İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MOBİL HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE KARIŞTIRICILARIN BOZUCU ETKİSİNİN AZALTILMASI

DOKTORA TEZİ

Aziz Gediz SEZGİN

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Telekomünikasyon Mühendisliği Programı

NİSAN 2019

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MOBİL HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE KARIŞTIRICILARIN BOZUCU ETKİSİNİN AZALTILMASI

DOKTORA TEZİ

Aziz Gediz SEZGİN
(504912024)

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Telekomünikasyon Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Güneş KARABULUT KURT

NİSAN 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504912024 numaralı Doktora Öğrencisi Aziz Gediz SEZGİN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "MOBİL HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE KARIŞTIRICILARIN BOZUCU ETKİSİNİN AZALTILMASI" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Güneş KARABULUT KURT** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Doç. Dr. Ertuğrul BAŞAR** Koç Üniversitesi	.....
	Doç. Dr. Ali Emre PUSANE Boğaziçi Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Murat Tayfun GÜNEL İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Dr. Öğr. Üyesi Tunçer BAYKAŞ Medipol Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : 11 Mart 2019
Savunma Tarihi : 19 Nisan 2019

Eşime ve çocuklarıma,

ÖNSÖZ

Kablosuz haberleşme sistemi kullanıcı sayılarının kablolu haberleşme sistemini kullananların sayılarını geçtiği günümüzde, kullanıcıların ihtiyaçlarını verimli bir şekilde karşılayacak sistemlere gereksinim vardır. Kablosuz haberleşme sistemlerinin gereksinim duyduğu bant genişliği bu ölçüde artmış ve dolayısıyla mevcut kaynağın en verimli bir şekilde kullanılması çok önemli hale gelmiştir. Bu tez çalışmasının temelini oluşturan dördüncü nesil kablosuz haberleşme sistemleri, kullanıcıların temel ihtiyaçları olan daha fazla hız, daha kaliteli iletişim ve daha çok kullanıcıyı istenilir servis kalitesinde destekleme olanağı sağlamayı amaçlamaktadır.

Bu tez çalışmasında dördüncü nesil kablosuz haberleşme sistemlerinde gürültü ve bozucu etkinin sistem performansına olan etkilerini bertaraf edecek donanımsal ve yazılımsal çözüm yöntemleri üzerinde duruldu. Önerilen yöntemler neticesinde kullanıcılara yönelik veri iletim hızı ve kalite metriklerinde klasik şebeke topolojisine göre çok daha iyi sonuçlar elde edildi ve sonuçların gerçek trafik taşıyan saha denemeleri ile de kanıtlanması sağlandı.

Bu çalışmanın her safhasında özveri ile yaklaşan danışmanım Sayın Prof. Dr. Güneş KARABULUT KURT'a (İTÜ), değerli yorumları ile beni yönlendiren ve aynı zamanda tez izleme jürisinde olan hocalarım Sayın Doç. Dr. Ertuğrul BAŞAR'a (Koç Üniversitesi) ve Sayın Doç. Dr. Ali Emre PUSANE'ye (Boğaziçi Üniversitesi), destekleriyle sürekli yanımda olan çalışma arkadaşım Sayın Dr. Mustafa KARAKOÇ'a, değerli yardımlarını esirgemeyen tüm arkadaşlarıma, bu noktaya gelişimde her zaman yanımda olan desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Nisan 2019

Aziz Gediz Sezgin
(Elektronik ve Haberleşme
Yüksek Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
SEMBOLLER ..... **xv**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xvii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xix**
ÖZET ..... **xxi**
SUMMARY ..... **xxiii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Kablosuz Haberleşme Teknolojilerinin Gelişimi 1
1.2 Çalışmanın Amacı 4
1.3 Literatürde Yapılan Çalışmaların Özeti 5
1.4 Tezin Organizasyonu 9
1.5 Yayınlar 10
2. 4. NESİL KABLOSUZ HABERLEŞME TEKNOLOJİSİ MİMARİSİ **13**
2.1 LTE Teknolojisine Genel Bakış 13
2.2 Çoklu Anten Tekniğinin Kullanımı 16
2.3 OFDM Özellikleri 19
2.3.1 Örnekleyici çıkışı 22
2.3.2 DFT çıkışı ve örnekleme sapmaları 23
2.4 Fiziksel Katman Parametreleri 24
2.5 Referans Sinyaller 27
2.5.1 DL referans sinyaller 27
2.5.2 UL referans sinyaller 28
2.6 Fiziksel Kanallar 29
2.6.1 DL fiziksel kanallar 29
2.6.2 UL fiziksel kanallar 32
2.7 Sonuç 34
3. VERİ ANALİZ VE VALİDASYON YÖNTEMİ **35**
3.1 Performans Ölçüm Metodolojisi 35
3.2 Performans İzleme Sistemi 39
3.3 Sonuç 41
4. LTE ŞEBEKE DAYANIKLILIĞININ ÖLÇÜLMESİ **43**
4.1 LTE PHY Kanalları 44
4.1.1 PHY kanalların girişimi ve etkileri 44
4.2 LTE Şebeke Performans Ölçümleri 45
4.3 Harici Sinyal Bozucu Durağan Ortam Saha Ölçümleri 60
4.4 Harici Sinyal Bozucu Mobil Ortam Saha Ölçümleri 69
4.5 Sonuç 75

5. SİNYAL BOZUCU DAYANIKLILIĞINI ARTIRMA YÖNTEMLERİ..... 77
5.1 Donanımsal Çözüm 77
5.1.1 Ma-MIMO anten 77
5.1.2 Sistem konfigürasyon tasarımı ve veri iletim hızı hesabı 80
5.1.3 Test ortamı..... 83
5.1.4 Test sonuçları 84
5.2 Kaynak Tahsisi ile Kanal Mimarisi Düzenleme Çözümü 86
5.2.1 Mevcut sistem mimarisi üzerine çalışmalar 88
5.2.2 Önerilen LTE dinamik kavramsal kanal tahsisi 94
5.3 Sonuç 99
6. SONUÇLAR 101
KAYNAKLAR..... 103

KISALTMALAR

16-QAM : 16-Quadrature Amplitude Modulation (16-sıralı kareli genlik modülasyonu)
256-QAM : 256-Quadrature Amplitude Modulation (256-sıralı kareli genlik modülasyonu)
3GPP : 3rd Generation Partnership Program (Üçüncü nesil ortaklık projesi)
64-QAM : 64-Quadrature Amplitude Modulation (64-sıralı kareli genlik modülasyonu)
ACK : Acknowledgement (Onaylama, tasdik)
ARQ : Automatic Repeat Request (Otomatik tekrar talebi)
AWGN : Additional White Gaussian Noise (Beyaz Gauss gürültüsü eklentisi)
BLER : Block Error Rate (Blok hata oranı)
CA : Carrier Aggregation (Taşıyıcı birleştirme)
CCI : Co-channel Interference (Eş-kanal girişimi)
CCE : Control Channel Element (Kontrol kanal elemanı)
CDF : Cumulative Distribution Function (Birikimli yoğunluk fonksiyonu)
CDMA : Code Division Multiple Access (Kod bölüşümlü çoklu erişim)
CFI : Control Format Indicator (Kontrol format göstergesi)
CI : Control Information (Kontrol verisi)
CP : Cyclic Prefix (Çevrimsel ön ek)
CQI : Channel Quality Indicator (Kanal kalite belirteci)
CTC : Convolutional Turbo Coding (Katlamalı turbo kodlama)
D2D : Device to Device (Cihazlar arası)
DCI : Downlink Control Information (Aşağı yönlü kontrol bilgisi)
DFT : Discrete Fourier Transformation (Ayrık Fourier transformu)
DL : Downlink (Aşağı yönlü)
DMRS : Demodulation Reference Signal (Demodülasyon referans sinyali)
DOS : Deny of Service (Servis engelleme)
DR : Data Records (Veri kayıtları)
EDGE : Enhanced Data Rates for GSM Evolution (GSM evrimi için artırılmış veri hızları)
eNodeB : LTE baz istasyonu
FDD : Frequency Division Suplex (Frekans bölmeli çoğullama)
FTP : File Transfer Protocol (Dosya transfer protokolü)
GPRS : General Packet Radio Service (Genel paket radyo hizmetleri)
GSM : Global System for Mobile Communication (Mobil haberleşme için global sistemler)
HARQ : Hybrid Automatic Repeat Request (Hibrit otomatik tekrar talebi)
IMSI : International Mobile Subscriber Identity (Uluslararası mobil abone kimliği)
IP : Internet Protocol (Internet protokolü)
IRAT : Inter Radio Access Technology (Radyo erişim teknolojileri arası)
ISI : Inter Symbol Interference (Semboller arası girişim)

KPI : Key Performance Indicator (Performans belirteci)
KQI : Key Quality Indicator (Kalite belirteci)
LAC : Location Area Code (Konum alan kodu)
LOS : Line of Sight (Açık görüş)
LTE : Long Term Evolution (Uzun dönemli dönüşüm)
LTE-A : Long Term Evolution-Advanced (Uzun dönemli dönüşüm erişimi)
MCS : Modulation Coding Scheme (Modülasyon kodlama şeması)
MIB : Master Information Block (Ana bilgi bloğu)
MIMO : Multiple Input Multiple Output (Çoklu giriş çoklu çıkış)
MME : Mobility Management Entity (Mobilite yönetim birimi)
Ma-MIMO : Massive Multiple Input Multiple Output (Kitlesel çoklu giriş çoklu çıkış)
MU-MIMO : Multi User Multiple Input Multiple Output (Çok kullanıcılı çoklu giriş çoklu çıkış)
NACK : Not Acknowledgement (Onaylamama, tasdik etmeme)
NE : Network Equipment (Şebeke elemanı)
NLOS : Non Line of Sight (Açık görüş olmayan)
NMT : Nordic Mobile Telecommunication (İskandinav mobil haberleşme)
OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Birbirine dik frekans bölüşümlü çoğullama)
OFDMA : Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access (Birbirine dik frekans bölüşümlü çoğullama erişimi)
PAPR : Peak to Average Power Ratio (Tepe ortalama güç oranı)
PBCH : Physical Broadcast Channel (Fiziksel yayılım kanalı)
PCFICH : Physical Control Format Indicator Channel (Fiziksel kontrol format bilgisi kanalı)
PCI : Physical Cell Identity (Fiziksel hücre kimliği)
PDF : Probability Distribution Function (Olasılık yoğunluk fonksiyonu)
PDU : Packet Data Unit (Paket veri ünitesi)
PDCCH : Physical Downlink Control Channel (Fiziksel DL kontrol kanalı)
PDCP : Packet Data Control Protocol (Paket data kontrol ptotokolü)
PDSCH : Physical Downlink Shared Channel (Fiziksel DL paylaşımlı kanal)
PF : Proportional Fair (Oransal hakkaniyet)
PHICH : Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (Fiziksel hibrit ARQ belirteç kanalı)
PHY : Physical Layer (LTE fiziksel ağ katmanı)
PMI : Precoding Matrix Indicator (Önkodlama matris belirteci)
PMM : Performance Management Module (Performans yönetim modülü)
PMS : Performance Management System (Performans yönetim sistemi)
PRACH : Physical Random Access Channel (Fiziksel rastgele erişim kanalı)
PRS : Pseudo Random Sequence (Psödo rastgele dizi)
PSCH : Primary Synchronisation Channel (Birincil senkronizasyon kanalı)
PUCCH : Physical Uplink Control Channel (Fiziksel UL kontrol kanalı)
PUSCH : Physical Uplink Shared Channel (Fiziksel UL paylaşımlı kanal)
P-GW : Packet Gateway (Paket geçit)
QoS : Quality of Service (Servis kalitesi)
QPSK : Quadrature Phase Shift Keying (Dördün evre kaydırmalı kiplenim)
RB : Resource Block (Kaynak bloğu)
RE : Resource Element (Kaynak elemanı)
REG : Resource Element Group (Kaynak elemanı grubu)

RF : Radio Frequency (Radyo frekans)
RI : Rank Indicator (Sıra belirteci)
RLC : Radio Link Control (Radyo link kontrolü)
RRC : Radio Resource Control (Radyo kaynak kontrol)
RS : Reference Signal (Referans sinyal)
RSRP : Reference Signal Received Power (Referans sinyal alıcı gücü)
RSRQ : Reference Signal Received Quality (Referans sinyal alıcı kalitesi)
Rx : Receiver (Alıcı)
SC-FDMA : Single Carrier-Frequency Division Multiple Access (Tek taşıyıcılı frekans bölüşümlü çoklu erişim)
SFBC : Space Frequency Block Coding (Uzay frekans blok kodlama)
SIB : System Information Block (Sistem bilgi bloğu)
SINR : Signal to Interference Noise Ratio (Sinyal girişim ve gürültü oranı)
SM : Space Multiplexing (Uzaysal çoğullama)
SNMP : Simple Network Management Protocol (Basit şebeke yönetim protokolü)
SR : Scheduling Request (Kaynak tahsis talebi)
SRS : Sounding Reference Signal (Sesli referans sinyali)
SSCH : Secondary Synchronisation Channel (İkincil senkronizasyon kanalı)
S-GW : Serving Gateway (Sunucu geçit)
TB : Transmission Blocks (İletim blokları)
TCP : Transmission Control Protocol (İletim kontrol protokolü)
TDD : Time Division Multiplexing (Zaman bölmeli çoğullama)
TDR : Transaction Data Records (İşlem veri kayıtları)
TM : Transmission Mode (İletim modu)
Tx : Transmitter (Verici)
Tx Div : Transmit Diversity (İletim çeşitlemesi)
TTI : Transmit Time Interval (İletim zaman aralığı)
UE: : User Equipment (LTE terminal)
UL : Uplink (Yukarı yönlü)
UMTS : Universal Mobile Telecommunications Service (Evrensel mobil haberleşme sistemi)
VOC : Voltage Controlled Oscillator (Voltaj kontrollü osilatör)
WCDMA : Wideband Code Division Multiple Access (Geniş bant CDMA)
xDR : External Data Records (Tüm data kayıtları)

SEMBOLLER

bps	: Veri iletim hızı, bit per second
BW	: Bant genişliği
dB	: Frekans güç oranı, desibel
dBm	: Multak güç değeri
Hz	: Hertz
I	: İstenmeyen girişim bileşeni
MEF	: Maksimum verimlilik faktörü
N	: Gürültü bileşeni
N_R	: Alıcı anten sayısı
N_{sub}	: Alt taşıyıcı sayısı
N_T	: Verici anten sayısı
RB	: Kaynak blok sayısı
RE_{sub}	: Alt çerçevedeki kaynak eleman sayısı
RE_{total}	: Toplam kaynak elemanı sayısı
$RSSI$	: Alıcı tarafından alınan sinyal gücü
$RSRP$	: Referans sinyal güç değeri
$RSRQ$	: Referans sinyal kalite değeri
S	: İstenilir sinyal bileşeni
$SINR$	: Sinyal girişim ve gürültü oranı
T_{CP}	: Çevrimsel ön ek uzunluğu
$T_{CP\text{-}e}$	: Uzatılmış çevrimsel ön ek uzunluğu
T_{frame}	: Çerçeve uzunluğu
Tput	: Toplam teorik veri iletim hızı
Tput_{sig}	: Sinyalleşme kanalları tarafından kullanılan kaynağın veri iletim hızı
$\text{Tput}_{\text{S-DL}}$	: DL özel alt çerçeveleri tarafından kullanılan kaynağın veri iletim hızı
$\text{Tput}_{\text{subDL}}$	: DL alt çerçeveleri tarafından kullanılan kaynağın veri iletim hızı
Tput_{DL}	: DL veri iletim hızı
T_S	: Sembol uzunluğu
T_{slot}	: Slot uzunluğu
$T_{subframe}$	: Alt çerçeve uzunluğu
Tu	: Faydalı sembol uzunluğu
W	: Güç birimi, Watt

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : İletim modları 17
Çizelge 2.2 : LTE DL fiziksel katman parametreleri 25
Çizelge 2.3 : PUCCH kanal boyutları 33
Çizelge 4.1 : LTE PHY kanalları ve işlevleri 43
Çizelge 4.2 : Ölçüm alanındaki saha konfigürasyonları 46
Çizelge 4.3 : Sektör parametreleri 47
Çizelge 4.4 : Saha testlerindeki CQI ve MCS ölçümleri 51
Çizelge 4.5 : LTE saha konfigürasyonu. 63
Çizelge 4.6 : Test parametreleri. 63
Çizelge 4.7 : Test etiketleri açıklaması. 65
Çizelge 5.1 : TDD UL/DL alt çerçeve dağılımları 81
Çizelge 5.2 : Özel alt çerçeve konfigürasyonları 82
Çizelge 5.3 : Test ortamı parametreleri 84

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : OFDM alt taşıyıcı yapısı. 19
Şekil 2.2 : DL ve UL taşıyıcı yapıları. 20
Şekil 2.3 : FDD çerçeve yapısı. 25
Şekil 2.4 : Sembol yapısı. 26
Şekil 2.5 : Normal CP modda temel tanımlamalar. 26
Şekil 2.6 : Referans sembollerin kaynak blok içinde dağılımı. 27
Şekil 2.7 : Normal CP ile DMRS ve SRS lokasyonları. 28
Şekil 2.8 : PBCH Yapısı. 30
Şekil 2.9 : Üç OFDM sembollü kontrol kanal yapısı. 31
Şekil 2.10 : PUCCH kanal yapısı. 32
Şekil 2.11 : PRACH iletim yapısı. 34
Şekil 3.1 : Şebeke topolojisi ve performans izleme sistemi. 37
Şekil 3.2 : Performans izleme sistemi bileşenleri. 40
Şekil 4.1 : LTE şebeke performans ölçüm alanı. 45
Şekil 4.2 : Ortalama kullanıcı sayısı. 49
Şekil 4.3 : Paket kayıp oranı ve kanal kullanımı. 50
Şekil 4.4 : Test sahaların güzergah boyunca servis alanı. 51
Şekil 4.5 : Saha ölçümlerindeki veri iletim hızları. 52
Şekil 4.6 : Saha ölçümlerindeki girişim/gürültü değeri. 53
Şekil 4.7 : Saha ölçümlerindeki TM kullanım oranları. 54
Şekil 4.8 : Histogram ve normalize dağılım veri iletim hızı ölçümleri. 55
Şekil 4.9 : CDF veri iletim hızı ölçümleri. 56
Şekil 4.10 : 1800 MHz 2x2 MIMO veri iletim hızı analizi. 57
Şekil 4.11 : Ortalama veri iletim gecikmesi. 58
Şekil 4.12 : eNodeB'ler arası geçiş performansı. 59
Şekil 4.13 : eNodeB içi geçiş performansı. 60
Şekil 4.14 : Geleneksel bozucu sinyal yapısı. 61
Şekil 4.15 : Chirp bozucu sinyal yapısı. 62
Şekil 4.16 : İTÜ Ayazağa Kampüsü test alanı. 62
Şekil 4.17 : İki bozucu tipi için uygulanan girişim senaryoları. 64
Şekil 4.18 : Ortalama RSRP ölçümleri. 66
Şekil 4.19 : Ortalama RSRQ ölçümleri. 67
Şekil 4.20 : Ortalama SINR ölçümleri. 67
Şekil 4.21 : Ortalama MCS ölçümleri. 68
Şekil 4.22 : Ortalama hız ölçümleri. 69
Şekil 4.23 : Test düzeneği. 70
Şekil 4.24 : Kısa güzergâh. 71
Şekil 4.25 : Uzun güzergâh. 71
Şekil 4.26 : Kısa güzergâh ölçümleri (açık). 72
Şekil 4.27 : Kısa güzergâh ölçümleri (kapalı). 73
Şekil 4.28 : Uzun güzergâh ölçümleri. 74

Şekil 5.1 : Ma-MIMO anten hüzme modeli. 80
Şekil 5.2 : Ma-MIMO test güzergahı. 83
Şekil 5.3 : Bozucu etkisi altında Ma-MIMO performansı. 85
Şekil 5.4 : Bozucu etkisinin SINR üzerindeki etkisi. 86
Şekil 5.5 : LTE kaynak kullanım gösterimi. 88
Şekil 5.6 : FDD DL OFDM veri motifi. 89
Şekil 5.7 : UL veri motifi. 90
Şekil 5.8 : TDD OFDM veri motifi. 91
Şekil 5.9 : 1.4 MHz bant genişliğindeki LTE DL OFDM motifi. 95
Şekil 5.10 : Bozucu etkinin OFDM motif gösterimi. 95
Şekil 5.11 : Alternatif OFDM motifleri. 96
Şekil 5.12 : Harici sinyal bozucu etkiden arındırılmış kaynak havuzu. 96
Şekil 5.13 : RE bazlı ölçüme göre alternatif OFDM motif belirleme akışı. 98

MOBİL HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE KARIŞTIRICILARIN BOZUCU ETKİSİNİN AZALTILMASI

ÖZET

Kablosuz haberleşme sistemlerindeki hızlı gelişmeler bilginin coğrafi sınırlarının ortadan kalkması için çok önemli bir etkendir. Bu sayede tüm ihtiyaçlarımız için bu teknolojinin sağladığı çözümlerden faydalanabiliyoruz. İhtiyaç kümemizdeki değişim nedeni ile kablosuz haberleşme sistemlerinde ortalama her on yılda bir yeni teknoloji hayatımıza girmektedir. Ses haberleşmesi ile başlayan teknolojik dönüşüm serüveni düşük hızlı veri iletimi ile devam etmiş, sonrasında geniş bant kablosuz internet deneyiminin sağladıkları ile yüksek ve çok yüksek hızlı veri iletimi gereksinimi ortaya çıkmış, devamında da veri iletim gecikmesinin neredeyse gerçek zamanlı olmasını gerektiren ihtiyaçlarımız dönüşümü şekillendirmiştir.

Bugün neredeyse dünya nüfusu kadar olan mobil bağlantı sayısı, kablosuz haberleşme teknolojilerinin hayatımızın vazgeçilmezi olduğunu net olarak göstermektedir. Bu rakam aynı zamanda sağlıklı bir şekilde bağlanmanın ne derece kritik olduğunu da ifade eder. Çünkü en önemli doğal kaynak ihtiyaç duyulan ve sahip olunan bilgidir. Daha fazla kullanıcı bağlı hale geldikçe kötü niyetli girişimlerin de etki alanı artacaktır. Özellikle bilgiye erişimin engellenmesi amaçlı harici girişimlere günümüzde sıkça karşılaşılmaktadır.

Kablosuz haberleşme sistemleri, harici girişimleri engellemek konusunda kendini geliştiren çözüm mekanizmaları üretmekte ne yazık ki çok esnek değildir. Bu nedenle araştırmacılar için çok önemli bir alan olarak görülen bu alanda yapılan çalışmalar yine de teorik çalışmalardan öteye gidememiştir. Yapılan çalışmaların şebeke uygulamaları, başarım ölçümlemesi ve klasik bağlantı modelleri ile karşılaştırılması da neredeyse yok denecek kadar azdır.

Bu tez çalışmasında kablosuz haberleşme sistemlerine yapılacak harici girişimleri önlemek adına literatürde ilk olarak hem donanımsal hem de yazılımsal öneriler sunulmuştur. Bu önerilerin sağlayacağı katkı açıklanmış ve saha denemeleri ile de önerilerin gerçek şebeke trafiği altındaki performansları incelenmiştir. Donanımsal çözümde saha mimarisi gelişimine uygun akıllı anten teknolojilerinin kullanımı sağlanmıştır. Bu çözüm önerisinin klasik şebeke saha mimarisine göre çok daha yüksek oranda harici girişim bağışıklığı gösterdiği gözlenmiştir. Ayrıca kablosuz haberleşme teknolojisi standartları ile çakışmayan, cihaz donanımında da bir değişim gerektirmeyen yeni bir yazılımsal çözüm önerisi ile de harici girişime karşı hızlı bir dönüşümün sağlanması ve bağlı olan terminallerin hızlıca bu girişimden izole edilmesi önerilmektedir.

Günümüzde en değerli varlığımız olarak kabul ettiğimiz verilerimizin sağlıklı bir şekilde kablosuz şebeke üzerinden iletimi için sunduğumuz alternatif öneriler ile yüksek verimlilikle bağlantının sağlanması ve harici bozucu girişimlere karşı hızlı önlem alınması sağlanacaktır.

REDUCING THE EFFECTS OF JAMMERS IN WIRELESS COMMUNICATIONS SYSTEMS

SUMMARY

Rapid developments in wireless communication systems are a very important factor for the elimination of geographical boundaries of information. For all our data transmission needs, we can take advantage of the solutions provided by these technologies. Due to the change in our basic requirement set, new technology, which called as generation, is entering our lives in wireless communication systems on average every ten years. The technological transformation adventure started with the voice communication continued with low speed data transmission, and then the need for high and higher-speed data transmission emerged with the broadband wireless internet experience, and then our needs, which require the data transmission delay to be almost real-time, have shaped the transformation.

First Generation, referred to 1G, established the foundation of mobile connectivity by the early 80s, providing analog mobile voice services. The popularity of 1G led to a call for more - more applications and improved speeds. 2G digital wireless communications technologies increased voice capacity and supported low speed basic data transfer. For the first time mobile was available on a broad scale, 3G soon followed by millennium. It optimized mobile for data, which enabled broadband services, offered better connectivity and a focus on multimedia applications. 4G LTE announced in 2009 by standard bodies, delivers greater capacity for faster and improved mobile broadband experiences. Finally, 5G announced recently in 2018, offers not only higher speed but also lower latency to provide online gaming and real time video applications. As users' expectations have grown from the early 80s to the present day, wireless communications technology has advanced through the generations at a similar rate. Today, the latest technology satisfies the demand for faster connectivity, increased capacity and an overall improved user experience.

The number of mobile connections that almost as much as the world population, clearly shows that wireless communication technologies are indispensable to our lives. This figure also indicates how critical it is to connect in a correct way. Because the most important natural resource is the information needed and owned. The more users become connected, the more malicious attempts issued. We often encounter external jammer attempts to prevent access to information.

There are many attack types in the literature. Among these, the denial of service attacks are expected to be critical in different mobile network layers and they have to be considered. Similarly, signalling amplification attacks are also important for mobile networks, particularly in the signalling plane due to the scarcity of resources. In addition to these, physical layer attacks are also critical threats, which pollute the air interface by jamming attacks.

Unfortunately, wireless communication systems are not flexible in developing the self-improving solution mechanisms to prevent external jammer related interference,

generated by undesired attacks. Therefore, studies in this area could not go beyond theoretical studies, even the problem is considered to be a very important for researchers. It is observed during the legacy network field tests that the terminal being served from the base station is either disconnected or the connected with very low quality. If the attack target is signalling channels between the base station and terminal, the call is dropped due to the loss of signalling between these two entities. Else, if the attack target is data channels, the call remains connected but not provide high quality services, and effect the mobile experience as negative.

In this thesis, legacy network field tests are not only provided, but also both hardware and software suggestions are first presented in the literature in order to prevent external interference to wireless communication systems. The contribution of these suggestions are detailed. Performance output of suggested models observed at the field trials under the actual network traffic. In the hardware solution, intelligent antenna technologies, which is also called as Massive-MIMO antenna systems are used. It has been observed that this suggestion shows a much higher external jamming interference immunity than the conventional network field architecture including passive antenna solution. In addition to hardware solution, it is recommended a new software solution, which does not interfere with the wireless communications technology standards and does not require any change in device hardware. This software solution provides a fast conversion against external jamming interference and isolate the connected terminals quickly from this external interference.

This thesis consists of six chapters, briefly described below.

- Chapter 1: In the introduction chapter, the historical development of wireless communication systems, the definition of the problem which is the subject of the thesis study, the aim and the benefits of this study, the studies on the solution of this problem in the literature and along with the organization of the thesis will be shared.
- Chapter-2: A brief architectural summary of LTE systems will describe in here and theoretical evaluation of the use of multiple antennas, OFDM features, protocol architecture, physical and logical channels are going to be discussed in this chapter.
- Chapter-3: In this section, we are going to describe how data obtained from different network layers are analyzed, how often it is received, validated and shared as the meaningful output.
- Chapter-4: Field topologies of LTE systems, which designed in our country, will be presented in this part of the study, which are trying to overcome against the external jammer attack. Network immunity and data transmission performance against different types of disturbing sources will also be discussed in detail in this section. In order to understant the effect of external jammer attack on the network capability, basic network performance results are obtained from stationary and mobile drive tests. It is also going to explain how wireless communications systems are inevitable under the external undesired jammer attacks.
- Chapter-5: We are going to offer two innovative methods to keep robust network performance against to external jammer attack. When selecting the methods, we will strive to stay true to the existing network architecture, data frame structure and 3GPP standards. First offered method will try to keep the

network performance by having the hardware based solution, however second offered method have totally different perspective to the problem, and offer the rearrangement of signalling resource blocks under the some calculation based rules.

- In the Results and Recommendations section, the results obtained from the different studies are evaluated and the contributions of the study to the science and industry will discussed. Also, some suggestions will make for future studies.

1. GİRİŞ

Bilginin bir noktadan diğerine aktarımı aşamasında kablosuz ortamın keşfedilmesi, erişilebilirliğin coğrafi sınırlarının kalkmasını sağlayan en önemli gelişmelerin başında yer almaktadır. Kablosuz ortam vasıtasıyla taşınan ses ve veri örüntüleri ile coğrafi sınırların aşılmasının sağlanmasının yanı sıra daha kaliteli ses iletiminin (kristal ses) ve daha yüksek veri iletim hızının (saniyede Gigabitler mertebesinde) kullanıcılara sunulması da sürekli bir beklenti halini almıştır. İşte bu beklentiyi karşılamak amacı ile farklı kablosuz ortam alternatifleri ve farklı nesil kablosuz haberleşme teknolojileri, standartları tanımlayan ve icrasını yürüten kurumlar tarafından hayata geçirilmiştir. Üçüncü nesil ortaklık projesi (Third Generation Partnership Project, 3GPP) bu alanda standartları belirleyen kurum olarak tüm sektör tarafından kabul görmüştür. Bugün 3GPP, 4. nesil (4th Generation, 4G) kablosuz haberleşme teknolojisinin şebeke kurulum standartlarını olgunlaştırmış, 5. nesil (5th Generation, 5G) kablosuz haberleşme teknolojileri için de çalışmalarını belli bir aşamaya getirmiş ve ilk sürümü (Release) Kasım 2018 sonu itibariyle Release-15 standardı olarak sabitlemiştir. 5G kablosuz haberleşme teknolojilerini sunan şebekeler, 2018 yılı içinde çoğu deneme kapsamında olmak üzere önümüzdeki yıldan itibaren daha geniş kullanım alanı bulacaktır.

1.1 Kablosuz Haberleşme Teknolojilerinin Gelişimi

Temel kablosuz haberleşme teknolojilerinin temelini teşkil eden 1. nesil (1st Generation, 1G) teknolojiler, mimari yapısının analog olması nedeniyle birçok dezavantaj içeriyordu. Ses kalitesi kötü, konuşma kapasitesi sınırlı ve kapsama alanı düşüktü. Ayrıca ağdaki herhangi bir abonenin gizlice dinlenmesi de oldukça kolaydı. Şu an dünyadaki birçok ülke, daha gelişmiş nesil sistemlere geçiş sürecini tamamlamaya çalışırken birinci nesil sistemler hala bazı ülkelerde lokal de olsa kullanılmaktadır. Ülkemizde ise 80'li yılların ortasında bu standarda uyumlu NMT-450 (Nordic Mobile Telecom) standardı [1] bir süre kullanılmıştır. 2. nesil (2nd Generation, 2G) teknolojiler ise analogtan sayısala geçişin ilk ürünüdür. Bu sebeple,

1G ve 2G sistemler arasındaki çizgi nettir. 2G sistemler, 1G'ye oranla daha yüksek kapasiteye sahiptir. Bu durum her iki teknoloji arasındaki dönüşümün en temel sebebidir. Çünkü abone sayısının beklenilenin üzerinde artması nedeni ile 1G kablosuz haberleşme teknolojisi bu artışa cevap veremez hale gelmiştir. 2G kablosuz haberleşme sistemlerinde her biri 200 KHz genişliğinde olan bir taşıyıcı kanalı, çok sayıda kullanıcı tarafından eşzamanlı olarak kullanılır (her bir frekans kanalı aynı anda sekiz kullanıcıya kadar zaman bölmeli metodlarla paylaştırılır).

Ülkemizde 2G kablosuz haberleşme sistemleri olarak mobil haberleşme için global sistemler (Global System for Mobile Communications, GSM) teknolojisi benimsenmiştir ve bu teknolojinin ilk yayını 1994 yılı itibariyle yapılmıştır [2]. Günümüzde de GSM teknolojisi operatörler tarafından 900 MHz ve 1800 MHz frekans bantlarında kullanılmaktadır. 900 MHz'de 124 adet, 1800 MHz'de de 299 adet 200 KHz'lik taşıyıcı kanal bulunmaktadır. 1G ve 2G kablosuz haberleşme sistemlerinde temel amaç ses haberleşmesinin iki uç birim arasında yapılmasını sağlamak idi. Bu aşamada data iletiminin ilk kullanım yöntemini 2G kablosuz haberleşme sistemleri üzerine kurulu 2.5G olarak da adlandırılan bu dönüşüm teknolojisinde genel paket radyo hizmetleri (General Packet Radio Service, GPRS) ve GSM evrimi için arttırılmış veri hızları (Enhanced Data rates for GSM Evolution, EDGE) isimli iki formatta sağlanmaktadır. GPRS data iletim formatında hızlar 20 Kbps civarında iken, bu değer EDGE formatında 59.2 Kbps değerindedir. Bir kullanıcı birden fazla zaman bölmeli kanalı bir arada kullanarak bu hızları yaklaşık 160–480 Kbps hızlara kadar çıkarabilmektedirler.

1G'den 2G'ye geçiş için artan abone sayısına karşılık verecek yeni teknoloji gerekmekteydi. Mevcut 2G kablosuz haberleşme teknolojisi, artan abone sayısına cevap verebilecek esnek yapıya sahip olmasına rağmen, yüksek hızlı ve büyük miktarda data iletimini çok da mümkün kılmamıştır. İşte bu nedenle yeni bir alt yapı gereksinimi 3. nesil (3rd Generation, 3G) kablosuz haberleşme teknolojilerini ortaya çıkarmıştır. İnternetin geldiği nokta, internet protokolünün (IP) başarısı, paket anahtarlamalı teknolojilerdeki gelişmeler ve kablosuz haberleşme teknolojisine olan ilginin beklenenin çok üzerinde olması nedeni ile 3G kablosuz haberleşme teknolojisi fazlasıyla benimsenmiş ve günümüzde dünyada en yaygın kullanılan teknoloji halini almıştır. 3G kablosuz teknolojinin geliştirilmesindeki önemli hedeflerden biri de o zaman kullanılmakta olan 2G ile tamamen uyumlu ve tüm dünyada geçerli bir

kablosuz haberleşme standardının gelişimine imkan tanımak idi. Bu bağlamda kod bölüşümlü çoklu erişim (Code Division Multiple Access, CDMA) teknolojisi geliştirilerek standartlaşması sağlanmıştır [3]. Bu teknolojiyi referans alarak farklılaştırılmış CDMA-2000, geniş bant CDMA (Wide-Band CDMA, WCDMA) ve evrensel mobil haberleşme sistemi (Universal Mobile Telecommunications Service, UMTS) gibi farklı 3G kablosuz haberleşme teknolojisi çözümleri dünyada farklı ülkelerde kullanılmaya başlanmıştır. Ülkemizde 3G kablosuz haberleşme teknolojisi 2100 MHz frekans bandında 2009 yılında ihale edilen spektrum ile kullanılmaya başlanmıştır [4]. Bu teknolojide her bir taşıyıcı, 5 MHz bant genişliğine sahiptir. 2100 MHz frekans bandında 12 adet 5 MHz'lik spektrumun kullanılmasına imkan sağlayacak bir bant genişliği mevcuttur. Birden fazla bant bir arada kullanılarak ikili ve üçlü taşıyıcı birleştirme ile 10 ve 15 MHz'lik birleştirilmiş taşıyıcılar da abone terminal (User Equipment, UE) tipine ve ihtiyaç duyulan data iletim hızına bağlı olarak bu teknoloji ile sunulmaktadır. 2016 yılı itibariyle ülkemizde spektrumun frekans bağımsız kullanılması kararı ile 900 MHz frekans bandı da bazı operatörler tarafından 3G kablosuz haberleşme teknolojisi olarak kullanılmaktadır.

Zamanla günlük hayatımızda İnternet'in çok daha fazla ihtiyaç haline dönüşmesi, mobil uygulamaların artan veri iletim gereksinimi, yüksek çözünürlüklü mobil video teknolojisinin hayatımıza daha fazla girmesi nedeni ile farklı bir erişim teknolojisi ile daha yüksek hızlara ulaşma amacı, 4G kablosuz haberleşme sistemlerinin doğmasına neden olmuştur. 4G kablosuz haberleşme teknolojisi 3GPP Release-8 standardı [5] ile birlikte tanımlanmıştır. Şebeke kurulumu açısından bu teknolojinin genelde kabul gördüğü gözlemlenmektedir. GSA'nın [6] raporuna göre tüm dünyada 2017 yılının üçüncü çeyreği sonunda 2.54 milyar 4G kablosuz haberleşme teknolojisi aboneliği kayıt altına alınmıştır. Bu teknoloji ile kurulan şebekelerdeki abonelik tüm aboneliğin %30.3'üne tekabül etmektedir.

4G kablosuz haberleşme teknolojisinin diğer ilk üç nesilden en önemli farkı paket anahtarlamalı olmasıdır. 1G, 2G ve 3G kablosuz haberleşme teknolojilerinde veri iletim formatı devre anahtarlamalı idi, paket anahtarlamaya dönüşüm hem veri iletim hızını artıran hem de gecikmesini azaltan yapıya sahiptir. 4G kablosuz haberleşme teknolojisinde birbirine dik frekans bölüşümlü çoğullama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) metodu kullanılmıştır [7]. Bu sayede frekans ve zaman boyutunda çoğullanmış kaynaklar sayesinde çok daha fazla kaynak abonelere tahsis

edilerek, onların veri iletim hızlarında önemli artışlar sağlanmıştır. Uzun dönemli dönüşüm (Long Term Evolution, LTE) olarak adlandırılan 4G kablosuz haberleşme teknolojisi kullandığı OFDM çerçeve yapısı sayesinde diğer 3 teknolojiden çok daha fazla kapasite ve çok daha yüksek hız sağlayabilmektedir. Bu teknolojide farklı bant genişlikleri ile iletimin sağlanmasına olanak verilmiştir. 1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz bant genişlikleri ile operatörler sahip oldukları spektrum kaynaklarını verimli bir şekilde bu teknolojide kullanabilmektedirler. Ülkemizde 2015 yılında ihale edilip 2016 yılında kullanılmaya başlanan 4G kablosuz haberleşme teknolojisi, birden fazla taşıyıcı birleştirme ve yeni nesil özellikleri de bünyesinde barındırma kabiliyeti sayesinde 4.5G olarak adlandırılmıştır [8]. LTE-Advanced (LTE-A) olarak adlandırılan bu teknolojide çoklu taşıyıcı birleştirme kabiliyeti, yüksek modülasyon ve çoklu anten kullanımı sayesinde gigabit seviyesinde veri iletim hızına imkan tanınmaktadır. Günümüzün en önemli teknolojileri arasında yer alan LTE, abonelere yüksek özgürlüklü kablosuz haberleşme imkanı sağlamanın yanı sıra birim kaynak elemanına (Resource Element, RE) düşen güç miktarının nispeten düşük olması nedeni ile gürültü ve bozucu etkilere karşı düşük bağışıklık göstermektedir.

1.2 Çalışmanın Amacı

LTE teknolojisinde gürültüyü bertaraf etmeye yönelik çeşitli optimizasyon yöntemleri mevcut iken özellikle baz istasyonu (eNodeB) harici kaynaklar tarafından yayımlanan istenmeyen bozucu etkisi altında sistemin davranışını stabil tutacak çalışmalar henüz araştırma boyutundadır ve teorik analizlerin ötesinde değildir. Detayları ileri bölümlerde açıklanacak olan bir OFDM çerçeve yapısında zaman ve frekans boyutlarında çok sayıda RE vardır. Bu RE'lerin sayısı kullanılan bant genişliği ile doğru orantılıdır. RE'ler ya eNodeB ile aboneler arasındaki sinyalleşmeleri sağlamak amacı ile ya da abonelerin servis gereksinimini karşılayacak data iletimini sağlamak amacı ile kullanılır. Tez çalışmamız, hem abonelerin eNodeB ile olan sinyalleşme iletişimini sürekli kılacak hem de abonelerin servis gereksinimi için data iletimini karşılayacak kaynak kullanımını maksimum seviyede tutacak yöntemleri önermektedir. Gürültü ve bozucu etkisini bertaraf edecek donanımsal ve yazılımsal öneriler ilk defa ele alınacak ve saha denemeleri ile başarımı konusundaki gözlemler paylaşılacaktır. Yapılan bu tez çalışmasının bilime sağladığı katkı ve yenilikler aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır:

- LTE sistemlerinde gürültü/bozucu etkisini minimize etmek için kitlesel çoklu giriş çoklu çıkış (Massive Multiple Input Multiple Output, Ma-MIMO) anten sistemlerinin kullanımı ile farklı anten hüzmelerinin sağladığı istenilir sinyalin bozucu ve gürültüye oranının (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio, SINR) sağladığı avantaj saha çalışmalarında da görülmüştür. Bu sayede abonenin veri iletim deneyiminde normal anten sistemlerine göre çok daha yüksek seviyede bağışıklık sağlanmıştır. Anten sayısının ve seçilen iletim modunun (Transmission Mode, TM) canlı şebeke performansına olan etkisinin ölçülmesi temel amaçtır. Anlık performans metriklerini gözlemlemek amacıyla çok katmanlı performans izleme sistemi tasarlanmış ve uygulanmıştır.
- Literatürde herhangi bir örneği olmayan yazılımsal dönüşüm modelinde, LTE kablosuz haberleşme sistemlerindeki kaynak havuzunda yeri belli olan sinyalleşme ve data RE'ler, eğer herhangi bir harici gürültü/bozucu etkiye maruz kalıyor ise yerlerinin dinamik olarak değişimini önermektedir. Yer değişiminde öncelikli RE sinyalleşme kaynaklarıdır ki bu sayede eNodeB ile abone arasındaki veri iletiminin kopmaması garanti altına alınmaya çalışılır. Sonra da veri kaynaklarının yerleri boş olan alana aktarılır ki bu durum zaten standartlarda tanımlıdır.

