies of Future Wireless Networks, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22, 4, 2192-2235.
- Mata, T., Hourai, M., Mori, K., Kobayashi, H. ve Boonsrimuang, P., 2015. Time Domain Channel Estimation Method for Uplink OFDMA System, In 2015 22nd International Conference on Telecommunications (ICT), 363-367, IEEE.
- Miao, J., Hu, Z., Yang, K., Wang, C. ve Tian, H., 2012. Joint Power and Bandwidth Allocation Algorithm with QoS Support in Heterogeneous Wireless Networks, *IEEE Communications Letters*, 16, 4, 479-481.
- Mohammed, A. J., Ghathwan, K. I. ve Yusof, Y. (2020). Optimal Robot Path Planning Using Enhanced Particle Swarm Optimization Algorithm, *Iraqi Journal of Science*, 61, 1, 178-184.
- Myung, H. G. ve Goodman, D. J., 2008. Single carrier FDMA: A New Air Interface for Long Term Evolution. John Wiley & Sons.
- Nee, R. V. ve Prasad, R., 2000. OFDM for Wireless Multimedia Communications, Artech House.
- Niknam, S., Nasir, A. A., Mehrpouyan, H. ve Natarajan, B., 2016. A Multiband OFDMA Heterogeneous Network for Millimeter Wave 5G Wireless Applications, *Ieee Access*, 4, 5640-5648.
- Niu, Y., Li, Y., Jin, D., Su, L. ve Vasilakos, A. V., 2015. A Survey of Millimeter Wave Communications (mmWave) for 5G: Opportunities and Challenges, *Wireless Networks*, 21, 2657-2676.
- Onireti, O., Hélot, F. ve Imran, M. A., (2011). On The Energy Efficiency-Spectral Efficiency Trade-Off in The Uplink of CoMP System, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 11, 2, 556-561.
- Osseiran, A., Boccardi, F., Braun, V., Kusume, K., Marsch, P., Maternia, M., ... ve Fallgren, M., 2014. Scenarios for 5G Mobile and Wireless Communications: The Vision of the METIS Project, *IEEE Communications Magazine*, 52, 5, 26-35.

- Parkvall, S., Furuskar, A. ve Dahlman, E., 2011. Evolution of LTE toward IMT-Advanced, *IEEE Commun. Mag.*, 49, 2, 84-91.
- Pätzold, M., 2002. *Mobile Fading Channels*, Wiley, NewYork.
- Pauli, V., Naranjo, J. D. ve Seidel, E., 2010. Heterogeneous LTE Networks and Inter-Cell Interference Coordination, *Nomor Research GmbH*, 1-9.
- Peng, M., Li, Y., Jiang, J., Li, J. ve Wang, C., 2014. Heterogeneous Cloud Radio Access Networks: A New Perspective for Enhancing Spectral and Energy Efficiencies, *IEEE Wireless Communications*, 21, 6, 126-135.
- Peng, M., Li, Y., Zhao, Z. ve Wang, C., 2015. System Architecture and Key Technologies for 5G Heterogeneous Cloud Radio Access Networks, *IEEE Network*, 29, 2, 6-14.
- Radunovic, B. ve Le Boudec, J. Y., 2004. Rate Performance Objectives of Multihop Wireless Networks, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 3, 4, 334-349.
- Rajagopal, S., Roberts, R.D. ve Lim, S.-K., 2012. IEEE 802.15.7 Visible Light Communication: Modulation Schemes and Dimming Support, *IEEE Communications Magazine*, 50, 3, 72-82.
- Rardin, R. L., 1998. *Optimization In Operations Research*, Prentice Hall, New Jersey.
- Rezvani, S., Mokari, N., Javan, M. R. ve Jorswieck, E. A., 2019. Fairness and Transmission-Aware Caching and Delivery Policies in OFDMA-based HetNets, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 19, 2, 331-346.
- Saito, Y., Kishiyama, Y., Benjebbour, A., Nakamura, T., Li, A. ve Higuchi, K., 2013. Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for Cellular Future Radio Access. In 2013 IEEE 77th vehicular technology conference (VTC Spring), 1-5, IEEE.
- Saquist, N., Hossain, E. ve Kim, D. I., 2013. Fractional Frequency Reuse for Interference Management in LTE-Advanced Hetnets, *IEEE Wireless Communications*, 20, 2, 113-122.
- Sari, H., 1997. Orthogonal Frequency-Division Multiple Access with Frequency Hopping and Diversity, in *Multi-Carrier Spread Spectrum*, K. Fazel & G. P. Fettweis (Editors), 57-68, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- Stavroulakis, P., 2003. *Interference Analysis and Reduction for Wireless Systems*, Artech House.
- Stuber, G. L., Barry, J. R., Mclaughlin, S. W., Li, Y., Ingram, M. A. ve Pratt, T. G., 2004. Broadband MIMO-OFDM Wireless Communications. *Proceedings of the IEEE*, 92, 2, 271-294.
- Tarokh, V. (Ed.), 2009. *New Directions in Wireless Communications Research*, 175-197, Springer, Boston.
- Theory and Applications of OFDM*, Springer Science & Business Media.
- Tse, D. ve Viswanath, P., 2005. *Fundamentals of Wireless Communication*, Cambridge University Press, Cambridge.

