

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YER ALTI ULAŞIM SİSTEMLERİNDE KABLOSUZ GÖRÜNTÜ AKTARIMI
BAŞARIMI**

HÜSEYİN DOĞAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
HABERLEŞME PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. TANSAL GÜÇLÜOĞLU**

İSTANBUL, 2016

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YER ALTI ULAŞIM SİSTEMLERİNDE KABLOSUZ GÖRÜNTÜ AKTARIMI
BAŞARIMI

Hüseyin DOĞAN tarafından hazırlanan tez çalışması 20.07.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Tansal GÜÇLÜOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Tansal GÜÇLÜOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Aktül KAVAS
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Serhan YARKAN
İstanbul Ticaret Üniversitesi

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans tez çalışmalarım boyunca bana yol gösteren, bilgisini ve zamanını esirgemeyen değerli hocam ve tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Tansal Güçlüoğlu'na saygı ve şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmalarımda bana destek olan Metro İstanbul A.Ş. yöneticilerime ve çalışmalarım sırasında bana yardımcı olan çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tüm çalışmalarım boyunca bana desteğini esirgemeyen ve sabır gösteren sevgili eşime ve biricik kızıma teşekkür ederim.

Temmuz, 2016

Hüseyin DOĞAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT	xv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	7
1.3 Hipotez.....	8
BÖLÜM 2	
TELSİZ YEREL ALAN AĞLARI.....	9
2.1 Kablosuz Ağ Türleri	9
2.2 IEEE Standartları	10
2.3 IEEE 802.11 Kablosuz Ağ Standartları	11
2.3.1 802.11a Standardı	11
2.3.2 802.11b Standardı	12
2.3.3 802.11g Standardı	12
2.3.4 802.11n Standardı	13
2.3.5 802.11ac Standardı	13
2.4 Sinyal Modülasyon Yöntemleri.....	13
2.4.1 Frekans Atlamalı Yayılım Spektrumu (FHSS)	14
2.4.2 Doğrudan Ardışık Yayılım Spektrumu (DSSS)	15
2.4.3 Dik Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM)	16
2.4.4 Taşıyıcı Algılaması Çoklu Erişim/Çakışma Kaçınma (Cdma/Ca)	17

2.5	Çoklu Giriş Çoklu Çıkış (MIMO-Multiple Input Multiple Output)	17
2.5.1	MIMO Temelleri	18
2.5.2	Maximum Ratio Combining (MRC)	19
2.5.3	Huzme Biçimlendirme (Beamforming).....	19
2.6	Kablosuz Ağ Haberleşme Yöntemleri	22
2.7	Kablosuz Yerel Alan Ağ Topolojileri	23
2.7.1	Yıldız Topolojisi (Star Topology)	23
2.7.2	Örgü Topolojisi (Mesh Topology)	24
2.8	Kablosuz Ortam Ağ Bileşenleri	24
2.8.1	Kablosuz İstemci (Wireless Client)	24
2.8.2	Kablosuz Erişim Noktası (WAP - Wireless Erişim Noktası)	25
2.9	IEEE 802.11n'in Mimari Yapısı	26
2.9.1	Fiziksel Katmanda Yapılan Düzenlemeler	26
2.9.2	MAC Katmanında Yapılan Düzenlemeler	29
2.10	802.11ac Standardı	33
2.10.1	Beamforming (Huzme Biçimlendirme)	36
2.10.2	Adaptive Transmission Power Control (ATPC)	36
BÖLÜM 3		
DÜNYA METROLARINDAKİ KABLOSUZ AĞ UYGULAMALARI		38
3.1	Moskova Metrosu.....	38
3.2	Güney Kore Metrosu	39
3.3	New York Metrosu.....	41
3.4	Torino Metrosu.....	45
3.5	Tren Yer Haberleşmesi Gerekliklikleri	50
3.6	Uygulamada Karşılaşılan Zorluklar	51
3.7	Hand-Over (Devretme) Süreci	52
FÜNİKÜLER HATTI TREN-YER HABERLEŞMESİ BAŞARIMI.....		55
4.1	Taksim - Kabataş Füniküler Hattı	56
4.2	Proje Detayları	57
4.2.1	Değerlendirilen Çözümler	58
4.2.2	Teknik Özellikler	60
4.3	Sistemin Çalışma Şekli	63
4.4	Link Bütçe Hesapları	63
4.4.1	SNR (Signal to Noise Ratio) Değeri	70
4.5	Saha Çalışmaları.....	70
4.6	Test Sonuçları	77
4.6.1	Veri Hızı Test Sonuçları.....	77
4.6.2	Hand-Over Sonuçları	81
4.6.3	Canlı Görüntü Aktarımı Sonuçları.....	82
4.7	Dikkat Edilmesi Gereken Noktalar	83
BÖLÜM 5		
SONUÇ VE ÖNERİLER		88

KAYNAKLAR.....	91
EK-A	
ERİŞİM NOKTASI CİHAZI	94
EK-B	
ANTENLER	97
EK-C	
HESAPLAMA PROGRAMI.....	100
ÖZGEÇMİŞ	101



SİMGELİSTESİ

k	Boltzman Sabiti
NF	Gürültü Değeri
P_n	Gürültü Gücü
R_x	Alıcı
T_{Ant}	Anten Sıcaklığı
T_e	Etkili Gürültü Sıcaklığı
T_0	İşletme Sıcaklığı
T_x	Verici

KISALTMA LİSTESİ

ACK	Acknowledgement
AIEE	American Institute of Electrical Engineers
A-MPDU	Aggregate MAC Protocol Data Unit
ARQ	Automatic Repeat Request
AP	Erişim Noktası
ATPC	Adaptive Transmission Power Control
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BER	Bit Error Rate
BSS	Basic Service Set
CA	Collision Avoidance
CCTV	Closed Circuit Television
CD	Collision Detection
CDMA	Code Division Multiple Access
CNR	Carrier to Noise Ratio
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CTS	Clear To Send
DCF	Distributed Coordination Function
DHCP	Dynamic Host Control Protocol
DSP	Digital Signal Processor
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
ESS	Extended Service Set
FCS	Frame Check Sequence
FEC	Forward Error Correction
Gbps	Gigabit Per Second
GI	Guard Interval
GSM	Global System for Mobile Communications
GPRS	General Packet Radio Service
IBSS	Independent Basic Service Set
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IRE	Institute of Radio Engineers
ISM	Industrial Scientific Medical
Kbps	Kilo Bit Per Second

LCD	Liquid Crystal Display
LTE	Long Term Evolution
MAC	Media Access Control
MBPS	Mega Bit Per Second
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MINT	Media Independent Network Transport
MRC	Maximum Ratio Combining
MSDU	Mac Service Data Units
MPDU	Message Protocol Data Unit
NAV	Network Allocation Vectors
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
ORLA	Opportunistic Radio Link Adaptation
OSI	Open Systems Interconnection
OSPF	Open Shortest Path First
PCF	Point Coordination Function
PtP	Point to Point
PtMT	Point to Multi Point
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
QOS	Quality of Service
RBS	Radio Base Station
RST	Request To Send
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SISO	Single Input Single Output
SMDP	Semi Markov Decision Process
SNR	Signal to Noise Ratio
SSID	Service Set ID
TG	Task Group
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UNII	Universal National Information Infrastructure
UTO	Unattended train Operation
VANET	Vehicular Ad Hoc Networks
VLAN	Virtual Local Area Network
WAP	Wireless Erişim Noktası
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WEP	Wired Equivalent Privacy
WI-FI	Wireless Fidelity
WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WPA	Wi-Fi Protected Access
WPAN	Wireless Personal Area Network
WSN	Wireless Sensor Networks
WWAN	Wireless Wide Area Network
WWISE	World Wide Spectrum Efficiency
YBS	Yolcu Bilgilendirme Sistemi

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Kablosuz ağ kategorileri.....	10
Şekil 2.2 Doğrudan ardışık yayılım Spektrumu (DSSS) kanal ilişkisi [5],[23]	16
Şekil 2.3 OFDM verici blok diyagramı [5],[25]	17
Şekil 2.4 MIMO’da alıcı – verici yapısı [6]	18
Şekil 2.5 MRC yapısı	19
Şekil 2.6 İletken sinyal oluşturma (Transmit Beamforming) [27]	20
Şekil 2.7 Yapıcı karışma (Constructive Interference) [27]	20
Şekil 2.8 Yıkıcı karışma (Destructive Interference) [27]	20
Şekil 2.9 Çoklu yol (Multipath) [27]	21
Şekil 2.10 Çok-yollu Yayılım [27]	21
Şekil 2.11 Kablosuz haberleşme ağ katmanları [5],[28]	22
Şekil 2.12 Çerçeve gönderim katmanları [5],[28]	23
Şekil 2.13 Örgü (Mesh) topolojisi.....	24
Şekil 2.14 Kablosuz erişim noktası	25
Şekil 2.15 Fiziksel katmanda yapılan iyileştirmeler [5],[8].....	27
Şekil 2.16 MIMO çalışma mantığı [5],[45]	28
Şekil 2.17 Koruyucu aralık (Guard Interval - GI) [5],[25]	30
Şekil 2.18 Başlangıç paket alanları [5].....	31
Şekil 2.19 Çerçeve bütünleştirmesi [5]	32
Şekil 2.20 MU-MIMO ile veri hızı artışı	35
Şekil 3.1 Moskova metrosu tünel uygulamaları [40]	39
Şekil 3.2 Seul metrosu tünel uygulamaları [41]	41
Şekil 3.3 Newyork metrosu uygulaması [42]	42
Şekil 3.4 WING 5.2 mesh connex [43]	44
Şekil 3.5 Torino metrosu hat güzergahı [44].....	45
Şekil 3.6 Torino metrosu tren kamera yerleşimi [44]	46
Şekil 3.7 Torino metrosu tren tünel davranışları [44].....	47
Şekil 3.8 Torino metrosu 2,4 Ghz spektrum analizör sonuçları	49
Şekil 3.9 Kumanda merkezine aktarılmış tren görüntüleri [48]	51
Şekil 3.10 Normal hand-over süreci.....	52
Şekil 3.11 Geleneksel kontrolör sistemleri	53
Şekil 3.12 Hand-over işlemi.....	54
Şekil 4.1 Taksim-Kabataş föniküler hattı.....	56

Şekil 4.2 Moxa AWK-6232 erişim noktası cihazı	60
Şekil 4.3 18 dBi yönlü antenin manyetik alan ve elektrik alan paterni.....	62
Şekil 4.4 8 dBi çok yönlü antenin manyetik ve elektrik alan paterni.....	62
Şekil 4.5 5 Ghz kanal yapısı	63
Şekil 4.6 550m için link bütçe hesabı	64
Şekil 4.7 550m veri hızı testi	65
Şekil 4.8 Sinyal seviye ölçüm değerleri	65
Şekil 4.9 250m link bütçe hesabı.....	66
Şekil 4.10 Tünel bozucu etkisi link bütçe hesabı.....	67
Şekil 4.11 300m link bütçe hesabı	68
Şekil 4.12 300m sinyal seviye ölçümü.....	68
Şekil 4.13 Tünel bozucu etkisi link bütçe hesabı.....	69
Şekil 4.14 Erişim noktası cihazları konumları.....	69
Şekil 4.15 Tünel fiziki yapısı ve cihaz yerleşimleri	71
Şekil 4.16 Sistem topolojisi	72
Şekil 4.17 Taksim erişim noktası cihazları	72
Şekil 4.18 Taksim tarafı erişim noktası cihazı fiziksel bağlantıları.....	73
Şekil 4.19 Tünel ortası erişim noktası cihazı	73
Şekil 4.20 Tünel ortası erişim noktası cihazı fiziksel bağlantıları	74
Şekil 4.21 Kabataş erişim noktası cihazı.....	74
Şekil 4.22 Kabataş tarafı erişim noktası cihazı fiziksel bağlantıları	75
Şekil 4.23 Kabataş tünelden perona geçiş bölgesi.....	76
Şekil 4.24 Füniküler araç üstü erişim noktası cihazı	76
Şekil 4.25 Tünel yapısı.....	78
Şekil 4.26 Tren1 (Sarı) Taksim, Tren2 (Beyaz) Kabataş	79
Şekil 4.27 Tren1 (Sarı) Kabataş, Tren2 (Beyaz) Taksim	80
Şekil 4.28 Hand-over süreleri.....	81
Şekil 4.29 Tren hareketindeki tren içi görüntü	82
Şekil 4.30 Saha keşifleri.....	83
Şekil 4.31 Tünel fiziki yapısı.....	84
Şekil 4.32 Kabataş tarafı peron girişi.....	84
Şekil 4.33 Araç üstünde uygulanan shark anten ve dipol anten.....	85
Şekil 4.34 Tren üstü shark anten kullanıldığı durumda sonuçlar.....	86
Şekil 4.35 Araç üstü dipol antenler kullanıldığı durumda sonuçlar	86

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 Wireless iletim parametreleri [3]	3
Çizelge 1.2 Wireless iletimin değerlendirilmesi [3]	3
Çizelge 2.1 Kablosuz ağ türleri	10
Çizelge 2.2 IEEE kablosuz ağ standartları ve özellikleri	11
Çizelge 2.3 Kablosuz ağ standartlarında kullanılan modülasyon çeşitleri	14
Çizelge 2.4 Fiziksel katmanda yapılan iyileştirmeler [5],[30]	26
Çizelge 2.5 MAC katmanında yapılan iyileştirmeler [5],[30]	29
Çizelge 2.6 802.11ac modülasyon planları [38]	34
Çizelge 2.7 IEEE 802.11ac ve IEEE802.11n karşılaştırması	35
Çizelge 4.1 Çözümlerin karşılaştırılması	59
Çizelge 4.2 Kablosuz erişim noktası cihazı teknik özellikleri	61
Çizelge 4.3 Anten özellikleri	61
Çizelge 4.4 $RX = -76$ dB hassasiyete göre SNR hesabı	70

YER ALTI ULAŞIM SİSTEMLERİNDE KABLOSUZ GÖRÜNTÜ AKTARIMI BAŞARIMI

Hüseyin DOĞAN

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Tansal Güçlüoğlu

Şehir nüfusunun hızla artması sonucunda ulaşım problemleri de beraberinde artmaktadır. Büyükşehirlerde ulaşım sorunlarına en etkili çözüm olarak Metro yatırımları öne çıkmaktadır. Metro ulaşım sistemleri; güvenilir, hızlı, konforlu ve çevre dostu olmasından dolayı gün geçtikçe tercih edilen ulaşım sistemi olmaktadır. Bu nedenlerden dolayı İstanbul'un ulaşım problemlerini çözüm olması adına Metro yatırımları hızlı bir şekilde artmaktadır.

Şehir içerisinde Metroların kullanım oranı arttıkça yer altında geçen sürede artmaktadır. Tren içerisinde uzun süre yolculuk eden yolculara Wi-Fi hizmeti sunmak, yolcu bilgilendirme sistemleri (YBS) ile multimedya yayınlar yapmak yolcu memnuniyeti açısından kaçınılmaz bir hal almıştır. Bunların yanı sıra İstanbul'da yeni yapılması planlanan Metro hatları tam otomatik sürücüsüz (UTO – Unattended train operation) sistemler olarak planlanmaktadır. Sürücüsüz metro sistemlerinde tren içerisinde seyahat eden yolcuların güvenliği için trende bulunan cctv kameralarının anlık olarak kumanda merkezinden izlenmesi ve tren içerisindeki yolcuların acil durumlarda interkom aracılığıyla kumanda merkezi ile görüşebilmesi gerekmektedir. Ayrıca tren SCADA sistemi bilgilerinin, yangın algıma sistemi ve deray algılama bilgilerinin kumanda merkezinde bulunan araç operatörü tarafından takip edilmesi de büyük önem arz etmektedir.

Bu tezin amacı; Tünelde ilerleyen föniküler treni ile kontrol merkezi arasındaki kesintisiz ve gecikmesiz yüksek kapasiteli video ve data haberleşmesinin kablosuz olarak sağlanabileceğini ortaya koymaktır. Öncelikli olarak kablosuz haberleşme sistemleri tanıtılmış ve IEEE 802.11 standartları hakkında bilgi verilmiştir. Dünya metrolarındaki tren-yer haberleşmesi uygulamaları incelenerek teknik detayları paylaşılmıştır. Tünel içerisinde, zorlu çevresel şartlarda kapsamanın sağlanması için link bütçe hesaplamaları yapılmıştır ve bu hesaplara göre ekipman yerleşimleri gerçekleştirilmiştir. Tren – yer haberleşmesinde trenin hareketli olmasından dolayı hand-over sorunları incelenmiş ve hand-over süresinin en aza indirilebilmesi için nasıl çözümler üretilebileceği ortaya konmuştur. Ayrıca tünel içerisinde kapsama problemi olmadan yüksek upload veri hızı hızlarına ihtiyaç olduğundan dolayı tünellerde kablosuz haberleşme uygulaması yapılmıştır. Yapılan uygulama ile tünel içerisinde elde edilebilecek minimum hand-over süresi ve maksimum band genişliği, veri hızı testleri ile ortaya konmuştur. Çalışmalar sonucunda kontrol merkezinden föniküler araç içi kamera görüntüleri canlı ve kesintisiz olarak izlenebilir duruma getirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Metro, tren yer haberleşmesi, mobility, hand-over, kablosuz ağlar, IEEE 802.11, UTO.

PERFORMANCE OF WIRELESS VIDEO TRANSMISSION IN UNDERGROUND TRANSPORTATION SYSTEMS

Hüseyin DOĞAN

Department of Electronics and Communications Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Dr. Tansal Güçlüoğlu

As a result of the rapid increase in the city population, transportation problems increase as well. Subway investments stand out as the most effective solution to the transportation problems in metropolitans. Subway transportation systems are increasingly preferred as they are reliable, fast, comfortable and environment-friendly. Due to these reasons, subway investments have been rapidly increasing in order to provide solutions to the transportation problems of İstanbul.

The period spent underground increases in line with the increase in the subway usage within the cities. Providing Wi-Fi services to the passengers with long travel periods in the trains and making multimedia publications via passenger information systems (PIS) has become inevitable in terms of customer satisfaction. Furthermore, future subway lines for İstanbul are planned to be built as unattended train operation (UTO) systems. In unattended subway systems, it is required to monitor the CCTV cameras in the train simultaneously from the command center for passenger safety and the passengers in the train should be able to contact the command center via the intercom in emergencies. In addition, the monitoring of train SCADA system, fire detection system and derailment detection system information by the vehicle operator in the command system poses great importance.

The aim of this thesis is to put for the fact that it is possible to provide uninterrupted and lag-free wireless connection between the train moving in the tunnel and

command center. First, wireless communication systems are introduced and information is provided for IEEE 802.11 standards. The hand-over problems that may arise from the train being in motion for train-ground communication and some solutions are introduced to minimize the hand-over period. In addition, as high upload throughput are required without coverage problems within the train, wireless communication implementations are made in the tunnels, which put for the minimum hand-over time and maximum bandwidth to be obtained in the tunnel via throughput tests.

Keywords: Subway, train to ground, mobility, hand-over wireless networks, IEEE 802.11, UTO.



1.1 Literatür Özeti

Son yıllarda kablosuz haberleşme sistemleri üzerinden multimedya veri aktarımı ile ilgili yeni gelişmeler yaşanmaktadır. Kablosuz olarak haberleştirilecek veri miktarının artırılabilmesi için yeni standartlar geliştirilmektedir. Bunun yanı sıra Dünyada ve ülkemizde hızla artan metro ağlarında da kablosuz multimedya haberleşmesi büyük bir ihtiyaç haline gelmiştir ve kapsamlı çalışmalar yapılmaktadır. Kablosuz haberleşmede metro tünellerinde yaşanan kapsama ve band genişliği sorunlarına çözüm olarak fiziksel katmanda (L1) anten çeşitleri ve modülasyon yöntemlerinde geliştirmeler yapılırken bir yandan da veri bağlantı ve network katmanında (L2) üretici firmalar kendi çözümlerini geliştirmektedirler.

Javier Alanso ve arkadaşları Barselona’da L9 metro hattının C band metro tüneli şartlarında yaptıkları çalışmalarda, 2x2 MIMO antenler kullanarak metro içerisinde video aktarımı sağlayabilmek için kapasite artırımı sağladığını görme fırsatı bulmuşlardır. Lokal düzensizliklerin, birkaç dalga boyu dışında anten ayrılmasında bir kazanç artışı olmamasına rağmen aynı polarizasyonlu MIMO antenlerin performansını artırdığını göstermişlerdir. Lokal düzensizlik etkisi, kanal matrisine hareketli ortalama boşluk filtresi uygulanarak kaldırılması ile tüneller için dalga boyu kılavuzu modelinde verilen değerlerine göre, SISO durumu kapasiteyi azaltır. Polarizasyon çeşitliliği MIMO sistem performansını artırır ancak duvar düzensizliği tarafından üretilen lokal depolarizasyon performansın düşmesine neden olabilmektedir. Çeşitlilik tekniğinin gözlenebilir kapasite üzerinde etkisinin, tünelin enine kesitine bağlı olduğu

gösterilmiştir. Uzaysal ve polarizasyon çeşitliliği uygulamanın faydası olmasına rağmen, tünel kesitinin dikdörtgene yakın olduğu durumlarda gözlenebilir kapasitedeki iyileşme daha yüksektir. Polarizasyon çeşitliliği dikkate alındığında spesifik olarak, kemerli tüneller çok kötü bir MIMO performansı ile sonuçlanabilir [1].

Kablosuz multimedya haberleşmesinde yüksek data hızını sağlamak için en önemlisi olan multiple-input multiple-output (MIMO) sistemler olmak üzere birçok teknik geliştirilmiştir. Kanal durum bilgisi vericide mükemmel ise gerçekleştirilebilir video iletim sistemi tasarlamak için kanal kapasitesini artırabilirsiniz. Yapılan birçok çalışma MIMO sistemler ile artık data iletiminin tek linkten, eş zamanlı birden çok linke geçmesini esas almaktadır. Jia-Chyu Wu ve arkadaşları, MIMO sistemler üzerinden video iletimi tasarlamak için modülasyon şeması ile ortak kaynak kodlaması uygulamışlardır. Yaptıkları çalışmalar sonucunda önerdikleri sistemde, kanal durumuna göre yeterli iletim hızı ve alıcı anten sayısı seçilebilir. Geliştirdikleri sistem, performans kontrol ünitesi tarafından geri bildirim sağlanan BER bilgileri ile video iletimini sağlamak için uygun kaynak kanal hızını sağlar. Bu nedenle, iletilen video kalitesi bir Rayleigh sönümlmeli kanal durumu üzerinde neredeyse homojen seviyede tutabilir. Yaptıkları çalışma ile geleneksel yöntemlere göre daha iyi BER performansı sağlandığını ortaya koymuşlardır [2].

Yüksek hızlı kablosuz iletim sistemleri IEEE 802.11n ve 802.11ac kablosuz LAN standartları da dâhil olmak üzere MIMO-OFDM kullanarak popüler olmuştur. Bu tür yüksek hızlı iletim sistemleri, yüksek kalite video görüntülerinin kalitesinde bozulma olmadan iletimi beklenmektedir. Kosuke Morinaga ve arkadaşları, kayıpsız video sıkıştırma algoritmaları ve MIMO-OFDM wireless iletim teknolojisi kullanarak kablosuz çevre üzerinde yüksek kalite görüntüleri iletmek için çalışmaktadır. Çalışma sonuçları, video dizilerinin %99.99 piksel yenileme oranı ile 22 dB CNR (carrier to noise ratio) oranı üzerinde iletildiğini göstermektedir. Çizelge 1.1’de belirtilen, IEEE 802.11ac standardı 8x8 MIMO-OFDM kablosuz iletim sistemleri üzerinden yüksek çözünürlüklü

videoların kalite kaybı olmadan kablosuz sistemler üzerinden iletimi hedeflenirken, kayıpsız sıkıştırma algoritmaları ve gerekli iletim hatası için anti teknoloji araştırmışlardır. Çizelge 1.2’de görüldüğü üzere, CNR 22dB ve daha fazla olduğu durumlarda kalite kaybı olmadan yüksek kalite video iletiminin mümkün olduğu doğrulandı.

Çizelge 1.1 Wireless iletim parametreleri [3]

Spatial streams	8×8 MIMO 8 streams
Bandwidth	80 MHz
MCS	3 (16-QAM, 1/2)
Guard interval	800 ns
Channel model	802.11TGn Model D
MIMO detection	MMSE
Symbol synchronization	Ideal
Reed-Solomon coding	RS (255,199) (22.0 % redundancy rate)
Video frame resolution	1920×1080
Video frame bit-depth	26 bpp (YUV)
Processing block size	320×32 (204 blocks per frame)

Çizelge 1.2 Wireless iletimin değerlendirilmesi [3]

CNR	BER (before RS)	BER (after RS)	Pixel restoration rate
18 dB	8.04×10^{-3}	4.00×10^{-3}	12.3 %
20 dB	6.73×10^{-4}	1.81×10^{-5}	97.0 %
22 dB	4.71×10^{-5}	3.80×10^{-8}	99.99 %

Bozulma olmadan iletimin mümkün olduğu durumları genişletmek için, daha yüksek sıkıştırma oranlı sıkıştırma algoritmaları, daha etkili hata düzeltme metodu ve bir iletim hatası saptanması üzerine yeniden iletim kontrolü yapmak gibi teknolojilerin geliştirilmesi beklenmektedir [3].

Metro araçları içindeki yolcu bilgilendirme sistemlerinde, trenlerin tünel içerisinde giderken çok sık bir şekilde hand-over (devretme) yapmasından dolayı görüntülerde bozulmalar olmaktadır. Li Zhu ve arkadaşları, yolcu bilgilendirme sistemlerinin video iletim kalitesini geliştirmek için uygulama katmanı parametreleri ve hand-over kararları

üzerine dizayn çalışmaları yapmışlardır. Tren ve yer (Train to ground) arasındaki video iletiminde kaynak kod ve IEEE 802.11p standardını kullanmışlardır. Metro yolcu bilgilendirme sistemi kanalı, finite-state markov zinciri olarak modellenmiştir ve kanal durum geçiş olasılık matrisi gerçek saha testlerinden ölçülen bilgiler ile hesaplanmıştır. Hand-over kararı ve uygulama katmanı parametrelerinin adaptasyon problemleri olasılıksal yarı markov karar işleme (Semi Markov Decision Process - SMDP) olarak formüle edilmiştir. Uçtan uca video bozulmasını en aza indirmek hedeflenmiştir. Simülasyon sonuçları, önerilen SMDP tabanlı optimizasyon algoritması uçtan uca video iletim kalitesini önemli ölçüde geliştiğini göstermiştir.

Son zamanlarda büyükşehirlerdeki nüfus artışı ciddi trafik sorunlarına neden olmaktadır. Birçok şehir meşgul yollar üzerindeki baskıyı azaltmak için rahat, kullanışlı ve verimli metro sistemleri yapmak için odaklanmıştır. Bilgisayar sistemi ve multimedya ağ teknolojilerine dayalı Yolcu Bilgilendirme Sistemi (YBS) yolculara trende ve istasyonlarda tren geliş saatleri, canlı ekonomi haberleri, spor haberleri gibi gerçek zamanlı dinamik multimedya bilgiler sağlar. Yangın, deprem veya terörist saldırı gerçekleştiğinde metro yolcu bilgilendirme sistemi (YBS) acil tahliye bilgilendirmesi yapabilir. Tren yer (Train-ground) video haberleşme ağında YBS önemli alt sistemlerdendir. Gelişmiş tren yer video haberleşme networkleri, hızlı tren ve yer arasındaki yüksek kalite video bilgilerinin iletimini garanti eder. Bu durum yolcuların yüksek kalite videoları izlemesini sağlar ve onlara seyahatlerinde konforlu bir yolculuk sunar. En yeni gelişen Metro YBS tren yer video haberleşme networkleri hazır ticari ürünler olarak satışa sunulan WLAN ekipmanlarından dolayı Kablosuz Yerel Ağ (WLAN) tabanlıdır. Ancak geleneksel WLAN standartları (IEEE 802.11 a/b/g) başlangıçta yüksek hızlı ortamlar için tasarlanmamıştır. İletişim servis kalitesi (QOS) tren ray boyunca ilerlerken, hızlı mobilite çevre tarafından etkilenir. Özellikle ray boyunca bir tren bir WLAN erişim noktasının kapsamından uzaklaşıp diğer erişim noktası kapsamına girerken bir hand-over oluşur ve bu hand-over iletişimde kesintilere veya uzun gecikmelere neden olabilir. Diğer yandan, kablosuz kanalların band genişliği sınırlı olduğundan dolayı video sinyalleri verimli kodlama algoritmaları (H.263, Mpeg4) kullanılarak yüksek miktarda sıkıştırılmaktadır. Kablosuz metro şartları gibi hataya

meyilli ortamlarda yüksek miktarda sıkıştırılmış video dataları savunmasız hale gelmektedir.

Kayıplı kanallar üzerinde video iletim kalitesini artırmak için önemli çalışmalar yapılmaktadır. Sıkıştırılmış video dasetindeki bit hatalarını düzeltmek için hata kontrolü, ileri hata düzeltme (FEC) ve otomatik tekrar isteğı (ARQ) gibi orijinal video akışına gereksiz bilgilerin eklenmesi oldukça fazla kullanılmaktadır. Uyarlanabilir ortak kaynak kodlama, iletimdeki bozulmayı en aza indirmek için kullanılan bir diğer yöntemdir. Günümüzdeki çalışmalarda kayıplı kanallar üzerinden video iletiminde uyarlanabilir kaynak alt band kodlama yaklaşımı uygulanmaktadır. Video iletim kalitesi kaynak kodlarının kullanılmaya başlanması ile birlikte ciddi miktarda artmıştır.

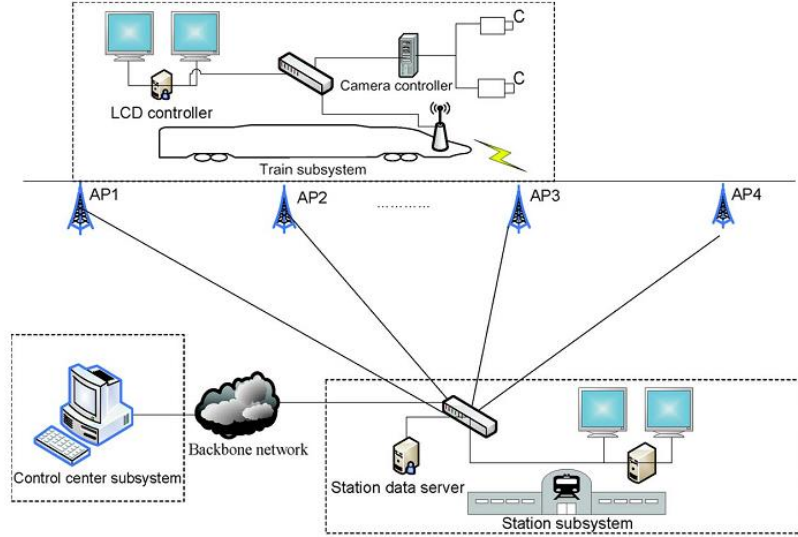
Birçok optimizasyon modeli kayıplı kanallar üzerinde video iletimini optimize etmek için sunulmasına rağmen, bu modellerden çoğı kanal zayıflamasından dolayı oluşan paket kayıpları altındaki iletim performansına odaklanmışlardır. Sonuç olarak mevcut çalışmalarda hand-over (devretme) işleminden dolayı meydana gelen kayıplar dikkate alınmamaktadır. Ancak yüksek hareketlilik (mobility) şartlarından dolayı Metro YBS' lerde hand-over sıklıkla olmaktadır. Hand-over kararlarının alınmasında ve hangi uygulama katmanı adaptasyon parametresi politikasının kullanılacağı, metrolarda tren ve yer (Train- Ground) video iletim networklerinin tasarımında çok önemli faktörlerdir. Bu durum tüm Metro video iletim sistemi performansını önemli bir şekilde etkilemektedir.

Li Zhu ve arkadaşları, araç iletişim networkünde geliştirilen bir standart olan IEEE 802.11p standardı tabanlı metro tren yer haberleşme networkü video iletim optimizasyon konuları üzerine çalışmalarını sürdürmektedirler. Çalışmalarında, kaynak kodlar, uygulama katmanı FEC (Forward error correction) şeması olarak tren yer video haberleşme networkünde kullanılmıştır. Metro YBS'de video iletimi için uygulama katmanı (L7) QOS'i ortaklaşa optimize etmek için entegre tasarım yaklaşımı sergiliyorlar. Kanal durumunu algılayan tren üzerindeki wireless kontrolör, hand-over 'lara karar verir ve video iletimi QOS optimize etmek için uygulama katmanı parametrelerini adapte eder. Önerilen programın farklı özellikleri aşağıda listelenmiştir.

- 1) Tren yer video haberleşme networkünün IEEE 802.11p tabanlı olması ve kaynak kodları uygulama katmanının FEC şeması olarak kullanılması.
- 2) Metro YBS kanal modeli, sonlu durum (finite-state) Markov zinciri ve gerçek saha testlerinden ölçülen veriler ile hesaplanmış kanal durum geçiş olasılık matrisi olarak modellenmiştir.
- 3) Hand-over kararları ve diğer uygulamalar arasında finans ve giriş kontrol problemlerine başarılı bir şekilde çözüm olan yarı markov karar süreci (SMDP) stokastik olarak uygulama katmanı parametreleri adaptasyon problemleri formüle edilmiştir. Çalışmalarında, metro video haberleşme networkünde video iletim QOS optimizasyonu için SMDP (Semi Markov Decision Process) uygulamaları üzerinde durulmuştur.
- 4) SMDP modelinin amacı uçtan uca bozulmayı en aza indirmektir. Kapsamlı simülasyon sonuçları sunulmuştur. Önerilen optimizasyon algoritması, metro video haberleşmesinde uçtan uca video kalitesini önemli ölçüde artırabildiğini ortaya koymuştur.

IEEE 802.11p ve Kayak Kod Tabanlı Tren Yer Video Haberleşme Ağı:

Metro YBS; Şekil 1.1 bize basit bir Metro Yolcu Bilgilendirme Sistemi genel görünümünü verir. Kumanda merkezi, istasyon, tren ve network olmak üzere 4 ana alt sistemden oluşur. Kumanda merkezi alt sistemi her türlü video akışı üretir ve gönderir. Kumanda merkezi, tüm video yayını kontrol eder ve tüm YBS ekranlarını ve network yönetimini izler. İstasyon alt sistemi, data sunucuları, video yayın kontrolörleri, LCD ekranlar ve diğer tüm yazılım sistemlerini içerir. Gerçek zamanlı bilgileri kumanda merkezinden alır ve diğer istasyon bilgileri ile birlikte trene gönderir. Tren alt sistemi, wireless kontrolör, araç üstü video kontrolör ve araç üstü kameralardan oluşmaktadır. Araç üstü ekipman bilgiyi kablosuz hat üzerinden alır ve gerçek zamanlı olarak LCD ekranlarda oynatır. Gerçek zamanlı monitör bilgisi network alt sistemi kullanılarak istasyona gönderilir. Network alt sistemi omurga (Backbone) ağı, tren yer video haberleşme ağı ve araç üstü ağı içerir. Tüm alt sistemler için haberleşme hizmeti sağlar.



Şekil 1.1 Yolcu bilgilendirme sistemi [4]

Sonuç olarak, Li Zhu ve arkadaşları sundukları optimum SMDP davranışı ile diğer iki sezgisel karar davranışını kıyaslamışlardır. İlk sezgisel davranışta, tren wireless kontrolörü, diğer erişim noktası daha iyi QOS (Quality of Service) sağladığı zaman hand-over yapmaya karar verir, hem raptor kod paritesi hem de iç güncelleme oranları sabittir. Bu davranış statik davranış olarak ifade edilmiştir [4].