1.3 Literatürde Yapılan Çalışmaların Özeti

Kablosuz haberleşme iletişim teknolojileri hızla gelişmektedir ve standartları sürekli olarak yükseltilmektedir. Temel hedef milyarlarca cihazı şebekeler üzerinden birbirine bağlamaktır. Daha fazla cihaz bağlı hale geldikçe, kötü niyetli amaçların etki alanı artacaktır. Olası saldırıları ve bunların etkilerini aramak, LTE ağlarını korumaya ve saldırılara karşı dayanıklılıklarını geliştirmeye yardımcı olabilir. Bu bağlamda kablosuz haberleşme sistemlerinde sistem performansının harici gürültü/bozucu etkisi karşısında davranışı oldukça fazla teorik çalışmanın temel motivasyonu olmuştur. Özellikle diğer teknolojilere göre çok daha yüksek bağışıklığa sahip 4G kablosuz haberleşme sistemleri, bu analizlerde önemli bir yer almaktadır.

Verilen bir kanal modeline göre çoklu taşıyıcı MIMO sistemlerinin teorik performans analizi hali hazırda çok iyi tahmin edilebilir çıktılar verecek şekilde Tse ve Viswanath tarafından kurgulanmıştır [9]. Bununla birlikte teorik analizlerin yanı sıra, LTE teknolojisinde sinyalleşme kanal atamaları ve ön tanımlı sinyalleşme modelleri ile

oluşan saha uygulamaları da son yıllarda literatürde yer bulmuştur [10], [11]. Fakat bu çalışmalarda sunulan saha testi temelli karşılaştırmalı performans analizleri, nispeten azdır.

3GPP LTE Release-8 tabanlı saha çalışmaları Irmer ve arkadaşları tarafından 2009 yılında yürütülmüştür. Yazarlar kullanıcı veri hızı, spektral verimlilik ve gecikme değerleri için sistem seviyesinde benzetimin yanı sıra laboratuvar test sonuçlarına da yoğunlaşmışlardır [12]. Release-8'in diğer bir saha denemesi 750 MHz frekans bandında Hu ve Quian tarafından yapılmıştır. Yazarlar MIMO teknolojisini kullanarak azımsanmayacak sayıda kullanıcı veri hızını farklı modülasyon teknikleri sayesinde artırmayı başarmışlardır [13]. Buenestado ve diğerleri 2014 yılında yaptıkları çalışmada, kullanıcı, hücre ve radyo link seviyesinde veri iletim hızlarını kapsamlı olarak incelemişlerdir. Farklı radyo koşulları için servis devamlılığı, erişilebilirlik, sürdürülebilirlik, hücreler arası geçiş ve kalite performans göstergeleri dikkate alınmıştır [14]. LTE–A heterojen mobil haberleşme şebekelerinin planlama problemleriyle ilgili Salman ve diğerleri tarafından 2015 yılında yapılan çalışmada sistem sabitlerini genel olarak dikkate alacak şekilde LTE-A sistemin performans değişimleri farklı saha modelleri için analiz edildi. Farklı tipteki sahalardaki anlık veri hızları için düşük karmaşıklı tahmin teknikleri kullanılmış, beklenen veri iletim hızı bilgisinin kritik olduğu uygulama alanlarında önceden tahminleme kullanımının önemi üzerinde durulmuştur [15].

3GPP 4G frekans bölmeli çoğullama (Frequency Division Duplex, FDD) tipinin veri iletim hızları, hücreler arası geçiş ve gecikme ile ilgili saha testleri Wylie-Green ve Swensson tarafından 2010 yılında dikkate değer bir çalışma olarak paylaşılmıştır. Yazarlar aşağı yönlü (Downlink, DL) ve yukarı yönlü (Uplink, UL) iletim linki veri hızlarını tek ve çoklu kullanıcı durumları içeren farklı senaryolarda ölçmüşlerdir. Ayrıca hücreler arası geçiş başarı oranı ve ortalama kullanıcı düzlemi gecikme değerlerini paylaşmışlardır. Saha testleri hareketli kullanıcılar için blok hata oranının (Block Error Rate, BLER) DL veri hızıyla ters orantılı olduğunu göstermişlerdir [16]. Landre ve diğerleri tarafından 2012 yılında yapılan çalışmada, arabayla yapılan saha test (drive test) ölçüm temelli benzetim algoritmaları incelenmiştir. Sonraki bölümlerde gösterileceği üzere ortalama veri iletim hızının kullanıcı lokasyonuyla ilgili olduğu veya 4x4 MIMO kullanımının %60 veri hızı iyileştirmesi sağlaması gibi bu tezde elde edilen sonuçların [17] nolu çalışmanın sonuçlarıyla benzer davranışlar

sergilediği gözlenmiştir. Benzer saha performans karşılaştırmaları sırasıyla [18] ve [19] no'lu çalışmalarda Hagerman ve diğerleri ve Furuskog ve diğerleri tarafından yapılmıştır. Açık döngülü (open loop) LTE saha konfigürasyonu için yatay ve dikey olarak yerleştirilmiş anten sayılarının etkisi Lerch ve Rupp'in çalışmalarında detaylıca incelemiştir. Çalışmada anten sayıları ve antenler arasındaki mesafe ile sistem performansı arasındaki değişimin korelasyonu bulunmaya çalışılmıştır [20]. Çalışmamızın motivasyonlarından birine benzer amaç içeren Errkilad ve diğerlerinin 2017'deki çalışmasında farklı MIMO tekniklerinin saha performansları incelenmiş, fakat testlerin yapıldığı şebekeye sadece test telefonların erişimine müsaade edilmiş olup ticari kullanıcıların sistem performansına etkileri dikkate alınmamıştır [21]. Çalışmada anten sayısındaki değişim ile abone veri iletim hızı deneyimi arasında doğru orantılı bir performans değişimi gözlenmiştir.

Werner ve diğerleri yapmış oldukları çalışmada, farklı iki ve dört anten konfigürasyonlu LTE sistemlerinde farklı anten polarizasyon, anten aralığı, sıralaması ve TM durumlarını Kista/Stockholm şehrinde test etmişlerdir [22]. Hücresel test ortamında UE'ye özel üç boyutlu hüzme yönlendirme özelliğine sahip antenle yapılan açık görüş olan (Line of Sight, LOS) ya da olmayan (nonLine of sight, nLOS) durumların performans karşılaştırılmasını Danneberg ve diğerleri tarafından 2012 yılında analiz etmiştir [23]. Becker ve diğerleri de probleme farklı bir bakış açısı katarak kullanıcı deneyimi temelli performans sonuçlarını derlemişlerdir. Yazarlar uygulama seviyesinde performans sonuçlarını araştırırken, kablolu erişim şebekesinin ölçüm sonuçlarını kopyalayıp kablosuz eşleniğine referans olmasını sağlamıştır [24]. Beyer ve diğerlerinin Deutche Telekom operatörün Huawei LTE şebekesinde birbirinden ayrı bir makro ve sekiz piko baz istasyonu ekipmanları ile yaptığı geniş alan denemesinde, kapsama alanının daha iyi bir veri iletim hızı için makro ve piko sahalar arasındaki entegrasyona bağlı olarak değiştiği sonucuna varmışlardır [25]. LTE sistem performansının 200 km/s gibi yüksek hızlı durumlar için değerlendirilerek hızın performansa etkisi olduğu gözlemi Merz ve diğerleri tarafından 2014 yılında raporlansa da bu etkinin analizinde SINR değerinin de önemli olduğu gözlenmiş ve düşük olduğu yerde limitli kaldığı deneyimlenmiştir [26]. Brutyan, LTE Release-8'deki farklı MIMO modların sistem performansına etkilerini 2013'te yaptığı çalışmada analiz etmiş ve uzaysal çeşitliliğin (spatial diversity) pozitif etkilerini gözlemlemiş ve paylaşmıştır [27].

LTE-A şebekesinin performans analizinin 16 sıralı kareli genlik modülasyonu (Quadrature Amplitude Modulation, QAM) kullanarak farklı TM'ler için farklı anten korelasyonlarının oluşturduğu sönümleme kanallarını dikkate alan bir benzetim çalışmasını Parihar ve Nakkeeran paylaşmışlardır [28]. Benzer bir şekilde açık ve kapalı döngü (closed loop) TM'lerin karşılaştırılması Ball ve diğerleri tarafından [29] no'lu çalışmada incelenmiştir. İdeal kapalı döngü MIMO kullanıldığı durumda yaklaşık 2 dB teorik performans kazancının mümkün olduğu gösterilmiştir. Mullner ve diğerleri tarafından aynı konu performans karşılaştırması için UE'ler takip edilerek 2009 yılında analiz edilmiştir. Açık döngü güç kontrolünün, servis veren eNodeB'ye yakın olan kullanıcılar için yüksek veri iletim hızı sağladığını göstermiştir. Kullanıcılar eNodeB'den uzaklaşıp hücre sınırına yaklaştıkça performanslarının düştüğü gözlemlenmiştir. Yazarlar yüksek veri iletim hızını koruyabilmek için bu tür durumlarda açık döngü yerine kapalı döngü tipinin kullanılmasını en temel çözüm olarak tavsiye etmişlerdir [30].

MIMO veri iletim hızı tahmini temelli Radyo Frekans (RF) planlama programı Beyer ve diğerleri tarafından paylaşılmıştır [31]. Bununla birlikte benzetim sonuçlarının saha deneme ölçümlerinden farklı olabileceği de önemle belirtilmiştir. Farklı anten ve modülasyon konfigürasyonları Robson tarafından yapılan çalışmada değerlendirilmiş ve hücreler arası geçiş, gecikme ve uçtan uca test topolojisinin performansları karşılaştırılmıştır [32]. LTE şebeke performans göstergelerinin tahminleme algoritması çıktıları ile ve saha test sonuçları ile derlenmesi Landre ve diğerleri tarafından 2013 yılında paylaşılmıştır [33]. Harris ve diğerleri tarafından 2018 yılında yapılan çalışmada, Ma-MIMO tekniğinin kullanımı incelenmiş fakat kanal ölçümleri canlı şebeke olmadan, tahminleme ile yapılmıştır [34].

Literatürde birçok saldırı tipi vardır. Bunların arasında servis engelleme (Denial of Service - DoS) saldırılarının mobil ağlarda kritik olması ve bunların dikkate alınması gerekmektedir. Bu saldırılar Henrydoss ve Boult'un 2014'te yaptıkları çalışmaya göre [35] farklı LTE katmanlarında gerçekleştirilebilir. Çekirdek (core) ve transmisyon (backhaul) şebekelerini hedef alan saldırılar, dolaşım ara bağlantısına saldırmak veya Uluslararası Mobil Abone Kimliğini (IMSI) çalmak için kimlik doğrulama mekanizmalarındaki güvenlik açıklarını kullanır. Bu saldırılara benzer şekilde, sinyal güçlendirici ataklar, özellikle kaynakların azlığı nedeniyle sinyalleşme düzleminde mobil ağlar için de önemlidir. Talbot'a göre bozucu saldırıları LTE ağlarının maruz

kaldığı en basit ama etkili saldırılardır [36]. Mobil ağlar, her müşteriye aynı anda hizmet vermek için sınırlı radyo kaynağına sahiptirler. Band genişliğinin azlığı nedeni ile boş kaynakları verimli bir şekilde yeniden kullanmak için ileri teknikler gerektirir. Bu nedenle fiziksel ağ katmanı (PHY) saldırıları kritik tehditlerdir.

Lichtman ve diğerleri [37], LTE'nin radyo frekansının bozma, aldatma ve dinleme konusunda ne kadar savunmasız olduklarını 2016 yılında araştırmış ve yeni nesil kritik iletişim ağlarını etkileyebilecek farklı PHY tehditlerini değerlendirdiler. Benzer bir çalışma Bhattarai ve diğerleri tarafından da incelendi ve simülasyon ortamında LTE şebekesinin sinyal bozucu uygulamalara karşı tepkisi gösterildi [38]. Krenz ve Brahma 2015 yılında yaptıkları çalışmada farklı saldırı yollarını inceledi ve uygulanması kolay bir yöntemi ayrıntılı olarak analiz etti [39]. Phillippe ve diğerleri [40], LTE tabanlı bir mobil geniş bant iletişim sisteminin, bazı askeri kullanım durumlarında karşılaşılan kasıtlı bozuculara nasıl dayanabildiklerini ve direnebildiklerini incelediler. Li ve diğerleri [41], LTE şebekesinin ilk senkronizasyon mekanizmasının savunmasızlığını inceledi ve bu güvenlik açığını doğrulamak için eşzamanlı senkronizasyon sinyallerine dayalı bir LTE sinyali bozma yöntemini 2015 yılında ileri sürdüler. Benzer şekilde Lichtman ve diğerleri tarafından 2014 yılında LTE UL şebekesinde kullanılan çok önemli bir kanal olan fiziksel UL kontrol kanalı (PUCCH) üzerindeki girişimin etkilerini araştırmaya odaklandılar [42].

1.4 Tezin Organizasyonu

Bu tez çalışması Bölüm 1.2'de de belirtildiği gibi LTE sistemlerin harici gürültü/bozucu bağışıklığını donanımsal ve yazılımsal olarak artırmayı hedefleyen çeşitli çözüm yöntemlerini önermektedir. Yapılan analizler farklı konferans ve dergi çalışmalarında sunuldu, yayınlandı veya sunulmak, yayınlanmak üzere kabul edildi.Tez çalışması, kısaca aşağıda açıklanan altı bölümden oluşmaktadır:

- Bölüm 1: Giriş bölümünde kablosuz haberleşme sistemlerinin tarihsel gelişimi, tez çalışmasına konu olan problemin tanımı, çalışmanın amacı ve bu çalışmanın sağladığı faydalar, literatürde bu problemin çözümü üzerine yapılan çalışmalar ve tez organizasyonu hakkında bilgiler sunuldu.

- Bölüm 2: LTE sistemlerin kısa bir mimari özeti verilecek, çoklu anten kullanımının teorik değerlendirilmesi, OFDM özellikleri, protokol mimarisi ve fiziksel kanallar burada ele alındı.
- Bölüm 3: Bu bölümde şebekenin farklı katmanlarından alınan verilerin nasıl analiz edildiği, ne sıklıkta alındığı ve validasyonu ile ilgili bilgiler tanımlandı.
- Bölüm 4: LTE sistemlerin ülkemizde tasarlanan saha topolojilerinin hem gürültü/bozucu etkiler karşısında bağışıklığı, çalışmanın bu bölümünde sunuldu. Farklı tip bozucu sinyaller karşısında sistem davranışı ve veri iletim performansındaki değişim bu bölümde detaylıca incelendi.
- Bölüm 5: Mevcut sistem bozucu bağışıklığını artıracak donanımsal ve yazılımsal öneriler bu bölümde tanımlanıp yapılan saha testleri ile sağladığı ek katkı gösterildi. Donanımsal denemelerde Ma-MIMO anten çözümü incelendi ve Release-14 uyumlu bu yenilikçi mimarinin ilk saha deneme sonuçları paylaşıldı. Yazılımsal önerilerde ise henüz literatüre girmemiş bir analiz ile gürültü/bozucu etkisinin minimize edilmesi üzerine değerlendirmeler paylaşıldı.
- Sonuçlar bölümünde, yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar genel hatlarıyla değerlendirilerek çalışmanın bilime ve endüstriye sağlayabileceği katkılar tartışıldı. Daha sonra yapılabilecek çalışmalar için önerilerde bulunuldu.

1.5 Yayınlar

Tez çalışması boyunca bir makale ve bir bildiri yayınlanmış, patent başvurusunda bulunulmuştur:

Sezgin, G., Coskun, Y., Basar, E., Karabulut, Kurt, G., (2018). Performance Evolution of a Live Multi-site LTE Network. *IEEE Access*, vol.6, 49690-49704.

Coskun, Y., Eygi, M., **Sezgin, G.,** Karabulut, Kurt, G., (2017). Jamming Resilience of LTE Networks: a Measurement Study. *International Telecommunications Conference* (ITelCon 2017). December 28-29, 2017. Istanbul, Turkey. pp: 151-162. ISBN: 978-981-13-0408-8

Sezgin, G., Karakoc, M., Karabulut, Kurt, G., (2018). İstenmeyen Bozucu Etkisini Önlemek Amaçlı Dinamik Kaynak Bloklarının Yayılımı, *Türk Patent Başvuru No. 2018/21359.*

2. 4. NESİL KABLOSUZ HABERLEŞME TEKNOLOJİSİ MİMARİSİ

Günümüzde akıllı telefon, tablet ve dizüstü bilgisayar kullanıcılarının talep ettiği hizmetler ve uygulamalar artık ses ve basit veri iletimi gereksiniminin ötesine gitmiştir. İnternetin hayatımızda önemli yer işgal etmesi ve yüksek hız düşük veri iletim gecikmesi beklentisinin daimi olarak artması, yeni nesil kablosuz standartların gelişimi için itici bir güç haline gelmiştir. LTE teknolojisi de abonelerin bu taleplerini karşılamak amacı ile tasarlanmış kablosuz haberleşme standartlarının başında yer almaktadır. Bu bölümde LTE olarak adlandırılan 4G kablosuz haberleşme teknolojisinin mimari modeli üzerinde durulacaktır. Teknolojiye genel bakış ve kullanım formatlarından, erişim metodu ve kanal yapısına kadar tüm detaylara bu bölümde değinilecektir.

2.1 LTE Teknolojisine Genel Bakış

LTE teknolojisi, daha yüksek veri iletim hızı, geliştirilmiş sistem kapasitesi ve kapsaması, esnek bant genişliği, önemli ölçüde geliştirilmiş spektral verimliliği, düşük veri iletim gecikme süresi ve çoklu-anten desteği ile mevcut mobil iletişim sistemlerinin entegrasyonunu içerir. 3GPP Release-8 ile tanımlanan LTE teknolojisi daha sonra Release-10'da LTE-A halini almıştır. Ülkemizde de 4.5G ya da LTE-A olarak bilinen bu teknolojide gigabitler seviyesinde veri iletim hızı çok düşük veri iletim gecikmesi sürelerinde tanımlanmaktadır.

LTE-A teknolojisi esnek bant genişlikleri ile veri iletimine imkan tanımaktadır. Standartlarda 1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz bant genişlikleri tanımlıdır. Her bir bant genişliği ile abonelere sunulacak serbest RE sayısı değişmektedir. Yani kapasitif ihtiyaç ya da veri iletim hızı ihtiyacı arttıkça bant genişliğini de artırmak gereklidir. Bu durumda bir aboneye sunulabilecek RE sayısı da artacağından sadece kapasitif olarak değil aynı zamanda abonenin veri iletim hızında da artış gözlenecektir. Bant genişliği artarken sistem çıkış gücü sabit tutulduğunda, birim RE başına düşen güç değeri bant genişliğindeki artış ile ters orantılı olacaktır. Yani bant genişliği artarken ilgili banda tahsis edilen çıkış gücü artırılmaz ise kapsama kaybına yol açacak bir

durum ile karşılaşılabilir. Ülkemizde baz istasyonlarının çıkış gücünü yetkisiz erişim alanı kapsamında kontrol eden sıkı bir güvenlik mesafesi mekanizması vardır. Özetle abone sayısı, her bir aboneye sunulacak veri iletim hızı ve ilgili bandın kapsama alanı arasındaki ilişkiyi sağlıklı bir şekilde yönetecek bir kapasite analiz sistemi bu teknolojide kritik öneme sahiptir.

Öte yandan LTE-A teknolojisi hem frekans bölmeli çoğullama (Frequency Division Duplexing, FDD) hem de zaman bölmeli çoğullama (Time Division Duplexing, TDD) yöntemleri ile veri iletimi yapabilmektedir. FDD'de her bir spektrumun DL ve UL frekans bant genişliği bulunmaktadır. Bu yöntem simetrik bant genişliği içerir. Her ne kadar bire beş gibi oranlarda DL baskın bir abone davranışı olsa da son zamanlarda UL uygulamalarının da artması nedeni ile bu oran azalmaya devam etmektedir. TDD'de ise DL ve UL çerçeve (frame) yapıları aynı frekanstadır. Bu durum aynı bant genişliğinin hem DL hem de UL için kullanılması gerekliliğini ortaya çıkarır. TDD kullanımının abone veri iletim hızına FDD'ye göre negatif etkisi sözkonusudur. Öte yandan asimetrik trafikleri verimli bir şekilde yönetmek için iyi bir alternatiftir. FDD'nin sağladığı avantajlar ve frekans planlamasının kolay olması nedeni ile asimetrik trafiklerde bile TDD nadiren kullanılmaktadır. Özellikle bizim incelediğimiz harici gürültü/bozucu etki analizlerinde sistemin bir sonraki davranışının tahminlenmesi gibi durumlarda ise TDD'nin önemli avantajı vardır. Kablosuz haberleşme sistemlerinde hava arayüzünün doğrusal olmayan karakteristiği nedeni ile sinyallerin harici gürültü/bozucu etkisi altında davranışını tahminlemek oldukça zordur. Çünkü UL yönünde UE'den eNodeB'ye doğru iletilen sinyaldeki bozulma pilot referans sinyale göre ölçümlenir, sonrasında DL yönünde de bozulmayı bertaraf edecek şekilde güç artışı ya da farklı koruma yöntemleri uygulanır. Eğer TDD'deki gibi DL ile UL aynı frekansta ise sadece zaman eksenindeki değişimin etkisini sistemi korumaya almak için hesaplamak yeterlidir. Ancak FDD'de ise hem zaman hem de DL/UL frekanslarının farklılığından dolayı frekans eksenlerindeki değişim göz önünde bulundurulmalıdır. Frekans eksenindeki değişim (UL frekansında ölçümleyip DL frekansında bir sonraki zaman diliminde gönderim), tahminlemesi ve yönetmesi oldukça zor bir metotdur. Son zamanlarda farklı TM alternatifleri ile bu zorluk için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir.

LTE-A'den beklenti yüksek hız olduğu için tek taşıyıcıda tanımlı en yüksek bant genişliği olan 20 MHz bile bazı durumlarda kapasitif yoğunluk nedeni ile beklentiyi

karşılamada eksik kalabilmektedir. Bu durumu bertaraf etmek için taşıyıcı birleştirme (Carrier Aggregation, CA) yöntemi ile birden fazla taşıyıcının birleştirilmesi durumu söz konusu olabilir. Aynı frekansta >20 MHz olan bant genişliğine sahip spektrumun doğru şekilde birleştirilmesi (örneğin 30 MHz'in 20+10 ya da 15+15) ile tanımlanan CA metoduna bant içi (intraband), farklı frekanslarda taşıyıcı birleştirme yöntemlerine de bantlar arası (interband) CA tanımı yapılabilmektedir. Sonuçta amaç veri iletim hızını artırmaktır. CA hem DL yönünde hem de UL yönünde yapılabilir. UL'de UE'nin güç tüketimi dengesini göz önünde bulundurmak ilk öncelik olacağı için UL yönünde CA için özel koşulların tanımlanması gereklidir.

Sadece CA ile değil aynı zamanda MIMO anten kullanımı ile ve yüksek dereceli modülasyon tekniklerinin kullanımı ile de abone veri iletim hızlarının artırılması sözkonusudur. 3G kablosuz haberleşme sistemleri, DL yönünde tek anten elemanından iletimi benimser iken LTE-A teknolojisinin de tanımlandığı 4G sistemlerde 2x2, 4x4 MIMO antenler oldukça yoğun kullanılmaktadır. İlk çarpan iletim anten sayısını (Transmitter, Tx) ikinci çarpan da alıcı anten sayısını (Receiver, Rx) vermektedir. Öyleki Ma-MIMO antenlerde bu değer 16x16, 64x64 ve hatta 256x256'ya kadar yükselmekte, artan frekans ile orantılı olarak anten eleman sayısı artmaktadır. LTE-A teknolojisinde artan hata kontrol algoritmaları sayesinde yüksek modülasyonlu sinyallerin de iletiminin arttığı gözlenmiştir. Her bir zaman aralığında 8 bit gönderen 256-QAM modülasyon tekniği DL yönünde kullanılmaya başlanmış olmasının yanı sıra, UL yönünde 64-QAM kullanımı (6 bit) sözkonusudur.

Tüm amaç eNodeB'den DL yönünde verimli ve hızlı veri iletimi, UL yönünde de abone UE'sinin pil tüketimini öncelikli olarak değerlendirip yüksek hızlı veri gönderimidir. Bu nedenle LTE-A teknolojisinde DL ve UL yönünde veri iletim motifleri arasında da birtakım farklılıklar vardır. LTE-A teknolojisinde DL yönünde OFDM, UL yönünde de tek taşıyıcılı frekans bölüşümlü çoklu erişim (Single Carrier Frequency Division Multiple Access, SC-FDMA) yöntemleri kullanılmaktadır. Özetle OFDM'de çok sayıda modüle edilmiş alt taşıyıcı kullanarak veri iletiminin paralel olarak yapılması temel amaçtır. Alt taşıyıcılar, mevcut bant genişliğini böler, daha sonra her bir taşıyıcı için yeterli frekans ayrılarak bu alt taşıyıcıların birbirine dik olması sağlanır. OFDM'in seçilmesinin ana nedeni, çok-yollu sönümlenmede sağlamlılık, yüksek spektral verimlilik, düşük karmaşıklık uygulanması, esnek transmisyon bant genişliklerini sağlamak, frekans-seçici zamanlama gibi gelişmiş

özellikleri desteklemek, MIMO iletim ve girişim koordinasyonunu sağlamaktır. UL yönünde SC-FDMA'in kullanılmasının en temel amacı güç tüketiminden tasarruf beklentisidir. SC-FDMA'da herhangi bir anda bir alt kanal iletildiği için bu problem oluşmaz, yalnız ard arda alt kanalları iletmek için çok hızlı iletim yapmak gerekir ve bunun sonucunda semboller arası girişim oluşur. Bu nedenle UE ile eNodeB arasında frekans ekseninde senkronizasyonun yapılması gerekir.

2.2 Çoklu Anten Tekniğinin Kullanımı

LTE-A teknolojisinde çoklu anten tekniklerinin kullanımının 2 temel amacı vardır:

- İletim çeşitlemesi (Transmit Diversity, Tx Div) ile veri iletiminin garanti altına alınması,
- Uzaysal çoğullama (Spatial Multiplexing, SM) ile birim zamanda iletilen veri miktarının artırılması.

Tx Div senaryosunda birden fazla anten elemanı üzerinden aynı veri iletimi yapılır. Bu durum Rx tarafına iletilen verinin ulaştığını garanti altına alır ve genelde daha yüksek SINR raporlanır. Diğer tarafta SM senaryosunda ise farklı veri sembolleri farklı antenler üzerinden aynı anda ayrı ayrı iletilirler. Bu nedenle birim zamanda farklı antenlerden farklı sayıda veri sembolleri iletilmiş olur. Anten sayısı ile iletilen veri sembolü arasında doğru orantı vardır. Bu durumun veri iletim hızına pozitif etkisi olsa da eNodeB UE'ye daha düşük veri iletim hata oranında maksimum verim ile datayı yollamak isteyecektir. Bu nedenle UE kabiliyetine göre değişen, eNodeB'den UE'ye doğru iletilecek veri formatı için farklı senaryolara bağlı olarak farklı birer TM tanımının yapılması gerekmektedir. İletilecek olan veri kodlanıp modüle edildikten sonra farklı katmanlarda (anten elemanlarında) tanımlanır. Bu durum sıra belirteci (Rank Indicator, RI) olarak adlandırılır. 3GPP Release-8'de aynı anda dörde kadar verinin Tx yönünde iletimine imkan tanımaktadır ($RI_{max}=4$). Bu dört Tx katmanda yedi farklı TM tanımlanmıştır. Bu TM'ler anten elemanları üzerinde iletilecek olan verilerin nasıl çeşitleneceği hakkında bilgi vermektedir. Release-9 ve Release-10'da yeni TM'ler tanımlanarak aşağıdaki çizelgede de göreceğiniz toplam TM sayısı dokuza yükseltilmiştir.

TM1 tek anten elemanı üzerinden veri iletimini benimserken TM2 MIMO'nun temeli olarak birden fazla anten elemanı üzerinden aynı verinin iletimini benimser. Açık

çevrim olması nedeni ile verinin abone UE'sine gittiğinin geri bildirimini gönderici yönünde beklemeye gerek yoktur. TM2 ayrıca, SM'in kötü hava arayüz senaryolarında geri dönüş senaryosu olarak da tanımlanmaktadır. Yüksek veri iletimini sağlamak için SM tüm koşullarda kullanılmaya çalışılır, ancak kötü hava arayüz koşullarında SM kullanıldığı zaman eNodeB tarafından iletilen sinyalin alıcıya ulaşma ihtimali de düşecektir. Bu durum veri iletim hata oranının artmasına ve aynı verinin eNodeB'den tekrar iletimine gerek duyacaktır ki kesinlikle istenmez. ENodeB tarafından tercih edilen en önemli koşul, verinin mümkün olan minimum seferde alıcı UE'sine doğru iletilmesidir ki bu durumda veri iletim verimi artacaktır. SM, kötü hava arayüz koşullarında direkt TM2 senaryosuna dönüşür ki verinin alıcı UE'sine ulaşma ihtimali iki kat daha da artırılmış olur.

Çizelge 2.1 : İletim modları.

İletim Modu (TM)	**Açıklama**
TM1	Tek Antenli İletim (Single Antenna Transmission)
TM2	İletim Çeşitlemesi – Açık Çevrim (Transmit Diversity – Open Loop)
TM3	Uzaysal Çoğullama – Açık Çevrim (Spatial Multiplexing – Open Loop)
TM4	Uzaysal Çoğullama – Kapalı Çevrim (Spatial Multiplexing – Closed Loop)
TM5	Çoklu Kullanıcılı MIMO (Multiuser MIMO)
TM6	İletim Çeşitlemesi – Kapalı Çevrim (Transmit Diversity – Closed Loop)
TM7	Hüzme şekillendirme – Ma-MIMO destekli (Beamforming – Ma-MIMO Supported)
TM8	Çift Katmanlı Hüzme şekillendirme – Ma-MIMO destekli (Dual Layer Beamforming – Ma-MIMO Supported)
TM9	8 katmana kadar Uzaysal Çoğullama (Spatial multiplexing up to 8 layers)

SM modları TM3 ve TM4 ile tanımlanır ki bu iletim modları sırası ile açık çevrim ve kapalı çevrim kabiliyetlerine sahiptir. TM3 ve TM4'te birden fazla anten elemanı üzerinden farklı verilerin iletimi hedeflenir. TM4'te ise farklı olarak alıcı UE'si her veri iletim aralığı boyunca kanal kalite belirteci (Channel Quality Indicator, CQI), sıra belirteci (Rank Indicator, RI) ve önkodlama matris belirteci (Precoding Matrix Indicator, PMI) bilgilerini UL yönünde eNodeB'ye raporlar. TM2, TM3 ve TM4 modları tek kullanıcılı MIMO senaryolarında kullanılır. Amaç fiziksel DL paylaşımlı kanal (Physical Downlink Shared Channel, PDSCH) üzerinde abone için daha fazla kaynak kullanımına imkan tanımaktır. PDSCH kanalı aboneye DL yönünde veri iletimini sağlamaktan sorumludur. 2 Tx MIMO kanalında SM ile 150 Mbps hızlara erişilirken, 4 Tx MIMO kanalında SM kullanımında PDSCH teorik hızları maksimum 300 Mbps olacaktır.

TM5'teki çok kullanıcılı MIMO (multi user MIMO, MU-MIMO) ile aynı zaman-frekans kaynağını kullanarak farklı katmanlar farklı kullanıcılara hem UL hem de DL yönünde atanabilirler. UL'de eNodeB aynı kaynağı farklı kullanıcılara farklı zaman-frekans düzleminde MU-MIMO ile dağıtacağından UL esnasında her bir alıcı UE'si için birbirine dik referans semboller kullanır ki, farklı UE'lerin birbirine yapacağı gürültü seviyesi kontrol altına alınabilsin. DL'te ise TM5 MU-MIMO ile her bir UE'ye sadece Rank 1 formatında data iletir (Rank 1: tek bir kanal üzerinden veri akışı). Bu durum DL yönünde eNodeB'nin sahip olduğu anten sayısından bağımsızdır.

TM6 ise TM4'ün özel bir formudur ve TM4'ten farklı olarak TM6'da sadece tek bir kanal üzerinden veri akışı sözkonusudur. UE kendine DL yönünde gelen sinyaldeki değişimi ölçümleyerek UL yönünde en uygun PMI'ı iletir. TM7 ve TM8'de ise sırasıyla tek kanal ya da iki kanal üzerinden hüzme şekillendirme söz konusudur. Release-10 tarafından eklenen TM9'da ise 8x8 MIMO'ya imkan tanıyacak 8 tane Tx kanalı üzerinden veri iletimine imkan tanınacak bir kanal modellemesi tanımlanmıştır.

UE DL yönünde eNodeB'den gelecek sinyali dinlerken sinyalin kaç anten tarafından ve hangi TM ile geleceğini bilemediği için tüm Rx antenleri ile gelen sinyali alıp (sadece kendi sinyalini değil, aynı zamanda ilgili hüzme içinde gelen diğer sinyalleri ve ortamın gürültüsünü de alarak) kendi için gönderilen sinyal dizisini belirlemelidir. Çeşitli frekans hüzmeleme teknikleri ile eNodeB tarafından gönderilen sinyalin UE tarafından alınması sağlanır.

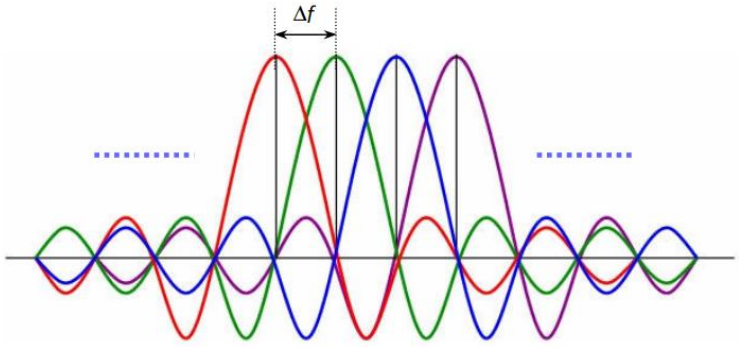
2.3 OFDM Özellikleri

OFDM tekniği, çoklu dar bant alt taşıyıcıların geniş bir kanal bant üzerinde kullanılmasına dayanır. Her bir dar bant alt taşıyıcı frekans düzleminde birbirine diktir. Bunun amacı semboller arası gürültü (Inter Symbol Interference, ISI) ile mücadeleyi sağlamaktır ve aşağıdaki Şekil 2.1'de verilir.

Veri içeren bilgi akışları, iletilmek üzere alt taşıyıcılara dağıtılır. Bu dağıtılma süreci belli bir zaman dilimindedir ve faydalı sembol uzunluğu (T_s) olarak tanımlanır. Verinin kablosuz hava ara yüzünde yayılması öncelikle zamana göre dağınıktır. Gönderilen sinyalin çeşitli sayıda benzerleri, verici alıcı arasındaki yolda bulunan çeşitli fiziksel etkenler nedeni ile, alıcıya belli sayıda ve zamanda belli değişimler ile gider. Verici tarafından gönderilen modüle edilmiş bir sinyalin zamana göre dağılmış farklı genlikteki benzerleri nedeni ile alt taşıyıcılar arasındaki diklik bir miktar bozulmaktadır. Bu durumda ISI'nın başarılı bir şekilde bastırılması zora girer. ISI'yı önlemek ve birbiri üzerine girişmiş sembolleri ayrıştırmak amacı ile OFDM sembollerin başına bekçi ayıracı olarak bilinen (T_g) bir zaman ayıracını tanımlamak gerekecektir. T_g bekçi ayıracı ya da diğer adı ile çevrimsel ön ek (Cyclic Prefix, CP) aslında sembol sonundaki bilgilerin kopyası olan verileri içerir. Sonuçta l. OFDM sembol uzunluğu

$$T_l = T_s + T_g \tag{2.1}$$

olarak tanımlanır.

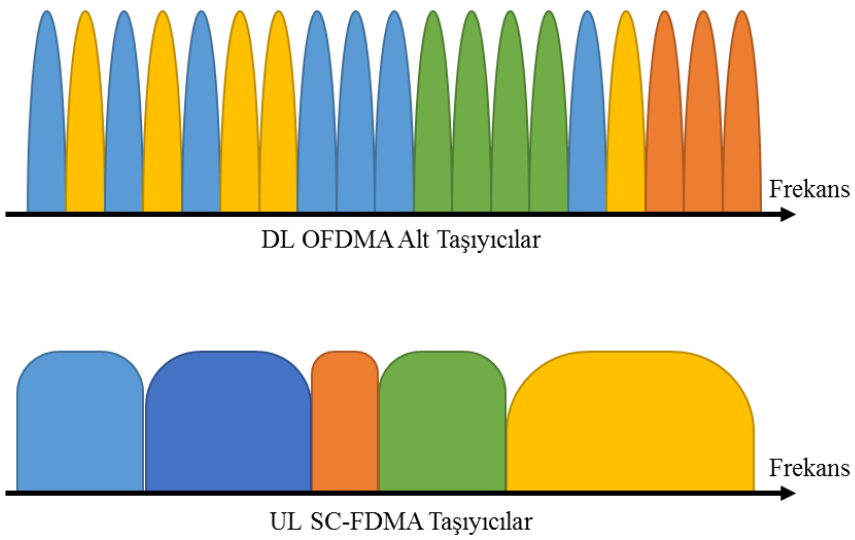


Şekil 2.1 : OFDM alt taşıyıcı yapısı.

Mobil erişim sistemlerinde OFDM tekniğini kullanmanın çeşitli avantajları vardır, şöyle ki;

- T_l'nin T_g'yi içermesi nedeni ile çoklu yol kaynaklı artan ISI'yı bastırma kabiliyeti yüksektir.
- Farklı bant genişliklerini kullanabilecek frekans spektrumunun esnekliğinin sağladığı verim sözkonusudur.
- Alt taşıyıcılar arasındaki diklik nedeni ile spektral verimlilik, veri iletim başarım oranı yüksektir.
- Hücre içinde servis alan her kullanıcı için, kullanıcı bazlı ölçümler sonucu en uygun alt taşıyıcı ya da taşıyıcı kümesinin veri akışı sorumluluğunu üstlenmesi sayesinde yüksek optimizasyon yeteneği sunar.

En son madde birbirine dik frekans bölüşümlü çoğullama erişimi (Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access, OFDMA) tekniğinin temelidir ki OFDM'in diklik kabiliyetinin sağladığı önemli bir özelliktir. Çok sayıda kullanıcı OFDM alt taşıyıcı kanalları aynı anda kullanarak sağlıklı bir şekilde veri iletim kabiliyetine aynı anda erişilebilir. Veri içeren bilgi kanallarının yanı sıra kontrol kanalları ve referans semboller de dağıtılmıştır. Kontrol kanalları şebeke hakkındaki sinyalleşme bilgilerini taşırken referans semboller de kanal yayılımı ile ilgili kabiliyeti sunmaktadır.



Şekil 2.2 : DL ve UL taşıyıcı yapıları.

LTE teknolojisinde DL yönünde OFDMA kullanılır. Tanımlı avantajlarının yanı sıra DL/UL arasındaki frekans farklılıklarının yarattığı Doopler değişiminin mobiliteye etkisi ve yüksek tepe ortalama güç oranına (Peak-to-Average Power Ratio, PAPR) sahip olması nedenli bazı negatif yansımaları da vardır. PAPR'de temel motivasyon, yan kanal gürültü (Co-Channel Interference, CCI) etkisini bastırmak amacı ile ilgili alt taşıyıcının gücünün artırılmasıdır. PAPR'yi sağlıklı yapabilmek için kuvvetli güç yükselteçlerine ve bu yükselteçlerin yüksek ölçüde doğrusal çalışmasına ihtiyaç vardır. Bu kabiliyet eNodeB'de yapılabilir ama maliyet nedeni ile UE'de tercih edilmemektedir. Bu nedenle UE tarafında UL için OFDMA'den farklı olarak SC-FDMA kullanılır. UL ve DL taşıyıcıların sembolik gösterimi Şekil 2.2'de sunulmuştur.

