

**KABLOSUZ HETEROJEN AĞLARDA
DİKEY EL DEĞİŞTİRME KARARININ OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Utku ÖZMAT

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Telekomünikasyon Mühendisliği

HAZİRAN 2016

**KABLOSUZ HETEROJEN AĞLARDA
DİKEY EL DEĞİŞTİRME KARARININ OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Utku ÖZMAT
(504121333)**

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Telekomünikasyon Mühendisliği

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hakan Ali ÇIRPAN

HAZİRAN 2016

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504121333 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Utku ÖZMAT, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “KABLOSUZ HETEROJEN AĞLARDA DİKEY EL DEĞİŞTİRME KARARININ OPTİMİZASYONU” başlıklı tezini aşağıdaki imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Hakan Ali ÇIRPAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Hakan Ali ÇIRPAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Güneş Zeynep KARABULUT KURT
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Yusuf ACAR
İstanbul Kültür Üniversitesi

Teslim Tarihi : **02 Mayıs 2016**
Savunma Tarihi : **14 Haziran 2016**

Aileme,

ÖNSÖZ

"Kablosuz Heterojen Ağlarda Dikey El Değiştirme Kararının Optimizasyonu" adlı bu çalışma İTÜ Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı Telekomünikasyon Mühendisliği programında yüksek lisans tezi olarak sunulmuştur.

Tezimin başından sonuna kadar, benden her türlü yardım ve desteklerini esirgemeyen danışmanım Sayın Prof. Dr. Hakan Ali ÇIRPAN'a ve tezin oluşmasındaki değerli katkılarından dolayı Sayın Dr. İbrahim HÖKELEK'e saygılarımla en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca geniş bilgi birikimi ve tecrübesiyle bana yol gösteren Sayın Prof. Dr. Gökhan UZGÖREN'e teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca yanımda olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2016

Utku ÖZMAT

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR.....	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Kablosuz Haberleşme Sistemlerinin Gelişimi.....	2
1.1.1 4G kablosuz ağlar	6
1.1.2 4G'deki sorunlar ve geliştirmeler	7
1.2 İçerik Bağımsız El Değiştirme Mimarisi.....	11
1.3 Dikey El Değiştirme Kararının Optimizasyonu	13
1.3.1 Tezin amacı ve kapsamı.....	13
1.3.2 Tezin katkıları	14
2. VHD ALGORİTMALARI.....	17
2.1 Giriş	17
2.2 4G Ağlarda El Değiştirme Yönetimi.....	17
2.2.1 El değiştirmenin sınıflandırılması.....	19
2.2.2 Dikey el değiştirme süreci	20
2.3 VHD Algoritmalarına Genel Bakış	22
2.3.1 VHD kriterleri	22
2.3.2 VHD algoritmalarının sınıflandırılması.....	24
2.3.3 VHD algoritmaları için performans metrikleri.....	25
2.4 VHD Algoritmalarının Gösterimi.....	26
2.4.1 RSS tabanlı VHD algoritmaları.....	26
2.4.2 Bant genişliği tabanlı VHD algoritmaları.....	29
2.4.3 Maliyet fonksiyonu tabanlı VHD algoritmaları	29
2.4.4 Birleşik VHD algoritmaları	29
2.5 VHD Algoritmalarının Karşılaştırılması	33
3. ÖNERİLEN ALGORİTMA	37
3.1 El değiştirme ihtiyacının tahmini ve kullanılan senaryo	37
3.2 Yolculuk Süresi Kestirimi.....	39
3.3 El Değiştirme Olasılıkları için Eşik Değer Hesabı.....	43
3.3.1 Gereksiz el değiştirme olasılığı için eşik değer hesabı.....	43
3.3.2 El değiştirme hatasının olasılığı için eşik değer hesabı.....	45

4. BENZETİM SONUÇLARI.....	49
4.1 Gereksiz El Değiştirme Sayısının Benzetimi	49
4.2 El Değiştirme Hatası Sayısının Benzetimi	51
4.3 Toplam El Değiştirme Sayısının Benzetimi	52
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	55
KAYNAKLAR.....	57
ÖZGEÇMİş	63

KISALTMALAR

1G	: First Generation
2G	: Second Generation
3G	: Third Generation
3GPP	: 3rd Generation Partnership Project
4G	: Fourth Generation
ABC	: Always Best Connected
AIPN	: All-IP Network
AMPS	: Advanced Mobile Phone System
ANN	: Artificial Neural Networks
AP	: Access Point
BRAIN	: Broadband Radio Access for IP-Based Networks
BS	: Base Station
CDF	: Cumulative Distribution Function
CDMA	: Code Division Multiple Access
DECT	: Digital Enhanced Cordless Telecommunication
EDGE	: Enhanced Data rates for GSM Evolution
GPRS	: General Packet Radio Service
GPS	: Global Positioning System
GSM	: Global System for Mobile Communications
HNE	: Handover Necessity Estimation
IDEN	: Integrated Digital Enhanced Network
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	: Internet Engineering Task Force
IMT	: International Mobile Telecommunications
IP	: Internet Protocol
IS	: Interim Standard
IST	: Information Society Technologies
ITU	: International Telecommunication Union
LM	: Linear Mobility
LTE	: Long Term Evolution
MAC	: Medium Access Control
MHz	: Megahertz
MICS	: Media Independent Command Service
MIES	: Media Independent Event Service
MIH	: Media Independent Handover
MIHF	: Media Independent Handover Function
MIIS	: Media Independent Information Service
MIMO	: Multiple Input - Multiple Output
MIRAI	: Multimedia Integrated Network by Radio Access Innovation
MT	: Mobile Terminal

OFDM	: Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
PDC	: Personal Digital Cellular
PDF	: Probability Distribution Function
PoA	: Point of Attachment
QoS	: Quality of Service
RSS	: Received Signal Strength
RWM	: Random Waypoint Mobility
SINR	: Signal to Interference and Noise Ratio
TDMA	: Time Division Multiple Access
UMTS	: Universal Mobile Telecommunications System
VHD	: Vertical Handover Decision
WCDMA	: Wideband Code Division Multiple Access
WDP	: Wrong Decision Probability
WiMAX	: Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	: Wireless Local Area Network
WWAN	: Wireless Wide Area Network

SEMBOLLER

P_i	: WLAN içerisindeki i. nokta
RSS_{P_i}	: P_i noktasından alınan RSS bilgisi
P_{Tx}	: WLAN içerisindeki AP'den iletilen sinyal gücü
PL_{ref}	: Referans noktasındaki yol kaybı
β	: Yol kaybı katsayısı
L_{OP_i}	: AP ile P_i noktası arasındaki uzaklık
d_{ref}	: AP ile referans noktası arasındaki uzaklık
X_σ	: Sıfır ortalamalı σ varyanslı Gauss rastgele değişkeni
σ	: Varyans
θ_i	: i. vektörün AP ile yaptığı açı
d_i	: i. vektörün uzunluğu
r_i	: P_i noktasının WLAN merkezine olan uzaklığı
v_i	: MT'nin i. vektör üzerindeki hızı
t_{WLAN_i}	: i. vektöre ait yolculuk süresi
T	: Bir yörüngeye ait toplam yolculuk süresi
N	: Bir yörüngedeki toplam vektör sayısı
P_u	: Gereksiz el değiştirme olasılığı
P_f	: El değiştirme hatası olasılığı
Th_{uN}	: Gereksiz el değiştirme olasılığı için eşik zaman değeri
Th_{fN}	: El değiştirme hatası olasılığı için eşik zaman değeri
τ_A	: Hücresel ağdan WLAN'a geçiş için gereken el değiştirme süresi
τ_D	: WLAN'den hücresel ağa geçiş için gereken el değiştirme süresi
τ_T	: Toplam el değiştirme süresi

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1: Kablosuz haberleşme teknolojilerinin karşılaştırılması.	5
Çizelge 2.1: RSS tabanlı VHD algoritmalarının özeti.....	28
Çizelge 2.2: Bant genişliği tabanlı VHD algoritmalarının özeti.	30
Çizelge 2.3: Maliyet fonksiyonu tabanlı VHD algoritmalarının özeti.	31
Çizelge 2.4: Birleşik VHD algoritmalarının özeti.....	32
Çizelge 2.5: VHD algoritmalarındaki dört grubun karşılaştırılmalı özeti.	34
Çizelge 4.1: HNE performansının değerlendirilmesinde kullanılan parametreler. .	49

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : Kablosuz haberleşme sistemlerinin gelişimi.	3
Şekil 1.2 : IEEE 802.21 standardı genel mimarisi. Üç tip servis çeşidi vardır: etkinlik servisi, komut servisi ve bilgi servisi.	12
Şekil 1.3 : IEEE 802.21 standardı içerisindeki işlemler. El değiştirme kararı ve başlatılması IEEE 802.21 içerisinde dahil edilmemiştir.	14
Şekil 2.1 : Heterojen ağ ortamında mobil hareketliliği yönetimi.	18
Şekil 2.2 : Heterojen kablosuz ağlarda yatay ve dikey el değiştirme.	19
Şekil 2.3 : VHD kararı verilirken kullanılan parametreler.	23
Şekil 2.4 : VHD algoritmalarının dört kategorisi ve bu kategorilere ait oniki algoritma.	27
Şekil 3.1 : El değiştirme gerekliliğinin kestirimi (HNE) biriminin blok diyagramı.	38
Şekil 3.2 : WLAN hücresi civarında rastgele hareket eden bir MT yörüngesi. ...	39
Şekil 4.1 : Gereksiz el değiştirme sayısının farklı N değerleri için MT hızı karşısındaki değişimi.	50
Şekil 4.2 : El değiştirme hatası sayısının farklı N değerleri için MT hızı karşısındaki değişimi.	51
Şekil 4.3 : Toplam el değiştirme sayısının farklı N değerleri için MT hızı karşısındaki değişimi.	52
Şekil 4.4 : Gereksiz el değiştirme sayısının toplam el değiştirme sayısına oranının farklı N değerleri için MT hızı karşısındaki değişimi.	53
Şekil 4.5 : El değiştirme hatası sayısının toplam el değiştirme sayısına oranının farklı N değerleri için MT hızı karşısındaki değişimi.	53

KABLOSUZ HETEROJEN AĞLARDA DİKEY EL DEĞİŞTİRME KARARININ OPTİMİZASYONU

ÖZET

Heterojen kablosuz ağlar arasında kesintisiz el değiştirme, istenilen servis kalitesinin sağlanması için oldukça önemli bir konudur. Farklı teknolojilere sahip ağların birlikte çalışabilmesi için, birbirleri arasında kesintisiz dikey el değiştirme algoritmaları desteklenmelidir. Tez çalışmasında bir hücresel ağ ve bir kablosuz yerel ağdan (WLAN) oluşan heterojen bir ortam sunulmuştur.

4G teknolojilerinin kullanılması ile birlikte, heterojen ağlar değerlendirilirken birçok ağ parametrelerinin ele alındığı dikey el değiştirme kararı (VHD) algoritması mevcuttur. Bu VHD algoritmaları çeşitli sınıflandırmalar altında incelenerek, kullanımları durumundaki avantaj ve eksiklikleri tespit edilmiştir.

Bu çalışmada, rastgele hareket eden mobil kullanıcıların olduğu bir ortamda el değiştirme hatalarını, gereksiz el değiştirmeleri ve bağlantı kopmalarını en aza indirerek maksimum kullanıcı tecrübesinde optimize edilmiş bir VHD algoritması sunulmuştur. Bu sayede minimum seviyedeki servis kesintisiyle istenilen ağda en uzun süre bağlı kalılabilmektedir. El değiştirmenin gerekli olup olmadığını saptayan bu yöntemde iki VHD algoritması mevcuttur. Birincisi, kullanıcının belli bir ağdaki kapsama alanında ortalama alınan sinyal gücü (RSS) örnekleri ve kullanıcı hızı bilgisi ile hareket süresinin matematiksel bir model ile tahmin edilmesidir. İkinci algoritma ise, çeşitli ağ parametreleri ve el değiştirme hatası veya gereksiz el değiştirme olasılığı bilgilerine göre bir eşik zaman değeri hesaplamaktadır. El değiştirme hatası veya gereksiz el değiştirme olasılığı ifadeleri, bir ağdaki kapsama alanı içerisindeki giriş ve çıkış noktalarının düzgün dağılımında olduğu varsayımıyla geliştirilen matematiksel bir model ile üretir. Tahmin edilen toplam hareket süresi eşik zaman değeri ile karşılaştırılır ve sadece toplam hareket süresi eşik zaman değerinden uzun olduğu zaman el değiştirmenin gerekli olduğu kararı alınır.

Kullanılan senaryoda, mobil kullanıcı WLAN içerisinde rastgele hareket ederek birçok yörünge çizmektedir. Rastgele hareket modelinden dolayı WLAN hücresi içerisindeki bu yörüngelerde yön değiştirmeler söz konusudur. Her bir yörünge için tanımlanan hareket vektörleri için sistemin başarımlı kriterleri olan gereksiz el değiştirme ve el değiştirme hata olasılıklarına ait eşik değerlere ve yolculuk süresine ait matematiksel ifadeler üretilmiştir.

Tanımlanan matematiksel ifadeler ışığında, MATLAB ortamında Monte-Carlo yöntemi kullanılarak yinelemeli şekilde benzetimler yapılmıştır. Bu benzetimler, herhangi bir yörünge içerisindeki bir ve birden fazla vektör sayısı için karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. Sonuç olarak, hem gereksiz el değiştirme sayısının hem de el değiştirme hatası sayısının farklı yön değiştirmelerdeki artan kullanıcı hızına karşın değişimleri çıkartılmıştır. En sonunda ise toplam el değiştirme sayısı benzer

şekilde verilerek, bu performans metriklerinin toplam el değıştirme sayısına oranları gösterilerek sistem hakkında daha detaylı bir analiz sağlanmıştır. Benzetim sonuçları değerlendirildiğinde, rastgele hareket modelinin etkisinden dolayı artan yön değıştirme sayısı ile WLAN hücresi içerisinde daha uzun süre kalındığı için gereksiz el değıştirme, el değıştirme hatası ve toplam el değıştirme sayılarının azalmakta olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada kullanılan gölgeleme etkisine ek olarak, kablosuz ortamdaki sönümlleme etkisi de ele alınarak daha gerçekçi benzetimler çıkarılabilir. Ayrıca, birden fazla WLAN ve WiMAX ağlarının da birleşimiyle oluşturulacak heterojen ağlar ile mobil kullanıcılar için daha verimli bir dolaşım sağlanabilir.

OPTIMIZATION OF VERTICAL HANDOVER DECISION IN WIRELESS HETEROGENEOUS NETWORKS

SUMMARY

Seamless handover is a major and critical issue to provide requested Quality of Service (QoS) in Next Generation Wireless Networks. The integration of heterogeneous networks technologies has been planned to be support for this issue. In this paper, a decision mechanism is proposed in order to provide an adaptive time which initiate to handover between cellular networks and Wireless Local Area Networks (WLAN). Probability of handover failures and unnecessary handovers from cellular to WLAN are reduced and the schema is extended by using Random Waypoint Mobility (RWM) model. The handover necessity estimation consist of two phases: traveling time prediction and time threshold calculation.

Next generation of wireless system requires providing real-time multimedia services any time anywhere with the required QoS. Mobile users expect to connect these services while they are on the move. In an environment of multiple heterogeneous access technologies, the concept of Always Best Connected (ABC) is defined as being connected in the most advantageous access technology according to available bandwidth, monetary cost, battery level, delay and security. Such ability to handover between heterogeneous networks is defined as vertical handovers. The new standards (e.g., IEEE 802.21) create a framework to support protocols for establishing seamless vertical handovers. These standards provide only the overall framework, leaving the implementation of the actual algorithms to the system designer. Therefore, it is essential to develop efficient Vertical Handover Decision (VHD) algorithms to support the success of the handover frameworks.

Various VHD algorithms have been presented in the literature to initiate handover at the appropriate time to the optimal network based on different criteria such as Received Signal Strength (RSS), bandwidth, cost function and combination of these metrics. A detailed survey and comparison of these proposed algorithms are provided in this thesis. These VHD algorithms have lack an extensive evaluation of various network parameters and/or require more detail for implementation. In general, there are two additional problems with the current VHD algorithms. Firstly, these algorithms lean to initiate handovers to low-cost and high-throughput WLANs whenever their coverage is available. For example, when Mobile Terminal (MT) travels around an area close to the coverage boundary of a WLAN at speeds above a certain limit, the handover process for connecting to the WLAN may start and not be completed before the MT leaves the WLAN coverage area. This situation may cause a connection breakdown and hence a network resource wastage as well as unnecessary battery consumption. Secondly, when the signal level from the connected Access Point (AP) is reduced and a handover is compulsory, the existing VHD algorithms for determining the handover triggering time are usually not adaptive to user mobility and network parameters.

The handover to WLAN is preferable due to high data rates and low access cost; however, it intrinsically has limited coverage range for a fast moving MT, and hence it may cause unnecessary handovers. For vertical Handover Necessity Estimation (HNE) problem, the work of Yan et al. can be considered among one of the leading studies. This model provides a very lucid guiding for HNE and considers only Linear Mobility (LM). In this thesis, this model is extended by applying the random waypoint mobility for MT to emulate more realistic mobility scenario.

This work proposes an optimized and extended vertical handover decision scheme, which includes minimum number of handover failures and unnecessary handovers whilst maximizing the user experience under the random waypoint mobility model. The handover necessity estimation unit decides the necessity of handover among all candidate networks. HNE processes various network parameters as its inputs and after some calculation produces a decision as its output. The inputs are the AP transmit power, RSS samples under shadowing effect, the distances between mobile terminal and access point, the speed of the MT, the handover latency, and the tolerable handover failure and unnecessary handover probability values. HNE has two elements, travel time estimation and time threshold calculation. The travel time is estimated by using these inputs. Then, HNE compares the estimated travel time against the desired time threshold value: if the travel time is greater than the threshold, “a handover is necessary” decision is given; otherwise “a handover is unnecessary” decision generated as an output. HNE executes this process for all the candidate networks with all trajectories and gives a necessity decision for each of them. As a consequence of this research, the optimum connection point with a preferred access network with the minimum probability of connection breakdowns. Also, this result is presented the HNE algorithm in both mobility models such as RWM and LM.

In this thesis, a MT follows multiple trajectories using random waypoint model. Due to RWM effect, each trajectory can be comprised movement vectors in the WLAN cell. Some mathematical expressions are generated for traveling time of MT and thresholds for unnecessary handovers and handover failures that are stated as performance metrics of the system for each movement vector.

In the light of this mathematical expressions, these performance metrics are simulated iteratively in the MATLAB using Monte-Carlo method. Results are presented comparatively for one or more vectors in a trajectory. Finally, variation of number of unnecessary handovers and handover failures are produced against increasing MT speed in a condition of different number of direction changes. Similarly, total number of handover is given and ratios of these metrics to total number of handover are calculated for deeper analysis about the proposed system. According to result of simulations, it is observed that number of unnecessary handover, handover failure and total number of handover are decreasing due to random waypoint model effect since it provides longer traveling time through multiple direction changes.

In the conclusion and future work chapter, a fading effect may be considered in a network coverage as well as shadowing in order to examine more realistic network environment. Besides, more than one heterogeneous networks such as WLAN and WiMAX may be involved for better user satisfaction. For this, researchers can measure on real test beds in order to observe ultimate evaluation.

1. GİRİŞ

Her zaman ve her yerde haberleşme servislerine erişime olan artan ihtiyaçlar, çeşitli kablosuz erişim teknolojilerinin birlikte kullanılması yönünde yapılan teknolojik geliştirmeleri hızlandırmıştır. Bu şekilde yapılan entegrasyonlar kesintisiz bir sistem içerisinde birçok ağı barındırır [1, 2]. Dördüncü nesil (4G) haberleşme sistemleri olarak tanımlan bu birleşik yapılarla, yüksek veri hızları, daha önce bant genişliği sınırlamaları yüzünden mümkün olmayan birçok servis ve uygulamalar, çeşitli mesafelerdeki mobil erişim ağları arasında global bir şekilde dolaşım imkanı sağlanmaktadır [3–8].

Genel bir 4G ağında, mobil terminaller (MT), çoklu arayüzlerle uygun olan diğer ağlar arasından erişimin sağlanmasında optimum olanını seçebilecektir. Bu erişimler, IEEE 802.11 Kablosuz Yerel Alan Ağı (WLAN) [9], IEEE 802.16 Mikrodalga Erişimi için Dünya Geneline Uyumluluk (WiMAX) [10], uydu sistemleri [11], bluetooth [12] ve geleneksel hücresel telefon ağlarını içerir. Tatmin edici bir kullanıcı tecrübesi için, devam eden bir ses veya video görüşmesi sırasında hissedilebilir bir kesinti olmadan MT muhtemel ağlar arasından "en iyi olan" üzerinden sorunsuz geçiş yapabilmelidir. Bu şekilde heterojen ağlar arasında el değiştirme yapabilme yeteneği dikey el değiştirme olarak adlandırılır [13]. Kesintisiz dikey el değiştirmenin sağlanabilmesi için IEEE 802.21 standardı geliştirilmiştir [14]. IEEE 802.21 sadece genel bir çerçeve sağlamakla birlikte, bu konudaki algoritmalarının uygulanmasını sistem tasarımcılarına bırakmıştır. Bu yüzden, etkin dikey el değiştirme kararı (VHD) algoritmalarının geliştirilmesi, bu yeni standardın başarımın sağlanmasında önemli rol oynamaktadır.