1.2 Tezin Amacı

Bu tezin amacı; tünelde ilerleyen tren ile kumanda merkezi arasındaki kesintisiz ve gecikmesiz yüksek kapasiteli video ve data haberleşmesinin kablosuz olarak sağlanabileceğini ortaya koymaktır.

Öncelikli olarak kablosuz yerel alan ağları tanıtılmış ve IEEE 802.11 standartları hakkında bilgi verilmiştir. Standartların geçiş süreçleri ve bu standartlarda kullanılan modülasyon yöntemleri detaylı olarak anlatılmıştır. Günümüz kablosuz haberleşme cihazlarında kullanılan standartlar ve modülasyon yöntemleri incelenerek konunun anlaşılması amaçlanmıştır.

Tren – yer haberleşmesinde trenin hareketli olmasından dolayı ortaya çıkacak hand-over (devretme) sorunları incelenmiş ve hand-over süresinin en aza indirilebilmesi için nasıl çözümler üretilebileceği ortaya konmuştur. Ayrıca tünel içerisinde kapsama

problemlerinin nasıl giderilebileceği ve kayıp olmadan yüksek upload veri hızı hızlarına nasıl çıkılacağı yapılan uygulamalar ve testler ile gösterilmeye çalışılmıştır.

Saha uygulaması ile tünel içerisinde elde edilebilecek minimum hand-over süresi ve maksimum band genişliği testler ile ortaya konmuştur. Tünel içerisinde çevresel etkenlerden dolayı yaşanabilecek kapsama problemleri ve diğer sorunlar gözlemlenerek, bu sorunlara çözüm üretmek amaçlanmıştır.

Yapılan bu çalışma, Türkiye’de yer altı treninde tren-yer (train to ground) haberleşmesi sağlanarak işletme kullanımına sunulan ilk uygulama olması nedeniyle bundan sonra yapılacak benzer çalışmalara yol göstermesi hedeflenmiştir.

1.3 Hipotez

Saha keşif çalışmaları (site survey) ve link bütçe hesaplamaları ile pratikte gerçekleştirilen uygulamalar arasında farklılıklar gözlemlenmiştir. Erişim noktası cihazlarının konumlarının belirlenmesi için yapılan hesaplamalarda ve testlerde, tünelin sinyal üzerindeki bozucu etkisinin ve trenin tünel içerisinde hareket etmesinden dolayı oluşan etkiler gözlemlenmiştir. Tünel yapısının ve fiziki yapıdaki değişimlerin veri hızı değerine etkisi ortaya konmuştur. Kullanılan anten tipleri ve antenlerin polarizasyonunun nasıl sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Genişleyen veya daralan tünel yapısından dolayı oluşan zayıflamalar ve yansılarda çok yönlü dipol anten kullanımının etkileri gözlemlenmiştir. Ayrıca yönlü antenlerin dikey polarizasyon ve yatay polarizasyon olacak şekilde konumlandırmanın ve polarizasyon çeşitliliği sağlamanın band genişliğine etkisi test edilmiştir.

Hand-over (devretme) süresi test edilmiş, düşük süreli ve kusursuz bir hand-over geçişi için yöntemler önerilmiştir.

TELSİZ YEREL ALAN AĞLARI

Kablosuz ağ teknolojileri; iki cihaz arasında bilginin taşınması maksadıyla elektromanyetik dalgaların kullanılması olarak tanımlanabilir. Kablolu ağlarda kablodan kaynaklanan birçok dezavantaj, örneğin esnek hareket edememe, kablo maliyetinin yüksek olması, görüntü kirliliğine sebebiyet vermesi, ağın genişletilmesinde sıkıntılarla karşılaşılması kablosuz ağ teknolojisinin gelişimini hızla artırmıştır [5] .

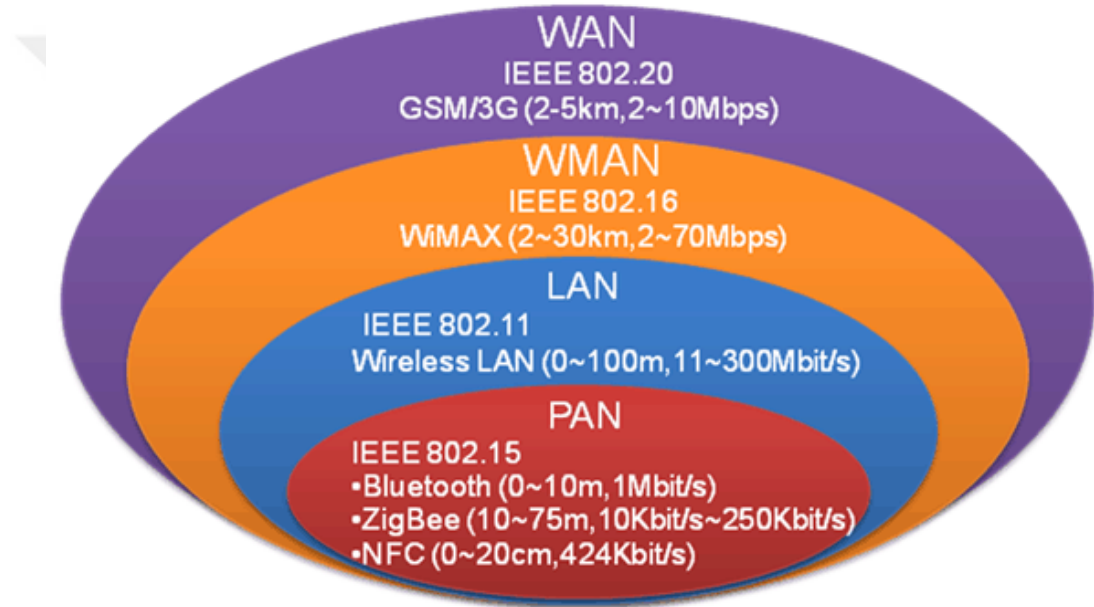
Telsiz yerel alan ağlar, kablosuz haberleşme yeteneğine sahip (802.11, bluetooth, infrared, GSM vb.) cihazların herhangi bir fiziksel bağlantı olmaksızın birbirleriyle bağlantı kurmalarını sağlayan ağ yapılarıdır [6].

2.1 Kablosuz Ağ Türleri

Kullanım alanlarına, iletişim gücüne ve kapsama alanına göre kablolu ağlardaki ağ tiplerine benzer olarak kablosuz ağlarda da kullanılan teknoloji ve türler sınıflandırılmıştır. Yerel alan ağlarda (LAN-Local Area Network) kullanılan kablosuz olarak oluşturulan yerel ağlar için WLAN ismi kullanılmaktadır. Ayrıca kullanılan kablosuz ağ standartları her ortam için bazı ölçütlere göre farklıdır. Bu ağ yapıları Çizelge 2.1 ve Şekil 2.1’de görülmektedir [6].

Çizelge 2.1 Kablosuz ağ türleri

Ağ Çeşidi	WPAN	WLAN	WMAN	WWAN
Standart	Bluetooth, UWB, Zigbee	IEEE 802.11 a/b/g/n/ac, HiberLAN	Wimax, IEEE 802.16	GSM, GPRS, CDMA, WCDMA, 3G, 4G, IEEE 802.20
Hız	0-3 Mbps	11-1300 Mbps	2 - 70 Mbps	2-100 Mbps
Mesafe	0-10 Metre	1-400 Metre	1-10 Km	30-40 Km



Şekil 2.1 Kablosuz ağ kategorileri

2.2 IEEE Standartları

Günümüzde kullanılan telsiz yerel alan ağlar için standartlar IEEE (Institute of Electrical and Electronical Engineers) tarafından belirlenmektedir.

IEEE (Institute Of Electrical And Electronical Engineers), bilim dünyasında, mühendisliğin yaratıcılık, geliştirme, bütünleştirme, paylaşırma işlevine, elektro teknoloji ve bilgi teknolojisine, insanlığa yararlı bilimlere ve uzmanlık alanlarına katkıda bulunan kar amacı olmayan teknik bir mesleki organizasyondur [6].

2.3 IEEE 802.11 Kablosuz Ağ Standartları

IEEE 802 LAN/MAN standart komitesi 802.x adı altında bir seri standart yayınlamış olup, 802.11 standardı Haziran 1997’de yayınlamıştır. Bu standardın amacı var olan kablolu LAN’lerin kablosuz olarak genişlemesini sağlamaktır [10].

Kablosuz ağlar lisans gerektirmeyen RF frekans aralıklarında kullanılmaktadır. Bu frekansların neler olacağı ve hangi protokolleri kullanacağı önceden belirlenmiş ve bir standart oluşturulmuştur. Bu nedenle kablosuz cihazların kullanacakları frekans aralıkları, veri kapasiteleri ve nasıl bilgi alıp göndereceklerine dair ana hususlar IEEE tarafından belirlenmiştir. IEEE 802.11 standart takımı kablosuz yerel ağlar içindir. IEEE LAN/MAN standart komitesi tarafından 5 GHZ ve 2.4 GHZ halk bandı (public spectrum band) içinde geliştirilmiştir [11].

IEEE 802.11 standardı WLAN standartlarını kapsamaktadır. 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11p, 802.11n, 802.11ac standartları şuana kadar belirlenmiş iletişim protokolleri standartlarıdır [9]. Çizelge 2.2’de IEEE kablosuz ağ standartları ve özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 2.2 IEEE kablosuz ağ standartları ve özellikleri

Standart	Tarih	Frekans	Kapsama Mesafesi	Hız
802.11	1997	2.4 GHZ	50 Metre	2 Mbps
802.11a	1999	5 GHZ	35 Metre	54 Mbps
802.11b	1999	2.4 GHZ	30 Metre	11 Mbps
802.11g	2003	2.4 GHZ	100 Metre	54 Mbps
802.11n	2009	2.4 GHZ / 5 GHZ	300 Metre	600 Mbps
802.11ac	2013	5 GHZ	500 Metre	1,3 Gbps

2.3.1 802.11a Standardı

1999 yılında standart olan 802.11a, 5 GHz frekansta ve maksimum 54 Mb/s hızında çalışabilir. Ancak bazı faktörler bant genişliğinin önemli bir kısmını tüketmektedir.

Yonga üreticilerine göre 802.11a protokolünün ulaşabileceği en yüksek veri transfer hızı 22–26 Mbps arasında bir değerdir. Modülasyon tekniği olarak OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - Dikey Frekans Bölüşümlü Çoğullama) kullanır [12], [13].

Yüksek frekans olmasından dolayı 802.11b'ye göre uzak mesafelerde setlerden ya da engellerden geçemezler. Sebebi frekans arttıkça dalga boyu küçüldüğü için karşılaştığı engellere daha çok takılır. Bunun için çok odalı ya da engelin çok olduğu ortamlarda verimsizdir.

2.3.2 802.11b Standardı

Eylül 1999 yılında standart olan 802.11b, 2.4 GHz frekansta maksimum olarak 11 Mbps bant genişliğinde çalışmaktadır. Fakat ortalama değer olarak 4.3 Mbps hızda çalışır. Ticarileşmiş ilk standarttır. Modülasyon tekniği olarak DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) kullanır [16]. Bu spektrum aynı zamanda kablosuz telefon ve çoğu bluetooth ürünleri tarafından da kullanılmaktadır. Kapsama alanı kapalı alanlarda 30–45 metredir. Wi-Fi uyumlu farklı marka cihazlar birbirleriyle uyumlu çalışabilir. Ancak 802.11b standardında da bazı sorunlar vardır. Öncelikle video, grafik, ses ağırlıklı hale gelen veri ortamını desteklemekten uzaktır ve bant genişliği ve gerçek zamanlı veri iletimine olanak sağlayacak servis kalitesi (Qos) ve önceliklendirme desteği bulunmamaktadır. Ayrıca diğer donanımların yarattığı radyo paraziti bu standardın kullandığı frekansı önemli ölçüde etkilemektedir [17].

2.3.3 802.11g Standardı

2003 yılında standart olan 802.11g, 2.4 GHz frekansta teorik olarak maksimum 54 Mbps hızında çalışabilir, ama 802.11g standardının ulaşabileceği en yüksek veri transfer hızı 19 Mbps'dir. Modülasyon tekniği olarak 802.11a gibi OFDM'yi kullanır. 802.11b ürünleriyle uyumludur. Kapsama alanı kapalı alanlarda 30–45 metredir. 802.11b ile aynı frekans spektrumunu kullandığından standartlaşması kolay olmuştur [18].

2.3.4 802.11n Standardı

IEEE 802.11n, 2.4 GHz ve 5 GHz frekanslarında 248–300 Mbps arasında yüksek hız sağlamaktadır. Arttırılmış veri aktarım hızı ve kapsama alan genişliği 802.11n'in en önemli özellikleridir [5].

En az iki anten kullanımı ile sağlanan Çoklu Giriş Çoklu Çıkış (Multiple-Input Multiple-Output-MIMO) teknolojisi bahse konu standardın ana unsurudur. İki adet 20MHz kanalı birleştirilerek 40MHz kanal genişliği sunması, 2.4GHz ve 5GHz frekans bantlarında çalışabilmesi bu standardın diğer ana özellikleridir.

2.3.5 802.11ac Standardı

Kablosuz yerel alan ağlarının kullanımının yaygınlaşmasına paralel olarak yüksek performans beklentilerinin karşılanması için IEEE 802 standartları komitesi tarafından oluşturulan yeni bir çalışma grubu (task group, TG) 802.11-2007 standardını oluşturmak amacıyla 2008 yılı Eylül ayında çalışmalarına başlamıştır. 802.11ac olarak bilinen standart tamamladığında kablosuz yerel alan ağlarında spektral verimliliğin iyileştirilmesi sonucunda kablolu ağlarla karşılaştırılabilir performansa ulaşılması hedeflenmiştir. 802.11ac çalışma grubu (TGac) tarafından yapılan çalışmalar sonucunda 2011 yılı Ocak ayında yeni standardın getirdiği teknolojileri tanımlayan ve özelliklerini belirleyen taslak ortaya çıkarılmıştır. 2013 yılı sonunda standart onaylanmıştır.

2.4 Sinyal Modülasyon Yöntemleri

WLAN sistemleri lisans ve kullanım ücreti gerektirmeyen ISM frekans bantlarında çalışmaktadır. Bu bantlar aynı zamanda telsiz servislerinin kullanımı için tahsisli olduğundan WLAN sistemleri enterferansa (frekans dalgalarının kesişmesi) dayanıklı teknolojiler üzerine kurulmak zorundadır. Bunun için WLAN sistemlerinde her bir standardın modülasyon tekniği, diğer kablosuz iletişim teknolojileri ile parazit yaratmaması için frekans spektrumunu verimli kullanan ve enterferanstan az etkilenen teknolojiler geliştirilmiştir. Bunlara örnek olarak FHSS, DHSS ve 802.11n teknolojisi MIMO verilebilir [21],[16].

Yayılım Spektrumu (Spread Spectrum) metodu kullanılarak, aynı frekansta birden çok kullanıcıya aynı ortamda gönderme yapılabilmektedir. Bu teknoloji kullanılarak geliştirilen modülasyon çeşitleri ve kullanıldıkları standartlar Çizelge 2.3.' de verilmiştir.

Çizelge 2.3 Kablosuz ağ standartlarında kullanılan modülasyon çeşitleri

Standart	Frekans	Maksimum Veri Aktarım Hızı	Kanal Genişliği	Modülasyon Çeşidi
802.11a	5 GHZ	54 Mbps	20 MHZ	OFDM, 64-QAM
802.11b	2.4 GHZ	11 Mbps	20 MHZ	DSSS, QPSK
802.11g	2.4 GHZ	54 Mbps	20 MHZ	OFDM, 64-QAM
802.11n	2.4 GHZ / 5 GHZ	600 Mbps	40 MHZ	OFDM, 64-QAM
802.11ac	5 GHZ	1,3 Gbps	160 MHZ	OFDM, 256-QAM

2.4.1 Frekans Atlamalı Yayılım Spektrumu (FHSS)

Frekans Atlamalı Yayılım Spektrumu (Frequency Hopping Spread Spectrum - FHSS) 2.4 GHz frekansında sunulan 83 MHz frekans aralığında, 802.11 standardında kullanılan bir modülasyon yöntemidir. Kablosuz ağ teknolojisinde güvenlik öncelikli konular arasında yer almaktadır. Bu nedenle Frekans Atlamalı Yayılım Spektrumu (FHSS) yöntemi kullanılarak karşılıklı eş zamanlı olarak veri aktarım esnasında frekans değişikliklerine gidilerek güvenlik seviyesi yükseltilmektedir.

Bu teknolojiye 6 MHz taşıyıcı frekansı kullanılmaktadır. Frekans Atlamalı Yayılım Spektrumu (FHSS) modülasyon tekniği kullanan cihazlar maksimum 2 Mbps veri aktarım hızı sunabilmektedir [11].

Gönderen cihaz saniyede 1600 kez frekans değiştirerek yüksek seviyeli bir güvenlik sağlar. FHSS tekniği için 2402–2480 MHz frekans aralığında 1 frekansta 79 kanal bulunmaktadır. Ağır enterferans yaşanan ortamlar için daha uygun bir çözümdür [7],[21],[16].

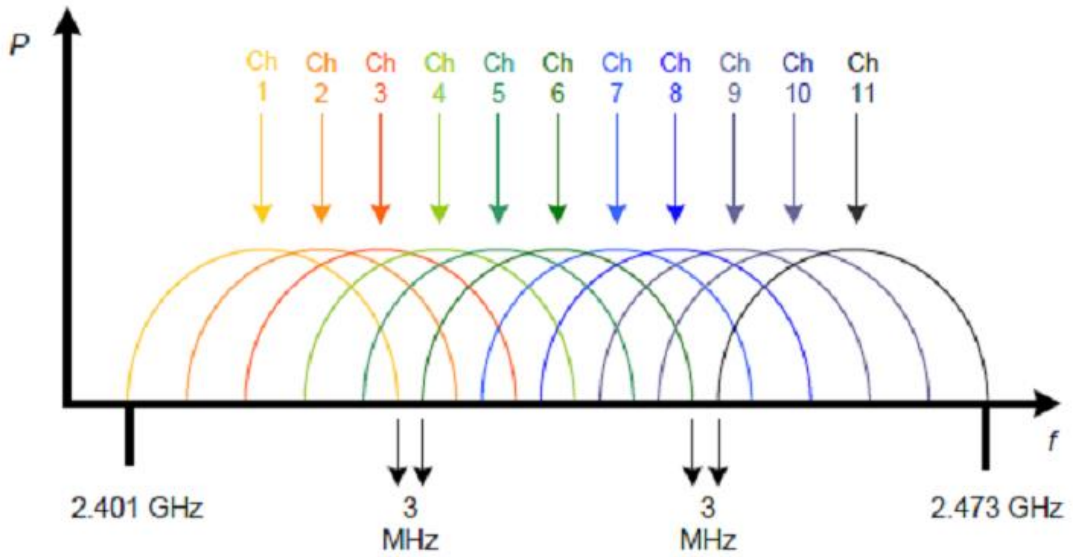
2.4.2 Doğrudan Ardışık Yayılım Spektrumu (DSSS)

DSSS, belirli bir frekans bandında sabit kalan bir taşıyıcıyı kullanır. Veri işareti mikro dalga iletiminde olduğu gibi dar bir frekans aralığı yerine, özel bir kodlama yöntemi kullanarak çok daha geniş bir frekans bandına dağıtılır. Dar bantlı işaretler ve dağıtık spektrum işaretleri aynı bilgiyi taşımak için aynı miktarda iletim gücünü kullanırlar. Ancak dağıtık spektrumda güç yoğunluğu dar bantlı işaretlerden çok daha düşüktür. Sonuç olarak radyo frekans spektrumunda dağıtık spektrum işaretinin tespiti çok zordur. Bu durumda DSSS cihazlarının güvenli bir iletim ortamı oluşturmalarını sağlar [7].

802.11b standardı DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) teknolojisini kullanmaktadır. DSSS fazla bant genişliğine, daha yüksek veri iletişim hızına sahiptir ve enterferanstan daha az etkilenmektedir [21, 16].

Bu teknolojiye her kanal 22MHz genişliğinde bir alanı yönetmekte olup, taşıyıcı frekans sadece 1MHz'dir. 2.4GHz frekansı; 2401-2473 MHz frekans aralığını kapsamaktadır. Bu frekans aralığında toplam 11 kanal mevcuttur. Şekil 2.2'de DSSS kanal ilişkisi gösterilmiştir.

20MHz bant genişliğinde sadece gönderme yapılabilen Frekans Atlamalı Yayılım Spektrumu (FHSS) aksine Doğrudan Ardışık Yayılım Spektrumu (DSSS) teknolojisi ile 20MHz bant genişliğinde hem gönderme hem de alma işlemi yapılmaktadır. Frekans Atlamalı Yayılım Spektrumu (FHSS) modülasyon çeşidine göre daha güvenlidir [22].



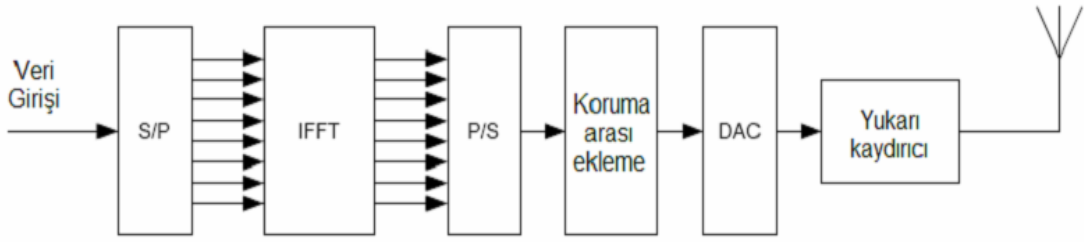
Şekil 2.2 Doğrudan ardışık yayılım spektrumu (DSSS) kanal ilişkisi [5],[23]

2.4.3 Dik Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM)

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) radyo dalgaları üzerinden büyük miktarda veri transferi yapmak için kullanılan bir frekans bölüşümlü çoğullama modülasyon tekniğidir. OFDM, radyo sinyalini daha küçük alt sinyallere bölüp aynı anda farklı frekanslardan alıcıya gönderme yöntemi ile çalışır. OFDM bir taşıyıcı yerine çok sayıda taşıyıcı kullanılan bir modülasyon tekniği olarak da bilinir. Bu teknikte sinyaller fiziksel engellerle karşılaştığında dağılmayıp, engelin çevresinden dolaşmaktadır. OFDM sinyal iletiminde meydana gelen çapraz karışmayı azaltan ve çoklu yol gecikme yayılmasına ve kanal gürültüsüne tolerans tanıyan bir yöntemdir. Bu yüzden pek çok kablosuz uygulama için oldukça uygundur [21] .

Dik Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM); mevcut geniş bant kanalını eşit dar bant kanallara bölen ve her bir dar bant kanal için taşıyıcı sinyal tahsis eden bir iletişim teknolojisidir.

Bu teknolojiye seri aktarım yöntemi ile tek bir taşıyıcı sinyal ile aktarılan 288 veri biti, Ayırık Ters Fourier Dönüşümü (IFFT) yöntemi ile 48 adet alt taşıyıcıya bölünerek paralel şekilde her biri 6 bit taşıyan sinyaller şeklinde modüle edilir ve gönderilir [23].



Şekil 2.3 OFDM verici blok diyagramı [5],[25]

Şekil 2.3’de görüldüğü gibi alıcı tarafında modülasyonun tam tersi demodülasyon yapılarak antenden alınan veri tekrar birleştirilir ve 288 bit’ e tamamlanır. Böylece istenilen veri farklı sinyal alt taşıyıcılar ile alıcı tarafına aktarılmış olur. Bu bize sinyalin yolculuğu esnasında karşısına çıkabilecek engel ve engellemelere karşı tek bir sinyal taşıyıcının güvenilirliğini 48 adet sinyal taşıyıcıya aktarır, çıkacak herhangi bir sorun bu 48 taşıyıcıdan birini veya bir kaçını etkiler ancak buna rağmen veri, karşı tarafa kalan diğer sinyal alt taşıyıcıları ile doğru şekilde aktarılmış olur.

2.4.4 Taşıyıcı Algılaması Çoklu Erişim/Çakışma Kaçınma (Csma/Ca)

Taşıyıcı algılaması çoklu erişim/çakışma kaçınma (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) ağdaki çarpışmaların önüne geçebilmek için kullanılan ağ bağlantı protokolüdür. Kablosuz ağ trafiğini sağlar. CSMA/CA gerçek veri dağıtımı yapılmadan önce çarpışmaları dinlemek için ağa bir sinyal gönderir, çarpışma duyduğunda, WLAN üzerindeki diğer aygıtlara hiçbir veri yayınlamamalarını söyler. IEEE 802.11 iletim şekli ve iletim ortamını tanımladığı için OSI’nin birinci ve ikinci katmanında faaliyet göstermektedir. Modülasyon şekilleri olan DSSS, FHSS, OFDM OSI’nin fiziksel katmanı ile ilgilidir. Diğer güvenlik ve iletim ile ilgili kısımlar ikinci katmanda (veri bağı) işlenir [23].

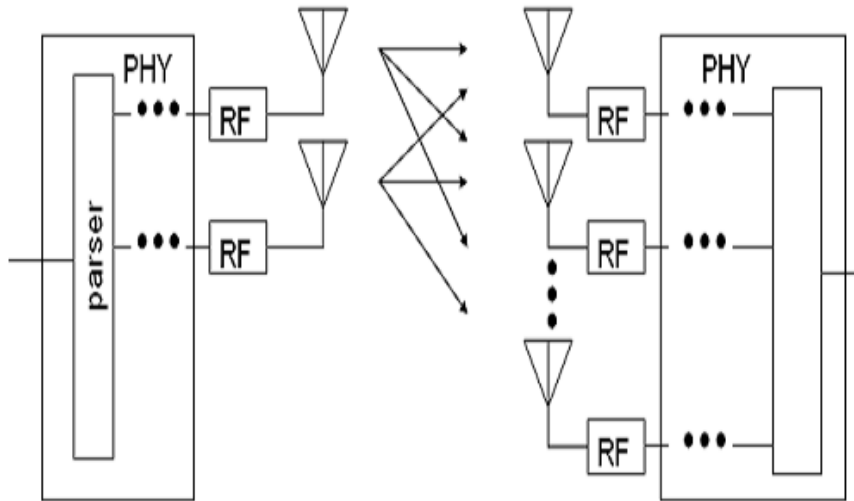
2.5 Çoklu Giriş Çoklu Çıkış (MIMO-Multiple Input Multiple Output)

802.11n standardı, MIMO adı verilen bir protokol sayesinde 2.4 GHz ve 5 GHz frekanslarının her ikisini de aynı anda kullanabilmektedir. MIMO teknolojisi, iletilecek bir bilginin parçalara ayrılıp farklı antenler üzerinden karşı tarafa gönderilmesini sağlar. Diğer standartlarla çalışan cihazlar bir anten üzerinden bir yayın yaparken, 802.11n

teknolojisine sahip ağ cihazları gönderi tarafında daha fazla yayın yaparken, alım tarafında birden fazla anten kullanırlar ve birden fazla alınan/gönderilen yayınları birleştirirler. Gönderilen veriler farklı rotalar takip ederek (örnek: duvarlardan, kapılardan ve diğer eşyalardan yansıyarak) alıcı antene farklı zamanlarda ve birden fazla kere varır. MIMO teknolojisi bu durumu kendi lehine kullanarak işaretin güçlenmesini ve daha uzaklara iletilmesini sağlar [14].

2.5.1 MIMO Temelleri

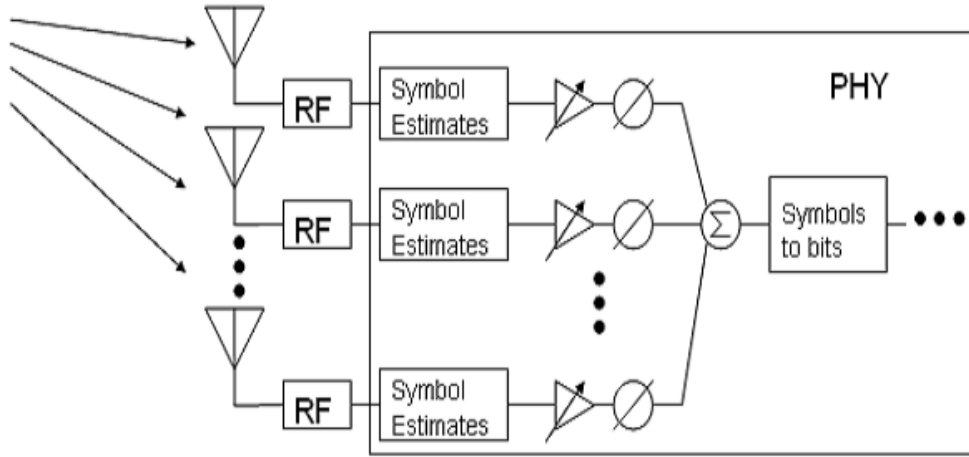
- İstemci ve Erişim noktasının her ikisinde de benzer MRC (Maximum Ratio Combining) tabanlı donanıma ihtiyaç duyulur. Şekil 2.4'te alıcı verici yapısı gösterilmiştir.
- Aynı frekans üzerinden aynı anda çoklu veri akımı sağlanabilir. Bu da yüksek ortalama veri transferine olanak sağlar.
- Hem veri oranını arttırmak için hem de bağlantının gücünü arttırmak için kullanılabilir.
- 802.11 a/b/g ile uyumlu değildir.



Şekil 2.4 MIMO'da alıcı – verici yapısı [6]

2.5.2 Maximum Ratio Combining (MRC)

MRC, temel bantta DSP (Digital Signal Processor) teknikleri kullanılarak yapılır. Çoklu antenler ve çoklu tam radyo frekansları paralel kullanılır. Gönderilen sinyalin kopyaları temel bantta maksimum SNR (signal to noise ratio) için doğrulanır ve birleştirilir [26]. Şekil 2.5'te MRC yapısı gösterilmiştir.

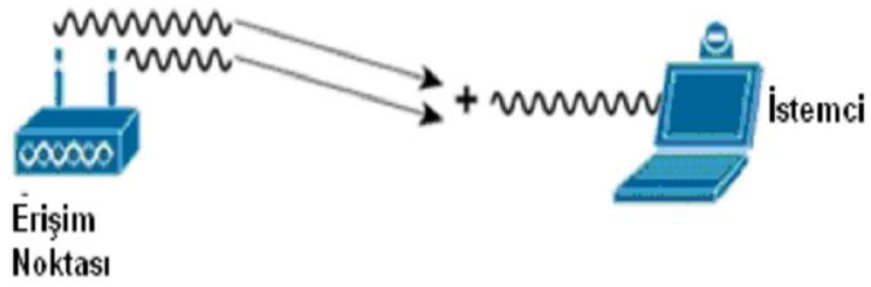


Şekil 2.5 MRC yapısı

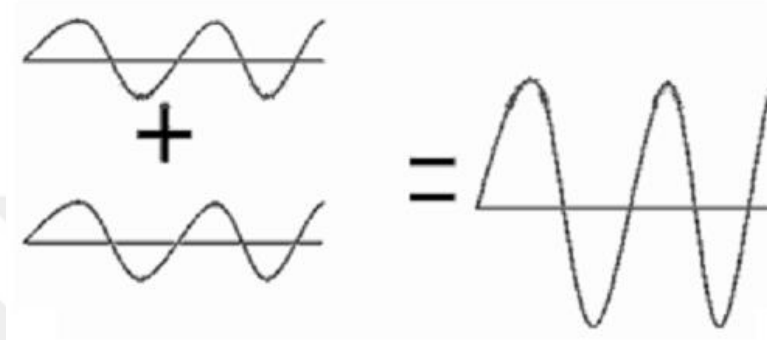
2.5.3 Huzme Biçimlendirme (Beamforming)

MIMO teknolojisi, alıcıda SNR'ı iyileştirmek için kullanılan diğer tekniklerin avantajlarını kullanır. Bunlardan biriside Transmit Beamforming'tir (gönderim sinyali oluşturma). Beamforming işlemi ilk sürüm tarafından desteklenmemektedir [26].

Bu teknikte, erişim noktasındaki antenler tarafından gönderilen sinyaller, alıcı tarafından ayrı ayrı alınıp, kendi içerisinde sinyaller birleştirilerek, sinyal gücü artırılır. Bu işlem Constructive Interference (Yapıcı karışma) olarak adlandırılır. Transmit Beamforming işlemi ve Yapıcı Karışma aşağıda Şekil 2.6 ve Şekil 2.'de gösterilmektedir.

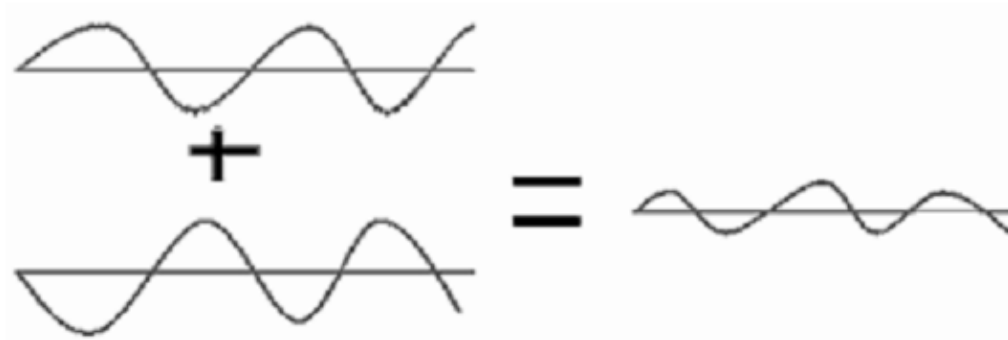


Şekil 2.6 İletken sinyal oluşturma (Transmit Beamforming) [27]



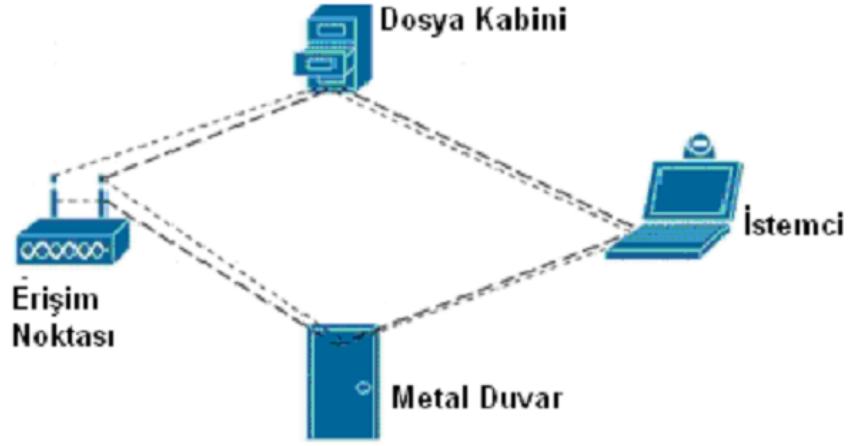
Şekil 2.7 Yapıcı karışma (Constructive Interference) [27]

Fakat beamforming işlemi, eski standart aygıtlarda iki sinyal arasındaki gecikmeden ötürü parazitlere ve veri kayıplarına sebep olabilir. Bu durumda Yıkıcı Karışma (Destructive Interference) olarak adlandırılır [27]. Şekil 2.8’de gösterilmiştir.