Temelbantta *N* alttaşıyıcılı *l.* OFDM sembolü aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$x_l(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=-N/2}^{\frac{N}{2}-1} X_{k,l} e^{\frac{j2\pi kt}{NT}} g(t - T_l), \qquad l = 0,1,2, \dots \tag{2.2}$$

Burada, iletilmek istenen işaretler $\{X_{k,l}\}_{k=-N/2}^{\frac{N}{2}-1}$olarak gösterilmiştir ve *N* çift sayı olarak varsayılmıştır. Denklemde $g(t), t \in (-T_g, T_S]$ aralığında sabit bir değer alan kare dalgadır. P adet yoldan oluşan zamandan değişebilen çok yollu kanalı

$$h(t) = \sum_{p=0}^{P-1} h_{p,l}(t)\delta(t - T_p) \tag{2.3}$$

olarak ifade edersek, kanal çıkışı $y_l(t)$ olarak şöyle yazılabilir:

$$y_l(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{p=0}^{P-1} h_{p,l}(T_p) \sum_{k=-N/2}^{\frac{N}{2}-1} X_{k,l} e^{\frac{j2\pi k(t-T_p)}{NT}} \tag{2.4}$$

Burada taşıyıcılar arası girişimin engellenmesi için koruma bandının yeteri kadar büyük olduğu varsayılabilir ($T_p \leq T_g, \forall p$), böylece *g(t)*'nin ilgili zamanda genliği 1 alınmıştır.

En genel durumu modellemek için frekans, faz, örnekleme periyodu ve örnekleme fazı sapmalarını sırasıyla $\Delta_f, \emptyset, \Delta_t$ ve $\tau_0(l)$ olarak gösterilmiştir. Bu durumda alınan işaret

$$z_l(t) = y_l(t)e^{j2\pi\Delta_f t+\emptyset} + w_l(t) \quad (2.5)$$

olarak gösterilebilir. Formül (2.5)'te $w_l(t)$, sıfır ortalamalı, sabit ve çift taraflı $N_0/2$ W/Hz güç yoğunluk fonksiyonlu toplamsal Gauss gürültüsünü (Additional White Gaussian Noise, AWGN) ifade etmektedir.

2.3.1 Örnekleyici çıkışı

Alıcıda $z_l(t)$'nin en az T saniyede bir kere örneklenmesi beklenmektedir. Bu örnekleme zamanı voltaj kontrollü osilatör (voltage controlled osilator, VCO) kullanılarak belirlenmektedir. VCO'lar ideal bir şekilde çalışmadıklarından, kullanımları kapsamında çeşitli zaman sapmaları gözlenebilmektedir. Burada tanımlı sapma değerleri kullanılarak *n.* sembolün $n(1+\Delta_t)T + \tau_0(l)$ zamanında örneklendiği görülebilir. Belirtilmelidir ki, örnekleme fazı sembol indeksinin bir fonksiyonudur ve sembol indeksi arttıkça örnekleme fazının mutlak değeri de artmaktadır.

Bu durumda alınan *n.* sembol z_n, aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$z_{n,l} = y\big(n(1+\Delta_t)T + \tau_0(l)\big)e^{j2\pi\Delta_f\left(n+(1+\Delta_T)T+\tau_0(l)\right)+j\emptyset} + w_{n,l} \quad (2.6)$$

Burada $w_{n,l} = w(n(1+\Delta_t)T + \tau_0(l))$ olarak ifade edildi. Çalışmamızda VCO sapmasının etkisini incelemek için frekansa bağlı sapmaların sıfır olduğu varsayılmıştır ($\Delta_f = \emptyset = 0$), ancak bu değerin sıfırdan farklı olabileceği göz ardı edilmemelidir. Bu durumda alınan işaret;

$$z_{n,l} = \frac{1}{\sqrt{N}}\sum_{p=0}^{M-1} h_p\big(n(1+\Delta_T)T + \tau_0(l)\big)\sum_{k=-N/2}^{\frac{N}{2}-1} X_{k,l}e^{\frac{j2\pi kn(t-\Delta_t)}{N}}e^{\frac{j2\pi k(\tau_0(l)-T_p)}{NT}} + w_{n,l} \quad (2.7)$$

olarak gösterilebilir. Kanalın bir OFDM sembolü süresince (T_s+ T_g) değişmediğini varsayarsak, kanalın frekans cevabını

$$H_{k,l} \coloneqq \sum_{p=0}^{P-1} h_p e^{-j\frac{2\pi k T_p}{NT}} \tag{2.8}$$

olarak tanımlayabiliriz. Bu durumda alınan *n.* sembol;

$$z_{n,l} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=-N/2}^{\frac{N}{2}-1} H_{k,l} X_{k,l} e^{\frac{j2\pi kn(t-\Delta_t)}{N}} e^{\frac{j2\pi ks(l)}{N}} + w_{n,l} \tag{2.9}$$

olarak gösterilebilir. Yukarıdaki ifadede $s(l) \coloneqq \tau_0(l)/T$ olarak tanımlanmıştır. Örnekleme fazının sembol indeksine göre değişimi aşağıdaki ilişki ile gösterilebilir.

$$\tau_0(l) = l\left(NT + T_g\right)\Delta_t + \tau_0(0) = lTP\Delta_t + \tau_0(0) \tag{2.10}$$

Burada $R \coloneqq N + T_g/T$ olarak tanımlanmıştır ve bir OFDM sembolündeki toplam örnek sayısını ifade etmektedir. Böylece $s_0 = \tau_0(0)/T$ olmak üzere, $s(l) = lR\Delta_t + s_0$ olarak ifade edilebilmektedir. Bu tanımların yardımı ile (2.10)'daki ilişki

$$z_{n,l} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=-N/2}^{\frac{N}{2}-1} H_{k,l} X_{k,l} e^{\frac{j2\pi kn(t-\Delta_t)}{N}} e^{\frac{j2\pi k(lR\Delta_t+s_0)}{N}} + w_{n,l} \tag{2.11}$$

olarak gösterilebilir.

2.3.2 DFT çıkışı ve örnekleme sapmaları

Ayrık Fourier transformu (Discrete Fourier Transform, DFT) bloğu çıkışında ise

$$z_{q,l} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=-N/2}^{\frac{N}{2}-1} z_{n,l} e^{\frac{-j2\pi qn}{N}} \tag{2.12}$$

elde edilecektir (*q=–N/2, …, N/2–1*). Alınan *q.* alt taşıyıcı aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$z_{q,l} = \frac{1}{N}\sum_{k=-N/2}^{\frac{N}{2}-1} H_{k,l}X_{k,l}e^{\frac{j2\pi k(lR\Delta_t - s_0)}{N}}e^{\frac{-j2\pi(N-1)(k(1+\Delta_t)-q)}{N}} \frac{\sin\left(\pi(k(1+\Delta_t)-q)\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{N}(k(1+\Delta_t)-q)\right)} + w_{q,l} \quad (2.13)$$

Burada $w_{q,l}$, frekanstaki AWGN bileşenini ifade etmektedir. $\Delta_T << 1$ değerleri için sinüs terimlerinin oranı yaklaşık 1 olacaktır.

$$\widehat{H}_{q,l} \coloneqq \frac{H_{q,l}}{N}e^{\frac{j2\pi q s_0}{N}}e^{\frac{-j\pi q\Delta_t(N-1)}{N}} \quad (2.14)$$

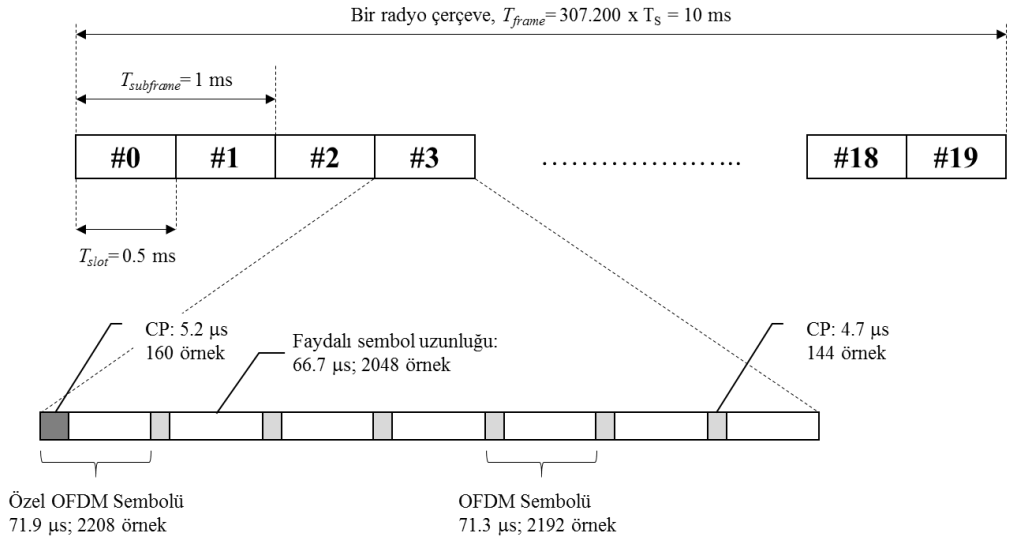
olarak tanımlanır ise 2.13 eşitliği

$$z_{q,l} = X_{q,l}\widehat{H}_{q,l}e^{\frac{j2\pi qRl\Delta_t}{N}} + ICI_{q,l} + w_{q,l} \quad (2.15)$$

olarak yazılabilir. $ICI_{q,l}$ alttaşıyıcılar arasında oluşan girişim terimini göstermektedir. Belirtilmelidir ki $\widehat{H}_{q,l}$ sabit bir terimdir ve sembol indeksi ile değişmemektedir. Bu nedenle, ideal çalışan bir kanal dengeleyici ile bu bileşenin etkisi ortadan kaldırılabilir. Fakat diğer faz terimi, $e^{\frac{j2\pi qRl\Delta_t}{N}}$, sembol indeksi ile değişmemektedir ve iletim verimliliğini artıran uzun çerçevelerin kullanılması durumunda alınan işaretlerin sembol uzayında dönmesine neden olmaktadır.

2.4 Fiziksel Katman Parametreleri

Zaman ekseninde LTE'deki farklı zaman aralıkları T_l=1/30.720.000 birim değerin katsayıları olarak ifade edilir. 30.720.000 değeri Hz cinsinden bir alt taşıyıcı alanı (15.000 Hz) ile FFT dönüşümü olan 2048 değerin çarpılması ile elde edildi. Radyo çerçeve ise 10 ms'lik bir alanda ifade edilir (T_{frame}=307.200 *x* T_l). Her çerçeve 10 eşit parçadaki 1 ms'lik alt çerçevelerden oluşur ($T_{subframe}$=30.720 *x* T_l). Kaynak tahsisi alt çerçeve bazlı tanımlanır. Her alt çerçeve bu nedenle 0.5 ms'lik 2 slot ile ifade edilir (T_{slot}=15360 *x* T_l). Her slot belli sayıdaki OFDM sembolden oluşur. Şekil 2.3, FDD modda LTE'nin çerçeve yapısını göstermektedir.



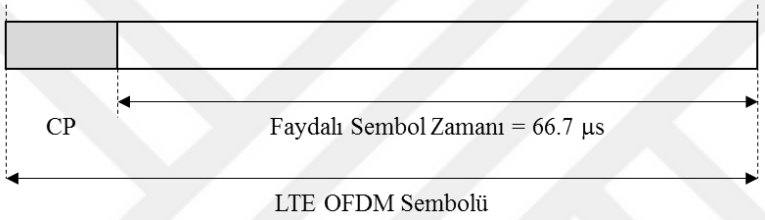
Şekil 2.3 : FDD çerçeve yapısı.

Faydalı sembol uzunluğu 2048 semboldür (*Ts*) ve zaman olarak 66.7 µs civarındadır. Normal modda ilk sembol T_g=160 uzunluğunda ya da zaman karşılığı 5.2 µs olan bir CP içerir. Kalan 6 semboldeki CP sembol uzunluğu T_g=144 ve zaman karşılığı 4.7 µs'dir. Bu farklılığın nedeni aslında tamamen matematiksel bölünebirlik ile alakalıdır.

Çizelge 2.2 : LTE DL fiziksel katman parametreleri.

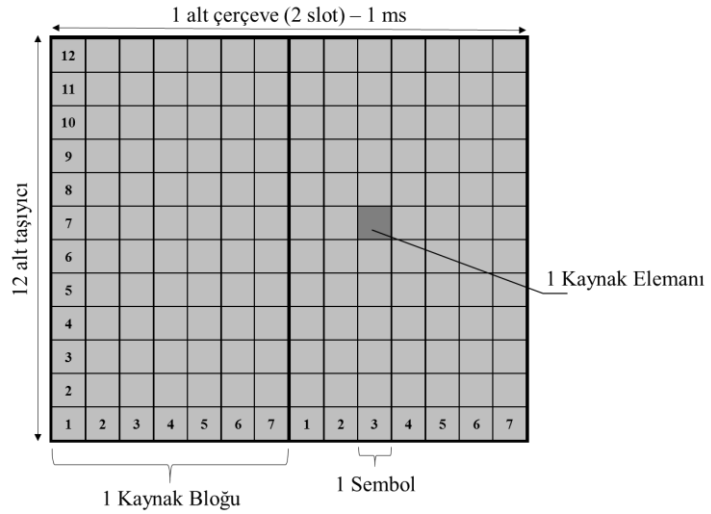
Kanal Bant Genişliği (MHz)	1.25	2.5	5	10	15	20
Çerçeve Süresi (ms)	10					
Alt Çerçeve Süresi (ms)	1					
Alt Taşıyıcı Mesafesi (kHz)	15					
Örnekleme Frekansı (MHz)	1.92	3.84	7.68	15.36	24.04	30.72
FFT Boyutu	128	258	512	1024	1536	2048
Kaynak Blok Sayısı (RB)	6	12	25	50	75	100
Data Kanal Bantgen. (MHz)	~1.1	~2.2	~4.5	~9	~13.5	~18
DL Bantgenişliği Verimi	%77	%90	%90	%90	%90	%90
OFDM Sembol/Alt Taşıyıcı	7/6 (normal/uzatılmış CP)					
CP Uzunluğu (Normal) µs	5.2 (ilk sembol) / 4.69 (takip eden altı sembol)					
CP Uzunluğu (Uzatılmış)	16.67					

Uzatılmış modda ise CP uzunluğu $T_{g\text{-}e}=512$ ve zaman karşılığı $16.7\ \mu s$'dir. Normal CP yüksek veri iletim hızı gerektiren şehir içi hücrelerde kullanılırken uzatılmış CP ise kırsal sahalarda tercih edilir. Normal CP fiziksel katman kapasitesinin %7,5'luk kısmını kullanır. CP'nin neden olduğu bu ek yükün etkisini azaltmanın yolu alt taşıyıcılar arasındaki mesafeyi azaltmaktır. Ancak bu durum yüksek mobilite ve kanal karakteristiğinin sık değiştiği hava arayüz ortamlarında sistemin çok daha fazla gürültü bileşenine maruz kalmasına ve kalitesinin bozulmasına neden olur. Frekans düzleminde alt taşıyıcıların sayısı 128'den 2048'e kadar değişmektedir (N). Alt taşıyıcılar arasındaki mesafe de $\Delta f = 1/Ts = 15\ KHz$'dir. Bant genişliğine bağlı olarak değişen genel fiziksel katman parametreleri Çizelge 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.4 : Sembol yapısı.

LTE fiziksel katman mimarisindeki kaynak blokları ve kaynak eleman tanımları Şekil 2.5'te basit olarak ifade edilmektedir.

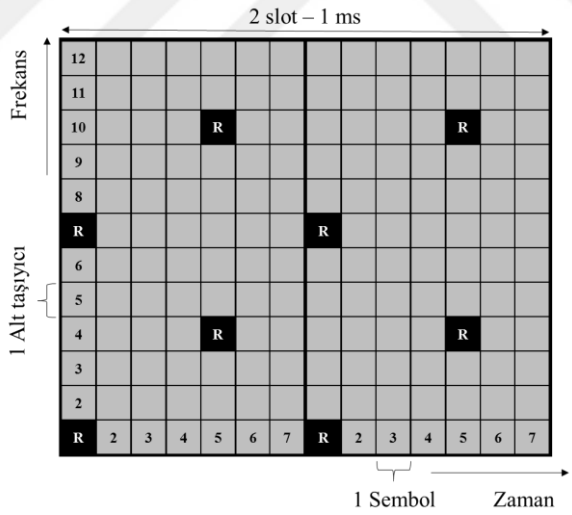


Şekil 2.5 : Normal CP modda temel tanımlamalar.

2.5 Referans Sinyaller

2.5.1 DL referans sinyaller

UE'de tutarlı bir demodülasyon yapılabilmesi için, OFDM zaman-frekans düzlemine kanal kestirimi yapılması amacıyla referans sembolleri (pilot semboller olarak da bilinir) eklenir. DL referans sembolleri her slotun 1. ve sondan 3. sembolüne altı alt-taşıyıcı atlayarak eklenir. Şekil 2.6'da sembollerin grid'e nasıl yerleştirildiği gösterilmiştir. 1. ve sondan 3. sembollerde yer alan referans kaynak elemanları arasında 3 alt-taşıyıcılık bir ofset bulunur. Bu işlemlerin sonucunda her kaynak blokta dört adet referans sinyali bulunması sağlanır. UE bu referans sinyaller dışında kalan kanalı bulmak için referans sinyaller sayesinde interpolasyon yaparak kanal kestirimi yapar. eNodeB'de iki adet iletim anteninin bulunması durumunda, ikinci anten için aynı sembollerde üçer alt taşıyıcılık ofsetler ile referans sembol eklenir. Antenlerden herhangi bir antenin referans sinyali göndermesi durumunda diğer antenlerde o alt-taşıyıcı boş bırakılarak kanal kestiriminin yapılabilmesine yardımcı olunur.



Şekil 2.6 : Referans sembollerin kaynak blok içinde dağılımı.

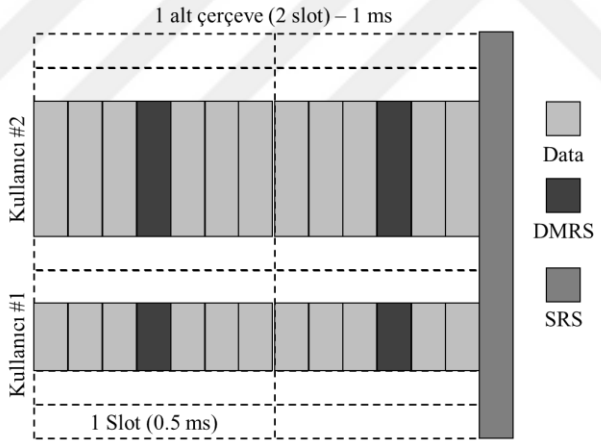
Referans semboller, sembol pozisyona ve hücre bilgilerine göre belirlenen kompleks değerli sayılardır. LTE standartları LTE hücre kimliğini belirten iki boyutlu referans sinyal dizilerini tanımlar. 510 değişik fiziksel hücre kimliği (Physical Cell ID, PCI) için karşılık olarak 510 referans sinyal dizisi bulunur. Referans sinyalleri iki boyutlu Psödo rastgele dizi (Pseduo Random Sequance, PRS) ve iki boyutlu ortagonal dizi

kullanılarak oluşturulur. 170 Cell-ID grubuna denk gelen 170 adet PRS ve her 170'lik grup için üç adet ortagonal dizi bulunur.

2.5.2 UL referans sinyaller

LTE UL'de iki farklı referans sinyal bulunur. Bunlardan birincisi demodülasyon referans sinyalidir (Demodulation Reference Signal, DMRS). DMRS eNodeB'de tutarlı kanal kestirimi yapabilmek için kullanılır. DMRS sinyalleri UL data ile birlikte gönderilir, data ile aynı bant genişliğini kullanır ve UL SC-FDMA sembolünün 4. ya da 3. slotunda normal ya da uzatılmış CP'ye göre yer alır.

İkinci referans sinyal tipi ise sesli referans sinyalidir (Sounding Reference Signal, SRS). SRS kanal bağımlıdır (yani frekans seçici), bunun manası DMRS tüm UL bandında yayılırken SRS ise UE odaklı ve belli bir slottadır. Bu slot, Şekil 2.7'de de görüleceği üzere 1 ms'lik alt çerçevenin son SC-FDMA sembolünde geniş bir bant referans sinyali ile iletilir.



Şekil 2.7 : Normal CP ile DMRS ve SRS lokasyonları.

eNodeB bir UE'nin kanalını ona kaynak ayırmadığı yerlerde bilemez ve beklemez. Bu sebeple kanalının nerelerde iyi nerelerde kötü olduğunu, sadece UE'ye kaynak ayrılan yerlerde bilebilir. SRS, eNodeB'nin UL yönünde ilgili UE'ye ait kanal durumunu çıkarıp bir sonraki slotta daha tutarlı UL kaynak tahsisi yapmasını sağlar. Bu sembolün gönderileceği zaman aralığında UE'nin data göndermesine izin verilmez ve bu nedenle %7 civarında UL kapasite kaybı oluşur. SRS opsiyonel bir özellik olup ek yükü

düşürmek için konfigüre de edilebilir, ya da bir hücrede tamamen kapatıladabilir. Frekansın değişik yerlerine tahsis edilen UE'ler SRS'i frekans düzleminde paylaşırlar.

2.6 Fiziksel Kanallar

2.6.1 DL fiziksel kanallar

LTE'de, ortam erişim kontrol (Media Access Control, MAC) katmanı ve daha üst katmanlardan alınan bilgi bloklarını taşıyan belirli sayıda DL fiziksel kanalları tanımlıdır. Bu kanallar taşıyıcı ya da kontrol kanalları olarak kategorize edilir.

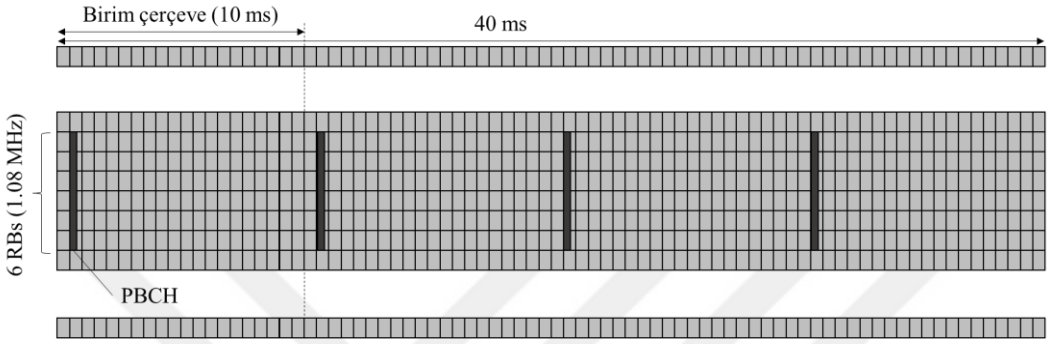
Taşıyıcı Kanallar

Fiziksel Yayılım Kanalı (Physical Broadcast Channel, PBCH): PBCH, DL sistem bant genişliği, Fiziksel hibrit ARQ belirteç kanalı (Physical Hybrid ARQ Indicator Channel, PHICH) gibi hücrenin ilk erişimi için gerekli olan sistem çerçeve numarasının en önemli sekiz bitine dair parametreleri yayınlar. Bu parametreler 14 bit uzunluğunda bir ana bilgi bloğu (Master Information Block, MIB) denilen formatta taşınır.

PBCH hücrede önceden sistem bant genişliği bilgisi olmadan tespit edilebilir ve erişilebilir olacak şekilde tasarlanmıştır. MIB çok düşük bir kodlama oranı ile kodlanıp OFDM yapısının en ortasındaki 72 alt-taşıyıcı (6 RB) üzerinde iletilir. Bunun amacı MIB bilgisinin alıcıya ilk iletim aktivitesi aşamasında ulaştığını garanti altına almaktır. Şekil 2.8'de görülebileceği gibi PBCH transmisyonu 10 ms'lik çerçeveler boyunca (0. alt çerçevede) 40 ms'lik bir periyoda dağılarak gönderilecek şekilde planlanmıştır. Her alt çerçeve iyi sinyal kalitesi olması durumunda UE bataryasını harcamamak ve gecikmeyi arttırmamak adına kendi kendine çözülebilecek bütün bilgileri içerir. Eğer UE PBCH kanalı sinyalini ilk denemede çözemezse kalan iletim periyotları boyunca soft birleştirme işlemine sokularak çözülene kadar PBCH kanalı sinyalini okumaya devam eder. Birden fazla anten olması durumunda daha geniş bir alanda erişim sağlanabilmesi için PBCH sinyalleri uzay frekans blok kodlama (Space Frequency Block Code, SFBC) kullanılarak gönderilir.

Fiziksel Aşağı Yönlü Paylaşım Kanalı (Physical Downlink Shared Channel, PDSCH): PDSCH, kaynak tahsis algoritması tarafından seçilen UE'lere kanal fiziki durumuna göre dinamik olarak bilgi içeren verilerin gönderilmesini sağlayan kanaldır. PDSCH verileri Taşıyıcı Bloğu (Transmission Block, TB) olarak bilinen bloklar

halinde taşır. Bir TB MAC katmanında bir MAC paket veri ünitesine (Packet Data Unit, PDU) karşılık gelmektedir. 1 ms'lik her iletim zaman aralığında (Transmission Time Interval, TTI) bu bilgiler MAC katmanından fiziksel katmana taşınır (1 ms'lik süre aynı zamanda düşük gecikme gereksinimlerini yerine getirmek için belirlenmiştir).



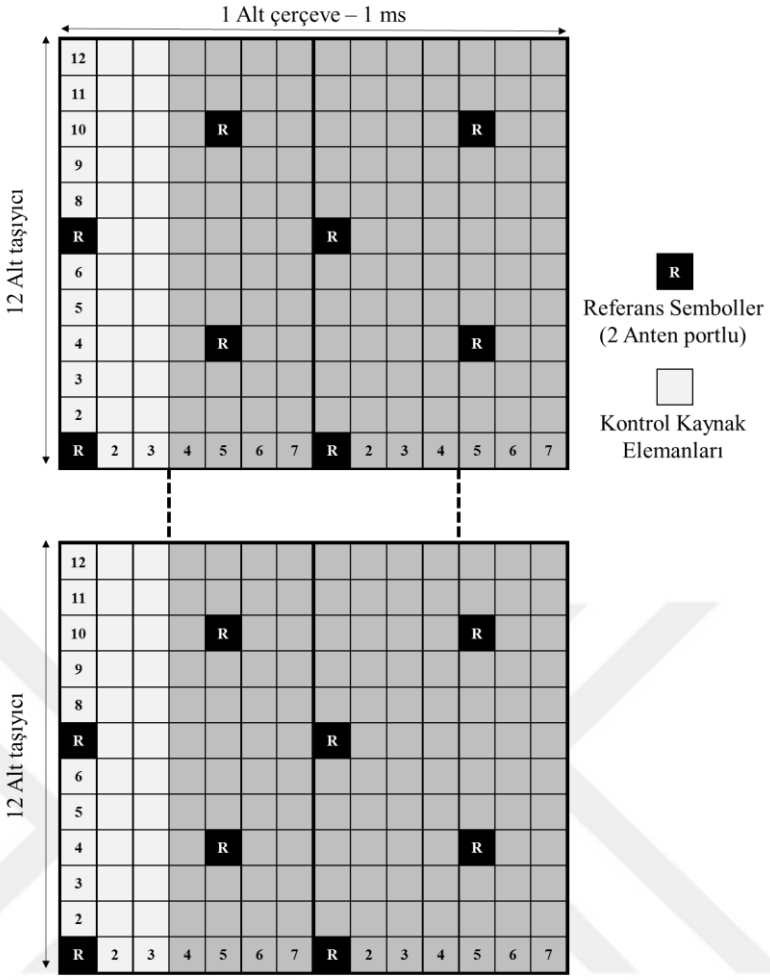
Şekil 2.8 : PBCH Yapısı.

Fiziksel iletim kanalında oluşan hataları düzeltmek için ileri hata düzeltme metodu olan katlamalı turbo kodlama (Convolutional Turbo Coding, CTC) kullanılır [43]. Veri öncelikle kullanılan çoklu anten tekniğine göre uzaysal katmanına yerleştirilir (Kapalı Döngü Uzaysal Çoğullama – Closed Loop Spatial Multiplexing, Açık Döngü Uzaysal Çoğullama – Open Loop Spatial Multiplexing, İletim Çeşitlemesi – Transmission Multiplexing gibi). Sonrasında dördün evre kaydırmalı kiplenim (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK), 16-QAM ya da 64-QAM gibi modülasyon sembolüne çevrilip frekans düzleminde bulunması gereken yerlere yerleştirilir.

PDSCH aynı zamanda PBCH ile gönderilmeyen bazı yayılım bilgilerinin gönderilmesine de yarar. Bu bilgiler Sistem Bilgi Bloğu (System Information Block, SIB) ve arama (paging) mesajlarıdır.

Kontrol Kanalları

Kontrol bilgileri, Şekil 2.9'da gösterildiği gibi tüm sistem bant genişliği boyunca uzanan bir alt çerçevedeki ilk bir, iki veya üç OFDM sembolünü kaplar. Dar bant genişliğine sahip sistemlerde (10 RB'den az), kontrol simgeleri 4. OFDM sembolünü de içerecek şekilde arttırılabilir.



Şekil 2.9 : Üç OFDM sembollü kontrol kanal yapısı.

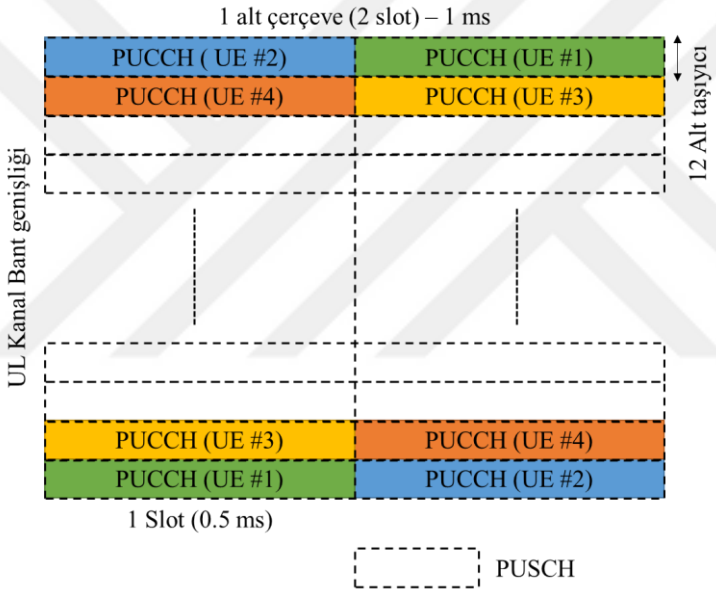
Fiziksel Aşağı Yönlü Kontrol Kanalı (Physical Downlink Control Channel, PDCCH): PDCCH DL kontrol bilgisi (Downlink Control Information, DCI) içeren bilgileri göndermeye yarar. DCI UE'lere yapılan kaynak ataması bilgilerini içerir. Aynı alt çerçevede birden fazla PDCCH gönderilebilir. Bir PDCCH kontrol kanal elemanlarından (Control Channel Elementi, CCE) oluşur ve bir CCE 9 tane kaynak eleman grubundan (Resource Element Group, REG) oluşur. Bir REG 4 adet kaynak elemanından oluşur. PDCCH için yalnızca QPSK modülasyonu kullanılır. Dört adet QPSK sembolü her REG'e atanır. İletim kanalı kalitesine göre bir UE'ye bir, iki, dört, ya da sekiz tane CCE atanabilir.

Fiziksel Kontrol Format Bilgisi Kanalı (Physical Control Format Indicator Channel, PCFICH): Bu kanal kontrol bilgilerinin kaç adet OFDM sembolünde iletileceğini UE'ye göndermek için kullanılır. 32-bit uzunluğundaki bu belirteç ilk OFDM sembolünde 16 kaynak elemanı ve QPSK modülasyonu kullanılarak iletilir.

2.6.2 UL fiziksel kanallar

LTE'de tanımlı 3 adet UL fiziksel kanal mevcuttur.

Fiziksel Yukarı Yönlü Paylaşım Kanalı (Physical Uplink Shared Channel, PUSCH): Bu kanal kullanıcı verisi taşımakta kullanılır. QPSK ve 16-QAM modülasyonlarının yanı sıra 64-QAM modülasyonu da opsiyonel olarak kullanılabilir. Bilgi bitleri öncelikle 1/3 formatlı turbo kodlandıktan sonra uygun kodlama oranına getirilmesi için oran eşitleme (rate-matching) olarak bilinen bir prosedürden geçirilir. Ardışık veri sembolleri ardışık SC-FDMA sembollerine zaman düzleminde yerleştirilir.



Şekil 2.10 : PUCCH kanal yapısı.

UL için en küçük kaynak atama döngüsü DL'te olduğu gibi 1 ms olarak tanımlanmıştır. Ama, aynı zamanda hücre uç kenarlarında performansı iyileştirmek ve üst katman protokol yükünü azaltmak için dört TTI'ı birleştirmek (bundling) mümkündür. Bu durumda, MAC PDU'su TTI'larda iletilmek üzere bölünür. Frekans düzleminde iletimler 180 kHz'lik kaynak blokların katları şeklinde atanarak yapılır. Aynı zamanda slotlar arası frekans atlama opsiyonu kullanılarak ikinci slotta farklı bir kaynak blok grubu kullanılıp frekans çeşitliliği yaratarak kazanç sağlamak, komşu hücrelerdeki girişim etkisini farklı dizi-atlama dizisi kullanarak ortalama bir değerde tutmak da bir opsiyon olarak bulunur.

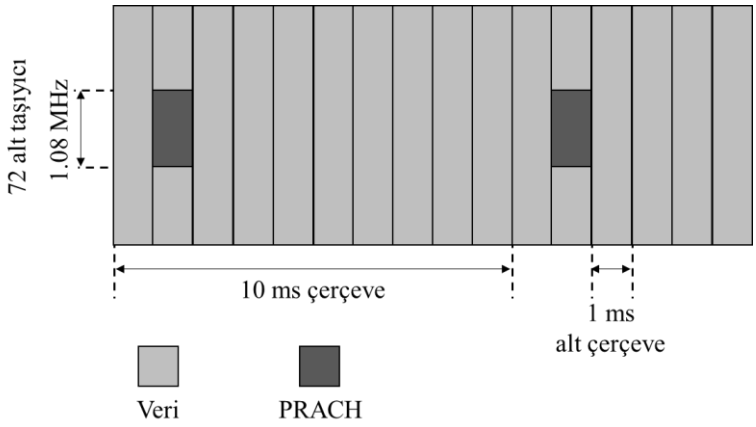
Fiziksel Yukarı Yönlü Kontrol Kanalı (Physical Uplink Control Channel, PUCCH): Kontrol sinyalleşmesi trafik verisinden bağımsız olarak hibrit otomatik tekrar talebi (Hybrid Automatic Request, HARQ) onaylama/reddetme (Acnowledgement/Not Acnowledgement, ACK/NACK), CQI, RI, PMI ve UL iletim için kaynak atama istekleri (Scheduling Request, SR) gibi bilgilerinden oluşur. Bu kanal Şekil 2.10'da gösterildiği gibi sistem bant genişliğinin en uç noktalarında kalan alt-taşıyıcılar ile iletilir. Bir PUCCH kanalı sistem bantgenişliğinin 1 RB için kullandığı kısmını diğer RB için tam zıt noktada bulunan RB'yi kullanacak şekilde ayarladığı için frekansta çeşitlilik kazandırarak yaklaşık 2 dB civarında kazanç sağlar.

Çizelge 2.3'te değişik sistem bant genişliklerinde kullanılan PUCCH kanal boyutları gösterilmiştir.

Çizelge 2.3 : PUCCH kanal boyutları.

Sistem Bant Genişliği (MHz)	1.25	2.5	5	10	15	20
PUCCH Kontrol Alanı	1	2	4	8	12	16
Kaynak Blok Sayısı	2	4	8	16	24	32

Fiziksel Rastgele Erişim Kanalı (Physical Random Access Channel, PRACH): Bu kanal UE'nin LTE şebekesine erişebilmek için senkronize olmadan gönderdiği ve zamanlamasını eNodeB ile senkronize ettiği rastgele erişim ön eki olarak bilinen sinyalin iletilmesinde kullanılır. Şekil 2.11'de gösterildiği gibi frekans düzleminde 72 alt-taşıyıcı kullanır (6 Kaynak Bloğu, 1.08 MHz). FDD LTE'de dört farklı rastgele erişim ön ek formatı bulunur ve bu formatlar CP uzunluğu değişen hücre boyutlarına uyum sağlamak için oluşturulmuştur.



Şekil 2.11 : PRACH iletim yapısı.

2.7 Sonuç

Bu bölümde LTE teknolojisinin temelini oluşturan tüm mimari bileşenlere değinilmiştir. LTE teknolojisinin genel hatları ile özellikleri, bu teknolojisinin en temel birimi olan OFDM çoklu erişim modeli veri motifi, iletim modları ve relase'ler içindeki gelişimi, fiziksel kanal modeli, referans sinyal ve UL-DL fiziksel kanallara değinilmiştir. Çoklu anten elemanlarının kullanımı, abone bazlı referans sinyallerin okunması ve esnek bant genişliklerinin performans etkileri üzerine değerlendirmelerde bulunulmuştur.

3. VERİ ANALİZ VE VALİDASYON YÖNTEMİ

Sadece kablosuz haberleşme teknolojilerinde değil aynı zamanda farklı sektörlerde de müşterilere sunulan tüm servislerde, sunulan servisin performansının belli metrikler ile kalitesinin ölçümlenmesi gereklidir. Bu bölümde tez çalışması boyunca yapacağımız tüm çalışmaların ölçüm metodolojisinin nasıl tasarlandığı ve anlamlı hale getirilmesi için ne gibi adımlardan geçtiği belirtilecektir.

3.1 Performans Ölçüm Metodolojisi

Tüm farklı servisler için ölçümlenecek kriterler, bu kriterlerin ölçüm sıklığı, nasıl ölçümleneceği ve paylaşım formatı, tasarlanan ve uygulanan çok katmanlı performans izleme sistemi üzerinde hayata geçecektir. Performans izleme sistemi, anahtarlama ekipmanları, hücresel baz istasyonları, iletim hatları, IP ve veri ağları dahil olmak üzere şebekenin tüm katmanlarının davranışının doğru ve eksiksiz bir performansını görüntülemek amacı ile inşaa edildi. Aynı zamanda belirlenen eşik değerlere göre alarm üretme ve ham datalardan türetilmiş üst seviye performans belirteçleri (Key Performance Indicator, KPI) hesaplama kabiliyetine sahiptir. Performans yönetim modülü (Performance Management Module, PMM), toplanan tüm dataların belirlenen zaman aralığında ilgilenilen KPI için en yüksek, en düşük, ortalama ya da istenen modelde belirlenecek değerinin hesaplanıp kullanıcıya istediği formatta sunulmasından sorumludur PMM'de KPI'ı ve kalite belirteçlerini (Key Quality Indicator, KQI) oluşturan şebeke elemanı (Network Element, NE) sayaçları, aynı zamanda işlem veri kayıtları (Transaction Data Records, TDR), eylem bazlı istatistik (event based statistic) veri ve geleneksel faturalama data kayıt verilerini (traditional billing xDataRecords, xDR) de tutar. Bu sayede şebeke ve servis performansını gözlemlenecek net verilere sahip olunur.