Bu tezin birincil amacı, 4G kablosuz sistemlerde dikey el değiştirmenin etkin bir şekilde optimize edilmesi için bir VHD şeması geliştirmektir. Bölüm 1.1’de kablosuz haberleşme sistemlerinin gelişimi anlatılacak, Bölüm 1.2’de IEEE 802.21 içerik bağımsız el değiştirme (MIH) ve MIH bileşenlerinin VHD için neden önemli olduğu

hakkında bilgi verilecektir. Bölüm 1.3'te ise mevcut VHD algoritmalarındaki açık sorunlar ve tezin bu konudaki katkıları sıralanacaktır.

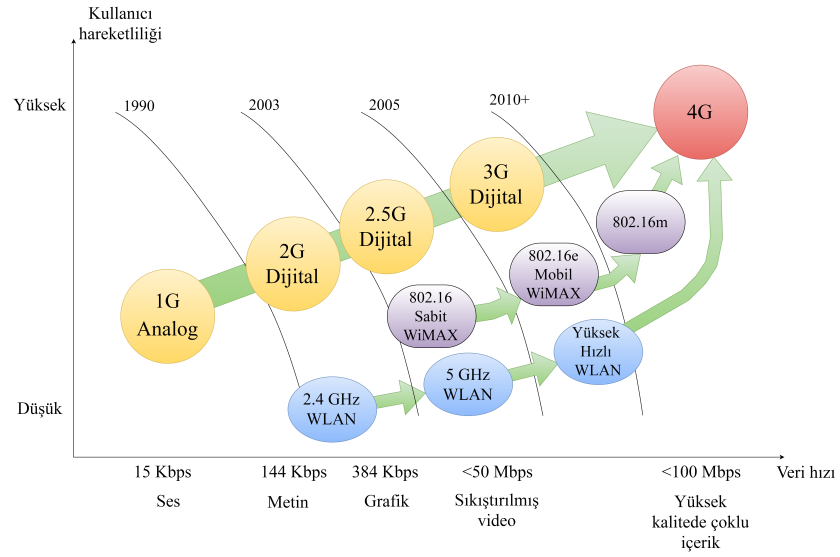
1.1 Kablosuz Haberleşme Sistemlerinin Gelişimi

Günümüzde, haberleşme teknolojileri günlük hayatın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiş ve bu yüzden kablosuz haberleşme pazarı hızla büyümektedir. Bu pazardaki artan talep, Şekil 1.1'de de gösterildiği gibi birinci nesilden üçüncü nesle doğru gelişmiş ve 4G kablosuz ağlara geçilmiştir. Çizelge 1.1'de kablosuz haberleşme sistemlerinin 4G'ye kadar gelişimi, kullanılan teknoloji, standartlar, frekans, bant genişliği, çoklu erişim tekniği, çekirdek ağ ve servis tiplerine göre karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Kablosuz haberleşme 1980'lerin başlarında 900 MHz frekans bandı civarında ve analog modülasyon kullanılarak ses iletimin sağlandığı Birinci Nesil (1G) kablosuz telekomünikasyon teknolojileri ile başlamıştır. Çeşitli ülkelerde farklı 1G standartları kabul edilmiştir. Bunlar, Birleşik Devletler'de İleri Mobil Telefon Sistemi (AMPS) [15], Birleşik Krallık'da Toplam Erişim Haberleşme Sistemi (TACS) [16], Almanya, Portekiz ve Güney Afrika'da C-450 [17] ve Fransa'da Radiocom 2000 [17] olarak sıralanabilir.

İkinci nesil (2G) kablosuz ağları 1991'de düşük-bant sayısal veri sinyalleşmesi kullanılarak ortaya çıkmıştır. Çoklu erişim tekniğine göre 2G teknolojileri Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (TDMA) ve Kod Bölmeli Çoklu Erişim (CDMA) olmak üzere ikiye ayrılmıştır [18]. Ülkelere göre başlıca 2G standartları, TDMA tabanlı olanlar; dünya genelinde Küresel Mobil Haberleşme Sistemi (GSM), Birleşik Devletler ve Kanada'da Tümlşik Sayısal Gelişmiş Ağ (iDEN), Kuzey ve Güney Amerika'da Geçici Standart 136 (IS-136) ve Japonya'da Kişisel Sayısal Hücre (PDC) olarak, CDMA tabanlı olanlar ise; Amerika'da ve Asya'nın bazı bölgelerinde kullanılan IS-95 olarak söylenebilir [19].

2G ile 3G arasında, 2.5G olarak adlandırılan ve 2G sistemlerdeki paket anahtarlama teknolojisiye ek olarak devre anahtarlama teknolojisini uygulandığı bir ara nesil geliştirilmiştir. 2.5G, GSM ve CDMA ağlarda kullanılan mevcut 2G yapısı ile birlikte paket 3G'nin de bazı özelliklerini sağlamaktaydı. Bu geliştirmeler Japonya ve



Şekil 1.1 : Kablosuz haberleşme sistemlerinin gelişimi.

Güney Kore dışında dünya genelinde kullanılan GSM için Genel Paket Anahtarlama Radyo Servisi (GPRS) ve GSM Gelişimi için Genişletilmiş Veri Hızı (EDGE) olarak sunulmuştur (EDGE teknolojisi 2.75G olarak da isimlendirilmektedir) [20].

2003 yılında, mobil haberleşme ağlarında Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (ITU) tarafından tanımlanan ve Uluslararası Mobil Telekomünikasyon-2000 olarak da bilinen 3G teknolojisine geçilmiştir [21]. Önceki nesillere kıyasla, 3G standartları, kullanıcılarına daha fazla bant genişliği, güvenlik ve birçok servis için daha geniş seçenekler sunmaktadır. 3G standartları dünya genelinde kullanılan CDMA2000 [22] ve Evrensel Mobil Telekomünikasyon Sistemi (UMTS) [23] ile Avrupa ve Birleşik Devletler'in bazı bölgelerinde kullanılan Sayısal Genişletilmiş Kablosuz Telekomünikasyon (DECT) [24] teknolojilerini de içermektedir.

Gelecek nesil kablosuz ağlardan daha çok kullanıcının her yerde erişim sağlayabilmesini ve kişiselleştirilmiş çoklu medya kablosuz haberleşme servislerini destekleyebilmesi beklenmektedir [25]. 4G ağlara olan artan istek, 4G ağları birçok kablosuz ağ teknolojilerini aynı anda kapsamasına doğru yönlendirmektedir. Son çalışmalarla birlikte IEEE 802.21 MIH standardı [14] ile GSM, UMTS, WiMAX, Bluetooth ve WLAN gibi farklı kablosuz erişim ağı teknolojileri arasında çeşitli el değiştirme mekanizmalarıyla kesintisiz dolaşımı desteklemesi amaçlanmaktadır.

Dünyanın lider taşıyıcı şirketleri hali hazırda 4G teknolojiye geçmiş bulunmaktadır. 2009 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nin Oregon eyaletinin Portland kentinde,

Clearwire ve Intel şirketleri tarafından "Clear" olarak adlandırılan dünyanın ilk 4G ağı kurulmuştur. Ek olarak, Birleşik Devletleri'nin en büyük mobil taşıyıcılarından AT&T ve Verizon Wireless şirketleri ve dünya genelinde birçok taşıyıcı UMTS teknolojisinin yerine kullanılan 3. Nesil Ortaklık Projesi (3GPP) Uzun Süreli Gelişim (LTE) standardını kullanarak ağlarını 4G ağlarına dönüştürmüştür [26]. Ülkemizde ise Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu tarafından kamuoyunda 4.5G olarak bilinen IMT Hizmet ve Altyapılarına İlişkin Yetkilendirme İhalesi 26 Ağustos 2015 tarihinde Ankara'da yapılmıştır. IMT yetkilendirme süresi 30 Nisan 2029 tarihine kadar olup, mobil taşıyıcılar IMT hizmetlerinin sunumuna 1 Nisan 2016 tarihinden itibaren başlamıştır.

Çizelge 1.1 : Kablosuz haberleşme teknolojilerinin karşılaştırılması.

Nesil/Özellik	1G	2/2.5G	3G	4G
Başlangıç/Yaygınlaşma	1970/1984	1980/1999	1990/2002	2000/2010
Standart	AMPS	2G: TDMA, CDMA, GSM 2.5G: GPRS, EDGE, 1xRTT	WCDMA, CDMA-2000	Tek Birleşik Standart
Teknoloji	Analog hücreli teknoloji	Dijital hücreli teknoloji	Geniş bant genişlikli CDMA, IP teknolojisi	Birleşik IP ve kesintisiz geniş bant kombinasyonu, LAN/WAN/PAN ve WLAN
Servis	Ses	2G: Dijital Ses, mesajlaşma 2.5G: Paket veri	Birleştirilmiş ses, video ve veri	Yüksek kapasiteli tüm-IP tabanlı çoklu veri
Çekirdek ağı	PSTN	PSTN	Paket ağı	İnternet
Veri hızı	1.9 Kbps	2G: 14.4 Kbps 2.5G: 384 Kbps	2 Mbps	2000 Mbps
El değiştirme	Yatay	Yatay	Yatay	Dikey ve yatay
Frekans	400-800 MHz	800-900 MHz 1800-1900 MHz	1800-2500 MHz	2000-8000 MHz

1.1.1 4G kablosuz ağılar

Servis sağlayıcıları, araştırmacılar ve mühendisler 4G için çalışma alanlarına göre farklı bakış açıları getirmiştir. Bunlardan bazıları aşağıdaki gibidir:

- 4G ağılar ile mobil multimedyanın her zaman, her yerde ve herkese global dolaşım desteği ile sağlanması amacıyla MAGIC konseptinde DoCoMo sunulmuştur. MAGIC özellikle yerel sistemler için çalışmaktadır ve burada 4G, 3G hücresel servislerinin uzantısı şeklindedir.
- Avrupa Komisyonu (EC), çok sayıda kablosuz ağılar arasında kesintisiz servis sağlama ve en uygun ağı kullanarak servis sağlama konularında odaklanarak bir 4G perspektifi sunmuştur. 4G için güvenli sistemler ve Ad-Hoc ağılar, en uygun kaynak kullanımı, çoklu radyo arayüzleri, WLAN kullanımı ve farklı yapılar ile ortak çalışmayı sağlayacak standartlar gibi detaylı çalışmalarla 4G konseptinde geliştirmeler sağlanmıştır [27].
- Daha kapsamlı bir çalışma [28]'de sunulmuştur. Buna çalışmada yerelden özele, operatör kontrollü olandan Ad-Hoc'a, genişbanttan kişisele ve 2G'den 3G'ye olmak üzere bütün sistemlerle sarılı bir 4G sistemi anlatılmaktadır.
- 4G'nin teknik yapısı ise [29]'da anlatılmıştır. Entegre sistemler tabanlı bu çalışmada 4G için teknik bir çerçeve önerilmiştir. Bu çerçevenin hedefinde kullanıcılar, terminaller, ağılar ve uygulamalar yer almaktadır.

4G için açık bir şekilde tanımlanmış veya kabul edilmiş bir standartlar bütünü olmamasına rağmen araştırmacılar tarafından ortak kabul edilen temel 4G özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir [7].

1. 4G düşük iletim maliyetlerinde yüksek veri hızı sağlamaktadır.

Bütün telekomünikasyon servislerinde olduğu gibi 4G'de de yüksek veri hızları ve güvenilirlik amaçlanmaktadır. Çoklu medya sistemlerini desteklemek için bu özellik oldukça önemlidir. 4G'deki veri hızları yaklaşık 20 Mbps bant genişliği ile 3G'ye göre 10 kat daha yüksek olmakta ve mobil sistemlerde en yüksek veri hızı

olarak 100 Mbps, hot-spot'larda ise 1 Gbps olarak ölçümler alınmıştır [30]. Bit başına iletim maliyetinin düşük olması da 4G'nin başlıca özellikleri arasındadır.

2. 4G ile tüm-IP tabanlı sistemlerle her zaman ve her yerde iletişim mümkün olmaktadır.

Mevcut kablosuz sistemler IP tabanlı ve IP tabanlı olmayanlar şeklinde ikiye ayrılır. Çoğu IP tabanlı olmayan sistemler ses transferi için optimize edilmiştir (örneğin, GSM, CDMA2000 ve UMTS). Buna karşın, IP tabanlı sistemler genellikle veri servisleri için tasarlanmıştır (örneğin, IEEE 802.11 WLAN). 4G ağlar bu iki sistemi kapsayacak şekilde tüm-IP mimarisi üzerine kurulmuştur. Bu sistem kullanılarak, IP paketleri IP tabanlı arka plan ağlar ile kendine özgü şekilde bağlanan erişim noktalarından geçerek herhangi bir protokol dönüşümü olmadan iletilebilmektedir [31]. Böylece tüm-IP tabanlı heterojen ağlarla kullanıcılar herhangi bir sistemi her zaman ve her yerde kullanabilmektedir. Kullanıcılar çoklu kablosuz ağlar tarafından sağlanan geniş çapta uygulamalara buna uyumlu terminaller (akıllı telefonlar) sayesinde erişebilmektedir.

3. 4G her zaman en iyi ağ ile kullanılmaktadır.

4G sistemler, heterojen yapısı itibariyle farklı kablosuz erişim sistemlerini karşılaştırabilecek yetenektedir. Bu sistemler sistem gereksinimleri ve radyo ortamları bakımından farklılık göstermektedir. 4G'deki mobil kullanıcılar "her zaman en iyi bağlantı" kavramı ile uygun olan erişim noktalarının en etkin kombinasyonları arasında kesintisiz bir şekilde dolaşabilmektedir [32].

4. 4G kişiselleştirmeye uygundur.

4G servisleri kullanıldığında, kullanıcılar çok farklı konumlarda, yoğunlukta ve farklı ekonomik seviyelerde olabilmektedir. Herkesin bu farklı isteklerine hitap edebilmek için servis sağlayıcıları kişisel tasarımlara ve kullanıcıya özgü servislerin sunulmasına ihtiyaç duyarlar. Bu yüzden 4G teknolojisi kullanıcı merkezlidir. Kullanıcı merkezli metodoloji ile tasarımlarda kullanıcılar esas kabul edilmektedir.

1.1.2 4G'deki sorunlar ve geliştirmeler

4G sistemlerde hala aşılması gereken ve araştırmacıların üzerinde çalıştığı bir takım problemler ve geliştirmeler devam etmektedir. Bu bölümde sorunlar ve geliştirmeler

hakkında genel bilgiler verilecektir. Karşılaşılan problemler ağ sistemleri, mobil terminaller ve servisler olarak üç grupta ele alınmıştır.

Ağ Sistemleri

4G’de daha önce de bahsedildiği gibi birçok kablosuz ağ sistemleri bir arada ve birlikte çalışmaktadır. Böylesi bir sistemde birleşik ağ altyapılarının tasarımı ve kesintisiz kullanıcı dolaşımı, servis kalitesi (QoS) sağlanması ve güvenlik gibi konularda zorluklar yaşanmaktadır.

1. **Birleşik Ağ Altyapısı:** 4G’de heterojen kablosuz sistemleri birleşiminde kesintisiz dolaşım sağlamak için ağ altyapılarında daha fazla geliştirme gerekmektedir. Bölüm 1.1.1’de de bahsedildiği gibi 4G sistemler tüm-IP ağ altyapısını kullanmaktadır.

IP ağ tabanlı heterojen kablosuz sistemlerin birlikte kullanılması ile ilgili birçok çözüm sunulmuştur. Bu çalışmalar örnek olarak, 3GPP tarafından sunulan Tüm-IP Ağ (AIPN) [33], Bilgi Teknolojileri Topluluğu (IST) tarafından sunulan IP Tabanlı Ağlar için Geniş Bantlı Radyo Erişimi (BRAIN) [34] ve Japonya tarafından sunulan Radyo Erişimi Yeniliği ile Birleşik Ağlarda Çoklu Medya (MIRAI) [35] sayılabilir. AIPN, GPRS tabanlı ve paket servislerin GSM’e taşınması amacıyla geliştirilmiş bir 3GPP standardıdır [33]. Bu standartta erişim ağı ile çekirdek ağ bir GPRS ağ geçidi ile bağlanmıştır. 2005 yılında 3GPP LTE gibi yüksek seviye protokolleri barındıran AIPN Release 7’yi yayınladı. 2008’de Release 8 özellikleri tamamlandı. 2015 yılında ise LTE’deki küçük hücreler, çoklu anten yapıları ve çeşitli trafik yapılarını destekleme gibi konularda yapılan geliştirmeleri içeren Release 12 yayınlandı.

BRAIN projesi bir Bilgi Teknolojileri Topluluğu (IST) programıdır [34]. BRAIN ağ mimarisi, BRAIN erişim ağı, BRAIN mobil ağ geçitleri, BRAIN erişim yönlendiricisi (router) ve IP tabanlı çekirdek ağdan oluşmaktadır. Ağ elemanları, gelişimi ve esnekliği sağlamak için standart İnternet Mühendisliği Görev Gücü (IETF) protokollerinden alınmıştır. Erişim ağı IP tabanlıdır ve yönlendiriciler mobil kullanıcı ile erişim ağı arasında arayüz oluşturmaktadır. Ağ geçitleri ise erişim ağı ile çekirdek ağ arasında konumlandırılmıştır.

MIRAI ise e-Japan projesi kapsamında heterojen kablosuz sistemlerin kesintisiz entegrasyonu için sunulmuş bir Japonya'nın ulusal bir projesidir [35]. MIRAI mimarisi dört büyük yapıdan meydana gelmiştir; mobil kullanıcı, radyo erişim ağı, ortak bir çekirdek ağı ve harici bir IP ağı. Ortak çekirdek ağı da bir kaynak yöneticisi ve mobil yöneticisi içermektedir. Ağı geçidi yönlendiricileri ise ortak çekirdek ağı ile harici IP ağı arasında arayüz görevi üstlenirler.

2. **Kesintisiz Serbest Dolaşım Desteği:** Kablosuz servislerin her zaman ve her yerde sağlanması için kesintisiz serbest dolaşım 4G ağlarda da desteklenmek zorundadır. Mobil kullanıcılar kablosuz ağların coğrafi sınırları arasında dolaşabilmelidir. Bu hareketlilik yönetimini yaparken iki ana sorun ortaya çıkmaktadır: konum yönetimi ve el değiştirme yönetimi. Hareketlilik yönetimi ile ilgili daha detaylı bilgi Bölüm 2.2'de sunulmuştur.

3. **Servis Kalitesi:** Çeşitli kablosuz erişim teknolojilerinde çoklu medya uygulamaları için farklı QoS ihtiyaçlarını desteklemek 4G ağlarda da başka bir sorun oluşturmaktadır [36]. Buna göre, bant genişliği, hareketlilik ve uygulama gereksinimlerine bağlı olarak kullanıcılar farklı erişim teknolojileri arasında kesintisiz geçiş yapabilmelidir. Heterojen kablosuz sistemlerde farklı QoS gereksinimli çeşitli uygulamaların desteklenmesinde radyo kaynaklarının etkin kullanılması ve çağrı kabulü stratejileri önemli rol oynamaktadır [37].

Mevcut QoS tasarımları genellikle bir kablosuz ağı özelinde yapılmıştır [7]. Örneğin 3GPP UMTS için kapsamlı bir QoS mimarisi sunmuştur. UMTS taşıyıcıları ve altındaki diğer taşıyıcı servisler vasıtasıyla UMTS için QoS gerçekleştirilmektedir. Fakat sadece UMTS'de QoS sağlamak, uçtan uca QoS gereksinimlerinin karşılanacağı anlamına gelmez. Çünkü UMTS içermeyen 4G sistemler de olabileceğinden bu QoS mimarisinden yararlanılamamaktadır. Bu problemin çözümü için 3GPP ortak QoS mimarilerinin birlikte çalışılması konusunda çalışmalarını sürdürmektedir.

4. **Güvenlik:** 4G'nin açık ortamında, çeşitli servis sağlayıcılarının ve ağı operatörlerinin son kullanıcı cihazlar ve açık arayüzler sayesinde çekirdek telekomünikasyon mimarisini ortak kullanmaktadır. Böylesi açık bir sistem, geleneksel kapalı ortamlara (örneğin; Genel Anahtarlama Telefon Şebekesi -

PSTN) kıyasla yüksek riskli güvenlik problemlerini de birlikte getirmektedir [38]. Bu yüzden yüksek seviyede güvenliğin garanti edilmesi 4G ağların başarıyla kurulmasında üstesinden gelinmesi gereken başka bir önemli konudur.

2G ve 3G'deki mevcut güvenlik şemaları 4G ağlar için yeterli gelmemektedir [39]. 4G'deki güvenlik tasarımlarının en zor noktası farklı sistemler için esnek olabilmesidir. [7]'de bahsedildiği gibi, mevcut güvenlik mimarileri genellikle ses servisleri gibi servis özelinde tasarlanmıştır. Böylesi bir tasarım, birçok heterojen sistemleri barındıran 4G ortamı için uygulanabilir değildir. Esnek güvenlik sistemlerinin tasarımı için bir çok araştırmacı yeniden ayarlanabilir güvenlik mekanizmaları üzerinde çalışmaktadır.

Mobil Terminaller

4G sistemlerde, geniş çeşitlilikteki kablosuz sistemlerle uyumlu olabilmesi, servislerin ve kullanıcı ihtiyaçlarının sağlanması için akıllı mobil terminaller gereklidir.

Mobil terminallerin sahip olması gereken özelliklerden bir tanesi çoklu anten tekniklerini destekleyebilir olmasıdır. Bu çoklu antenlerin çeşitli kablosuz erişim teknolojilerinde maksimum kullanımı ile 4G'de sunulan yüksek veri hızları, yüksek güvenilirlik ve uzun mesafe haberleşme mümkün olmaktadır.