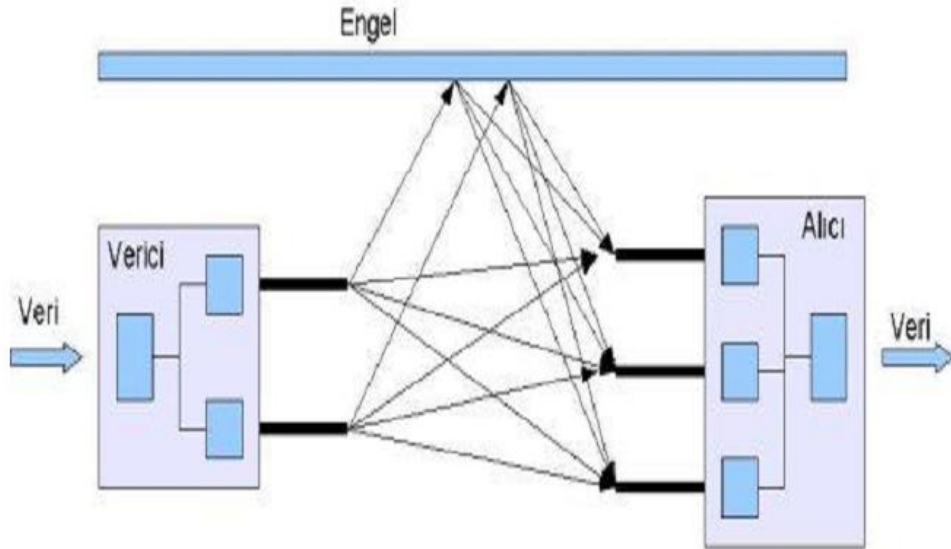
Şekil 2.8 Yıkıcı karışma (Destructive Interference) [27]

Genel anlamıyla MIMO, birden fazla antenle iletim tekniğinde geçmektedir. Şekil 2.9’da gösterilen Çok-yollu Yayılım (Multipath Propagation) gibi olguların kullanımıyla, bant genişliğinin verimini artıran bir teknoloji denilebilir.



Şekil 2.9 Çoklu yol (Multipath) [27]

Radyo dalgaları, yayılımları sırasında engellere çarpıp yansımakta veya sönmülmektedir. Geleneksel anten teknolojisinde, bu yansımalar sıkıntılar yaratabilmektedir. Örneğin Televizyon izlerken izlediğiniz kanalın görüntüsünün bir kopyası, biraz kaymış gibi ekranda görünmesi gibi. MIMO, bu etkiyi aynı frekans bandında, birim zamanda iletilebilecek veri miktarını artırmak için kullanır. Birden fazla anten kullanımıyla, veri parçalar halinde gönderilir ve karşı tarafta da yine fazla sayıda anten tarafından algılanır. Her bir anten tarafından alınan veri, bir Sayısal İşaret İşleyici (DSP - Digital Signal Processor) kullanılarak birleştirilir.

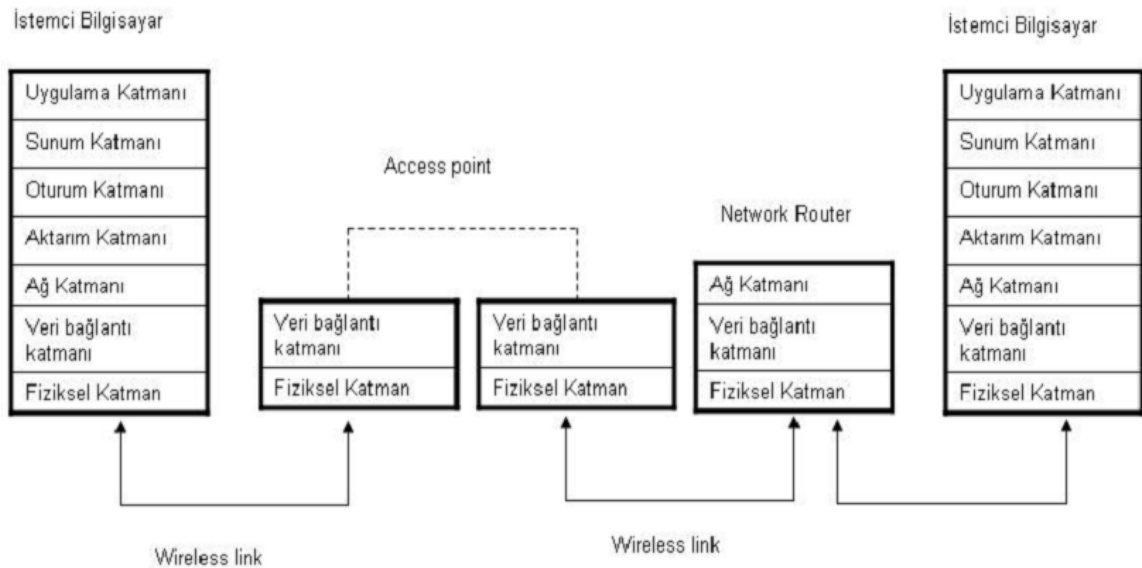


Şekil 2.10 Çok-yollu yayılım [27]

Şekil 2.10’da, vericiye gelen veri içeride parçalara ayrılıp, radyo dalgaları halinde dışarıya aktarılır. Antenlerden yayılan dalga, hem doğrudan doğruya, hem de ortamdaki engellerden yansıyarak alıcıya ulaşır. Alıcı, üç anteninde algıladığı veriyi sayısal işaret işleme yardımıyla birleştirerek esas veriyi tekrar oluşturur.

2.6 Kablosuz Ağ Haberleşme Yöntemleri

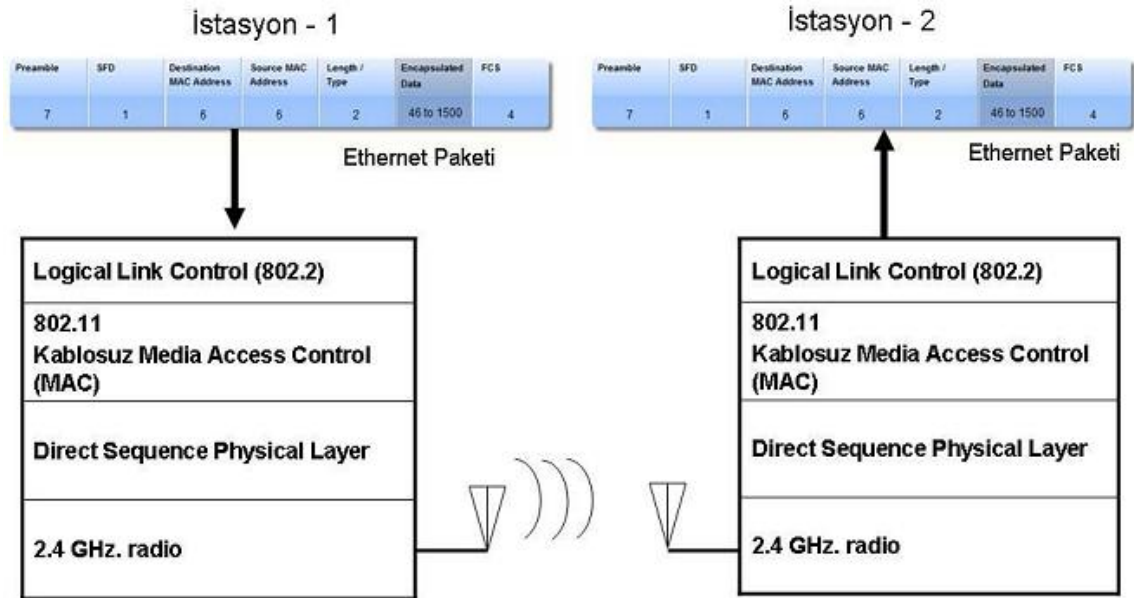
Bilgisayarlar birbiri ile haberleşmede OSI (Open System Interconnect) katmanlar sırasını kullanmaktadır (Şekil 2.11). Bilgisayar ağlarında kullanılan Erişim Noktaları (Erişim Noktası – AP) bu yapının birinci ve ikinci katmanlarını kullanmaktadır [28].



Şekil 2.11 Kablosuz haberleşme ağ katmanları [5],[28]

Kablosuz ağlar, günümüzde en popüler haberleşme teknolojisi olan Ethernet teknolojisini kullanmaktadır. Ethernet, bir asenkron teknolojisidir. İstemci bilgisayarlar atanmış bir zaman dilimi yoktur ve iletişim ortamında herhangi bir iletişim yetkisi kontrol merkezine ihtiyaç duymaz. Bunun yerine ortamda veri aktarımının olup olmadığını anlamak maksadıyla bir mesaj gönderilerek veri aktarımı sıraya sokulmaktadır. Bu mesajın genel adı Taşıyıcı Algılaması Çoklu Erişim/Çakışma Kaçınma (Carrier-Sense Multiple Access/Collision Detection - CSMA/CD) dır. Ethernet paketinde 4 byte olan Çerçeve Kontrol Sıklığı (Frame Check Sequence - FCS) bölümünde yer almaktadır.

Ethernet teknolojisinde veriler paketlere bölünerek belli aralıklardaki bit sayısına uygun olarak gönderilirler. Kablolu ağlarda 802.3 standardı olarak adlandırılan bu çerçeve yapısı, kablosuz ağlarda 802.11 olarak adlandırılmakta olup, gönderilecek ethernet çerçevesi elektromanyetik dalgalar ile bir istasyondan diğer bir istasyona taşınmaktadır (Şekil 2.12) .



Şekil 2.12 Çerçeve gönderim katmanları [5],[28]

IEEE 802.11 standartları OSI katmanlarından L2 Veri Bağlantı Katmanı (Media Access Control - MAC) katmanı ve L1 Fiziksel Katmanı kapsamaktadır [29].

2.7 Kablosuz Yerel Alan Ağ Topolojileri

Topoloji kavramı, elemanların fiziksel ve ya mantıksal dizilişleri anlamına yani ağa ağlanan düğüm noktalarının (bilgisayarlar, ağ yazıcıları, sunucular, vs.) yerleşimini simgelemektedir. Kablosuz yerel alan iletişim ağlarında genellikle aşağıdaki topoloji tipleri kullanılmaktadır: Bunlar Yıldız (Star), Noktadan Noktaya (PtP) ve Örgü (Mesh) topolojileridir.

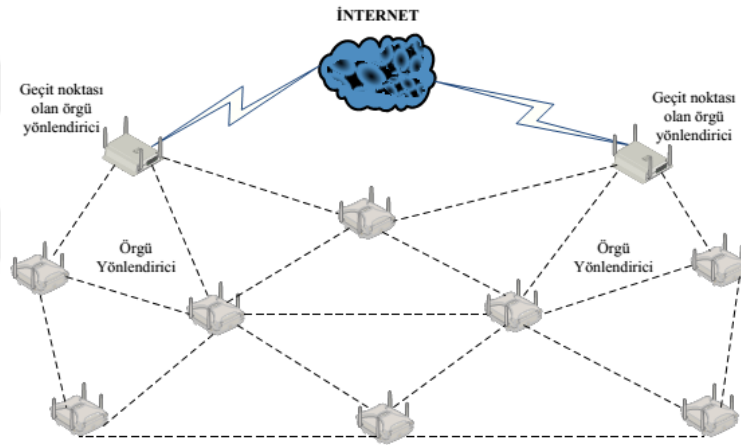
2.7.1 Yıldız Topolojisi (Star Topology)

Yıldız topolojisi (ki günümüzde en fazla kullanılan topoloji tipi budur) söz konusu olduğunda bir ağdaki iletişimi düzenlemek için bir taban istasyonu veya erişim noktası

kullanılmaktadır. Bir noktadan diğerine giden bilgi önce göndericiden erişim noktasına geliyor, oradan da hedef noktaya aktarılmaktadır. Bu erişim noktası ya da istasyon ayrıca kablolu bir ağa köprü görevi de görebilir. Böylece kablosuz olarak bağlanan istemciye ağ üzerindeki diğer bilgisayarlara, internete veya diğer ağ aygıtlarına erişim sağlanabilmektedir [6].

2.7.2 Örgü Topolojisi (Mesh Topology)

Ağ örgüsü topolojisi ise yıldız topolojisinden biraz daha farklıdır. Sistem aynı olmasına rağmen ortamda bir erişim noktası bulunmamaktadır. Birbirinin kapsama alanındaki her aygıt birbiri ile haberleşebilir. Daha gelişmiş sistemlerde Erişim Noktası Cihazları yönlendirici olarak görev yapar (Şekil 2.13).



Şekil 2.13 Örgü (Mesh) topolojisi

2.8 Kablosuz Ortam Ağ Bileşenleri

IEEE 802. 11 Kablosuz yerel alan ağlarında kullanım alanlarına göre birden çok aygıt bulunmaktadır. Kablosuz yerel alan ağlarında bulunan temel bileşenler aşağıda sıralanmaktadır.

2.8.1 Kablosuz İstemci (Wireless Client)

En az bir adet 802.11a/b/g kablosuz ağ adaptörüne sahip olan kişisel bilgisayarlar, dizüstü bilgisayarlar, el bilgisayarları, cep telefonları istemci olarak kabul edilir.

2.8.2 Kablosuz Erişim Noktası (WAP - Wireless Erişim Noktası)

Erişim noktası kısaca AP ya da WAP adıyla bilinir. Erişim noktası, kablolu bir Ethernet ağına kablosuz erişim sağlar (şekil 2.14). Erişim noktası, switche veya kablolu yönlendiriciye takılır ve kablosuz haberleşme sinyalleri gönderir. Bu, bilgisayarların ve aygıtların kablolu ağa kablosuz olarak bağlanmasını sağlar. Erişim noktaları hücresel telefon kuleleri gibi davranır: bir konumdan diğetine geçebilir ve ağa kablosuz erişiminiz devam edebilir. Kablolu ağlardaki Hub isimli cihaza karşılık gösterilebilir.

Gelen paketi havaya gönderirler ve tüm istemciler ilgili pakete ulaşabilir. Erişim noktaları SSID'leri (Service Set ID) ile ayırt edilirler. Erişim Noktaları periyodik olarak beacon paketlerini havaya göndermek suretiyle varlıklarını (SSID bilgilerini) mevcut istemcilere bildirirler. Bu Erişim Noktalarının açık noktalarından biri olarak da tartışılmaktadır. Erişim Noktası Cihazlarının kendisine ait hafızaları vardır. İçlerinde gömülü yazılım (Firmware) bulunmaktadır. Bu yazılımlar yeni çıkan standartlara ya da gelişmelere göre güncellenebilir. Erişim Noktası Cihazları içlerinde güvenlik protokolleri bulundurlar. Bunlardan bazıları WEP (Wired Equivalent Privacy) ,WPA (Wi-Fi Protected Access) ve WPA2 (Wi-Fi Protected Access 2) dir. Erişim noktaları istemcilere otomatik olarak IP (Internet Protocol) atayabilir. Hemen hemen hepsi DHCP (Dynamic Host Control Protocol) mekanizmasına sahiptir.



şekil 2.14 Kablosuz erişim noktası

Kablosuz erişim noktaları temel olarak 3 özelliğ e sahiptir. Bunlar erişim noktası bu varsayılan (default) modu, diğ er ikisi ise tekrarlayıcı (Repeater) modu ve köprü (Bridge) modudur [6].

2.9 IEEE 802.11n'in Mimari Yapısı

802.11a/b/g standartlarında yapılan geliştirme ve eklemeler ile 802.11n hazırlanmıştır. Yapılan bu geliştirmeler, fiziksel katmanda yapılan geliştirmeler ve MAC katmanında yapılan geliştirmeler olarak ikiye ayrılmış ve incelenmiştir [5].

2.9.1 Fiziksel Katmanda Yapılan Düzenlemeler

Fiziksel katmanda yapılan iyileştirmeler genel olarak frekans, modülasyon, sinyal işleme ve kanal üzerinde yapılan iyileştirmelerdir. Yapılan bu düzenlemelerin veri aktarım hızı ve mesafede ne gibi artılar sağladığı sonraki maddelerde normal şartlarda ölçülerek analiz edilecek olup, bir önceki standartlara göre artış miktarı Çizelge 2.4' de özetle verilmiştir [5].

Çizelge 2.4 Fiziksel katmanda yapılan iyileştirmeler [5],[30]

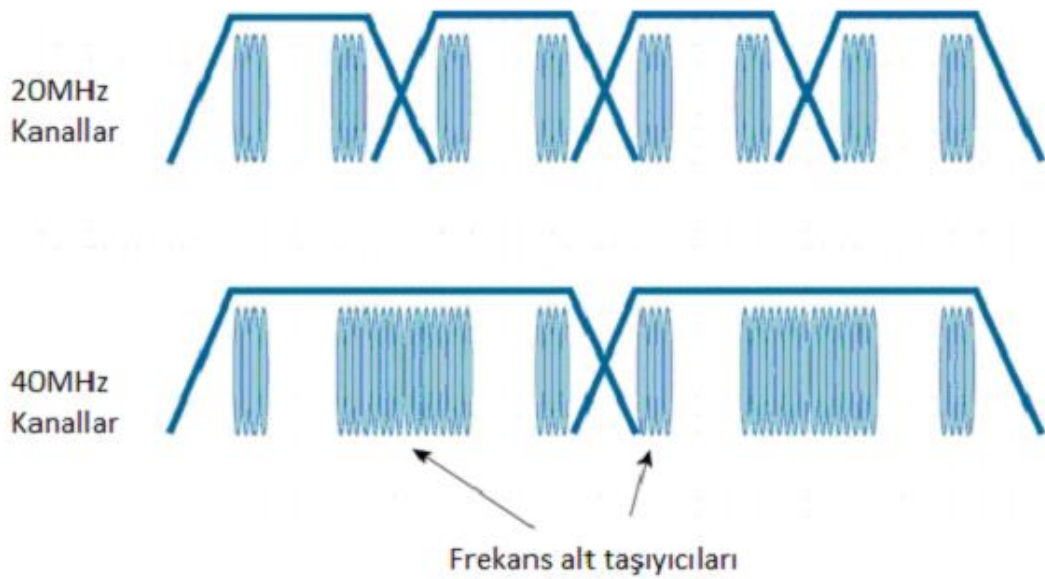
802.11n Yapılan Değişiklikler	Açıklama	802.11 a/b/g Üzerine Artış Miktarı
MIMO Kullanılması	Tek olan sinyal akım miktarı en az 2 uzaysal sinyal akımına çıkartarak veri aktarma hızı artırıldı.	100%
40 MHZ Kanal Genişliği	20 MHZ bant genişliği iki katına çıkartılarak veri aktarma hızı artırıldı.	100%
OFDM Kullanılması	48 adet olan frekans alt taşıyıcı 52 adete çıkartılarak her sinyal başına hız 65 Mbps çıkartıldı.	20%

2.9.1.1 Kanal Genişletme

802.11n standardını hızlı yapan düzenlemelerden birisi uzaysal sinyal akımının çoklanması ve kanal genişliğinin artırılmasıdır. Geleneksel IEEE 802.11b,a,g standartları hâlihazırda 20 MHz bant genişliğini kullanmaktadır. 802.11n ise hem 20 MHz hem de 40 MHz bant genişliği ve her kanal için 4 adet uzaysal sinyal akımı sunmaktadır. 5 GHz frekansında 40 MHz bant genişliğinde kullanılan 802.11n kablosuz cihazın maksimum 600 Mbps veri aktarım hızı sunacağı teorik olarak öngörülmektedir. 40 MHz'de 2 adet

uzaysal sinyal akımı kullanılmasında ise maksimum 300 Mbps veri aktarım hızına ulaşılabileceği değerlendirilmektedir.

40 MHz bant genişliği sadece 5GHz frekansında desteklenmektedir. Çünkü ISM 2.4 GHz bandının içine 40 MHz bant genişliklerini sıkıştırmak kullanım açısından efektif değildir. 20 MHz bant genişliği mevcut standartlarda zorunlu kullanılması gereken genişliktir. Ancak 802.11n standardında 40 MHz bant genişliğini kullanmak opsiyonel olarak sunulmaktadır [5].



Şekil 2.15 Fiziksel katmanda yapılan iyileştirmeler [5],[8]

802.11n teknolojisinde mevcut iki kanalı bir kanal olarak birleştirilerek 40 MHz bant genişliği sağlanmakta ancak bu belirli frekans aralığında daha az kanal, dolayısı ile daha az BSS kullanımı demektir. Bu nedenle 802.11n kablosuz cihazlarda 20 MHz zorunlu, 40 MHz seçeneği olarak kullanılabilmektedir. Şekil 2.15’de Fiziksel katmanda yapılan iyileştirmeler gösterilmiştir [5].

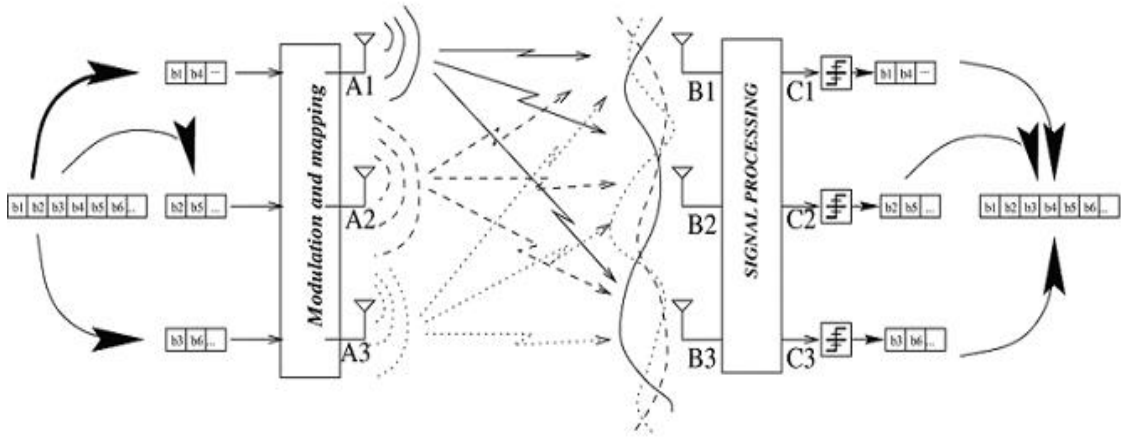
Veri aktarım hızı $R = E_s \times B_w$ ile formüle edilebilmektedir. R : veri aktarım hızı (bit per second, bps), E_s : frekans verim oranı (bit per second/hz, bps/hz.), B_w : iletişim bant genişliğini temsil etmektedir. Örneğin $E_s = 2,7 \text{ bps/Hz}$ (2.4 GHz için) $B_w = 20 \text{ MHz}$ iken $R = 54 \text{ Mbps}$ (802.11a/g) olarak hesaplanacaktır. Yine bu formüle dayanarak 40 MHz için $E_s = 3,7 \text{ Bps/Hz}$ (5GHz için), $B_w = 40 \text{ MHz}$, $R = 144 \text{ Mbps}$ sonucu elde edilecektir. Uzaysal sinyal akımının 4’e çıkartılması ile R ; $144 \times 4 = 600 \text{ Mbps}$ olacaktır [5],[33].

2.9.1.2 MIMO – OFDM Teknolojisinin Kullanımı

MIMO teknolojisi, IEEE 802.11n standardının veri iletim hızında gerçekleştirdiği artışın en önemli faktörü olarak değerlendirilebilir. Özellikle OFDM teknolojisi ile beraber kullanımı ile MIMO-OFDM sistemleri hedeflenen gigabite seviyesinde kablosuz veri iletim hızına ulaşmada etkili olmuştur.

802.11a/b/g standartlarını destekleyen kablosuz erişim noktalarında veri göndermek için bir, almak için de bir adet anten kullanılmaktaydı. 802.11n ise kanal kapasitesini artırmak için iki veya daha fazla anten kullanmaktadır. Antenlerden saçılan sinyal birbirine karışmadan bağımsız iletim yolları oluşturmakta ve böylece geniş kanal verimliliği ortaya çıkmaktadır. MIMO çalışma mantığı Şekil 2.16’da gösterilmiştir [5].

OFDM teknolojisi ile çok sayıda sinyal alt taşıyıcısı kullanılarak farklı antenlere yönlendirilen veri, burada birbirine karışmayan farklı yollarla gönderilir ve alıcıda matematiksel hesaplarla oluşturulmuş algoritma ile birleştirilerek gönderilen sinyale en yakın iz elde edilmiş olur [5].



Şekil 2.16 MIMO çalışma mantığı [5],[45]

Kablosuz ağlarda veri kaybına neden olan çoklu yol sorununun (multipath) MIMO-OFDM teknolojisi ile dezavantajdan avantaja çevrilmesi 802.11n teknolojisinin getirdiği en önemli yeniliktir.

2.9.2 MAC Katmanında Yapılan Düzenlemeler

Mac katmanında yapılan iyileştirmeler genellikle vericiden alıcıya gönderilen çerçeve içerisinde yapılan düzenlemeler ve kısaltmalardır. Önceki standartlara göre bu düzenlemelerin veri iletim hızına ne kadar fayda sağladığı Çizelge 2.5’de özetle verilmiştir [5].

Çizelge 2.5 MAC katmanında yapılan iyileştirmeler [5],[30]

802.11n Yapılan Değişiklikler	Açıklama	802.11 a/b/g Üzerine Artış Miktarı
802.11 Koruyucu Aralık Zamanın Kısaltılması	Frekans karışımını önlemek için frekanslar arası verilen koruyucu aralık süresi olan 800ns, 802.11n’de 400ns kadar düşürülmektedir. Bu da bit başına harcanan 4 μ s’ yi 3.6 μ s ye çekmektedir.	10%
Çerçeve Düzenlemesi ve Onay Paketinin Engellenmesi	A-MPDU (Aggregate MAC Protocol Data Unit/ Ortam Erişim Kontrol Protokolü Düzenlemesi) uygulaması iki kablosuz cihaz arasındaki sinyal akımı ile gönderilen çerçeve genişliğini 2.3Kb den 64 Kb’e kadar çıkarmaktadır.	100%

2.9.2.1 Çerçeve Düzenlemesi

Çerçeve düzenlemesi Media Access Control (MAC)’ ü içeren Veri Bağlantı Katmanında yapılmaktadır. 802.11n veri aktarım paketlerinde yapılacak düzenlemeler ile geleneksel kablosuz ağ standartlarından daha yüksek veri aktarım hızı elde edilmeye çalışılmıştır [5].

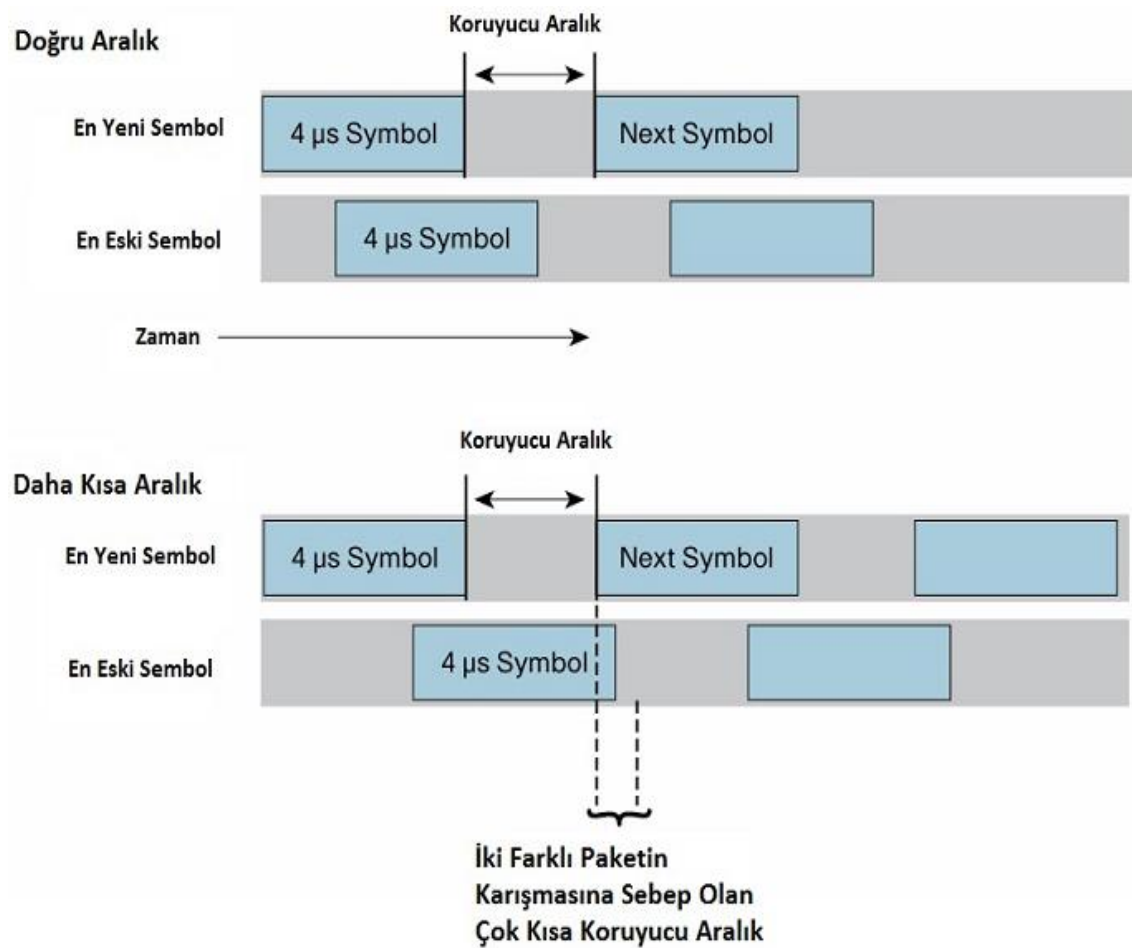
2.9.2.2 Koruyucu Aralığın (Guard Interval - GI) Düşürülmesi

Koruyucu aralık frekans karışımını asgari seviyeye indirmek için her bir OFDM işareti arasında bulunan aralıktır.

Bir verici noktasından alıcı noktasına gönderilen bir paket iki farklı yol üzerinden alıcı tarafına ulaşması durumunda, daha uzun yol kat eden eski paket henüz alıcı tarafına

sağlıklı bir şekilde ulaşmamışken, ondan daha kısa bir yol üzerinden alıcıya giden yeni paket çok yol sorununa (multipath) neden olmaktadır. Böyle bir durumun meydana gelmesi kablosuz iletişimde etkinliğin azalmasına neden olmaktadır.

Koruyucu aralık; uzun yol üzerinden gelen geç kalmış sinyal üzerindeki veri paketinin bir sonraki veri paketinden daha önce varışını sağlayan semboller arası sessiz bir zaman periyodudur. Koruyucu aralığın zamanı 800 feet'lik (244 metre) mesafe farkı için 802.11a/g' de 800ns olarak belirlenmiştir [5],[25].



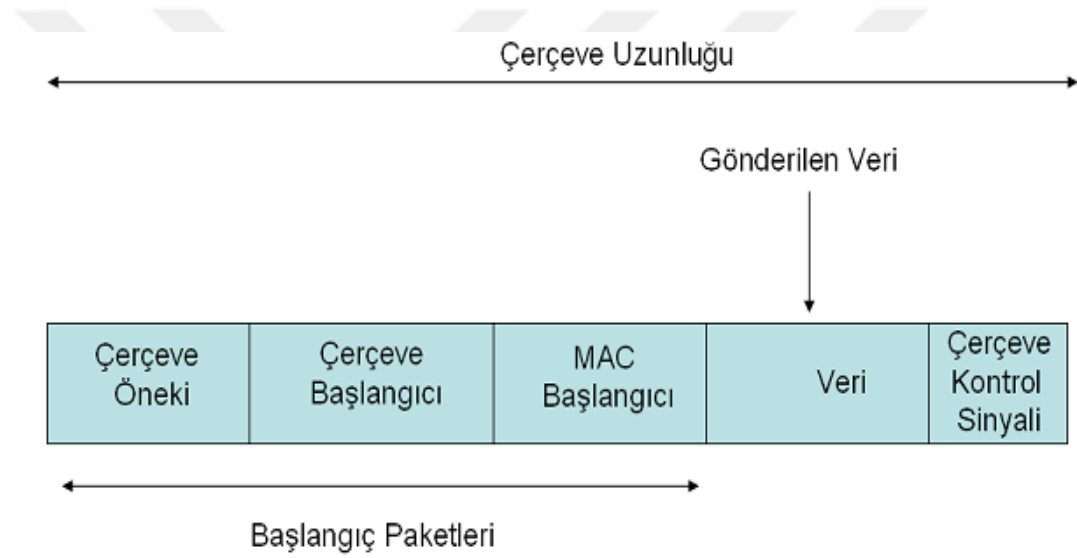
Şekil 2.17 Koruyucu aralık (Guard Interval - GI) [5],[25]

802.11n teknolojisi de 800ns koruyucu aralık kullanmaktadır. Ancak eğer gönderme ve alma istasyonu arasında 800 feet' lik bir mesafe kesin olarak yok ise, Şekil 2.17'de görüldüğü üzere 802.11n 800ns koruyucu aralığı 400ns ye indirmektedir. Bu iyileştirme, 4 μ s olan sembol gönderim süresini 3.6 μ s' ye indirmektedir [5].

2.9.2.3 Tek Çerçeve Tek Sinyal

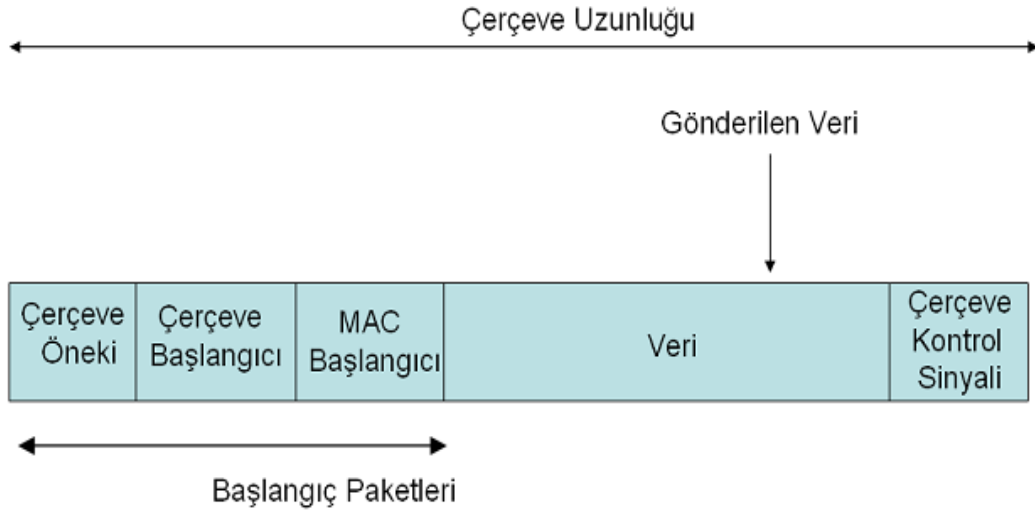
Veri aktarım hızının artırılması için yapılan iyileştirmelerden diğeri MAC katmanında çerçeve içerisinde ve onay sinyali üzerinde gerçekleştirilen düzenlemelerdir.

Bir çerçeve gönderimde gönderilen gerçek veri paketinin önüne ve arkasına birçok başlangıç ve bitiş paketleri eklenmektedir. Şekil 2.18’de görüldüğü üzere bazen başlangıç ve bitiş paketleri gerçek veri paketinden daha fazla yer kaplayabilmekte ve bu nedenle iki farklı sinyal ile ancak gönderilebilmektedir. 802.11n geliştiricileri aşırı yer kaplayan bu başlangıç paketlerinin düşürülmesi ile veri aktarım hızında önemli bir artış olacağını değerlendirerek Çerçeve Bütünleştirmesine (Frame Aggregation) gidilmiştir [5].



Şekil 2.18 Başlangıç paket alanları [5]

Aslında çerçeve bütünleştirme; birden fazla çerçevenin tek bir sinyal aracılığı gönderilmesi olup, 802.11n bu maksatla iki farklı çerçeve bütünleştirme tekniği kullanmaktadır. Mac Service Data Units (MSDU) aggregation ve Message Protocol Data Unit (MPDU) aggregation. Her iki teknikte başlangıç paketlerinin düşürülmesini sağlamak ve her bir çerçeve için tek bir sinyal kullanılmaktadır. Şekil 2.19’da çerçeve bütünleştirmesi gösterilmiştir.