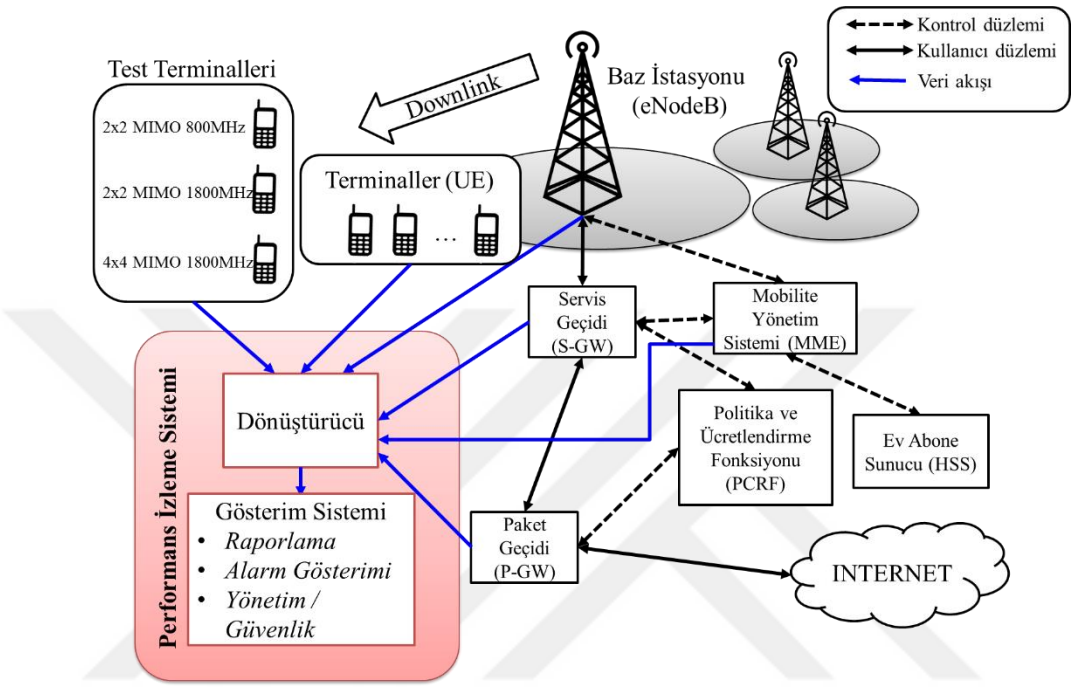
Her servis için ölçümlenecek kriterler, bu kriterlerin ölçüm sıklığı, nasıl ölçümleneceği ve paylaşım formatının belirlenmesi gerekir. Örneğin ses servisi için: Ses servisi için ölçümlenecek kriterler ses kullanılabilirliği (availability), kulaktan kulağa gecikme (mouth to ear delay) ve ses kalitesi düşünülebilir. Bu kriterlerin ölçüm sıklığı ise yarım

saatte bir olabilir. Yarım saatlik periyotlarda bahsi geçen tüm kriterlerin raporlanması istenir. İlgili kriterlerin belirtilen periyotta nasıl ölçümleneceği de bir diğer belirtilmesi gereken önemli girdidir. Kullanılabilirlik kriteri sadece baz istasyonunun servis verme hazır oluşluğu ile ölçümlenirken, kulaktan kulağa gecikme kriteri için ise iki terminal arası ölçüm gereklidir, benzer şekilde ses kalitesi için ise terminal üzerinden ölçüm yapılması yeterli olacaktır. Nereden ve ne sıklıkla ölçümleneceği belirli olan kriterlerin nasıl paylaşılacağı ise bir diğer karar mekanizmasıdır. Maksimum, ortalama ya da ağırlıklı ortalama değerlerin hangilerinin paylaşılacağı belirtilmelidir. Çünkü bu değer ilgili kritere ilişkin performans algısını direk yöneteceğinden nasıl paylaşılacağına çok dikkat edilmelidir. Ses servisi örneğinde belirttiğimiz kullanılabilirlik kriterinin ağırlıklı ortalaması, kulaktan kulağa gecikmenin maksimumu, ses kalitesinin ortalaması alınarak izlenebilir.

Kablosuz haberleşme sistemlerinde ölçümlenecek kriterler sunulan servisin direk müşteri deneyimini yansıtacak şekilde olmalıdır. Kriterler, servisi sunan baz istasyonundan, kullanıcının mobilite etkinliğine, servis deneyimine ve servisi aldığı coğrafi lokasyonun koşullarına kadar çeşitlenmelidir. Kablosuz haberleşme servisi sağlayıcı operatörler için bu kriterler ne kadar çeşitli olur ise anlamlı bir çıktı üretme imkanı o kadar fazla olacaktır. Ancak bu durum biraz karmaşık bir süreçtir. Kriter, bir matematiksel formülden oluşur. Bu matematiksel formül ise çeşitli parametreleri içerir, formülde bu parametrelerin matematiksel işleme tabi tutulması sözkonusudur. Parametrelerin ise doğru şekilde sayaçlara bağlanması gereklidir. Çeşitli sayaçlar belli bir formatta bir araya gelerek parametreleri oluşturur. Sayaçlar ise etkinliklere (event) bağlıdır. İlgili etkinlikte sayacın doğru sayması çok önemlidir.

Kullanılabilirliğin ölçümlenmesi için baz istasyonunun ilgili hücresinde kurulan tüm çağrıların sağlıklı bir şekilde sonlandırılması (tamamlanması) ya da hücre değiştirme (cell handover) eylemi ile başarılı bir şekilde hedef hücreye geçmesi gereklidir. Çağrının tamamlanması esnasındaki sinyalleşme akışlarında yer alan ve çağrının başarılı bir şekilde tamamlandığını belirten sayacın doğru sayması gereklidir. Bu sayaç formülün payında, yani başarılı tamamlanmış çağrılar kısmında yer alacaktır. Eğer çağrı başarılı bir şekilde tamamlanamamış ve tanımsız bir kesinti oluşmuş ise bu durumun da negatif etkisi olacağı için başarısız tamamlanmış çağrı olarak formülün paydasında, toplam çağrı sayısına girdi sağlayacak şekilde yer alacaktır. Aynı şekilde hücre değiştirmenin başarısı da ilgili sayaçların doğru sayması ve akması ile olur. Bu

sayaçlar sinyal seviyesi kaynaklı hücre değiştirme sayacı, kalite kaynaklı sayaç, kapasite kaynaklı, yük dengeleme kaynaklı, baskın hücre kaynaklı sayaçlar olabilirler. Bu sayaçların oluşturacakları parametrelerin formüle doğru bir şekilde entegre edilmesi ile ilgili kriter doğru şekilde sonuç verir hale gelir.



Şekil 3.1 : Şebeke topolojisi ve performans izleme sistemi.

Belirlenilen kriterlere ait parametrelerin ve onu oluşturan sayaçların ölçüm sıklığı önemli bir boyutlandırma çalışmasıdır. Kullanıcının mobilite kaynaklı hareketi nedeni ile birden fazla baz istasyonuna ait hücreden servis alması muhtemeldir, bu eylem esnasında terminal ile baz istasyonu esnasında binlerce sinyalleşme olur, tüm bu sinyalleşmeler aslında sayaçları tetiklemektedir. Sayaçlar gerçek zamanlı olarak sunuculara veri kayıtları (Data Records, DR) olarak akar. Terminal aktif ise DR dosyası belli bir boyuta geldiğinde (operatör bunun MB cinsinden büyüklüğünü belirler) ya da pasif (idle) durumda ise her 2 saatte bir olacak şekilde ya da abone mobil olduğu için konum alan kodu (Location Area Code, LAC) değiştiğinde yeni DR'lar üreyecektir. Bu dosyalar içinde sayaçları içerir ve her abone için günlük minimum 12 adet DR dosyasından bu verinin alınması gerekir. Alınan bu verilerin ne sıklıkta raporlanacağı veri işleyen sunucuların kapasitesi ile orantılıdır. Genelde ayrıştırma (parsing) işlemi 5'er dakikalık periyotlarda yapılır ve ilgili kritere göre 15 dk'lık

sıklıkta hazırlanır ve sunumu da bu verilere göre günlük, saatlik ya da 15 dk'lık formatta yapılır. Sözkonusu, tüm çağrı etkinliklerine bağlı olan sayaçların doğru bir şekilde alınması ve işlenmesi olduğundan günlük terabyte'larca datanın işlendiğini söylemek çok yanlış olmayacaktır.

Müşterilerimize sunduğumuz tüm servisler çok katmanlı şebeke topolojisi üzerinden toplanmaktadır. Önerilen çok katmanlı performans izleme sistemi Şekil 3.1'de belirtilmiştir. Kullanıcı kırılımından şebeke geneline kadar farklı şebeke servislerinin performanslarını izleyebilmek için kontrol (control plane) ve kullanıcı (user plane) düzlemlerinin etkileri Mobilite Yönetim Sistemi (Mobility Management Entity, MME), Servis Geçidi (Serving Gateway, S-GW), Paket Geçidi (Packet Gateway, P-GW), baz istasyonları (eNodeB) ve terminal (User Equipment, UE) birimlerinden toplanmaktadır.

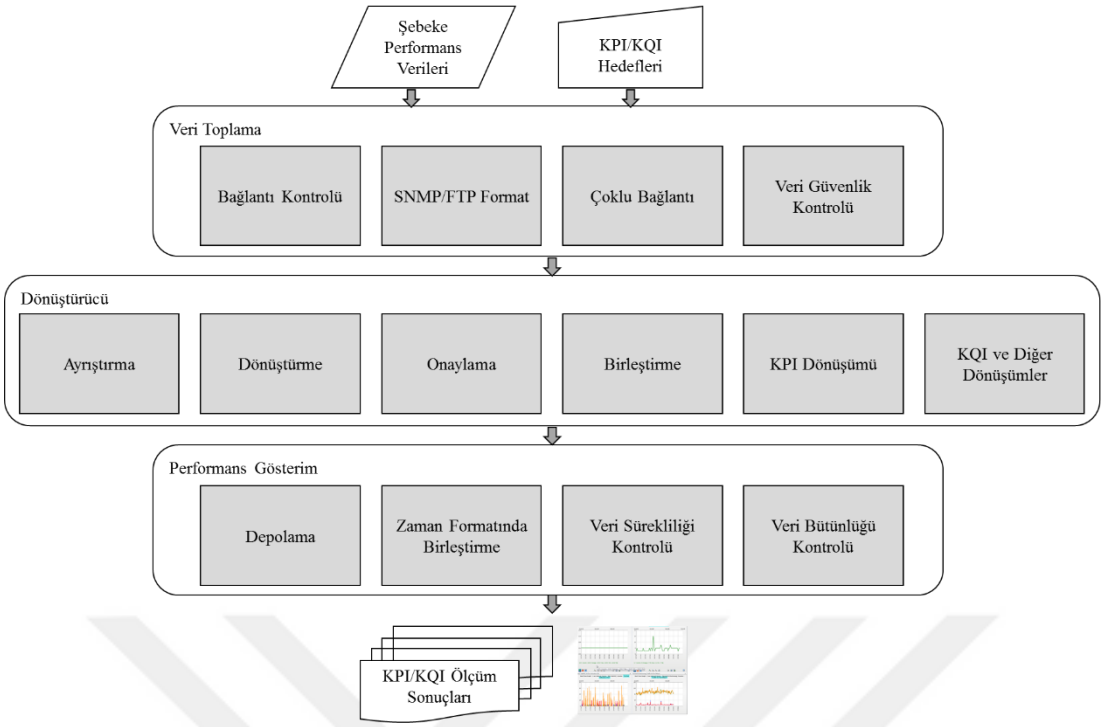
Ölçümünü yapacağımız servisin çok katmanlı şebeke topolojisinin hangi elemanlarından ölçümleneceğinin belirtilmesi gerekir. Performansını paylaşacağımız kriterin icrasında hangi şebeke elemanları rol alıyor ise o şebeke elemanlarında ilgili servis için çeşitli sayaçlar çalışıyor demektir. Bu nedenle şebeke elemanlarının bileşenlerinin doğru bir şekilde alınıp ölçüme girdi sağlamasına özen gösterilmelidir. Tabi farklı şebeke elemanlarından aynı servisi ölçmek için alınan sayaçların ölçüm birimlerinin birbiri ile uyumlu olmasına özen gösterilmelidir. Kullanılabilirlik kriterinin ölçümü için baz istasyonu aktif olarak rol alacaktır, aynı zamanda baz istasyonunun şebekeye yönelik tüm bağlantılı şebeke elemanları da kullanılabilirlik performansını etkilemektedir. Tüm ilgili şebeke bileşenlerinden alınacak sayaçların doğru bir şekilde parametreye dönüşmesi önemlidir.

Temel amaç ilgili servisin müşteri nezdinde ihtiyacının doğru bir şekilde resmedilmesi olduğundan, matematiksel formül çıktılarının nasıl gösterileceği de belirlenmelidir. Aslında ilgili servisin performans çıktısı, o servise ilişkin alınacak optimizasyon faaliyetlerini tetikler. Hatta gerekli ise yatırım kararı, bu çıktıların referans alınması ile yapılır. Daha önceki maddelerde verdiğimiz kullanılabilirlik örneğinden devam edilirse, kullanılabilirliğin performansını etkileyen sayaç eğer kapasite kaynaklı ise bu durumda ilgili hücre ya da komşu hücrelerde kapasite artışı yatırımı tetiklenmektedir. Eğer kullanılabilirlik parametresi ağırlıklı ortalama değil de maksimum alınır ise, bu durumda belki çok seyrek rastlanan anlık maksimumlarda gereksiz yatırım tetiklenmiş olacaktır.

3.2 Performans İzleme Sistemi

Şekil 3.2'de paylaşılan genel akış adımları, aslında Şekil 3.1'deki çok katmanlı şebeke topolojisinin performans izleme sistemi kutucuğunun detayını göstermektedir. Performans izleme sistemi, şebekedeki tüm şebeke ekipmanlarından gelen verilerin normalizasyonunu (orijinal ham verinin yapısal formatına bakılmaksızın doğru formatta haritalanması, tek bir genel biçime dönüştürülmesi ve sistem tarafından sunulabilir hale getirilmesi), verilerin toplanması, geç gelen ve eksik gelen sayaçların belli bir kriter seti içinde hesaplamaları ve trafik analiz hesaplamaları (yoğun saat ve normal saat gibi) gibi kabiliyetleri temel işlevleri olarak tanımlanabilir. Şebekenin tüm ekipmanları sadece farklı şebeke katmanlarındaki donanımsal çözümler demek değildir. UE'ler de hem kullanıcı hem de kontrol düzleminde paylaştığı verileri bu izleme sistemi üzerinden anlamlandırılıp görüntülenebilirler. Veri iletim gecikmesi (latency), hücreler arası aktif geçiş (handover) ve DL veri iletim hızı (DL throughput) gibi ölçümler istenen ölçüm derinliğine göre sadece eNodeB üzerinden alınabileceği gibi, eNodeB, MME, S-GW, P-GW ve UE gibi şebekenin diğer bileşenlerinin olduğu farklı ölçüm akışları üzerinden de alınabilir. Örneğin kullanıcı bazlı analizlerde UE üzerinden başlanarak yapılan ve akış boyunca tüm şebeke elemanlarının performans verileri ile şekillenen KPI'lar anlamlı olur iken şebeke bazlı analizlerde daha çok MME, S-GW ve P-GW gibi çekirdek şebeke elemanları üzerinden yapılan analizler anlamlı olmaktadır.

Ölçüm yöntemleri de istenen KPI'a göre farklılık göstermektedir. Örneğin veri iletim gecikmesi eNodeB üzerinden veri merkezindeki (data center) MME'ya yakın bir topolojik alana konumlandırılmış proximity sunucuya gönderilen ping sinyalinin cevap bulma süresi referansı ile kullanıcı düzleminde hesaplanır. Bu sayede kullanıcının gerçek zamanlı video paylaşımı ve canlı oyun performansları esnasındaki veri iletim gecikmesi deneyimi direkt olarak gözlenmiş olur.



Şekil 3.2 : Performans izleme sistemi bileşenleri.

Şebeke performansının doğru bir şekilde ve istenen zaman aralıklarında raporlanması, davranış farklılıklarına karşın alınacak önlemlerin doğruluğu ve ne zaman alınacağı bakış açısı ile çok kritik ve değerli çıktılar sunmaktadır. Şekil 3.2'de farklı şebeke elemanlarından gelen ve saha/şebeke gerçeklerini yansıtan kontrol ve kullanıcı düzlemindeki performans verileri, dönüştürücü platform üzerinden gösterime hazır hale getirilir. Tasarlanan ve hayata geçirilen bu dönüştürücü platform, herhangi bir ağ elemanına, onların yönetim sistemlerine ve alt şebeke elemanlarına iki yönlü bağlantı sağlar. xDR, KPI, KQI ve hata alarmlarının da yer aldığı şebeke yönetim verilerinin toplanması için gerekli bağlantının basit şebeke yönetim protokolü (Simple Network Management Protocol, SNMP) ve dosya transfer protokolü (File Transfer Protokol, FTP) gibi formatlarda sağlanması ve yönetilmesinden sorumlu olan tek yapı bu dönüştürücü platformdur. Burada aynı zamanda gelen ham data ayrıştırılır, anlamlı formata çevrilir, istenen veri aralığında olacak şekilde doğrulanır ve hangi formatta izlenecek ise o şekle getirilir. Aynı zamanda verilerin geçici bir süre saklanması ve üst katman uygulamalara farklı API standartlarında gönderilmesi sorumluluğu da vardır. Dönüştürücü platform çıktısı olarak sunulan veriler performans gösterim platformu tarafından istenen formatta çıktı sunmaya hazır hale getirilir. Performans gösterim platformunda sunulan bu veriler artık şebeke elemanı farklılığından, şebeke mimarisi

farklılığından, zaman ve coğrafi farklılıklardan arındırılmış halde ve her bir KPI için belirli bir formatta sunuma hazır haldedir.

Diğer saha ölçüm yöntemlerinin aksine tasarlanan performans izleme sistemi sayesinde şebeke davranışının ve performansının doğru bir resminin çizilmesine, otomatik olarak alarm mekanizmalarının türetilmesine ve gerektiğinde KPI'ı oluşturan tüm sayaçların detaylı analizine kadar kontrollerin yapılmasına olanak sağlayacak kök neden/sonuç çalışmalarına açık bir kabiliyet sergilenir.

3.3 Sonuç

Bu bölümde şebekede trafik üreten tüm servislerin ölçüm metololojisinin nasıl tasarlandığı belirtilmiştir. Her servis özelinde şebeke elemanlarından alınan dataların anlamlı hale getirilme yöntemleri örnekler ile açıklanmıştır. Sonuçta müşterilerimizin deneyimlerini birebir yansıtacak KPI kümelerinin belirlenme adımları tanımlanmıştır.

4. LTE ŞEBEKE DAYANIKLILIĞININ ÖLÇÜLMESİ

Bu bölümde LTE şebekesinin harici sinyal bozucu saldırılarına karşı direncinin, LTE PHY kanallarına etkisini operasyonel yani canlı trafik alan bir şebeke üzerinde test edilecektir. Daha önce yapılan literatür çalışmalarında sinyal bozucu saldırıları teorik olarak incelenmiş ve çıkarımlar bir teoriye dayandırılmıştı. Bu bölümde paylaşılacak çıktılar teoride yapılan varsayımların pratik uygulamalar ile gösterimi niteliğindedir. Hava arayüzünü kirletmenin yaygın yolu, sinyal bozucu saldırılarıdır. Analizlerde LTE şebeke sistem performansını etkileyen iki tip bozucu saldırısı incelenecektir. Detaylı ölçüm sonuçları LTE şebeke performans ölçümleri referansına göre sunulup böyle bir sinyal bozucu saldırılara karşı önlem önerilerini takip eden bölümde değerlendirilecektir. Öncelikle sağlıklı karşılaştırma yapabilmek amacı ile LTE şebeke performans ölçümleri paylaşılacaktır.

Çizelge 4.1 : LTE PHY kanalları ve işlevleri.

Kanal Kısaltması	İşlevi	İletim Yönü
PUSCH	Bağlantı verileri, radyo kaynak kontrol (Radio Resource Control, RRC) sinyal mesajları, UL kontrol bilgileri (isteğe bağlı) taşır.	UL
PUCCH	UL için kontrol bilgilerini taşır.	UL
PRACH	Rastgele Erişim fonksiyonlarını etkinleştirir, senkronize olmayan tek bağlantıya sahiptir.	UL
PDSCH	SIB, çağrı(paging), RRC bağlantı mesajları gibi ana veri taşıma kanalıdır.	DL
PDCCH	DL kontrol belirteç (Downlink Control Indicator, DCI) ve zamanlama bilgisini taşır.	DL
PBCH	Ağa erişmek için gerekli MIB bilgilerini yayınlar.	DL
PHICH	HARQ ACK/NACK mesajlarını taşır.	DL
PCFICH	Kontrol Format Göstergesi (CFI) taşır ve UE'ye sinyal formatını bildirir.	DL

4.1 LTE PHY Kanalları

LTE PHY kanalları, hem veri hem de kontrol bilgilerini eNodeB ile UE arasında radyo sinyalleri ile hava arayüzü üzerinden taşımaktan sorumludur. LTE'nin fiziksel kanalları, kullanıcı verilerinin ve kontrol mesajlarının taşınmasından sorumludur ve DL ile UL için farklı kanallar bulunmaktadır. Bu kanalların kısa açıklamaları aşağıdaki Çizelge 4.1'de tekrar özet olarak verilmiştir.

4.1.1 PHY kanalların girişimi ve etkileri

UE düzenli olarak MIB mesajını almalıdır, çünkü MIB DL bant genişliği, sistem çerçeve numarası ve PHICH konfigürasyonu gibi önemli bilgilere sahiptir. Daha önce de belirttiğimiz gibi PBCH, DL frekansının merkezinde 1.08 MHz bant genişliği ile iletilir. Bu nedenle, belirli bir frekansta çalışan dar bantlı sürekli bir bozucu nedeni ile bu kanalın girişime uğraması sistem performansı için çok tehlikelidir. PDCCH, UE'nin eNodeB'den gönderilecek verilerin alınabileceği DL atamasını UE'ye bildirir. eNodeB ile UE arasındaki ilk sinyalleşme ve bilgi paylaşımının yapıldığının garanti altına alınması gerekir. Bu kanalı bozmak ise UE'nin hangi verinin kendisine ait olduğuna karar verememesine neden olur ve UE'nin verileri doğru şekilde alıp göndermesi engellenir. PCFICH, PDCCH için önemli bir kanaldır, çünkü OFDM sembollerinin sayısının ne kadarının PDCCH'ye ait olduğunu belirler. PCFICH'yi bozmak önemli bir tehdit olarak görülmemektedir. Çünkü kanal 4 RE içeren 4 REG tarafından taşınır, yani oldukça seyrek bir kanaldır. Bu 4 REG, bant genişliğinden bağımsız olarak tüm bant boyunca eşit olarak dağıtılır. Ancak PDCCH, PCFICH gibi seyrek değildir. Bu nedenle, PDCCH'e saldırmak PCFICH'den daha kolay olabilir ancak senkronizasyon gerekir yani konumunun ve ne zaman yayınlanacağının net olarak bilinmesi gerekir. UL veri transferleri için HARQ mekanizmasının ACK/NACK mesajlarını taşıyan PHICH kanalına saldırmak, UL yönünde verinin tekrar iletimi gereksinimine ve aktarım hataları sayısında bir artışa neden olabilir. Bu da aktarım performansını düşürebilir. Son olarak veri kanalları (PDSCH veya PUSCH) bozulmuşsa, UE'ler verileri doğru bir şekilde alamaz veya gönderemez. Ancak böyle bir saldırı eğer belli bir UE'yi hedef almışsa, daha karmaşık sistem bilgilerine ihtiyaç duyması nedeniyle olası görülmemektedir. UE'lerin veri çıkışının bozulması ve bozulmanın bant genişliği ile doğru orantılı olması beklenir. Kontrol verisi (Control Information, CI), sıralama istekleri (Scheduling Request, SR) ve DL veri iletimleri için

HARQ mesajlarını taşıyan PUCCH, UL bant genişliğinin iki kenarına yerleştirilmiş şekilde bulunur.

4.2 LTE Şebeke Performans Ölçümleri

LTE şebekesi ülkemizde Nisan 2016 itibariyle kullanılmaya başlanmıştır. Bu teknolojiyi kullanan sahalar temelde 800 MHz (Band 20), 1800 MHz (Band 3) ve 2600 MHz (Band 7) gibi FDD frekans bantlarında kurulmaktadır. Bununla birlikte 2600 MHz (Band 38) TDD frekans bandı da alternatif olarak değerlendirilebilir. Her ne kadar yukarıda özel olarak bazı frekanslara değinilse de ülkemizde spektrum kullanımı teknolojiden bağımsız olarak değerlendirilmektedir. Yani istenilen frekans istenilen teknolojide kullanılabilir. Operatörün sahip olduğu bant genişliği, frekans bandının kapsama karakteristiği ve hali hazırda ne kadar gürültüden ve harmonikten arındırılmış olduğu gibi kriterler ilgili teknolojide hangi spektrumun seçileceğini belirlemede önemli etkenlerdir.



Şekil 4.1 : LTE şebeke performans ölçüm alanı.

Saha denemelerindeki temel amaç, farklı konfigürasyonlara sahip eNodeB'lerden servis alan UE'lerin performanslarını ölçmektir. Saha denemeleri İstanbul ilinde farklı yoğunluklara sahip baz istasyonlarını barındıran bir alanda yapılmıştır. Sahalardaki baz istasyonları Release-12 standartlarını destekleyen özellikler ile donatılmıştır.

Ölçüm alanı Şekil 4.1'de ve ölçüm alanındaki tüm sahaların konfigürasyonları Çizelge 4.2'de sunulmuştur.

Çizelge 4.2 : Ölçüm alanındaki saha konfigürasyonları.

Saha	Sektör Sayısı	Frekans Bantları
Saha-1	4	800 MHz, 1800 MHz
Saha-2	3	800 MHz, 1800 MHz
Saha-3	4	800 MHz, 1800 MHz
Saha-4	4	800 MHz, 1800 MHz
Saha-5	3	800 MHz, 1800 MHz
Saha-6	3	800 MHz, 1800 MHz
Saha-7	4	800 MHz, 1800 MHz
Saha-8	4	800 MHz, 1800 MHz
Saha-9	3	800 MHz, 1800 MHz

Farklı tipte UE'ler ile dokuz eNodeB'yi içeren seçili alanda saatte 20-60 km/s arasındaki hızlarla değişen mobil testler alınmıştır. Şekil 4.1'de test güzergâhını içerecek şekilde seçili alan gösterilmektedir. Bu alan iş merkezlerini, yerleşim yerlerini ve yoğun ana yolların olduğu bölgeyi kapsamaktadır. Seçilen alan için ortalama sahalar arası mesafe 1.3 km'dir. Baz istasyonları, sağlanması hedeflenen kapsama alanına ve bu kapsama alanındaki abone yoğunluğuna göre üç ya da dört sektör planlanmıştır. Her sektör için referans alınan parametre tablosu Çizelge 4.3'te verilmektedir.

Saha ölçümlerinde kullanılan UE'ler 2x2 ve 4x4 MIMO destekleyen yapıda farklılık göstermektedir. 800 MHz 2x2, 1800 MHz 2x2 ve 1800 MHz 4x4 bantları için sırasıyla Samsung S5, Samsung Galaxy Note4 ve Huawei 4x4 B618s-22d WTTx modem UE'leri kullanılmıştır. Samsung S5 ve Samsung Galaxy Note4 telefonları Cat-4 sınıfındadır, öte yandan Huawei 4x4 B618s-22d WTTx modem ise Cat-11 sınıfındadır. Cat-4 terminaller teorik olarak DL yönünde 150 Mbps hızı desteklerken UL'de bu hız 50 Mbps'dır. Cat-11 UE ise DL yönünde 600 Mbps hızı desteklemektedir, UL hızı ise Cat-4 ile aynı ve 50 Mbps'dır. Denemeler sadece DL performansı sırasıyla 10 MHz ve 20 MHz bant genişliklerinde 800 MHz ve 1800 MHz için yapılmıştır.

Çizelge 4.3 : Sektör parametreleri.

Parametre	**Tanım**		
Taşıyıcı Frekans	800 MHz	1800 MHz	1800 MHz
Bant genişliği	10 MHz	20 MHz	20 MHz
UE durumu	Serbest, tüm spektrumu tarar.		
Baz istasyonu anten sayısı	2	2	4
LTE Çoğullama	FDD		
eNodeB çıkış gücü	2x43 dBm	2x44.7 dBm	4x44.7 dBm
RS Güçlendirme	+3 dB	0 dB	0 dB

Kullanıcıların hareketli olduğu senaryoda abonenin hücre seçimi ve hücreler arası geçiş RSRP'ye göre alınmaktadır. RSRP ölçümlerine benzer olarak RSRQ ölçümleri de aday hücreleri kalite kriterlerine göre kendi aralarında sıralamak için kullanılmaktadır. Eğer RSRP ölçümleri sağlıklı karar verebilmek için yeterli değilse hücre seçimi ve hücreler arası geçiş için RSRQ da kullanılabilir.

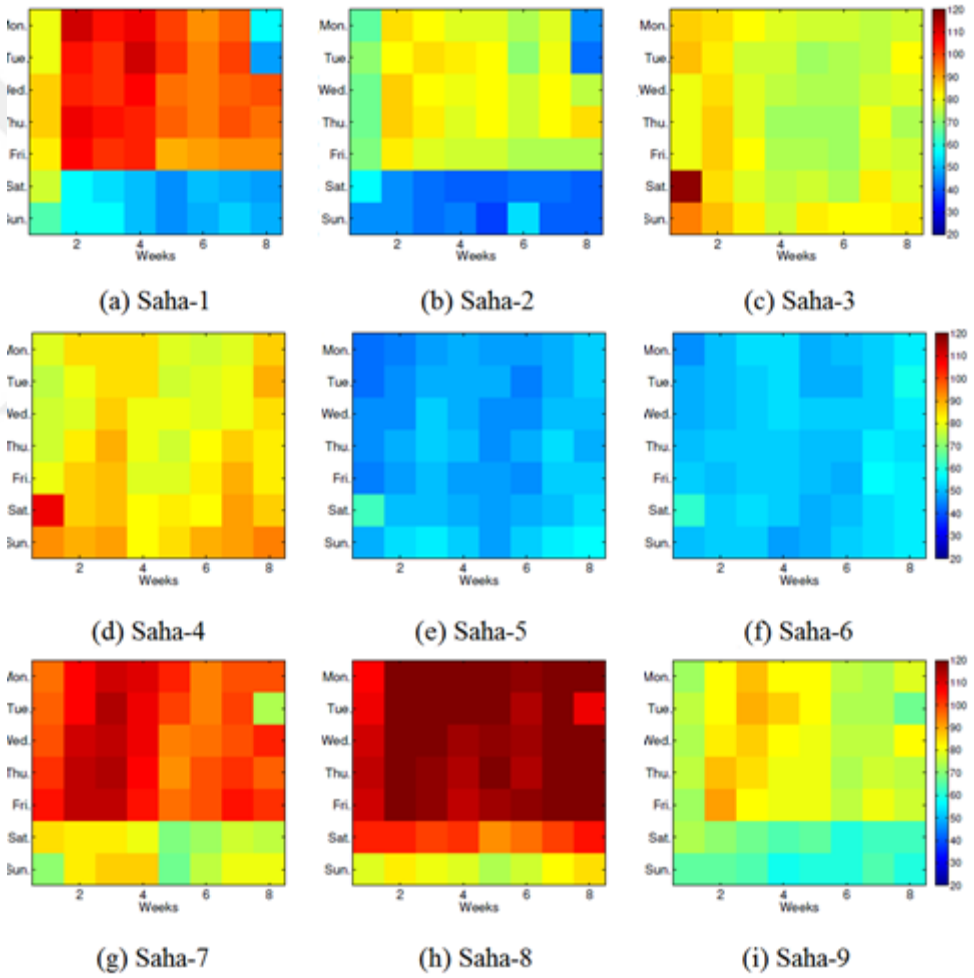
Seçili alanda şebekenin ticari LTE trafiğini taşırken normal performansını yansıtabilmesi için her eNodeB'nin güç değerleri sabit tutulup test sırasında değiştirilmesine müsaade edilmemiştir. LTE standartları DL güç kontrol detaylarını tanımlamaz ama referans sinyal, PDCCH ve PDSCH gibi kanal standartlarını belirler. Saha denemeleri sırasında şebekede ticari trafik taşındığı için ACK TCP protokolü kullanılmıştır. Paket data yakınsama protokolü (Packet Data Convergence Protocol, PDCP) ve radyo link kontrol (Radio Link Control, RLC) paket uzunlukları sırasıyla 3GPP TS 36.323 ve 36.322 standartlarında verildiği şekilde tanımlanmıştır. Ayrıca saha denemeleri sırasında süreksiz alıcı (discontinuous reception) özelliği aktif hale getirilmiştir. LTE baz istasyonları için katman yönetimi düşük frekans bantları daha iyi yayılım koşullarına sahip oldukları için düşük bantlara doğrudur. Böylece eğer bir kullanıcı iyi radyo koşullarına sahipse ve hücrenin merkezinden uzak değilse taşıyıcı konfigürasyonuna göre katman yönetimi 1800 MHz kalmasını zorlayabilir. Eğer hücre yükü artarsa ve kullanıcının hareket yönü hücre merkezinden hücre sınırına doğruysa daha düşük frekans bandı olan 800 MHz kullanılır. Kullanıcılar hücre merkezinden hücre sınırına doğru hareketliyse daha düşük bantlara doğru yönlendirilmelerine

rağmen hücreler arası geçiş eNodeB'ler arası mesafeye göre 800 MHz veya 1800 MHz bantlarında gerçekleşebilir. Eğer baz istasyonları arası mesafe az ise hücreler arası geçiş 1800 MHz kaynak hücreden 1800 MHz hedef hücreye doğru olabilir.

Kaynak tahsisi spektrum bant genişliğinin UE'lere atanmasından sorumludur ve radyo kanallarının UL ve DL yönünde eNodeB tarafından sinyal alan UE'ler ve eNodeB'ler açısından nasıl değerlendirileceğine karar verir. Bunun sonucu olarak UE, bağlantıları için gerekli servis kalitesini (Quality of Service, QoS) her alt çerçeve için (örneğin 1ms TTI) için tanımlar ve eNodeB'ye bildirir. Saha testleri için seçilen bölgede olan eNodeB'lerin hepsi oransal hakkaniyet (Proportional Fair, PF) kaynak tahsis algoritmasını kullanmaktadır. eNodeB'lerin kurulumu çatı üstü antene sahip geleneksel makro hücresel baz istasyonunun kopyasıdır. Her eNodeB anteni yatay açıklığı 0.7λ (yaklaşık 8 cm) olan dört doğrusal kolondan oluşur. Her kolon çift polarizasyonlu (+45 ve -45 dereceli) birleştirilmiş anten parçalarını içerir. Toplamda her anten birimi sekiz anten çıkışı içermektedir. Her sektör, birbirleri arasında 20-30 cm mesafe bulunan iki anten elemanından oluşur. Kullanılan 4x4 MIMO destekli 4 X-Pol anten yatayda 65°, dikeyde 6° yayılım paterni göstermektedir. Aynı frekansta birden fazla dipol ile desteklendiğinden aynı frekansta 25-26 dB, farklı frekanslar arasında da 35 dB civarında zayıflama göstermektedir. Girişim bastırma kabiliyeti 150 dB'den yüksek olan bu anten, frekansa bağlı olarak 15-18 dBi arası kazanç sağlamaktadır. Bunun yanında UE antenleri, ticari şekilde kullanıldığı gibi telefon monte durumundadır. UE'ler saha testleri sırasında test aracı ön camı üstüne monte edilmiştir. Tüm sahalar transmisyon kapasitesi açısından 1 Gbps simetrik hızları destekleyecek şekilde fiber transmisyonuna sahiptir. Bu kapasite, kullanıcı veri hızlarının sınırlanmayacağı bir büyüklüğü sunar.

Çalışmanın bu bölümünde Release-12 eNodeB'lerle yapılan saha testlerinin amacı, UE ve eNodeB'ler arasında farklı anten konfigürasyonlarının performanslarını ölçmektir. Arabayla yapılan saha testleri DL performansını değerlendirmek için 800 MHz 2x2 MIMO, 1800 MHz 2x2 MIMO ve 1800 MHz 4x4 MIMO olmak üzere üç ana gruba bölünmüştür. Arabayla yapılan saha testlerinin yanında dokuz baz istasyonun ortalama KPI'ları sekiz hafta boyunca toplanmıştır. Aşağıdaki durumlardan biri oluştuğunda veri hızlarına olan etkinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır;

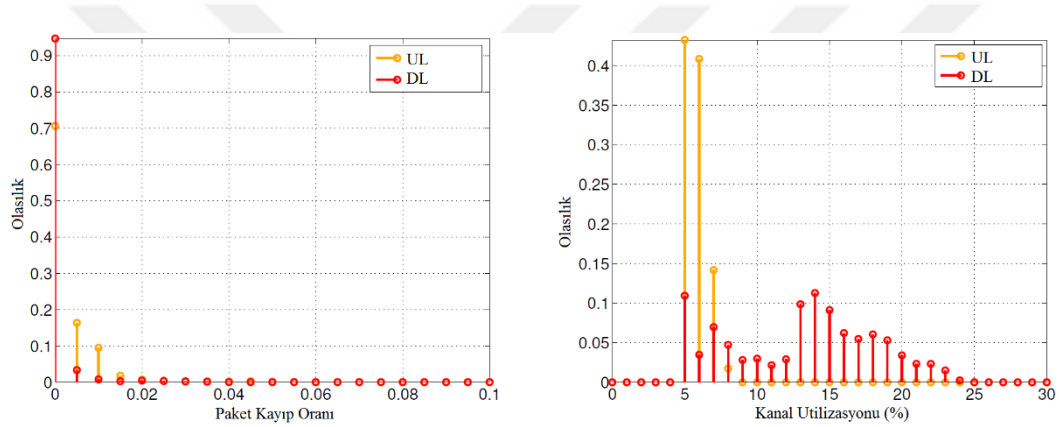
- Düşük (800 MHz) frekanslara karşın yüksek (1800 MHz) frekans bantları: Yol kaybının doğası gereği UE hücre merkezinden hücre sınırına doğru ilerledikçe düşük frekans sinyalleri yüksek frekans sinyaline göre daha az kayba uğrarlar.
- 10 MHz bant genişliğine karşı 20 MHz bant genişliği: Benzer radyo koşullarında daha fazla kaynak bloğu daha fazla kullanıcı veri hızına ulaşılmasını sağlar.
- Aynı frekans bandında 2x2 MIMO'ya karşı 4x4 MIMO: Daha yüksek MIMO daha fazla spektral verimliği sağladığı için daha yüksek veri hızlarını tetikler.



Şekil 4.2 : Ortalama kullanıcı sayısı.

Saha testleri ticari trafikte gerçekleştirilmiştir ve tüm testler dokuz bağımsız eNodeB içeren canlı şebekede çoklu UE senaryosuyla gerçekleştirilmiştir. Testler süresince, aktif kullanıcıların sinyal seviyeleriyle doğru orantılı olan en yüksek veri hızları

raporlanmıştır. Şekil 4.2, her baz istasyonu için ortalama kullanıcı sayısının zaman içinde dağılımını göstermektedir. Saha-8, diğer tüm sahalara göre hem hafta içi hem de hafta sonu daha fazla aktif kullanıcı sayısı içermektedir. Bazı sahalarda hafta sonu hafta içi ayrımı çok net görülmektedir. Saha-5 ve saha-6'da ise ortalama kullanıcı sayısı birbirine çok yakındır. Paket kayıp ve kanal utilizasyon değerlerine ait histogramlar Şekil 4.3'te verilmiştir. OFDM motifinde CP kullanımı nedeni ile minimum %5 utilizasyon değeri hem UL hem de DL için gözlenmiştir. Sahaların ortalama paket kaybı UL ve DL yönünde sırasıyla 0.0008 ve 0.0032 değerlerindedir. Özellikle utilizasyon verisinden eNodeB'lerin düşük/orta yüklü trafik ile çalıştıkları anlaşılmıştır.



Şekil 4.3 : Paket kayıp oranı ve kanal kullanımı.

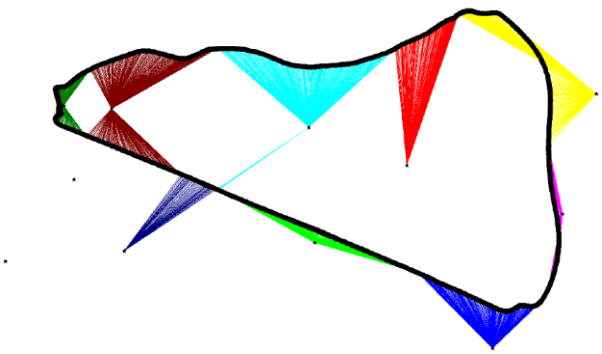
PDSCH veri hızı, kanal şartlarına göre UE'nin raporladığı CQI değerine direkt bağlıdır. CQI değerlerine tekabül eden MCS değerleri ile uygulanacak modülasyon belirlenir. MCS değerine göre modülasyon tipi TS 36.213 tarafından tanımlanmıştır. LTE PHY katmanda birçok iyileşme olmasına rağmen Release-12'ye kadar yüksek modülasyon standartlaştırma dokümanlarında yer almamaktadır. Spektral verimliliği ve veri iletim hızını artırmak için 3GPP standartlarında Release-12'de yüksek modülasyon desteği tanımlanmıştır.

Canlı saha denemeleri esnasında ölçümlenen trafik değerlerine uygun olan CQI ve MCS eşleştirmeleri ile onların yüzdesel dağılımları Çizelge 4.4'te verilmiştir. Testler sırasında raporlanan CQI değerleri 4 ile 15 arasında değişmektedir. Tablodan açık şekilde görüldüğü üzere CQI=10 en çok raporlanan CQI değeridir. CQI=10 ve üstündeki CQI'ların raporlanması oranı yaklaşık %73'tür ki modülasyon olarak 64-

QAM'in kullanıldığını söyleyebiliriz. Raporlanan CQI değerleri saha testleri için seçilen bölgenin radyo koşullarının iyi olduğu göstermektedir. Yanı sıra 16-QAM ve QPSK modülasyonlarına ait CQI oranları sırasıyla yaklaşık %20 ve %7'dir.