Teletar iletim gücü sabitken hem alıcı hem de vericide çoklu anten tekniklerini kullanarak kanal kapasitesinin ciddi bir şekilde arttığını gözlemlemiştir [40]. Ajib ve Haccoun'un [41]'deki çalışmasında ise araştırmacılar bir Dik Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM) sisteminde baz istasyonunda iki verici anten ve üç alıcı anten; kullanıcı terminalinde ise bir verici anten ve üç alıcı anten kullanarak Çoklu-Giriş Çoklu-Çıkış (MIMO) tanımını yapmıştır. Bu çalışmada laboratuvar sonuçları ile birlikte saha sonuçları da elde edilmiştir. Çok kullanıcı MIMO tabanlı kablosuz ağlardaki çoğullama ve planlama teknikleri ile ilgili genel bir bakış Ghys ve diğerlerinin çalışmasında sunulmuştur [42].

Yukarıda anlatılan ve [40–42] çalışmalarında da belirtilen çok kullanıcı MIMO tabanlı anten tekniklerine ek olarak, cihaz ebatlarının sınırlı olması, maliyet ve güç tüketimi gibi diğer tasarım problemleri de mobil terminallerde karşılaşılan durumlar arasındadır [7].

Servisler

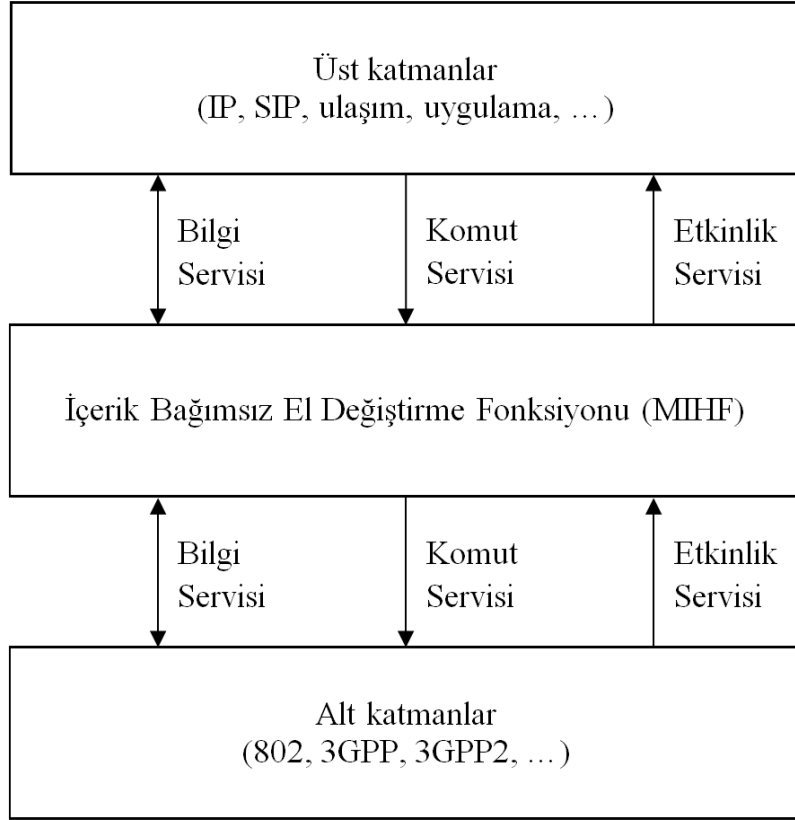
4G sistemleri kullanıcılarına çok çeşitli yeni servisler sunmaktadır ve bir kullanıcı birçok servis sağlayıcısından aynı anda farklı servisler alabilmektedir. Operatörlerin bu servisler için yeni iş mimarilerine, ücretlendirme süreçlerine ve veri korunmasına ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca farklı servisler için farklı faturalama metriklerinin de dengelenmesi gerekmektedir (örneğin, ücretlendirmenin veri mi yoksa süre üzerinden mi hesaplanması). 4G ağlar için bu yapısal faturalandırma sistemi üzerine [43,44]'de de belirttiği gibi birçok çerçeve sunulmuştur.

1.2 İçerik Bağımsız El Değiştirme Mimarisi

4G'de heterojen ağlar arasında el değiştirme yönetimi önemli bir çalışma konusudur. Bu bölümde İçerik Bağımsız El Değiştirme (MIH) servisleri ve IEEE 802.21 [45] standardı tanıtılacaktır.

3G ağlarda geleneksel olarak, alınan sinyal gücünden ölçülen kanal kalitesine ve geçiş yapılacak yeni hücrenin kaynaklarının uygunluğuna göre el değiştirmenin başlaması kararı verilmektedir. Bu süreç periyodik olarak yapılmakta ve sinyal gücü daha önce belirlenen bir eşik değerinin altına düştüğü ölçüldüğünde başka bir radyo kanalına veya hücreye el değiştirme işlemi başlatılmaktadır. Fakat bu tarz geleneksel yöntemler sinyal gücünü el değiştirmenin kararında tek kriter olarak kullanmaktadır. Ayrıca, bu el değiştirme yöntemleri kullanıcıya göre bir ağ seçimine izin vermeyip erişim için tek bir tercih sunmaktadır. Bu protokoller, ortak bir sinyal protokolü, yönlendirme tekniği ve serbest dolaşım yönetimine dayandırıldığından homojen sistemler için tasarlanmıştır. Heterojen bir ortamda ise, el değiştirme kararı bant genişliği ve güvenlik ihtiyaçları gibi başka parametreler de kullanılarak gerçekleştirilir. Kullanıcı tercihleri seçilebilir olmakla birlikte, mobil terminaller ve ağ yönlendiricileri de farklı ağlar ile birlikte çalışabilir olmalıdır.

Sistemler arası kesintisiz el değiştirme için, IEEE 802.21 standardı ile tanımlanan MIH servisleri üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Böyle bir tanımlama ile mevcut bir arama ya da oturum devam ederken heterojen teknolojiler arasında kesintisiz el değiştirme gerçekleştirilerek MT'lerin kullanıcı tecrübeleri artırılması amaçlanmaktadır. IEEE 802.21 herhangi bir ağ katmanına özel bir teknoloji kullanımına gerektirmeden bu



Şekil 1.2 : IEEE 802.21 standardı genel mimarisi. Üç tip servis çeşidi vardır: etkinlik servisi, komut servisi ve bilgi servisi.

katmanlar arasında ortak bir arayüz sunar. 802.21 standardının genel mimarisi Şekil 1.2’de gösterilmiştir.

Bu mimaride, MIH fonksiyonu (MIHF) yukarı ve aşağı katmanlar arasında, el değiştirme kararını veren ve başlatan farklı cihazlar arasındaki bilgi ve komutların iki yönlü iletilmesi görevini üstlenerek orta katman olarak çalışmaktadır. Her bir terminalde MIHF modülü bulunmaktadır ve el değiştirmenin kontrolü gibi genellikle serbest dolaşım yönetim protokolleri ilgili fonksiyonları kullanmaktadır. MIHF içinde üç tip servis barındırmaktadır:

- İçerik Bağımsız Etkinlik Servisi (MIES)
- İçerik Bağımsız Komut Servisi (MICS)
- İçerik Bağımsız Bilgi Servisi (MIIS)

MIES etkinlikleri tespit etmek ve bunları yerel ve uzak arayüzlerden raporlanmasından sorumludur. Şekil 1.2’de de gösterildiği gibi alt seviye katmanlardan üst seviye

katmanlara doğru tek yönlü çalışır. Bağlantı bozulmaları ve kopmaları gibi olaylar üst katmanlara MIES tarafından taşınır. Diğer taraftan MICS ilgili el değiştirmeye ait komutları üst katmanlardan alt katmanlara yine tek yönlü olarak iletir. Bu komutlar genel olarak ağ cihazlarının konfigürasyonu ve uygun ağların tespiti ile ilgilidir. Bu iki servisten daha az sıklıkla çalışan fakat eşit derecede önemli bir servis olan MIIS ise el değiştirmeye ilişkin bilgilerin yeniden elde edilmesinden görevli el değiştirmeye yardımcı bir mekanizmadır. Bu bilgiler kanal bilgisi veya bir Erişim Noktası (AP)'na ait Ortam Erişim Yönetimi (MAC) adresi gibi statik bağlantı katmanı parametreleri olabilmektedir.

IEEE 802.21, eski bağlantıların düzeltilmesi, radyo ölçümünün raporlanması, yeni bağlantıların bulunması, yeni radyo erişimin tespit edilmesi, kaynak durumunun kontrolü ve ağ bilgilerinin yenilenmesi gibi fonksiyonları içeren bir el değiştirme süreci sunmaktadır. Bununla birlikte, el değiştirme kararının uygulanması ve gerçekleştirilmesi Şekil 1.3'te gösterildiği gibi IEEE 802.21 standardının içinde yer almamaktadır. 4G'deki heterojen ağ ortamında, el değiştirme en uygun zamanda ve en uygun erişim ağına doğru yapılmalıdır. Bu yüzden VHD süreci heterojen ağlarda ne zaman ve nerede el değiştirmenin yapılmasını belirlediği için oldukça önemlidir.

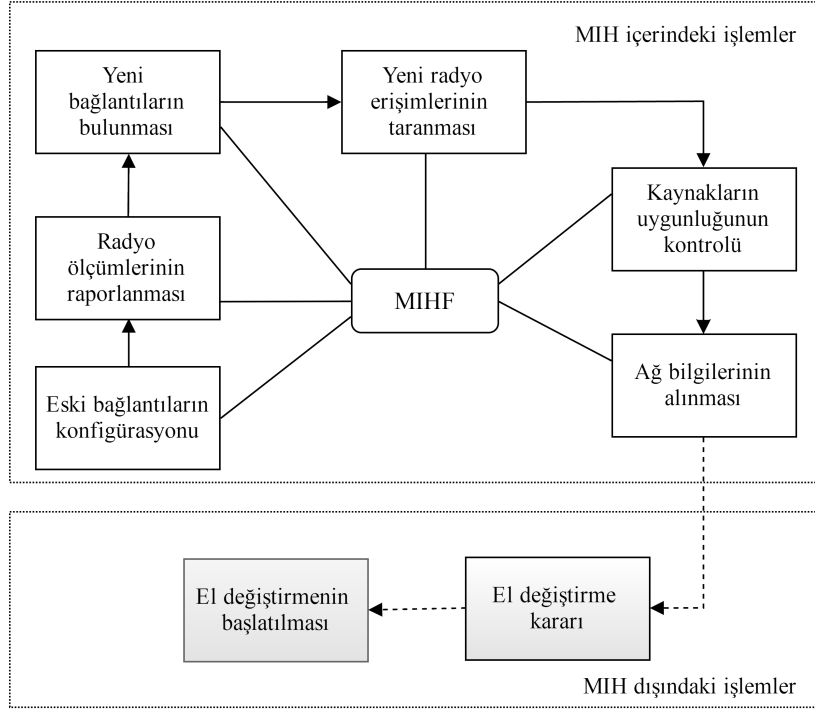
Bu çalışmada 4G kullanıcıları için daha iyi bir servis kalitesinde ve kesintisiz serbest dolaşım sağlayan bir VHD şeması geliştirilmiştir.

1.3 Dikey El Değiştirme Kararının Optimizasyonu

1.3.1 Tezin amacı ve kapsamı

Çeşitli ağ parametrelerini kullanarak optimum zamanda optimum ağı el değiştirmeyi başlatmak için birçok VHD algoritması sunulmuştur. Bu çalışmalar hakkında detaylı araştırma bir sonraki Bölüm 2'de yer almaktadır.

Bu VHD algoritmaları gerek çeşitli ağ parametrelerinin detaylı incelenmemesi gerekse uygulamalardaki gerçekleştirilebilirliği açısından yeterli değildir. Bunların dışında, mevcut VHD algoritmalarında iki önemli problem söz konusudur. Birincisi, bahsedilen algoritmalarda eğer bir WLAN kapsamı mevcut ise ağın uygunluğuna bakılmaksızın düşük maliyet ve yüksek veri hızı açısından bu ağı doğru el değiştirmeyi başlatma eğilimindedir. Böyle bir durumda, MT'nin hızı belirlenen eşik değerinin



Şekil 1.3 : IEEE 802.21 standardı içerisindeki işlemler. El değiştirme kararı ve başlatılması IEEE 802.21 içerisinde dahil edilmemiştir.

üzerindeyken WLAN'ın sınırlarına yaklaştığında el değiştirmeyi başlatmaktadır ve bu durum kaynakların gereksiz kullanımına sebep olduğu gibi MT'nin de batarya seviyesini azalmaktadır [46]. Dahası, eğer MT yüksek hızla hareket ettiği için eğer WLAN'ı terk edene kadar el değiştirme gerçekleşmezse bağlantı kopmaları olabilmektedir. İkinci problem ise, genellikle bağlanılan noktadan alınan sinyal gücü azalmaya başladığında el değiştirmeye ihtiyaç duyulur. Mevcut VHD algoritmaları el değiştirmenin başlama zamanını kullanıcının hareketliliği ve ağ parametrelerine göre dinamik olarak belirleyememektedir.

Bu çalışmada, rastgele hareket eden mobil kullanıcıların olduğu bir ortamda el değiştirme hatalarını, gereksiz el değiştirmeleri ve bağlantı kopmalarını en aza indirerek maksimum kullanıcı tecrübesinde optimize edilmiş bir VHD algoritması sunulmuştur. Bu sayede minimum seviyedeki servis kesintisiyle istenilen ağda en uzun süre bağlı kalınabilmektedir.

1.3.2 Tezin katkıları

Hücrel ağdan WLAN'e doğru el değiştirmenin gerekliliğini tespit etmek adına el değiştirme ihtiyacının tahmini (HNE) üzerine bir yöntem sunulmuştur. HNE ile

kullanıcının bir WLAN ağı içerisindeki toplam hareket ettiği süresini ve ortalama alınan sinyal gücü seviyesi (RSS) örnekleri ve mobil kullanıcının hız bilgisi kullanarak matematiksel bir model tanımlanmıştır. Daha sonra çeşitli ağ parametreleri ve kabul edilebilir el değiştirme hatası veya gereksiz el değiştirme olasılıklarını kullanarak bir eşik değeri hesaplanmaktadır. Tespit edilen yolculuk süresi hesaplanan bu eşik değerlerle karşılaştırılarak el değiştirmenin gerekli olup olmadığına karar verilmektedir.

Tez boyunca kullanılan [47]'deki çalışmada kullanılan sadece bir doğru boyunca hareket eden mobil kullanıcı yerine burada MT belirtilen alan içerisinde rastgele hareketlilik modeli (RWM) doğrultusunda hareket etmektedir. Bu durumda MT için her bir hareket vektörü için hesaplamalar yapılarak el değiştirme hatası ve gereksiz el değiştirme olasılıkları her bir hareket vektörü için ayrı ayrı hesaplanmaktadır. En sonunda ise bunların katılım olasılıkları oluşturularak performans sonuçları elde edilmektedir.

Daha detaylı açıklamalar ve hesaplamalar Bölüm 3'te sunulmuştur. Ayrıca bu bölümde teze referans olan [47]'deki çalışmanın üzerine yapılan katkılar matematiksel hesaplar üzerinden karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

2. VHD ALGORİTMALARI

2.1 Giriş

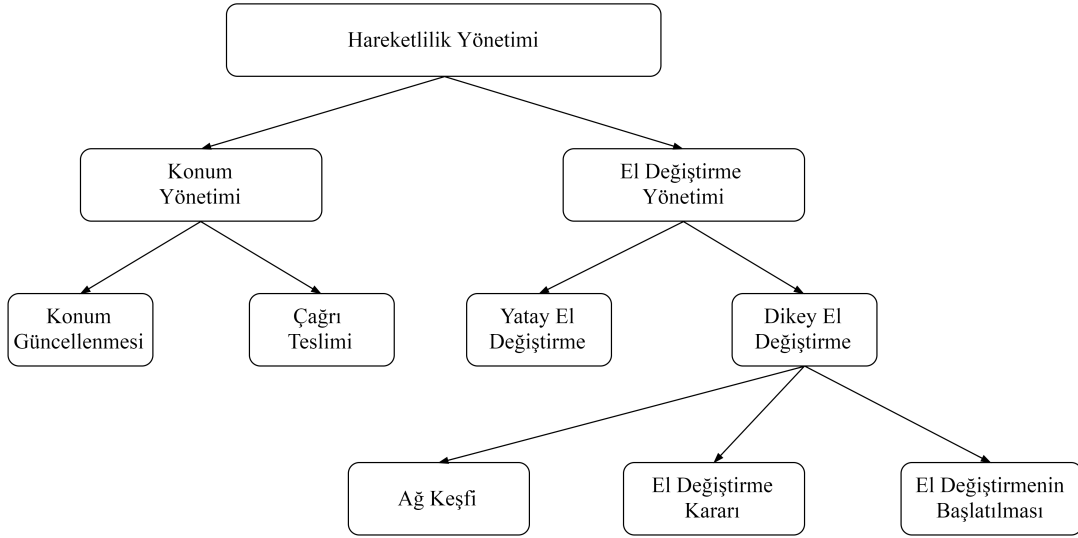
Etkili bir VHD algoritması, çoklu erişim ağları arasında kesintisiz dolaşımı destekleyen ve çeşitli uygulamalar için gerekli olan QoS parametrelerini sağlayabilecek şekilde tasarlanmalıdır. Bu bölümde, mevcut VHD algoritmalarının detaylı araştırması sunulmuştur. Sistematik bir karşılaştırma için, algoritmalar el değiştirme kullandıkları ana kriterlerine göre dört gruba ayrılmıştır. Ayrıca, bu algoritmalar arasında uygulamada yaşanan karmaşıklık ve verimliliklerine göre karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir.

Bölüm 2.2’de 4G’de el değiştirme yönetimi ile genel bilgiler verilir, Bölüm 2.3’te mevcut VHD algoritmalarına giriş yapılacaktır. Bölüm 2.4’te ise VHD algoritmalarının gruplandırılmasından bahsedilecek ve bu algoritmaların karşılaştırılması Bölüm 2.5’te sunulacaktır. Son olarak ise bu detaylı araştırmanın sonuçları yer alacaktır.

2.2 4G Ağlarda El Değiştirme Yönetimi

4G’de en önemli sorunlardan bir tanesi de bu bölümde anlatılacak olan mobil terminallerin hareketliliğinin yönetilmesidir. Heterojen ağlardaki mobil hareketliliğinin yönetimine ait hiyerarşi Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Burada iki ana mobil hareketlilik yönetimi vardır: Konum yönetimi ve el değiştirme yönetimi [48].

Konum yönetimi mevcut bağlantı noktasından (PoA) çağrının teslimi için yeni ağın keşfinin yapılmasını sağlar [48]. Konum güncellenmesi ve çağrı tesliminden oluşan iki yapıyı barındırır. Konum güncellenmesi, ağ üzerinde kullanıcı kimliği doğrulaması ve mobil terminalin konumun yenilenmesi işlevlerini yerine getirir. Bu yapı içerisinde MT periyodik olarak kullanıcının hareket izlerini güncelleyerek ve kullanıcı kimliği doğrulamalarını sağlayarak yeni erişim noktasını bilgilendirir. Bu sayede ağ içerisinde MT izlenmiş olur. Çağrı teslimi ise veri tabanı sorgulamaları ve



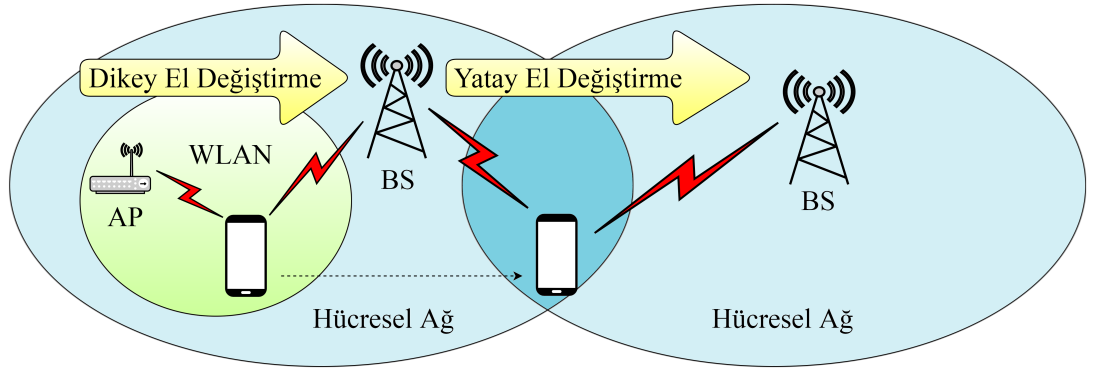
Şekil 2.1 : Heterojen ağ ortamında mobil hareketliliği yönetimi.

terminal aramalarından sorumludur. Burada kullanıcının hareket izleri ve MT'nin mevcut konumu için ağa sorgulamalar gönderilir.

4G kablosuz ortamında mobil kullanıcılar bir erişim noktasından bir başka erişim noktasına doğru hareket ettiklerinde mobil cihazlarını kullanabiliyor olmalıdır. Bu şekildeki süreçler "el değiştirme" olarak adlandırılır ve mobil terminal bir kapsama alanından diğerine geçtiğinde mevcut çağrı aktif tutularak bağlantıyı diğer erişim noktasına transfer eder [49].