Şekil 2.19 Çerçeve bütünleştirmesi [5]

Böylelikle hem fazladan zaman kaybı hem de fazla çerçeve gönderimi nedeniyle ortaya çıkan çakışmalar düşürülmüş olmaktadır. Ayrıca tek bir sinyal ile gönderilen çerçevenin uzunluğu da artırılmış olmaktadır. 802.11a/b/g standartların da 4Kb olan çerçeve uzunluğu 802.11n ile 64Kb' e kadar çıkartılmıştır [5].

2.9.2.4 Onay Paketinin Engellenmesi

IEEE 802.11n' in MAC katmanında yaptığı diğer bir düzenleme onay paketi engelleme Block Acknowledgement (Block ACK) işlemidir.

802.11n öncesi standartlarda her bir çerçevenin verici istasyonundan alıcı istasyonuna eksiksiz olarak ulaştığını kontrol eden Onay (Acknowledgment - ACK) paketi eklenmektedir. Bu paket alıcı istasyonundan verici istasyonuna paketin eksiksiz olarak alındığını bildirmek için gönderilmektedir. Eğer verici ACK paketini almaz ise, ACK paketini alana kadar aynı çerçeveyi sürekli göndermeye başlar. ACK paketi veri aktarım hızının ayarlanmasında da kullanılmaktadır. Eğer alınabilecek çerçeveden fazla gönderim yapılırsa, verici istasyonu gönderim hızını düşürmektedir. Kablolu bilgisayar ağlarında kullanılan bu metot kablosuz ağlarda da kullanılmakta ancak her bir çerçeve için onay paketinin gönderilmesi etkinlik açısından veri aktarım hızını düşürmektedir.

802.11n, eksiksiz alınan birçok çerçeve için tek bir ACK paketinin alıcıdan vericiye göndermekte ve önceki standartlarda ACK paketi için harcanan 128 byte'lık alanı dış etkenlerin durumuna bağlı olarak 8 byte'a kadar düşürmektedir [5].

2.10 802.11ac Standardı

Saniyede Gigabit (Gigabit-per-second, Gbps) veri transferi hızına ulaşan 802.11ac standardı sadece lisanssız 5 GHz frekans bandında çalıştığından girişimden daha az etkilenir. 802.11n standardı 2,4 GHz frekans bandında 20 MHz kanal bant genişliğinde birbirleriyle örtüşmeyen sadece 3 kanal kullanılırken 802.11ac standardında 20 Mhz kanal bant genişliğinde 23 kanal vardır.

Performans artışı sağlanması için kanal bant genişliği, modülasyon planı ve uzaysal akış sayısı gibi bazı seçime bağlı (opsiyonel) parametreler tanımlanmıştır. Zorunlu (mandatory) parametreler (80 MHz bant genişliği, 1 uzaysal akış, 800 nano saniye uzun koruma aralığı ve 5/6 kod oranı ile 64QAM modülasyon) kullanılan 802.11ac cihaz için veri hızı yaklaşık 293 Mbps'dir. Eğer tüm opsiyonel parametreler uygulanırsa veri hızı (160 MHz bant genişliği, 8 uzaysal akış, 400 nano saniye kısa koruma aralığı ve 5/6 kod oranı ile 256 QAM modülasyon) veri hızı 7 Gbps değerine çıkarılabilir [36],[38].

802.11ac standardı ile bugün yaygın olarak kullanılan 802.11n standardı tarafından desteklenen 20 MHz ve 40 MHz kanal bant genişliği yanında 80 MHz bant genişliğini destekler. Böylece birbirine komşu iki adet 40 MHz kanal birleştirilerek bant genişliği iki kat artırıldığında fiziksel katmanda veri hızı yaklaşık olarak iki katına çıkartılırken ($\sim 2.1x$, %117 artış) aynı zamanda sistem verimliliği de yükseltilmiş olunur. Opsiyonel olarak komşu veya komşu olmayan iki adet 80 MHz kanal birleştirilerek 160 MHz kanal bant genişliği kullanıldığında veri hızı yaklaşık olarak dört katına çıkartılırken ($4.2x$, %333 artış) hem de daha fazla kullanıcıya hizmet sunulması için önemli avantaj sağlanır [37], [38].

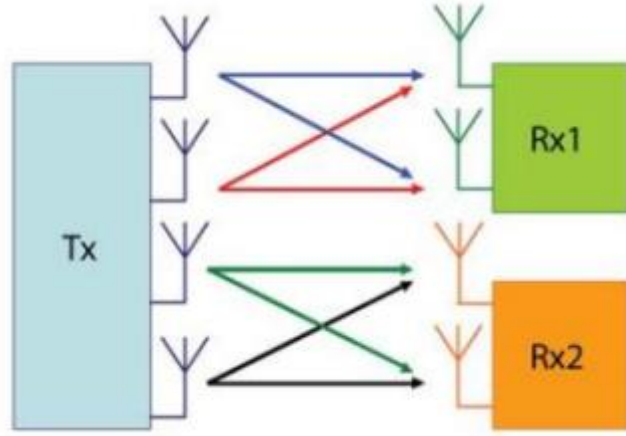
Haberleşme sistemlerinde veri hızı ve haberleşme kapasitesi artışı sağlamak için kullanılabilecek yöntemlerin başında daha yüksek dereceli modülasyon ile sembol başına taşınan bit sayısının artırılması gelir. 802.11ac standardında fiziksel katman yine OFDM tekniğine dayanır. 802.11ac standardında BPSK, QPSK, 16QAM ve 64QAM modülasyonu yanında opsiyonel olarak 80 MHz ve 160 MHz kanal bant genişliklerinde 3/4 ve 5/6 kodlama oranıyla 256 QAM modülasyonu desteklenir. 256 QAM ile 64 QAM modülasyonuna göre ($8/6=1,33$) %33 veri hızı artışı sağlanır [11]. 802.11ac

standardında kullanılan modülasyon ve kodlama planı indisi (0-9) arasında olup sadece Çizelge 2.6’da görüldüğü üzere 10 farklı plan yer almaktadır [38].

Çizelge 2.6 802.11ac modülasyon planları [38]

Plan	Modülasyon	Kod Oranı
0	BPSK	1/2
1	QPSK	1/2
2	QPSK	3/4
3	16-QAM	1/2
4	16-QAM	3/4
5	64-QAM	2/3
6	64-QAM	3/4
7	64-QAM	5/6
8	256-QAM	3/4
9	256-QAM	5/6

802.11n standardında maksimum dört uzaysal akış desteklenirken 802.11ac standardı sekize kadar uzaysal akış desteği içerir. Böylece 802.11ac standardında veri hızı iki katına (~2x, %100 artış) çıkarılır [11]. 802.11n standardında olduğu gibi 802.11ac standardı da verici huzme biçimlendirme tekniğini destekler. Bunun ötesinde 802.11ac standardında tanımlanan MU-MIMO (Multi-User MIMO) tekniği ile huzme biçimlendirme yeteneği daha ileriye taşınmıştır. Şekil 2.20’de görüldüğü gibi, bir erişim noktası uzaysal çoğullama tekniğiyle farklı yönlerdeki çok sayıda istemci ile aynı frekans spektrumunda farklı uzaysal akışlar kullanarak eş zamanlı olarak haberleşebilir. Kablosuz ağlarda spektral verimliliğin yükseltilmesi açısından MU-MIMO tekniği büyük önem taşır [38], [39].



Şekil 2.20 MU-MIMO ile veri hızı artışı

802.11ac standardı 5 GHz frekansında çalışan 802.11a ve 802.11n cihazlar ile geriye doğru uyumludur. 802.11ac standardı uyumlu bir erişim noktası servis verdiği hücre içinde haberleşme kapasitesini artırarak aynı sayıda istemciye 802.11n standardına göre kullanıcı başına daha fazla kapasite ile servis sağlar. Alternatif olarak kullanıcı başına aynı haberleşme kapasitesi ile daha fazla istemciye servis sunulabilir. Bu yetenekleri özellikle üniversite kampüsleri, konferans salonları, stadyumlar ve diğer ortak kullanıma açık alanlarda 802.11ac standardını oldukça cazip kılar [36],[38].

Çizelge 2.7 IEEE 802.11ac ve IEEE802.11n karşılaştırması

	IEEE 802.11n	IEEE 802.11ac
Kanal Band Genişliği	40 Mhz	160 Mhz
Modülasyon	64 QAM	256 QAM
Koruma Aralığı	400 ns	400 ns
MIMO	MIMO	Mu-MIMO
Uzaysal Akış	4	8
Beamforming	Var	Standart
Veri Hızı	600 Mbps	7 Gbps

2.10.1 Beamforming (Huzme Biçimlendirme)

Beamforming, anten pattern'ının hedeflenen abonelere otomatik ve gerçek zamanlı olarak yönlendirilmesidir. Beamforming, cihazlara bağlı olan wireless cihazların yönüne göre sinyal alma ve göndermedeki hassasiyet ayarı anlamına gelmektedir. Yani günümüz teknolojisinde kullanılan wireless cihazların ölü nokta ve etraftaki cihazların yayın kirliliği etkisini yok etmeye çalışmaktadır. Beamforming teknolojisine sahip cihazın antenleri, cihaza bir istemci bağlandığında, yönlü anten gibi çalışmaya başlayarak, gücünü bağlı olan cihaza odaklamaktadır ve bu da büyük bir kararlılık artışı sağlamaktadır [35].

Bu sayede;

- İhtiyaç duyulan alanda daha yüksek sinyal seviyesi
- Enterferansın azalması
- Hücre kapasitesinin artması
- Veri hızının artması
- Spectral verimliliğin artması
- Lokasyon servislerin doğruluğunun artması

Mümkün olmaktadır.

En yalın hali elektrik tiltli antenlerdir. Elektrik tiltli antenler sadece dikey düzlemde ayarlanabilirken, beamforming ile pattern, RBS tarafından otomatik olarak dikey ve yatay ekseninde hareket ettirilebilir, ayrıca pattern'ın şekli değiştirilebilir (3D beamforming). “Smart Antenna” sistemlerinin gelişmesi ve “MIMO” beamforming teknolojisi için vazgeçilmezdir. Beamforming özelliğine sahip olan antenler birçok dipol dizininden oluşur, aktif ekipmanlarda içinde bulunduğundan, boyutları büyüktür. Beamforming 802.11ac ile standartlaşmıştır [35].

2.10.2 Adaptive Transmission Power Control (ATPC)

Adaptive Transmission Power Control (Ayarlanabilir İletim Güç Kontrolü); kablosuz haberleşme sistemlerinde, alıcıdaki sinyal seviyesi değişimine göre vericinin çıkış

gücünü ayarlaması özelliğidir. Genel olarak, yüksek iletim gücü alıcıda yüksek sinyal gücü demektir. Alıcıda yüksek bir SNR oranına sahip olmak, sayısal haberleşme linkinin bit hata oranını azaltır. Kablosuz haberleşme kanallarında daha yüksek iletim gücü kullanmak sinyal zayıflamasına karşı daha fazla koruma sağlar.



DÜNYA METROLARINDAKİ KABLOSUZ AĞ UYGULAMALARI

Gelişen teknoloji ve artan güvenlik ve internet talepleri metrolarda kablosuz sistemlerin kullanımını artırmıştır. Dünya genelinde birçok metro işletmesi firma yolcularının metro istasyonlarında ve tünellerde güvenliğini artırmak için kablosuz ağ uygulamalarına başvurmuşlardır. Aynı şekilde yolcularına metro istasyonlarında ve tren içerisinde internet erişimi sağlayarak konforlu bir yolculuk sunmak istemektedirler. Bu kapsamda birçok metro hattı araştırmalar ve çalışmalar yapmaktadırlar. Yapılan bazı çalışmalar incelenerek sunulmuştur.

3.1 Moskova Metrosu

Moskova metrosu yolcuların yüksek hızlı internet taleplerine cevap verebilmek için metro hattı boyunca kablosuz iletişim ağı kurmuştur. Moskova metrosunda, 12 hat 180 istasyonu ile yaklaşık 400 km metro hattı bulunmaktadır ve günde 7 milyon yolcu taşımaktadır.

Moskova metrosu tren içerisinde yolculuk eden yolcuları için hem yüksek hızlı internet erişimi sağlamak hem de gelir elde ettikleri reklam içeriklerini yolculara ulaştırmak için araştırmalar yapmıştır. Moskova metrosunda başta Wİ-Fİ olmak üzere 3G, LTE gibi birçok kablosuz sistem test edilmiştir. Metro tünel şartlarında büyük zorlukların üstesinden gelmek zorunda kalınmıştır. Tünellerde karşılan zorluklar şunlardır;

- Dar ve kıvrımlı tünel yapısı düzensiz sinyal yayılımına ve hatların üst üste binmesine neden olmuştur.
- Sarsıntılar ve yansıtıcı metal yüzeyler.

- Görüş hattına (line of sight) engel olma.
- Komşu metro hatları aşırı etkileşime neden olmuştur.

Bu zorlukların üstesinden gelmek için 2014 yılında 430 noktaya yüksek kapasiteli baz istasyonu kurulmuştur. Trenlerin üzerine 750 tane mobil ünite monte edilmiştir. Sağlanan en yüksek net veri hızı değeri 100 Mbps. Tünel içerisinde 1 baz istasyonunu kapsama alanı maksimum 1 km olarak sağlanabilmiştir. 50 ms'nin altında hand-over süresi ile kesintisiz iletişim sağlanmıştır. Düşük gecikme değerleri ile tünel içerisinde mükemmel bir performans sağlanmıştır. Her bir metro hattında günlük 1 terabyte veri iletimi ve kesintisiz bir bağlantı imkânı sunulmuştur. Bu altyapı sayesinde yüksek hızlı internet hizmetinin yanı sıra tren içerisinde gerçek zamanlı cctv görüntülerinin alınması, yolcu bilgilendirme sistemlerine canlı bilgi gönderebilme mümkün hale gelmiştir. Yolcular yerin onlarca metre altında akıllı telefonları ve tabletleri ile maillerine ulaşabilmişler ve internet üzerinden canlı video izleme keyfini yaşamışlardır [40]. Moskova metrosu tünel içindeki uygulamalar Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 21 Moskova metrosu tünel uygulamaları [40]

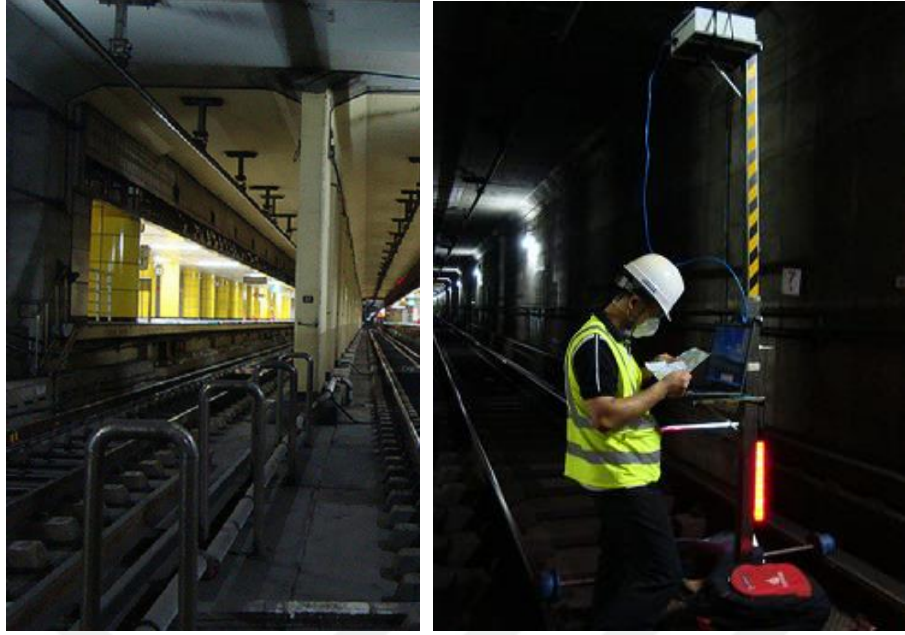
3.2 Güney Kore Metrosu

Güney Kore'de Daegu metrosunda 2003 yılında yaşanan yangında 198 kişi feci şekilde can vermiştir. Bu olay üzerine işletmeci firma, metro yolcularını ve çalışanlarını olası yangın, kaza ve hırsızlık olaylarına karşı korumak için kablosuz video izleme sistemlerini araştırmaya başlamıştır. Yıllar süren araştırmalar ve denemelerin sonunda zorlu metro çevresel şartları ve hızlı tren hareketlerinin üstesinden gelecek bir çözüm 2010 yılında

uygulanmıştır. Kablosuz altyapıda mesh network çözümü kullanılmıştır. Bu uygulama dünyada ilk gerçek zamanlı, yüksek band genişlikli, mobil kablosuz video izleme çözümü olmuştur. Kullanılan bu mesh network ekipmanları, yüksek hızlı performans gerektiren video streamlerini, istasyondan RF network için en zorlu çevre şartlarında işletilen trenlere aktarılmasını sağlamıştır.

Seul metrosunda bu sistemin kurulduğu 4 metro hattında 148 istasyon bulunmaktadır ve 201 tren ile günlük 2.037.000 yolcu taşınmaktadır.

Daegu yangınında bir kundakçı Jungangho istasyonu peronunda duran treni ateşe vermiştir. Karşı taraftan gelen tren durumdan habersiz bir şekilde perona gelmesiyle yangın diğer trene de yayılmış ve facia daha fazla büyümüştür. Bundan dolayı Seul metrosu yetkilileri istasyon video görüntülerinin istasyona yaklaşan hareket halindeki tren makinisti tarafından canlı takip edebilmesini istemişlerdir. Bu sayede istasyonda yaşanabilecek olağanüstü durumlarda ya da ray hattına düşmüş bir yolcu olması durumunda, makinist video görüntülerinden bu durumu görüp karar verebilecektir. Bu mesh sistem, saatte 80 km hızla hareket eden tren monitörüne istasyon görüntülerini aktarabilme kabiliyetine sahiptir. Sabit kablosuz altyapı boyunca kusursuz hand-over sağlamıştır. Metro tünelleri özellikle RF haberleşme açısından çok zordur çünkü metal yansıtıcı yüzeyler, gürültü, titreşim ve yüksek voltaj elektrik hatları gibi bozucu etkenler mevcuttur. Bu mesh network altyapısı sayesinde sadece istasyon görüntülerinin trene aktarılması değil aynı zamanda tren içi kameralarının kumanda merkezine aktarılması, tren içerisindeki yolculara anons ve tren monitörleri üzerinden ticari reklamların aktarılması da sağlanmıştır. Bu projede hat boyunca toplamda 1000 mesh node noktası kurulmuştur. Bu sayede istasyondaki 350 kamera ve tren içerisindeki 300 kamera, 80 km hızdaki tren ile 20 Mbps iletim kapasitesi ile haberleşebilmiştir [41]. Seul metrosu tünel uygulamaları Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 22 Seul metrosu tünelleri uygulamaları [41]

3.3 New York Metro

Newyork şehri ulaşım firması, metro içerisinde cep telefonu çekmediğinden dolayı birçok yolcu şikâyeti alıyordu. Yolcular istasyona ve tünellerde girdiklerinde yolculuk boyunca aileleri ve arkadaşları ile iletişimi kesiliyordu. Metro istasyonları gibi halka açık alanlarda ücretsiz Wi-Fi hizmeti sağlamak önemli ve zor bir girişimdir. Tüm yeraltı metro istasyonlarında bu kadar büyük kablosuz ağ kurarken birçok zorlukla karşılaşmıştır. Bu zorluklar aşağıdaki gibidir;

- Metro hattı ve istasyonlarının fiziksel büyüklüğü; Newyork metrosu fiziksel olarak oldukça büyüktür, ray hattı uzunluğu yaklaşık 1280 km ve toplamda 480 istasyona sahiptir. Yıllık ortalama yolcu sayısı 1,7 milyar kişidir. Bu büyüklükteki bir yapıda kablosuz network kurmak ciddi bir planlama gerektirmektedir. Ayrıca kablosuz ekipman kurulumları bina estetiğini bozmayacak şekilde olmalıdır. Metro istasyonlarında devamlı metal tozu vardır bundan dolayı seçilecek ekipmanlar toz geçirmez olmalıdır. Bunun yanı sıra yüksek sıcaklık değişimlerine karşı dayanıklı olmalıdır. Ayrıca istasyonlar yangın su hortumları ile yıkandığı için su geçirmez ürünler tercih edilmelidir.
- Radyo yoğunluğu kalabalık insan gurubunun hareketinden dolayı sürekli olarak değişmektedir. Yolcular devamlı olarak hareket halindedir. Oturuyorlar, trene

doğru yürüyorlar, hızlı giden tren içerisinde duruyorlar tüm bu durumlar bağlantı zorluklarına neden olmaktadır.

- Yolcular, yer üstünde evlerindeki ve ofislerindeki gibi sürekli ve yüksek kaliteli internet bağlantısı olmasını beklemektedirler.
- Metro istasyonlarında ve tünellerinde çalışma şartları oldukça zordur. Gece işletme durduktan sonra kısıtlı süre içerisinde tüneldeki ve istasyonlardaki ekipman montajları ve saha çalışmaları gerçekleştirilmelidir.

Bu zorlu yer altı şartlarının üstesinden gelebilmek için doğru WLAN ekipmanlarına ihtiyaç vardır. Hızlı ve güvenilir bağlantı, en iyi uzaktan yönetim kapasitesine sahip ürünler tercih edilmelidir. Dış ortama dayanıklı, IP67 koruma sınıfında ve dirençli WLAN ekipmanları tercih edilmiştir.

Metro istasyonlarına yolculara yüksek hızlı Wi-Fi hizmeti sunan Erişim Noktası cihazları kurulmuştur. Erişim Noktası cihazları wireless data merkezine kurulan uzaktan yönetim cihazı ile kontrol edilebilmektedir. Erişim Noktası cihazları hücrel data yüklemesini de desteklediği için gelecekte Newyork metrosu, tünellerde bile yolcularına onların hücrel servislerine benzer bağlantılar da sağlamak için bu cihazlardan istifade edebilirler [42]. Newyork metrosu örnek uygulaması Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 23 Newyork metrosu uygulaması [42]

Kullanılan Erişim Noktası cihazlarının özellikleri aşağıdaki gibidir;

- Kendine özgü bir routing mantığı vardır. Mesh Connex ve Opportunistic Radio Link Adaptation (ORLA) denilen bu routing teknikleri, istasyondaki yolcu sayısından ve

bu yolcuların hareket halinde olması, oturuyor olması yada tren içerisinde olmasından etkilenmeden devamlı en yüksek data iletimini sağlamaktadır.

- 3x3 MIMO desteklediği için belirgin olarak 300 Mbps data iletimi ile yüksek performanslı bağlantı ve daha iyi iletim kalitesi sağlamaktadır.
- Nema 4X housing ve IP67 koruma sınıfındaki cihazlar toz ve su geçirmez özelliktedir. Bu sayede istasyon temizliğinde kullanılan yangın su hortumlarından ve trenlerin metal tozlarından sistem etkilenmemektedir.
- -40 ve 70 derece arasında geniş sıcaklık değerlerinde çalışabilen cihazlar yaz kış sorunsuz bir şekilde çalışmakta, tren hareketinden dolayı meydana gelen rüzgar sirkülasyonundan ve Newyork'ta yaşanan kasırgalardan etkilenmemektedir.
- Kullanılan kontrol cihazları sayesinde Erişim Noktası cihazları uzaktan erişim sağlanabiliyor. Bu sayede QOS (quality of service), güvenlik, kolay yönetim sağlayarak üstün performans başarımı elde edilebilmektedir.
- Kontrol cihazları 10000 den fazla Erişim Noktası cihazını yönetebiliyor, izleyebiliyor ve arıza tespiti yapabilmektedir. Ayrıca sisteme yeni takılan bir cihazı otomatik olarak tarıyor ve bir tuş ile sisteme ekleyebilmektedir [42].

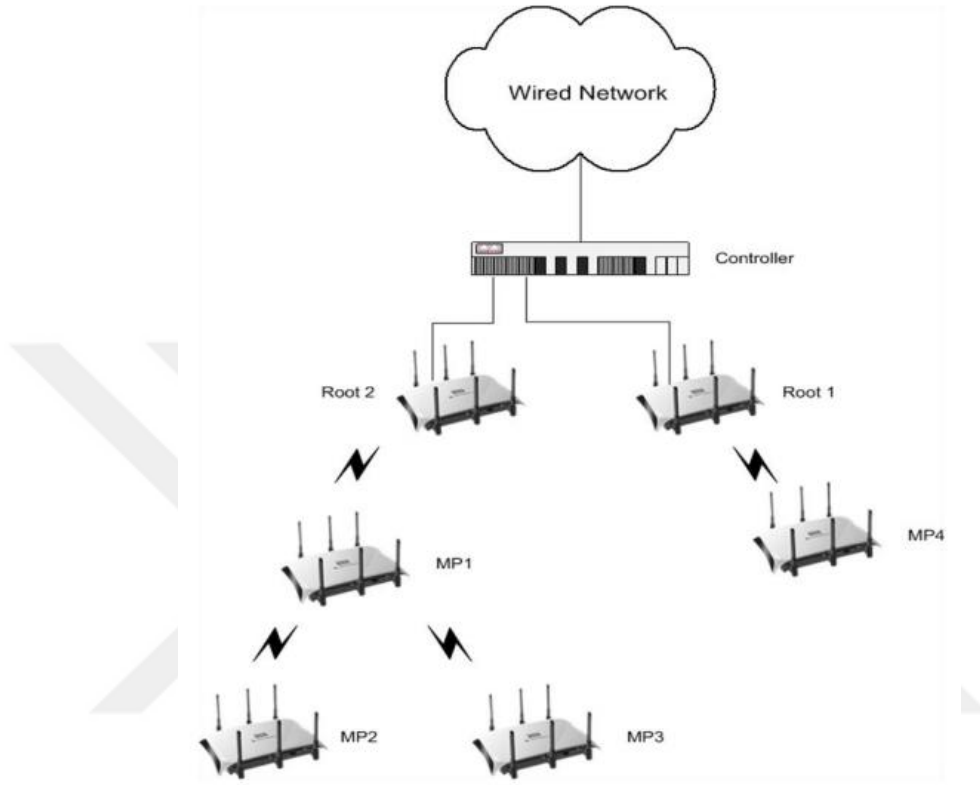
Üretici firmanın geliştirdiği meshconnex tekniği;

Kablosuz Erişim Noktası cihazları mesh yapıda olduğunda büyük avantaj sağlamaktadır. Mesh yapılar, Erişim Noktası cihazlarını sadece kullanıcılara Wi-Fi iletmek için değil aynı zamanda networkteki diğer Erişim Noktası cihazları için bir yönlendirici ve tekrarlayıcı gibi davranmasını da sağlamaktadır. Sonuç olarak kendi kendini kuran, iyileştiren kablosuz bulutlar, kurulum ve sistem mühendisliği maliyetlerini düşürmektedir.

Üreticinin geliştirdiği meshconnex adındaki yönlendirme motoru, verimli yönlendirme sağlar, düşük atlama geçişleri sağlar, düşük yönlendirme yükü, yüksek hızlı hand-over ve kanıtlanmış ölçeklenebilirlik sağlar. Meshconnex üreticinin patentli Layer2 routing teknolojisini kullanır ve bu teknoloji en iyi veri hızı bağlantısını bularak kurmaktadır.

Mesh connex yapısında bir Erişim Noktası cihazı "Access point node" olarak adlandırılır. Kablo ile networke bağlı olan node ise "root node" olarak adlandırılır. Meshconnex yazılımının fonksiyonu, bir node'dan root node'una en kısa yola ve yol boyunca paketlerin geçmesine karar vermektir. Bu yollar, iki node veya mesh noktası arasındaki

iletişime izin vermek için kullanılan bağlantılardır (link). Yollar mesconnex'te dinamik olarak oluşturulur. Root node'lara yollar, RF çevresel şartlar ve Şekil 3.4'de kullanılan cihaz topolojisinin belirlediği yol metrikleri üzerinden meshconnex algoritması tarafından seçilir [43].



Şekil 24 WING 5.2 mesh connex [43]

Opportunistic Radio Link Adaptation (ORLA) adı verilen algoritma, en iyi veri hızı sağlayan data oranını seçmek için karar veren bir anahtardır. Data oranının kabul edilebilir olup olmadığına karar vermek için lokal durumları kullanmak yerine, daha büyük veri hızı olup olmadığına karar vermek ve diğer data oranlarını proaktif bir şekilde irdelemek için ORLA tasarlanmıştır. Eğer diğer data oranları gelişen veri hızı sağlarsa, ORLA akıllı olarak seçim tablosunu en yüksek performansa ayarlar. ORLA mesh networkün client tarafında backhaul kapasitesi kadar gelişim sağlar.

Üretici firmanın geliştirdiği yazılım (WING), kontrolör ve Erişim Noktası cihazları arasında kablolu ve kablosuz tünel açmak için kullandığı birkaç farklı protokol vardır.

İlk protokol, üretici firmanın patentli yönetim ve kontrol protokolü olan Media Independent Network Transport (MINT) . Bu protokol, iki veya daha fazla WING

yazılımıyla donatılmış cihazın Layer2 trafiğini kapsüllemek (encapsulation) ve köprülemek için kullanılır.

İkinci protokol ise, IP paketlerini kimlik doğrulamasına (authentication) ve şifrelemeye (encryption) tabi tutarak IP iletişimini güvenli hale getiren bir IETF (Internet Engineering Task Force) protokolü olan IPsec protokolünü kullanarak iki WING cihazı yada bir WING cihazı ve üçüncü parti başka bir cihaz arasında IPv4 trafiğini kapsüllemek (encapsulation) için kullanılır [43].

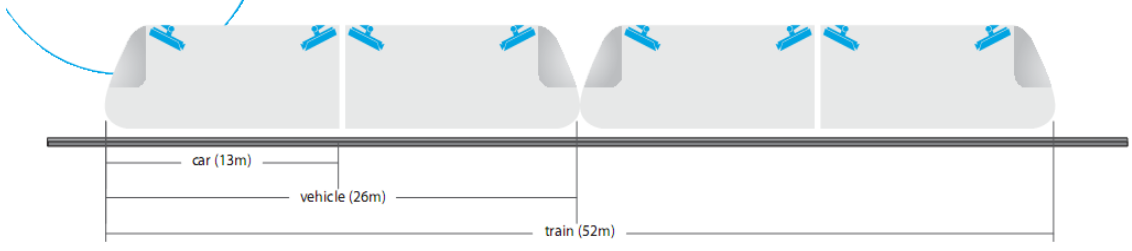
3.4 Torino Metrosu

Torino Metrosu, tamamen otomatik ve sürücüsüz bir metro hattıdır. Mevcutta 9,6 km hat rotası ve 15 istasyon ile işletilmektedir. Mevcut filosu ile en yoğun saatte 2 dakikalık headway ile günlük 80000 yolcu taşımaktadır. Yolcu artışına ayak uydurmak için güneye doğru 13,2 km ve 21 istasyonluk yeni hat çalışmaları yapılmaktadır. Şekil 3.5'te hat güzergahı gösterilmiştir. [44].



Şekil 25 Torino metrosu hat güzergahı [44]

Çift olarak birleştirilmiş olan araçların boyları 52 metredir ve saatte 80 km hız yapabilmektedirler. Maksimum 440 yolcu taşıyabilmektedir.



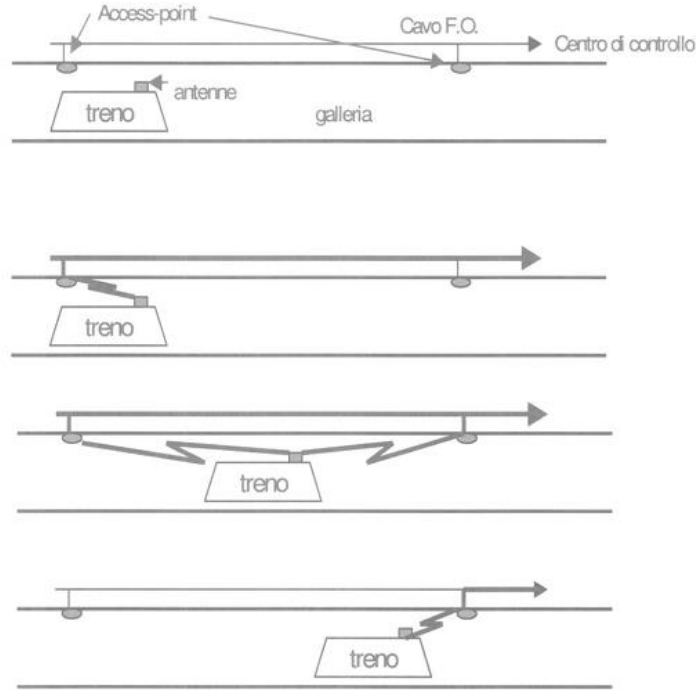
Şekil 26 Torino metrosu tren kamera yerleşimi [44]

Etkili ve fark edilen güvenliği artırmak için işletmeci firma istasyonlara, araçlara, teknik odalar ve tünellere video izleme sistemi kurma kararı almıştır. Trenlerde kurulan kamera yerleşimi Şekil 3.6'daki gibidir. Tüm sistem güvenlik kontrol merkezi odasından kontrol edilebilir durumdadır. Sistem, iki ana ihtiyacı karşılamak ve 9 farklı senaryonun üstesinden gelebilmektedir. İlk ihtiyaç, araç üzerindeki yolcuların gerçek zamanlı güvenliğini sağlamaktır. Kontrol merkezindeki operatör araç içerisinde olan olayları değerlendirebilmektedir (Yangın, kaza, alarm, panik vb.). İkinci ihtiyaç, canlı olarak görülemeyen olayların kayıtlardan izlenerek değerlendirilebilmesidir. Bu durum polisin suç hareketlerini ve vandalizm tek tek incelemesine olanak sağlamaktadır.

Araç içerisinde video izleme sistemi olmasını gerektiren senaryolar ise aşağıdaki gibidir;

- Tren içi diafon aktivasyonu, diafonun düğmesine basıldığında kontrol merkezindeki operatör tüm araç içerisinde görüntü alabildiği için haberleşmenin başladığı andan itibaren görüntü alabilmektedir.
- Acil durum freni çekildiğinde, yangın alarmı geldiğinde, operatör araç içerisinde ne olduğunu kameralardan görerek müdahale edebilmektedir. Birden fazla araçta yangın çıkması durumunda, operatör araçların aynı tünelde olup olmadığını kontrol ederek önlem alınabilmektedir.
- Tren tünelde durduğunda veya birden çok tren tünelde kaldığında, operatör yolcuların panik olmasını engelleyecek önlemler alarak gerekli yönlendirmeler yapılabilmektedir.
- Tren park alanına giderken araç içerisinde yanlışlıkla kalan ya da suç işlemek için araç içerisinde kalan yolcu var ise kontrol merkezi tarafından görülebilmektedir.
- Şüpheli davranışlar, operatör tarafından hem gerçek zamanlı olarak hem de kayıttan izleyerek önlemler alınabilmektedir.

Tüm bu ihtiyaçları karşılamak için kamu ihalesi yapılmıştır. İhale belirli özellikleri karşılayabilen tüm firmalara açık olmuştur. Bu özellikler; Tünel içerisinde 80 km hızla giden trenden kontrol merkezine hiçbir kesinti olmadan görüntü aktarabilen, bir sonraki erişim noktasına bağlanabilen ve IEEE wireless protokol standartlarından birini kullanan ürünleri kapsamaktadır. Trenin tünel içerisinde Erişim Noktası cihazları ile etkileşimi Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 27 Torino metrosu tren tünel davranışları [44]

Dört firma bu özellikleri karşılayabiliyordu ve bunların arasından bir tanesi ihaleyi kazanmıştır.

Torino metrosu video izleme sisteminde toplamda 534 kamera bulunmaktadır.