Çizelge 4.4 : Saha testlerindeki CQI ve MCS ölçümleri.

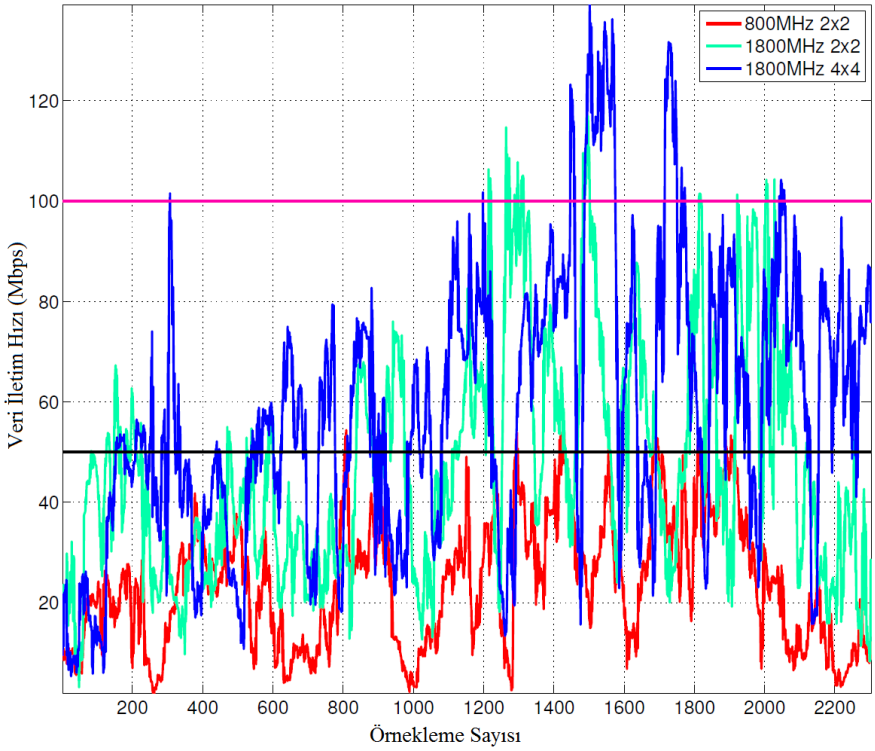
CQI	MCS	Modülasyon	Oran (%)
4	8	QPSK ya da 16-QAM	0.62
5	9	QPSK ya da 16-QAM	4.62
6	10	16-QAM	1.74
7	13	16-QAM ya da 64-QAM	1.91
8	14	16-QAM ya da 64-QAM	7.87
9	17	64-QAM	10.64
10	16	16-QAM ya da 64-QAM	27.91
11	19	64-QAM	11.51
12	20	64-QAM ya da 256-QAM	14.27
13	20	64-QAM ya da 256-QAM	13.34
14	21	64-QAM ya da 256-QAM	1.45
15	21	64-QAM ya da 256-QAM	4.13



Şekil 4.4 : Test sahaların güzergah boyunca servis alanı.

Şekil 4.1'de gösterilen ölçüm alanındaki test güzergahı boyunca hangi sahaların servis aldığı Şekil 4.4'te verilmiştir. Bu şekilden anlaşılmaktadır ki, bir sahanın servis vermesi için gerek şart en yakında olması değildir, bazı sahalar daha uzak olsa bile

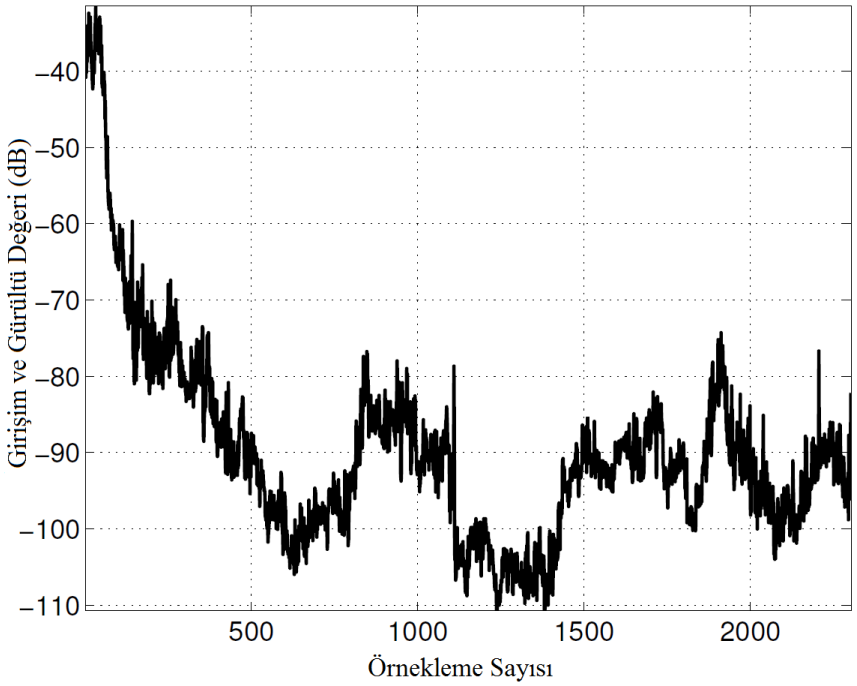
topografik yapı ve çevredeki binaların durumu nedeni ile güzergahta daha uzak alanlara servis verebilir.



Şekil 4.5 : Saha ölçümlerindeki veri iletim hızları.

Şekil 4.5, farklı frekans, bant genişliği ve MIMO konfigürasyonlarının DL veri hızlarını göstermektedir. Raporlanan CQI değerlerinin eşleniği olan MCS ile hesaplanan spektral verimlilik DL veri iletim hızının artmasını etkilemektedir. Ayrıca daha büyük bant genişliği daha yüksek DL veri iletim hızı demektir. Saha testlerinde 800 MHz 2x2 MIMO konfigürasyon ile en yüksek 55.3 Mbps DL veri iletim hızına ulaşılmıştır. 1800 MHz konfigürasyonda ise sırasıyla 2x2 MIMO ve 4x4 MIMO durumları için 117 Mbps ve 139.2 Mbps en yüksek veri iletim hızları elde edildi. Tüm saha testleri ölçümleri canlı trafik şartlarında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca daha düşük modülasyon ve veri iletim hızı desteğine sahip UE'ler de şebeke yoğunluğunu etkileyen faktörler arasında yer almaktadır. Aynı frekans ve bant genişliğinde 2x2 ve 4x4 MIMO konfigürasyonları arasındaki %17'lik fark spektral verimlilik farkı olarak açıklanır. Daha öncede belirtildiği üzere testler Cat-4 ve Cat-11 UE'ler ile yapılmıştır. Deneyimlenen veri iletim hızları sadece şebeke konfigürasyonlarına değil aynı zamanda UE kategorilerine de bağlıdır. Tüm bantlardaki girişim/gürültü seviyesi

ölçümleri Ascom TEMS programıyla yapılmıştır ve değerleri de Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Şekil 4.5'deki ölçümler ile karşılaştırdığımızda tüm frekans ve bant genişlikleri için daha düşük girişim/gürültü değerlerinin daha yüksek veri iletim hızlarını tetiklediği açıkça görülmektedir. Sistem link tasarımı hücre sınırında performansı düşürmeyecek şekilde komşu hücreler arasında yeteri kadar ortak kesişimi oluşturacak şekilde yapılmıştır.

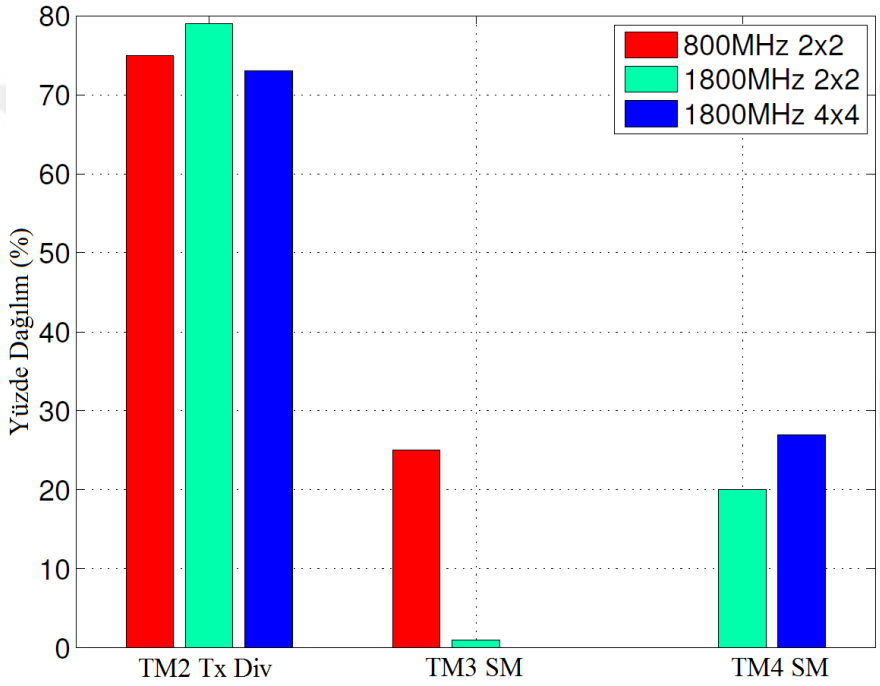


Şekil 4.6 : Saha ölçümlerindeki girişim/gürültü değeri.

Aynı bant genişliği için teorik olarak 4x4 MIMO konfigürasyonun 2x2 MIMO konfigürasyonun iki katından daha iyi olması gerekirken canlı saha denemelerinde bu değerlere ulaşmak oldukça zordur. Canlı ticari şebekelerin ideal olmayan propagasyon şartlarında en yüksek teorik veri iletim hızına ulaşılamamasının en önemli nedeni seçilen TM'dir.

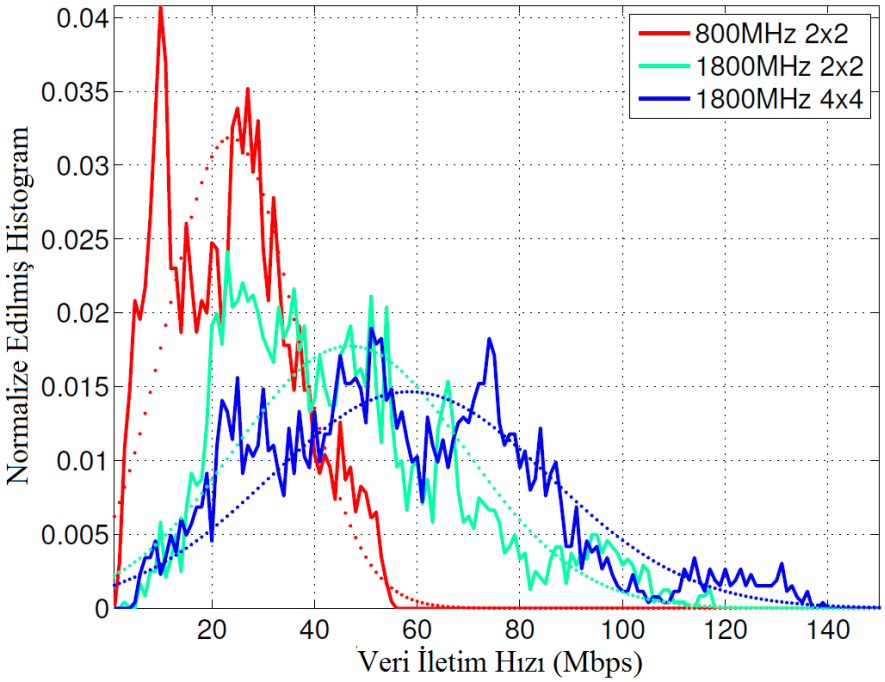
UE'lerin TM kullanım detayları Şekil 4.7'de verilmiştir. Kaynak tahsis algoritması için en önemli kural iletilen verinin alıcıya ulaşmaması nedeni ile tekrar gönderiminin mümkün olduğunca az uygulanmasıdır. Şebeke yeniden veri iletimlerini azaltmak ve kanal şartlarındaki doğrusal olmayan değişimlere karşı kendini garanti altına almak için her anten portundan ayrı veri iletimi ile veri iletim hızını iki katına çıkaran SM yerine Tx Div gönderimini seçmiştir. UE'lerin mobil olmasından ve kanal yayılım

davranışının iyi olmamasından dolayı TM2 en çok raporlanan TM tipi olmuştur. 1800 MHz 4x4 MIMO UE'ler diğer tüm UE'lerden daha çok TM4 kullanımı örneklemiştir. Bu davranış direkt olarak 4x4 MIMO konfigürasyonunun performans üstünlüğünü etkilemektedir. Testler esnasında 800 MHz 2x2 MIMO konfigürasyonunda TM4 kullanımı gözlenememiştir. Testler sırasında kullanılan radyo şebeke alt yapısı Ericsson tarafından üretilmiştir ve 800 MHz 2x2 radyo modül tasarımı link hesaplaması kısıtlamaları nedeniyle TM4 tipi desteklenmeyecek şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 4.7 : Saha ölçümlerindeki TM kullanım oranları.

Her konfigürasyonun dağılımını gözlemleyebilmek için olasılık fonksiyonları hesaplanmıştır. Olasılık yoğunluk fonksiyonu (Probability Density Function, PDF) ve birikimli yoğunluk fonksiyonu (Cumulative Density Function, CDF) çıktıları sırasıyla Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da farklı konfigürasyonlar için gösterilen deneysel dağılım eğrileri ile oluşturulmuştur. Şekil 4.8'de, 1800 MHz 4x4 MIMO konfigürasyonunun diğer konfigürasyonlardan daha yüksek DL veri iletim hızı ile servis verdiği gözlenmiştir. En yüksek normalize edilmiş veri iletim hız değerleri sırasıyla 800 MHz 2x2, 1800 MHz 2x2 ve 1800 MHz 4x4 konfigürasyonları için 8, 22 ve 77 Mbps'dir.

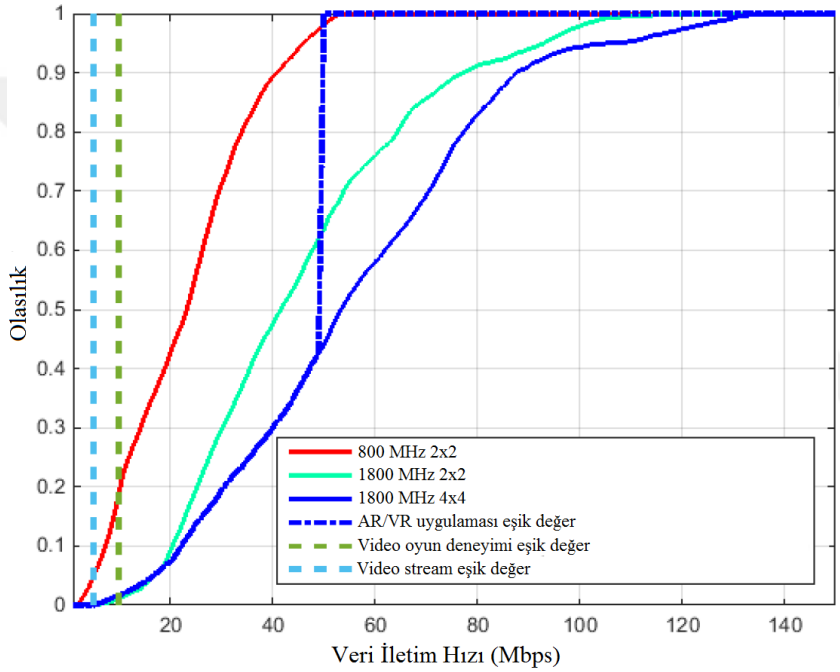


Şekil 4.8 : Histogram ve normalize dağılım veri iletim hızı ölçümleri.

Şekil 4.9'da ise verilen konfigürasyonlar için ortalama veri hız değerlerinin %50 olasılıklı CDF çizimleri verilmiştir. Bu resimden açıkça görüleceği üzere yüksek veri hız örnekleri her zaman 4x4 MIMO konfigürasyonuyla elde edildi. Fakat normalize edilmiş dağılımlar üzerine deneysel dağılım eğrilerini oturtmak istediğimizde farklı konfigürasyonlara ait gerçek davranışlar daha belirgin ortaya çıkmıştır. Ortalama veri iletim hızları ve standart sapmaları sırasıyla 800 MHz 2x2, 1800 MHz 2x2 ve 1800 MHz 4x4 konfigürasyonları için 23.6 Mbps, 41.8 Mbps, 56.5 Mbps ve 12.5, 22.4, 7.2 olarak hesaplanmıştır. Bu çalışma gerçek canlı şebekelerde çoklu anten teknolojilerinin uygulama realitelerinden dolayı şebeke veri iletim hızının uzaysal katman sayısıyla doğru orantılı olmadığını göstermiştir.

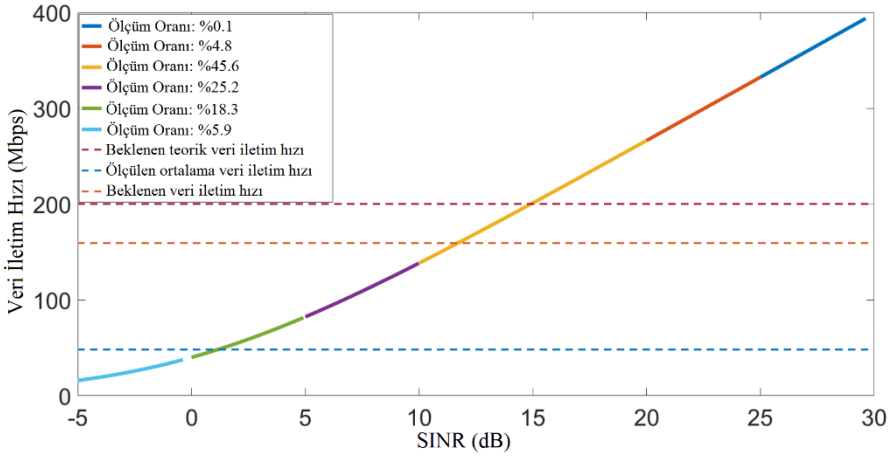
Çalışma için seçilen alandan toplanan veriler, kullanıcı deneyimi bakış açısıyla işlenmektedir. AR/VR, yüksek kalitede video oyun ve video stream uygulamalarının yanı sıra diğer uygulamalar da tüm konfigürasyonlar ile desteklenebilmektedir. Şekil 4.9'a göre video stream için gerekli olan 5 Mbps veri iletim hızı isteri, 800 MHz 2x2 MIMO konfigürasyonu kullanan kullanıcıların %95 tarafından desteklenirken, 1800 MHz 2x2 MIMO ve 1800 MHz 4x4 MIMO konfigürasyonlarını kullanan kullanıcıların %99'undan fazlası tarafından desteklenmektedir. Bunun yanında video oyunu için gerekli olan 10 Mbps veri iletim hızı isteri, 800 MHz 2x2 MIMO

konfigürasyonu kullanan kullanıcıların %81 tarafından desteklenirken, 1800 MHz 2x2 MIMO ve 1800 MHz 4x4 MIMO konfigürasyonlarını kullanan kullanıcıların %98'inden fazlası tarafından desteklenmektedir. Benzer şekilde AR/VR uygulamaları için gerekli olan 50 Mbps veri iletim hızı isteri, 800 MHz 2x2 MIMO konfigürasyonu kullanan kullanıcıların %2'sinden azı tarafından desteklenirken, bu oran 1800 MHz 2x2 MIMO ve 1800 MHz 4x4 MIMO konfigürasyonlarını kullanan kullanıcılar için sırasıyla %33 ve %57 civarındadır. AR/VR için ayrıca önemli bir veri iletim gecikmesi KPI'ı söz konusu olduğu için bu eşik değer ayrıca incelenmelidir.



Şekil 4.9 : CDF veri iletim hızı ölçümleri.

Bu bölümdeki veri iletim hızlarının ölçümü ile ilgili değerlendirmeyi tamamlamadan önce Şekil 4.10'daki 1800 MHz 2x2 MIMO konfigürasyonun detaylı kayıtlarını kullanarak teorik beklentiler ile canlı şebeke performans karşılaştırmasının kısa bir değerlendirmesi yapılmıştır.



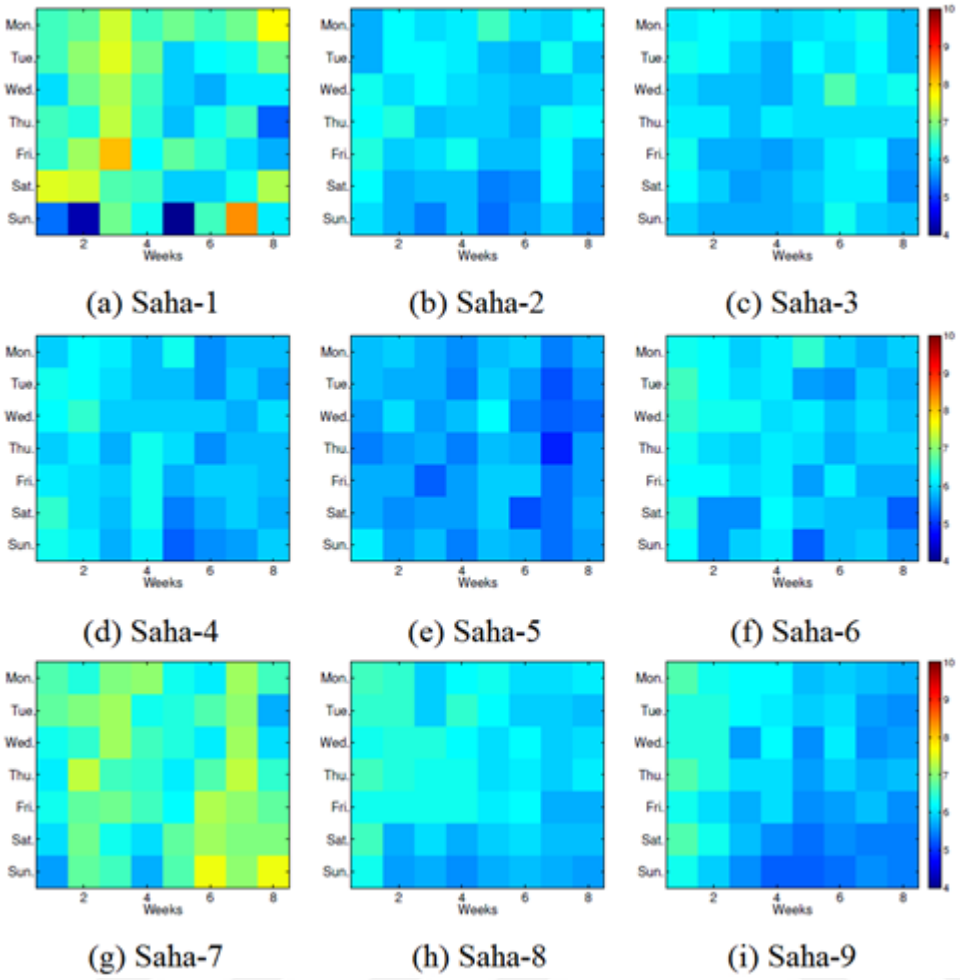
Şekil 4.10 : 1800 MHz 2x2 MIMO veri iletim hızı analizi.

Farklı modülasyon oranları ve farklı SINR ölçümlerinin temel amacı, teorik kapasite ve beklenen veri iletim hız değerlerini hesaplamaktır. 1800 MHz 2x2 MIMO 256-QAM konfigürasyon için teorik maksimum veri iletim hızı değeri 200 Mbps olarak verilmektedir. Sistem kapasitesi için

$$Cap = \min(N_T, N_R) x BW x \log_2(1 + SINR)\ [bps] \tag{4.1}$$

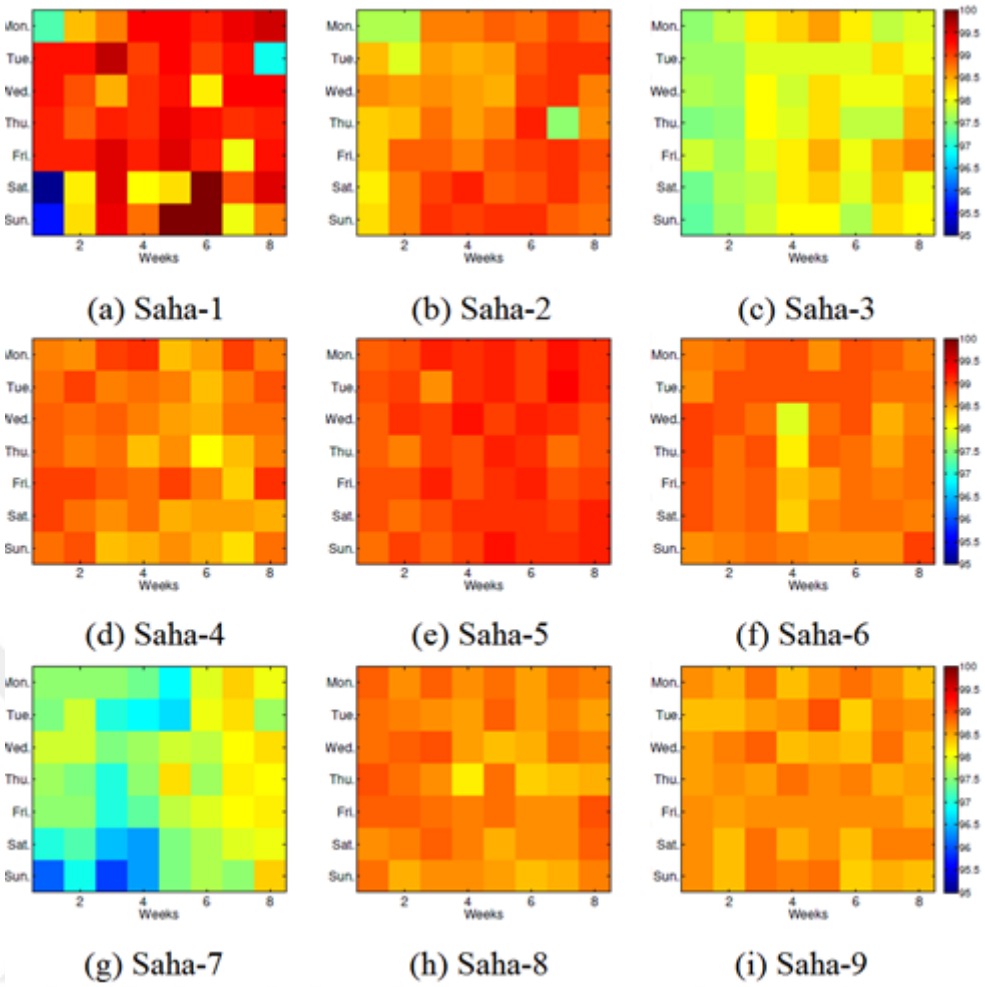
formülünü kullanabiliriz. Burada NT ve NR, sırası ile verici ve alıcı anten sayısını; BW, sistem bant genişliğini temsil eder. SINR aralığının gözlemleme oranları dikkate alındığı zaman belirtilen saha konfigürasyonu için ölçümlenen kapasite maksimum 159 Mbps'dir. Ancak, ölçülen ortalama veri iletim hızı değeri ise 41.8 Mbps'dir. Verilen test bölgesi için ortalama kullanıcı veri iletim gecikme değeri 6.1 ms ve baz istasyonu kırılımında zaman içinde dağılımı ise Şekil 4.11'de verilmiştir.

Şekil 4.2'deki ortalama kullanıcı sayısı gösteriminden farklı olarak Şekil 4.11'de ortalama veri iletim gecikmesinin çok büyük değişimler göstermediği söylenebilir. Veri iletim gecikmesi daha çok saha topolojisi ve sahanın merkez çekirdek şekebe elemanlarına nasıl bağlandığı ile alakalıdır. Yakın fiziksel alanlarda bulunan sahalar topolojik olarak benzer mimaride olduklarından veri iletim gecikmeleri arasında büyük farklar beklenmez. Ancak yine de tanımlama ve port kapasitelerinden dolayı belli ölçüde değişimler de gözlenmektedir.



Şekil 4.11 : Ortalama veri iletim gecikmesi.

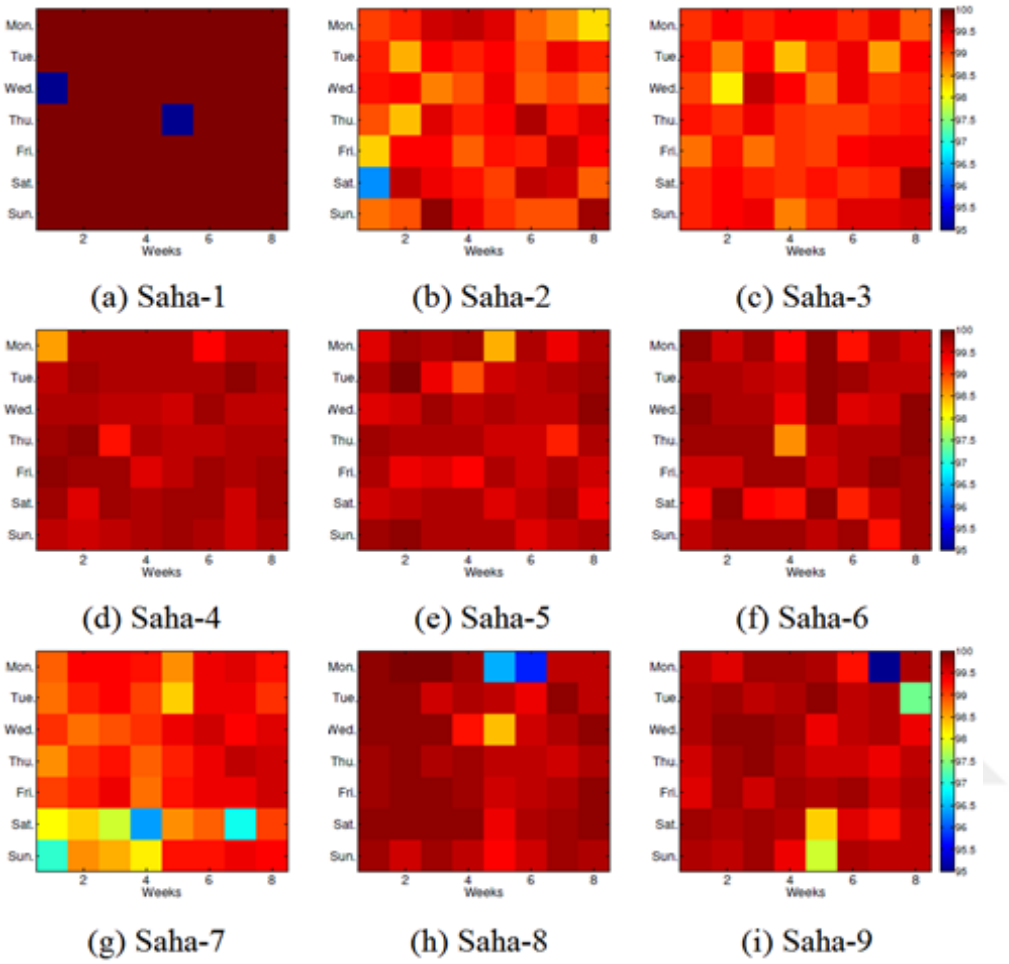
Kablosuz haberleşme sistemlerindeki abonelerin hareketli olması nedeni ile eNodeB'ler arası geçiş başarı oranları sahaların mobilite performansları açısından önemlidir. Sistem tasarımı nedeniyle iki eNodeB arası geçiş sadece kaynak ve hedef aynı frekansta ise gerçekleşebilir. Bununla beraber eNodeB'nin sektörleri arasında ve sektörün kendi içinde ise farklı frekanslara doğru geçişlere izin verilir. Şekil 4.12'de aynı frekans geçişleri için eNodeB performansları gösterilmiştir. 7 nolu eNodeB'de hafta içi kullanıcı sayısı oldukça fazladır, mobilitenin yüksek olduğu bu sahada aynı frekanstaki (farklı eNodeB'lerdeki) hücreler arası geçiş başarı oranı önemli oranda düşüktür. Sahanın servis alanının geniş olması ve sahanın bulunduğu coğrafi alanın yüksek mobilite kaynaklı sinyal seviyelerindeki ani değişimi tetiklemesi, bu başarım oranını önemli derecede etkilemektedir.



Şekil 4.12 : eNodeB'ler arası geçiş performansı.

Bunun yanında düşük mobilite durumunda aynı eNodeB'ye ait sektörler arası ve sektör içi farklı frekanslara doğru geçiş performansı da Şekil 4.13'te verilmiştir. eNodeB içindeki farklı sektörler arası ya da aynı sektör (anten) yönündeki farklı frekansa sahip hücreler arasında geçişin tetiklenebilmesi için yük dağılım mekanizmasının düzgün şekilde çalışıyor olması gerekmektedir. Bu durum 1 no'lu eNodeB'de neredeyse mükemmel olarak çalışırken Saha-7 için ise parametrik bazı düzenlemelerin tamamlanması gerekmektedir. Bu saha bulunduğu lokasyon itibariyle yukarıda da belirttiğimiz gibi yüksek mobiliteye sahiptir, bu nedenle geçiş sinyal seviyelerinin tekrar gözden geçirilerek performansın artırılması hedeflenmiştir. Hem aynı hem farklı frekanslara sahip hücreler arası geçişin performansı %100'e yaklaşmaktadır. Aynı frekansa sahip hücreler arası geçiş başarı oranı farklı frekanslara ait hücreler arası geçişe göre daha korunaklı durumdadır. Farklı MIMO konfigürasyonları için hücreler arası geçiş senaryoları aynı akışı takip etmektedir. Tek bağlantı olduğu senaryoda RRC

bağlantısı tek bir eNodeB'ye bağlıdır. Farklı eNodeB'ler arasında CA yapıldığı zaman hücreler arası geçiş senaryoları da farklı olabilmektedir.

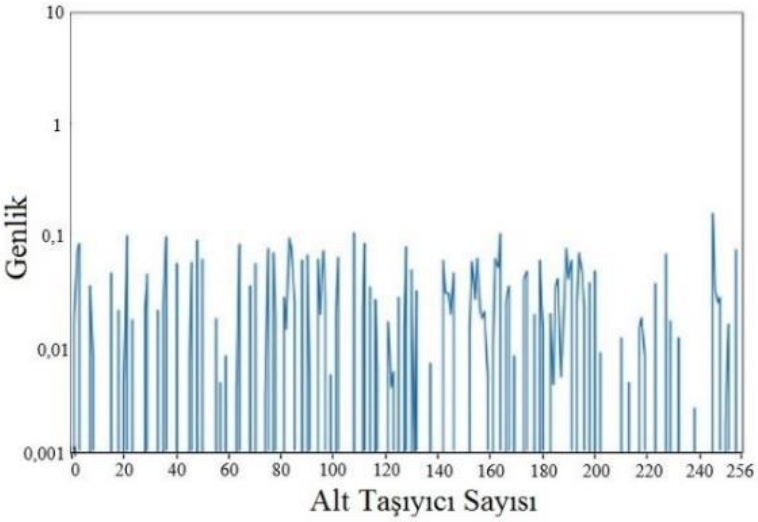


Şekil 4.13 : eNodeB içi geçiş performansı.

4.3 Harici Sinyal Bozucu Durağan Ortam Saha Ölçümleri

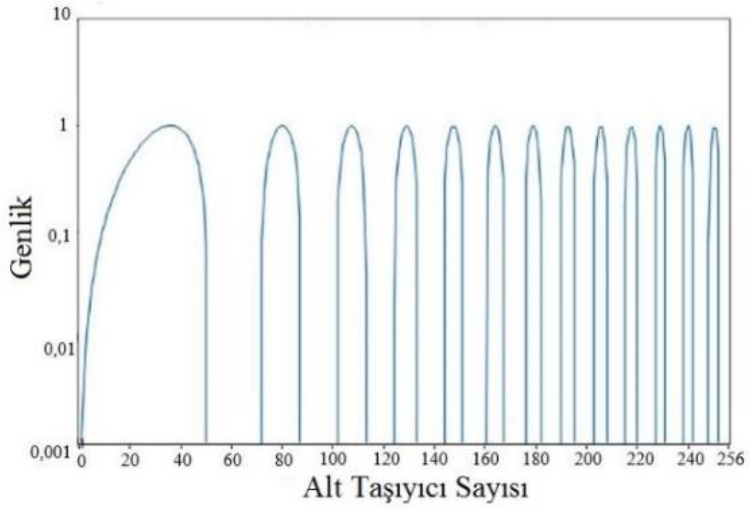
LTE PHY'deki sinyal bozucu etkisini araştırmak için, önce sinyal bozucu saldırılarının tanımlanması gerekir. Literatürde yayınlanan çeşitli dokümanlar farklı bozucu tipleri hakkında değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Xu ve diğerleri tarafından 2005'te yapılan analize göre, bozucu çeşitleri sabit sinyal bozucu (radyo sinyali), yanıltıcı sinyal bozucu (kanala düzenli paketler gönderir), rastgele sinyal bozucu (radyo sinyali göndererek uyku modu ve aktif modu arasında geçiş yapan) ve son olarak, reaktif sinyal bozucu olarak tanımlanmıştır [44]. Clancy [45], kanal tahsisi için pilot ton sinyallerini kullanan OFDM sistemleri için pilot ton bozma atağı çalışması ile, sinyal

bozma saldırılarına 2011 yılında yaptığı analizler ile farklı bir yaklaşım getirmiştir. Geniş bantlı bozucu, OFDM sisteminin tüm alt kanallarını bozmaktadır ama dar bantlı pilot sinyali bozma girişimi çok daha karmaşıktır. Dar bantlı bir sinyal bozucu belirli bir protokolü hedeflediğinde, LTE'nin fiziksel ve sinyalleşme kanalları biçiminde sahip olduğu alt kanallardan birini bozarak çok etkili bir saldırı gerçekleştirebilir. Sinyalleşme kanalları eNodeB ile UE arasındaki haberleşme sisteminin sağlıklı çalışması için hayati önem taşımaktadır. Tüm frekans bant genişliğini bozmak yerine belirli bir kanalı hedefleyen bozma türü de son zamanlarda oldukça popülerdir ve akıllı sinyal bozucu (smart jamming) olarak adlandırılır [46].



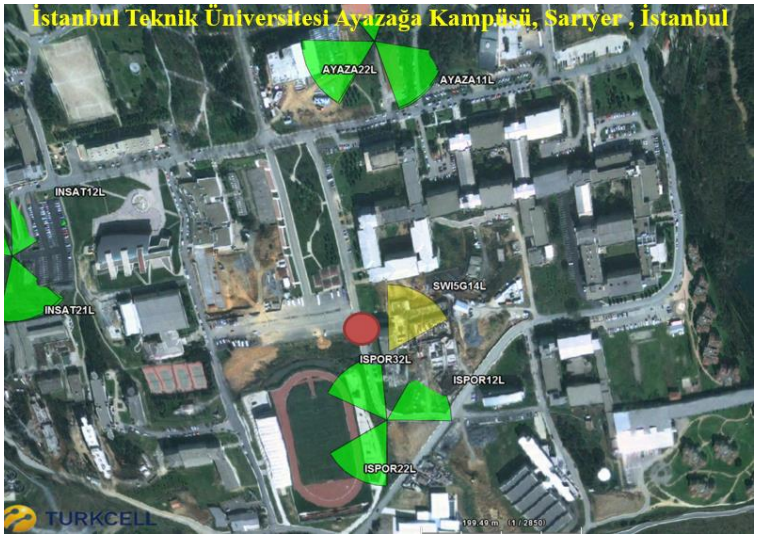
Şekil 4.14 : Geleneksel bozucu sinyal yapısı.

Durağan ortamda yapılan testler sırasında girişim kaynağı olarak kullanılan farklı karakteristiklere sahip iki tip sinyal bozucu ele alınmaktadır. USRP N210 yazılım tabanlı radyo çözümü ile bozucular tasarlanmış ve uygulanmıştır. Birinci tip bozucu, alt taşıyıcıları sıfır ortalamalı ve varyansa sahip Gauss dağılımlı sinyaller olarak kabul edilen OFDM yapıdaki geleneksel bir kısmi bant bozucudur (conventional partial band signal jammer) ve Şekil 4.14'te gösterilen bu sinyal bozucu geleneksel bozucu olarak adlandırılır.



Şekil 4.15 : Chirp bozucu sinyal yapısı.

İkinci bozucu tipi ise, sinyali Gauss dağıtılmış geleneksel bozucuya kıyasla daha düşük PAPR değerine sahip olan özel bir dalga formundaki kısmi bant sinyal bozucusudur (chirp partial band signal jammer). Genellikle chirp bozucu olarak adlandırılır ve Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Durmaz ve diğerleri tarafından 2017 yılında yapılan çalışmada belirttiği gibi, chirp bozucu saldırıları Gauss gürültüsüne dayalı geleneksel bozucu saldırılara göre iletişim kalitesini daha ciddi bir şekilde bozduğu belirtilmiştir [47]. Sinyal bozucular için kullanılan cihazların sınırlı çıkış gücü göz önünde bulundurulduğunda, daha iyi bir PAPR karakteristiğine sahip bir chirp sinyal bozucu daha etkili bir şekilde sinyal kalitesini bozabilir.