El değiştirme kullanıcının başka bir erişim ağına bağlandığında aktif oturumunun korunduğu bir süreçtir [48]. Bağlantı noktalarının ait olduğu erişim ağına bağlı olarak el değiştirme dikey veya yatay olabilir [49]. Yatay el değiştirme iki bağlantı noktasının da aynı ağ teknolojisini kullandığı, örneğin bir hücresel ağ içindeki iki komşu hücre arasındaki gibi el değiştirmelerdir. Dikey el değiştirme ise, iki bağlantı noktası arasında farklı ağ teknolojilerinin kullanıldığı el değiştirmelerdir. IEEE 802.11 erişim noktası ile bir hücresel ağdaki baz istasyonu arasındaki geçişler dikey el değiştirmedir.

Bir el değiştirme süreci üç fazdan oluşur: El değiştirme kararı, radyo bağlantısının transferi ve uygun kanal ataması [48]. El değiştirme kararı hangi bağlantı noktasına geçileceğini ve el değiştirmenin zamanlanma bilgilerini içerir. Radyo bağlantısı transferinde el değiştirme kararındaki bilgiler ışığında mevcut bağlantıların yeni noktaya taşınması görevi yerine getirilir. Kanal atamasında ise kaynakların uygun kullanılmasına yönelik işlemler yapılmaktadır.



Şekil 2.2 : Heterojen kablosuz ağlarda yatay ve dikey el değiştirme.

2.2.1 El değiştirmenin sınıflandırılması

El değiştirme kararı sürecindeki farklı faktörlere bağlı olarak el değiştirme çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Literatürde en çok kullanılan sınıflandırmalar aşağıda verilmiştir.

Yatay ve Dikey El Değiştirme - Mevcut ağ çeşitlerine göre el değiştirme yatay veya dikey olarak tanımlanabilir [50]. Yatay veya sistem içi el değiştirme aynı teknolojiyi kullanan iki PoA arasında gerçekleşir. Örneğin, 3G hücresel ağında coğrafik olarak komşu olan iki BS arasındaki el değiştirme bu türdendir. Diğer taraftan, dikey veya sistemler arası el değiştirme ise farklı teknolojiyi kullanan iki PoA arasında yapılır. 3G BS ile IEEE 802.11 erişim noktası arasındaki el değiştirme Buna örnek olarak gösterilebilir. Şekil 2.2’de iki hücresel BS arasındaki yatay el değiştirme ve WLAN’e ait bir AP ile hücresel ağdaki BS arasındaki dikey el değiştirme gösterilmiştir.

Dikey el değiştirme, bant genişliği, veri hızı, frekans gibi farklı parametrelere sahip heterojen erişim sistemleri arasında gerçekleşir. Bu farklı karakteristikler dikey el değiştirme uygulamalarını yatay el değiştirmeye kıyasla daha zorlu hale getirmektedir [51]. Yatay ve dikey terimleri hücre büyüklüklerine göre hiyerarşik olarak sıralanmış ağlar üzerinden geçiş yönüne göre tanımlanmıştır. Dikey el değiştirme aşağı ve yukarı yönlü olmak üzere iki şekildedir.

Yukarı yönlü dikey el değiştirme genellikle her birim için daha az bant genişliğine sahip büyük hücrelere doğru gerçekleşmektedir. Bu yüzden yukarı yönlü dikey el

değiştirmede mobil kullanıcı WLAN gibi veri hızı yüksek fakat kapsaması küçük olan bir ağdan, kapsaması geniş fakat düşük veri hızlı yeni bir ağa geçiş yapmaktadır. Benzer şekilde aşağı yönlü olanda ise genellikle büyük hücrelerden, bant genişliğı yüksek olan daha küçük hücrelere el değıştirme sağlanır [49].

Sert ve Yumuşak El Değıştirme - Bağlantı sayıları ele alındığında el değıştirme sert ve yumuşak olmak üzere sınıflandırılabilir. Eğer MT aynı anda sadece tek bir erişim noktasına bağlanabiliyorsa bu sert el değıştirme olarak tanımlanır. Yumuşak el değıştirmede ise MT el değıştirme süreci boyunca birden fazla erişim noktası ile haberleşebilmektedir. Örneğin, eğer MT çoklu ağ arayüzlerine sahipse, yumuşak el değıştirme boyunca eř zamanlı farklı ağlardaki birden fazla erişim noktasına bağlanabilmektedir [51]. Yumuşak el değıştirmede, el değıştirme tamamlanmadan mevcut ağ ile bağlantı koparılmaz. Yani bağlanılmak istenilen erişim noktasına tam geçiş sağlanmadan, bir önceki erişim noktası ile hala oturum devam etmektedir. Öte yandan sert el değıştirmede önce eski bağlantı kesilmekte ve ardından yeni bağlantı kurulmaktadır.

Mobil Kontrollü, Ağ Kontrollü ve Mobil-Ağ Kontrollü El Değıştirme - Ağ kontrollü el değıştirmede, el değıştirme işlemi ağ tarafından yapılmakta iken, mobil kontrollü el değıştirmede bu işlem mobil cihaz tarafından gerçekleştirilmektedir. Mobil-ağ birleşik el değıştirmelerde ise mobil cihaz ağ ile işbirliğı yaparak el değıştirme kararını verir.

Diğer El Değıştirme Çeşitleri - Yukarıda anlatılan el değıştirme çeşitlerine ek olarak literatürde başka yöntemler de uygulanmaktadır [49]. Frekans bağlantıları ele alındığında, aynı frekanslar arası ve farklı frekanslar arası gerçekeşen el değıştirmeler mevcuttur. Yönetimsel alanlarına göre de el değıştirmeler benzer şekilde sınıflandırılabilir. Yine el değıştirmenin gerekliliğine göre zorunlu ve gönüllü el değıştirme şeklinde ayrımlar vardır. Kullanıcı katılımına göre de etkin ve pasif el değıştirme tanımları yapmak mümkündür.

2.2.2 Dikey el değıştirme süreci

Dikey el değıştirme süreci üç aşamadan oluşur: Ağ keşfi, el değıştirme kararı ve el değıştirmenin başlatılması [52].

Ağ Keşfi - Bu aşamada, MT ulaşılabilen kablosuz ağları arar. Burada MT'nin çoklu arayüzleri aktif olmalı ve bu arayüzler farklı kablosuz teknolojilerinden gelen servisleri alabiliyor olmalıdır. Dolayısıyla eğer herhangi bir servis alınabiliyorsa, MT bu kablosuz ağa bağlanabildiğini anlamaktadır. Ulaşılabilir kablosuz ağların tespit edilmesi için en kolay yol bütün arayüzlerin her zaman aktif olmasıdır. Fakat bu durum herhangi bir paketin alınıp verilmediği durumlarda kullanıcının pil ömrünü tüketmektedir. Bu yüzden kullanılmayan arayüzlerin her zaman aktif bırakılmasından kaçınılmalıdır. Ayrıca yeni ağ arama süresi mümkün olabildiğince kısa tutulmalıdır. Çünkü el değiştirmenin gerekliliği olduğu durumlarda, MT yeni ağa hızlıca bağlanabilmelidir.

Güç verimliliği ve yeni ağları arama süresi ağ keşfi aşamasında el değiştirme sürecinin performansı konusunda büyük önem taşımaktadır. Arayüzler belirli aralıkta aktif edilip yeni ağlardan gelen servis bilgilerini alabilir. Arayüzlerin periyodik olarak aktif edilmesi de ağ arama süresini doğrudan etkilemektedir. MT'nin kısa aralıklarla arayüzleri aktif etmesi ağ keşfi süresini kısaltırken, pil seviyesini de azaltmaktadır. Tersine şekilde uzun aralıklarla arayüzlerin aktif edilmesi de ağ keşfi süresini uzatır fakat güç verimliliği de artar. Bu yüzden ağ keşfi süresi ile güç verimliliği arasında bir ödünleşim söz konusudur [53].

El Değiştirme Kararı - El değiştirme kararı hangi kablosuz ağa el değiştirmenin gerçekleştirileceği kararının verilmesi sürecidir. Bu karar dikey el değiştirme için mevcut bağlanılan ve bağlanılacak olan ağa ait birçok ağ ve cihaz parametrelerine bağlı olarak verilmektedir. Örneğin, mobil kontrollü el değiştirmeler için, cihaz üzerindeki dikey el değiştirme modülü tarafından ağın bant genişliği, trafik yükü, kapsama, maliyet, güvenlik, QoS ve hatta kullanıcı tercihleri gibi bir takım metrikler kullanılarak verilir [54].

Dikey el değiştirme kararı ile ilgili daha detaylı bilgiler Bölüm 2.3'te sunulmuştur.

El Değiştirmenin Başlatılması - El değiştirmenin başlatılması için mobil kullanıcının bağlantı yolunun yeni PoA'ya yönlendirilip veri paketlerinin yeni kablosuz bağlantıyla transfer edilmesi gerekir. Bu yüzden MT'ye hedef ağ tarafından paketlerin doğru bir şekilde iletilmesi için yeni erişim noktasına ait yönlendirme bilgisi transfer edilir. 4G'deki heterojen ortam içinde çoklu standartlar ve ağlar yönetilirken, yeni kablosuz

bağlantılar ile mobil cihazın veri akışı devam ederken farklı ağlar arasında dolaşımını mümkün kılmak için içeriğe bağlı bilgileri taşıyan paketlerin de iletimi sağlanmaktadır. Burada amaç mobil kullanıcı bir ağdan başka bir ağa geçerken yaşanan mevcut trafik akışının tekrar kurulması esnasındaki gecikmeyi en aza indirmektir. Eğer içerik transferi gecikmesi çok uzun sürerse, trafik akışı tekrar kurulması da aynı oranda uzayacaktır ve el değiştirme esnasındaki bağlantı kopma oranı da yükselecektir. Bu yüzden gerek ağlar arası gerekse servis sağlayıcıları arasındaki hızlı el değiştirmeleri destekleyen mekanizmaların tasarlanması oldukça önemli bir konudur [54].

VHD algoritmaları mobil kullanıcılara mevcut aday ağlar arasında en iyi olana bağlanılmasını sağlar. Genellikle sadece alınan sinyal gücünü (RSS) kriter olarak kullanan yatay el değiştirme algoritmalarının tersine, burada servislerin maliyeti, güç tüketimi ve mobil kullanıcının hızı gibi kriterler de kullanılarak kullanıcı merkezli bir el değiştirme söz konusudur [49].

2.3 VHD Algoritmalarına Genel Bakış

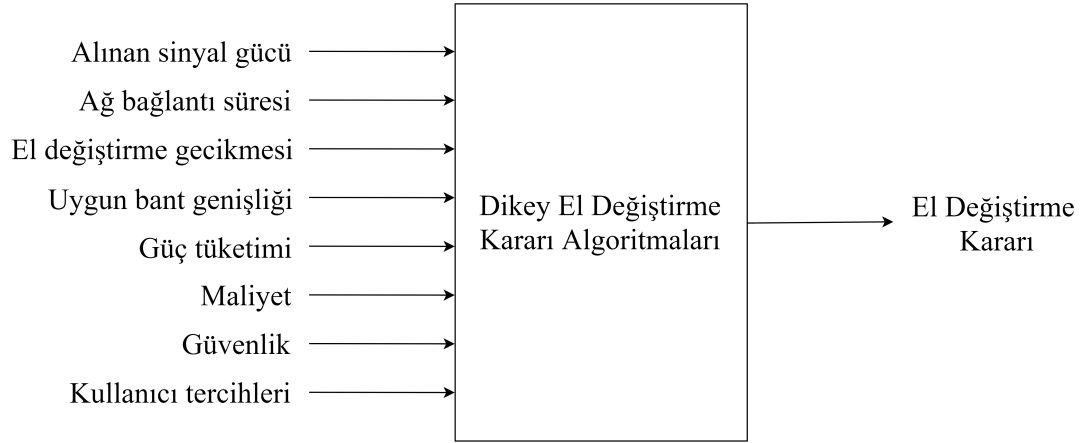
VHD algoritmalarının araştırılması ile ilgili daha önce birçok çalışmalar yapılmıştır [55,56]. Bunlardan ilki [57]'de VHD politikalarındaki performans ve tasarım sorunları sunulmuş ve bazı VHD algoritmalarının analizi ve karşılaştırılması yapılmıştır. Fakat bu çalışmada sadece maliyet fonksiyonu ve RSS tabanlı olan VHD algoritmaları ele alınmıştır. Daha sonra [55]'te QoS ve sistem kaynaklarının kullanımı üzerindeki farklı dikey el değiştirme algoritmalarının performansları yine karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. [56]'da ise mevcut dikey el değiştirme kararlarında kullanılan matematiksel modeller üzerine çalışılmıştır. Devam eden bölümlerde bu çalışmalar üzerinden güncellemeler yapılarak VHD algoritmaları anlatılacaktır.

Mevcut VHD algoritmaları kullanılan ana el değiştirme kriterlerine göre dört grupta sınıflandırılmıştır.

2.3.1 VHD kriterleri

VHD kararı verilirken kullanılan bir takım kriterler Şekil 2.3'te gösterilmiştir.

Alınan sinyal gücü (RSS) - Ölçümü kolay ve servis kalitesini doğrudan etkilediği için en çok kullanılan VHD kriteridir. Alınan RSS ölçümleri ile MT ve bağlandığı nokta



Şekil 2.3 : VHD kararı verilirken kullanılan parametreler.

arasındaki mesafe birbirleri ile ilişkilidir. Mevcut yatay el değiştirme kriterlerinde ana kriter olan RSS, VHD algoritmalarında da önemli bir yere sahiptir.

Ağ bağlantı süresi - MT'nin belli bir erişim ağında bağlı kaldığı süreyi belirtir. Ağ bağlantı süresinin tespit edilmesi el değiştirmenin başlatılacağı en doğru anın seçilmesinde çok önemlidir. Böylelikle servis kalitesi istenilen seviyeye göre ayarlanabilir. Örneğin, WLAN'den hücresel ağa el değiştirme erken bitirilirse, ağ kaynakları verimsiz kullanılmış olacaktır veya tersine el değiştirme geç tamamlanırsa bu sefer de bağlantı kopmaları oluşacaktır. Ayrıca ağ bağlantı süresinin tespit edilmesi ile sık sık el değiştirmenin yaşanabileceği kısa bağlantı süresine sahip ağlar aday ağ listesinden çıkartılır ve gereksiz el değiştirme azaltılır.

Ağ bağlantı süresi MT'nin hızı ve konumu ile oldukça ilişkilidir. Hem MT'nin bağlantı noktasına olan uzaklığı hem de hareket hızı, MT'ye ulaşan RSS bilgisini etkiler. RSS'deki bu değişimler mobil kullanıcının herhangi bir ağda bağlı kalıp kalmadığını tespit eder. Bu yüzden ağ bağlantı süresi farklı büyüklüğe sahip ağların bulunduğu heterojen bir ortamdaki VHD algoritmaları için büyük önem taşımaktadır.

El değiştirme gecikmesi - MT'ye eski bağlantıdan gelen son paket ile el değiştirme sonrası kurulan yeni bağlantıdan gelen ilk paket arasındaki geçen süre el değiştirme gecikmesi olarak adlandırılır. Bu gecikme farklı teknolojiler arasında ele alınması gereken bir faktördür ve birlikte çalışması gereken bazı uygulamalarda önemli bir etki yapar.

Uygun bant genişliği - Saniye başına bit cinsinden ifade edilen ve veri haberleşmesi kaynakları için kullanılan bir ölçüdür. Herhangi bir erişim ağı içerisindeki trafik durumu için bir göstergedir.

Güç tüketimi - Mobil terminalin pil seviyesinin düşük olduğu durumlarda güç tüketimi önemli bir kriter haline gelmektedir. Böyle durumlarda, değerli hale gelmiş olan pil seviyesini çok düşürmeyecek olan bağlantı noktasına doğru el değiştirme tercih edilmektedir [49].

Maliyet - Farklı ağlar için farklı ücretlendirmeler söz konusudur. Bu yüzden ağ servislerinin maliyeti el değiştirme yapılırken dikkate alınması gereken bir kriterdir.

Güvenlik - Bazı uygulamalarda gizlilik ve iletilen verinin bütünlüğü kritik öneme sahiptir. Dolayısıyla, veri güvenliğinin gerekli olduğu durumlarda el değiştirme için yüksek güvenliğe sahip ağlar tercih edilmektedir.

Kullanıcı tercihleri - Kullanıcıların kişisel tercihleri diğer aday ağlar arasında hangi erişim ağına geçeceğini belirleyebilmektedir.

RSS ve ağ bağlantı süresi tabanlı karar kriterleri hem yatay hem de dikey el değiştirme kararlarında geniş ölçüde kullanılmaktadır. Diğer kriterler ise sadece VHD algoritmalarında görülmektedir.

2.3.2 VHD algoritmalarının sınıflandırılması

VHD algoritmalarının sınıflandırılmasında birçok yöntem uygulanmıştır [58, 59]. Bu çalışmada, VHD algoritmaları el değiştirme karar kriterlerine göre dört grupta incelenmiştir. Aşağıda sıralanan bu gruplar Bölüm 2.4'te detaylı olarak anlatılacaktır.

RSS tabanlı algoritmalar - Bu grupta el değiştirme kararının verilmesinde ana kriter olarak RSS bilgisi kullanılmaktadır. Mevcut bağlanılan noktadan gelen RSS ile diğer aday bağlantı noktalarından gelen RSS bilgilerinin karşılaştırılması adına birçok strateji geliştirilmiştir [60–62]. [63]'te RSS tabanlı yatay el değiştirme yöntemleri beş alt kategoride sınıflandırılmıştır; göreceli RSS, eşik değerli göreceli RSS, gecikmeli göreceli RSS, eşik değerli ve gecikmeli göreceli RSS ve tahmin yoluyla karar stratejileri. Dikey el değiştirme kararı verilirken farklı tip ağlardan farklı uyumlulukta RSS bilgisi alındığı için göreceli RSS kavramı geçerli değildir. Çünkü her bir ağ için

farklı bir eşik değeri söz konusudur. Ayrıca, bant genişliği gibi diğer ağ parametreleri de VHD süreçlerinde RSS ile birlikte kullanılmaktadır.

Bant genişliği tabanlı algoritmalar - Mobil kullanıcılar için uygun bant genişliği ana kriter olarak kullanılmaktadır [25,64]. Bazı algoritmalar ise hem bant genişliği hem de RSS bilgisini birlikte değerlendirmektedir [60,65]. Herhangi bir algoritma için RSS ve bant genişliğini ortak kullanılsa bile, bu çalışmadaki yöntemler ya RSS tabanlı ya da bant genişliği tabanlı olarak ayrılmıştır.

Maliyet fonksiyonu tabanlı algoritmalar - Bu tarz algoritmalar ücretlendirme, güvenlik, bant genişliği ve güç tüketimi gibi metrikleri kullanarak bir maliyet fonksiyonu tanımlarlar. Buna göre aday ağların bu maliyet fonksiyonları karşılaştırılarak el değiştirme kararı verilir [54, 66, 67]. Ağ durumu ve kullanıcı tercihlerine göre bu metrikler farklı ağırlıklandırmalara göre değerlendirilebilir.

Birleşik algoritmalar - Birleşik VDH algoritmaları diğer algoritmalara kıyasla oldukça geniş bir giriş bilgi setine sahiptir. Dolayısıyla, el değiştirme süreci için analitik bir formülasyon oldukça zordur. Bu yüzden, makine öğrenimi teknikleriyle el değiştirme kararı verilir. Bu grupta bulanık mantık ve yapay zeka ağlarına göre çalışan algoritmalar da oldukça popülerdir [68]. Bulanık mantık sistemler insan tecrübelerinden yararlanarak sayısal düşünce ile algoritmaların toplam verimliliğini arttırmaktadır. Bu yaklaşımları kullanan VHD algoritmaları için [68–71] çalışmaları örnek gösterilebilir. Eğer kapsamlı bir giriş seti varsa yapay zeka ağları ile istenilen çıkış için bu giriş setleri aracılığıyla öğrenme yoluyla el değiştirme kararı verilebilmektedir [72, 73]. Ayrıca sürekli ve gerçek zamanlı öğrenme süreçleriyle, sistemin performansı gözlemlenebilir ve kendi yapısını el değiştirme için yüksek başarımlı hale getirebilir. Bu şekildeki algoritmalar ise adaptif algoritmalar olarak adlandırılmaktadır.

2.3.3 VHD algoritmaları için performans metrikleri

VHD algoritmalarının performansları, ortalama ve maksimum el değiştirme gecikmesi, toplam el değiştirme sayısı, yanlış karar verilmesinden dolayı yaşanan el değiştirme hatası sayısı ve genel bir hareketlilik şablonu üzerinden devam eden bir oturum için veri hacmi gibi birçok sayısal metrik üzerinden kullanım senaryolarına göre karşılaştırılabilir.

El değiştirme gecikmesi - El değiştirme gecikmesi, ilgili VHD algoritmasının kompleksliği ile alakalı olup, el değiştirme sreccinin başlatılması ve tamamlanması arasında geçen süredir. Bu srenin azaltılması özellikle gecikme konusunda hassas olan ses ve çoklu medya uygulamaları için oldukça önemlidir.

El değiştirme sayısı - Sıklıkla el değiştirme yapılması kaynakların verimsiz kullanılmasına sebep olabileceği için genellikle el değiştirme sayısının az olması tercih edilmektedir. Eğer belirli bir zaman aralığı içerisinde mobil kullanıcı başlangıçtaki bağlı olduğu noktaya geri dönmesi gerekiyorsa, bu el değiştirme gereksiz olarak değerlendirilmektedir [62] ve bu şekilde olan el değiştirmelerin sayısı olabildiğince azaltılmalıdır.