- İstasyonlarda ortalama 24 adet sabit kamara bulunmaktadır. Görüntüler dijital olarak kodlanarak Mpeg4 formatında istasyon içerisinde kaydedilmektedir. Ip/Ethernet olarak fiber optik omurga üzerinden merkeze iletilmektedir. Görüntüler istasyonda 7/24 olarak 7 gün boyunca kaydedilmektedir.
- Trenlerde her bir vagonunda 4 adet sabit kamera bulunmaktadır. Dijital olarak kodlanarak Mpeg4 formatında tren içerisinde kaydedilmektedir. IEEE 802.11g protokolü ile gerçek zamanlı olarak kontrol merkezine iletilmektedir. Tren

içerisinde 2 günlük kayıt tutulmaktadır. Aynı zaman kontrol merkezinde izlenen görüntü de 7 gün boyunca kaydedilmektedir.

- Tünel içerisinde de yaklaşık olarak 70 adet hareketli kamera bulunmaktadır ve kablo ile aynı yakın istasyona gelerek aynı şekilde video izleme sistemine dâhil olmaktadır.

Her bir trende ve istasyondaki kameralarda 4CIF çözünürlük kullanılmıştır. Trenlerde toplam 16 video akışının kablosuz olarak canlı aktarılabilmesi için 6fps (saniyede 6 çerçeve) video akışı ayarlanmıştır. Tüm video akışı IP/Ethernet olarak fiber optik ring üzerinden kontrol merkezine aktarılmakta ve orada bulunan monitörlerce izlenmektedir.

Network omurgası çift yedekli ve 10 gbps fiber optik ring olarak Spaning tree prokolü ile oluşturulmuştur. Routing işlemleri için OSPF protokolü, multicast routing için ise PIM protokolü kullanılmıştır.

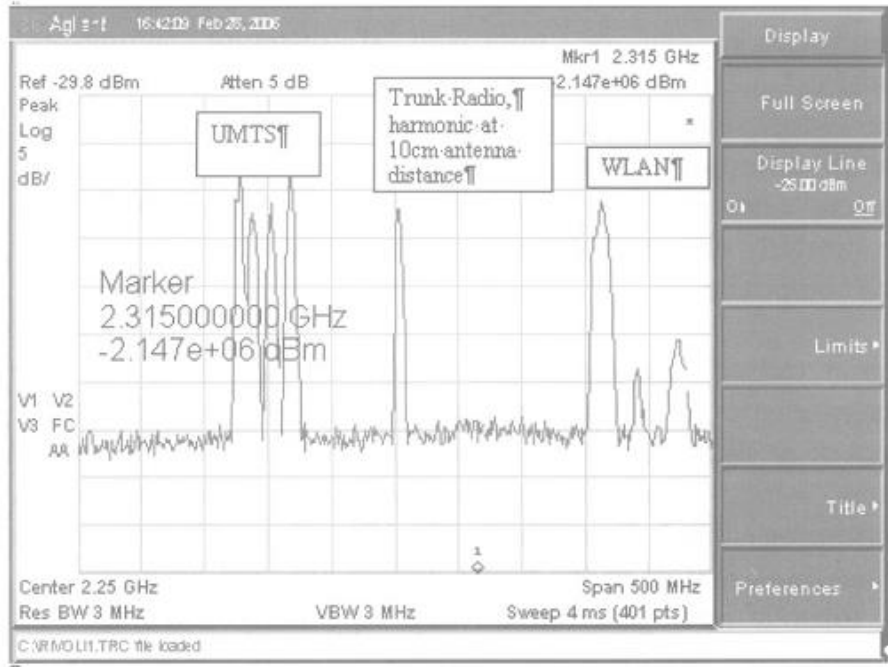
Çözülen Problemler;

Video izleme sisteminin uygulanması sırasında yaşanan en büyük problem, tren görüntülerinin kontrol merkezine kablosuz olarak aktarılması olmuştur. İhale sırasında, IP paketlerini yüksek veri hızı, yüksek band genişliği ve düşük gecikme ile taşıyabilen, hızlı hareket kabiliyetini en iyi kullanan bir kablosuz iletim protokol standardı yoktu. Bu gereklilikler, bir video izleme sistemi olarak gerçek zamanlı video akışı tarafından üretilen trafik çeşidinden gelmektedir. Kablosuz protokol olarak IEEE 802.11g protokolüne karar verilmiştir. IEEE 802.11g protokolü hızlı hareketlilik (fast mobility) için oluşturulmamıştı ama diğer gerekli özelliklere sahipti.

IEEE 802.11g protokolü hızlı roaming ve hand-over algoritmalarına sahip olmadığından dolayı daha yüksek seviye hand-over çözümü uygulamaya karar verilmiştir. Bu protokol 13 frekans bandından sadece 3 tanesinin kullanılmasına izin veriyordu, bundan dolayı araç üstü iletim ekipmanları kullanılarak her 0,5s’de bu frekansları tarayarak daha iyi radyo sinyali bulmaya çalışılmaktadır. Mevcut radyo sinyali -70dbm değerinin altına düştüğünde diğer erişim noktasına hand-over yapacak şekilde sistem ayarlandı. Bu çözüm oldukça iyi sonuçlar vermiştir ancak optimum çözüm değildi. Çapı 6,8 metre olan Tünelin şekli, tren hareketi bir birleriyle karşılaşan trenler tüneli tamamen

dolduruyor ve bu durumda öngörülemeyen yansımalar ve elektromanyetik dalgaların yansımalarına neden oluyordu. Bunların yanı sıra yaşanan bir diğer sorunda, iki erişim noktası arasındaki mesafe ortalama 300 metreydi ancak bazen tren üstü ekipmanı 2 km ötedeki erişim noktasına bağlanıyordu. Tüm bu sorunlar yazılımda erişim noktalarının tüneldeki konumlarına işaret konularak çözülmüştür böylece en yakın bir sonraki erişim noktası hand-over için değerlendirilecek duruma gelmiştir.

Karşılaşılan bir diğer sorun ise civardaki UMTS kapsama antenlerinin etkisiydi. Hem metraj olarak hem de frekans olarak problem oluşturmuştur [44]. UMTS frekansı ile kablosuz ağ (WLAN) frekansının etkileşimi Şekil 3.8’de analizör ölçüm sonucunda gösterilmiştir.



Şekil 28 Torino metrosu 2,4 Ghz spektrum analizör sonuçları

Bu sorun her bir erişim noktasına çok kesin ve doğru iletim gücü tanımlanarak çözülmüştür. Sonuç olarak, Torino metrosu kurulan bu sistem ile modüler ve genişleyebilen bir sisteme kavuşmuştur. Yakın gelecekte 4 kat büyümesi planlanan Torino metrosu bu sistem sayesinde sorunsuz bir şekilde büyümesini gerçekleştirebilir duruma gelmiştir [44].

3.5 Tren Yer Haberleşmesi Gereklilikleri

Video trafik, ses verisi, yolcu bilgilendirme sistemi gibi verilerin tren ile yer arasında aktarılması için talepler çok fazla artmaktadır. Bu talepleri karşılayabilmek için bazı haberleşme gerekliliklerinin yerine karşılanması gerekmektedir.

Düşük Hand-over Süresi: Tren hat boyunca hızlı bir şekilde ilerlese bile tren ile yer arasında bağlantının sürekli sağlam kalması gerekir. Bu durum şu anlama gelmektedir; tren hat boyunca hızlı bir şekilde ilerlerken tren üzerindeki kablosuz cihaz bir sonraki Erişim Noktasına çabucak bağlantı kurmalıdır. Eğer hand-over süresi çok uzun olursa veri trafiği kesilir. Kısa ağ kesintileri bile ağ akışının sürekliliğini riske atar ve görüntüde donma, seste gecikmeler gibi istenmeyen durumların oluşmasına neden olur. Kısaca söylemek gerekirse, pürüzsüz ve kesintisiz video ve ses iletimi için çok kısa hand-over sürelerine ihtiyaç bulunmaktadır.

Düşük Gecikme: Gözetim ve denetim uygulamaları söz konusu olduğunda, kumanda merkezindeki tren operatörünün tren ile ilgili doğru ve güncel bilgileri alması için verilerin zamanında ulaşması çok önemlidir. Gerçek zamanlı durum takipleri ve kritik sistemlerin desteğinin sağlamak için tren yer haberleşmesinde çok düşük gecikmeler olmak zorundadır.

Yüksek Veri hızı: Çok sistem çok veri trafiği demektir, video, kontrol ve multimedya verileri tren ile yer arasında muazzam bir veri trafiğine neden olmaktadır. Tren ile yer arasında tren yer haberleşmesinin veri hızı değeri yüksek çözünürlüklü, yüksek iletim oranlı video trafiğini karşılaması gerekmektedir.

Kablosuz Ağ Güvenliği: Tren yer haberleşmesinde tren işletmesi için hayati veriler taşınmaktadır bu yüzden kötü niyetli girişimlere karşı güvenli olması gerekmektedir. Veri trafiğinin yetkisiz bir şekilde manipüle edilmemesi için güncel güvenlik protokollerinin mutlaka uygulanması gerekmektedir.

Veri Trafiği Önceliklendirme: Aynı haberleşme hattı üzerinden birden çok veri taşındığında, önemli ve zaman hassasiyetli verilerin önceliklendirilmesi ve asla riske edilmemesi gerekir. Bu yüzden Tren yer haberleşme sistemi, birden çok uygulamayı destekleyen QOS özelliğine sahip olmalıdır [48]. Kumanda merkezine aktarılan örnek kamera görüntüsü Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 29 Kumanda merkezine aktarılmış tren görüntüleri [48]

3.6 Uygulamada Karşılaşılan Zorluklar

Tren yer haberleşmesi gerekliliklerini teorik olarak bile sağlamaya çalışmanın birçok zorluğu vardır. Gerçek ortamda, hatta tren işletmesi altında tren yer haberleşmesini uygulamak çok daha zordur ve yüksek performans gerektirir. Demiryolu tren işletmesinde aşağıdaki zorluklar karşılaşılr;

Yüksek Hızlı İşletme: Tren hat üzerinde 80 km/saat hızla ilerlemektedir. Tren yer haberleşme ağı, tren bu hızlarda ilerlerken hand-over esnasında kesintisiz bir sağlamak ve bunu korumak zorundadır.

Kablosuz Girişimler: Metroda istasyonlarda ve tünellerde telsiz sistemi, GSM, CBTC sistemi gibi birçok kablosuz yayan yapan cihaz vardır. Bu ve benzeri yayı yapan cihazlara rağmen tren yer haberleşme cihazları kusursuz bir işletme sağlamalıdır.

Tren Titreşimi: Hızlı hareket eden ve sürekli titreşim olan trende stabil bir platformdan uzaktır. Tren üzerine konulan tüm cihazlar tren hareket halindeyken bile çalışır durumda kalmalıdır. Titreşim ve ani şoklar tren üzerindeki cihazın performansını bozmamalıdır.

Çevresel Etkilere Maruz Kalma: Hat boyunca kurulan cihazlar tünel içerisindeki çevresel şartlardan etkilenmektedirler. Tünel içerisinde aşırı nem, demir tozu bulunmaktadır ve

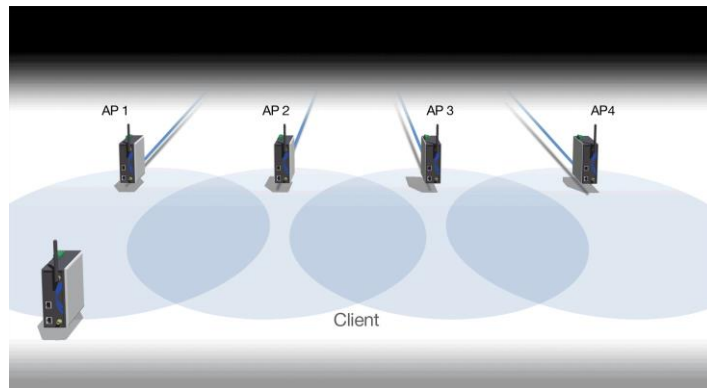
aşırı sıcak, aşırı soğuk ortamlar oluşmaktadır. Özellikle erişim noktası cihazları bu şartlar altında kesintisiz ve sorunsuz bir şekilde çalışmalıdır.

Ağ Kapsaması: Demiryolu hattının coğrafi kapsamı düşünüldüğünde tüm hat boyunca tren yer haberleşmesi ağı için kapsama sağlanmalıdır. Erişim noktası cihazları çeşitli durum ve konumlara göre konulmalıdır, bunun için kapsamlı bir saha keşif çalışması yapılarak network kapsama planı oluşturulmalıdır. Saha keşif çalışmasının kalitesi önemlidir, Erişim noktası cihazlarının kurulacağı yerin wireless enterferanslardan etkilenmeyecek şekilde belirlenmesi ve kullanılacak anten tipilerinin iyi seçilmesi önemlidir [48].

3.7 Hand-Over (Devretme) Süreci

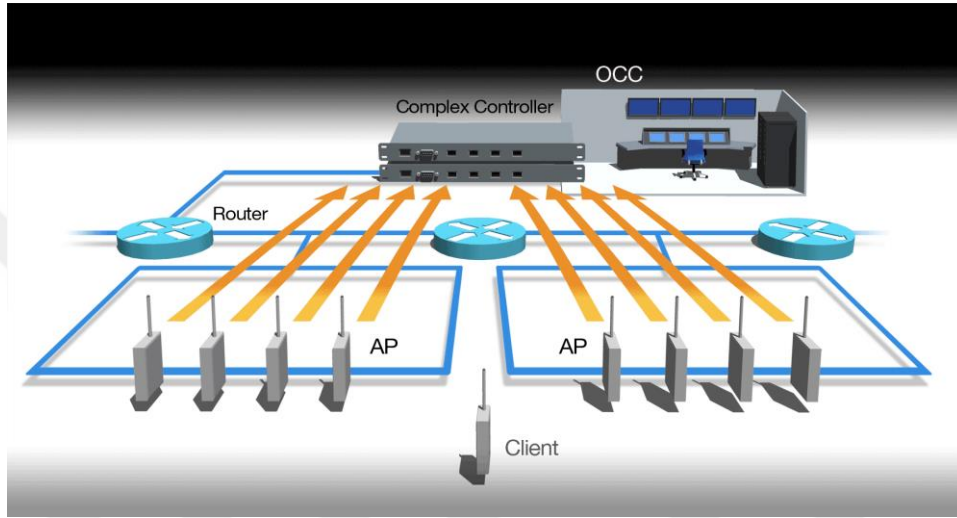
Tren-yer haberleşmesinde, tren hızlı bir şekilde hareket ettiği için sık bir şekilde hand-over gerçekleşmektedir. Bu hand-over işleminin süresi haberleşmenin kalitesini belirlemektedir. Bundan dolayı hand-over sürecine büyük önem verilmektedir.

Normal bir hand-over sürecinde; Şekil 3.10'da görüldüğü gibi client cihazı bir Erişim Noktası cihazına bağlı kaldığı süre boyunca herhangi bir tarama yapmaz ve o Erişim Noktasına mümkün olduğu kadar bağlı kalmaya çalışır. Sinyal seviyesi iyice düşüp bağlantı koptuktan sonra client yeniden ortamdaki sinyalleri tarar ve en yüksek sinyali aldığı Erişim Noktası cihazına bağlanır. Yeniden bağlanma sırasında tüm kimlik denetimi (authentication) süreci baştan yapılır. Tüm bu işlemler nedeniyle yeniden bağlanma süreleri 350ms'nin üzerinde olmaktadır.



Şekil 30 Normal hand-over süreci

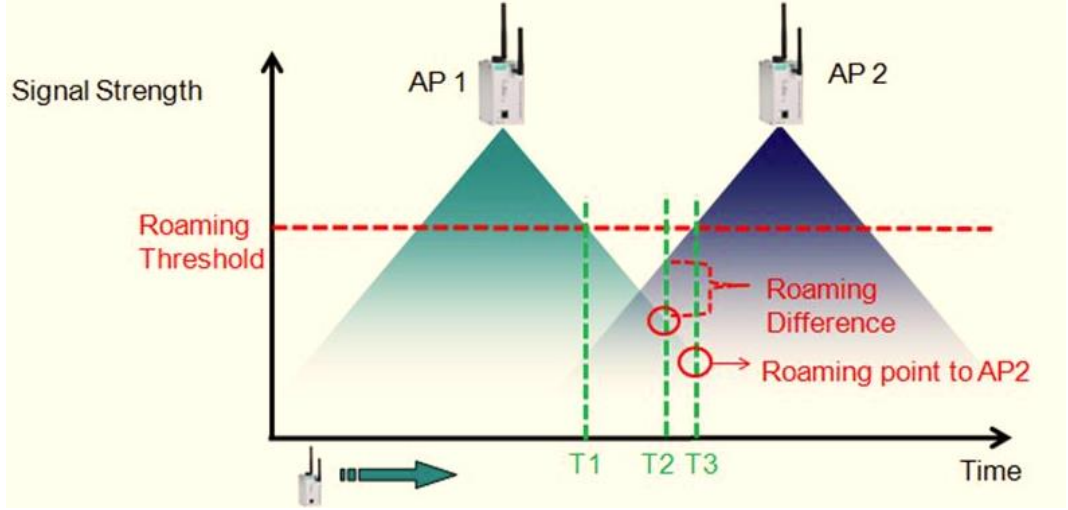
Kablosuz kontrolör cihazı; Tren-yer haberleşmesinde kullanılan Erişim Noktası cihazlarının denetimini, kontrolünü ve hand-over parametrelerini yönetimini yapan cihazlardır. Geleneksel kompleks kontrolör sistemlerinde tüm trafik kontrolör üzerinden geçer. Şekil 3.11’de görüldüğü üzere kontrolör üzerinde çok yüksek veri trafiği olacağı için dar boğaz oluşabilir ve daha az Erişim Noktasını daha yüksek gecikmelerle yönetebilir. Kontrolör üzerine çok fazla yük bindiği için maliyetleri de çok yüksektir. Ayrıca hand-over gecikmeleri 100ms üzerindedir.



Şekil 311 Geleneksel kontrolör sistemleri

Client bazlı hand-over çözümünde, client’a girilen parametrelere göre ne zaman hand-over edeceğine karar verir. Client üzerinde tanımlanan önemli 2 parametre bulunur; Roaming Threshold ve Roaming Difference.

Şekil 3.12’de “Hand-over” süreci görsel olarak açıklanmıştır. Roaming Threshold, client’ın hangi sinyal seviyesi altına düştüğünde arka planda yeni Erişim Noktası cihazı aramaya başlayacağını belirtir. Roaming Difference, arama başladıktan sonra mevcut bağlı Erişim Noktası cihazı sinyalinden offset değeri kadar yüksek güçte yeni bir sinyal bulunduğunda geçiş yapılacağını belirtir. Bu değer daha önceden belirlenir ve yeni sinyal, eski sinyalden offset değeri kadar büyük olduğunda hand-over yapılır. 3 ayrı kanal arasında hand-over yapılabilir. Hand-over süresi 200ms altındadır.



Şekil 32 Hand-over işlemi

T1: Client bağlanmak üzere yeni bir Erişim Noktası cihazı aramaya başlar (background scan).

T2: Hand-over koşullarını sağlayan yeni bir Erişim Noktası bulunduğunda hand-over süreci başlar.

T3: Bu noktada client başarıyla AP1'den AP2'ye geçmiştir.

Kontrolör bazlı hand-over çözümünde, data trafiği kontrolör üzerinden geçmez. Sadece şifre paylaşım trafiği merkezden iletilir. Client cihazı, bir Erişim Noktası cihazına bağlandığında kimlik denetimi (authentication) anahtarı kontrolör üzerinden tüm Erişim Noktası cihazlarına iletilir ve hand-over sırasında tekrar anahtar paylaşımına gerek kalmaz. Bu sayede client cihazı hat boyunca ilerlediğinde her Erişim Noktası cihazında tekrar anahtar paylaşımı olmaz ve bu sayede hızlı bir şekilde hand-over gerçekleşir.

Hand-over süresi 50 ms altındadır. 3 ayrı kanal arasında hand-over yapılabilir. Kompleks kontrolör veya sadece Erişim Noktası cihazı içeren çözümlere göre maliyet açısından daha efektif bir çözümdür. Tren hızının 120 km/s ve üzerinde olduğu durumlarda bile çalışır.

FÜNİKÜLER HATTI TREN-YER HABERLEŞMESİ BAŞARIMI

Ülkemizde yeraltı ulaşım sistemleri hızla yaygınlaşmakta, yolcu sayıları ve yolculuk süreleri de aynı oranda artmaktadır. Kaçınılmaz olarak güvenlik ihtiyaçları da bu gelişmelere paralel olarak artmıştır. İstasyonlarda alınan güvenlik önlemlerinin yanı sıra trenlerde de önlemler almak elzem hale gelmiştir. Tren içerisini canlı olarak izleyebilmek, tren içerisindeki yolcular ile konuşabilmek ve tren alarm bilgilerini anlık olarak alabilmek yolcu güvenliğini artırmakta ve acil durum yönetimini kolaylaştırmaktadır.

Kablosuz haberleşme sistemleri teknolojisi hızla gelişmektedir. Firmalar ulaşım sistemleri için özel çözümler üretmektedirler. Ulaşım sistemleri için geliştirilen ürünler standart Wi-Fi ürünlerden farklı olarak tasarlanmakta ve ulaşım sistemlerinin ihtiyaçlarına hitap etmektedir. Özellikle trenlerin hızlı hareket etmelerinden dolayı oluşacak sorunlara çözümler üretilmiştir. Tünel içerisindeki ulaşım sistemlerinde ise tren hareketinin yanı sıra tünel şartlarında oluşacak sinyal bozulması ve kapsama problemlerini gidermek için iyileştirmeler yapılmıştır.

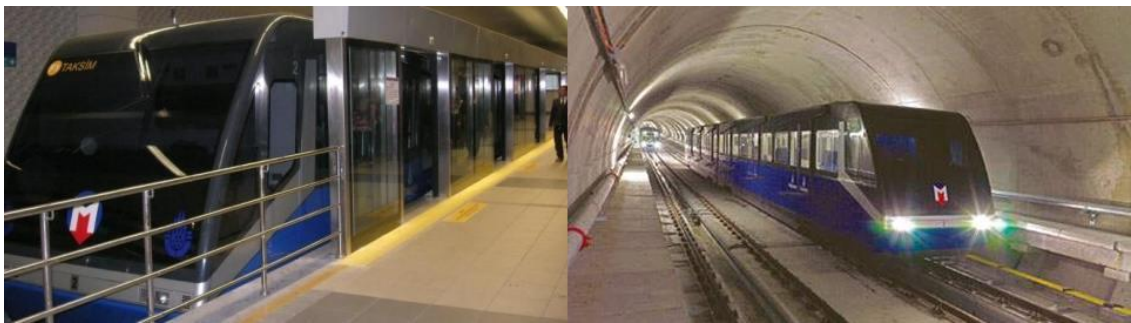
Füniküler araçları sürücüsüz olarak işletilmektedir. Bundan dolayı araç içerisinde izlenmesi ve takip edilmesi yolcu güvenliği ve acil durum yönetimi için büyük önem arz etmektedir. Füniküler tünel yapısı kablosuz haberleşme için zorlu çevresel şartlara sahiptir bundan dolayı sistem tasarımına büyük önem verilmiştir ve uygulamada zorluklar ile karşılaşmıştır.

Proje boyunca yapılan çalışmalar, karşılaşılan sorunlar ve geliştirilen çözümler sonraki bölümlerde detaylı olarak anlatılmıştır. Yapılan testlerin sonuçları değerlendirilmiş, şekiller ve grafikler ile ortaya konmuştur.

Gerçekleştirilen bu proje ile Türkiye’de ilk defa yer altında tren ile yer arasında kablosuz haberleşme altyapısı kurularak çalışır hale getirilmiş ve işletme altında kullanıma sunulmuştur. Bu proje ile tren içi kamera görüntüleri, kontrol merkezinden canlı ve kesintisiz bir şekilde izlenebilir duruma gelmiştir. Bu proje bundan sonra yapılacak benzer çalışmalara yol gösterecektir.

4.1 Taksim - Kabataş Füniküler Hattı

Taksim - Kabataş Füniküler hattı (F1) ; Taksim ve Kabataş bölgeleri arasında 2 funiküler treni ile sürücüsüz olarak çalışmakta olan bir yer altı raylı sistem hattıdır. Toplam 640 metre hat uzunluğu vardır ve 2 istasyondan oluşmaktadır. Günlük ortalama 35000 yolcu taşımaktadır. F1 hattında, standart funiküler sistemlerinde olduğu gibi çekme halatlarıyla birbirine bağlanmış iki tren karşılıklı çalışmaktadır. Taksim istasyonunda yer alan ve elektrikli motorla çalışan bir makara yardımı ile çekme halatı trenleri çekmektedir. Araçlar birbirine halatla bağlı olduğu için trenlerin hareketleri eşzamanlıdır. Yani bir istasyondan tren kalktığında diğer istasyondaki tren de hareket etmektedir. Tünel orta noktasında trenler yan yana gelmektedir.



Şekil 331 Taksim-Kabataş funiküler hattı

Tamamı tünel içerisinde hareket eden bu araçlarda sürücü veya herhangi bir görevli bulunmamaktadır. Bu yüzden araç içi kamera görüntülerinin anlık olarak kontrol merkezinden izlenebilmesi önemlidir. Bu ihtiyacın karşılanabilmesi için funiküler tüneli

boyunca tren-yer haberleşme sisteminin kurulması kararlaştırılmış ve proje çalışmaları başlatılmıştır.

4.2 Proje Detayları

Proje çalışmalarına, öncelikli olarak kablosuz tren - yer haberleşme sistemleri ve hareketli kablosuz haberleşme teknolojileri araştırılarak bu alanda çalışan üreticiler ile görüşülerek başlanmıştır. Füniküler araç görüntülerinin aktarılması için ihtiyaç olan teknik özellikler belirlenmiş ve bu özelliklerin hangi teknoloji ve hangi ürünler ile karşılanabileceği araştırılmıştır.

Kullanılacak ürün seçilirken; ürünlerin sunduğu veri hızları, hand-over (devretme) süreleri ve fiyatları önemli kıyaslama özellikleri olarak değerlendirilmiştir.

Proje detayları ve teknik özellikler belirlenirken işletme ve güvenlik ihtiyaçları göz önünde bulundurulmuştur. Bunlardan en önemlisi kameralardır. Kamera görüntülerinin aktarılabilmesi için gerekli minimum band genişliği hesaplanmıştır. Füniküler trenlerinin her birinde 14 adet kamera görüntüsü olmak üzere toplam 28 adet kamera görüntüsünün kontrol merkezine aktarılması planlanmıştır. Her bir kamera HD (720p) çözünürlükte ortalama 1 Mbps veri iletmektedir. Bundan dolayı en az 30 Mbps upload veri hızına ihtiyaç olduğu anlaşılmıştır. Bir diğer dikkat edilmesi gereken nokta hand-over süresidir. Kamera görüntüleri 25 fps (saniyede 25 çerçeve) olarak izlenmektedir. Yani bir resim çerçevesi 40 ms de iletilmektedir. İnsan gözü, yoğun hareketliliğin yaşanmadığı canlı bir kamera görüntüsünde, saniyede kayıp 5 resim çerçevesini fark edememektedir. Proje maliyetinin yüksek olmaması için tüm bu hesaplamalar ile birlikte tren içerisinde yaşanacak düşük hareketlilik de dikkate alınarak saniyede 5 resim çerçevesi kaybı kabul edilebilir görülmüştür. Kablosuz haberleşme ürünlerinde hand-over süreleri 200ms, 50ms, 20ms ve 5ms kategorilerinde sunulmaktadır. Proje maliyeti de dikkate alınarak hand-over süresinin 200 ms olmasının yeterli olacağına karar verilmiştir.

4.2.1 Değerlendirilen Çözümler

Proje sürecinde birçok teknoloji ve çözüm araştırılmış, dünya metrolarındaki örnek uygulamalar incelenmiştir.

İncelenen çözümlerde her firmanın kendini bir adım öne çıkartacak bir iyileştirmeyi uyguladığı görülmüştür. Hand-over (devretme) süreçlerini yönetmek için geliştirilmiş kontrolör cihazları kullanıldığı gözlemlenmiştir. Tren-yer haberleşmesinde hareket halindeki tren çok sık hand-over yapmakta ve bu hand-over sürelerinin az olması gerekmektedir. Bu şartların sağlanması için tüm Erişim Noktası cihazlarını yöneten, kontrol eden ve hand-over parametrelerini belirleyen kablosuz kontrolör cihazları kullanılmıştır.

Proje çalışmaları kapsamında araştırılan ve değerlendirilen çözümler aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Radwin markasının çözümünde, 2 adet Erişim Noktası cihazı kullanarak 90 Mb/s veri hızı ve 50 ms hand-over süresi sağladığı Fünikülerde yapılan testlerde görülmüştür. Tren yer haberleşmesi için özel olarak geliştirdiği teknoloji ile yüksek band genişliği, düşük hand-over süresi ve geniş kapsama alanı sağlamaktadır. Beamforming teknolojisi kullanarak, anten yayınlarını haberleşme sağladığı trene özel yayın yapıyor gibi yönlendirmektedir. ATPC (Adaptive Transmission Power Control) tekniği ile tren antene yaklaştığında anten gücünü azaltmakta, uzaklaştıkça gücünü artırarak anten yakınında oluşan kapsama problemlerini çözmektedirler. Moskova metrosunda sistem başarılı bir şekilde uygulanmıştır ve işletme altında yolculara hizmet vermektedir.

Fluidmesh markasının çözümünde 180 km hızda bile paket kaybı olmadan 5 ms'nin altında hand-over işlemi gerçekleştirmektedir. Bu sistem ile Fünikülerde test yapılmamıştır. Geliştirdikleri MPLS tabanlı transmisyon protokolü ile standart protokollerin limitlerini aşarak güvenilirliği yüksek bir kablosuz ağ altyapısı sunmaktadır. Yenilikçi bu transmisyon protokolü, trafik optimizasyon algoritması tabanlıdır. Bu protokol, her Erişim Noktası cihazına, her paket iletiminde belirli bir öncelik ve güvenilirlik atamasına izin verir. Roma metrosunda sistem başarılı bir şekilde uygulanmıştır ve işletme altında kullanılmaktadır.

Firetide markasının çözümü mesh network tabanlıdır. Erişim Noktası cihazlarının hand-over geçişlerini yönetmek için kontrolör cihazı kullanır. 6 adet Erişim Noktası cihazı

kullanarak 80 Mb/s veri hızı ve 20ms hand-over süresinde iletişim sağladığı Fünikülerde yapılan testlerde görülmüştür. Geliştirdikleri dağıtılmış ethernet anahtarlama yöntemi ile standart L3 routing yöntemleri kullanan Wi-Fi çözümlerine göre emniyet, performans ve güvenilirlik önemli ölçüde artırılmıştır. Seul metrosunda işletme altında başarılı bir şekilde uygulanmıştır ve sistem çalışmaktadır.

Moxa markasının çözümünde, hem kontrolör cihazı ile hem de Erişim Noktası tabanlı bir hand-over yönetimi sağlanmaktadır. 3 adet Erişim Noktası cihazı kullanarak 60 Mb/s veri hızı sağladığını göstermiştir. Proje maliyeti dikkate alınarak kontrolör cihazı tercih edilmemiştir. Hand-over yönetimini ve kararlarını Erişim Noktası cihazları vermektedir. Bundan dolayı 200 ms civarında hand-over gerçekleşmiştir. Sistem Kopenhag metrosu ve Polonya metrosunda kurulmuş ve işletme altında çalışmaktadır.

Çizelge 4.1’de teknik özellikleri ve performansları değerlendirilen çözümler karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.1 Çözümlerin karşılaştırılması

Ürün	Hand-Over	Max Veri Hızı	Erişim Cihazı	Kontrolör	Mesh	Dünya Metroları	Fiyat
Radwin	50 ms	90 Mbps	2 Adet	Evet	Hayır	Moskova	Yüksek
Fluidmesh	5 ms	90 Mbps	2 Adet	Hayır	Hayır	Roma	Yüksek
Firetide	20 ms	80 Mbps	6 Adet	Evet	Evet	Seul	Orta
Moxa	50 ms	60 Mbps	3 Adet	Hayır	Hayır	Kopenhag	Düşük

Farklı teknolojiler ve çözümler ile Füniküler tren kamera görüntülerinin merkeze aktarılması mümkündür. Her çözüm, kendi geliştirdiği bir yöntem ile standart Wi-Fi ürünlerden farklılaşmakta ve bir adım öne çıkmaktadır. En doğru ve yeterli çözümü seçebilmek için, teknik olarak işletme ihtiyacı net olarak hesaplanmalı, kritik öncelikler ve en önemlisi proje bütçesi belirlenmelidir. Bölüm 4.2 “Proje detayları” başlığı altında işletme ihtiyacı teknik olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplara göre minimum veri hızı 30 Mb/s, hand-over süresi ise 200 ms ve altıdır. Tanımlanan bu ihtiyacı karşılayabilen ve maliyeti daha uygun bir çözüm sunan Moxa markasının çözümü projede kullanılmak üzere tercih edilmiştir.

4.2.2 Teknik Özellikler

Projede kullanılacak ürünler ve cihazlar tünel şartlarında çalışacağı için çevresel koruma özellikleri yüksek olması gerekmektedir, bu yüzden IP67 koruma sınıfında olan Moxa AWK-6232 erişim noktası cihazları kullanılmıştır. Aynı şekilde tren üzerine konulacak cihazların EN 50155 raylı sistem standartlarını karşılaması gerektiği için, nem, sıcaklık, titreşim ve şoktan etkilenmeyen ürünler olması gerekmektedir. Şekil 4.2’de projede tercih edilen Moxa markasının Erişim Noktası cihazı gösterilmiştir. IP67 koruma sınıfında olan bu cihaz aynı zamanda EN 50155 raylı sistem sertifikasına sahiptir.



Şekil 34 Moxa AWK-6232 erişim noktası cihazı

Çizelge 4.2’de, saha çalışmalarında kullanılan Erişim Noktası cihazının desteklediği standartlar, anten sayısı ve kazancı, modülasyon çeşitleri, iletim gücü, alım hassasiyeti ve kullanılan kanallar detaylı bir şekilde verilmiştir. Cihaza 4 adet anten bağlanabilmektedir ve 5/6 kod oranında 64 QAM modülasyon yapmaktadır. Çift radyo (Dual Radio) özelliği bulunmaktadır. Çift radyo özelliği, bir Erişim Noktası cihazının iki farklı frekansta (kanalda) ayrı ayrı yayın yapmasını sağlar. Bu özellik sayesinde bir cihaz iki Erişim Noktası cihazı gibi davranması sağlanır. Aynı anda iki farklı client ile toplam band genişliğinde azalma olmadan haberleşebilir.