- Veeravalli, V. V. ve Mantravadi, A., 2002. The Coding-Spreading Trade Off in CDMA Systems, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 20, 2, 396-408.
- Verdú, S. ve Shamai, S., 1999. Spectral Efficiency of CDMA with Random Spreading, *IEEE Transactions on Information Theory*, 45, 2, 622-640.
- Viterbi, A., 1995. *CDMA: Principles of Spread-Spectrum Communication*. Addison-Wesley Publishing Company.
- Wang, Z., Ma, X. ve Giannakis, G. B., 2004. OFDM or Single-Carrier Block Transmissions, *IEEE Trans. Commun.*, 52, 3, 380-94.
- Wong, C. Y., Tsui, C. Y., Cheng, R. S. ve Letaief, K. B., 1999. A Real-Time Sub-Carrier Allocation Scheme for Multiple Access Downlink OFDM Transmission, In *Gateway to 21st Century Communications Village, VTC 1999-Fall. IEEE VTS 50th Vehicular Technology Conference (Cat. No. 99CH36324)*, 2, 1124-1128, IEEE.
- Wu, G., Mizuno, M. ve Havinga, P. J., 2002. MIRAI Architecture for Heterogeneous Network, *IEEE Communications Magazine*, 40, 2, 126-134.
- Wu, Q., Esteves, E., Wang, J. ve Ng, T. S., 2002. The CDMA2000 High Rate Packet Data System, *Advances in 3G Enhanced Technologies for Wireless Communications*, 149-226.
- Wu, W., Yang, Q., Gong, P. ve Kwak, K. S., 2016. Energy-Efficient Resource Optimization for OFDMA-Based Multi-Homing Heterogenous Wireless Networks, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 64, 22, 5901-5913.
- Zhang, H., Gladisch, A., Pickavet, M., Tao, Z. ve Mohr, W., 2010. Energy efficiency in Communications, *IEEE Communications Magazine*, 48, 11, 48-49.
- Zhang, L., Wu, Y., Walker, G. K., Li, W., Salehian, K. ve Florea, A., 2016. "Improving LTE eMBMS with Extended OFDM Parameters and Layered-Division-Multiplexing, *IEEE Transactions on Broadcasting*, 63, 1, 32-47.
- Zhang, Y. J. ve Letaief, K. B., 2004. Multiuser Adaptive Subcarrier-and-Bit Allocation with Adaptive Cell Selection for OFDM Systems, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 3, 5, 1566-1575.

ÖZGEÇMİŞ

Erdal GÜRSOY, ilk ve orta öğrenimini Sarıkaraman Merkez Yunus Emre İlköğretim Okulu'nda, lise öğrenimini Hasanoğlan Atatürk Anadolu Öğretmen Lisesi'nde tamamladı. 2012 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde Lisans Programı'na başladı. 2014 yılında da aynı fakültenin Bilgisayar Mühendisliği'nde Çift Anadal Programına başladı. Yabancı dil olarak orta seviyede İngilizce bilmektedir.

YAYINI

Gürsoy, E. ve Hacıoğlu, G., 2022. OFDMA Resource Allocation with DPSO on HetNets, International Conference on Advanced Technologies (ICAT), 291-294, Van.