El değiştirme hatası olasılığı - El değiştirme başlatıldığı anda hedef ağ bunu tamamlamak için yeterli kaynağa sahip değilse veya mobil terminal el değiştirme işlemi bitmeden hedef ağın kapsama alanından çıkarsa el değiştirme hatası meydana gelir. Normal şartlar altında, el değiştirme hatası olasılığı hedef ağının kanal uygunluğu ile alakalıdır [74]. Yukarıda bahsedilen ikinci durum mobil kullanıcının hareketliliğinden dolayı oluşan bir el değiştirme hatasıdır [75].

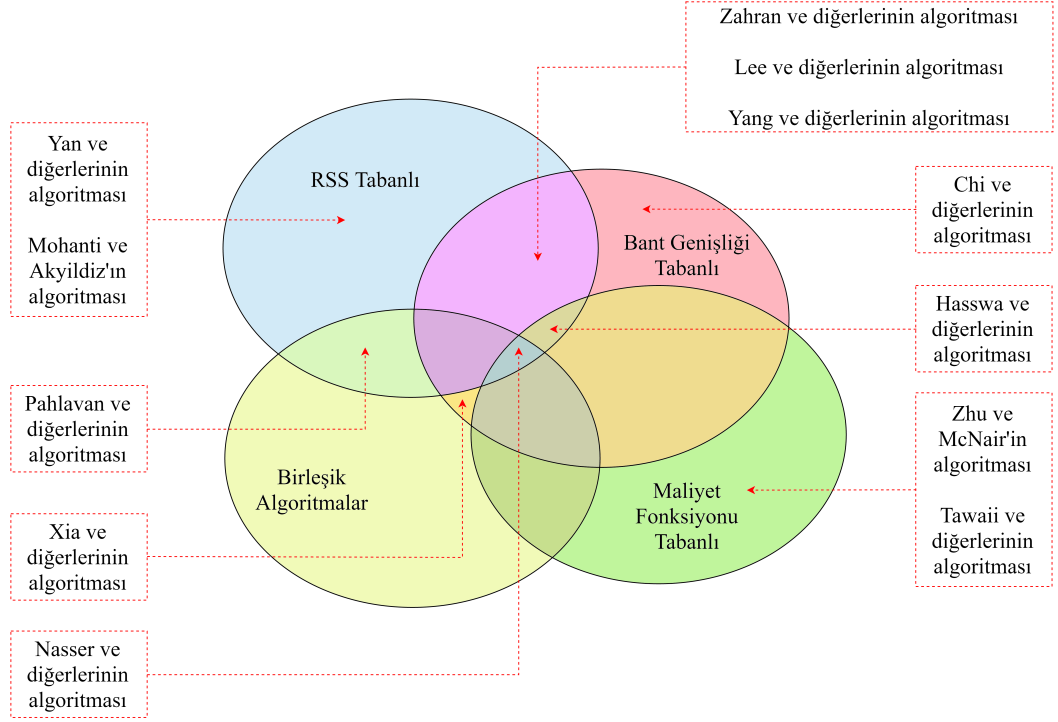
Veri hacmi - Veri hacmi herhangi bir ağdan mobil kullanıcıya iletilen veri hızını tanımlar. Genellikle el değiştirmeyi daha fazla veri hacmine sahip ağlara doğru yapmak tercih edilir.

2.4 VHD Algoritmalarının Gösterimi

Bu bölümde bazı VHD algoritmalarının gösterimi yapılmıştır. İşlemsel temelleri ile Bölüm 2.3.2’de yapılan dört kategoride ele alınan algoritmalar avantaj ve dezavantajları ile birlikte karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. şekil 2.4’te gösterildiği gibi bazı VHD algoritmaları birden fazla kategoriye dahil olsalar dahi, sınıflandırma yaparken ana karar kriterleri kullanılmıştır. Her bir sınıflandırma üç yaklaşım türüne ayrılmış ve bunlar birer nc örnekle ifade edilmiştir.

2.4.1 RSS tabanlı VHD algoritmaları

RSS tabanlı VHD algoritmaları, mevcut bağlantı noktasından alınan RSS bilgisini diğer ağ bağlantı noktalarınınkiyle karşılaştırarak el değiştirme kararını verir.



Şekil 2.4 : VHD algoritmalarının dört kategorisi ve bu kategorilere ait oniki algoritma.

Uygulamada kolaylık sağladığı için birçok çalışmada kullanılmıştır [60–62, 76, 77]. RSS tabanlı VHD algoritmalarını adaptif ömürlü, RSS eşik değerli ve yolculuk mesafesi tahmini tabanlı olmak üzere üç yaklaşım türüne ayrılabilir. Bu yaklaşım türlerinin uygulama alanları, özellikleri, avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

Bant genişliği tabanlı VHD algoritmaların asıl avantajı el değiştirme hatası, gereksiz el değiştirme ve bağlantı kopma olasılıklarını azaltıyor olmasıdır. Fakat, RSS bilgileri örneklenip ortalanması alınarak işlem yapıldığı için el değiştirme gecikmesi artmaktadır. Buna karşın el değiştirme gecikmesi gereksiz el değiştirme olasılığı ile dengelenebilmektedir.

Çizelge 2.1 : RSS tabanlı VHD algoritmalarının özeti.

Algoritma	Uygulama Alanı	Özellik	Avantaj	Dezavantaj
Zahran ve diğerlerinin algoritması	3G ve WLAN arasında	RSS bilgisi, değiştirme zamanı kararı için uygun bant genişliği veya tahmini bir ömürle birleştirilmiştir.	Kullanıcı hareketliliği ve uygulama gerekliliklerine uyum sağlama Uygun bant genişliği üzerinde geliştirme yapılabilir	Yüksek paket gecikmesi Fazladan arama tablosu
Mohanty ve Akyildiz'in algoritması	3G ve WLAN arasında	Dinamik bir RSS eşik değeri hesaplanmış ve el değiştirme zamanının tespit edilmesi için mevcut RSS ile karşılaştırılmıştır.	El değiştirme hatası ve el değiştirmenin yanlış başlatılması olasılığında azalma	Ağ kaynaklarının verimsiz şekilde kullanılması
Yan ve diğerlerinin algoritması	Hücreler ağırlar ve WLAN arasında	Dinamik bir zaman eşik değeri hesaplanmış ve el değiştirme kararı için WLAN içerisindeki öngörülen bir yolculuk süresi ile karşılaştırılmıştır.	El değiştirme hatası, gereksiz el değiştirme ve bağlantı kopması olasılıklarında azalma	Fazladan el değiştirme gecikmesi

2.4.2 Bant genişliği tabanlı VHD algoritmaları

Bant genişliği tabanlı VHD algoritmalarında mobil kullanıcı için veya ağın trafiğine göre uygun bant genişliğini ana kriter olarak değerlendirilir [25, 64, 78]. Bu algoritmalar için de öncül üç adet yaklaşım ele alınmıştır. Bunlar; QoS tabanlı, sinyal seviyesinin girişim ve gürültüye oranı (SINR) tabanlı, hatalı karar olasılığı (WDP) tahmini tabanlı algoritmalar şeklinde sınıflandırılmıştır.

Bant genişliği tabanlı VHD algoritmaları ait yaklaşımların karşılaştırılması ve özellikleri Çizelge 2.2’de sunulmuştur.

2.4.3 Maliyet fonksiyonu tabanlı VHD algoritmaları

Maliyet fonksiyonu tabanlı VHD algoritmaları birçok metriği birleştirerek bir maliyet fonksiyonu oluşturur. Bu alanda birçok çalışma yapılmıştır [54, 66, 67, 79, 80]. Diğer algoritmalarda olduğu gibi maliyet fonksiyonu tabanlı VHD algoritmalarının da üç gösterimi ele alınmıştır. Bunlar; çoklu-servis tabanlı, normalize edilmiş ve ağırlıklandırılmış maliyet fonksiyonu tabanlı ve ağırlıklandırma tabanlı olan algoritmalar şeklindedir.

Maliyet fonksiyonu tabanlı VHD algoritmalarının bu üç gösterimine ait uygulama alanları, özellikler, avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.3’te gösterilmiştir.

2.4.4 Birleşik VHD algoritmaları

Birleşik algoritmalar, yapay zeka ağları veya bulanık mantık tabanlı ve maliyet fonksiyonu tabanlı algoritmalarda olduğu gibi birçok parametreyi birleştirerek el değiştirme kararı veren VHD algoritmalarıdır. Literatürde geniş bir kombinasyonda algoritmalar mevcuttur [68–73]. Birleşik VHD algoritmaları, çok katmanlı ileri beslemeli yapay zeka ağları tabanlı, iki yapay zeka ağını birlikte kullananlar ve bulanık mantık tabanlı olmak üzere genel olarak üç konu başlığında incelenmiştir.

Bu gruptaki algoritmalar, genellikle sistem karmaşıklığını artırır ve ağ yapısını öğrenmeleri için belli bir süre gereklidir. Bununla birlikte en uygun ağın seçilmesinde oldukça başarılıdır. Birleşik VHD algoritmalarına ait yaklaşımların karşılaştırılması Çizelge 2.4’te verilmiştir.

Çizelge 2.2 : Bant genişliği tabanlı VHD algoritmalarının özeti.

Algoritma	Uygulama Alanı	Özellik	Avantaj	Dezavantaj
Lee ve diğerlerinin algoritması	WWAN ve WLAN arasında	Bant genişliği ile birlikte RSS, sistem durumu ve uygulama tipi bilgileri birlikte kullanılarak el değiştirme kararı verilir.	Yüksek veri hacmi Gerçek zamanlı iletişim için düşük el değiştirme gecikmesi	Uygun bant genişliği bilgisinin zor alınması Yüksek yeni uygulama engelleme oranı
Yang ve diğerlerinin algoritması	WCDMA ve WLAN arasında	Aday ağlar arasında SINR değerleri karşılaştırılarak el değiştirme kararı için kestirim yapılır.	Yüksek veri hacmi WLAN ve WCDMA arasında dengeli ağ yükü dağılımı	Çok fazla el değiştirme yapılması Ping-pong etkisi
Chi ve diğerlerinin algoritması	Herhangi iki kablosuz ağ arasında	Uygun bant genişliği, ağ trafiği ve gereksiz el değiştirme olasılığı bilgileri el değiştirme kararı için kullanılan kriterlerdir.	Düşük gereksiz el değiştirme olasılığı Dengeli trafik yükü	RSS bilgisi kullanılmadığı durumlarda yüksek bağlantı kopma olasılığı

Çizelge 2.3 : Maliyet fonksiyonu tabanlı VHD algoritmalarının özeti.

Algoritma	Uygulama Alanı	Özellik	Avantaj	Dezavantaj
Zhu ve McNair'in algoritması	Herhangi iki heterojen ağ arasında	Kullanıcıların aktif uygulamaları birbirinden bağımsız olarak tanımlanan maliyet fonksiyonuna göre en az maliyetle olana geçer.	Yüksek kullanıcı memnuniyeti Düşük engelleme olasılığı	Normalizasyon yöntemi ve ağırlıklandırma ataması gibi bilgiler için yetersiz detay Gerçekçi olmayan algoritma
Hasswa ve diğerlerinin algoritması	Herhangi iki heterojen ağ arasında	Normalizasyon ve ağırlıklı dağılım kullanılır ve bir el değiştirme gerekliliği kestirimi yapılmaktadır.	Yüksek veri hacmi Yüksek kullanıcı memnuniyeti	Güvenlik ve girişim seviyeleri gibi parametrelerin zor kestirimi
Tawil ve diğerlerinin algoritması	Herhangi iki heterojen ağ arasında	Ağırlık fonksiyonu kullanılır. MT yerine, bulunulan ağa göre el değiştirme hesaplanmaktadır.	Düşük el değiştirme gecikmesi Düşük engelleme olasılığı Yüksek veri hacmi	MT ve bulunulan ağdaki PoA arasında işbirliği zorunluluğu

Çizelge 2.4 : Birleşik VHD algoritmalarının özeti.

Algoritma	Uygulama Alanı	Özellik	Avantaj	Dezavantaj
Nasser ve diğerlerinin algoritması	Herhangi iki heterojen ağ arasında	Bir maliyet fonksiyonu elde edilir ve buna göre sistem el değiştirme kararı başlamadan önce öğrenme işlemine geçilir.	El değiştirme için aday ağlar arasında en iyi olanın seçilmesinde yüksek başarımlı	Öğrenme gecikmesi Yüksek sistem karmaşıklığı
Pahlavan ve diğerlerinin algoritması	WLAN ve GPRS arasında	RSS bilgisi yapay zeka ağı için giriş olarak toplanır ve sistem el değiştirme kararı başlamadan önce ortamı öğrenmeye başlar.	Düşük el değiştirme sayısı Düşük ping-pong etkisi	Öğrenme süreci ve parametrelerinde yetersizlik Öğrenme gecikmesi Yüksek sistem karmaşıklığı
Xia ve diğerlerinin algoritması	WLAN ve hücresel ağlar arasında	Mevcut RSS, kestirilen RSS ve bant genişliği bulanlaştırılarak ve normalize edilerek el değiştirme kararı için kriter olarak kullanılır.	Düşük el değiştirme sayısı Düşük ping-pong etkisi	Sürekli değişen kablolu ortamın ihtiyaçlarının karşılamayan sabit ağırlıklandırma

2.5 VHD Algoritmalarının Karşılaştırılması

Şu ana kadar sınıflandırılması yapılan dört gruba ayrılmış oniki VHD algoritmasının el değiştirme karar kriterleri gösterilmiştir. Bu dört grubun genel olarak karşılaştırılması için özellikleri beş metrik üzerinden özetlenmiştir. Bu metrikler; algoritmanın uygulanabileceği ağ teknolojileri, giriş parametreleri, el değiştirme için hedef seçim kriterleri, karmaşıklık ve güvenilirlik olmak üzere Çizelge 2.4'te sıralanmıştır.

RSS tabanlı VHD algoritmalarının uygulandığı ağ teknolojileri genellikle makro hücreler ile mikro hücreler arasında olup 3G ve WLAN oluşan bir heterojen ağ ortamı buna örnek gösterilebilir. Verilen algoritmalar maliyet konusunda verimli ve yüksek bant genişliğine sahip olduğundan dolayı WLAN kullanımını olabildiğince arttırmak eğilimindedir. Diğer üç gruba ait algoritmalar ise her çeşit kablosuz ağ arasında el değiştirme yapmak için kullanılabilir.

El değiştirilecek hedef ağ seçimi kriteri için, aday ağ RSS tabanlı algoritmaların kullanıldığı durumda en kararlı RSS'e sahip olmalıdır. Eğer bant genişliği tabanlı algoritmalar kullanılıyorsa bu sefer en yüksek bant genişliğine sahip ağ seçilmelidir. Diğer yandan maliyet fonksiyonu tabanlı veya birleşik algoritmalarda hedef ağ seçiliren sistemin genel performansına bakılmaktadır. Çeşitli ağ parametrelerine bağlı olan sistem performansının en yüksek olduğu ağa doğru el değiştirme başlatılmaktadır.

Karmaşıklık açısından bakıldığında, dört grup arasında RSS tabanlı olanlar genellikle en basit uygulanabilirliğe sahipken onu bant genişliği tabanlı olan VHD algoritmaları takip eder. Maliyet tabanlı olan VHD algoritmaları çeşitli ağ parametrelerini toplayıp normalize ettikleri için daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Birleşik algoritmaları ise el değiştirme öncesi bir öğrenme sürecine ihtiyaç duydukları için en karmaşık VHD algoritmalarıdır.

Son olarak güvenilirlik kriteri bu algoritmalar arasında değişmektedir. RSS'teki dalgalanmalar, RSS tabanlı algoritmalarının güvenilirliğini düşürürken, kablosuz ağlarda sürekli değişen uygun bant genişliği de bant genişliği tabanlı VHD algoritmalarının güvenilirliğini azaltmaktadır. Maliyet fonksiyonu tabanlı algoritmalarda, ağ güvenliği gibi ölçümü zor parametreler değerlendirildiği için, bu algoritmalarında güvenilirliği

Çizelge 2.5 : VHD algoritmalarındaki dört grubun karşılaştırılmalı özeti.

Grup	Uygulanabilir ağ teknolojileri	Giriş parametreleri	El değiştirme için hedef seçim kriteri	Karmaşıklık	Güvenilirlik
RSS tabanlı VHD algoritmaları	Genellikle makro hücreler ile mikro hücreler arasında	Ana giriş parametresi olarak RSS bilgisi	Aday ağlar arasında en kararlı RSS bilgisine sahip olan	Basit	RSS'teki dalgalanmalar yüzünden düşük güvenilirlik
Bant genişliği tabanlı VHD algoritmaları	Herhangi iki heterojen ağ arasında	RSS gibi diğer parametrelerle ile birleştirilmiş bant genişliği	Aday ağlar arasında en yüksek bant genişliğine sahip olan	Basit	Değişen uygun bant genişliği yüzünden düşük güvenilirlik
Maliyet fonksiyonu tabanlı VHD algoritmaları	Herhangi iki heterojen ağ arasında	Ücretlendirme, bant genişliği ve güvenlik gibi birçok parametre	Aday ağlar arasında en düşük maliyet fonksiyonu değerine sahip olan	Karmaşık	Parametrelerin ölçülmesi zor olduğundan düşük güvenilirlik
Birleşik VHD algoritmaları	Herhangi iki heterojen ağ arasında	Farklı yöntemler için farklı giriş parametreleri	Aday ağlar arasında en yüksek performansla sahip olan	Çok karmaşık	Sistem öğrenildiği için yüksek güvenilirlik

düşüktür. Bununla birlikte birleşik algoritmalarda sistem el değıştirme işleminden önce öğrenildiğı için dört gruptaki algoritmalar arasında güvenilirliğı en yüksek olan VHD algoritmalarıdır.

Sonuç olarak, RSS ve bant genişliğı tabanlı VHD algoritmaları genellikle basittir. Fakat bu algoritmalar sadece birkaç tane el değıştirme kriterini ele almaktadır. Ücretlendirme veya güç tüketimi gibi diğeri önemli parametreler değeriendirilmemektedir. Ek olarak, sadece iki tip ağ teknolojilerinde çalışabilmektedirler. Maliyet fonksiyonu tabanlı ve birleşik algoritmalar, çok daha karmaşık ve aday ağlar arasında karşılaştırma yapabilmek için geniş çapta ağ parametrelerini hesaplamaktadır. Bu algoritmalar genellikle teorik analizlerin elde edilmesinde veya çok detay gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır.

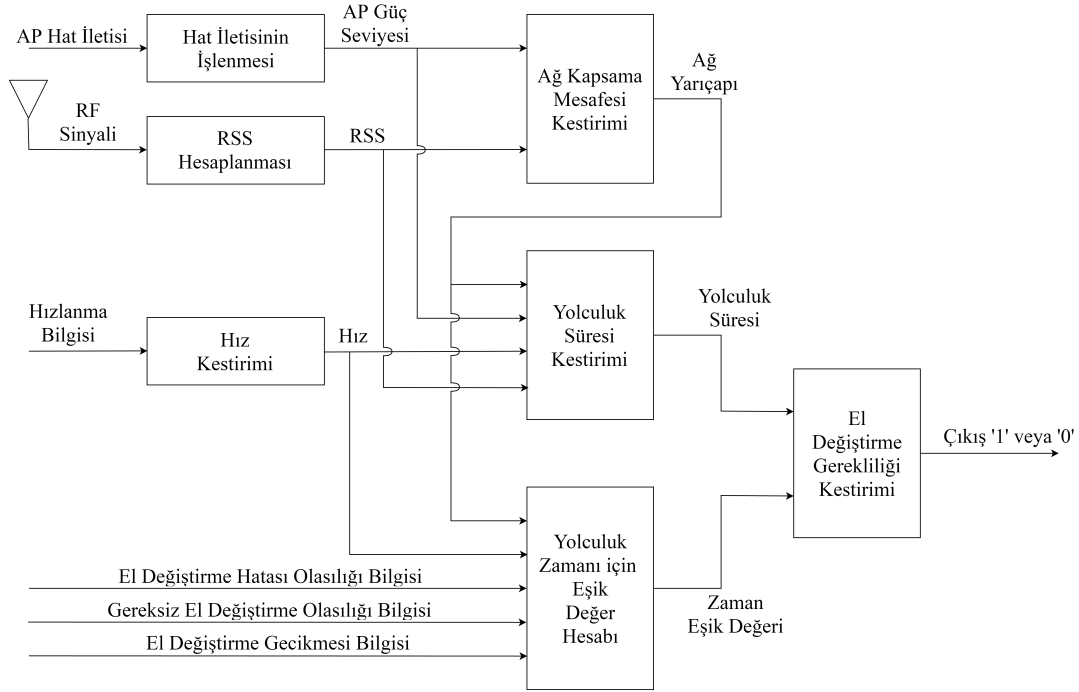
3. ÖNERİLEN ALGORİTMA

3.1 El değiştirme ihtiyacının tahmini ve kullanılan senaryo

El değiştirme ihtiyacının tahmini (Handover Necessity Estimation - HNE) birimi, uygun bir aday ağ için el değiştirmenin gerekli olup olmadığını belirler. HNE, çeşitli ağ parametrelerini giriş olarak kabul eder ve ikili sayı değeri işe çıkış verir. Giriş bilgisi olarak; bağlantı noktası (Access Point - AP) güç seviyesi, RSS örnekleri, ağın yarıçapı, MT'nin hızı el değiştirme gecikmesi ve el değiştirme hatası ve gereksiz el değiştirme olasılığına ihtiyaç duyar. Çıkış olarak ise; eğer el değiştirme gerekli ise '1' ve el değiştirme gerekli değil ise '0' bilgilerini üretir. HNE'nin blok diyagramı Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

HNE, hareket süresi tahmini ve el değiştirme olasılıkları için eşik değer hesabı olmak üzere iki birimden oluşur. HNE sürecinin başlatıldığında, öncelikle MT'nin bulunduğu konum çevresindeki WLAN ağları tespit edilir. Bölüm 2.3.1'de bahsedilen VHD kriterlerine göre el değiştirme için en uygun ağ seçilir. Seçim işlemi tamamlandıktan sonra aday ağ içerisindeki hareket süresi ve eşik zaman değeri hesaplanır. MT tarafından toplanan RSS örnekleri, MT'nin hızı, el değiştirme gecikmesi, AP'nin güç seviyesi ve yarıçapı ile el değiştirme hatası ve gereksiz el değiştirme olasılığı kullanılarak hareket süresi tahmin edilir. Daha sonra HNE, bu tahmin edilen hareket süresi ile eşik zaman değerini karşılaştırır. Eğer hareket süresi eşik değerden daha büyük ise '1' çıkışı üretilir ve el değiştirmenin gerekli olduğu anlaşılır. Bunun dışında '0' çıkışı üretilir ve el değiştirmenin gereksiz olduğu anlamı çıkar. HNE bu işlemi her bir aday ağ için gerçekleştirir ve yine her biri için bu ikili çıkışları üretir.