Şekil 4.16 : İTÜ Ayazağa Kampüsü test alanı.

Harici sinyal bozucunun durağan ortamda yapılan testleri, İstanbul Teknik Üniversitesi Ayazağa Kampüsünde, Şekil 4.16'da gösterilen lokasyonda gerçekleştirilmiştir. Test alanında üç adet aktif FDD LTE eNodeB bulunmaktadır.

Çizelge 4.5 : LTE saha konfigürasyonu.

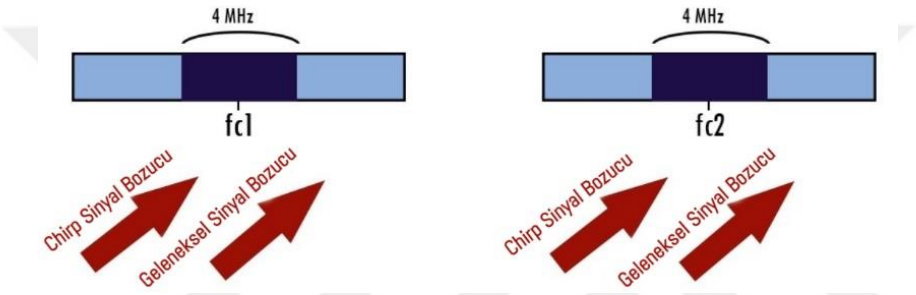
Çalışma Frekansı	**800 MHz**	**1800 MHz**	**2600 MHz**
LTE Bant Genişliği	10 MHz	20 MHz	20 MHz
eNodeB Anten Sayısı	2x2	4x4	4x4
eNodeB Anten Kazancı	15.4 dBi	17.4 dBi	17.4 dBi
Çeşitleme Yöntemi	FDD	FDD	FDD
eNodeB Çıkış Gücü	2x43 dBm	4x44,7 dBm	4x44,7 dBm
Referans Sinyal Kazancı	3dB	0 dB	0 dB

Şebeke konfigrasyon bilgisi Çizelge 4.5'te genel hatları ile verilmiştir. Test senaryolarında sinyal bozucunun çalıştırılacağı frekans 1800 MHz bandıdır. Gerçek zamanlı kullanıcı trafiğine sahip olan bir eNodeB test lokasyonu olarak seçilip, bu sahanın 1800 MHz frekansı kullanılmıştır. Şekil 4.16'da gösterilen kırmızı daire durağan testlerin yapıldığı alanı vermektedir. Çizelge 4.6'da de test parametreleri verilmiştir.

Çizelge 4.6 : Test parametreleri.

UL Merkez frekansı, f_{c1}	1755.1 MHz
DL Merkez frekansı, f_{c2}	1850.1 MHz
Sinyal Bozucu Bant Genişliği	4 MHz
Sinyal Bozucu Çıkış Gücü	27 dBm
Test terminali UE Kategori	Kategori 6
Test terminali Çıkış Gücü	23 dBm
UE ve eNodeB arası mesafe	15 metre
Sinyal Bozucu ve UE arası mesafe	<1 m

Şekil 4.17'de görüldüğü gibi, sistem bant genişliğinin merkezindeki frekanslar sinyal bozucuya maruz bırakıldı. Belirtilen 2 tip sinyal bozucunun şebeke performansı üzerine etkileri çeşitli senaryolar ile karşılaştırıldı. Bir harici sinyal bozucu kaynağının LTE şebekesine potansiyel etkisini gözlemlemek için Çizelge 4.7'de açıklandığı gibi 6 farklı test senaryosu belirlendi. DL1 ve UL1, DL veya UL yönünde sinyal bozma saldırısı olmadığı durumu gösterir. DL2 ve UL2 olarak etiketlenen test durumlarında her iki yönde de merkez 4 MHz geleneksel sinyal bozucuya maruz bırakıldı. Son olarak, DL3 ve UL3 test durumları için geleneksel bozucu yerine chirp bozucu kullanılmıştır.



Şekil 4.17 : İki bozucu tipi için uygulanan girişim senaryoları.

LTE sistem performansını ölçmek için kablosuz haberleşme sistemlerinde kullanılan en yaygın kavram SINR'dır. Kanal kalitesi için bir gösterge olarak kullanılan ve aşağıdaki gibi tanımlanan ortak bir performans ölçütüdür.

$$SINR = \frac{S}{I + N} \tag{4.2}$$

Burada *S*, sinyallerin ölçülen gücünü gösterir (referans sinyalleri ve PDSCH kanalları olabilir), *I* hücrenin kendinden, diğer hücrelerden ya da harici kaynaklardan gelen girişim gücünü gösterir ve *N* de çevre gürültüsünü belirtir. Bununla birlikte SINR, bir kablosuz ağ için sinyal kalitesini ifade etmek amacıyla yaygın olarak kullanılsa da, 3GPP tarafından yayınlanan spesifikasyonlarda tanımlı değildir. Dolayısıyla UE'ler tarafından direkt rapor edilmez. Bunun yerine başka bir performans metriği olan referans sinyal kalite (Reference Signal Received Quality, RSRQ) indeksi kullanılır.

$$RSRQ = N_{PRB} \frac{RSRP}{RSSI} \tag{4.3}$$

N_{PRB} alınan sinyal gücü göstergesindeki (Received Signal Strength Indicator, RSSI) RB sayısıdır. Referans sinyal gücü (Reference Signal Received Power, RSRP), tüm bant genişliği üzerindeki hücreye özel RS'lerin ortalama gücü olan alınan sinyal referans gücüdür, böylece RSRP sadece RS'i taşıyan sembollerde ölçülür. RSSI, toplam geniş bant gücü (tüm sembollerdeki ölçümü) tüm girişimler ve termal gürültü dahil olmak üzere bilgi sağlayan bir parametredir.

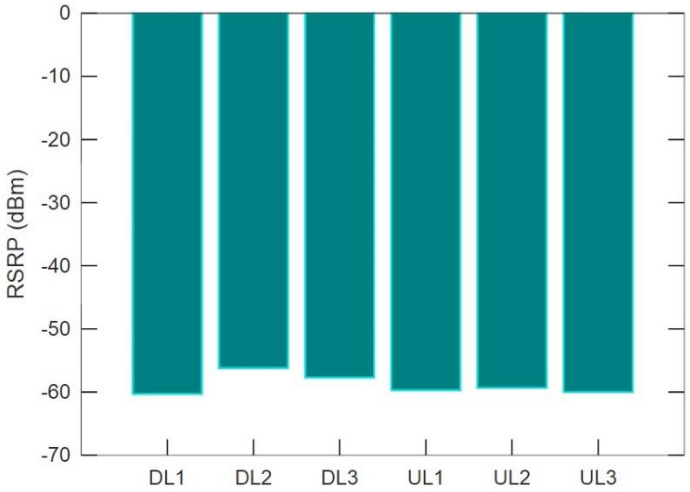
$$RSSI = S + I + N \tag{4.4}$$

Bu performans ölçütleri, ortamın radyo frekans (RF) koşullarına bağlıdır. Sinyal bozucu kaynakları gibi herhangi bir harici girişimin bir sapmaya neden olacağı açıktır. Sinyal bozucuların sisteme etkilerinin gözlenmesi için, bu performans metriklerindeki varyasyonlar karşılaştırılır.

Çizelge 4.7 : Test etiketleri açıklaması.

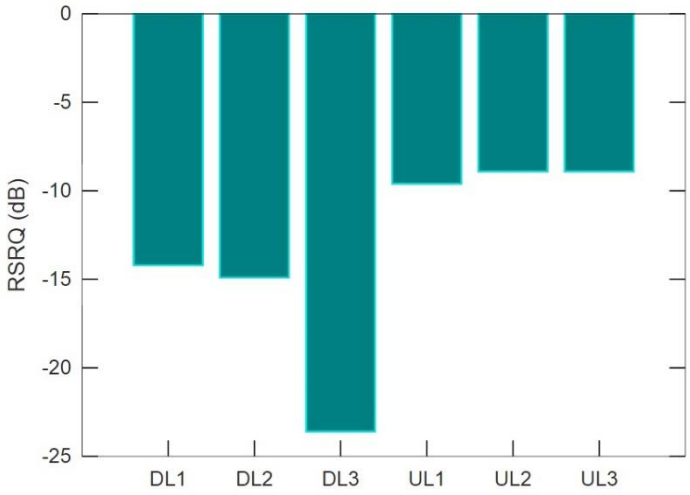
Test Etiketi	**Frekans Yönü**	**Sinyal Bozucu Lokasyonu**	**Sinyal Bozucu Tipi**
DL1	DL	-	-
DL2	DL	Merkez	Geleneksel
DL3	DL	Merkez	Chirp
UL1	UL	-	-
UL2	UL	Merkez	Geleneksel
UL3	UL	Merkez	Chirp

Ölçümler, operatörün uzman mühendisleri yardımıyla gerçekleştirilmiştir ve performans metriklerini içeren ölçüm raporları, hizmet veren hücrenin bağlı bulunduğu eNodeB'den ve testte kullanılan UE'den alınmıştır. UE davranışını gözlemlemek ve istatistiklerini elde etmek için LTE Cat-6 UE üzerine kurulu TEMS yazılımı kullanılmıştır. UE ve sinyal bozucu arasındaki mesafe etkiyi net gözlemlemek adına çok yakın tutulmuştur. Her bir ölçümü yaklaşık 3 dakika süren çalışmada kolaylık sağlaması açısından sinyal bozucunun etkilerinin gözlemlenmesi için performans ölçümlerinin ortalama değerleri incelenmiştir.

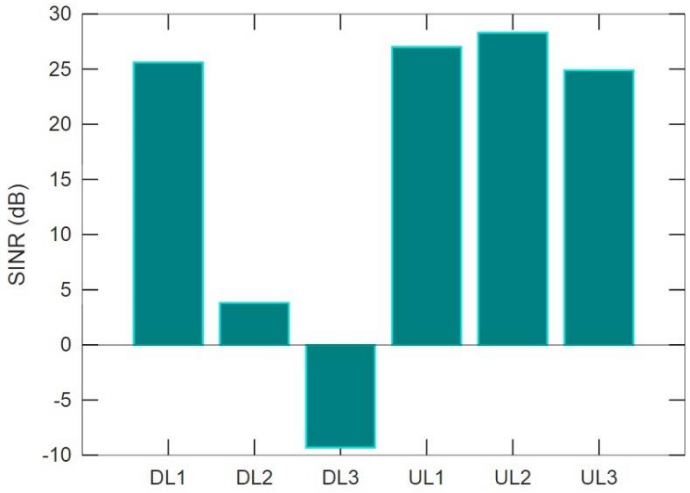


Şekil 4.18 : Ortalama RSRP ölçümleri.

Şekil 4.18, eNodeB tarafından iletilip UE tarafından alınan sinyalin güç seviyesini ifade etmek için kullanılan RSRP'nin ortalama değerlerinin, her bir test senaryosu için benzer (yaklaşık -58 dBm) olduğunu göstermektedir. Çünkü girişim eNodeB tarafından iletilen toplam sinyal gücü üzerinde bir etkiye sahip değildir. RSRP'nin aksine, doğrudan DL iletim kalitesi ile ilgili olan RSRQ ve SINR değerlerinin sinyal bozucu tarafından etkilendiği deneyimlenmiştir. Şekil 4.19 ve Şekil 4.20 bu iki metriğin ortalama ölçüm sonuçlarını gösterir. Herhangi bir UL girişim senaryosunda RSRQ ve SINR değerleri ile DL1 senaryosu değerlerinin birbirine yakın olduğu her iki şekilde de görülmektedir. Günlük hayatımızı etkileyecek bir senaryoyu analiz etmeyi amaçladığımız için sinyal bozucu aktif edildiğinde UE çoktan şebekeye erişmiş ve bir eNodeB'den servis almaya başlamış olacaktır. Ayrıca, DL1 testi sırasında, şebeke yükü tüm UL testleri sırasından daha fazla olmuştur. Bu nedenle, RSRQ değerleri Şekil 4.19'da gösterildiği gibi farklıdır (DL1: -14 dB ile UL1: -9 dB). Her iki figürde de, chirp sinyal bozucunun geleneksel sinyal bozucudan daha olumsuz bir etkiye sahip olduğu açıktır. DL frekansın merkezini bozma senaryoları UL frekansının merkezini bozma senaryolarından daha olumsuz etkiye sahiptir. Çünkü çoğu DL kontrol sinyalleri çalışma frekansının tam ortasında bulunmaktadır. Ayrıca bozucu sinyal bant genişliği 4 MHz olduğundan, PBCH kanalına ek olarak, PHICH kanalının merkeze yakın olan kısımları bozucu girişiminden etkilenmiştir. Son olarak, DL3 testi sırasında, kötü RF koşulları yaratılması nedeniyle test UE'sinin LTE şebekesinden bağlantısı kesilmiştir (ortalama RSRQ -23.6 dB, ortalama SINR -9.26 dB).



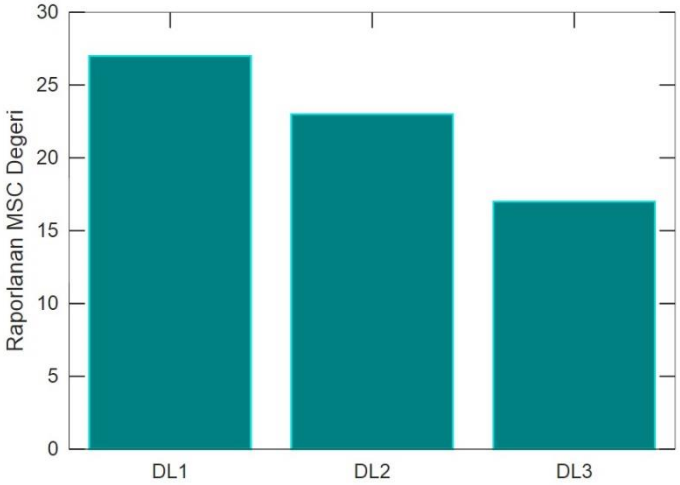
Şekil 4.19 : Ortalama RSRQ ölçümleri.



Şekil 4.20 : Ortalama SINR ölçümleri.

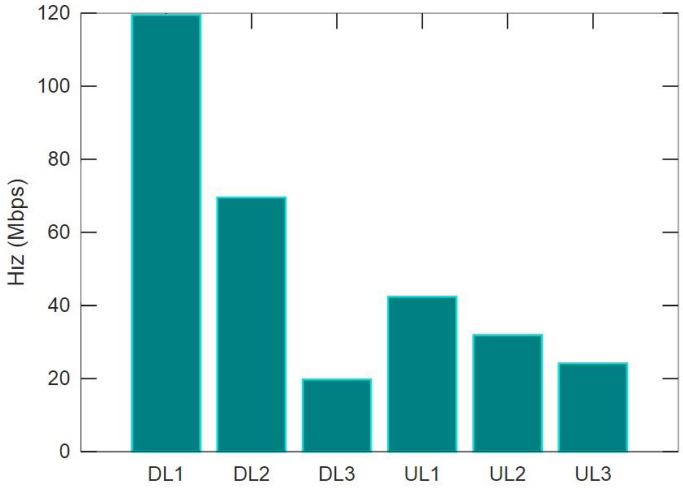
LTE şebekesi, uyarlamalı (adaptive) modülasyon kodlama şemalarını (Modulation Coding Schemes, MCS) kullandığından, şebekede sinyal kalitesi değiştiğinde modülasyon ve kodlama tipini değiştirir. Gürültü ve girişim seviyesi düşük olduğunda yüksek modülasyon, gürültü ve girişim seviyesi yüksek olduğunda düşük modülasyona uyarlar. Dolayısıyla, SINR seviyesindeki değişim ile tanımlanan modülasyon değerlerinin birbiri ile örtüşmesi beklenir. Bu savın yansıması Şekil 4.21'de gösterilmektedir. UE'nin TEMS çıktılarına göre test sırasında raporlanan MCS değeri 0 ile 28 arasındadır. En düşük MCS değeri olan 0'da QPSK modülasyonu, en yüksek MCS değeri olan 28'de de 64-QAM ya da 256-QAM modülasyonu ile iletim yapılır. En etkili harici bozucu girişimi senaryosunda (DL3 durumu), 17 ile

modülasyon kodlama şeması en düşük ortalamaya sahip olduğu görülebilir. Bu nedenle, girişimin etkisi azaldıkça, şebekenin çalıştığı modülasyon kodlama şeması da artar. Daha yüksek MCS ile daha yüksek derecede modülasyonun uygulanacağı ve dolayısıyla daha yüksek veri iletim hızı sağlanacağı açıktır.



Şekil 4.21 : Ortalama MCS ölçümleri.

Hız, girişimin etkisini doğrudan görebileceğimiz gerçek bir performans ölçütüdür. 20 MHz bant genişliğinde teorik olarak çıkılabilecek en yüksek hız DL için saniyede 400 Mbit, UL için saniyede 100 Mbit olur. Şekil 4.22'deki test senaryolarındaki ortalama DL ve UL hız değerleri aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Metot olarak DL frekanslarında girişim yaratıldığında DL hız değerleri, UL frekanslarında girişim yaratıldığında ise UL hız değerleri kaydedildi. RSRQ ve SINR grafiklerine benzer şekilde, Şekil 4.22 bize göstermektedir ki her iki yönde de en zararlı bozucu türü chirp sinyal bozucu olmuştur. UE'nin veri iletim kanallarının (DL için PDSCH, UL için PUSCH) girişime uğraması durumunda hızın düşmesi oldukça beklenen bir durumdur.



Şekil 4.22 : Ortalama hız ölçümleri.

4.4 Harici Sinyal Bozucu Mobil Ortam Saha Ölçümleri

Bölüm 4.3'te yapılan çalışmalarda, durağan ortamda farklı iki tip harici sinyal bozucu ile LTE şebeke performansı gözlenmişti. USRP N210 yazılım tabanlı radyo çözümü ile tasarlanan bozucular, çok düşük olan çıkış güçleri nedeni ile hareketli testlerde kullanılmamıştır. Geleneksel sinyal bozucu ile benzer yapıda olan, ancak çıkış gücü çok daha yüksek olan ticari tip bozucular hareketli testlerde kullanılmıştır. İki farklı ölçüm ile öncesi sonrası sonuçlar mobil ortamda ve canlı trafik altında gerçekleştirilmiştir. UE'ler herhangi bir frekansa kilitlenmemiştir. Test sistemi düzeneği için bir araç içine yerleştirilmiş harici sinyal bozucu kullanılmış ve aşağıdaki görsellerde sunulmuştur.

Şekil 4.23 (a), (b), (c), (d), (e), (f)'de gösterilen test ortamındaki bozucu cihaz 1800 MHz frekansında tüm bantta yayın yapacak şekilde modellendi. Yüksek bant genişliğinde yayın yaptığı için çıkış gücü nispeten düşüktür (33 dBm → 2 W). Bunu artırmak için bozucu çıkışına doğrusal bir yükseltici bağlandı. Bu sayede çıkış gücü 40W (46 dBm) seviyesine çıkmaktadır. Ancak bu çıkış gücünü gerçekçi seviyelere çekmek için sırası ile 10W'lık ve 20W'lık zayıflatıcılar kullanıldı. Bu zayıflatıcılar sayesinde mobil ortamda optimum etki sağlanmaya çalışıldı. Optimum seviyeden amaç kalite kaynaklı olarak frekanslar arası (inter frequency) ve teknolojiler arası (inter radio access technology, IRAT) geçiş yapmasına neden olmayacak şekilde çıkışı ayarlamaktır. Bu nedenle 20W'lık zayıflatıcı kullanıldı. Bozucu yayını için de sistem

aracın ön camına Şekil 4.23 (e) ve (f)'deki gibi konumlandırıldı ve güzergâhta sabitlendi.



(a) (b)

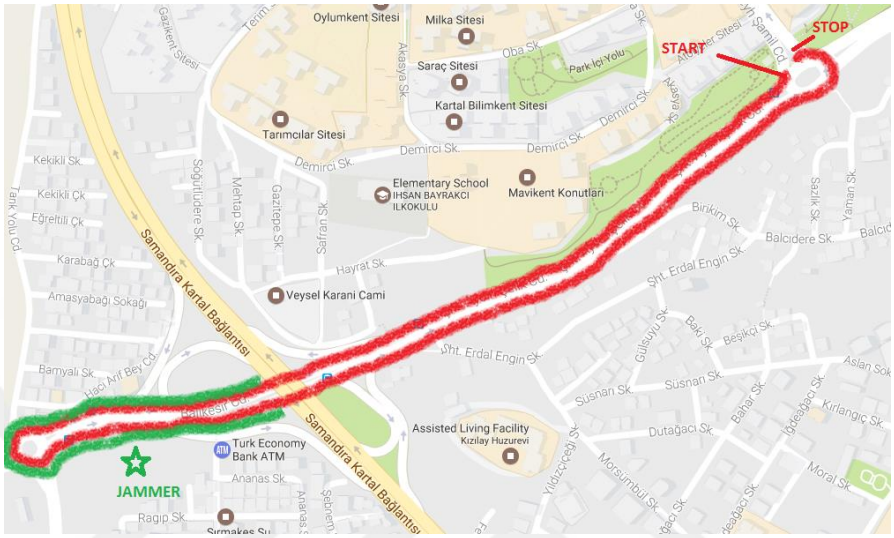
(c) (d)

(e) (f)

Şekil 4.23 : Test düzeneği.

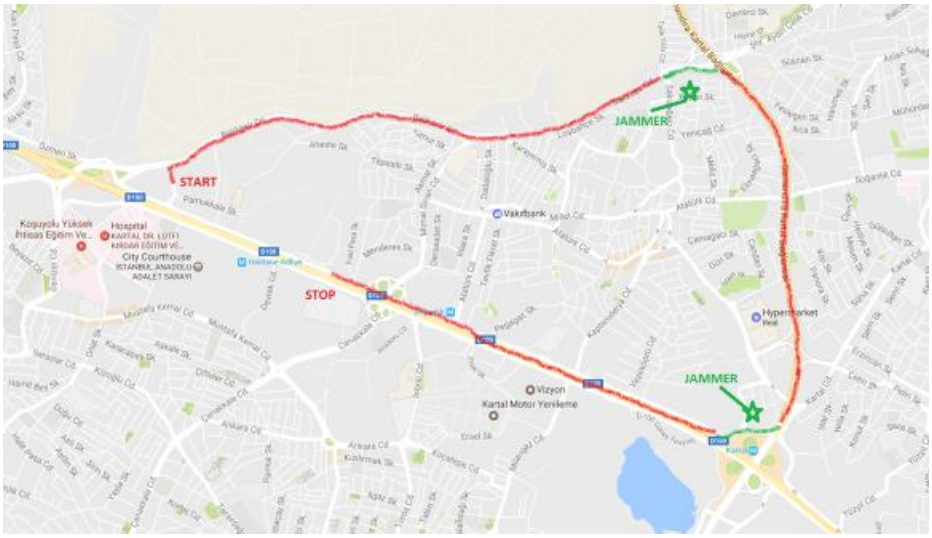
Testler iki güzergâhta yapıldı. Şekil 4.24'te gösterilen kısa güzergâhta harici sinyal bozucu açık ve kapalı olacak şekilde ölçümler yapılarak sonuçlar değerlendirildi. Şekil 4.25'te gösterilen uzun güzergâhta da iki ayrı noktaya konumlandırılan harici sinyal bozucu ile sistem performansındaki değişim gözlendi.

Şekil 4.24'ten görüleceği üzere bozucu yeri güzergâhın uç noktasında konumlandırılmıştır. Görsele göre hem kırmızı hem de yeşil izlerin bulunduğu alanlar bozucu etkisindeki alanlardır. Keskin geçişin olmasının nedeni, güzergâh üzerindeki altgeçittir. Bozucu etkisinin yayılımı bu altgeçit nedeni ile bastırılmıştır.



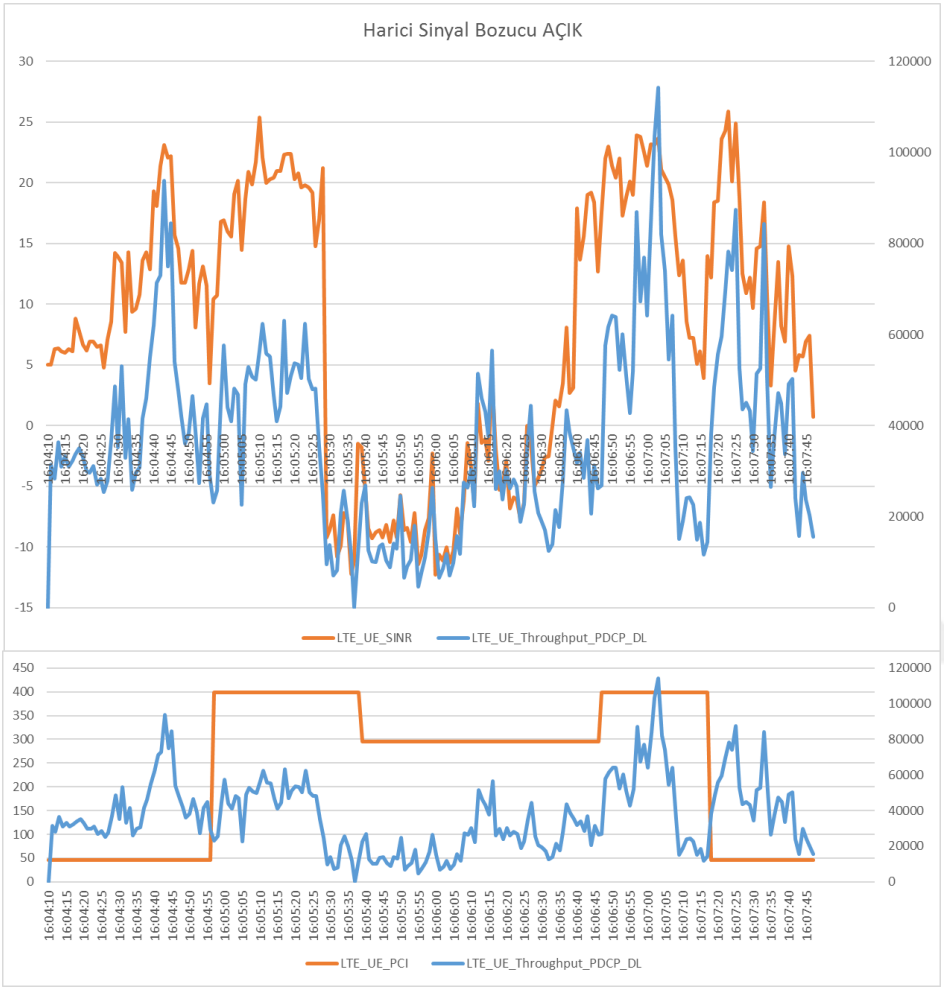
Şekil 4.24 : Kısa güzergâh.

Öte yandan benzer bir ölçümü de Bölüm 4.2'deki testlerde referans olarak kullanılan (Şekil 4.1) uzun güzergâhta yapıldı. Şekil 4.25'te görülen iki noktaya ayrı ayrı konumlandırılan harici sinyal bozucu araç ile elde edilen ölçümler birleştirildi.



Şekil 4.25 : Uzun güzergâh.

Çalışma makro şebeke normal radyo performans parametreleri ile ve canlı trafik etkisi altında yapılmıştır. Kısa güzergâhta alınan öncesi ve sonrası sonuçlara göre sinyal performansında bozucu etkisinin büyük olduğu tecrübe edildi.

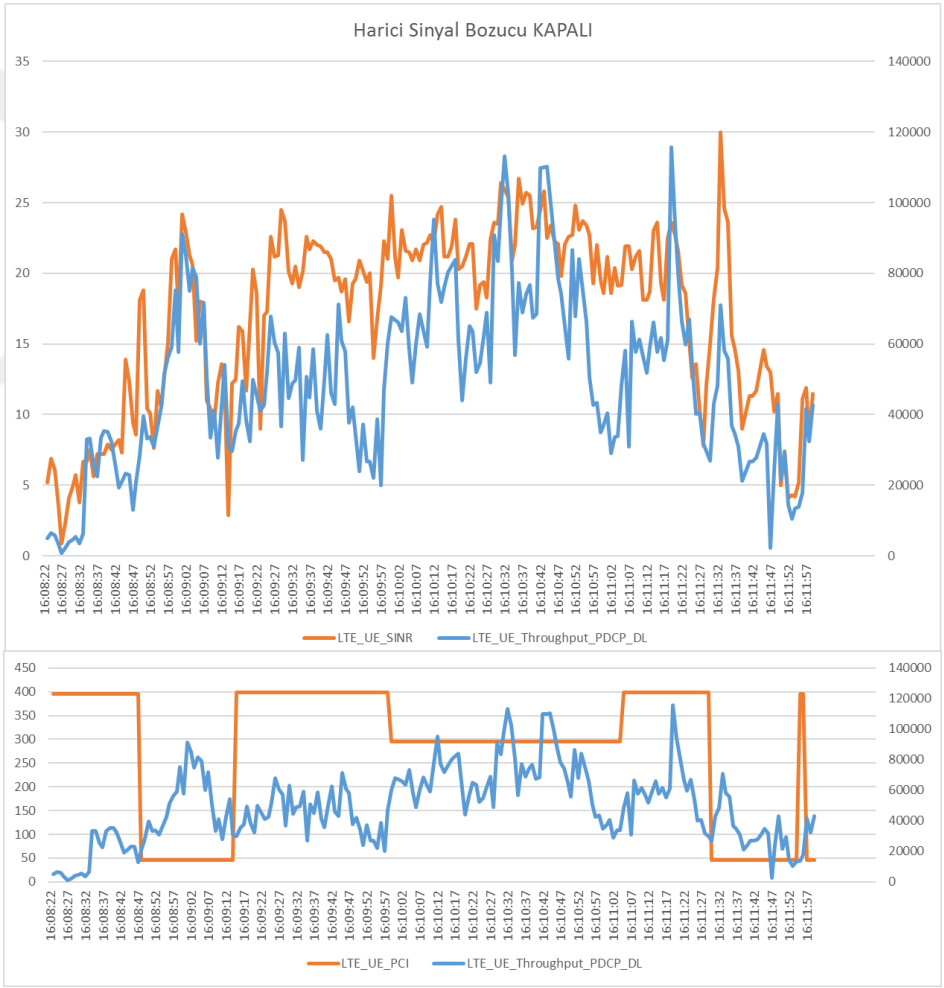


Şekil 4.26 : Kısa güzergâh ölçümleri (açık).

Şekil 4.26, harici sinyal bozucunun açık olduğu durumdaki performans değişimini göstermektedir. Üstteki şekil SINR ve DL veri iletim hız değişimini, alttaki şekil de yine DL veri iletim hızı ve bu hızın hangi sahalardan alındığını belirten PCI değerini sunmaktadır. Buna göre bozucunun açık olduğu güzergâh boyunca DL veri iletim hızının düşüşünün etkileri kolayca görülmektedir. Harici sinyal bozucu, OFDM sinyalin standart şeklini (zarfını) bozduğu için SINR'da neden olacağı düşüş, hız ile benzer şekilde görülmektedir. Bu durum aslında hız düşüşünün SINR kaynaklı

olduğunu, yani sinyal seviyesinde düşüş ya da girişim/gürültü seviyesinde artış ile açıklanması gerektiğini bize göstermektedir. Aynı şekilde iyi SINR seviyesi ile düşük hız değerleri ise harici sinyal bozucu etkisinden bağımsız trafik yükünden kaynaklı ölçülen hız değerleridir.

Şekil 4.27'de ise harici sinyal bozucunun kapalı olduğu duruma ilişkin performans verilerini bize vermektedir. Aynı alanda bozucu kapalı olduğu için güzergâh boyunca alınan testlerde herhangi bir bozulma görülmemektedir. SINR değerinin de belirli bir seviyede gitmesi de hız düşüşünü gerektirecek bir harici etkinin olmadığını belirtmektedir.

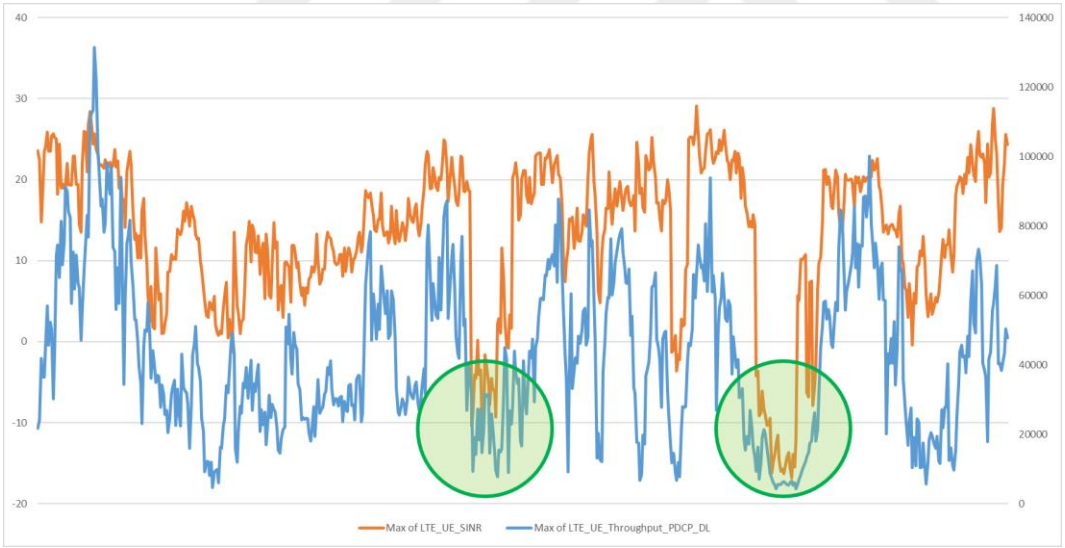


Şekil 4.27 : Kısa güzergâh ölçümleri (kapalı).

Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'nin alt görsellerindeki PCI değerlerini karşılaştırıldığında öncesi ve sonrası testlerde benzer hücreler arası geçiş davranışının sergilendiği

görülmektedir. Harici sinyal bozucu ucuna bağlanan zayıflatıcı seçiminin hassas yapılmasının nedeni de budur. Sinyal seviyesindeki düşüş nedeni ile terminal IRAT handover ile 3G ya da 2G'ye geçmeye gerek duymadan çağrısını LTE'de sürdürmektedir. Benzer durum aynı şekilde farklı frekans geçişi için de geçerlidir. Katman yönetimi modeline göre 1800 MHz altında ve nispeten daha geniş alana servis veren 800 MHz frekansına geçiş yapmaya gerek görmeden tüm harici sinyal bozucu etkilerinin görülmesine imkân sağlanmıştır. 800 MHz sinyal seviyesi güzergâhın herhangi bir noktasında 1800 MHz'e göre daha iyidir. Bu nedenle 1800 MHz önce frekanslar arası geçiş ile 800 MHz'e, 800 MHz de teknolojiler arası geçiş ile 3G'ye aktarılır. Ani sinyal kötüleşmeleri nedeni ile (bozucu etkisi iyi bir örnektir) 1800 MHz'den 3G ve/veya 2G'ye geçiş yaptığı da görülmektedir.

Kısa güzergâhta alınan öncesi (açık) ve sonrası (kapalı) testler arasındaki hız farkı yaklaşık olarak %33 seviyelerindedir. Bu fark kısa mesafeli ölçüm olduğu için kendisini büyük ölçüde hissettirmiştir.



Şekil 4.28 : Uzun güzergâh ölçümleri.

Şekil 4.28'de paylaşılan görsele göre, uzun güzergâhta alınan ölçüm sonuçları da harici sinyal bozucu etkisini açık olarak göstermektedir. Buna göre iki ayrı harici sinyal bozucu lokasyonu için aynı güzergâhta alınan iki ayrı test birleştirilmiştir. Her iki harici sinyal bozucudan ikincisinin etkisinin nispeten daha uzun sürmesinin nedeni ölçümler esnasında hem geçiş hem de bozucu etkisinin yaşanmasından dolayı olarak

yorumlanmıştır. Ölçümler yoğun saatte alındığı için nispeten SINR seviyeleri iyi olsa da birim kullanıcı tarafından deneyimlenen DL veri iletim hızı değerleri göreceli olarak daha düşüktür. Ancak harici sinyal bozucu etkisi altında hem SINR hem de DL veri iletim hızı değerleri ani ve dramatik oranda düşüş göstermektedir. Tüm güzergâhta alınan öncesi sonrası sonuçlar arasında bir karşılaştırma yapmak, ölçüm örnekleminin fazla olması ve bozucuların konumlandığı noktaların sistem performansını yüksek seviyede etkilemeyecek şekilde hassas olarak seçilmesi nedeni ile çok anlamlı değildir. Ancak rakamsal olarak yine de ifade etmek gerekirse değişen trafik ve mobilite koşulları altında harici sinyal bozucu etkisi ile güzergâhta deneyimlenen veri iletim hızı %6 civarında değişmiştir.

4.5 Sonuç

LTE şebekesinin hava arayüzü üzerinden yapılan sinyal bozucu saldırılarına karşı savunmasız oldukları bu bölümde yapılan çalışmalarda gözlenmiştir. LTE şebekesinin harici sinyal bozucu saldırılarına karşı direncinin, LTE PHY ve kanallarına etkisi canlı trafik alan bir şebekede test edilip sağlıklı karşılaştırma yapabilmek amacı ile öncelikle LTE şebeke performans ölçümleri yapılmıştır. Daha sonra iki tip bozucu ile durağan testler, piyasada en çok kullanılan geleneksel bozucu ile de mobil testler farklı güzergahlarda yapılmıştır. Detaylı ölçüm sonuçları LTE şebeke performans ölçümleri referansına göre karşılaştırılıp böyle bir sinyal bozucu saldırılara karşı önlem önerileri aşağıda özetlenmiştir.

- Öncelikle, eNodeB'nin parametrik düzenlemeleri yardımıyla, bir bozucunun varlığı tespit edildiğinde yayın yaptığı frekansı değişebilir. Ancak bu parametrik düzenlemeler bazı durumlarda eNodeB'nin abonelere yayın yapamamasına neden olabilir. Eğer sinyal bozucu frekans değiştirme yeteneğine sahip değilse, bu yöntem olası bir bozucu etkisinden kaçınmak için yeterli olabilir.
- Şebekeye senkron olma yeteneğine sahip bir bozucu atak yapıyor ise, eNodeB'nin zamanlamasını değiştirmek ve farklı bir senkronizasyon döngüsüne geçmek bir yöntem olabilir. Ancak eNodeB ile aktif UE'ler arasında senkronizasyon geçişi esnasında mükemmel uyum, aktif olmayan UE'ler ile de paging tekrarı gibi ihtiyaçlar söz konusu olacaktır. PRACH ve paylaşımlı kanalların iletimini bozmayı hedefleyen daha karmaşık saldırıların

sisteme senkronize edilmesi gerektiğinden, girişim tespit edildiğinde veya bir saldırı başladığında, sinyal bozucunun senkronizasyonunu bozarak bu durum ortadan kaldırılabilir.

- Bozucu tespit edildikten sonra, eNodeB herhangi bir bilgiyi uzun bir süre boyunca yayınlamayı durdurabilir. Ayrıca, UL kontrol kanalları gibi senkronizasyon olmadan veya sistemle ilgili herhangi bir bilgiyi dinlemeden kolayca erişilebilecek ve bozucuya maruz kalabilecek veriler alternatif olarak data kanalları üzerinden iletilebilir. Bu strateji, mevcut bant genişliğinin çoğuna yayılan paylaşımlı veri kanalları üzerinde kontrol bilgisi göndereceğinden, maksimum UL hızında düşüşe neden olsa da, kontrol kanalını hedef alan bozucular için alternatif çözüm senaryosu olarak değerlendirilebilir.

5. SİNYAL BOZUCU DAYANIKLILIĞINI ARTIRMA YÖNTEMLERİ

Bu bölümde LTE şebekesinin sinyal bozucu dayanıklılığını artırmak için iki ana yöntem önerilmiştir. Yöntemleri seçerken mevcut şebeke mimarisine, veri çerçeve yapısına ve 3GPP standartlarına sadık kalmaya gayret gösterilmiştir. İlk önerilen yöntem donanımsal olarak sistemin bozucu bağışıklığını artırırken, ikinci yöntem ise tamamen farklı bir bakış açısı ile kanalların mantıksal yapılarını ve yerlerini düzenleyerek sinyal bozucu atakları bertaraf etmeyi amaçlamaktadır.