Çizelge 4.2 Kablosuz erişim noktası cihazı teknik özellikleri

Desteklediği Standartlar	IEEE 802.11a/b/g/n for Wireless LAN IEEE 802.11i for Wireless Security IEEE 802.3ab for 1000BaseT IEEE 802.3at for Power-over-Ethernet Plus IEEE 802.1D for Spanning Tree Protocol IEEE 802.1w for Rapid STP, IEEE 802.1Q VLAN
Anten Sayısı ve Kazancı	4 dual-band omni-directional anten, 5 dBi at 2.4 GHz, 2 dBi at 5 GHz, N-type (male)
Modülasyon Çeşitleri	802.11n: 64QAM @ 300 Mbps to BPSK @ 6.5 Mbps
Tx Transmit Gücü	802.11a/n (20/40 MHz): MCS15 40 MHz: Typ. 12 dBm (± 1.5dBm)
Rx Sensitivity	802.11a/n: -68 dBm @ MCS15 40 MHz (300 Mbps), -70 dBm @ MCS7 40 MHz (150 Mbps)
İşletme Kanalları	2.412 to 2.472 GHz (13 kanal) 5.18 to 5.24 GHz (4 kanal)

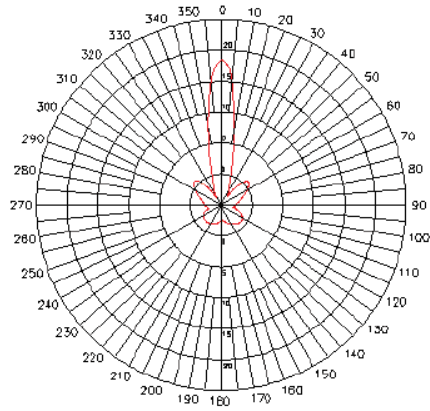
Projede, Moxa ANT-WSB5-PNF model 18 dBi ve Huber-Suhner 1356.17.0077 model 14 dBi yönlü antenler kullanılmıştır. Ayrıca Moxa ANT-WDB-ANF-0609 model 9 dBi çok yönlü dipol antenler kullanılmıştır. Antenler 5.1 – 5.9 Ghz aralığında çalışma frekansına sahiptir, empedans değerleri 50 Ohm'dur. Detaylı bilgi Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.3 Anten özellikleri

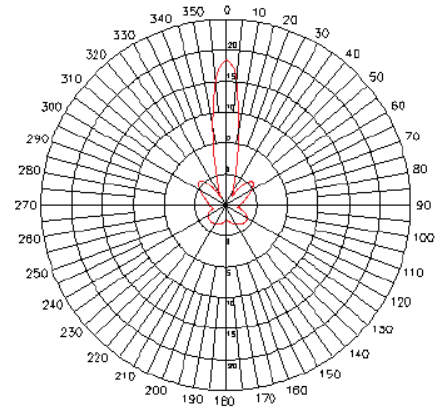
	18 dBi	14 dBi	9 dBi
Frekans	5.1 Ghz -5.9 Ghz	5.1 Ghz -5.9 Ghz	5.1 Ghz -5.9 Ghz
Anten Tipi	Yönlü panel tip	Yönlü panel tip	Çok yönlü dipol tip
Anten Kazancı	18 dBi	14 dBi	9 dBi
Konektör	N Type	N Type	N Type
Empedans	50 Ohm	50 Ohm	50 Ohm
VSWR	1.5	1.5	1.5

Şekilde 4.3’de 18 dBi yönlü antenin elektrik alan ve manyetik alan paterni gösterilmiştir.

H-Plane



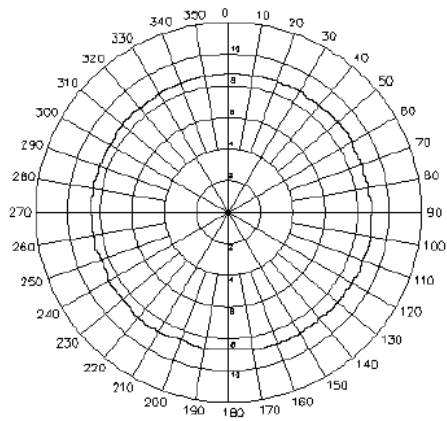
E-Plane



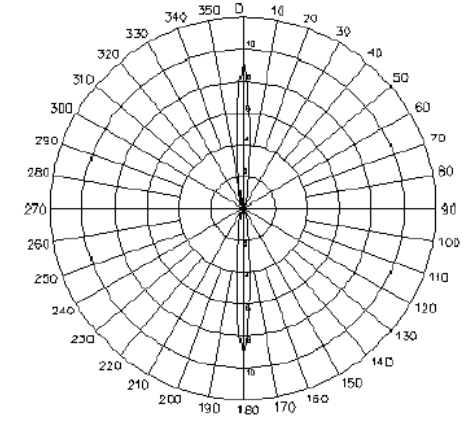
Şekil 4.3 18 dBi yönlü antenin manyetik alan ve elektrik alan paterni

Şekil 4.4’de 9 dBi çok yönlü antenin elektrik alan ve manyetik alan paterni gösterilmiştir.

H-Plane for 5 GHz



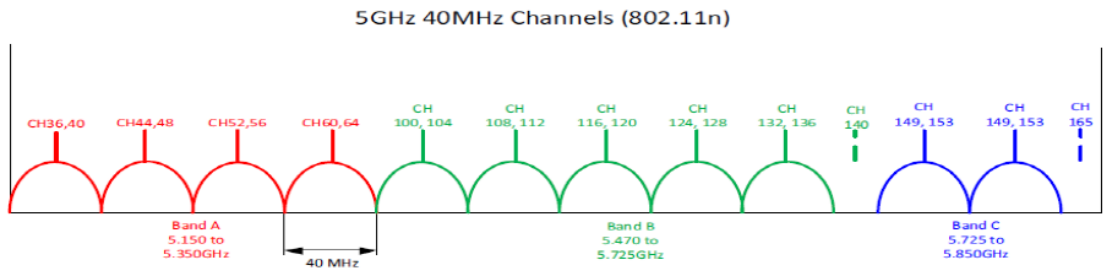
E-Plane for 5 GHz



Şekil 4.4 8 dBi çok yönlü antenin manyetik ve elektrik alan paterni

4.3 Sistemin Çalışma Şekli

Yeraltı ulaşım sistemlerinde 2.4 Ghz frekansı çoğunlukla sinyalizasyon sistemi haberleşmesi tarafından kullanılmaktadır. Bundan dolayı projede kullanılan Erişim Noktası cihazları 5 Ghz frekansında haberleştirilmiştir. IEEE 802.11n standardının önemli bir özelliği olan kanal birleştirme (channel bonding) özeliği kullanılarak daha fazla band genişliği elde etmek için 40 Mhz'lik kanallar kullanılmıştır. 5 Ghz frekans bandında aynı zamanda bir biriyle çakışmayan 11 kanal bulunmaktadır. Şekil 4.5'de 5 Ghz kanal yapısı gösterilmiştir.



Şekil 4.5 5 Ghz kanal yapısı

Tüneldeki her Erişim Noktası cihazı birinci radyosu üzerinden Tren1 SSID'sini, ikinci radyosu üzerinden ise Tren2 SSID'sini yayınlayacak şekilde ayarlanmıştır. Tren2'nin Tren1'i etkilemeden aynı şekilde çalışabilmesi farklı bir kanalda çalıştırılmıştır. Tren1'de radyo1 frekansı olarak adlandırılan 36-40 numaralı kanallar kullanılmıştır. Tren2'de radyo2 frekansı olarak adlandırılan 100-104 numaralı kanallar kullanılmıştır. Her iki radyoda 5 Ghz frekansında olup çakışmayan, farklı bantlarda bulunan kanallar tercih edilmiştir. Bu sayede her tren kendi SSID'sine bağlanarak farklı kanallardan çalışmaktadır, dolayısıyla olası enterferanslar önlenmiştir.

4.4 Link Bütçe Hesapları

Projede, saha uygulamalarına başlamadan önce 550 metre uzunluğundaki tünel için Link bütçe hesapları yapılmıştır. Bu hesaplamalar, üretici firmanın ürünlerinin güç ve kayıp değerleri girilerek, haberleştirilebilecek mesafenin hesaplanabildiği "Moxa WLAN Calculator" hesaplama programı (calculation tool) ile yapılmıştır. Hesaplama programı (calculation tool), kullanılan ürün, frekans ve anten tipleri girilerek haberleştirilmek

istenen mesafedeki serbest uzay kaybını hesaplayabilen ve sonucunda alıcıda oluşacak RX değerini veren yardımcı bir programdır.

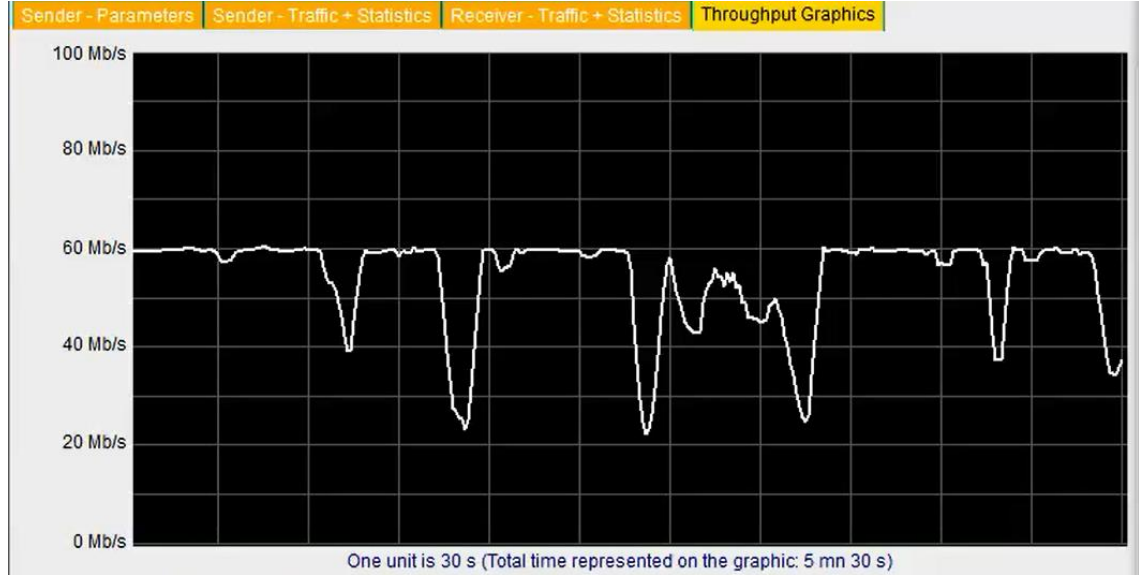
Uygulamanın yapılacağı tünelin başlangıç noktası Taksim istasyonudur. Ölçümler ve hesaplamalar bu referans noktasına göre yapılmıştır. Proje detayları bölümünde minimum veri hızı ihtiyacı 30 Mb/s olarak hesaplanmıştır. Hesaplama programında bu değere en yakın referans değeri 36 Mb/s olarak alınmıştır. 36 Mb/s veri hızı değeri için kullanılan cihazların RX hassasiyeti -76 dB'dir. Bu değeri elde edebileceğimiz mesafe, teorik olarak hesaplama programı (calculation tool) kullanılarak hesaplanmıştır. Kullanılan Erişim Noktası cihazlarının TX gücü ürün kataloğundan alınan bilgiye göre 16 dBm'dir. Tren üzerinde 9 dBi kazanç değerinde anten bulunmaktadır. Yer tarafında ise 18 dBi kazançlarında antenler bulunmaktadır. Bu değerler, Şekil 4.6'daki gibi hesaplama programına girildikten sonra, 36 Mb/s veri iletim hızında haberleşmesi için iletim mesafesinin maksimum 1002 metre olduğu hesaplanmıştır.

Model Name AWK-6232	Model Name AWK-6232
Frequency 5 GHz 5240 MHz	Frequency 5 GHz 5240 MHz
Data Rate 36 Mbps	Data Rate 36 Mbps
Required RX Sensitivity -76 dbm	Required RX Sensitivity -76 dbm
TX Power 16 dBm	TX Power 16 dBm
Antenna Gain ANT-WDB-ANF-0609 9 dBi	Antenna Gain ANT-WDB-PNF-1518 18 dBi
RF Cable Loss A-CRF-NMNM-LL4-300 1.6 dB (Loss)	RF Cable Loss A-CRF-NMNM-LL4-300 1.6 dB (Loss)
RX Signal Strength -71 dBm	RX Signal Strength -71 dBm
Distance 550 m	
Free Space Loss (Path Loss) 101.6 (dB)	
Reserved Safety Factor (1/8), Extremely 9 dB	
Maximum Transmission Distance (Based on all aboved input values): 1002 m	

Şekil 4.6 550m için link bütçe hesabı

Ancak teorik olarak hesaplanan 1002 metre iletişim mesafesinin sağlanamadığı test yapılarak görülmüştür. Link bütçe hesaplarından çıkan teorik sonuç ile sahada gerçekleşen sonucu kıyaslayabilmek için testler yapılmıştır. Tünel çevresel şartlarının hesaplanan değerlerden çok daha fazla bozucu etkisi olduğu anlaşılmıştır. Tünel uzunluğu 550 metredir ve bu tünelin başlangıç noktalarına Erişim Noktası cihazları

konularak veri hızı testleri yapılmıştır. Ancak yapılan testlerde, teorik olarak hesaplanan 36 Mb/s iletim seviyesinin sağlanamadığı görülmüştür. Şekil 4.7’de görüldüğü üzere veri hızı 20 Mb/s seviyelerine kadar düşmüştür. Tren, Erişim Noktası cihazlarına yakinken veri hızı değerleri yüksek olmasına karşın, tren hareket edip ilerlerken bazı bölgelerde veri hızı değerlerinin 20 Mb/s seviyelerine kadar düştüğü görülmektedir.



Şekil 4.7 550m veri hızı testi

Veri hızı değerinin düştüğü bu bölgeler kontrol edilerek, bu düşüşün nedenleri incelenmiştir. Veri hızında görülen düşüş, tünel çevresel şartlarının sinyal seviyesinde meydana getirdiği bozulma ve azalmadan kaynaklanmaktadır. Düşüşün yaşandığı bölgelerde sinyal seviye ölçümleri yapılmıştır.

802.11 Info	
Operation mode	AP-Client - Client (WLAN 1)
Channel	36
RF type	N Only (5GHz)
SSID	ARAC1
MAC	02:90:E8:38:90:34
Security mode	WPA2
Current BSSID	0A:90:E8:38:90:1D
Signal strength	■■■■ (-82dBm/-121dBm)
RSSI	39

Şekil 4.8 Sinyal seviye ölçüm değerleri

Şekil 4.8’de görüldüğü üzere, yapılan ölçümlerde, tünel ortasında yani 250 metrede sinyal seviyelerinin -82 dB seviyelerinde olduğu gözlemlenmiştir. İdeal şartlarda bu mesafedeki bir kablosuz haberleşmede olması gereken sinyal seviyesi hesaplanmıştır.

Şekil 4.9'da gösterilen değerler ile yapılan hesap şu şekildedir; Tren üzerinde 9 dBi kazancında bir anten ile yer tarafında 18 dBi kazancında bir antenin, 250 metre mesafede serbest uzay kaybı da dikkate alınarak olması gereken RX sinyal seviyesi -55 dB olduğu hesaplanmıştır.

Model Name AWK-6232	Model Name AWK-6232
Frequency 5 GHz 5240 MHz	Frequency 5 GHz 5240 MHz
Data Rate 36 Mbps	Data Rate 36 Mbps
Required RX Sensitivity -76 dbm	Required RX Sensitivity -76 dbm
TX Power 16 dBm	TX Power 16 dBm
Antenna Gain ANT-WDB-ANF-0609 9 dBi	Antenna Gain ANT-WSB5-PNF-18 18 dBi
RF Cable Loss A-CRF-NMNM-LL4-300 1.6 dB (Loss)	RF Cable Loss A-CRF-NMNM-LL4-300 1.6 dB (Loss)
RX Signal Strength -55 dBm	RX Signal Strength -55 dBm
Distance 250 m	
Free Space Loss (Path Loss) 94.7 (dB)	
Reserved Safety Factor Custom 0 dB	

Şekil 4.9 250m link bütçe hesabı

Bu hesaplama ve ölçümlere göre tünelin bu bölgesine kadar olan tünel çevresel şartlarının zayıflatıcı etkisi, gerçek sinyal seviyesi ile teorik sinyal seviyesinin farkı alınarak $(82-55=27)$ -27 dB olduğu hesaplanmıştır.

Tünel içerisinde 250 metre bölgesine kadar maksimum -27 dB bozucu etki olduğu düşünülerek tekrar Şekil 4.10'da görüldüğü üzere, 27 dB zayıflama değeri girilerek hesaplama yapılmıştır ve maksimum iletim mesafesinin 126 metre olduğu görülmüştür.

Device A	Path	Device B
Model Name AWK-6232		Model Name AWK-6232
Frequency 5 GHz 5240 MHz		Frequency 5 GHz 5240 MHz
Data Rate 36 Mbps		Data Rate 36 Mbps
Required RX Sensitivity -76 dbm	Distance 250 m	Required RX Sensitivity -76 dbm
TX Power 16 dBm	Free Space Loss (Path Loss) 94.7 (dB)	TX Power 16 dBm
Antenna Gain ANT-WDB-ANF-0609 9 dBi	Reserved Safety Factor Custom 27 dB	Antenna Gain ANT-WSB5-PNF-18 18 dBi
RF Cable Loss A-CRF-NMNM-LL4-300 1.6 dB (Loss)		RF Cable Loss A-CRF-NMNM-LL4-300 1.6 dB (Loss)
RX Signal Strength -82 dBm		RX Signal Strength -82 dBm
Maximum Transmission Distance (Based on all aboved input values): 126 m		

Şekil 4.10 Tünel bozucu etkisi link bütçe hesabı

Erişim noktası cihazları bir birine karşılıklı olarak baktırılacak ve bir Erişim Noktasının kapsamasından ayrılan tren diğer cihazının kapsamasına girecektir. 126 metrelik iletim mesafesi bulunan karşılıklı iki Erişim Noktası cihazı olacağı için toplam (126+126) 252 metrelik kapsama alanı sağlanacaktır. Bundan dolayı tünel orta bölgesine yani 250 metre bölgesine diğer Erişim Noktası cihazının konulmasına karar verilmiştir.

Erişim Noktası cihazlarında kullanılacak antenler belirlenirken proje maliyeti göz önünde bulundurulmuştur. Kullanılacak antenlerin ihtiyacı karşılayacak optimum kazanç seviyesinde olması gerekmektedir. İstenilen 36 Mb/s veri hızı değerinden yukarıda bir kapasite sağlayacak bir anten de kullanılabilir ancak bu durum proje maliyetini artıracaktır. Bu amaç doğrultusunda geriye kalan bölgeler için 18 dBi antenler yerine 14 dBi kazançlı antenler ile Şekil 4.11’de görüldüğü üzere hesaplamalar yapılmıştır. Tünelin geriye kalan 300 metresinde, 16 dBm TX gücüne sahip Erişim Noktası cihazlarının, 9 dBi kazancında bir araç üstü anten ile 14 dBi kazancında bir yer antenin, 300 metre mesafede serbest uzayda iletişimde olması gereken RX sinyal seviyesi -61 dB olduğu hesaplanmıştır.

Device A	Path	Device B
Model Name AWK-6232		Model Name AWK-6232
Frequency 5 GHz 5240 MHz		Frequency 5 GHz 5240 MHz
Data Rate 36 Mbps		Data Rate 36 Mbps
Required RX Sensitivity -76 dbm	Distance 300 m	Required RX Sensitivity -76 dbm
TX Power 16 dBm	Free Space Loss (Path Loss) 96.3 (dB)	TX Power 16 dBm
Antenna Gain ANT-WDB-ANM-0609 9 dBi	Reserved Safety Factor Custom 0 dB	Antenna Gain Custom 14 dBi
RF Cable Loss A-CRF-NMNM-LL4-300 1.6 dB (Loss)		RF Cable Loss A-CRF-NMNM-LL4-300 1.6 dB (Loss)
RX Signal Strength -61 dBm		RX Signal Strength -61 dBm

Şekil 4.11 300m link bütçe hesabı

Ancak yapılan saha ölçümlerinde tünelin geriye kalan 300 metresinde sinyal seviyesinin -80 dB olduğu Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Bu hesaplama ve ölçümlere göre tünelin bu bölgesinde, tünel çevresel şartlarının zayıflatıcı etkisi, gerçek sinyal seviyesi ile teorik sinyal seviyesinin farkı alınarak ($80-61=19$) -19 dB olduğu hesaplanmıştır.

802.11 Info	
Operation mode	AP-Client - Client (WLAN 1)
Channel	36
RF type	N Only (5GHz)
SSID	ARAC1
MAC	02:90:E8:38:90:34
Security mode	WPA2
Current BSSID	0A:90:E8:38:90:30
Signal strength	■ ■ ■ ■ (-80dBm/-112dBm)
RSSI	32

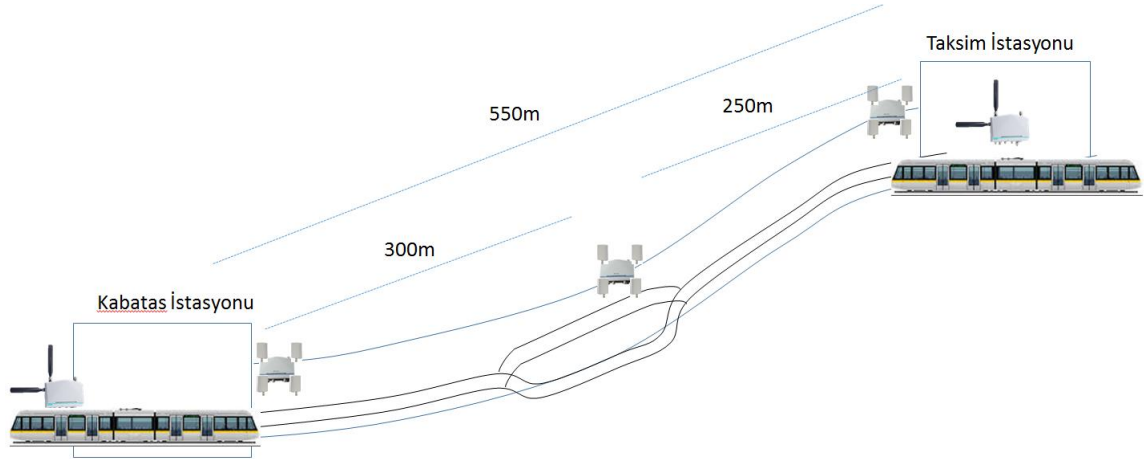
Şekil 4.12 300m sinyal seviye ölçümü

Tünelin bu 300 metre bölgesinde hesaplanan bozucu etkisi göz önüne alınarak Şekil 4.13’de girilen değerler ile tekrar hesaplama yapılmıştır. Tren üzerindeki 9 dBi ve yer tarafındaki 14dBi kazançlı antenlerin, 19 dB tünel bozucu etkisi de hesaba katıldığında 200 metrede haberleşebildiği görülmüştür. Bu sonuçlara göre, tünelin son noktasına da bir Erişim Noktası cihazı ve bu cihaza 14 dBi kazancında anten konularak istenilen 36 Mb/s veri iletim hızındaki haberleşmenin rahat bir şekilde sağlanabileceği anlaşılmıştır.

Device A	Path	Device B
Model Name AWK-6232 ?		Model Name AWK-6232 ?
Frequency 5 GHz 5240 MHz		Frequency 5 GHz 5240 MHz
Data Rate 36 Mbps		Data Rate 36 Mbps
Required RX Sensitivity -76 dbm	Distance 300 m	Required RX Sensitivity -76 dbm
TX Power 16 dBm	Free Space Loss (Path Loss) 96.3 (dB)	TX Power 16 dBm
Antenna Gain ANT-WDB-ANM-0609 ? 9 dBi	Reserved Safety Factor Custom 19 dB	Antenna Gain Custom 14 dBi
RF Cable Loss A-CRF-NMNM-LL4-300 ? 1.6 dB (Loss)		RF Cable Loss A-CRF-NMNM-LL4-300 ? 1.6 dB (Loss)
RX Signal Strength -80 dBm		RX Signal Strength -80 dBm
Maximum Transmission Distance (Based on all aboved input values): 200 m		

Şekil 4.13 Tünel bozucu etkisi link bütçe hesabı

Sonuç olarak, tren tarafında 9 dBi kazançlı anten kullanılmıştır. Yer tarafında ise, tünel başlangıç noktasında 18 dBi kazançlı antenlere sahip Erişim Noktası cihazı kullanılmıştır. Tünelin 250.metresinde ise 14 dBi kazançlı antenlere sahip Erişim Noktası cihazı ve bu noktadan 300 metre sonra tünelin 550.metresinde 14 dBi kazançlı antenlere sahip Erişim Noktası cihazları kullanılmıştır. Şekil 4.14’de cihazların konumları gösterilmiştir.



Şekil 4.14 Erişim noktası cihazları konumları

4.4.1 SNR (Signal to Noise Ratio) Değeri

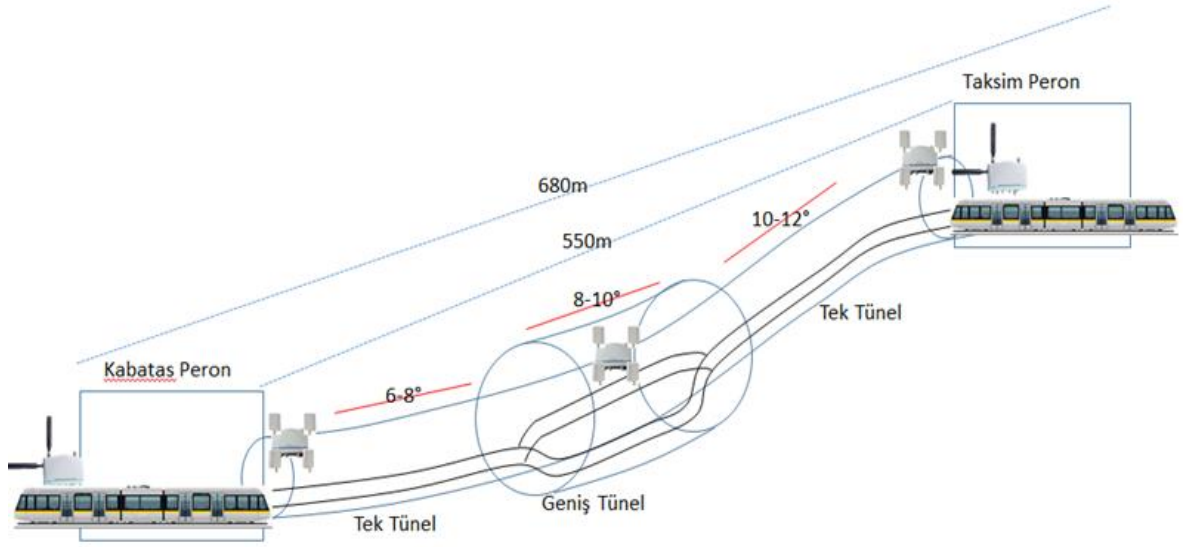
Erişim Noktası cihazlarının ürün katalog bilgilerinden alınan verilere göre, 36 Mb/s iletim hızında haberleşebilmesi için gerekli RX hassasiyeti -76 dB'dır. Çizelge 4.4'de Rx hassasiyetine göre sinyal gürültü oranı (SNR) hesaplanmıştır.

Çizelge 4.4 RX= -76d B hassasiyete göre SNR hesabı

Alıcı Hassasiyeti Hesaplama	Değişkenler	Birim	Denklem	Değer
RX Gürültü Değeri	NF	dB		2
İşletme Sıcaklığı	T_0	K		300
Etkili Gürültü Sıcaklığı	T_e	K	$T_e = T_0(NF - 1)$	175,4679577
Boltzmann Sabiti	k	J/K		$1,38E-23$
Alıcı Band genişliği	BW_{RX}	MHz		40
Anten Sıcaklığı	T_{Ant}	K		300
Gürültü Gücü (RX)	P_n	dBm	$P_n = k(T_{Ant} + T_e)BW_{RX}$	-95,80939668
Sinyal Gürültü Oranı	SNR_{RX}	dB	$SNR_{RX} = P_{RX}/P_n$	19,80939668

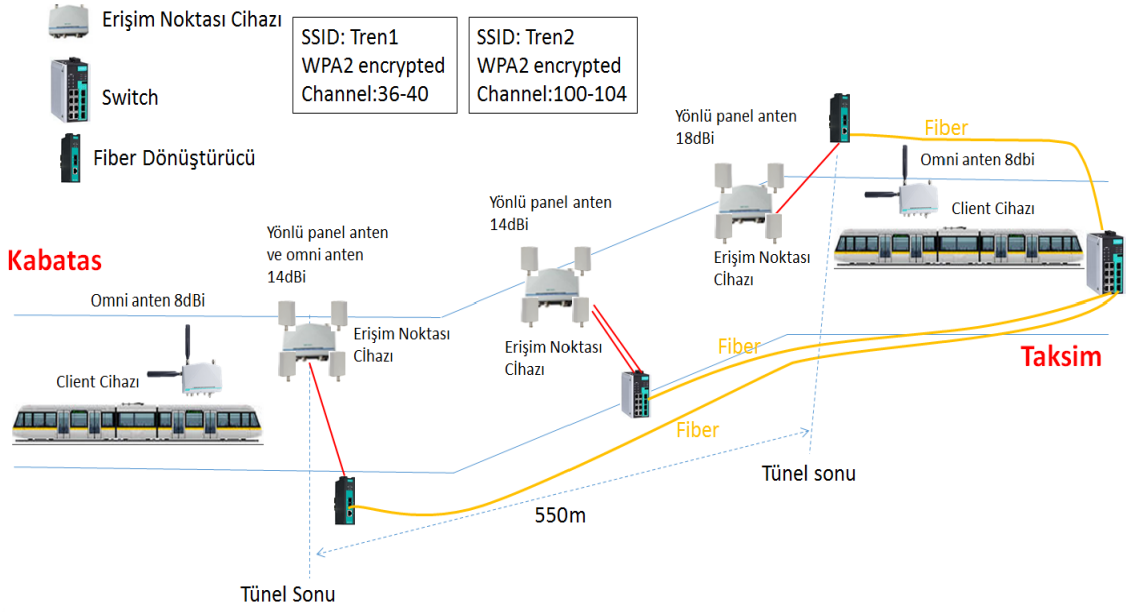
4.5 Saha Çalışmaları

Link bütçe hesapları yapıldıktan sonra buradan çıkan sonuçlara göre saha çalışmalarına başlanmıştır. Tünel içerisinde fiziki şartlarına göre tünel içerisinde Erişim Noktası cihazlarının montaj konumları belirlenmiştir. Hesaplamalar ve ölçümlerden çıkan sonuçlara göre, Şekil 4.15'de gösterildiği gibi, Taksim ve Kabataş tünel başlangıçlarına birer adet ve tünel ortasına 1 adet olmak üzere toplam 3 adet Erişim Noktası cihazı kullanılmıştır.



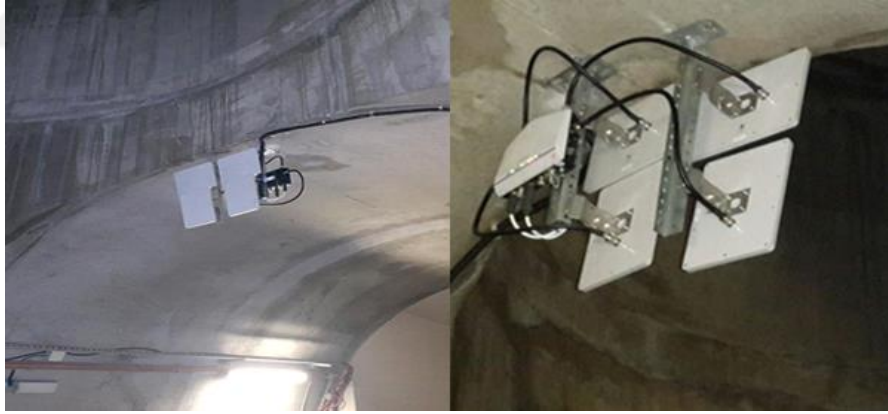
Şekil 4.15 Tünel fiziki yapısı ve cihaz yerleşimleri

Erişim Noktası cihazları ile bu cihazların haberleştiği switch arasındaki mesafe 100 metreden fazla olduğu için fiber optik kablo ile haberleştirilmiştir. Fiber optik kablolar merkezde bulunan fiber optik switch’de sonlandırılmıştır. Bu sonlandırmalar yapılırken ağ mimarisinin Yıldız topoloji olmasına karar verilmiştir. Çünkü Bus topoloji yapıldığı takdirde haberleşme, Erişim Noktası cihazları üzerinden atlayarak gelecekti ve bundan dolayı cihaz üzerinde gerçekleşecek L2 (veri bağlantısı) katmanı işlemlerinden kaynaklı gecikmeler oluşacaktı. Gecikmelerin önüne geçmek için kablolar her Erişim Noktası cihazından direkt olarak switch’e getirilmiştir. Bu işlemler ile Yıldız (star) topolojisinde bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Aynı zamanda Yıldız ağ yapısı ile bir Erişim Noktası cihazında oluşacak arızada diğer Erişim Noktası cihazının haberleşmesinin kesilmesinin önüne geçilmiştir. Fiber optik kablo güzergâhı ve sistem topolojisi Şekil 4.16’da gösterilmiştir.



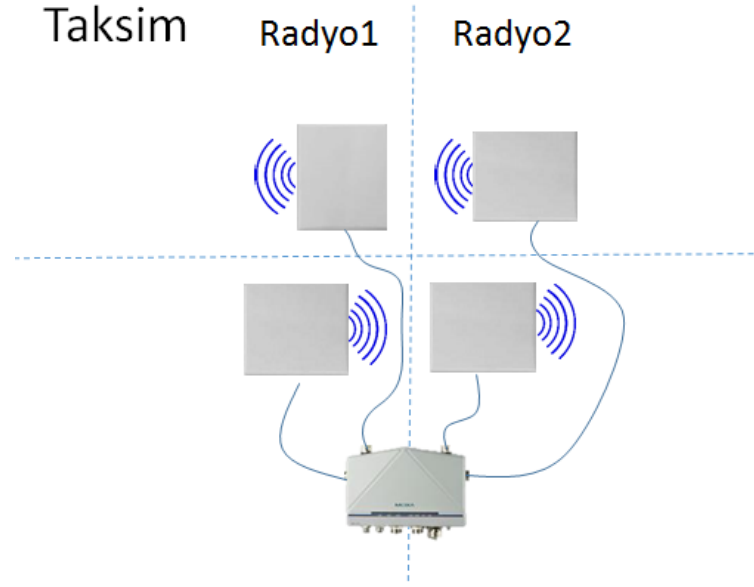
Şekil 4.16 Sistem topolojisi

İlk uygulama noktası olarak Taksim istasyonu seçilmiştir. Taksim tarafına Şekil 4.17’de görülen 1 adet çift radyolu Erişim Noktası cihazı montaj edilmiştir. Bu ünitenin üzerine 4 adet 18 dBi gücünde yönlü anten kullanılmıştır.



Şekil 4.17 Taksim erişim noktası cihazları

Taksim tarafında kullanılan cihazın fiziksel bağlantıları Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Kullanılan cihazlarda tren1 için radyo1, tren2 için radyo2 frekansları tahsis edilmiştir. Radyo1 ve radyo2 frekanslarında hem yatay hem de dikey polarizasyonlu yayın yapılmaktadır. Yatay ve dikey polarizasyonlu yayın yaptırılarak, tünel içerisindeki sinyal kayıpları azaltılmış ve veri iletim hızı artırılmıştır. Bu konu veri hızı test sonuçları bölümünde detaylı olarak ele alınmıştır.