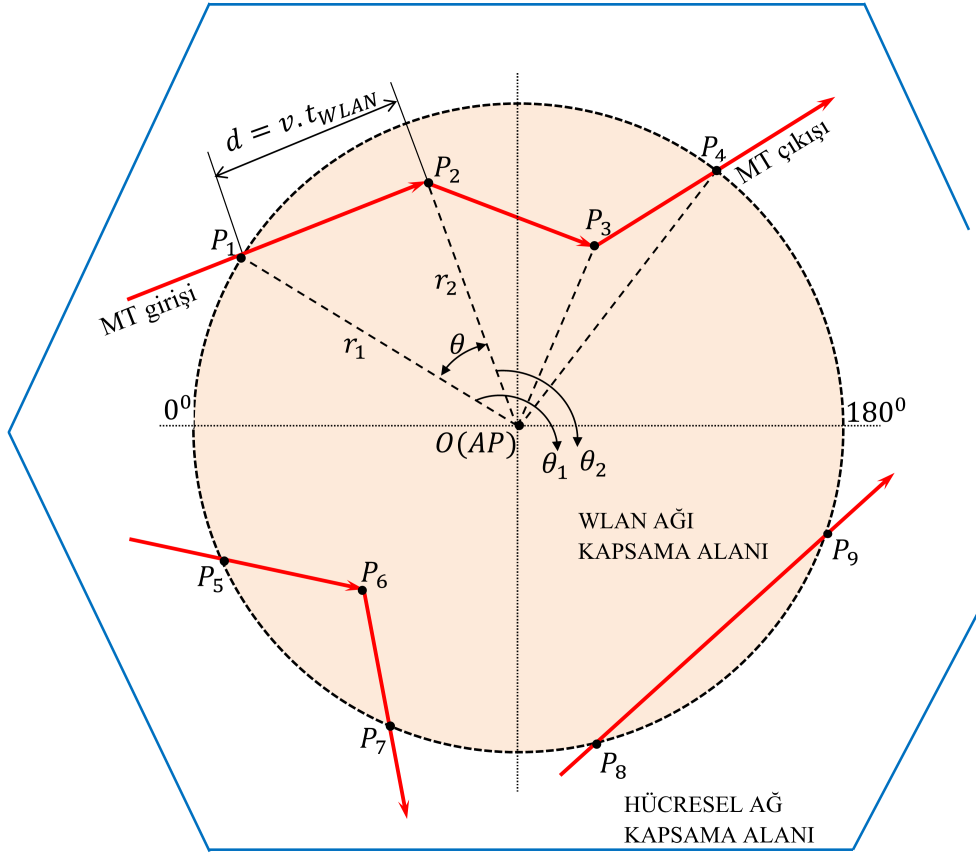
Bu bölümde, el değiştirme ihtiyacının kestirimi için bir yöntem sunulmuştur. Kesintisiz kullanıcı dolaşımını sağlamak ve ağ kaynaklarının kullanımını optimize etmek için el değiştirme hatası ve gereksiz el değiştirme olasılıkları en aza indirgenmelidir. El değiştirmenin gerekliliği kestirimi yolculuk süresi tahmini ve bu süre için bir eşik değerin hesaplanması yoluyla yapılmaktadır.



Şekil 3.1 : El değiştirme gerekliliğinin kestirimi (HNE) biriminin blok diyagramı.

El değiştirme gerekliliğinin kestirimi için bir hücrese ağ ve bir WLAN ağının bulunduğu bir ortamda, MT rastgele hareket modelini (RWM) kullanmaktadır. Daha önce X. Yan, HNE için benzer bir ağ ortamı üzerinde çalışmıştır [47]. Bu çalışma, HNE algoritmalarının uygulanması için oldukça elverişli bir ortam sunmaktadır. Fakat burada MT yalnızca doğrusal bir şekilde hareket etmektedir. Yani MT, WLAN hücrese herhangi bir noktadan girip, hiç bir şekilde yönünü değiştirmeden yine herhangi bir noktadan WLAN hücrese terketmez. Bu hareketlilik uygulanabilirlik açısından yeterli değildir ve MT'nin rastgele dolaşımı durumunda HNE algoritmasının performansını sergileyememektedir. Çünkü MT, WLAN hücrese herhangi bir giriş yaptıktan sonra, yönünü birçok kez değiştirebilir ve bu da performans analizlerini etkilemektedir.

Şekil 3.2'de MT'nin WLAN hücrese civarındaki rastgele hareket yörüngeleri için bir örnek gösterilmektedir. Burada gösterilen her bir yörünge bir ya da daha fazla hareket vektörlerinden oluşmaktadır. Örneğin; MT, WLAN hücrese P_1 noktasından girsin. P_2 noktasına gelene kadar $|P_1P_2|$ vektörü boyunca hareket etmektedir. Daha sonra P_2 noktasına vardığında yönünü değiştirerek $|P_2P_3|$ vektörünü izlemektedir. P_3 noktasına geldiğinde tekrar yönünü değiştirerek $|P_3P_4|$ vektörü doğrultusunda ilerleyip



Şekil 3.2 : WLAN hücresi civarında rastgele hareket eden bir MT yörüngesi.

P_4 noktasında WLAN hücresinden ayrılmaktadır. X. Yan'ın [47]'daki çalışmasında ise; MT sadece şekilde gösterilen P_8 noktasından girip, $|P_8P_9|$ vektörünü izleyerek P_9 noktasından çıkmaktadır. Bu tek vektörden oluşan yörüngeler doğrusal hareket olarak adlandırılır. Daha gerçekçi ortamlarda ise MT rastgele hareket etmektedir. Tez çalışmasında bu rastgele hareket modeli kullanılmış ve mobil kullanıcıları WLAN içerisindeki serbest dolaşımları desteklenmiştir.

3.2 Yolculuk Süresi Kestirimi

El değiştirmenin gerekli olup olmadığının kestirimi, ardışık RSS ölçümlerini kullanarak MT'nin WLAN hücresi içerisindeki yolculuk süresinin tahmin edilmesine göre karar verilir. Kullanılan algoritma aşağıda verilen varsayımlara dayanmaktadır:

- WLAN hücresi dairesel geometriye sahiptir.
- MT, WLAN hücresinin etrafında değişken hızda ve rastgele hareket etmektedir.

- WLAN hücresinin kapsama alanı içerisindeki radyo yayılım ortamı log-uzaklık yol kayıp modeli kullanılarak tasarlanmıştır [81].

Şekil 3.2'deki yolculuk süresinin tahmini senaryosunda, AP'nin hücre içerisinde herhangi bir P_i noktasında bulunan MT'ye olan mesafesi ile dBm cinsinden alınan RSS bilgisi arasındaki ilişki log-uzaklık yol kaybı modeli kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$RSS_{P_i} = P_{T_x} - PL_{ref} - 10\beta \log_{10} \frac{l_{OP_i}}{d_{ref}} + X_\sigma \quad (3.1)$$

Burada, P_{T_x} dBm cinsinden WLAN'deki AP'den iletilen sinyal gücü, l_{OP_i} AP ile P_i noktası arasındaki uzaklık, d_{ref} AP ile önceden belirlenen bir referans noktası arasındaki uzaklık, PL_{ref} bu referans noktasındaki dB cinsinden yol kaybı, β yol kaybı katsayısı ve X_σ ise sıfır ortalamalı ve σ varyanslı Gauss dağılımlı rastgele değişkenidir.

Tasarlanan ortamda WLAN hücrelerini de kapsayan bir hücresel erişim ağı mevcuttur ve MT her zaman bu hücresel ağına kapsama alanı içerisinde. MT, WLAN hücrelerine giriş yaptığı esnada WLAN hücrelerinden baskın bir sinyal almaktadır. Örneğin; Şekil 3.2'de gösterilen P_1 noktasında geldiğinde MT'ye WLAN'den hücresel ağdakine göre daha yüksek bir RSS bilgisi gelmektedir.

Kullanılan senaryoda, MT'nin hızı $[v_{min} v_{max}]$ aralığında rastgele değişmektedir. WLAN hücrelerine herhangi bir giriş noktası P_i , O noktasına göre θ_j açısına sahiptir. MT'nin bu noktadan devam edip yönünü değiştireceği nokta olan P_{i+1} de θ_{j+1} açısında yer almaktadır ve bu açılar $[0 \ 2\pi]$ aralığında düzgün dağılıma sahiptir. Rastgele iki nokta olan P_i ve P_{i+1} arasındaki açı farkı θ_i ile tanımlanmış ve $\theta_i = |\theta_j - \theta_{j+1}|$ denklemi ile elde edilmektedir.

Şekil 3.2'de de görüldüğü gibi MT'nin takip ettiği yörüngeler bir veya birden fazla vektörlerden oluşmaktadır. Örneğin, P_1 'den girilip P_4 'den çıkılan bir yörünge $|P_1 P_2| \cup |P_2 P_3| \cup |P_3 P_4|$ şeklinde üç vektörün birleşimi olarak gösterilebilir. Herhangi bir yörünge boyunca toplam geçirilen yolculuk süresinin olasılık dağılım fonksiyonunu (PDF) bulmak için önce her bir vektörün PDF'i hesaplanmalı ve ardından bu PDF'lerden bir katılım PDF'i elde edilmesi gerekmektedir. Buna göre, öncelikle vektörü oluşturan herhangi iki noktaya ait açıların PDF'inden başlanmalıdır. P_i ve P_{i+1} ait noktaların açılarına ait PDF aşağıdaki gibidir:

$$f_{\Theta_j}(\theta_j) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} & 0 \leq \Theta_j \leq 2\pi \\ 0 & \text{diger} \end{cases} \quad (3.2)$$

$$f_{\Theta_{j+1}}(\theta_{j+1}) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} & 0 \leq \Theta_{j+1} \leq 2\pi \\ 0 & \text{diger} \end{cases}$$

Bu iki nokta birbirinden bağımsız oldukları için, noktaların katılım PDF'i Denklem 3.2'de verilen PDF'lerin çarpımı şeklinde olacaktır.

$$f_{\Theta_j, \Theta_{j+1}}(\theta_j, \theta_{j+1}) = \begin{cases} \frac{1}{4\pi^2} & 0 \leq \Theta_j, \Theta_{j+1} \leq 2\pi \\ 0 & \text{diger} \end{cases} \quad (3.3)$$

Vektör açısı Θ_i 'nin birikimli dağılım fonksiyonu (CDF):

$$F_{\Theta_i}(\Theta_i) = P(\Theta_i \leq \theta_i) \\ = \iint_L f_{\Theta_j, \Theta_{j+1}}(\theta_j, \theta_{j+1}) d\Theta_j d\Theta_{j+1} \quad (3.4)$$

Burada L , MT'nin yönünün $0 \leq \Theta_i \leq 2\pi$ aralığında olması için açılar için belirtilmiş bir limit değerini ifade etmektedir. $\theta_i \leq 0$ için $P(\Theta_i \leq \theta_i) = 0$ ve $\theta_i \geq 2\pi$ için $P(\Theta_i \leq \theta_i) = 1$ olmaktadır. Denklem 3.4'te belirtilen integral alındığında aşağıdaki CDF ifadesi elde edilir:

$$F_{\Theta_i}(\Theta_i) = \frac{(4\pi - \theta_i)\theta_i}{4\pi^2}, \quad 0 \leq \Theta_i \leq 2\pi \quad (3.5)$$

Buna göre Θ_i 'nin PDF'i:

$$f_{\Theta_i}(\Theta) = \begin{cases} \frac{2\pi - \theta_i}{2\pi^2}, & 0 \leq \Theta_i \leq 2\pi, \\ 0, & \text{diger} \end{cases} \quad (3.6)$$

şeklindedir. Θ_i 'nin PDF'i ile herhangi bir vektöre ait yolculuk süresi olan t_{WLAN_i} 'nin PDF'i hesaplanabilir. Bunun için öncelikle vektörün yolculuk mesafesi d_i Kosinüs formülünden aşağıdaki gibi elde edilir.

$$d_i = \sqrt{r_i^2 + r_{i+1}^2 - 2r_i r_{i+1} \cos \theta_i} \quad (3.7)$$

Vektörün yolculuk süresinin MT'nin hızı v_i 'ye bölümünden o vektöre ait yolculuk süresi hesaplanabilir.

$$\begin{aligned}
t_{WLAN_i} &= g(\theta_i) \\
&= \frac{\sqrt{r_i^2 + r_{i+1}^2 - 2r_i r_{i+1} \cos \theta_i}}{v_i}
\end{aligned} \tag{3.8}$$

Burada, r_i ve r_{i+1} sırasıyla MT'nin uğradığı P_i ve P_{i+1} noktalarının AP'ye olan uzaklıklarını ifade etmektedir. r_i ve r_{i+1} uzaklıkları RWM kullanılmasından dolayı bilinmeyen parametrelerdir. Eğer MT [47] çalışmasındaki gibi hiç yön değiştirmeden WLAN hücrelerinden çıkıyorsa sadece WLAN hücresinin yarıçapı R 'ye eşittir. Bunun dışında P_i ve P_{i+1} noktalarının WLAN hücreindeki konumuna bağlı olarak R 'den farklı olabilmektedir.

Herhangi bir vektöre ait yolculuk süresi olan T_i 'yi Θ_i açısının PDF'i cinsinden elde etmek için aşağıdaki dönüşüm uygulanır:

$$f(T_i) = \left| \frac{f(\theta_i)}{g'(\theta_i)} \right|_{\theta_i=g^{-1}(T_i)} \tag{3.9}$$

Burada, θ_i , $g(\theta_i)$ fonksiyonun kökü olarak kullanılır ve $g'(\theta_i)$ ise $g(\theta_i)$ 'nin θ_i 'ye göre birinci türevidir.

$$\theta_i = \cos^{-1} \left(\frac{r_i^2 + r_{i+1}^2 - t_{WLAN_i}^2 v_i^2}{2r_i r_{i+1}} \right) \tag{3.10}$$

$$g'(\theta_i) = \frac{r_i r_{i+1} \sin \theta_i}{v \sqrt{r_i^2 + r_{i+1}^2 - 2r_i r_{i+1} \cos \theta_i}} \tag{3.11}$$

Denklem 3.10 ve Denklem 3.11 birleştirilerek,

$$\begin{aligned}
g'(\theta_i) &= \frac{r_i r_{i+1} \sin \left(\cos^{-1} \left(\frac{r_i^2 + r_{i+1}^2 - t_{WLAN_i}^2 v_i^2}{2r_i r_{i+1}} \right) \right)}{v_i \sqrt{r_i^2 + r_{i+1}^2 - 2r_i r_{i+1} \cos \left(\cos^{-1} \left(\frac{r_i^2 + r_{i+1}^2 - t_{WLAN_i}^2 v_i^2}{2r_i r_{i+1}} \right) \right)}} \\
&= \frac{\sqrt{4r_i^2 r_{i+1}^2 - \left(r_i^2 + r_{i+1}^2 - t_{WLAN_i}^2 v_i^2 \right)^2}}{2t_{WLAN_i} v_i^2}
\end{aligned} \tag{3.12}$$

elde edilir. Denklem 3.10'da bulunan θ_i ifadesi Denklem 3.6'da yerine yazıldığında, θ_i 'nin vektöre ait yolculuk süresi, MT hızı ve vektörün başlangıç-bitiş noktalarının AP'ye olan uzaklıkları cinsinden bulunmuş olur.

$$f(\theta_i) = \frac{2\pi - \cos^{-1}\left(\frac{r_i^2 + r_{i+1}^2 - t_{WLAN_i}^2 v_i^2}{2r_i r_{i+1}}\right)}{2\pi^2} \quad (3.13)$$

Daha sonra, Denklem 3.12 ve Denklem 3.13'ten herhangi bir vektöre ait yolculuk süresinin PDF'i $f(T_i)$, Denklem 3.9'daki dönüşüm kullanılarak elde edilir.

$$f(T_i) = \frac{v_i^2 t_{WLAN_i} \left(2\pi - \cos^{-1}\left(\frac{r_i^2 + r_{i+1}^2 - t_{WLAN_i}^2 v_i^2}{2r_i r_{i+1}}\right)\right)}{\pi^2 \sqrt{4r_i^2 r_{i+1}^2 - \left(r_i^2 + r_{i+1}^2 - t_{WLAN_i}^2 v_i^2\right)^2}} \quad (3.14)$$

Son olarak herhangi bir yörünge içerisindeki her bir vektöre ait yolculuk süresine ilişkin PDF $f(T_i)$ bulunduktan sonra, o yörüngeye ait katılım PDF'i $f(T)$, bütün vektörlerin PDF'inin konvolüsyonu alınarak elde edilebilir. Bir yörüngedeki toplam vektör sayısı $N = 1, 2, \dots, \infty$ olmak üzere,

$$f(T) = f(T_1) \otimes f(T_2) \otimes \dots \otimes f(T_{N-1}) \otimes f(T_N) \quad (3.15)$$

bir yörüngedeki toplam yolculuk süresinin PDF'i hesaplanmış olur. Bu PDF ifadesi bir sonraki bölümde anlatılacak olan olasılık hesaplarında kullanılacaktır.

3.3 El Değiştirme Olasılıkları için Eşik Değer Hesabı

Gereksiz el değiştirme ve el değiştirme hatası olasılıklarını kabul edilebilir sınırlarda tutmak için, sırasıyla Th_{u_N} ve Th_{f_N} eşik değerlerinin kestirimi yapılmalıdır. Gereksiz el değiştirme ve el değiştirme hatası bilgileri kullanılarak, el değiştirme işlemi yalnızca MT'nin WLAN içerisindeki yolculuk süresinin belirlenen bu eşik değerleri geçmesi durumunda başlatılmalıdır.

3.3.1 Gereksiz el değiştirme olasılığı için eşik değer hesabı

Bu çalışmada, rastgele hareket modeli altında gereksiz el değiştirme sayısı Th_{u_N} eşik değerinin belirlenmesiyle azaltılmaya çalışılmıştır ve MT'nin yolculuk süresi bu eşik değerinin altında olmamasına dikkat edilmiştir. MT'nin WLAN'e girerken ve çıkarken harcanan el değiştirme süresi sırasıyla τ_A ve τ_D olsun. Eğer herhangi bir yörüngeye ait yolculuk süresi bu el değiştirme sürelerinin toplamından küçükse, gereksiz el değiştirme gerçekleşir. Çünkü MT el değiştirme tamamlanana kadar, WLAN'den

çıkması olacaktır. Gereksiz el değiştirme olasılığı P_u , Denklem 3.15'te elde edilen yolculuk süresine ait PDF'in belirlenen aralıkta integralinin alınmasıyla hesaplanır.

$$P_u = P_r [Th_{u_N} < T \leq \tau_T] = \int_{Th_{u_N}}^{\tau_T} f(T) dt_{WLAN_i} \quad (3.16)$$

Burada el değiştirmenin başlayıp bitmesi esnasındaki toplam süre $\tau_T = \tau_A + \tau_D$ şeklinde ifade edilir. Buna göre N adet vektörden oluşan bir yörünge için gereksiz el değiştirme olasılığı P_u aşağıdaki gibi elde edilir.

$$P_u = \Pr [Th_{u_N} < T \leq \tau_T] = \int_{Th_{u_N}}^{\tau_T} f(T) dt \quad (3.17)$$

Burada, $\tau_T = \tau_A + \tau_D$ şeklindedir. Gereksiz el değiştirme olasılığı P_u yukarıda verilen integralin τ_T ve Th_{u_N} aralığındaki çözümü ile aşağıdaki gibi gösterilir.

$$\begin{aligned} P_u = & \left\{ \frac{\left[4\pi - \cos^{-1} \left(\frac{r_1^2 + r_2^2 - \tau_T^2 v_1^2}{2r_1 r_2} \right) \right] \cos^{-1} \left(\frac{r_1^2 + r_2^2 - \tau_T^2 v_1^2}{2r_1 r_2} \right)}{4\pi^2} \right. \\ & \left. - \frac{\left[4\pi - \cos^{-1} \left(\frac{r_1^2 + r_2^2 - Th_{u_N}^2 v_1^2}{2r_1 r_2} \right) \right] \cos^{-1} \left(\frac{r_1^2 + r_2^2 - Th_{u_N}^2 v_1^2}{2r_1 r_2} \right)}{4\pi^2} \right\} \\ & \times \left\{ \frac{\left[4\pi - \cos^{-1} \left(\frac{r_2^2 + r_3^2 - \tau_T^2 v_2^2}{2r_2 r_3} \right) \right] \cos^{-1} \left(\frac{r_2^2 + r_3^2 - \tau_T^2 v_2^2}{2r_2 r_3} \right)}{4\pi^2} \right. \\ & \left. - \frac{\left[4\pi - \cos^{-1} \left(\frac{r_2^2 + r_3^2 - Th_{u_N}^2 v_2^2}{2r_2 r_3} \right) \right] \cos^{-1} \left(\frac{r_2^2 + r_3^2 - Th_{u_N}^2 v_2^2}{2r_2 r_3} \right)}{4\pi^2} \right\} \\ & \times \dots \times \left\{ \frac{\left[4\pi - \cos^{-1} \left(\frac{r_{N-1}^2 + r_N^2 - \tau_T^2 v_N^2}{2r_{N-1} r_N} \right) \right] \cos^{-1} \left(\frac{r_{N-1}^2 + r_N^2 - \tau_T^2 v_N^2}{2r_{N-1} r_N} \right)}{4\pi^2} \right. \\ & \left. - \frac{\left[4\pi - \cos^{-1} \left(\frac{r_{N-1}^2 + r_N^2 - Th_{u_N}^2 v_N^2}{2r_{N-1} r_N} \right) \right] \cos^{-1} \left(\frac{r_{N-1}^2 + r_N^2 - Th_{u_N}^2 v_N^2}{2r_{N-1} r_N} \right)}{4\pi^2} \right\} \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$N = 1, 2, \dots, \infty$$

Örneğin $N = 1$ için;

$$\begin{aligned} z_1 &= \cos^{-1} \left(\frac{r_1^2 + r_2^2 - \tau_T^2 v_1^2}{2r_1 r_2} \right) \\ p_1 &= \pi \pm \sqrt{4\pi^2 (1 + P_u) - 2\pi z_1 + z_1^2} \end{aligned} \quad (3.19)$$

olsun. Buna göre bir adet vektörden oluşan bir yörüngeye ait yolculuk süresine ilişkin eşik değer Th_{u_1} ; toplam el değiştirme gecikmesi, MT'nin hızı, P_1 ve P_2 noktalarının AP'ye olan uzaklıkları ve kabul edilebilir gereksiz el değiştirme olasılığı parametrelerine bağlı bir fonksiyon olarak ifade edilebilir.

$$Th_{u_1} = \frac{\sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos p_1}}{v_1} \quad (3.20)$$

Bu şekilde yukarıdaki denklemler çözülerek N adet vektöre sahip bir yörüngeye ait yolculuk süresi T , Th_{u_N} eşik değeri ile karşılaştırılarak, gereksiz el değiştirmenin olup olmadığının kestirimi yapılabilmektedir.