5.1 Donanımsal Çözüm

LTE şebekesi yüksek kalite figürleri ile çalışır ise kullanıcı deneyimini pozitif etkiler. Bu motivasyon ile, planlama çalışmalarındaki en önemli hedef yüksek SINR sağlayacak şekilde bir saha tasarımını hayata geçirmektir. Normal şartlarda sinyal girişimlerini minimumda tutacak şekilde planlama yapılır ise farklı baz istasyonlarının birbirine doğru yaptığı negatif girişim düşük olacaktır. Bu durumda her abone için yüksek SINR raporlanır ve kullandığı servisi yüksek kalitede deneyimler. Ancak harici bozucu kaynakları ile oluşturulan girişimin önlenmesi için mevcut tasarımlarda dinamik bir çözüm oluşumu söz konusu değildir. İşte bu noktada 5G teknolojisinin ilk donanımı olarak tanımlanan Ma-MIMO ürününün mevcut LTE şebekesinde kullanımı ile bir fayda sağlanabileceği öngörülmüş, özellikle yüksek kapasite beklentisi olan alanlarda ya da harici bozucu kaynaklarının sık görüldüğü alanlarda bu ürünün ciddi avantaj sağlayacağı analiz edildi. Saha planlama bakış açısı ile değerlendirildiğinde, kapasitif beklentinin karşılanması amacı ile Ma-MIMO kullanımı öncelikli olarak düşünülse de yüksek derecede harici bozucu bağışıklığına sahip olması nedeni ile bu donanımsal çözümün farklı kullanım senaryolarından söz etmek mümkündür.

5.1.1 Ma-MIMO anten

MIMO tekniği, iletişim sistemlerinde alıcı ve verici ünitelerde birden fazla anten kullanılarak erişim şebeke performansının artırılmasını amaçlar. MIMO ile toplam aktarım gücü antenlere dağıtılarak spektral verimliliğin artırılması ve gürültü bileşeninin azaltılması hedeflenir. LTE şebekesinin sinyal bozucu dayanıklılığının

ölçümlendiği 4. Bölümde Çizelge 4.5'te kullanılan antenler 2x2 ve 4x4 yapısında idiler. İlgili bölüm analizinde kullanılan antenlerde, alıcı-verici arasında 2 ya da 4 farklı iletim yolunu kullanarak hem veri iletim başarımının artırılmasını hem de birim zamanda daha fazla veri gönderimini sağlamak amacı ile MIMO tekniğini kullanmışlardır.

MIMO teknikleri, günümüzde aktif olarak kullanılan hücresel iletişim sistemlerinde temelde kullanıcı veri iletim hızını artırmaya yönelik tasarlanmış olsa da, şu anda standartları üzerinde çalışmaları yeni sürümler ile devam eden 5G iletişim teknolojisinde Ma-MIMO anten kullanımı ile servis alanındaki toplam veri hızının artırılmasının yanı sıra, sistem kapasitesinin artırılması da amaçlanmıştır. Ma-MIMO ile aynı frekans spektrumunu kullanarak aynı anda birden fazla kullanıcıya servis vermek mümkündür. Ma-MIMO anten tekniğinin temel mantığı kullanıcı veri iletim hızının yüksek yoğunluklu alanlarda sabit tutulması prensibine dayanır.

Veri iletimi talebinin sürekli arttığı ve frekans kaynaklarının bu talebi karşılamada yetersiz kaldığı kapasitif yoğun lokasyonlarda, 5G teknolojisi henüz son halini almadan da özellikle TDD radyo iletimi yöntemini kullanan 4.5G Ma-MIMO uygulamaları, operatörler tarafından hayata geçirilmeye başlamıştır. Ma-MIMO'nun uygulanabilmesi için verici tarafında 32 veya 64'e kadar çıkabilen çoklu anten sistemlerinde hüzmeleme (beamforming) tekniği kullanılmaktadır. Bu sayede anten sistemlerinin oluşturduğu çoklu servis alanı hüzmelerinin her birinde aynı zaman diliminde aynı frekans aralığı kullanılabilmekte ve sistem kapasitesi artırılmaktadır.

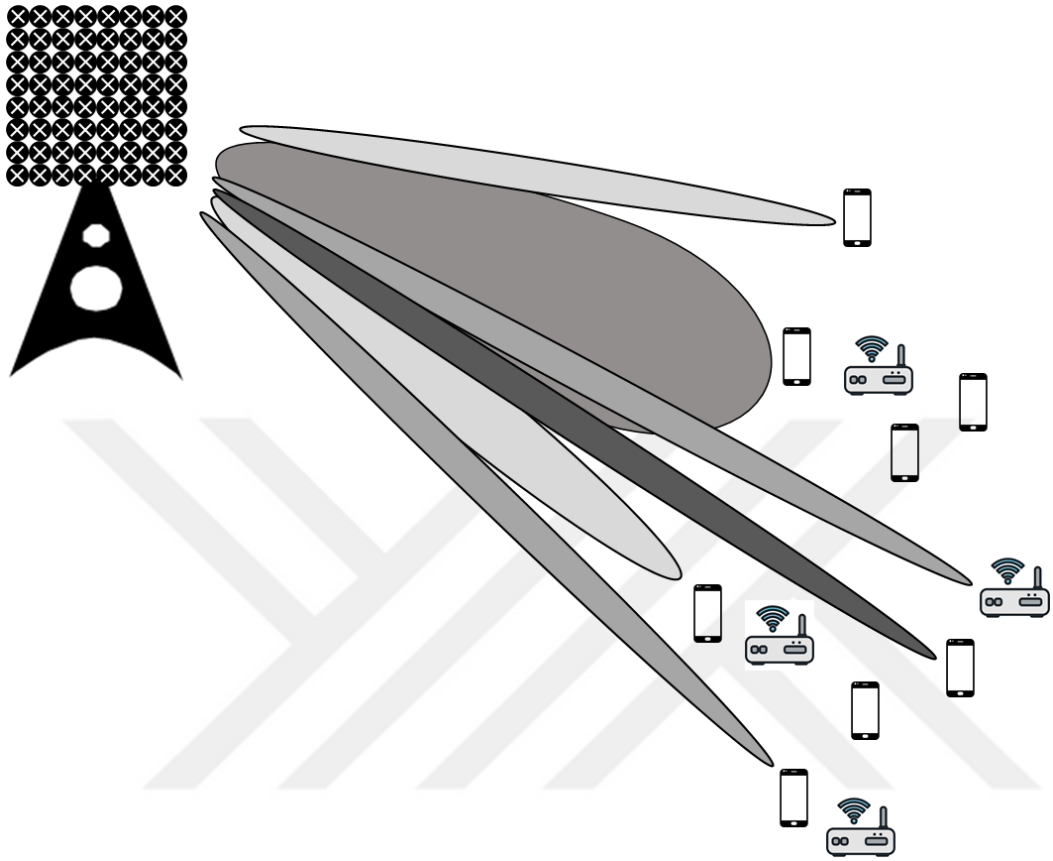
Tek bir servis sahasının oluşturulduğu geleneksel yöntemlerden farklı olarak, dinamik olarak farklı servis sahaları oluşturabilen Ma-MIMO'da hüzmeleme işlemi iki farklı yolla yapılmaktadır.

- Uyarlanabilir Hüzmeleme (Adaptive Beamforming) tekniğinin yapılabilmesi için farklı TM'lerin desteklenmesi ve piyasaya henüz çıkmış olan, sayıca çok az Release 12-13 UE'ler tarafından gönderilen kullanıcıya özel referans sinyallerinin işlenebilmesi gerekmektedir. Bu sayede kullanıcı mobil iken ona özel hüzmenin dinamik olarak kullanıcıyı belli bir aralıkta takip etmesi sağlanabilir.
- Tezin bu alt bölümünü oluştururken yaptığımız denemeler esnasında kullanılan Ma-MIMO anten, anahtarlamalı hüzmeleme (switched beamforming) tekniğini referans alarak kullanmaktadır. Bunun manası kullanıcıya özel bir

referans sinyal ayrıştırmasına gerek duymadan sürekli olarak SINR ölçümü yapıp, abone var ise hüzmeyi açık, yok ise kapalı tutarak on/off modda hüzme yayılımı yapmaktır. Bu sayede 4.5G destekleyen tüm akıllı telefonların da servis alabileceği bir çözüm hayata geçirilmiştir. Denemeler esnasında kullandığımız Cat-4 UE ile de bu sayede Ma-MIMO antenden servis alınabilmiştir.

Klasik 2x2 pasif anten üzerinden servis alan kullanıcılar, aynı kaynağı ve nispeten daha geniş hüzmeyi kullanarak (genelde 60° ± 30°'de 3 dB kayıplı hüzme) spektrumdan yararlanmaktadırlar. Servis alan her abone aynı kaynak havuzundan talepleri ölçüsünde faydalanmaktadır. Ma-MIMO antende ise her katman için sanal olarak ayrı kaynak havuzları tanımlanmış ve servis alan aboneler için stabilite garanti altına alınmıştır. Ma-MIMO antende her hüzme çok daha dar bir yayılım örüntüsü (pattern) sergilemektedir. Abonelerin dağılımına göre daha geniş bir alanı kapsamak için bazen birden fazla hüzme birleşerek tek bir hüzme gibi davranabilirler. Tüm bu değerlendirmeleri anlık olarak tüm abonelerin konum ve SINR bilgilerini göz önünde bulundurarak yapar. Bu hesaplama hassasiyetinden dolayı Ma-MIMO antenlerde aboneler hep yüksek SINR raporlamak ister, çünkü servis aldığı hüzmenin kalitesini düşürecek aboneler yoktur. Eğer bu şekilde konumlanmış aboneler servis talebinde bulunuyor ise, ya yeni bir hüzme açarak onları mevcut hüzmeden izole eder, ya da mevcut hüzmeyi genişleterek bu abone grubunun servis alma kalitesini artırmaya çalışır. Şekil 5.1'de Ma-MIMO antenin genel hüzme yapısı görülmektedir. Testlerde kullandığımız anten 64x64 özelliktedir, bununla birlikte maksimum 16 adet 4x4 hüzme yayılımı yapabilecek bir işlemci gücüne sahiptir. Yani duruma göre maksimum 16'ya kadar eş zamanlı hüzme yayılımı yapılabilir. Abonelerin servis beklentisine, lokasyonuna ve çevresel etkilere göre her bir TTI'da tüm hesaplamaların yapılıp kaç adet hüzme ile nasıl bir yayılım örüntüsünün sergileneceğinin belirlenmesi oldukça karmaşık bir algoritmanın sorunsuz çalışması ile mümkün olabilmektedir. TDD sistemlerde UL ve DL sinyallerin aynı frekans aralığını kullanması, Ma-MIMO'nun TDD radyo iletim sistemlerinde gerçekleşmesini FDD'ye göre görece daha kolay kılmaktadır. Hüzmeleme işleminin doğru (kullanıcıya uygun) yapılabilmesi için kanal tahminlemesinden olabildiğince doğru sonuç alınması ve kanal tahminlemesinin olabildiğince hızlı gerçekleşmesi gerekmektedir. Kullanıcı UL sinyalleri, verici tarafında DL kanal tahminlemesine girdi olarak kullanılır. DL ve UL sinyallerini aynı frekansı bandını üzerinde tanımlayan TDD, bu nedenle farklı frekans bantları üzerinde

tanımlayan FDD'ye göre daha avantajlıdır. FDD'de farklı frekanslardan kaynaklı kanal kestirim zorluğu, TDD'de nispeten daha kolaydır.



Şekil 5.1 : Ma-MIMO anten hüzme modeli.

5.1.2 Sistem konfigürasyon tasarımı ve veri iletim hızı hesabı

Tez çalışmasının bu alt bölümündeki testlerde kullanılan 2600 MHz TDD Ma-MIMO anten 10 MHz bant genişliği üzerinden servis sunmaktadır. Bu bant genişliğinde elde edilebilecek teorik hız şöyle hesaplanır:

- Bantgenişliği (BW): 10 MHz (50 Resource Block)

BW, testlerde kullanılan bant genişliğidir, FDD 2x2 10 MHz bir LTE spektrum teoride 75 Mbps maksimum hız sağlayabilir. Bu değer TDD'de çok daha düşük olacaktır.

- DL/UL oranı: SA2 (3:1)

TDD'nin asimetrik konfigürasyon mimarisi nedeni ile bir çerçevedeki DL ve UL alt çerçevelerin dağılımlarının standartlara göre tanımlanması gerekir. Bu çalışmada 3:1, yani 3 DL ve 1 UL alt çerçeve tanımlaması yapılmıştır. Sahaların birbirine girişiminin

minimumda tutulması amacı ile TDD teknolojisinde özellikle senkronizasyonun sağlanmasına ve tüm sahalarda mümkünse aynı alt çerçeve dağılımının kullanılmasına özen gösterilmelidir. Bu durum bir operatörün tüm TDD sahalarında geçerli olabileceği gibi farklı operatörlerin fiziki olarak birbirine yakın olan TDD sahalarında da geçerlidir.

Çizelge 5.1 : TDD UL/DL alt çerçeve dağılımları.

UL/DL Konf.	DL -> UL geçiş periyodu	Alt çerçeve sayısı									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1		D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2		D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10 ms	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4		D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5		D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Çizelge 5.1'de D, U ve S harfleri sırasıyla DL, UL ve özel alt çerçeve (special sub-frame) kısaltmalarını belirtmek amacı ile kullanılmıştır. UL/DL arasında anahtarlama periyotları 5 ms ve 10 ms olarak tanımlanmıştır. SA2 konfigürasyonunda bu süre 5 ms'dir. Simetrik konfigürasyonlarda 1:1 oranı korunur, SA1 konfigürasyonu buna örnek olarak verilebilir. DL dominant konfigürasyonlar sırasıyla SA3, SA2, SA4 ve SA5'tir. Bununla birlikte UL dominant konfigürasyonlara SA0 ve SA6 örnek olarak gösterilebilir.

- Özel alt çerçeve oranı: 10:2:2 (Configuration 7)

Sahanın planlanan kapsama alanı referansı ile Çizelge 5.1'deki gösterime göre seçilen SA2'deki "S" harfli özel alt çerçeve yapılarının nasıl tasarlanacağı aşağıdaki Çizelge 5.2'ye göre belirlenir. CP değeri de burada belirlenir.

Sahada aktif olarak servis veren Ma-MIMO anten 64x64 yapıdadır. Her bir anten elemanı 2.5W'lık bir güç yükseltici ile beslenmektedir. Pasif antenlerden farklı olarak Ma-MIMO antenlerde anten elemanları ile güç yükselticiler aynı fiziksel donanım içindedirler. 64 Tx, 64 Rx anten elemanı olsa da maksimum eş zamanlı yayılım (stream) sayısı 16'dır. Yani 64x64 Ma-MIMO anten aynı anda maksimum 16 adet hüzme ile yayın yapabilir. Her bir hüzme servis alanındaki terminal tipinden bağımsız olarak 4x4 yayın yapar. Hüzme sayısı servis alan abonelerin servis alanındaki

dağılıma, servis alanının girişim gürültü seviyesine ve abone yoğunluğuna göre değişir.

Çizelge 5.2 : Özel alt çerçeve konfigürasyonları.

Konfigürasyon	Normal CP				Uzatılmış CP			
	DLPTS	GP	ULPTS	Hücre Boyu (km)	DLPTS	GP	ULPTS	Hücre Boyu (km)
0	3	10	1	101	3	8	1	94
1	9	4	1	37	8	3	1	32
2	10	3	1	26	9	2	1	19
3	11	2	1	15	10	1	1	7
4	12	1	1	5	3	7	2	82
5	3	9	2	90	8	2	2	19
6	9	3	2	26	9	1	2	7
7	10	2	2	15				
8	11	1	2	5				

Konsolide veri iletimi için teorik değer olan bir alt çerçevedeki (1 ms) kaynak elemanı sayısı (RE_{sub}) 14 alınır. Teorik maksimum veri iletim hızı hesaplanacağı için kullanılacak olan modülasyon da bu amaca uygun olarak 64-QAM seçilir ve maksimum verimlilik faktörü (maximum efficiency factor, $MEF_{64\text{-}QAM}$) 0,93 alınır. BW, 10 MHz olduğu için kullanılan RB sayısı da 50'dir. Her bir RB'deki alt taşıyıcı sayısı 12 olarak tanımlı olduğu için toplam alt taşıyıcı sayısı 600'dür.

- Toplam kaynak elemanı sayısı (RE_{total})

$$RE_{total} = N_{sub} x RE_{sub} = 600x14 = 8.400 \quad (5.1)$$

- 1 ms'deki toplam teorik bit sayısı (Tput)

$$Tput = RE_{total} x 6 x MEF_{64-QAM} = 8.400x6x0{,}93 = 46.872\ bit/ms \quad (5.2)$$

Sinyalleşme kanallarının ise toplam RB'ler içinde işgal ettikleri alanı yaklaşık olarak aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

- PDCCH → %10
- CRS+DMRS → %14,3+%4,7
- CP → %6,66

Bu bilgileri referans alarak sinyalleşme kanallarının hız üzerine etkisi de şöyle hesaplanabilir:

$$Tput_{sig} = Tputx(PDCCG + CRS + DMRS + CP) \\ = 30.157\ bit/ms \tag{5.3}$$

Sistem TDD olduğundan 1 hüzme için DL yönündeki teorik maksimum hız şöyle hesaplanabilir:

$$Tput_{S-DL} = Tput_{sig}\frac{10}{14} = 21.540\ bit/ms \tag{5.4}$$

$$Tput_{subDL} = Tput_{sig}x6 = 180.942\ bit/ms \tag{5.5}$$

$$Tput_{DL} = 2xTput_{S-DL} + Tput_{subDL} = 21{,}36\ Mbps \tag{5.6}$$

Bu değer 10 MHz FDD teorik hızı ile karşılaştırıldığında oldukça düşüktür. Ancak kapasitif olarak Ma-MIMO anten 16'ya kadar dinamik hüzmeleme yapıp her birinde 21,36 Mbps teorik maksimum hız sunduğu zaman hücre veri iletim hızı yaklaşık 342 Mbps seviyelerine kadar çıkacaktır.



Şekil 5.2 : Ma-MIMO test güzergahı.

5.1.3 Test ortamı

Test düzeneği Şekil 4.23'teki yapı ile aynıdır. Ancak testler bu çalışmada 2600 MHz'de yapıldığı için farklı güç yükselteci benzer şekilde kullanılmıştır. Testler Ma-MIMO antenin bulunduğu Ankara ilinde Şekil 5.2'de belirtilen güzergâhta icra

edilmiştir. Kule üzerinde, yerden yaklaşık 20 metre yükseklikte sabitlenmiş Ma-MIMO anten ile yapılan ölçümlerde hem LOS hem de NLOS ölçümler alınarak bozucu altında performans değişimleri gözlenmiştir. Şekil 5.2'den de görüleceği üzere bozucu yeri güzergâhın iki farklı noktasında konumlandırılmıştır. Güzergâhı simetrik kabul eder isek sağ üst tarafta kalan ölçüm güzergâhının NLOS alanda olduğu söylenebilir.

Çizelge 5.3 : Test ortamı parametreleri.

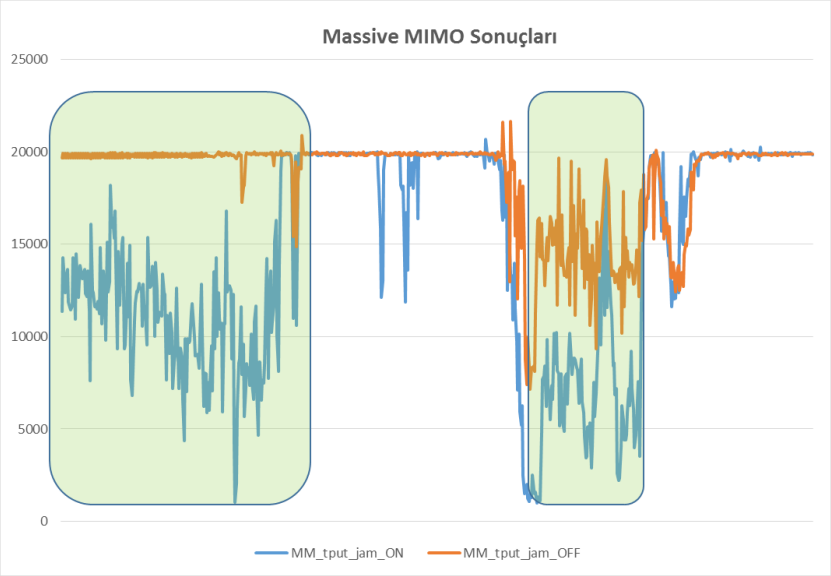
	4. Bölüm Testleri	**5.1. Bölüm Testleri**
Kullanılan çoğullama teknolojisi	FDD	TDD
Frekans Spektrumları	800, 1800	2600
Bant Genişlikleri	10, 20	10
Anten Özellikleri	2x2, 4x4	64x64
Terminal Özellikleri	2x2 Cat-4	2x2 Cat-4
Terminal Bağımsızlığı	Kilitli Değil	TDD frekansa kilitli
Baz İstasyonu Çıkış Gücü	20W, 30W	2.5W
Anten Kazancı	17.4 dBi	16.3 dBi
Yatay Hüzme Genişliği	65°	15°- 90° arası
Dikey Hüzme Genişliği	6°	8°- 35° arası

5.1.4 Test sonuçları

LTE şebekesinin sinyal bozucu dayanıklılığının ölçümlendiği 4. bölümde, saha performanslarının bozucu etkisi ile ne oranda değiştiği 2x2 ve 4x4 eNodeB antenleri kullanılarak mobil ortamda ve FDD frekans spektrumundan faydalanan canlı trafik altında gerçekleştirilmiştir. UE'ler 2x2 Cat-4 özelliğinde olup, herhangi bir frekansa kilitlenmemiş, ölçüm yaptığı frekansta serbest bırakılmıştır. Uçtan uca mimari model ele alınarak veri iletim hızı, SINR, sinyal gücü ve sinyal kalitesi değişimi farklı bozucu tipleri ile birlikte DL ve UL yönünde ölçümlenmiştir.

Bu alt bölümde ise farklı bir saha mimarisi referans alınmış, Ma-MIMO antenli saha mimarisi TDD teknolojisi ile servis verecek şekilde modellenmiştir. TDD teknolojisinin aynı bandı hem DL hem de UL yönünde kullanması, veri iletim hızı açısından negatif olsa da asimetrik servisler için tercih sebebi olabilir. Karşılaştırmalı gösterim Çizelge 5.3'te sunulmuştur.

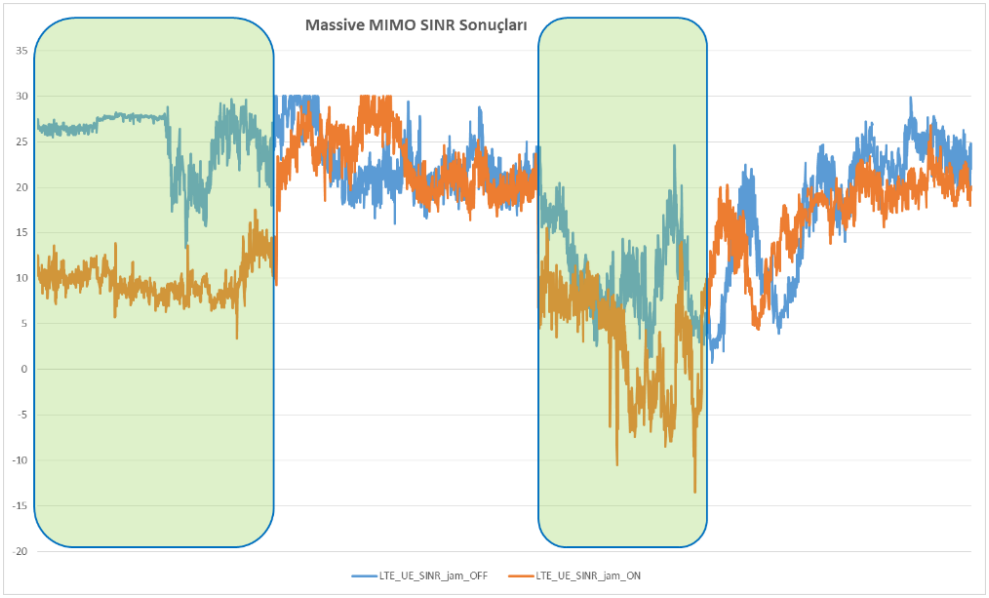
Katmanlı saha mimarisi gereği tüm öncelikler FDD frekanslara göredir. Bunun nedeni operatör şebekesinde FDD ile oluşturulan sürekli kapsama alanıdır. TDD Ma-MIMO anten sadece bir lokasyondan konumlanıp süreklilik ihtiva etmediği için katmanlı saha mimarisinde önceliği en düşük seviyededir. Dolayısı ile düşük ve normal ütilizasyon seviyelerinde TDD Ma-MIMO anten üzerinden servis alan abone sayısı nerede ise yoktur. Bu trafik ortamında test UE'sinin TDD teknolojisi üzerinden servis almasını sağlamak için bu frekansa kilitlenmiştir. Benzer şekilde canlı saha trafiği oluşturmak adına bazı UE'ler manuel olarak TDD Ma-MIMO şebekesinden servis alacak şekilde konfigüre edilmiştir.



Şekil 5.3 : Bozucu etkisi altında Ma-MIMO performansı.

Şekil 5.3'te, bozucu etkisi altındaki performans çıktıları ile bozucu etkisi yokken alınan ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Buna göre bozucunun açık olduğu güzergâhlar boyunca DL hız düşüşünün etkileri kolayca görülmektedir. Özellikle NLOS ortamda düşen hıza karşı yüksek SINR'ın etkisi nedeni ile bozulmanın nispeten daha az olduğu görülmektedir.

Güzergâh boyunca yapılan ölçümler sonucunda sinyalin %21.5 oranda bozulduğu görülmüştür. Aynı lokasyonda bulunan ve 1800 MHz FDD teknolojisinde 4x4 MIMO destekli 4 X-Pol anten ile servis veren sahanın bozulması %30.1'dir.



Şekil 5.4 : Bozucu etkisinin SINR üzerindeki etkisi.

Şekil 5.4'te ise bozucu etkisinin SINR üzerine etkisi gözlenmiştir. Hız eğrisi davranışına benzer tepkinin SINR grafiğinde de görüldüğü söylenebilir. Bozucu nedeni ile SINR seviyeleri arasındaki fark %27.9 seviyelerindedir.

Ölçüm sonuçlarına göre Ma-MIMO sistemin spektral verimlilik ve yüksek SINR bağışıklığı nedeni ile harici sinyal bozucu girişimi karşısında sistem performansını koruma tepkisinin normal 4x4 MIMO destekli 4 X-Pol antene göre daha yüksek olduğu söylenebilir.

5.2 Kaynak Tahsisi ile Kanal Mimarisi Düzenleme Çözümü

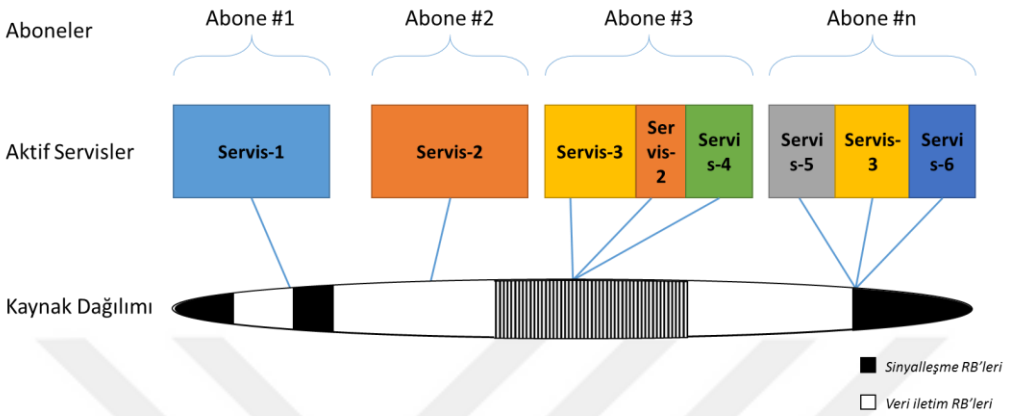
Bölüm 4'te LTE şebekesinin sinyal bozucu dayanıklılığı analiz edildiğinde oldukça savunmasız görünen şebeke mimarisi, gelen harici sinyal bozucu ataklara karşın kendi koruma mekanizmasını geliştirememekte ve eNodeB ile UE arasındaki bağlantı ya kopmakta ya da kaliteli iletişime izin vermeyecek seviyede bozulmakta olduğu görülmüştür. Bölüm 5.1'de sunduğumuz öneri ile daha çok kapasitif kullanım için tasarlanmış ve 5G kablosuz haberleşme teknolojisinin ilk donanımsal ürünü olarak kabul edilen Ma-MIMO anten çözümü, sahip olduğu çoklu hüzme yapısı ve hüzmeler arası geçişi SINR referansına göre yapma becerisi sayesinde harici sinyal bozucu girişimlere karşı oldukça yüksek bağışıklık göstermiştir. LTE TDD modda yapılan saha ölçümlerinde Ma-MIMO anten sisteminin klasik 4x4 pasif antene göre yaklaşık %30 daha iyi performans sergilediği söylenebilir. Donanımsal öneri ile yapılan bu

iyileşmenin yanı sıra yazılımsal olarak bazı fırsatların harici sinyal bozucu girişimine karşı şebeke bağışıklığını artıracağı analiz edilmiş ve LTE şebekesinin mantıksal kanal mimarisini dinamik olarak yönetmesi amaçlanmıştır. Yeni nesil kablosuz haberleşme sistemlerinde ses ve data servislerinin yanı sıra farklı kullanıcı isterlerini karşılayacak iş modelleri de sunulmaktadır. Bu servisler, operatör tarafından abonelere sunulan servis kalite taahhütü gereği önceliklendirilebilir. Normalde LTE teknolojisinde çeşitli kalite göstergeleri ile abonelere kaynak havuzundan ne oranda pay verileceği belirlenir. Bunun için izlenen yol her kaynak tahsis periyodunda servis talebinde bulunan abonelerden çeşitli bilgileri toplayıp, kaynak havuz paylaşımı esnasında bu bilgilere göre abonelere kaynak tahsisi sağlanır. Temel amaç veri iletim verimliliğini maksimumda tutmaktır. Kanal kalite figürleri iyi olan UE yüksek oranda havuzdan pay alırken, düşük olan UE daha az pay alacak, hatta hiç alamayacaktır. Ek olarak bazı aboneler üyesi oldukları servis öncelikleri ile etiketlendirilebilir. Bu durumda önceliği yüksek olan UE kaynak tahsisinde hep öncelikli olarak servis alacaktır. Kalite figürü kötü olsa bile önceliği yüksek olan abone ya da UE, servis sürekliliğini sürdürecek minimum veri iletimini deneyimleyecek şekilde kaynak havuzundan payını almaya çalışır.

Öncelikli aboneler ve onların kullandıkları servisler, ortam gürültüsü ya da sinyal bozuculardan da etkilenmemelidir. Mevcut LTE kablosuz haberleşme sistemlerinde hem UL hem de DL yönünde LTE mantıksal kanalları taşıyan RB'ler (veri iletiminin ve sinyalleşmenin yapıldığı kaynaklar) Bölüm 2'de detayları anlatıldığı üzere sabit ve değişmeyen bir formattadır. Önerilen bu yöntem, ortam gürültü seviyesine göre RB'lerin oluşturduğu sinyalleşme ve veri iletim kanallarının yerlerini dinamik olarak değiştirmekte, bu değişim eNodeB'den servis alan tüm UE'lere iletilmekte ve eNodeB ile UE'ler arasında senkronizasyon sağlanmaktadır. Bu sayede özellikle kablosuz haberleşme sistemlerinde veri iletimini engelleyen gürültü ve bozucuların neden olduğu performans düşüşü ve kesintilerin önüne geçilmesi hedeflenmektedir. Öneri herhangi bir standardı ve kural kümesi olmayan kanal blok yönetiminin esnekliğini sağlamak adına önemli ve yeni bir gelişmedir.

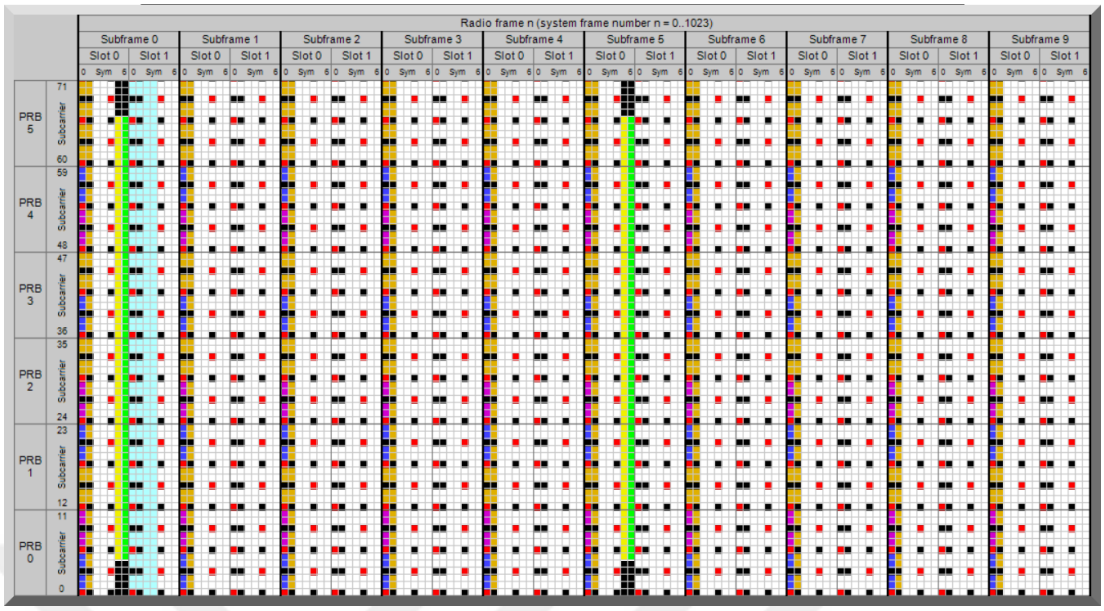
5.2.1 Mevcut sistem mimarisi üzerine çalışmalar

LTE kablosuz haberleşme sisteminde abonelerin servis kullanımını aşağıdaki Şekil 5.5'te özet olarak görülebilir.



Şekil 5.5 : LTE kaynak kullanım gösterimi.

Her abone farklı servis taleplerini karşılamak için eNodeB'nin tek kaynak havuzunu kullanırlar. Bir abone aynı anda bir ya da birden fazla servisi kullanabilir, çoklu servis kullanımına örnek olarak kendi yazılımını güncelleyen UE'yi kullanan abonenin aynı anda müzik dinleyip genişbant internet kullanması örnek olarak gösterilebilir. Burada bazı servisler öncelikli bazıları ise eşit statüde değerlendirilerek kaynak havuzundan ihtiyaçları olan RB'leri alırlar. Her servisin ihtiyaç duyduğu kaynak ve ihtiyaç duyduğu süre de farklılık göstermektedir. Buna göre kaynak tahsis algoritması servis sürekliliğini sağlayacak şekilde abonenin taleplerini karşılamaya çalışır. Örneğin müzik servisini herhangi bir kesintiye uğratmadan aboneye sunmaya çalışır. Bazı servisler de operatör kaynak tahsis algoritmaları nedeni ile kaynak havuzunu kullanmada öncelikli servis olarak değerlendirilebilir. Bu durumda eNodeB ile ilgili öncelikli servisi kullanan UE arasındaki hava arayüzü kötü olsa bile, eNodeB kaynak tahsisi için ilgili algoritmayı çalıştırır ve veri iletim verimliliğini de göz önünde tutarak maksimum RB ataması yapmaya gayret gösterir. Tüm bu akışların 1 ms'lik süre içinde yapılması, servis talebinde bulunan abonenin ardışık tahsisler boyunca RB alamasa bile kesintiyi hissetmeden deneyimine devam etmesini sağlar. Bu süre zarfında aynı zamanda karmaşık bir algoritma da en verimli bir şekilde abonelere kaynak tahsisini yapmaya gayret gösterir.



Şekil 5.6 : FDD DL OFDM veri motifi.

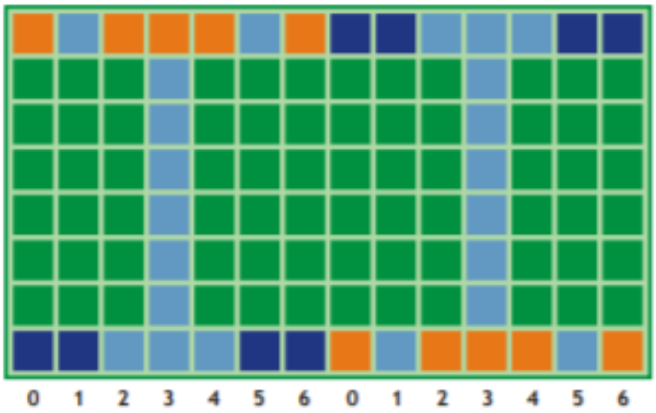
Her ne kadar özet gösterim Şekil 5.5'te verilerek kaynak tahsis yöntemi açıklanmaya çalışılsa da her bir RB'nin DL ve UL'de yerlerinin örnek gösterimleri sırasıyla Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de verilmiştir.

Şekil 5.6'da DL yönünde detaylı olarak verilen OFDM veri motifinde;

- açık yeşil renk birincil senkronizasyon kanallarını (Primary Synchronization Channel, PSCH),
- sarı renk ikincil senkronizasyon kanallarını (Secondary Synchronization Channel, SSCH),
- açık mavi renk fiziksel yayılım kanalını (Physical Broadcast Channel, PBCH),
- mavi renk fiziksel kontrol format bilgisi kanalını (Physical Control Format Indicator Channel, PCFICH),
- mor renk fiziksel hibrit ARQ belirteç kanalını (Physical Hybrid ARQ Channel, PHICH),
- turuncu renk fiziksel DL kontrol kanalını (Physical DL Control Channel, PDCCH),

- beyaz renk fiziksel DL paylaşımlı kanalı (Physical DL Shared Channel, PDSCH),
- kırmızı renk seçilen Tx anten portuna karşılık gelen hücreye özel referans sinyali (Reference Signal, RS),
- koyu yeşil renk UL TDD slotlarını,
- gri renk TDD'de DL ile UL arasındaki özel alt çerçeve koruma çerçevesini
- siyah renk seçilen Tx anten portunda kullanılmayan slotları

vermektedir.

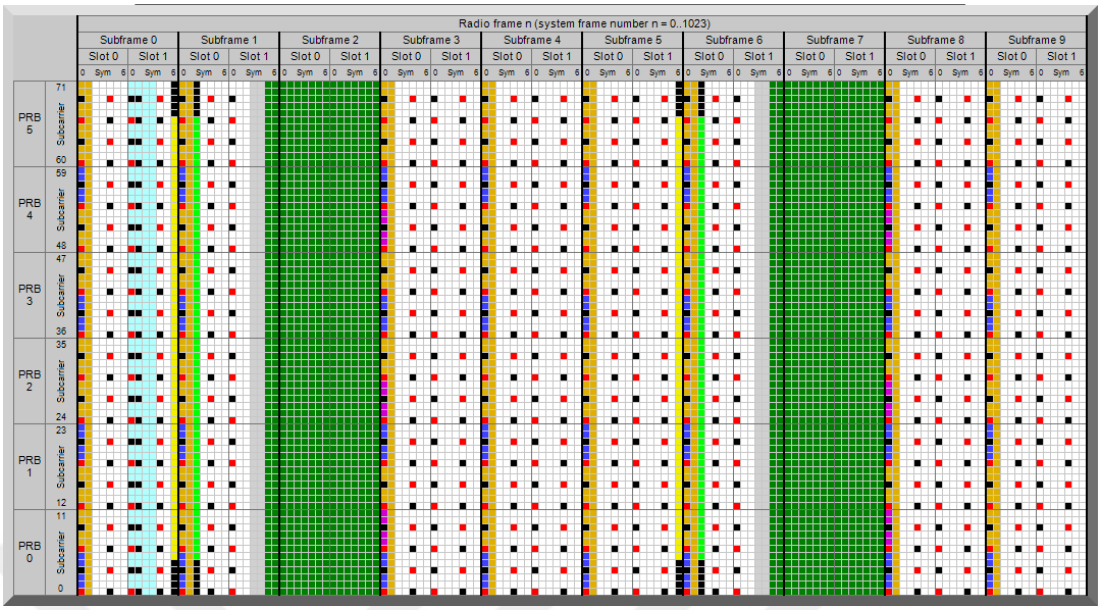


Şekil 5.7 : UL veri motifi.

Benzer şekilde Şekil 5.7'de UL yönünde detaylı olarak verilen OFDM veri motifinde;

- turuncu renk fiziksel UL kontrol kanalı kanal kalite belirtecini (Physical UL Control Channel-Channel Quality Indicator, PUCCH-CQI),
- mavi renk fiziksel UL kontrol kanalı kanal onay bilgilerini (Physical UL Control Channel-ACK/NACK/SRI, PUCCH-ACK/NACK/SRI),
- yeşil renk fiziksel UL paylaşımlı kanal veri bilgilerini (Physical UL Shared Channel-Data, PUSCH-Data)
- açık mavi renk demodülasyon referans sinyalini (Demodulation Reference Signal, DMRS)

vermektedir.



Şekil 5.8 : TDD OFDM veri motifi.