Şekil 4.18 Taksim tarafı erişim noktası cihazı fiziksel bağlantıları

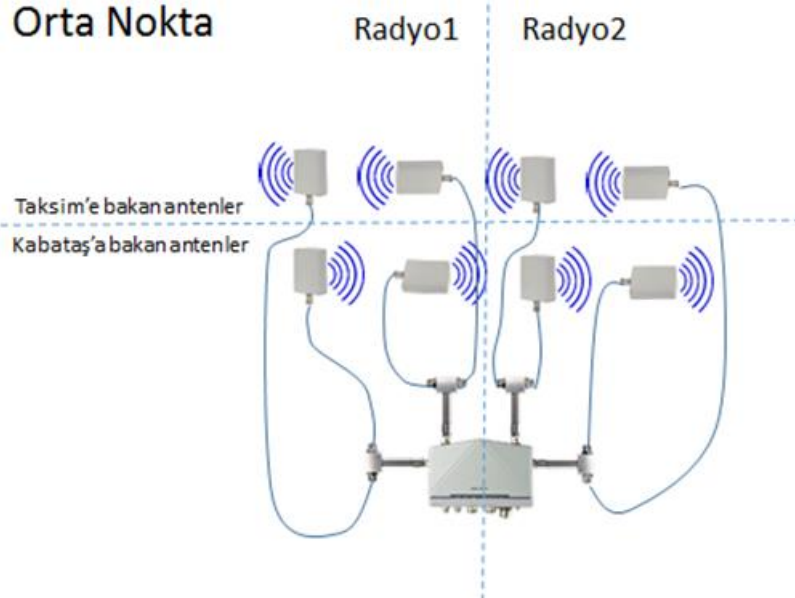
Daha sonra ikinci uygulama noktası olan tünel ortasına geçilmiştir. Şekil 4.19’da görüldüğü üzere çift radyo çıkışlı Erişim Noktası cihazı montaj edilmiştir. Tünel orta bölgesinde iki tren yan yana geçtiği için veri hızı azalmaktadır. Farklı radyo frekanslarından, iki tren için, her iki hareket yönüne, hem dikey hem de yatay polarizasyon yapacak şekilde antenler konumlandırılmıştır. Toplamda 8 adet 14 dBi gücünde panel tipi yönlü anten kullanılmıştır.



Şekil 4.19 Tünel ortası erişim noktası cihazı

Tünel ortasında kullanılan Erişim Noktası cihazlarının anten fiziksel bağlantıları Şekil 4.20’de gösterilmiştir. Tren1 için hem Taksim yönüne hem de Kabataş yönüne splitter ile RF sinyal bölünerek 2 adet anten konulmuştur. Antenlerden bir tanesi dikey

polarizasyon, diğeri yatay polarizasyonda yayın yapmaktadır. Benzer şekilde tren2 için de aynı ayarlamalar yapılmıştır.



Şekil 4.20 Tünel ortası erişim noktası cihazı fiziksel bağlantıları

Son uygulama noktası olan Kabataş istasyonu tarafında, 1 adet çift radyolu Erişim Noktası cihazı montaj edilmiştir. Antenlerin konumu ve görselleri Şekil 4.21'de gösterilmiştir.



Şekil 4.21 Kabataş erişim noktası cihazı

Kabataş

Radyo1

Radyo2

Tünel bakan antenler

İstasyona bakan antenler

Kabataş istasyonundaki uygulamada diğer noktalardan ve yapılan hesaplamalardan farklı olarak yatay ve dikey polarizasyonda yayın yapan dipol antenler de kullanılmıştır. Kabataş istasyonunun tünel bölgesinden peron bölgesine geçişte, normalde homojen olan tünel fiziki yapısı değişmektedir. Şekil 4.23’de görüldüğü üzere tünel çeperi genişlemekte ve uzamaktadır. Aynı zamanda tünel bir duvar ile sonlanarak peron bölgesine geçilmektedir. Fiziki yapıdaki bu farklılıktan dolayı veri hızı değişkenlik göstermiş ve değerler düşmüştür. Çok yönlü anten kullanılarak, bu bölgede yansımalarından dolayı oluşan sinyal kayıplarının önüne geçilmiştir.



Şekil 4.23 Kabataş tünelden perona geçiş bölgesi

Yer montajları tamamlandıktan sonra tren üzerindeki montajlara geçilmiştir. Füniküler hattında çalışmakta olan 2 adet funiküler trenine Erişim Noktası cihazı montajı yapılmıştır. Her iki tren için, Şekil 4.24’de görüldüğü gibi, 1 adet çift radyolu Erişim Noktası cihazı tren üstüne montaj edilmiştir. Bu cihaz üzerinde 2 adet 9 dBi gücünde dipol, çok yönlü anten kullanılmıştır. İkinci tren için aynı tip antenlerle farklı kanalda çalışan ayrı bir ağ kurulmuştur.



Şekil 4.24 Füniküler araç üstü erişim noktası cihazı

4.6 Test Sonuçları

Tren ve yer tarafındaki montaj işlemlerinin tamamlanmasından sonra sistemin test işlemlerine başlanmıştır. Veri hızı ve hand-over süreleri test edilmiştir. Bu bölümde test sonuçları detaylı bir şekilde incelenerek, canlı görüntü aktarımı sonuçlarına yer verilmiştir.

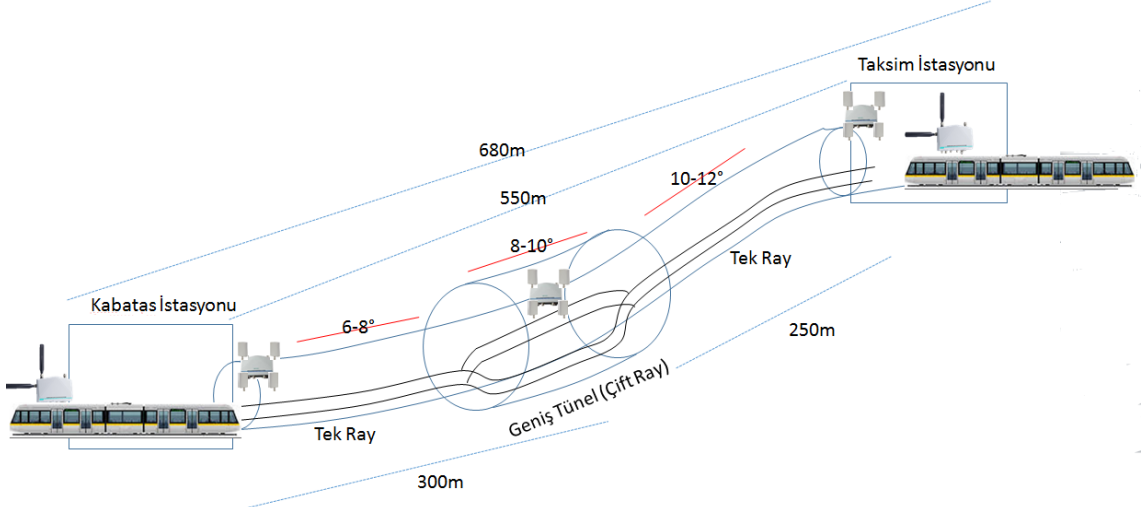
Veri hızı testleri, trenden merkeze UDP veri gönderilerek yapılmıştır. UDP veri paketleri gönderildiğinde onay paketi gelmez ve daha hızlı bir iletişim sağlanır. Bundan dolayı ses ve video gibi multimedya veri iletişimde UDP veri paketleri gönderilir. TCP veri paketleri gönderildiğinde ise paketin alıcıya ulaştığı bilgisi gerektiği için veri hızı düşmektedir. Çalışmamızda sistemin ideal kapasitesini görmek için UDP veri paketleri ile testler yapılmıştır.

Her bir tren üzerine “LAN traffic V2” programı kurulu laptop tipi PC konularak veri trafik testleri gerçekleştirilmiştir. “LAN traffic V2” programı; IP ağlar için TCP, UDP ve ICMP protokolleri ile trafik üreten bir programdır. Sistem odasına da aynı program kurulu bir bilgisayar yerleştirilmiştir. Toplam kapasiteyi görebilmek için bant genişliği sınırlandırması yapılmadan normal hızlarda (20 km/h) ilerleyen tren1 ve tren2’den merkeze UDP veri paketleri gönderilerek merkezdeki bilgisayardan veri hızı değerleri gözlemlenmiştir.

4.6.1 Veri Hızı Test Sonuçları

Veri hızı test sonuçları bu bölümde değerlendirilmiştir. Bu bölümdeki grafiklerin anlaşılabilmesi için “Bölüm 4.4 Link Bütçe Hesapları” bölümünün iyi bir şekilde incelenmesi ve anlaşılması gerekmektedir. Dikkat edilmesi gereken önemli hususlar; tünelin geometrik yapısı, eğimli bölgeler, Erişim Noktası cihazları arasındaki mesafe, sinyal seviyeleri ve antenler arasındaki görüş hattıdır (line of sight). Tünelin çevresel şartlarından dolayı oluşan sinyal bozucu etkisi “Bölüm 4.4’de detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Tünel yapısı Şekil 4.25’de gösterilmiştir. Tünel boyu 550 metredir, peron bölgeleri ile birlikte toplam tren hareket alanı 640 metre olmaktadır. Taksim istasyonundaki birinci Erişim Noktası cihazı ile tünel orta bölgedeki cihaz arasındaki mesafe 250 metredir ve bu bölge 10°-12° eğimlidir. Orta bölgedeki cihaz, tünelin genişleyerek çift ray olduğu ve iki trenin yan yana geçtiği alandadır. Bu alan 8°-10°

eğimlidir ve diğer bölgelere göre hem daha yeniş hem de daha yüksek yapıdadır. Orta bölgedeki cihaz ile Kabataş istasyonundaki Erişim Noktası cihazı arasındaki mesafe 300 metredir ve bu bölge 6°-8° eğimlidir.



Şekil 4.25 Tünel yapısı

Aşağıdaki grafikler veri hızı - zaman değerlerini göstermektedir. Her bir kare 30 s'lik süre dilimini temsil etmektedir. Trenler bir perondan diğer perona hareketini 135s'de tamamlamaktadır. Ortalama 4,5 kare bir sefer süresini göstermektedir. Grafikler, tren hareketi ile birlikte oluşan veri hızındaki değişimler ve bu değişimlerin nedenleri açıklanarak yorumlanmıştır.

Şekil 4.26'daki grafikte sarı renkli gösterim tren1'in veri hızı grafiğidir. Bu gösterimde, tren1 Taksim perondan hareket etmektedir. Şekilde görüldüğü üzere, tren1 perondayken 90 Mb/s veri hızı sağlanabiliyorken, tünel boyunca hareketine başladığı anda veri hızı düşmektedir. Bunun nedenlerinden biri, trenin Erişim Noktası cihazının altından geçiyor olmasıdır. Erişim Noktası cihazının üzerinde yönlü anten olduğu için ve antenler tünellere doğru yayın yaptığı için antenlerin alt bölgesinde veri hızı düşmektedir. Diğer neden ise, Tren1 eğim oranı 12° (%21) olan tünel bölgesine ilk girdiğinde, Erişim Noktası cihazı ile tren üstü anten arasındaki görüş hattını (line of sight), tünel ve trenin engellemesinden dolayı azalmasıdır. Bu nedenlerden dolayı bu bölgede sinyal seviyesi azalmaktadır ve sonuç olarak Şekil 4.26'da görüldüğü üzere, veri hızı 30 Mb/s'e kadar düşmektedir. Tren1 eğimli bölgeye tamamen girdikten sonra antenler arasında görüş hattı sağlandığından dolayı veri hızı tekrar artmaya başlayarak

90 Mb/s bandına yaklaştığı grafikten görülmektedir. Tren1 tek ray bulunan dar ve alçak tünel bölgesinden, çift ray bulunan geniş ve yüksek tünel bölgesine geçerken çevresel yapıdaki bu değişimden dolayı veri hızında düşüş olmuştur. Aynı zamanda bu bölgede hand-over işlemi gerçekleşmiştir. Hand-over işlemi 70-100 ms arasında gerçekleştiği için veri hızında az miktarda azalmaya sebep olmaktadır. Tren1 orta bölgedeki Erişim Noktası cihazının altından geçerken veri hızı 50 Mb/s'a düşmüştür. Bunun nedeni Erişim Noktası cihazlarına bağlı antenlerin yönlü anten olması ve cihazın ATPC (Adaptive transmission power control) özelliğine sahip olmamasıdır. Ayrıca ATPC özelliği olmadığından dolayı Erişim Noktası cihazının güçlü sinyal göndermesi, anten ile trenin yakın olduğu durumda veri hızını olumsuz olarak etkilemektedir. Tren1 orta bölgedeki Erişim Noktası cihazından uzaklaştıktan sonra veri hızı artmıştır ve daha sonra geniş tünel bölgesinden dar tünel bölgesine geçiş yapmıştır. Geçiş anında veri hızında düşüş olmuştur. Sonrasında dar tünel bölgesinde veri hızı yeniden artarak 80 ve 90 Mb/s bandına kadar çıkmıştır. Son Erişim Noktası cihazına yaklaşıldığında veri hızı yeniden düşmüştür ve 60 Mb/s veri hızı değerinde tren hareketi sonlanmaktadır. Tren1'in Taksim'den Kabataş'a seyri boyunca ortalama 70 Mb/s veri hızı sağlanmıştır.

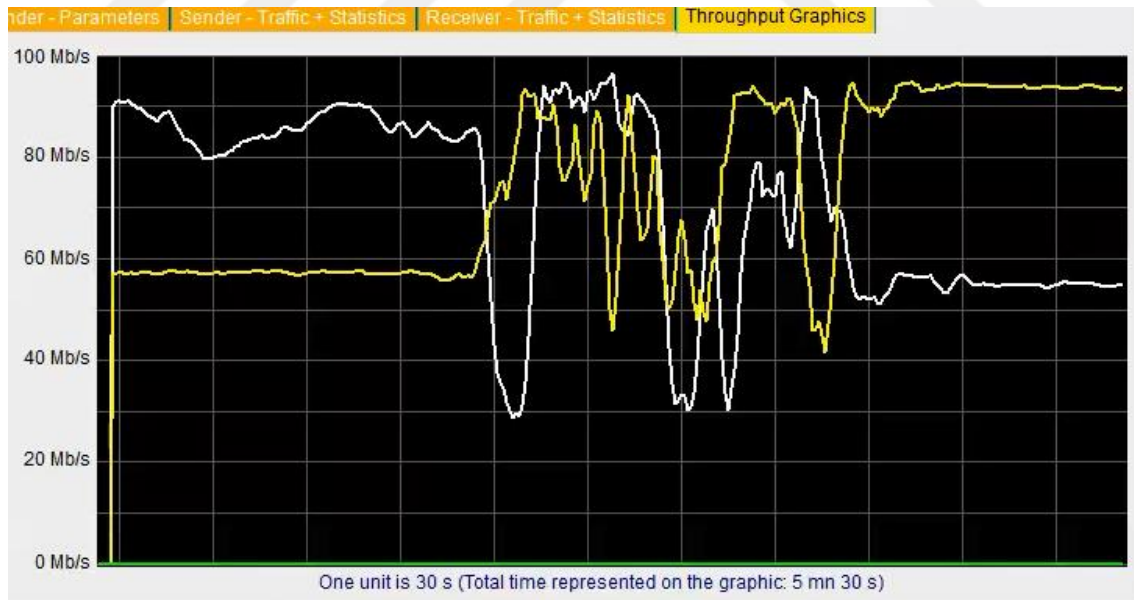


Şekil 4.26 Tren1 (Sarı) Taksim, Tren2 (Beyaz) Kabataş

Şekil 4.26'da, beyaz renkli gösterim ise tren2'nin veri hızı değişim grafiğidir. Bu grafikte, tren2 Kabataş perondan hareket etmektedir. Tren2 perondayken 50Mb/s veri hızı, toplam hareketi boyunca ise ortalama 65 Mb/s veri hızı sağlanmıştır. Tren2 tek ray

bulunan dar tünelden çift raylı geniş tünele geçiş yaptığıında veri hızı düşmüştür. Orta noktadaki Erişim Noktası cihazından uzaklaşana kadar veri hızı 30 Mb/s seviyesinde olmuştur. Geniş tünelden dar tünele geçiş olduktan sonra veri hızı artarak 90 Mb/s değerine çıkmaktadır. Bu trende tünelin yüksek eğimli bölgesine geldiğinde sinyal seviyesinde ciddi bir azalma meydana geldiği için veri hızı düşerek 30 Mb/s olmuştur. Eğimli bölgenin geçilmesi ile veri hızı değeri 80 Mb/s değerine kadar çıkarak tren2 hareketini tamamlamıştır.

Şekil 4.27’de görülen grafik ise, trenler yer değiştirdiğindeki hareketlerinde ortaya çıkan veri hızı grafiğidir. Bir önceki grafik analizindeki durumda, tünel fiziki şartlarından kaynaklanan sinyal seviyesindeki ve veri hızında değişimler benzer şekilde bu durumda da gerçekleşmiştir. Veri hızı değerleri farklı olmasına rağmen aynı analizler bu durum için de geçerlidir. Kısaca özetlemek gerekirse, Şekil 4.27’de tren1 Kabataş’tan, tren2 Taksim’den hareket etmiştir. Taksim peronda bulunan tren2, ortalama 90 Mb/s veri hızı değerindedir. Kabataş peronda bulunan tren1 50 Mb/s veri hızı değerindedir. Veri hızı grafiklerinden de anlaşılacağı üzere hedeflenen 30 Mb/s veri hızı her iki tren içinde sağlanmıştır.



Şekil 4.27 Tren1 (Sarı) Kabataş, Tren2 (Beyaz) Taksim

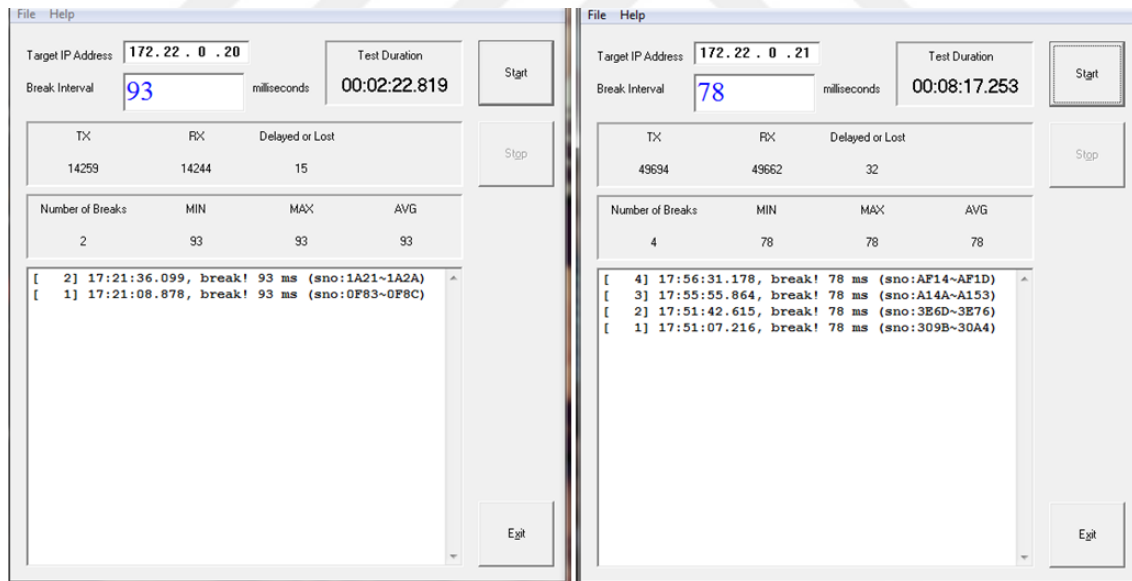
İki trende kullanılan cihazlar aynı olmasına rağmen, aynı noktalarda iki araçtan merkeze aktarılan veri hızı değerlerinde farklılık olduğu gözükmemektedir. Tren2'nin veri hızı

değerleri her iki yöndeki hareketinde de tren1'den az olduğu görülmektedir. Bu farklılık, iletim yapılan kanaldan, antenden ve anten kablolarından kaynaklanmaktadır.

Sonuç olarak veri hızı testlerinde, tünel geometrik yapısının değişmesi ve eğim oranı gibi çevresel şartlar ile birlikte Erişim Noktası cihazları ve antenlerin yayın şeklinin veri hızını etkilediği görülmüştür.

4.6.2 Hand-Over Sonuçları

Tren ile merkez arasında veri hızı testi yapılırken “LAN Break tester” programı ile paket kaybı ve gecikmeler gözlemlenmiştir. Şekil 4.28’de paket gecikmeleri ve kayıpları gösterilmiştir. Trafik ve görüntü aktarımı testlerinde hand-over süreleri 70 ms ve 100 ms arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Hand-over esnasında paket kayıpları oluşmaktadır ancak veri hızı değeri 30 Mb/s altına düşmemiştir. Hedeflenen 200 ms hand-over değerinden daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Hand-over geçiş parametrelerinin hassas bir şekilde ayarlanmış olması ve hat boyunca 2 defa hand-over yapıyor olması bu süreyi düşüren etkenler olmuştur.



Şekil 4.28 Hand-over süreleri

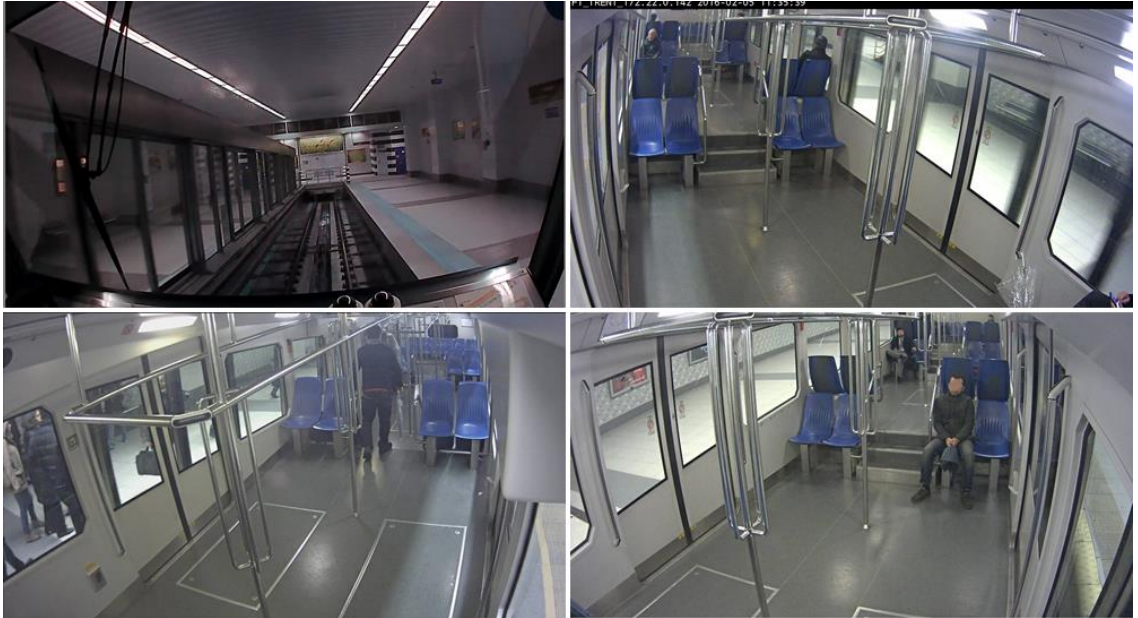
Hand-over geçiş parametrelerinden en önemlisi Beacon Interval (İşaret aralığı) özelliğidir. Beacon Interval (İşaret Aralığı); İşaret aktarımları arasında geçen süredir. İşaret, temel olarak kablosuz istemci ya da yönlendirici için kablosuz ağın hala etkin olduğunu kablosuz istemcilere sinyal göndererek belirten bir kalp atışı gibidir. Bu aralık

1 ile 1000 milisaniye arasında olacak şekilde ayarlanabilir. Bu optimizasyonda, Erişim Noktası cihazlarının hangi sıklıkta beacon paketleri göndereceği belirlenir. Bu değerin düşürülmesi paketlerin daha sık gönderilmesini sağlar ve hand-over sürelerini kısaltır, fakat bu paketler de Erişim Noktası cihazlarının aktarabileceği trafik kapasitesini etkilediği için çok fazla düşürülmesi aktarılacak maksimum trafik miktarını azaltır. Bu değeri yükseltmek aktarılacak trafik miktarını artırır fakat bu seferde hand-over sürelerini uzatır. Optimum değeri yakalamak için bu değeri küçük kademelerle düşürüp yükseltmelidir. Çalışmamızda optimum sonuçlar 110 ms değerinde yakalanmıştır.

4.6.3 Canlı Görüntü Aktarımı Sonuçları

Testler tamamlandıktan sonra projede hedeflenen canlı ve kesintisiz görüntü aktarımı aşamasına geçilmiştir. Trenlerdeki kameralar aktif edilerek, her trendeki 14 kameradan 7'ser adet yayın alınmıştır. Toplamda alınan 14 adet canlı görüntü yayını ortalama 30 Mbps video görüntüsü herhangi bir kesilme, donma veya bozulma olmadan kontrol merkezinden izlenebilmiştir.

Kontrol merkezinde, tren içindeki kamera görüntüsünün Kabataş – Taksim seferi boyunca canlı olarak nasıl gözüktüğü Şekil 4.29'daki resimlerde gösterilmiştir.

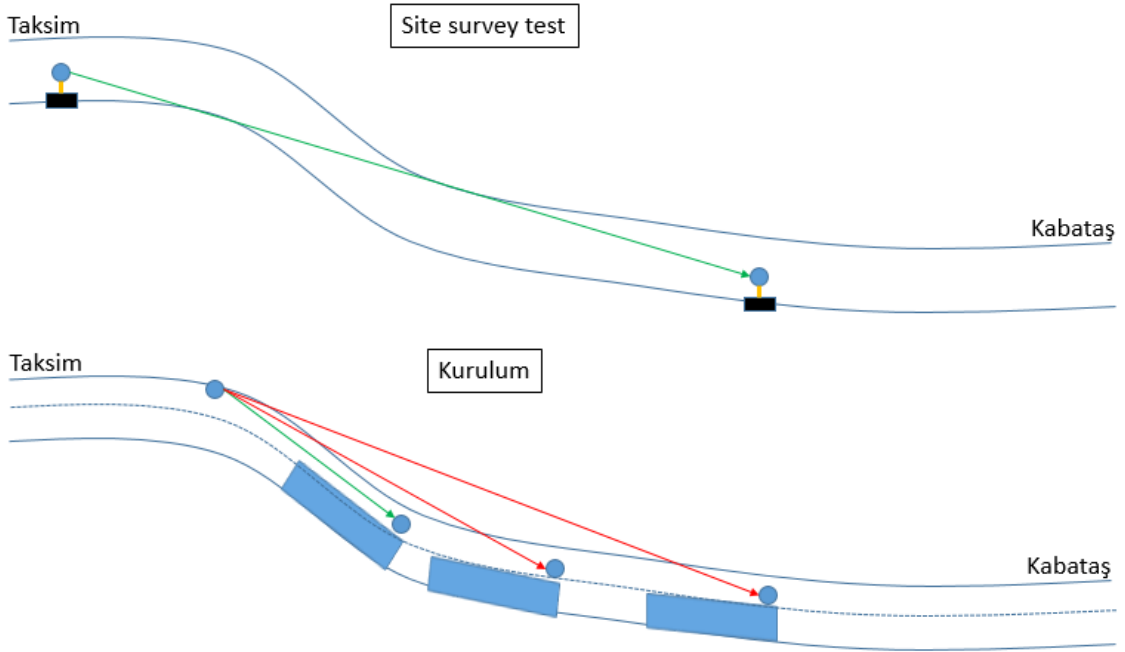


Şekil 4.29 Tren hareketindeki tren içi görüntü

4.7 Dikkat Edilmesi Gereken Noktalar

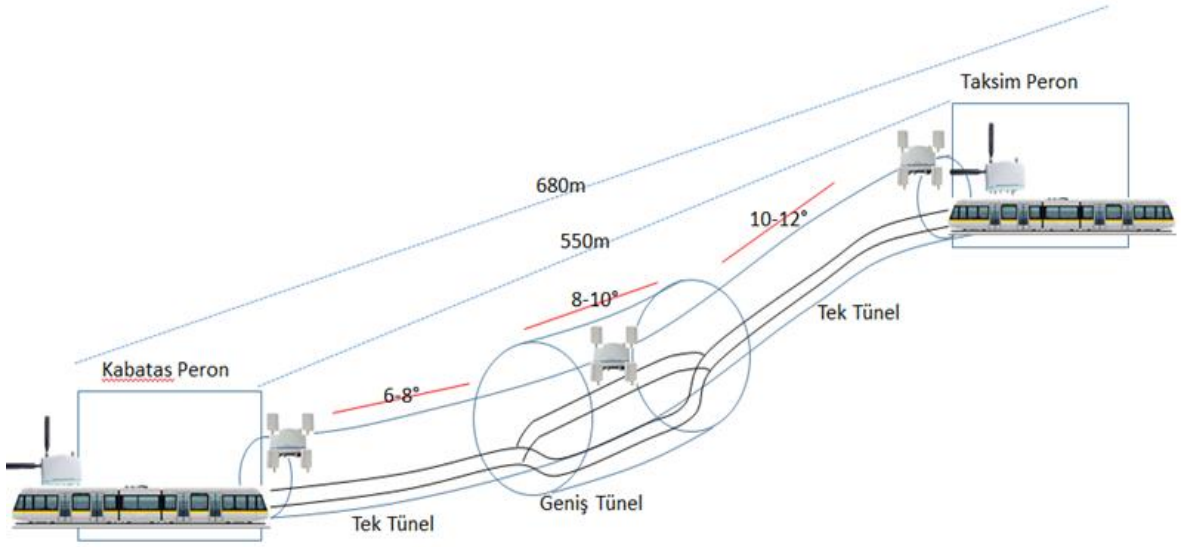
Proje çalışmaları sırasında önemli kazanımlar ve tecrübe elde edilmiştir. Uygulamada elde edilen sonuçların, tasarım aşamasında planlanan ve hesaplanan değerlerden farklı olduğu görülmüştür. Bu bölümde tasarım sırasında hesaplanan ile uygulamada karşılaşılan farklılıklar açıklanmıştır.

Link bütçe hesapları sırasında alınabilecek sonuçlar hesaplanmıştır. Ancak tünel içerisinde tren hareketi olduğu durumda tünel içerisinde elektromanyetik dalganın yayılacağı alan azalmaktadır. Bu durumun veri hızını etkilediği anlaşılmıştır. Şekil 4.30'da iki durum arasındaki fark görülebilmektedir.



Şekil 4.30 Saha keşifleri

Tünel yapısı, Şekil 4.31'de görüldüğü üzere, Taksim'den Kabataş'a doğru 250 metre boyunca 12 derece eğimlidir ve daha sonra 150 metre boyunca genişlik ve yükseklik artmaktadır, tünel sonunda daralarak 150 metre 8 derece eğim ile sonlanmaktadır. Tünelin değişken yapısı kapsama sağlanmasını zorlaştırmıştır.



Şekil 4.31 Tünel fiziki yapısı

Kabataş istasyonu peron bölümünden tünele geçerken Şekil 4.32’de görülen peron sonundaki duvar nedeniyle yönlü antenin çok fazla yansımaya ve kayba neden olduğu tespit edilmiştir. Yönlü antenler ile birlikte çok yönlü (omni) anten kullanılarak bu yansıma azaltıldı ve böylelikle kapsama alanında iyileştirme olmuş ve veri hızı artırılmıştır.

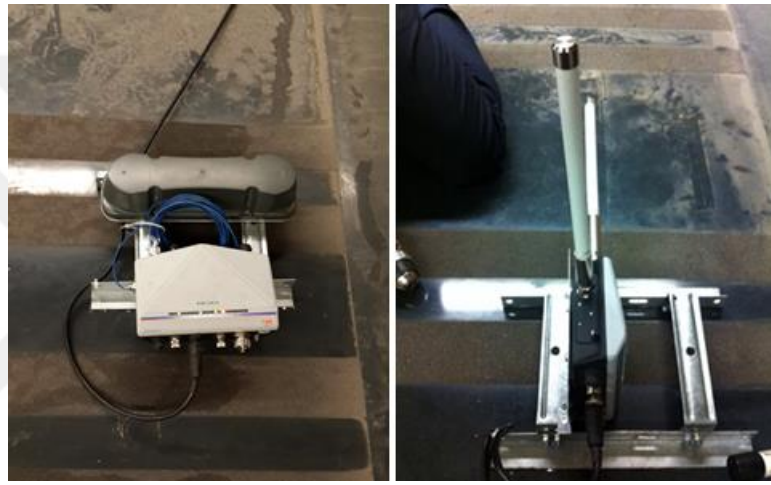


Şekil 4.32 Kabataş tarafı peron girişi

Erişim noktası cihazlarına bağlı olan antenler, hem dikey hem de yatay polarizasyonda yayın yapacak şekilde ayarlanmıştır ve polarizasyon çeşitliliği (polarization diversity) sağlanmıştır. Aynı şekilde trenlerin üzerine de yatay ve dikey polarizasyonlu antenler konulmuştur. Tünel çevresel şartlarından dolayı yansıyan sinyallerin bu durumda daha iyi alınabildiği gözlemlenmiştir. Bu yöntem ile tünelin belli bölgelerinde yaşanan kapsama kayıpları giderilmiş ve veri hızı değerleri artmıştır. Sonuç olarak tek

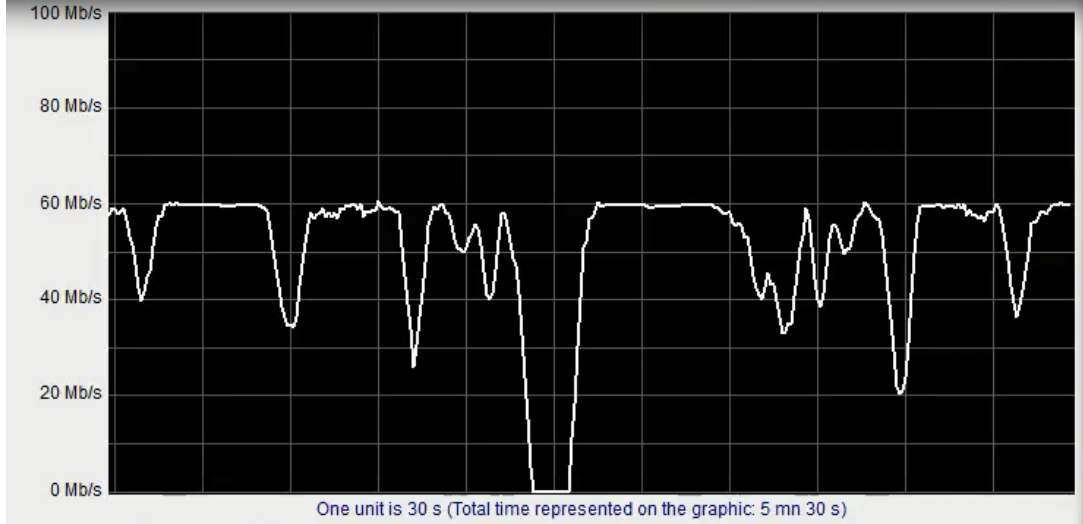
polarizasyona (dikey) göre hem yatay hem dikey polarizasyonlu çözümün daha iyi performans verdiği gözlemlenmiştir.

Araç üzerinde ilk uygulamalarda, araçlar için özel olarak tasarlanmış olan 9 dBi kazançlı, dikey polarizasyonlu, yönlü, shark tipi anten kullanılmıştır. Ancak bu antenler kısa oldukları için araç üzerindeki klimadan ve tek polarizasyonlu oldukları için de tünelin değişken eğiminden dolayı istenilen veri hızı değerleri sağlanamamıştır. Bunların yerine aynı kazançta hem yatay polarizasyon hem de dikey polarizasyonda 2 adet dipol tipi omni anten Şekildeki gibi kullanılmıştır. Şekil 4.33’de iki anten arasındaki görsel fark gösterilmiştir.



Şekil 4.33 Araç üstünde uygulanan shark anten ve dipol anten

Shark tipi antenin kullanıldığı durumlarda ortaya çıkan veri hızı değerleri Şekil 4.34’de gösterilmiştir. Trenin tünel boyunca hareketinde 20 Mb/s’a kadar düşmektedir ve tünelin Kabataş tarafındaki duvarlı bölümünde kapsama tamamen kesildiği için veri hızı 0 Mb/s olduğu görülmektedir. Şekilde her bir kare 30 s’lik süre dilimini göstermektedir. Trenin bir perondan hareket edip tekrar aynı perona gelişindeki veri hızı grafiği gösterilmiştir. Bu testte veri hızı maksimum 60 Mb/s hızında sınırlandırılmıştır.