3.3.2 El değiştirme hatasının olasılığı için eşik değer hesabı

El değiştirme hatası, WLAN hücrelerine geçiş yapılırken geçen el değiştirme süresi τ_A 'nın, MT'nin toplam yolculuk süresinden büyük olduğu zaman gerçekleşir. Bu süre için bir Th_{f_N} eşik değeri belirlenerek, bu hata kabul edilebilir bir seviyede tutulur.

$$P_f = \Pr [Th_{f_N} < T \leq \tau_A] = \int_{Th_{f_N}}^{\tau_A} f(T) dt \quad (3.21)$$

Benzer şekilde, $f(T)$ belirtilen aralıklar için integrali alındığında el değiştirme hatası P_f , aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned}
P_f = & \left\{ \frac{\left[4\pi - \cos^{-1} \left(\frac{r_1^2 + r_2^2 - \tau_A^2 v_1^2}{2r_1 r_2} \right) \right] \cos^{-1} \left(\frac{r_1^2 + r_2^2 - \tau_A^2 v_1^2}{2r_1 r_2} \right)}{4\pi^2} \right. \\
& - \frac{\left[4\pi - \cos^{-1} \left(\frac{r_1^2 + r_2^2 - Th_{f_N}^2 v_1^2}{2r_1 r_2} \right) \right] \cos^{-1} \left(\frac{r_1^2 + r_2^2 - Th_{f_N}^2 v_1^2}{2r_1 r_2} \right)}{4\pi^2} \left. \right\} \\
& \times \left\{ \frac{\left[4\pi - \cos^{-1} \left(\frac{r_2^2 + r_3^2 - \tau_A^2 v_2^2}{2r_2 r_3} \right) \right] \cos^{-1} \left(\frac{r_2^2 + r_3^2 - \tau_A^2 v_2^2}{2r_2 r_3} \right)}{4\pi^2} \right. \\
& - \frac{\left[4\pi - \cos^{-1} \left(\frac{r_2^2 + r_3^2 - Th_{f_N}^2 v_2^2}{2r_2 r_3} \right) \right] \cos^{-1} \left(\frac{r_2^2 + r_3^2 - Th_{f_N}^2 v_2^2}{2r_2 r_3} \right)}{4\pi^2} \left. \right\} \\
& \times \dots \times \left\{ \frac{\left[4\pi - \cos^{-1} \left(\frac{r_{N-1}^2 + r_N^2 - \tau_A^2 v_N^2}{2r_{N-1} r_N} \right) \right] \cos^{-1} \left(\frac{r_{N-1}^2 + r_N^2 - \tau_A^2 v_N^2}{2r_{N-1} r_N} \right)}{4\pi^2} \right. \\
& - \frac{\left[4\pi - \cos^{-1} \left(\frac{r_{N-1}^2 + r_N^2 - Th_{f_N}^2 v_N^2}{2r_{N-1} r_N} \right) \right] \cos^{-1} \left(\frac{r_{N-1}^2 + r_N^2 - Th_{f_N}^2 v_N^2}{2r_{N-1} r_N} \right)}{4\pi^2} \left. \right\}
\end{aligned} \tag{3.22}$$

$$N = 1, 2, \dots, \infty$$

Yukarıdaki ifade, tek vektörlü bir yörünge için ($N = 1$) ele alındığında,

$$\begin{aligned}
y_1 &= \cos^{-1} \left(\frac{r_1^2 + r_2^2 - \tau_A^2 v_1^2}{2r_1 r_2} \right) \\
q_1 &= \pi \pm \sqrt{4\pi^2 (1 + P_f) - 2\pi y_1 + y_1^2}
\end{aligned} \tag{3.23}$$

kabul edilsin. Buna göre gereksiz el değıştirmenin kestiriminde olduğu gibi, bir adet vektörden oluşan bir yörüngeye ait yolculuk süresine ilişkin eşik değeri Th_{f_1} ; WLAN hücresine girerken yaşanan el değıştirme gecikmesi, MT'nin hızı, P_1 ve P_2 noktalarının AP'ye olan uzaklıkları ve kabul edilebilir el değıştirme hatasının olasılığı parametrelerine bağımlı bir fonksiyon olarak ifade edilebilir.

$$Th_{f_1} = \frac{\sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos q_1}}{v_1} \tag{3.24}$$

Bu şekilde N adet vektörlere sahip MT yörüngeleri için de eşik değeri bulunarak, el değiştirme hatası kontrol edilebilir.

4. BENZETİM SONUÇLARI

Bu bölümde önerilen HNE algoritmalarının RWM altındaki benzetim sonuçları sunulmuştur. Bu sonuçlar MATLAB ile daha keskin performans gözlemleyebilmek için 10,000 yinelemeli Monte-Carlo yöntemiyle elde edilmiştir ve yörünge içerisindeki vektör sayıları $N = 1$, $N = 2$ ve $N = 3$ için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Burada $N = 1$ durumu için, [47]'deki çalışma söz konusu olup, RWM etkisini incelemek için diğer $N = 2$ ve $N = 3$ durumları dahil edilmiştir.

HNE sürecinde kullanılan parametreler Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

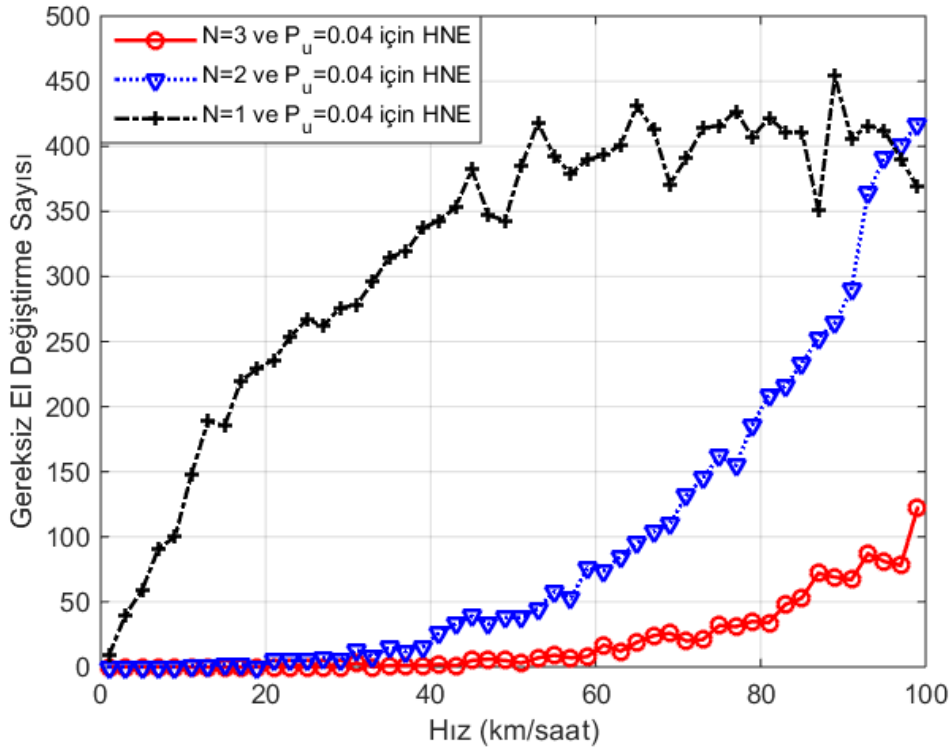
Çizelge 4.1 : HNE performansının değerlendirilmesinde kullanılan parametreler.

Parametre	Sembol	Değer
WLAN yarıçapı	R	150 m
AP iletim gücü	P_{Tx}	20 dBm
AP ile referans notası arasındaki uzaklık	d_{ref}	1 m
Referans noktasındaki yol kaybı	PL_{ref}	40 dB
Yol kaybı katsayısı	β	3.5
Gölgeleme etkisinin standart sapması	α	4.3 dB
Hücresel ağdan WLAN'a geçişteki el değiştirme gecikmesi	τ_A	2 sn
WLAN'dan hücresele ağa geçişteki el değiştirme gecikmesi	τ_D	2 sn
Kabul edilebilir el değiştirme hatası olasılığı	P_f	0.02
Kabul edilebilir gereksiz el değiştirme olasılığı	P_u	0.04

Performans metrikleri olarak gereksiz el değiştirme sayısı, el değiştirme hatası sayısı ve toplam el değiştirme sayısı kullanılmıştır. Ayrıca sonuçların daha iyi anlaşılabilmesi için gereksiz el değiştirme sayısı ve el değiştirme hatası sayısının toplam el değiştirme sayısına oranları da verilmiştir. Bu metriklerin, MT'nin WLAN içerisindeki hızının 1 km/saat ile 100 km/saat aralığında 2 km/saat 'lik artışları karşısındaki sonuçları farklı N değerleri için karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

4.1 Gereksiz El Değiştirme Sayısının Benzetimi

Gereksiz el değiştirme sayısının, artan MT hızlarına karşı performansı Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Farklı N değerlerinin hepsinde kabul edilebilir gereksiz el değiştirme

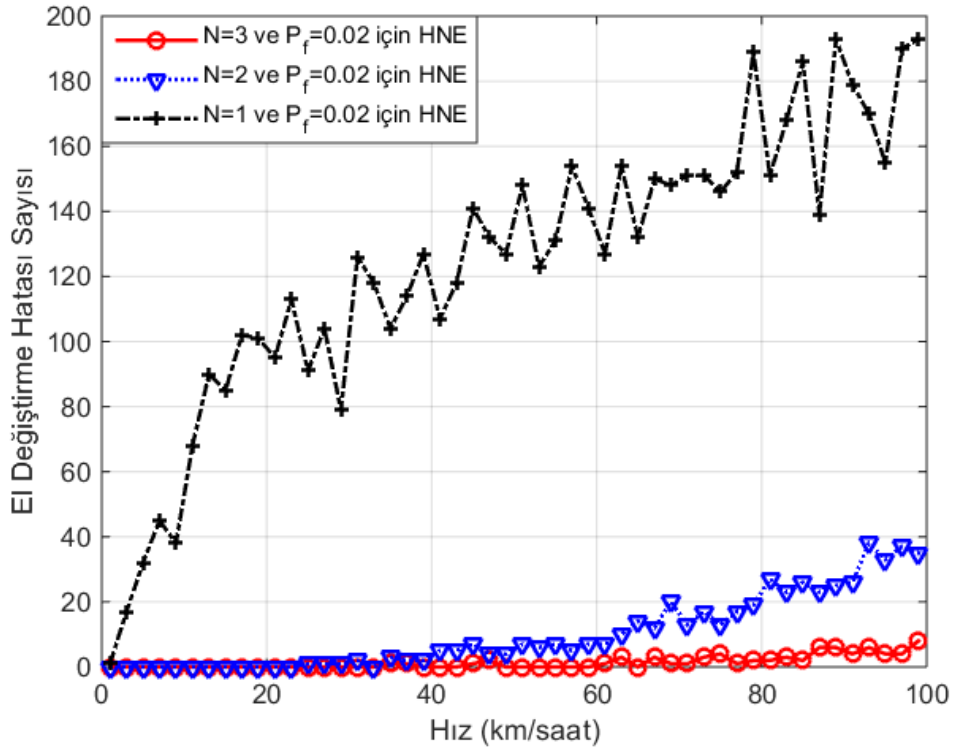


Şekil 4.1 : Gereksiz el değiştirme sayısının farklı N değerleri için MT hızı karşısındaki değişimi.

olasılığı $P_u = 0.04$ olarak belirlenmiştir. Şekilde de görüleceği üzere, $N = 1$ iken gereksiz el değiştirme sayısı diğer iki duruma göre oldukça fazla çıkmıştır. Bunun sebebi olarak, WLAN içerisinde yön değiştirme arttıkça WLAN hücresi içerisinde geçirilen süre de artacağı için el değiştirme gerekli hale gelmektedir.

Örneğin, $N = 1$ iken MT yüksek hızla WLAN hücresinin kapsama alanına herhangi bir noktadan girsin ve kısa bir süre sonra yine herhangi bir noktadan çıkış yapsın. Bu geçişler için harcanan el değiştirme süresi, MT'nin WLAN içerisinde kaldığı süreden fazla olduğu durumda MT'nin WLAN'e bağlanması gerekmez. Çünkü hücresel ağdan WLAN'e, sonra tekrar WLAN'den hücresel ağa geçene kadar, el değiştirme tamamlanamayacağı için en baştan mevcut bulunduğu ağdan ayrılmamalıdır.

Öte yandan N 'nin birden büyük olduğu durumlarda, MT'nin WLAN içerisinde yön değiştireceği ve bir sonraki vektörle WLAN içerisinde devam edeceği için el değiştirmenin gerekliliği de artacaktır.

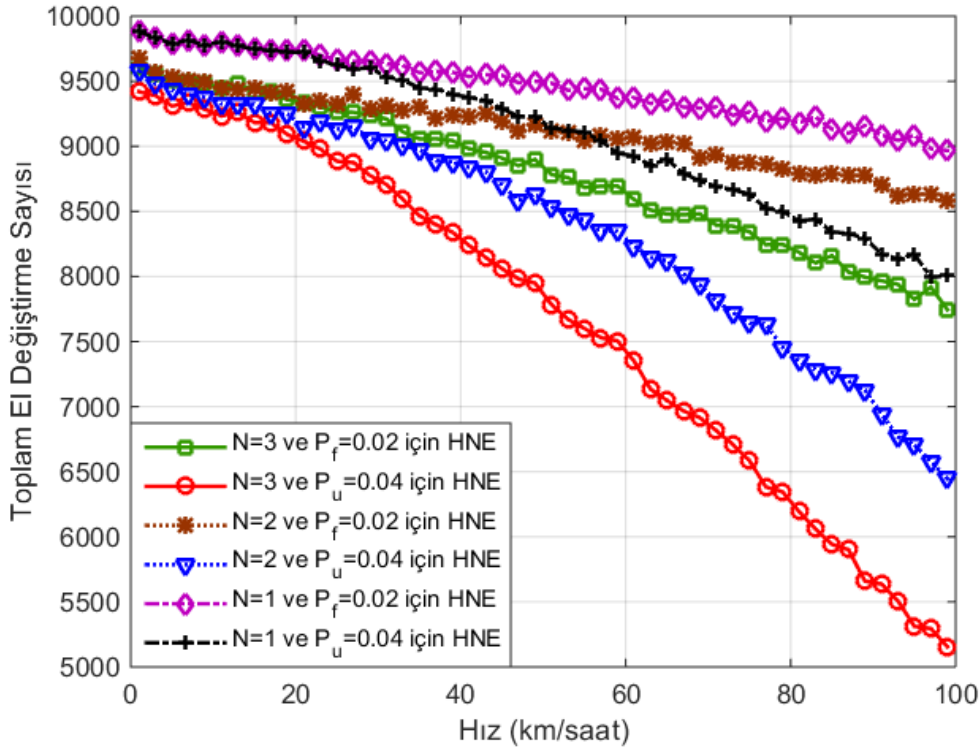


Şekil 4.2 : El değiştirme hatası sayısının farklı N değerleri için MT hızı karşısındaki değişimi.

Her N değeri için yapılan 10,000 yinelemeye göre Şekil 4.1'den de anlaşılabileceği gibi, bir yörünge içerisindeki yön değiştirmeleri temsil eden vektör sayısı N arttıkça gereksiz el değiştirme sayısı da gittikçe azalacaktır.

4.2 El Değiştirme Hatası Sayısının Benzetimi

Gereksiz el değiştirme sayısına benzer şekilde, burada da artan MT hızlarına karşı el değiştirme hatası performansı Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Farklı N değerlerinin hepsinde kabul edilebilir el değiştirme hatası olasılığı $P_f = 0.02$ olarak belirlenmiştir. Şekilde de görüleceği üzere, $N = 1$ iken el değiştirme hatası sayısı diğer iki duruma göre yüksektir. Bunun sebebi olarak, WLAN içerisinde yön değiştirme sayısı yani N 'nin birden fazla olduğu durumlarda, bir sonraki hareket vektöründe de WLAN içerisinde olacağı için hücrel ağdan WLAN ilk geçiş için gereken el değiştirme süresi yeterli olacak ve WLAN ağına yapılan el değiştirme başarılı bir şekilde tamamlanacaktır.



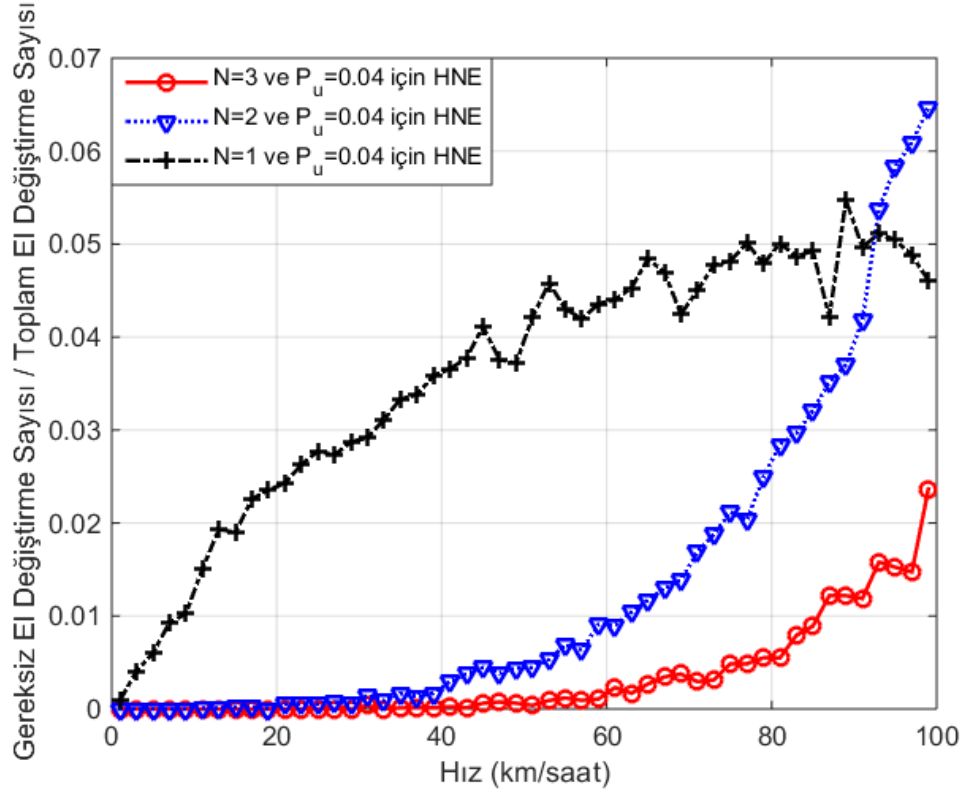
Şekil 4.3 : Toplam el değiştirme sayısının farklı N değerleri için MT hızı karşısındaki değişimi.

Örneğin, $N = 3$ iken el değiştirme hatası sayısı, Şekil 4.2’den görülebileceği üzere 10,000 yinelemenin sonunda yalnızca sıfır ile on arasında değişmektedir. Bu da göstermektedir ki artan N değerleri için bu sonuç sıfıra yakınsayacaktır.