Şekil 5.6, FDD 1,4 MHz bant genişliğindeki bir kaynak havuzundaki 6 adet RB'yi ve onların alt çerçevelerindeki RE'lerin hangi kanal verisini taşımakla sorumlu olduğunu göstermektedir. Bu havuz DL boyunca tahsis talebinde bulunan tüm kullanıcılar ile önce sinyalleşme kanalları vasıtasıyla bilgi aktarımlarını tamamlayacak, sonra da PDSCH kanalları vasıtasıyla veri iletim icrasını gerçekleştirecektir. Benzer şekilde tek bir UE'nin UL boyunca data gönderimi esnasında kullandığı kaynak mimarisi de Şekil 5.7'de verilmiştir. TDD 1,4 MHz bant genişliğinde servis veren bir eNodeB'nin kaynak havuzu Şekil 5.8'de gösterilmiştir. Özellikle Bölüm 5.1'deki formatın kullanımına dikkat edilmiştir. Sadece bant genişliği 10 MHz değil, gösterimin sayfa boyutunda olması adına 1,4 MHz kullanılmıştır. Bu durum PDSCH kanal sayısını etkiler, diğer sinyalleşme kanalları sayısında değişim olmaz, sadece yerleri bant genişliğine göre değişiklik gösterebilir. FDD'den farklı olarak TDD aynı frekans bant genişliğinde hem DL hem de UL kullandığı için bazı alt çerçevelerin TDD UL için ayrıldığı görülebilir. UL için ayrılan kanallarda UE hem sinyalleşme hem de UL yönünde veri iletim gereksinimlerini giderecektir.

Bu bölümde paylaşılan şekillerde belirtildiği gibi sabit bir bant genişliğine sahip LTE kablosuz haberleşme sistemlerinde kaynak blokların yerleri sabittir, özellikle sinyalleşme kanalları gürültü ve dış kaynaklı sinyal bozucu etkisi ile alıcı tarafından çözümlenemediği zaman tüm veri iletimi sonlanır. Benzer şekilde veri iletim kanalları

dış kaynaklı sinyal bozucu etkisi ile çözümlenemediği zaman, bu durumda veri iletim hızı düşer. Söz konusu yöntemde zaten dinamik olarak ölçümlenen ortam gürültü seviyesi RE'lerin yerlerinin dinamik olarak değişimi için referans olarak kullanılabilir. Ortam gürültü seviyesi belli bir değerin altına düştüğü zaman RE'ler dinamik olarak yer değiştirerek dış kaynak sinyal bozucu etkisi yok ya da minimize edilebilir. Önerilen bu yöntem mevcut 3GPP standartlarında yer alan herhangi bir yöntem ile çelişmemekte, kaynak tahsis algoritmalarında RE'lerin yerlerinin değişimi için bir ara adım olarak yer almaktadır. Bu önerinin özgünlüğünü analiz etmek için literatürde benzer yapıdaki patent başvuruları incelenmiştir. Dimou ve diğerleri tarafından 2013 yılında alınan patentte [48] cihazlar arasındaki veri iletiminin sağlıklı yürütülmesi amacı ile dinamik olarak kaynak bloklarının değişimi öngörülmüştür. Bu çalışmada amaç gürültü bileşeninin minimizasyonu ve sağlıklı veri transferidir. Ancak sözkonusu patentte önerilen çalışma cihazlar arasındaki iletişime odaklanmıştır. Bu tez çalışmasında önerilen yöntem cihazlar arasında değil, farklı ve daha genelleştirilmiş bir şekilde baz istasyonu ile baz istasyonundan servis alan tüm UE'ler arasında bir algoritmik değişim ve dönüşümü içermektedir.

Nosley tarafından 2009 yılında alınan patentte MAC katmanında kaynak bloklarının dinamik olarak değişimi önerilmiş, ama bu önerinin hangi ihtiyacı çözeceği net olarak ifade edilmemiştir. Sadece MAC katmanında dinamik kaynak blokları tahsisi ile sadece LTE ve LTE-A teknolojisinde değil aynı zamanda UMTS ve WCDMA teknolojilerinde de çözüm olacağı öngörülmüştür. Ancak PHY katmanda bozucu kaynaklı bir etkinin MAC katmanında çözümlenmesi bu yöntemle mümkün olamamaktadır. Önerilen yöntem ile PHY katmanda sinyal bozucu veya gürültü kaynaklı negatif dönüşümlerin önüne geçilmesi amaçlanmıştır.

Papasakellariou ve Nam tarafından 2014 yılında yayınlanan patent dokümanında [49] çoklu iletim zaman aralıkları üzerinde kaynak blok planlaması yapılmasını sağlayan bir sistemden bahsedilmiştir. Buluşun uygulamasında en az bir PDSCH, en az bir TTI'da, DL kontrol bilgisi ile planlanmaktadır. Bu patentte temel odak TDD teknolojisinde DL ve UL frame yapılarının harici sinyal bozucu ataklara karşın yerlerinin değişimini, sinyalleşme ve veri kanallarının yerlerinin değişimini ve yönetimini içerir. Aynı zamanda özel alt çerçevelerin yönetimi de bu patent kapsamında incelenmiştir. FDD teknolojisinde UL ve DL çerçeveler farklı frekansta, TDD teknolojide ise aynı frekanstadır. FDD'ye göre aynı zaman diliminde daha az

sayıda UL ya da DL alt çerçeve adedine sahip olan TDD teknolojisinde veri iletim hızı görece düşük olacağı için harici sinyal bozucu nedeni ile etkilenecek veri miktarı da görece daha az olacaktır. Bu tez çalışmasında önerilen yöntem daha yüksek veri iletim hızı sağlamayı taahhüt eden FDD teknolojisinde harici sinyal bozucu etkisi ile bozulacak sinyalleşme ve veri kanallarının yerlerini frekans ve zamanda dinamik olarak değiştirerek sağlıklı veri iletimini sürekli kılmayı amaçlamıştır.

Wei tarafından 2017 yılında yayınlanan patent dokümanında [50] LTE ve LTE-A haberleşme sistemlerinde kaynak havuzu yapılandırması sağlayan bir sistemden bahsedilmiştir. Buluş konusu sistemde cihazlar, iletişim halindeyken çeşitli parametreler göz önünde bulundurularak kaynak havuzu yapılandırılması sağlanmıştır. Cihazlar arası haberleşme için ardışık kaynak bloklarının sayısı, periyot uzunluğu, her bir periyottaki kaynak bloğu sayısı, kaynak havuzunun bant genişliği gibi parametreler kullanılarak kaynak havuzunda yapılandırmalar sağlanmaktadır. Bu patentte cihazlar arası (Device-to-Device, D2D) haberleşme ve birbirine yakın cihazlar arasında, cihazların birbirine olan durumuna göre kaynakların kullanımı, ayrıştırılması gibi çözüm algoritmaları önerilmiştir. Bu tez çalışmasında önerilen patent başvurusunda amaç, OFDM FDD tabanlı haberleşme teknolojilerinde UE ve eNodeB arasındaki kontrol ve veri kanallarının harici sinyal bozucu ataklarına karşın dinamik olarak korunmasına yönelik bir algoritma geliştirmektir. Çalışma, standartları 3GPP tarafından tanımlı bir teknolojide veri ve sinyalleşme kanallarını bozan bir etkinin bertaraf edilmesine yönelik bir çözümün sadece yazılım ile sağlanmasını amaçlamaktadır. Bu sayede kullanıcı terminallerinde bir değişime gerek kalmadan çözüm sağlanması amaçlanmaktadır. D2D'de ise henüz standartlar net olarak belirlenmemiştir. Sağlanacak fayda henüz ürünleşmemiş bir teknoloji üzerindedir. Halbuki bu çalışmada önerilen çözümün sağladığı fayda milyarlarca terminal değişiminin, hatta teknolojinin atıl duruma düşmemesi için sağlanacak çözüm önerisini içermektedir.

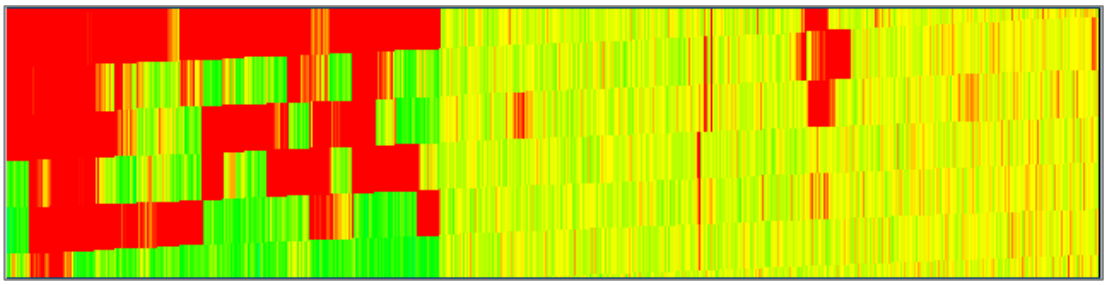
Lee ve diğerleri [51] tarafından 2017 yılında alınan patentte kablosuz haberleşme sistemlerinde sinyal bozulmasına karşı kaynak paylaşımı yapılmasını sağlayan bir sistemden bahsedilmiştir. Söz konusu sistemde zamanla değişiklik gösterebilen bir kaynak paylaşımı yer almaktadır. Kaynak paylaşımı, bir baz istasyonu ve en az bir kullanıcı cihazı arasında olabilmektedir. Buluşun bazı uygulamalarında en az bir CQI, PMI gibi en az bir veri içeren bir kanal durum bilgisi yer almaktadır. Önerilen yöntem

ise bir sinyal gürültü oranını referans alarak bir eşik değer karşılaştırması yapmaktadır. Buna göre spektrumun kirliliğinin tespiti ve gerekli ise spektrumun değiştirilmesinin kontrolü ve onayı (spektrum ile birlikte çoğullama teknolojisinin değişimi, spektrum ile birlikte gerekli ise teknolojinin değişimi -sinyal seviyesi iyi olsa bile diğer teknolojiye geçişe zorlanarak farklı frekansa UE'nin bağlanmaya zorlanması-) bu çalışmada önerilmiştir. Sonrasında seçmeli anahtar üretici modül değerlendirilmiştir. Bu anahtar üreticinin kullanımı opsiyoneldir ve amaç anahtar bilgisinin UE'ye iletilerek dönüşümün gizliliğinin hem alıcı hem de verici için (eNodeB ve UE(ler)) korunmasının sağlanmasıdır. Anahtar harici farklı yöntemler de değerlendirilebilir. Örneğin çeşitli eşik değerleri tanımlanarak, bu eşik değerlerde alınacak aksiyonlar RRC kurulumu aşamasında sinyalleşme kanalları üzerinden baz istasyonu ile UE arasında tanımlanır ve her iki birim de aynı akışı takip ederek aynı ölçümleme ve raporlama ile aynı değerlendirmeleri yapar. Bu tanımlanan akış, önerilen patente özgü ve planlanan çözümün en önemli adımlarından biridir. Bahsi geçen ilgili patentte [51] ise dönüşüm önerilmiş ama bunun yönteminin detayları açıklanmamıştır. Detaylar tüm UE'lerde donanımsal değişime neden olabilir ki bu istenen bir şey değildir. Bu çalışmada önerilen değişimi tetikleyici algoritma, teknolojiden bağımsız, kullanılan duplexing metodolojisinden bağımsız, tanımlanan veri çerçeve formatlarından bağımsız ve en önemli mevcut ekipmanlar üzerinde değişime neden olmayan, sadece algoritma ile geliştirilebilen formattadır.

5.2.2 Önerilen LTE dinamik kavramsal kanal tahsisi

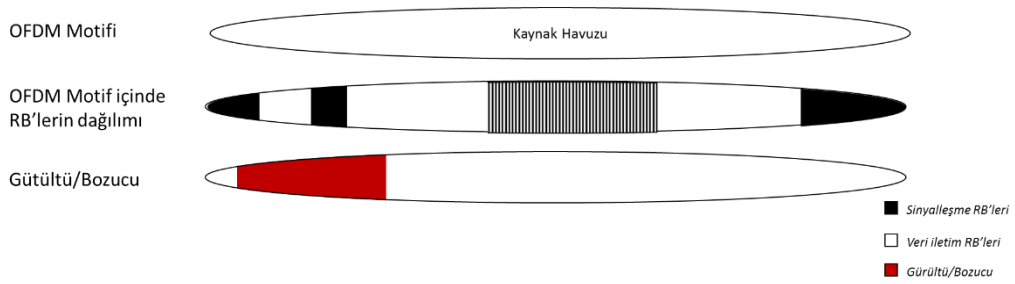
1.4 MHz bant genişliğine sahip bir LTE RB yapısında (orantılı şekilde 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz ve 20 MHz için çözüm irdelenebilir) 72x120 boyunda bir matris her 1 ms'lik TTI zaman adımlarında ölçümlenir. Buna göre aşağıdaki gibi bir girişim/gürültü görseli duruma göre ortaya çıkabilir. Bu durum UE'nin ölçümleri sonucu elde edilen gösterimdir. Şekil 5.9'da kırmızı renk ile ifade edilenler eşik seviyenin altındaki gürültü seviyesine sahip olan RE'leri, sarı olanlar kritik seviyede olanları, yeşil olanlar ise güvenli alanlarda olanları belirtmektedir. Bu örnek üzerinden gidersek kırmızı RE'ler ile iletilen veriler abonelere iletilememektedir. Abone bu durumda iletilen veriyi alamadığını UL sinyalleşme kanalları üzerinden NACK mesajı ile bildirecek, eNodeB de bir önceki periyotta gönderdiği veriyi tekrar aboneye göndermeye çalışacaktır.Bu durum veri iletim verimliliğinin düşmesine neden olur ki kaynak tahsis algoritması tarafından kesinlikle istenen bir durum değildir. Etkilenen

RE'ler eğer veri kanallarını içeriyor ise kaynak tahsis algoritmasının verim düşümü toplam hücre veri iletim hızını düşürür, sinyalleşme kanallarını içeriyor ise hücre kullanılabilirlik (availability) metriklerinin etkilenmesine, çağrı kesintisi yaşayan abonelerin sayısının artmasına ve şebekeye erişim sorunu yaşanmasına neden olur.



Şekil 5.9 : 1.4 MHz bant genişliğindeki LTE DL OFDM motifi.

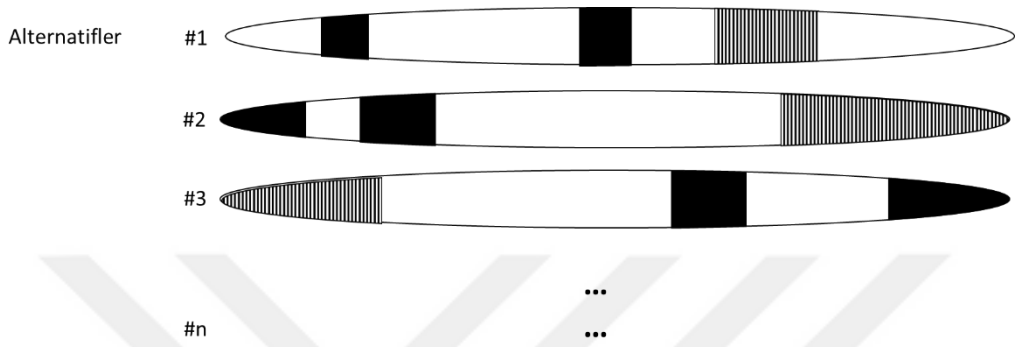
DL yönünde ölçümlenen kalite indikatörleri majör bir bozulmayı gösteriyor ise (RE'lerin ölçüm periyodu boyunca ağırlıklı ortalamasının eşik değere göre durumu) bu durumda RE'lerin yerlerinin dinamik olarak değişmesine gerek vardır. Özellikle sinyalleşme kaynak bloklarının yerlerinin değiştirilmesi, bu blokların bozucudan korunması servis kaybının minimizasyonu açısından kritik öneme sahiptir. Önerilecek RE değişim teklifi kalite indikatörleri ile birlikte UE'ler ile eNodeB arasında teyitleşilir ve bir sonraki TTI'da sinyalleşme kanallarının harici sinyal bozucu etkiden arındırılmasını sağlayacak şekilde RE'lerin yerlerini önceden belirlenen alana taşımak için dönüşüm akışına sokar. Şekil 5.10'da gösterilen bir bozucu etkisi ele alınırsa:



Şekil 5.10 : Bozucu etkinin OFDM motif gösterimi.

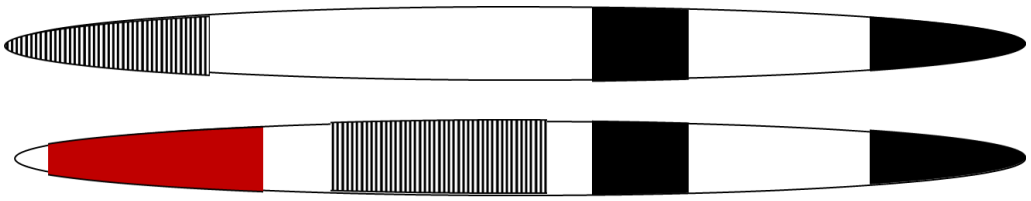
Şekilden de anlaşılacağı üzere OFDM DL motif üzerinde yer alan bazı sinyalleşme kanalları harici sinyal bozucu etkisi altındadır. Öncelikli olarak bu sinyalleşme

kanallarının yerlerinin değiştirilmesi gereklidir. RE'lerin ölçüm periyodu sonunda sahip olduğu SINR değerleri ile elde edilen kalite indikatörü ile önceden belirlenmiş alternatif OFDM motiflerinden birine doğru bir geçişi tetikler. Alternatif kaynak havuzları ölçüm periyodu sonunda aşağıdaki Şekil 11'de örnek gösterimi verilenlerden biri olabilir. En yüksek SINR'ı sağlayan kaynak havuzu öncelikli olarak tercih edilir.



Şekil 5.11 : Alternatif OFDM motifleri.

Şekil 5.10'da verilen örnek devam ettirildiğinde 5.11'de sunulan alternatifler arasından en uygun olan 3 no'lu kaynak havuzuna geçiş için aksiyon alınır. Bu sayede sinyalleşme kanallarının harici bozucu girişimden korunması sağlanmış olur. Devamında kaynak tahsis algoritması veri kanallarını (PDSCH) düşük SINR'lı alanlardan arındırarak temiz bir kaynak havuzu paylaşımı yapmaya çalışır. Sonuç olarak oluşturulan OFDM motifi Şekil 5.12'de verilmiştir.

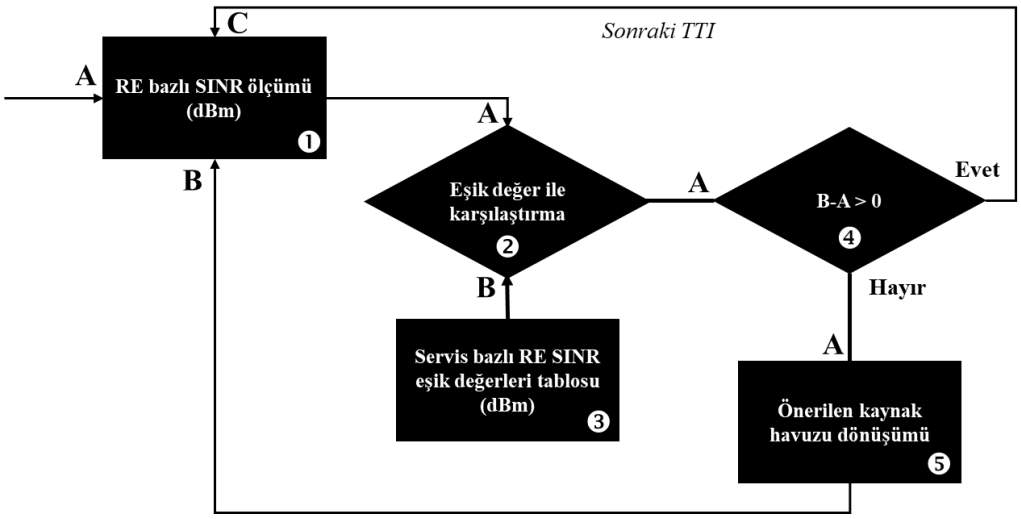


Şekil 5.12 : Harici sinyal bozucu etkiden arındırılmış kaynak havuzu.

Harici sinyal bozucu etkiden arındırılmış kaynak havuzunu sağlamak için planlanan akış şöyle özetlenebilir:

- Her bir TTI'da RB bazlı SINR ölçümleri eşik değerler ile karşılaştırılır. Eşik değerler talep edilen servisin tipine, ilgili servisin ve abonenin önceliklendirme listesinde olup olmadığına göre değişir.
- RE, eşik değerden daha iyi bir SINR değerine sahip ise bu durumda ilgili RE gürültü/bozucu etki altında değildir kabulü ile ilerlenir. Aksi durumda, eğer RE'nin SINR değeri eşik değerden daha düşük ise bu durumda her RE'nin SINR değerine göre daha önceden belirlenmiş alternatif kaynak havuzlarından en yüksek SINR'ı sunanın seçimi yapılır.
- Alternatif kaynak havuzlarında ilk olarak gürültü/bozucu etkiye maruz kalan alanın temiz olup olmadığına ya da en kötü ihtimalle veri iletim kanallarının işgal edilip edilmediğine bakılır. Her durumda bir sonraki zaman aralığında en uygun alternatife geçilir. Eğer gürültü/bozucu etki altında kalan RE'lerde veri kanalı yok ise herhangi bir aksiyon almaya gerek yoktur. Veri kanalları gürültü/bozucu etkisinde kalıyor ise, bu durumda bir sonraki TTI'da veri kanallarının da uygun boş alanlara kaydırılması sağlanır.

Şekil 5.13'teki akış incelendiğinde tüm RE'lere ait SINR seviyeleri 1-A kapısından ölçümlenmek üzere sisteme girer. SINR değerleri 3-B'den gelen eşik referans karşılaştırılmak üzere 2 no'lu kutuya sunulur. Şekil 5.5'te belirtilen farklı servisler için farklı eşik değerler içerebilir. Browsing servisinin gürültü/bozucu eşik değeri ile ses servisinin gürültü/bozucu eşik değeri aynı olmayacaktır. Browsing daha yüksek gürültü/bozucu değeri altında da belli bir kalitede servis sunabilir. 3-B kutusunun çıkışı farklı servisler için belirlenmiş eşik değerleri içermektedir. 2-A ve 2-B'den gelen iki farklı değer 4-A no'lu kutuya sunulur. Eğer RE'nin SINR seviyesi 3-B'den gelen eşik değerden daha iyi ise bu durumda RE'nin değişimine gerek yoktur, bir sonraki zaman aralığındaki kaynak tahsisinde aynı süreci icra etmek için 1-C kutusuna sunulur ve tekrar kaynak ataması bekler. Eğer RE'nin SINR seviyesi 3-B'den gelen eşik değerden daha düşük ise bu durumda RE'nin yerinin değişimi için 5-A kutusuna sunulur. 5 no'lu kutu, daha önceden yerleri belli olan, eNodeB ile UE arasında daha önceden belirlenmiş alternatif kaynak havuzlarından en uygun olanın bir sonraki zaman aralığında seçimi ile gürültü/bozucu etkisinin minimize edilmesinden sorumludur.



Şekil 5.13 : RE bazlı ölçüme göre alternatif OFDM motif belirleme akışı.

eNodeB ile UE arasında doğru kaynak havuzunun seçimi için sinyalleşme kanallarının dizilimine bakılır. Sinyalleşme kanallarını oluşturan RE'lerin SINR değerlerinin bir seride dizilimi ile alternatif kaynak havuzundaki sinyalleşme kanallarını oluşturan RE'lerin SINR değerleri arasında maksimum fark hangi alternatif kaynak havuzunda var ise bir sonraki zaman aralığında ona otomatik olarak geçilir.

Alternatif olarak bir anahtar üretimi ile bir sonraki zaman aralığında hangi kaynak havuzu dağılımına geçileceği de belirtilmişti. Ancak bu durum UE'lerde ek bir tasarım değişikliği getirebilir. Bunun tasarım değişmeden bir karşılıklı el sıkışma algoritması ile yapılması durumunda UE'de ek hesaplamalardan kurtulmuş olunur, dolayısıyla pil ömrüne de pozitif etkisi olur.

Önerilen akıştaki değişen kaynak havuzu mimarisi, bir sonraki zaman aralığında UE'nin dinleyeceği sinyalleşme kanallarının yerini bilerek kendini hazırlaması ile son bulur.

Önerilen bu yöntem, herhangi bir standarda bağlı olmayan kaynak tahsis algoritmasında yapılacak bir düzenlemeyi içerir. Bu sayede abone bağlantı sürekliliğini sağlamak amacı ile harici sinyal bozucu etki bertaraf edilmeye çalışılır.

5.3 Sonuç

Bu bölümde LTE şebekesinin sinyal bozucu dayanıklılığını artırmak için iki ana yöntem önerilmiştir. Yöntemleri seçerken mevcut şebeke mimarisine, veri çerçeve yapısına ve 3GPP standartlarına uygunluğa önem verecek şekilde odaklanılmıştır. İlk önerilen yöntem donanımsal olarak sistemin bozucu bağışıklığını artırırken, ikinci yöntem ise tamamen farklı bir bakış açısı ile kanalların mantıksal yapılarını ve yerlerini düzenleyerek sinyal bozucu atakları bertaraf etmeyi amaçlamaktadır. Önerilen her iki yöntem de sinyal bozucu girişimleri bertaraf edecek şekilde başarım çıktıları sergilemiştir.

6. SONUÇLAR

Kablosuz haberleşme sistemlerine tahsis edilen frekans spektrumu çok değerli bir kaynaktır. Bu nedenle baz istasyonu tarafından her kaynak tahsisinde UE'de rezerve edilen kaynak elemanları ile iletilen bilginin, alıcıya bozulmadan ulaştığına emin olmak en önemli amaçtır. Günümüzde tüm dünyada en çok kullanılan kablosuz haberleşme teknolojilerinden biri olan LTE şebekelerinde, yüksek kalitede veri iletimini sağlayacak mimari tasarım başarı ile yapılmış olsa da harici sinyal bozucu girişimi karşısında kendini koruma eksikliği söz konusudur. Donanımsal ve yazılımsal çözüm önerileri olarak tanımlanan ve bu tez çalışmasının odağını teşkil eden alternatif yöntemler ile bu eksiklik kısmen ya da tamamen giderilebilir. Günümüz operatör mimari saha tasarımlarının temelini teşkil eden pasif antenli MIMO anten çözümüne alternatif olarak Ma-MIMO antenli LTE saha çözümleri ile çok daha yüksek harici sinyal bozucu bağışıklığı elde edilebileceği gözlenmiştir. Ma-MIMO anten, uyarlanabilir hüzme kabiliyeti sayesinde pasif MIMO antenlere göre %30 civarında daha iyi performans sergilemiştir. Bununla birlikte literatürde henüz örneği olmayan kaynak tahsis yöntemi ile yazılımsal olarak kaynak havuzunun dinamik dönüşümü amaçlanmış, harici sinyal bozucu girişimine karşı dönüşen kaynak havuzu ile bu girişimin başarı ile minimizasyonu sağlanmıştır. Önerilen yöntemde baz istasyonu ile UE'ler arasındaki bağlantının kopmaması ilk olarak hedeflenmiş, ölçüm süresi sonundaki ilk zaman aralığında da sinyalleşme kanallarını içeren kaynak elemanlarının yerlerinin planlı bir şekilde değişimi sağlanmıştır.

Yapılan çalışmaların çıktılarının LTE şebekesi sistem performansına etkileri ve maliyet analizi etkileri aşağıda özetlenmiştir:

LTE şebekesi sistem performansının bozucu etkisi ile değişimi ele alındığında;

- Hangi tip bozucu olursa olsun LTE şebekesinde kaynak havuzunu koruyacak bir çözüm yöntemi sözkonusu değildir.
- LTE frekans bant genişliğinin sinyalleşme kanallarının olduğu kısımlara doğru yapılan harici sinyal bozucu etki, baz istasyonu ile terminal arasındaki bağlantıyı koparak veri iletimini sonlandırır.

- Ortalama genlikte yayın yapan geleneksel bozuculara göre genliği sürekli değişen chirp bozucuların sistem performansı üzerindeki etkisi çok daha büyüktür.

Maliyet analizi etkisi ele alındığında;

- Pasif MIMO antenlere oranla finansal olarak daha maliyetli olan Ma-MIMO çözümü, sağladığı avantaj da düşünüldüğü zaman pozitif yatırım olarak değerlendirilebilir. Özellikle şebeke kalite göstergeleri, abone hissiyatı ve kesintiye uğramayan veri kullanımının hücre büyüklüğünde sağlayacağı pozitif miktar bu yatırımı hayata geçirme nedenlerinden bazılarıdır.
- Yazılımsal öneri olan kaynak tahsis yöntemi yüksek başarım ile alternatif çıktılar sunmaktadır. Ancak, özellikle terminal üzerinde yaratacağı hesaplama yüküne dikkat etmek gerekir.

Tez çalışmasının devamında terminal üzerindeki hesaplama yükünün çıkarılması ve onun minimizasyonu için alternatif yöntemlerin analizi incelenebilir. Ortak kanal kullanımı, sinyalleşme kanallarını içeren kaynak elemanlarının sürekli değişimi ile bozucu etkinin önceden tespiti, terminal bazlı sanal kaynak havuzlarının kullanımı, aynı kaynak havuzundan servis alan kullanıcıların fiziksel lokasyonlarına bağlı olarak aynı kaynak elemanını kullanmaları gibi şebeke dilimleme odaklı alternatif yöntemler tez çalışmasının devamında incelenecek başlıklar olarak tanımlanabilir.

KAYNAKLAR

[1] **Beliavski, N.** (2003). *NMT Association: Two Steps Forward in 450 MHz Band* [Power Point Slides]. Erişim linki https://www.itu.int/ITU-D/tech/events/2003/sofia2003/documents/PART2_SLOT3-4_Beliavski.pdf

[2] **Meral, A. B. & Baş, M** (2013). Türkiye'de Faaliyet Gösteren GSM Operatörlerinin Hizmet Kalitesi Bakımından Karşılaştırılması ve Uygulanan Rekabet Stratejileri, *Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 15(2), 41-70.

[3] **Url-1** <http://www.3gpp.org/specifications>, erişim tarihi 01.01.2019.

[4] **Url-2** < https://www.btk.gov.tr/uploads/pages/slug/2009-faaliyet-raporu.pdf>, eriş im tarihi 2010.

[5] **Url-3** <http://www.3gpp.org/specifications/releases/72-release-8>, erişim tarihi 01 .01.2019.

[6] **Url-4** < https://gsacom.com/paper/lte-ecosystem-report/>, erişim tarihi 2018.

[7] **Url-5** <https://www.csie.ntu.edu.tw/~hsinmu/courses/media/wn11fall/ofdm_new.pdf > erişim tarihi 01.01.2019.

[8] **BTK, 4.5G İhalesini Onayladı** (2015, 31 Ağustos), erişim linki https://www.btk.gov.tr/haberler/btk-4-5g-ihalesini-onayladi

[9] **Tse, D & Viswanath, P.** (2005). Fundamentals of wireless communication. *Cambridge university press.*

[10] **Penttinen, J. T. J.** (2016). The LTE-Advanced Deployment Handbook. *JohnWiley & Sons, Ltd.*

[11] **Sauter, M.** (2017). From GSM to LTE-Advanced Pro and 5G: an introduction to mobile networks and mobile broadband. *John Wiley & Sons, Ltd*.

[12] **Irmer, R., Mayer, H. P., Weber, A., Brun, V., Schmidt, M., Ohm, M., Ahr, N., Zoch, A., Jandura, C., Marsch, P.** (2009). Multisite field trial for LTE and advanced concepts, *IEEE Commun. Mag., 47 (2)*, 92-98.

[13] **Hu, R. Q. & Qian, Y.** (2013). Heterogeneous Cellular Networks in Field Trial of LTE Technology. *Wiley Telecom*.

[14] **Buenestado, V., Ruiz-Aviles, J. M., Toril, M., Luna-Ramírez, S., Mendo, A.** (2014). Analysis of throughput performance statistics for benchmarking LTE networks, *IEEE Commun. Lett., 18 (9)*, 1607–1610.

[15] **Salman, H. A., Aldabbagh, G., Taha, Z., Ibrahim, L. F.** (2015). Topological planning and design of heterogeneous mobile networks in dense areas, *International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*, (pp. 709-714).

[16] **Wylie-Green, M. P., & Svensson, T.** (2010). Throughput, capacity, handover and latency performance in a 3GPP LTE FDD field trial, *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, (pp. 1-6).

[17] **Landre, J. B., El Rawas, Z., Visoz, R., Bouguermouh, S.** (2012). Realistic performance of LTE: In a macro-cell environment, *IEEE Vehicular Technology Conference*, (pp. 1-5).

[18] **Hagerman, B., Werner, K., Yang, Y.** (2011). MIMO performance at 700MHz: Field trials of LTE with handheld UE, *IEEE Vehicular Technology Conference*, (pp. 1-5).

[19] **Furuskog, J., Werner, K., Riback, M., Hagerman, B.** (2010). Field trials of LTE with 4x4 MIMO, *Ericsson Review, 87 (1)*, 10–15.

[20] **Lerch, M., & Rupp, M.** (2013). Measurement-based evaluation of the LTE MIMO downlink at different antenna configurations, *International ITG Workshop on Smart Antennas (WSA)*, (pp. 1-6).

[21] **Erkkiland, J., Koskela, M., Heikkila, J., Kupiainen, T., Heikkila, M., Kippola, T., Nykanen, A., Saukkonen, R.** (2017). Antenna configuration comparison in challenging NLOS locations, *2017 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, (pp. 1-5).

[22] **Werner, K., Furuskog, J., Riback, M., Hagerman,** B. (2010). Antenna configurations for 4x4 MIMO in LTE-field measurements, *IEEE Vehicular Technology Conference*, (pp. 1-5).

[23] **Danneberg, M., Holfeld, J., Grieger, M., Amro, M., Fettweis, G.** (2012). Field trial evaluation of UE specific antenna downtilt in an LTE downlink, *International ITG Workshop on Smart Antennas (WSA)*, (pp. 274-280).

[24] **Becker, N., Rizk, A., Fidler, M.** (2014). A measurement study on the application-level performance of LTE, *IFIP Networking Conference*, (pp. 1-9).

[25] **Beyer, J., Belschner, J., Chen, J., Klein, O., Linz, R., Muller, J., Xiang, Y., Zhao, X.** (2013). Performance measurement results obtained in a heterogeneous LTE field trial network, *IEEE Vehicular Technology Conference*, (pp. 1-5).

[26] **Merz, R., Wenger, D., Scanferla, D., Mauron, S.** (2014). Performance of LTE in a high-velocity environment: a measurement study, *Proceedings of the 4th workshop on all things cellular: operations, applications, & challenges*, (pp. 47-52).

[27] **Brutyan, A.** (2013). *Performance Analyses Of Different MIMO Modes In LTE Release 8 Networks* (Master's thesis), Rijksuniversiteit Groningen, Netherlands.

[28] **Parihar, R. & Nakkeeran, R.** (2015). Performance analysis of LTE networks in different transmission modes using 16-QAM under fading channels, *International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP)*, (pp. 979-983).

[29] **Ball, C. F., Müllner, R., Lienhart, J., Winkler, H.** (2009). Performance analysis of Closed and Open loop MIMO in LTE, *European Wireless Conference (EW)*, (pp. 260-265).

[30] **Mullner, R., Ball, C. F., Ivanov, K., Lienhart, J., Hric, P.** (2009). Contrasting open-loop and closed-loop power control performance in UTRAN LTE uplink by UE trace analysis, *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, (pp. 1-6).

[31] **Beyer, J., Isensee, U., Droste, H.** (2011). A measurement based approach to predict the MIMO throughput of the LTE downlink in RF planning tools, *IEEE Vehicular Technology Conference*, (pp. 1-5).

[32] **Robson, J.** (2009). The LTE/SAE trial initiative: Taking LTE-SAE from specification to rollout, *IEEE Communications Magazine, 47 (4)*, 82–88.

[33] **Landre, J. B., El Rawas, Z., Visoz, R.** (2013). LTE performance assessment Prediction versus field measurements, *2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, (pp. 2866-2870).

[34] **Harris, P., Vieira, J., Hasan, W. B., Liu, L., Malkowsky, S., Beach, M., Armour, S., Tufvesson, F., Edfors, O.** (2018). Achievable Rates and Training Overheads for a Measured LOS Massive MIMO Channel, *IEEE Wireless Communications Letters, 7 (4)*, 594-597.

[35] **Henrydoss, J. & Boult, T** (2014). Critical security review and study of DDoS attacks on LTE mobile network, *Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile*, (pp. 194-200).

[36] **Talbot, D.** (2012). One Simple Trick Could Disable a Citys 4G Phone Network, *MIT Technology Review*.

[37] **Lichtman, M., Piqueras J. R., Labib, M., Rao, R., Marojevic, V., Reed. J. H.** (2016). LTE/LTE-A jamming, spoofing, and sniffing: threat assessment and mitigation, *Communications Magazine, 54 (4)*, 54-61.

[38] **Bhattarai, S., Wei, S., Rook, S., Yu, W., Erbacher, R. F., Cam, H.** (2015). On simulation studies of jamming threats against LTE networks, *International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, (pp. 99-103).

[39] **Krenz, R. & Brahma, S.** (2015). Jamming LTE signals, *International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, (pp. 72-76).

[40] **Philippe, G., Montaigne, F., Schiel, J. C., Georgeaux, E., Gruet, C., Roy, P. Y., Force, P., Mege, P.** (2013). LTE resistance to jamming capability: To which extend a standard LTE system is able to resist to intentional jammers, *Military Communications and Information Systems Conference*, (pp. 1-4).

[41] **Li, X., Xie, X., Zeng, J., Wang, Y.** (2015). Vulnerability analysis and verification for LTE initial synchronization mechanism, *36th Sarnofi Symposium*, (pp 150-154).

[42] **Lichtman, M., Czauski, T., Ha, S., David, P., Reed, J. H.** (2014). Detection and mitigation of uplink control channel jamming in LTE, *Military Communications Conference (MILCOM)*, (pp. 1187-1194).

[43] **Woodard, J. P. & Hanzo, L.** (2000). Comparative Study of Turbo Decoding Techniques: An Overview, *IEEE Trans. on Vehicular Tech., 49 (6)*, 2208-2232.

[44] **Xu, W., Trappe, W., Zhang, Y., Wood, T.** (2005). The feasibility of launching and detecting jamming attacks in wireless networks, *Proceedings of the 6th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, (pp. 46-57).

[45] **Clancy, T. C.** (2011). Efficient OFDM denial: Pilot jamming and pilot nulling, *International Conference on Communications (ICC)*, (pp. 1-5).

[46] **Aziz, F. M., Shamma, J. S., Stuber, G. L.** (2014). Resilience of LTE networks against smart jamming attacks, *Global Communications Conference (GLOBECOM)*, (pp. 734-739).

[47] **Durmaz, M. A., Alakoca, H., Kurt, G. K., Ayyildiz, C.** (2017). Chirp subcarrier jamming attacks: an OFDM based smart jammer design, *IEEE 16th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net)*, (pp. 1-5).

[48] **Dimou, K. & Belleschi, M.** (2013). Network Assisted UE Detection in Direct Mode UE-to-UE Communication, *US Patent No. US20140206322A1*.

[49] **Papasakellariou, A. & Nam, Y. H.** (2014). Scheduling over multiple transmission time intervals, *US Patent No. US20140328260A1*.

[50] **Wei, X.** (2017). A mechanism of resource-pool configurations for device-to-device communication, *US Patent No. US20170055265A1*.

[51] **Kim, H., Kim, K., Yi, Y., Kim, B., Park, H., Lee, H.** (2017). Method and Apparatus for Calcelling Interference and Receiving Signal in wireless Communication System, *US Patent No. US010148299B2*.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad :	Aziz Gediz SEZGİN
Doğum Tarihi ve Yeri :	28.08.1966 Ilıç-Erzincan
E-posta :	gediz.sezgin@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

Lisans :	1987, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans :	1991, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Anabilim Dalı, Elektronik ve Haberleşme Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

1990-1991	APPLE KÖK Temsilcilik, Teknik Müdür
1991-1994	TELETAŞ A.Ş., Kablolu TV Proje Mühendisi
1995-	TURKCELL İletişim Hiz. AŞ., Genel Müdür Yardımcısı
2017	Global Telecom Business tarafından “Yenilikçi 50 İsim” listesine seçildi.
2018	Mobile Europe tarafından “Yılın CTO’su” ödülü ile ödüllendirildi.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Sezgin, G., Coskun, Y., Basar, E., Karabulut, Kurt, G., (2018). Performance Evolution of a Live Multi-site LTE Network. *IEEE Access*, vol.6, 49690-49704.

Coskun, Y., Eygi, M., **Sezgin, G.,** Karabulut, Kurt, G., (2017). Jamming Resilience of LTE Networks: a Measurement Study. *International Telecommunications Conference* (ITelCon 2017). December 28-29, 2017. Istanbul, Turkey. pp: 151-162. ISBN: 978-981-13-0408-8

Sezgin, G., Karakoc, M., Karabulut, Kurt, G., (2018). İstenmeyen Bozucu Etkisini Önlemek Amaçlı Dinamik Kaynak Bloklarının Yayılımı, Türk Patent Başvuru No. 2018/21359.