Şekil 4.34 Tren üstü shark anten kullanıldığı durumda sonuçlar

Son durumda ise, tünel yapısından dolayı kapsamanın kesilmemesi için araç üzerine dikey ve yatay polarizasyonlu yayın yapan dipol omni anten takılmıştır. Şekil 4.35’de görüldüğü üzere trenin tünel boyunca hareketinde 55 Mb/s ortalama veri hızı sağlanmıştır. Tünelin kapsama alanı en düşük bölgesinde dahi 30 Mb/s veri hızı sağlandı görülmektedir.



Şekil 4.35 Araç üstü dipol antenler kullanıldığı durumda sonuçlar

İki trende de aynı sistem ve ürünler olmasına rağmen merkeze aktarılan veri hızı farklılık gösterebilir. Bu farklılık, kanaldan, antenden veya anten kablolarından dolayı olabilir. Bu durum ile karşılaşıldığında aşağıdaki çözümler uygulanarak sorun tespit edilerek giderilebilir. Problemin kaynağını tespit edilebilmek için trenlerin kullandığı

kanallar ve tünel içerisinde kullanılan radyo seçimleri değiştirilerek test edilebilir. Mevcut durumda, tren1 36. kanalı ve tüneldeki Erişim Noktası cihazlarının 1. radyosunu kullanmaktadır. Tren2 ise 100. kanalı ve tüneldeki Erişim Noktası cihazlarının 2. radyosunu kullanmaktadır. Tren1 100. kanalı, Tren2 ise 36. kanalı kullanacak şekilde kanallar değiştirilerek hem kanal hem de trenlerin bağlandığı anten/radyo gibi ekipmanlar değiştirilmiş olur. Değişiklik sonucunda problem diğer trende yaşanmaya başlarsa, adım adım tüneldeki Erişim noktası cihazlarında değişiklik yapılarak sorunun kaynağı bulunur. Değişiklik sonucunda problem yine tren2’de yaşanmaya devam ederse tren üzerindeki ekipmanlar kontrol edilir.



SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde yeraltı ulaşım sistemlerine büyük önem verilmekte ve sayıları hızlı bir şekilde artmaktadır. Yeraltında geçirilen sürenin artmasından dolayı, yolculara yönelik internet ve yolcu bilgilendirmesi gibi hizmetlerin sunulması, tren içerisinde multimedya uygulamaların artması kaçınılmazdır. Bunların yanı sıra İstanbul’da yeni yapılması planlanan Metro hatları tam otomatik sürücüsüz (UTO – Unattended train operation) sistemler olarak planlanmaktadır. Sürücüsüz metro standartlarına göre güvenlik önlemlerinin artırılması gerekmektedir. Bu bağlamda; tren içerisindeki kamera görüntülerinin, yolcu ile yapılan interkom görüşmelerinin ve tren alarm bilgilerinin kablosuz olarak kesintisiz ve gecikmesiz bir şekilde kontrol merkezine aktarılması büyük önem arz etmektedir. Tüm bu ihtiyaçlara cevap verebilmesi adına gelişmekte olan tren-yer kablosuz haberleşme teknolojisi incelenmiştir. Dünya metrolarında yapılan benzer uygulamalar araştırılmıştır. Metro alanında çözümler sunan üreticiler ile görüşmeler yapılarak en uygun çözümler değerlendirilmiştir.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar ile sürücüsüz olarak işletilmekte olan Taksim-Kabataş füniküler hattında tren ile merkez arasında kablosuz haberleşme altyapısı kurulmuştur. Sistem testleri gerçekleştirilerek devreye alınmıştır. Bu sayede tren içi kamera görüntülerinin kontrol merkezinden canlı olarak, gecikmesiz ve kesintisiz bir şekilde izlenebilmesi sağlanmıştır.

Öncelikli olarak, tünelin çevresel şartlarından dolayı oluşan haberleşme sinyallerine yaptığı bozucu etki, yapılan sinyal ölçümlerinden alınan sonuçlar ile birlikte hesaplanmıştır. Tünel boyunca kullanılacak Erişim Noktası cihazları yerleri tespit

edilmiş, montajları yapılmış, ayarlamaları gerçekleştirilmiştir. Tren üzerinde kullanılan anten tipleri güç hesapları yapılarak belirlenmiş ve tren ile testler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; tünel çevresel şartlarının kapsama alanına ve veri hızına etkisinin en aza indirilmesi için Erişim Noktası cihazlarının sayıları ve yerleri önemlidir. Ayrıca kullanılacak anten tipleri, kazançları ve yayın şekli çok iyi belirlenmelidir.

Yer altı kablosuz iletişim ağı uygulamalarında, tünel eğiminin, yüksekliğinin ve genişliğinin değişmesi, tünel geçişlerinde duvar olması gibi fiziki yapıdaki ani değişimler ve düzensiz çevre şartları, kapsama alanını ve dolayısıyla veri hızını olumsuz olarak etkilediği gözlemlenmiştir. Bu olumsuz etkilerin üstesinden gelebilmek için Erişim noktası sayısı artırılmış, yönlü antenlerin yanı sıra çok yönlü antenler de kullanılmıştır. İlave olarak tren üzerinde yatay ve dikey polarizasyon yapacak şekilde dipol antenler kullanılmıştır. Bu çalışmada, tren üzerinde ve Erişim Noktası cihazlarında kullanılan antenler bir birine 90° açı ile konumlandırılmıştır. MIMO sistemlerde, antenlere dikey ve yatay polarizasyon ile yayın yaptırarak polarizasyon çeşitliliği (polarization diversity) sağlanması, kapsama alanına ve iletim kapasitesine ciddi anlamda katkı sağladığı gözlemlenmiştir.

Metrolarda yapılacak kablosuz haberleşme ürünleri tercih edilirken, tünel çevresel şartlarından dolayı oluşacak olumsuz etkilerin azaltılması için 802.11 standartlarının özellikleri ile birlikte farklı haberleşme ve modülasyon teknikleri geliştirmiş cihazlar kullanılmalıdır. Hüzme biçimlendirme (beamforming) yöntemi ile anten yayınları doğrudan trenlere yönlendirerek yönlü anten gibi çalışması sağlanabilir. Anten gücünü bağlı bulunduğu cihaza odaklayarak hem güç tasarrufu sağlar hem de bağlantıdaki kararlılığı artırarak veri iletim hızına olumlu etki yapar. Bir diğer özellik ATPC (Adaptive Transmission Power Control) yöntemi ile anten güçleri verimli bir şekilde kullanılabilir. Bu yöntem sayesinde, tren antene yaklaştığında anten gücünü düşürerek sinyal bozulmaları azaltılmalı, uzaklaştığında gücünü artırarak sinyal zayıflamalarının önüne geçilerek veri hızında azalma olmadan iletişim sağlanabilmelidir. Trenin hızlı bir şekilde tünelde ilerleyişinden dolayı daha hızlı hand-over gerçekleşmesi için veri bağlantı katmanı (L2) ve ağ katmanında (L3) iyileştirmeler yapan, özel algoritmalar geliştiren kablosuz haberleşme cihazları tercih edilmelidir. Erişim noktası cihazlarını sadece veri iletimi yapan cihazlar olarak değil aynı zamanda tekrarlayıcı ve

yönlendirici olarak kullanan çözümler de bulunmaktadır. Patentli Layer2 routing teknolojisini kullanılarak en iyi veri hızı bağlantısı bulunup kurulabilmektedir. Veri paketlerinin birleştirilmesi, paket başlıklarının (header) azaltılması, veri paketlerine etiketleme yapılması (MPLS) ve paket önceliklendirmeleri yapılması gibi işlemleri özel algoritmalar ile yaparak hızlı ve güvenilir iletişim sağlayan ürünler tercih edilmelidir.

Tren-yer haberleşmesi uygulamalarında hand-over işlemlerini yönetmesi için dâhili ya da harici kablosuz kontrolör cihazı kullanılması önemlidir. Erişim Noktası cihazlarının tüneldeki yerleşimleri ve sinyal seviyelerine göre kablosuz kontrolör üzerinden gerekli optimizasyonlar yapılarak kusursuz hand-over işlemleri gerçekleştirilebilir. Aynı zamanda tren üzerinde çift anten kullanılması, bir antenin haberleşmeyi gerçekleştirmesi diğerinin en iyi sinyal seviyesini taramasını sağlayarak hand-over geçişlerini daha hızlı ve kolay olmasını sağlar. Bunun yanında bir Erişim Noktası cihazı arızalanması durumunda, en güçlü sinyal seviyesindeki diğerine bağlanması sağlanarak yedeklik sağlanmış olur.

İstanbul’da yapımı devam eden metro projeleri ile raylı sistem ağlarını kullanan günlük yolcu sayısının 2023 yılında 8 milyona ulaşması beklenmektedir. Bu durum insanların yer altında daha fazla zaman geçirecekleri anlamına gelmektedir. Dolayısıyla bundan sonraki çalışmalarda sadece trenden merkeze değil, merkezden de trene veri gönderilebilmesi için çalışmalar yapılarak tren içerisindeki yolculara internet hizmeti sunulabilmelidir. Bunun için, UDP upload veri hızlarının yanı sıra TCP verilerinin hızlı bir şekilde yolculara iletilebilmesi için download veri hızları da artırılmalıdır. İnternet erişimi, yolcunun istasyona girdiği anda başlayarak tünel içerisindeki yolculuğu boyunca sağlanabilmelidir. Bu kapsamda istasyon içerisinde de yüksek kapasiteli kablosuz haberleşme altyapısı oluşturulmalıdır. Bu altyapı ile istasyon içerisinde birçok haberleşme hizmeti, kolaylıkla ve düşük bir maliyetle sunulabilir duruma gelecektir.

IEEE 802.11 standartlarından en güncel olan IEEE 802.11ac standardının endüstriyel ve raylı sistem ürünleri hızla piyasada yer almaktadır. Bu standardın getirdiği çözümler metrolarda artan çoklu kullanıcı ve yüksek band genişliği ihtiyaçlarını karşılayacaktır. IEEE 802.11ac standardının kullanılması metro içerisindeki kablosuz haberleşme uygulamalarını hızlı bir şekilde artıracaktır.

KAYNAKLAR

-
- [1] Javier Alonso Valdesueiro, Benjamin Izquierdo, ve Jordi Romeu, 2010, "On 2x2 MIMO Observable Capacity in Subway Tunnels at C -Band: An Experimental Approach"
 - [2] Jia-Chyi Wu, Chi-Min Li, ve Kuo-Hsean Chen, 2010, "Adaptive Video Transmission over Wireless MIMO System".
 - [3] Kosuke Morinaga, Hiroshi Tsutsui, ve Yoshikazu Miyanaga, 2012, "An Evaluation of Wireless Video Transmission Using Lossless Video Compression and 8x8 MIMO-OFDM Wireless Transceiver", 13. International symposium on Communication and Information Technologies (ISCIT)
 - [4] Li Zhu, F. Richard Yu, Senior Member, Bin Ning ve TaoTang, 2011, "Cross-Layer Design for Video Transmissionsin Metro Passenger Information Systems", IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 60, NO. 3.
 - [5] Aydın H., (2010). Çoklu Kanal Kullanımlı Kablosuz Ağ Standartı 802.11n' nin Özellikleri ve Performans Analizleri, Yüksek Lisans Tezi, Beykent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
 - [6] Gezin D.M, (2011). Kablosuz Ağ Teknolojileri ve Şifreleme, Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
 - [7] Kaplan Y., (2002). Kablosuz LAN Teknolojileri.
 - [8] Paul T., Ogunfunmi T., 2008, "Wireless LAN Comes of Age: Understanding the IEEE 802.11n Amendment", IEEE Circuits and System Magazine.
 - [9] Ortiz S., Garber L.,2009, "IEEE 802.11n: The Road Ahead", Technology News, 0018-9162/09/\$25.00 © 2009 IEEE.
 - [10] "802.11n: The Next Generation of Wireless Performance", Cisco Public Information, USA, 2009.
 - [11] Garuda C. ve Ismail M., 2005, "A Multi-Standard OFDM-MIMO Transceiver for WLAN Applications", IEEE Analog VLSI Lab, The Ohio State University Columbus, OH, USA.
 - [12] Chang, R. W., 1996, "Synthesis of band limited orthogonal signals for multi channel data transmission", Bell System Technical Journal 46, pp.1775-1796

- [13] Bahai, A. R. S., Saltzberg, B. R., Ergen, M., 2004, " Multi Carrier Digital Communications: Theory and Applications of OFDM", Springer.
- [14] Yilmaz M.S., 2002, " Kablosuz Bilgisayar Ağları Üzerine IEEE 802.11a Protokolü"
- [15] IEEE,802.11a-1999 High-speed Physical Layer in the 5 GHz band (1999-02 11). Retrieved on 2007-09-24.
- [16] Kaplan Y., 2002, "Kablosuz LAN teknolojileri"
- [17] IEEE, 802. 11b-1999 Hiher Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz band 2007-09 -24
- [18] IEEE 802.11g-2003: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band. IEEE (2003-10-20).
- [19] Perahia E., 2008, " IEEE 802.11n Development: History, Process, and Technology", Intel Corporation, 0163-6804/08/\$25.00 © 2008 IEEE, IEEE Communications Magazine .
- [20] XIAO Y,2005, "IEEE 802.11n: Enhancements For Higher Throughput in Wireless LANs" , 1536-1284/05/\$20.00 © 2005 IEEE, IEEE Wireless Communications.
- [21] Öztürk E., 2004, "WLAN Kablosuz Yerel Alan Ağları (Wireless Local Area Networks) Teknolojisinin İncelenmesi, Mevcut Düzenlemelerin Değerlendirilmesi Ve Ülkemize Yönelik Düzenleme Önerisi". Telekomünikasyon Kurumu .
- [22] "Certificated Wireless Network Administrator Official Studies Guide", Planet3 Wireless, USA, 2002.
- [23] OZDEMİR G., TASPINAR N.,2003, "OFDM ile MC-CDMA Sistemlerinin Karşılaştırılması", Erciyes Üniversitesi, Muhendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Muhendisliği, Kayseri.
- [26] Yoshio K., Tetsuki T., 2002, "On Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO) Maximal Ratio Combining (MRC) and Optimal Data Transmission for OFDM", pp. 45-52
- [27] Gezgin D.M., Buluş E., Buluş H.N., 2008 ,"The Technical Analysis of the Comparison of 802.11n Wireless Network Standard", International Scientific Conference, Gabrovo
- [28] Cisco Network Academy Networking Home and Small Business CCNA Certification Program
- [29] Hneiti, W., Ajlouni, N. "Dependability Analysis of Wireless Local Area Networks", Amman Arab University, 2006.
- [30] "Wi-Fi CERTIFIED™ 802.11n draft 2.0: Longer-Range, Faster-Throughput, Multimedia-Grade Wi-Fi® Networks", Wi-Fi Alliance, 2007.
- [31] Tasarlı (Infrastructure) Mod Yapısı, Eusso Technology

- [33] Gilbert J. M., Cho W.J., Sun Q., 2005, "MIMO Technology for Advanced Wireless Local Area Networks", Atheros Communications, DAC, , Anaheim, California, USA.
- [35] <http://www.culha.net/tag/beamforming-nedir/>
- [36] "What to Expect from 802.11ac (White Paper)", Aruba Networks, (2012).
- [37] "802.11ac: The Fifth Generation of Wi-Fi (White Paper)", Cisco, (2012).
- [38] Hakkı Soy, Özgür Özdemir ve Mehmet Bayrak,2013, "Kablosuz Yerel Alan Ağlarında Güncel Gelişmeler: IEEE 802.11ac ile Yeni Nesil Gigabit Wi-Fi" .
- [39] "IEEE 802.11ac: Technical Overview and Challenges for Manufacturing Test (White Paper)", Aeroflex, (2012).
- [40] "Fiber in MotonTM Train-to-Ground Solution Moscow Metro Case Study" PROVIDING HIGH-SPEED INTERNET TO MILLIONS OF PASSENGERS,2014.
- [41] "Seoul Korea's Subway System, Wireless Mesh Delivers Unique Ability to Provide High-Performance Real-Time Video Streaming in Challenging Subway Environment to and from Trains Moving at 50 mph,2009.
- [42] "Case Study New York City Transit Motorola's WLAN Technology", 2014.
- [43] "Motorola Solutions Motorola Solutions How To – WiNG 5.2.2 MeshConnex", 2012.
- [44] Alberto Forchino, 2009, "On-Board Video Surveillance with Real Time Wireless Transmission: Turin Metro Case Study"
- [45] Kljujić J.S, Radivojević M.R, 2009, "Testing of Multimedia Content Transmission in Wireless 802.11n Network", TELSIKS, 978-1-4244-4383-3/09©2009 IEEE.
- [46] Akın,G.,2011, "Ad-Hoc Wireless Network", Trakya Üniversitesi.
- [47] Hassen A. M., Mohamed O., Shamala S. ve A. W. AbdulHamid, 2012, "High Throughput Path Establishment for Common Traffic in Wireless Mesh Network"
- [48] Z. Lee, D. Wu, "A Train-to-Ground Network for Onboard CCTV, Voice, and Data", 2013.

ERİŞİM NOKTASI CİHAZI

AWK-6232 Series

Outdoor industrial IEEE 802.11a/b/g/n dual-radio wireless AP/bridge/client



- > IEEE 802.11a/b/g/n compliant
- > Dual-radio design for 2.4 GHz and/or 5 GHz bands
- > M12 anti-vibration connectors
- > Industrial grade QoS (WMM) and VLAN supported
- > Supports client-based Turbo Roaming
- > Rugged IP68-rated housing and -40 to 75°C operating temperature



Introduction

Moxa's AWK-6232 3-in-1 outdoor wireless AP/bridge/client meets the growing need for faster data transmission speeds and wider coverage by supporting IEEE 802.11n technology with a net data rate of up to 300 Mbps for each radio module. The AWK-6232 provides a flexible and efficient way to deploy your wireless network with its dual 2.4/5 GHz RF modules, which allow two independent wireless connections over different frequencies. The AWK-6232 is compliant with the industrial standards and approvals covering operating temperature, power input voltage, surge, ESD, and vibration. In addition, the AWK-6232 is housed in an IP68 metal casing with M12 connectors for total protection against dust, water, vibration, and other environmental effects.

Improved Higher Data Rate and Bandwidth

- High-speed wireless connectivity with up to 300 Mbps data rate for each radio module
- MIMO technology to improve the capacity of multiple data stream transmits and receives
- Increased channel width with channel bonding technology

Features for Critical Environments

- IP68-rated metal housing and -40 to 75°C wide operating temperature
- Anti-vibration M12 design and waterproof/dust-tight RJ45 connectors
- Wall, DIN-rail, and pole-mounting options for versatile outdoor installation

802.11g:

-87 dBm @ 6 Mbps, -86 dBm @ 9 Mbps,
-85 dBm @ 12 Mbps, -82 dBm @ 18 Mbps,
-80 dBm @ 24 Mbps, -76 dBm @ 36 Mbps,
-72 dBm @ 48 Mbps, -70 dBm @ 54 Mbps

802.11n (2.4 GHz):

-69 dBm @ MCS15 20 MHz,
-71 dBm @ MCS7 20 MHz

802.11a:

-87 dBm @ 6 Mbps, -86 dBm @ 9 Mbps,
-85 dBm @ 12 Mbps, -82 dBm @ 18 Mbps,
-80 dBm @ 24 Mbps, -76 dBm @ 36 Mbps,
-72 dBm @ 48 Mbps, -70 dBm @ 54 Mbps

802.11n (5 GHz):

-68 dBm @ MCS15 40 MHz, -69 dBm @ MCS15 20 MHz,
-70 dBm @ MCS7 40 MHz, -71 dBm @ MCS7 20 MHz

Protocol Support

General Protocols: Proxy ARP, DNS, HTTP, HTTPS, IP, ICMP, SNMP, TCP, UDP, RADIUS, SNMP, DHCP, VLAN, STP/RSTP

Interface

Default Antennas: 4 dual-band omni-directional antennas, 5 dBi at 2.4 GHz, 2 dBi at 5 GHz, N-type (male)

Connector for External Antennas: N-type (female)

LAN Ports: 2, 8-pin M12 A-coded (female), 10/100/1000BaseT(X), auto negotiation speed, F/H duplex mode, and auto MDI/MDI-X connection (female)

Console Port: RS-232 (waterproof RJ45-type)

Reset: Present

LED Indicators: PWR, FAULT, STATE, WLAN1, WLAN2, LAN1, LAN2

Alarm Contact (digital output): 8-pin M12 A-coded (male), 1 relay output with current carrying capacity of 1 A @ 24 VDC

Digital Inputs: 8-pin M12 A-coded (male), 2 electrically isolated inputs

• +13 to +30 V for state "1"

• +3 to -30 V for state "0"

• Max. input current: 8 mA

Management

Device Management: Wireless Search Utility, SNMP

Physical Characteristics

Housing: Metal, IP68 protection

Weight: 1699 g (3.75 lb)

Dimensions: 224 x 148 x 67 mm (8.82 x 5.82 x 2.62 in)

Installation: Wall mounting (standard), DIN-rail mounting (optional), pole mounting (optional)

Environmental Limits

Operating Temperature: -40 to 75°C (-40 to 167°F)

Storage Temperature: -40 to 85°C (-40 to 185°F)

Ambient Relative Humidity: 5% to 95% (non-condensing)

Power Requirements

Input Voltage: 12 to 48 VDC, redundant dual DC power inputs or 48 VDC Power-over-Ethernet plus (IEEE 802.3at compliant)

Input Current: 1.5 A @ 12 VDC

Connector: 5-pin M12 A-coded (male)

Power Consumption: 18 W

Reverse Polarity Protection: Present

Standards and Certifications

Safety: UL 60950-1, EN 60950-1

EMC: EN 55022/24

EMI: CISPR 22, FCC Part 15B Class A

EMS:

IEC 61000-4-2 ESD: Contact: 8 kV; Air: 15 kV

IEC 61000-4-3 RS: 80 MHz to 1 GHz: 10 V/m

IEC 61000-4-4 EFT: Power: 4 kV; Signal: 2 kV

IEC 61000-4-5 Surge: Power: 2 kV; Signal: 1 kV

IEC 61000-4-6 CS: 10 V

IEC 61000-4-8

Radio: EN 301 489-1/17, EN 300 328, EN 301 893, TELEC, FCC ID SLE-WAPN001

Note: Please check Moxa's website for the most up-to-date certification status.

MTBF (mean time between failures)

Time: 317,948 hrs

Standard: Telcordia SR332

Warranty

Warranty Period: 5 years

Details: See www.moxa.com/warranty

: Specifications

WLAN Interface

Standards:

IEEE 802.11a/b/g/n for Wireless LAN

IEEE 802.11i for Wireless Security

IEEE 802.3 for 10BaseT

IEEE 802.3u for 100BaseTX

IEEE 802.3ab for 1000BaseT

IEEE 802.3at for Power-over-Ethernet Plus

IEEE 802.1D for Spanning Tree Protocol

IEEE 802.1w for Rapid STP

IEEE 802.1Q VLAN

Spread Spectrum and Modulation (typical):

• DSSS with DBPSK, DQPSK, CCK

• OFDM with BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM

• 802.11b: CCK @ 11/5.5 Mbps, DQPSK @ 2 Mbps, DBPSK @ 1 Mbps

• 802.11a/g: 64QAM @ 54/48 Mbps, 16QAM @ 36/24 Mbps,

QPSK @ 18/12 Mbps, BPSK @ 9/6 Mbps

• 802.11n: 64QAM @ 300 Mbps to BPSK @ 6.5 Mbps (multiple rates supported)

Operating Channels (central frequency):

US:

2.412 to 2.462 GHz (11 channels)

5.18 to 5.24 GHz (4 channels)

EU:

2.412 to 2.472 GHz (13 channels)

5.18 to 5.24 GHz (4 channels)

JP:

2.412 to 2.472 GHz (13 channels, OFDM)

2.412 to 2.484 GHz (14 channels, DSSS)

5.18 to 5.24 GHz (4 channels for W52)

Security:

• SSID broadcast enable/disable

• Firewall for MAC/IP/Protocol/Port-based filtering

• 64-bit and 128-bit WEP encryption, WPA/WPA2-Personal and Enterprise (IEEE 802.1X/RADIUS, TKIP, and AES)

Transmission Rates:

802.11b: 1, 2, 5.5, 11 Mbps

802.11a/g: 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbps

802.11n: 6.5 to 300 Mbps (multiple rates supported)

TX Transmit Power:

802.11b:

Typ. 18±1.5 dBm @ 1 to 11 Mbps

802.11g:

Typ. 18±1.5 dBm @ 6 to 24 Mbps,

Typ. 17±1.5 dBm @ 36 to 48 Mbps,

Typ. 15±1.5 dBm @ 54 Mbps

802.11n (2.4 GHz):

Typ. 14±1.5 dBm @ MCS15 20 MHz

802.11a:

Typ. 17±1.5 dBm @ 6 to 24 Mbps,

Typ. 16±1.5 dBm @ 36 to 48 Mbps,

Typ. 14±1.5 dBm @ 54 Mbps

802.11n (5 GHz):

Typ. 13±1.5 dBm @ MCS15 20 MHz,

Typ. 12±1.5 dBm @ MCS15 40 MHz

RX Receive Sensitivity:

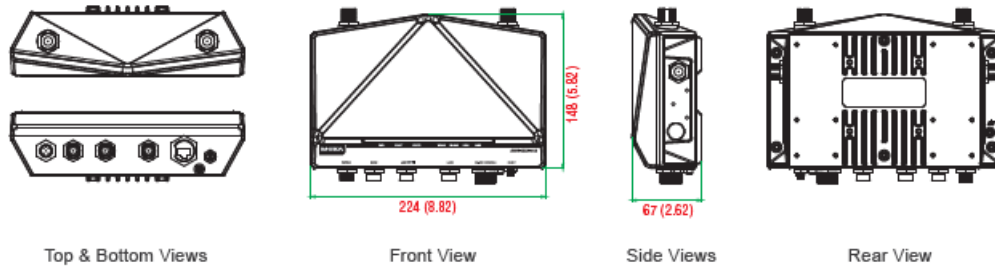
802.11b:

-92 dBm @ 1 Mbps, -90 dBm @ 2 Mbps,

-88 dBm @ 5.5 Mbps, -84 dBm @ 11 Mbps

Dimensions

Unit: mm (inch)



Ordering Information

Available Models

AWK-6232-M12-US-T: IEEE 802.11a/b/g/n IP68 dual-radio wireless AP/bridge/client, US band, -40 to 75°C operating temperature

AWK-6232-M12-EU-T: IEEE 802.11a/b/g/n IP68 dual-radio wireless AP/bridge/client, EU band, -40 to 75°C operating temperature

AWK-6232-M12-JP-T: IEEE 802.11a/b/g/n IP68 dual-radio wireless AP/bridge/client, JP band, -40 to 75°C operating temperature

Note: Please visit Moxa's website for a complete list of optional wireless accessories and antennas available for Moxa's wireless products.

Package Checklist

- AWK-6232 wireless AP/bridge/client
- 4 2.4/5 GHz antennas: ANT-WDB-ANM-0502
- Wall-mounting kit (includes 2 supports)
- Field-installable power plug
- Field-installable Ethernet plug
- 1 metal cap to cover RJ45 connector
- 1 metal cap to cover M12-female LAN connector
- 1 metal cap to cover M12-male DI/O connector
- 2 transparent plastic sticks for field-installable plugs
- Documentation and software CD
- Quick installation guide (printed)
- Warranty card

ANT-WSB5-PNF-18

Directional panel antenna: 18 dBi at 5 GHz



- > High-gain antenna to enhance performance
- > Waterproof N-type connector
- > Lightweight
- > Compact form factor
- > Pole-mounting support
- > IP65 protected housing
- > -40 to 80°C operating temperature range

: Specifications

Antenna Characteristics

Frequency: 5.1 to 5.9 GHz
Antenna Type: Directional panel type
Typical Antenna Gain: 18 dBi
Connector: N-type (female)
Impedance: 50±5 ohms
Polarization: Linear
HPBW/horizontal: 10°
HPBW/vertical: 10°
V.S.W.R.: 1:1.5 max.
Power Handling: 10 W max.

Physical Characteristics

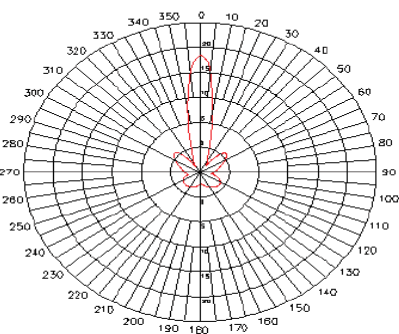
Weight: 310 g
Dimensions: 270 x 205 x 15 mm
IP Rating: IP65
Radome Color: Grayish white
Radome Material: PC and ABS

Environmental Limits

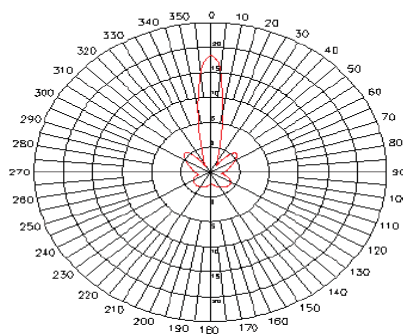
Operating Temperature: -40 to 80°C (-40 to 176°F)
Storage Temperature: -40 to 80°C (-40 to 176°F)
Ambient Relative Humidity: 5 to 95% (30°C, non-condensing)

: Field Patterns

H-Plane



E-Plane



Data Sheet

SENCITY® Spot-S WiFi Antenna 1356.17.0077

SPA-5600/40/14/0/V_2

Description

Directional, planar, linear vertical polarized WiFi antenna with 14 dBi gain
WLAN IEEE 802.11 a/h/p - WiFi bands 5.15 to 5.975 GHz
Approved acc. to EN 50155 (2007) and EN 45545-2 (2012) for railway rolling stock and EN 50125-3 (2003) for railway signalling and telecommunications on track-side
For outdoor and indoor applications
Ingress protection IP 66 and IP 67

Wall mounting material included



Product Configuration

Technical Data

Electrical Data

	Band 1
Frequency (MHz)	5150 - 5975
VSWR	1.5
Impedance (Ohm)	50
Gain (dBi)	14
3dB beamwidth (h) (°)	40
3dB beamwidth (v) (°)	35
Front to back ratio (dB)	20
Vertical electrical tilt (°)	0

Ports

	Port 1
Connector	N, jack (female)
Polarization	vertical

General Data

Composite Power max (W) 10

- Meets EN 50155 railway standard fire retardant acc. to DIN 5510-2, EN 45545-2, BS 6853, and outdoor use acc. to NF F16-101/102
- Meets environmental standards according to EN 60068

Mechanical Data

Dimensions (mm)	101 x 81 x 38 (Height x Width x Depth)
Weight (kg)	0.11
Windload	frontal: 15 N at 180 km/h , Wind speed survival: 220 km/h
Included mounting material	Wall mounting material

Environmental Data

Environmental conditions	outdoor
Operation temperature (°C)	-40 to 85
Storage temperature (°C)	-40 to 85
Transport temperature (°C)	-40 to 85
Flammability rating	UL 94-V0
Solar radiation	UL 748C, F1
RoHS 2011/65/EC	compliant
Lead-free soldered	yes
REACH 2006/1907/EC	compliant

IP RATING: IP 66 / IP 67 (IEC 60529)

SOLAR RADIATION: EN 50125-3:2004 §4.9, 1120 W/m² for 20h

ANT-WDB-ANF-0609

Dual-band omni-directional antenna: 6 dBi at 2.4 GHz or 9 dBi at 5 GHz



- > High-gain antenna to enhance performance
- > Waterproof N-type connector
- > Lightweight
- > Compact form factor
- > Pole-mounting support
- > Housing provides IP65 protection
- > -40 to 80°C operating temperature range

Specifications

Antenna Characteristics

Frequency: 2.4 to 2.5 or 5.1 to 5.9 GHz

Antenna Type: Omni-directional

Typical Antenna Gain: 6/9 dBi

Connector: N-type (female)

Impedance: 50 ± 5 ohms

Polarization: Linear

HPBW/horizontal: 360°

HPBW/vertical: $8/10^\circ$

V.S.W.R.: 1:1.5 max.

Power Handling: 10 W max.

Physical Characteristics

Weight: 286 g

Dimensions:

Diameter: 35 mm

Length: 660 mm

IP Rating: IP65

Radome Color: White

Radome Material: Glass fiber

Environmental Limits

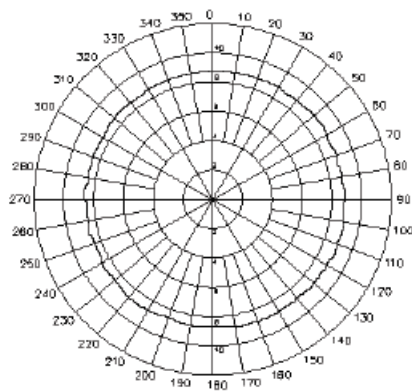
Operating Temperature: -40 to 80°C (-40 to 176°F)

Storage Temperature: -40 to 80°C (-40 to 176°F)

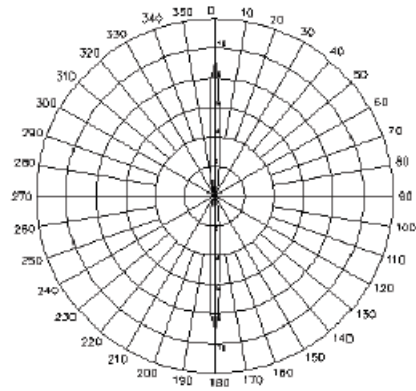
Ambient Relative Humidity: 5 to 95% (30°C, non-condensing)

Field Patterns

H-Plane for 5 GHz



E-Plane for 5 GHz



HESAPLAMA PROGRAMI

MOXA®

WLAN Calculator

Industrial Wireless LAN

Moxa WLAN Calculator

- ◆ Link Budget Calculator
- ◆ Free Space Loss
- ◆ Fresnel Clearance Zone
- ◆ Antenna Downtilt

Link Budget Calculator

Free Space Loss

Fresnel Clearance Zone

Antenna Downtilt

After you enter your parameters (such as access points, antennas, cables, etc.), the calculator generates the required RX sensitivity and the estimated RX signal strength in the receiver end. Please make sure that the RX signal strength is higher than the RX sensitivity in order to maintain the wireless communication.

Note:
Calculated results provided on this site are for design references only. On-site verification is required to obtain actual values.

Device A	Path	Device B
Model Name AWK-1121 Frequency 2.4 GHz 2412 MHz Data Rate 1 Mbps Required RX Sensitivity -97 dbm TX Power 18 dBm Antenna Gain ANT-WDB-ANF-0407 4 dBi RF Cable Loss A-CRF-NMNM-LL4-300 1 dB (Loss) RX Signal Strength -82 dBm	Distance 1 km Free Space Loss (Path Loss) 100 (dB) Reserved Safety Factor (1/4), Less cont 6 dB	Model Name AWK-1121 Frequency 2.4 GHz 2412 MHz Data Rate 1 Mbps Required RX Sensitivity -97 dbm TX Power 18 dBm Antenna Gain ANT-WDB-ANF-0407 4 dBi RF Cable Loss A-CRF-NMNM-LL4-300 1 dB (Loss) RX Signal Strength -82 dBm

Maximum Transmission Distance (Based on all aboved input values): 5.593 km

☐ Display Transmission Distance Chart

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Hüseyin DOĞAN
Doğum Tarihi ve Yeri : 16.11.1985 - Sandıklı
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : hsydogan@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği	Kocaeli Üniversitesi	2008
Lise	Fen Bilimleri	Ümraniye Lisesi (YDA)	2003

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2016 -	Metro İstanbul A.ş.	Seyrantepe Bölge Elektronik Sistemler Şefi
2011 -2016	İstanbul Ulaşım A.ş.	Haberleşme Sistemleri Mühendisi
2009-2010	Innova Medikal A.ş.	Bakım Mühendisi