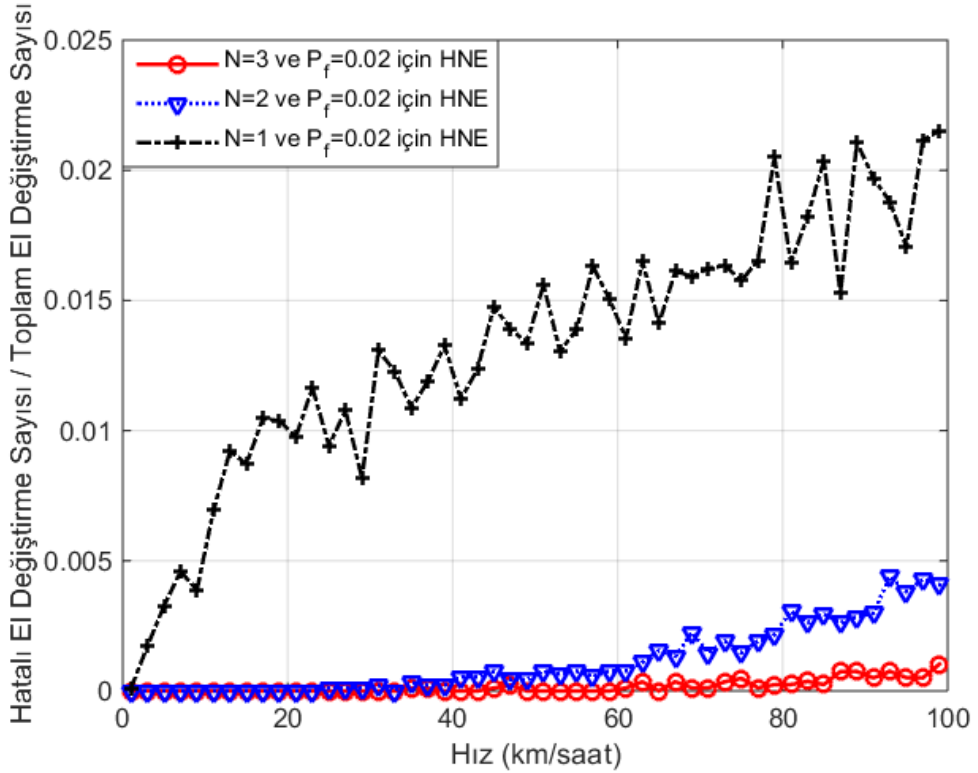
4.3 Toplam El Değiştirme Sayısının Benzetimi

Toplam el değiştirme sayısı, WLAN hücresi içerisindeki MT hızı karşısındaki değişimi Şekil 4.3’te sunulmuştur. Rastgele hareket eden MT, WLAN içerisinde çok sayıda yön değiştirme yaşadığı için, giriş-çıkış sayısı da artan N için azalacaktır. Üç farklı N değeri için hem $P_u = 0.04$ hem de $P_f = 0.02$ olarak kabul edildiği durumdaki toplam el değiştirme sayıları Şekil 4.3’te karşılaştırılmıştır.

Elde edilen sonuçların daha iyi anlaşılabilmesi için gereksiz el değiştirme ve el değiştirme hatası sayılarının, toplam el değiştirme sayısına oranı sırasıyla Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’te gösterilmiştir. Şekillerden de görüleceği üzere, toplam gerçekleştirilen el değiştirme sayısı içerisindeki gereksiz el değiştirme ve el değiştirme hataları oldukça düşük ve çoklu N değerleri için azalmaktadır.



Şekil 4.4 : Gereksiz el değiştirme sayısının toplam el değiştirme sayısına oranının farklı N değerleri için MT hızı karşısındaki değişimi.



Şekil 4.5 : El değiştirme hatası sayısının toplam el değiştirme sayısına oranının farklı N değerleri için MT hızı karşısındaki değişimi.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

4G ağlardaki el değiştirme yöntemleri ve mevcut VHD algoritmaları Bölüm 2’de detaylı olarak tanıtılmıştır. Burada belirtilen VHD kriterleri ve performans metrikleri belirlenmiştir. Ayrıca literatürdeki VHD algoritmaları sınıflandırılıp karşılaştırılarak mevcut sistemlerdeki eksiklikler ve buna ilişkin geliştirmeler tespit edilmiştir.

Önerilen algoritmadaki kullanılan senaryo, yolculuk süresinin kestirimi ve el değiştirme olasılıkları için eşik değerler Bölüm 3’te anlatılmış ve bunların matematiksel çıkarımları verilmiştir. Buna göre sunulan rastgele hareket eden bir MT için HNE algoritmasının performansı incelenmiştir. HNE süreci için değerlendirme faktörü olan gereksiz el değiştirme ve el değiştirme hatası olasılıklarının hangi durumlarda gerçekleştiği ve bunu önlemek için iki olasılık ifadesi için de eşik değerler MT’nin rastgele hareket modeli altında ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Çıkarılan bu matematiksel analizlere göre Bölüm 4’te benzetim sonuçlarına yer verilmiştir. Kullanılan senaryo ve alınan varsayımlara göre, kabul edilebilir bir olasılık değeri için bir yörüngedeki vektör sayısı ve MT’nin hızının artışına karşılık düşen gereksiz el değiştirme, el değiştirme hatası ve toplam el değiştirme sayıları grafiklerde karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir. Buna göre bir hücreli ağ ve WLAN ağından oluşan bir heterojen ortam içerisinde mobil kullanıcının rastgele hareketinin etkisi gözlemlenmiştir. Tez çalışmasında sıklıkla kullanılan [47]’deki gibi doğrusal bir hareketliliğe karşın bir rastgele hareket modeli geliştirilmiş ve sonuçları verilmiştir.

Bu çalışmadaki, gölgeleme etkisinin yanı sıra, ileride ağ kapsama alanlarındaki sönmeme etkisi de ele alınarak daha gerçekçi bir ağ ortamı oluşturulabilir. Ayrıca, birden fazla WLAN ve WiMAX ağlarının da katılımıyla mobil kullanıcılar için daha iyi bir deneyim sunulabilir. Bunun için daha üst düzey araştırmalar gerçek test ortamlarında üretilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Akyildiz, I. F., X.J. ve Mohanty, S.** (2004). A survey of mobility management in next-generation all-IP-based wireless systems, *II*(4), 16–28.
- [2] **Ceken, C., Y.S. ve H., A.** (2010). Interference aware vertical handoff decision algorithm for quality of service support in wireless heterogeneous networks, *Computer Networks*, 54(5), 726–740.
- [3] **Dekleva, S., S.J.V.U. ve G., K.** (2007). Evolution and emerging issues in mobile wireless networks, *Communications of the ACM*, 50(6), 38–43.
- [4] **Nguyen-Vuong, Q.-T., A.N. ve Y., G.D.** (2007). Terminal-controlled mobility management in heterogeneous wireless networks, *IEEE Communications Magazine*, 45(4), 122–129.
- [5] **Ghaderi, M. ve Boutaba, R.** (2006). Call admission control in mobile cellular networks: a comprehensive survey: Research articles, *Wireless Communications and Mobile Computing*, 6(1), 69–93.
- [6] **Zahariadis, T. ve Kazakos, D.** (2003). (R)evolution toward 4G mobile communication systems, *IEEE Wireless Communications*, 10(4), 6–7.
- [7] **Hui, S.Y. ve Yeung, K.H.** (2003). Challenges in the migration to 4G mobile systems, *IEEE Communications Magazine*, 41(12), 54–59.
- [8] **Varshney, U. ve Jain, R.** (2001). Issues in emerging 4G wireless networks, *Computer*, 34(6), 94–96.
- [9] **Deng, D.J. ve Yen, H.C.** (2005). Quality-of-Service provisioning system for multimedia transmission in IEEE 802.11 wireless LANs, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23(6), 1240–1252.
- [10] **Wang, F., G.A.S.C.F.P.J.F.H.F. ve J., B.S.** (2008). Mobile wimax systems: performance and evolution., *IEEE Communications Magazine*, 46(10), 41–49.
- [11] **Beakley, G.W.** (1984). Overview of commercial satellite communications, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 20(4), 455–464.
- [12] **Sairam, N.G.S. ve Redd, R.** (2002). Bluetooth in wireless communication, *IEEE Communications Magazine*, 40(6), 90–96.
- [13] **Mohr, W. ve Jain, K.W.** (2000). Access network evolution beyond third generation mobile communications, *IEEE Wireless Communications Magazine*, 38(12), 122–133.

- [14] **Taniuchi, K., Y.M. ve Famolari, D.** (2009). IEEE 802.21: Media independent handover: Features, applicability, and realization, *IEEE Communications Magazine*, 47(1), 112–120.
- [15] **Young, W.R.** (1979). Advanced mobile phone service: introduction, background, and objectives, *Bell System Technical Journal*, 34(6), 94–96.
- [16] **Tacikawa, K.**, (2002). W-CDMA: Mobile Communications System, Wiley, New York.
- [17] **Goldsmith, A.**, (2005). Wireless Communications, Cambridge University Press, New York.
- [18] **Davies, A. ve Brady, T.** (1998). Policies for a complex product system, *Futures*, 30(4), 293–304.
- [19] **Adachi, F.** (2001). Wireless past and future - evolving mobile communications systems, *IEICE Trans. Fundamentals*, 84(1), 54–60.
- [20] **Mishra, A.R.**, (2004). Fundamentals of cellular network planning and optimisation: 2G/2.5G/3G... Evolution to 4G, Wiley, West Sussex.
- [21] **Callendar, M.H.** (1997). International mobile telecommunications-2000 standards efforts of the ITU, *IEEE Personal Communications*, 4(4), 6–7.
- [22] **Knisely, D. N., L.Q. ve Ramesh, N.** (2002). CDMA2000: A third-generation radio transmission technology, *Bell Labs Technical Journal*, 3(3), 63–78.
- [23] **Richardson, K.** (2000). Advanced mobile phone service: introduction, background, and objectives, *Bell System Technical Journal*, 12(3), 93–100.
- [24] **Schuz, J., B.E.B.G.S.B.H.I.S.K.W.J.K.K. ve Blettner, M.** (2006). Cellular phones, cordless phones, and the risks of glioma and meningioma (interphone study group, germany), *American Journal of Epidemiology Advance Access*, 163(6), 512–520.
- [25] **Lee, C. W., C.M.C.M.C. ve Sun, Y.S.** (2005). A framework of handoffs in wireless overlay networks based on mobile IPv6., *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23(11), 2118–2128.
- [26] **Dahlman, E., P.S.S.J. ve Beming, P.**, (2008). 3G Evolution, Second Edition: HSPA and LTE for Mobile Broadband, Academic Press.
- [27] **Williams, F.** (1999). Fourth generation mobile, *In Proceedings of the 4th ACTS Mobile Communications Summit 1999 (AMOS'99)*.
- [28] **Pereira, J.M.** (2000). Fourth generation: now, it is personal!, *In Proceedings of the IEEE 11th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'2000)*.
- [29] **Sun, J.-Z., S.J. ve Howie, D.** (2001). Features in future: 4G visions from a technical perspective, *In Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM'01*.

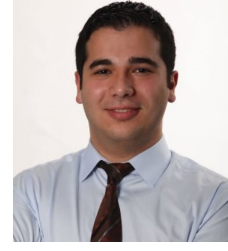
- [30] **Miki, T., O.T.Y.H. ve Umeda, N.** (2005). The overview of the 4th generation mobile communication system, *In Proceedings of the Fifth International Conference on Information, Communications and Signal Processing (ICICS 2005)*.
- [31] **Choi, Y.-J., L.K.B. ve Bahk, S.** (2007). All-IP 4G network architecture for efficient mobility and resource management, *IEEE Wireless Communications*, 14(2), 42–46.
- [32] **Gazis, V., A.N. ve L., M.** (2005). Toward a generic “always best connected” capability in integrated WLAN/UMTS cellular mobile networks (and beyond), *IEEE Wireless Communications*, 12(3), 20–29.
- [33] **Patel, G. ve Dennett, S.** (2002). The 3GPP and 3GPP2 movements toward an all-IP mobile network, *IEEE Personal Communications*, 7(4), 62–64.
- [34] **BRAIN, I...**, (2001), BRAIN architecture specifications and models, BRAIN functionality and protocol specification.
- [35] **Wu, G., M.M. ve Havinga, P.** (2002). MIRAI architecture for heterogeneous network, *IEEE Communications Magazine*, 40(2), 126–134.
- [36] **Benmimoune, A. ve Kadoch, M.** (2010). Vertical handoff between UMTS and WLAN, *In Proceedings of the 4th international conference on Communications and information technology (CIT'10)*, 131–140.
- [37] **Niyato, D. ve Hossain, E.** (2005). Call admission control for QoS provisioning in 4G wireless networks: issues and approaches, *IEEE Network*, 19(5), 5–11.
- [38] **Park, Y. ve Park, T.** (2007). A survey of security threats on 4G networks, *In Proceedings of the 2007 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'07)*l.
- [39] **Al-Muhtadi, J., M.D. ve Campbell, R.** (2002). A lightweight reconfigurable security mechanism for 3G/4G mobile devices, *IEEE Wireless Communications*, 9(2), 60–65.
- [40] **Telatar, E.** (1999). Capacity of multi-antenna Gaussian channels, *Bell System Technical Journal*, 10(6), 585–595.
- [41] **Sampath, H., T.S.T.J.E.V. ve A., P.** (2002). A fourth-generation MIMO-OFDM broadband wireless system: design, performance, and field trial results, *IEEE Communications Magazine*, 40(9), 143–149.
- [42] **Ajib, W. ve Haccoun, D.** (2005). An overview of scheduling algorithms in MIMO-based fourth-generation wireless systems, *Bell System Technical Journal*, 19(5), 43–48.
- [43] **Ghys, F. ve Vaaraniemi, A.** (2003). Component-based charging in a next-generation multimedia network, *IEEE Communications Magazine*, 41(1), 99–102.

- [44] **M., K. ve Kaloxyllos, A.** (1979). A holistic solution for charging, billing and accounting in 4G mobile systems, *In Proceedings of the 59rd Vehicular Technology Conference (VTC'04 - Spring)*.
- [45] **De La Oliva, A., B.A.S.I.M.T. ve A., V.** (2008). An overview of IEEE 802.21: media-independent handover services, *IEEE Wireless Communications*, 15(4), 96–103.
- [46] **Chen, W.T. ve Shu, Y.Y.** (2005). Active application oriented vertical handoff in next-generation wireless networks, *In Proceedings of the 2005 IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC'05)*, 1383–1388.
- [47] **Yan, X.** (2010). Optimization of Vertical Handover Decision Processes for Fourth Generation Heterogeneous Wireless Networks, *Doktora Tezi*, <http://ctie.monash.edu>.
- [48] **Akyildiz, I. F., M.J.H.J.S.M.U.H. ve Wang, W.** (1999). Mobility management in next-generation wireless systems, *Proceedings of the IEEE*, 87(8), 1374–1384.
- [49] **Nasser, N., H.A. ve H., H.** (2006). Handoffs in fourth generation heterogeneous networks, *IEEE Communications Magazine*, 44(10), 96–103.
- [50] **Zhu, F. ve McNair, J.** (2006). Multiservice vertical handoff decision algorithms, *URASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 52(2).
- [51] **Siddiqui, F. ve Zeadally, S.** (2006). Mobility management across hybrid wireless networks: Trends and challenges, *Computer Communications*, 29(9), 1363–1385.
- [52] **Akyildiz, I.F. ve Wang, W.** (2002). A dynamic location management scheme for next-generation multitier PCS systems, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 1(1), 178–189.
- [53] **Chen, W.-T., L.J.C. ve Huang, H.K.** (2004). An adaptive scheme for vertical handoff in wireless overlay networks, *In Proceedings of the Tenth International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS'04)*.
- [54] **Zhu, F. ve McNair, J.** (2004). Optimizations for vertical handoff decision algorithms, *In Proceedings of the 2004 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'04)*, 867–872.
- [55] **H., Z.A. ve B., L.** (2005). Performance evaluation framework for vertical handoff algorithms in heterogeneous networks, *In Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Communications (ICC'05)*, 173–1178.
- [56] **Stevens-Navarro, E. ve Wong, V.W.S.** (2006). Comparison between vertical handoff decision algorithms for heterogeneous wireless networks, *In Proceedings of the 63rd Vehicular Technology Conference (VTC'06 - Spring)*, 947–951.

- [57] **McNair, J. ve Zhu, F.** (2004). Vertical handoffs in fourth-generation multinetwork environments, *IEEE Wireless Communications*, 11(3), 8–15.
- [58] **Kassar, M., K.B. ve Pujolle, G.** (2008). An overview of vertical handover decision strategies in heterogeneous wireless networks, *Computer Communications*, 31(10), 2607–2620.
- [59] **Lin, T., W.C. ve Lin, P.C.** (2008). A neural network-based context-aware handoff algorithm for multimedia computing, *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Application*, 4(3), 1–23.
- [60] **Zahran, A. H., L.B. ve Saleh, A.** (2006). Signal threshold adaptation for vertical handoff in heterogeneous wireless networks, *Mobile Networks and Applications*, 11(4), 625–640.
- [61] **Mohanty, S. ve Akyildiz, I.F.** (2006). A cross-layer (layer 2 + 3) handover management protocol for next-generation wireless systems, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 5(1), 1347–1360.
- [62] **Yan, X., M.N. ve Sekercioglu, Y.A.** (2008). A traveling distance prediction based method to minimize unnecessary handovers from cellular networks to WLANs, *IEEE Communications Letters*, 12(1), 14–16.
- [63] **Pollini, G.P.** (1996). Trends in handover design, *IEEE Communications Magazine*, 34(3), 82–90.
- [64] **Yang, K., G.I.Q.B. ve Dooley, L.S.** Combined SINR based vertical handoff algorithm for next generation heterogeneous wireless networks, *In Proceedings of the 2007 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'07)*, s.4483–4487.
- [65] **Guo, C., G.Z.Z.Q. ve Zhu, W.** (2004). A seamless and proactive end-to-end mobility solution for roaming across heterogeneous wireless networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 22(5), 834–848.
- [66] **Hasswa, A., N.N. ve Hassanein, H.** (2006). Tramcar: A contextaware cross-layer architecture for next generation heterogeneous wireless networks, *In Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Communications (ICC'06)*, 240–245.
- [67] **Tawil, R., G.P. ve Salazar, O.** (2008). A vertical handoff decision scheme in heterogeneous wireless systems, *n Proceedings of the 67th Vehicular Technology Conference (VTC'08 - Spring)*, 2626–2630.
- [68] **Zhang, W.** (2004). Handover decision using fuzzy MADM in heterogeneous networks, *In Proceedings of the 2004 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'04)*, 653–658.
- [69] **L. Xia, L.G.J. ve He, C.** (2007). A novel fuzzy logic vertical handoff algorithm with aid of differential prediction and pre-decision method, *In Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Communications (ICC'07)*, 5665–5670.

- [70] **Hou, J. ve O'Brien, D.C.** (2006). Vertical handover-decision-making algorithm using fuzzy logic for the integrated radio-and-OW system, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 5(1), 176–185.
- [71] **H. Liao, L.T. ve Du, Z.** (2006). A vertical handover decision algorithm based on fuzzy control theory, *In Proceedings of the First International Multi-Symposiums on Computer and Computational Sciences (IMSCCS'06)*, 309–313.
- [72] **Q. Guo, J.Z. ve Xu, X.** (2005). An adaptive multi-criteria vertical handoff decision algorithm for radio heterogeneous network, *In Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Communications (ICC'05)*, 2769–2773.
- [73] **N. Nasser, S.G. ve Al-Masri, E.** (2007). Middleware vertical handoff manager: A neural network-based solution, *In Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Communications (ICC'07)*, 5671–5676.
- [74] **Khafa, A.E. ve Tonguz, O.K.** (2004). Dynamic priority queueing of handover calls in wireless networks: an analytical framework, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 22(5), 904–916.
- [75] **Barcelo, F.** (2004). Performance analysis of handoff resource allocation strategies through the state-dependent rejection scheme, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 3(3), 900–909.
- [76] **M. Liu, Z.-C. Li, X.B.G. ve Lach, H.Y.** (2006). Design and evaluation of vertical handoff decision algorithm in heterogeneous wireless networks, *In Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Networks (ICON'06)*, 1–6.
- [77] **Chang, B.J. ve Chen, J.F.** (2008). Cross-layer-based adaptive vertical handoff with predictive RSS in heterogeneous wireless networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 57(6), 3679–3692.
- [78] **J. Nie, J. Wen, Q.D. ve Zhou, Z.** (2005). A seamless handoff in IEEE 802.16a and IEEE 802.11n hybrid networks, *In Proceedings of the 2005 International Conference on Communications, Circuits and Systems (ICCCAS'05)*, 383–387.
- [79] **Balasubramaniam, S. ve Indulska, J.** (2004). Vertical handover supporting pervasive computing in future wireless networks, *Computer Communications*, 27(8), 708–719.
- [80] **E. Stevens-Navarro, Y.L. ve Wong, V.W.S.** (2008). An MDP-based vertical handoff decision algorithm for heterogeneous wireless networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 52(2), 1243–1254.
- [81] **Stuber, G.L.**, (2001). Principles of Mobile Communication, Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Utku ÖZMAT
Doğum Tarihi ve Yeri : 01.03.1990, Zile
E-Posta : utku.ozmat@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2016, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı, Telekomünikasyon Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- **2013-2015** : Araştırma Görevlisi, Gedik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
- **2015-** : Destek Mühendisi, NETAŞ Telekomünikasyon A.Ş.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

▪

DİĞER YAYINLAR SUNUMLAR VE PATENTLER:

▪