



2025 / 2026 GÜZ DÖNEMİ

**EHB 473 Mikrodalga ve RF Haberleşmesi
Dönem Projesi**

Hazırlayanlar:

Ahmet Utku Alkan / 040220116

Erol Tetik / 040220034

İÇİNDEKİLER

1. PROJENİN KAPSAMI VE SAHA ANALİZİ

- 1.1. Konum ve Coğrafi Analiz
- 1.2. Teknik Gereksinimler ve Hedefler

2. SİNYAL PARAMETRELERİ, MODÜLASYON VE BANT GENİŞLİĞİ ANALİZİ

- 2.1. Frekans Bandı ve Kanal Planlaması
- 2.2. Trafik Kafapistesi ve Bit Hızı Hesaplamaları
- 2.3. Modülasyon Seçimi ve Spektral Verimlilik Analizi
- 2.4. X-Y-Z Yöntemi ile Bant Genişliği ve Spektrum Planlanması

3. FRESNEL BÖLGESİ, DÜNYA EĞRİLİĞİ VE GÖRÜŞ HATTI (LOS) ANALİZİ

- 3.1. Birinci Fresnel Yarıçapı ve Açıklık Kriteri
- 3.2. Çevresel Engeller ve Toplam Yükseklik Gereksinimi
- 3.3. Dünya Eğriliği ve Atmosferik Kırılma (Earth Bulge) Etkisi
- 3.4. Kule Yükseklikleri ve Görüş Hattı (LOS) Uygunluk Denetimi

4. HESAPLAMALAR VE LİNK BÜTÇESİ ANALİZİ

- 4.1. Aşım Olasılığı (P_o)
- 4.2. Serbest Uzay Yol Kaybı (L_p)
- 4.3. Fade Marjı (F)
- 4.4. Anten Kazançları (G)

5. SİSTEM KAZANCI, KAYIPLARI VE ALICI EŞİĞİ (RSLm)

- 5.1. Sistem Kayıpları
- 5.2. Sistem Kazancı (G_s)
- 5.3. RSLm (Alıcı Eşiği)
- 5.4. Toplam Sistem Kazancı ve Tasarımın Güvenlik Marjı Analizi

6. ÇEŞİTLİLİK (DİVERSİTE) TEKNİKLERİ VE VARSAYIMLAR

- 6.1 Uzay Diversitesi
- 6.2. Uzay Diversitesi - Varsayım
- 6.3. Frekans Diversitesi
- 6.4. Frekans Diversitesi - Varsayım

7. SONUÇ VE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZ

- 7.1. Performans Değerlendirmesi
- 7.2. Teknik Analiz ve Nihai Karar

8. KAYNAKÇA

1. PROJENİN KAPSAMI VE SAHA ANALİZİ

Bu proje çalışması kapsamında, İstanbul'un stratejik iki noktası olan Avrupa Yakası'ndaki Kabataş Erkek Lisesi ile Anadolu Yakası'ndaki Üsküdar Nakkaştepe mevki arasında, yüksek güvenilirlikli bir mikrodalga radyo link (Point-to-Point) tasarımı gerçekleştirilmiştir. Modern haberleşme sistemlerinde veri iletim hızı kadar iletimin sürekliliği de kritik önem taşıdığından, bu tasarımda yıllık kesinti süresi maksimum 5 saniye olacak şekilde oldukça düşük bir hata toleransı (high availability) hedeflenmiştir.

1.1. Konum ve Coğrafi Analiz: Sinyal iletiminin gerçekleştirileceği güzergah, İstanbul Boğazı'nı dikey olarak kesmektedir. Söz konusu güzergahın coğrafi konumu ve istasyon noktaları **Şekil 1**'de sunulmuştur. Bu durum, mikrodalga sinyallerinin su yüzeyinden yansımaları (multipath fading) riskini beraberinde getirmektedir.

- **Verici Terminali (Tx):** Kabataş Erkek Lisesi binasının çatısına konumlandırılmıştır. Kule yüksekliği 19.5 metre olarak sisteme dahil edilmiştir.
- **Alıcı Terminali (Rx):** Üsküdar Nakkaştepe mevki olarak seçilmiştir. Alıcı noktasının yerden yüksekliği 64.4 metredir.
- **Bağlantı Mesafesi:** İki istasyon arasındaki mesafe tam olarak 1.609 km (1 mil) olarak belirlenmiştir.



Şekil 1: Kabataş Erkek Lisesi ve Nakkaştepe Mevkii Arasındaki 1.6 km'lik Radyolink Güzergahı.

1.2. Teknik Gereksinimler ve Hedefler: Tasarım sürecinde, sistemin 8 GHz frekans bandında çalışması kararlaştırılmıştır. Bu frekans bandı, özellikle şehir içi kısa mesafe link kurulumlarında spektrum verimliliği ve atmosferik olaylara karşı direnci nedeniyle tercih edilmiştir. Projenin temel teknik hedefleri şunlardır:

- Polarizasyon kaybını minimize etmek için dik (vertical) polarizasyon kullanımı.
- Yıllık %99.9999 (yılda 5 saniye) kullanılabilirlik oranına ulaşmak.
- Kısıtlı bant genişliği içerisinde maksimum veriyi taşımak için ileri seviye modülasyon tekniklerini kullanmak.

2. SİNYAL PARAMETRELERİ, MODÜLASYON VE BANT GENİŞLİĞİ ANALİZİ

Sistemin haberleşme kapasitesi ve spektrum verimliliği, hedeflenen veri hızına ve uluslararası standartlara uygun olarak yapılandırılmıştır. Bu bölüm, sistemin fiziksel katmanındaki temel parametreleri ve bant genişliği kullanım stratejilerini kapsamaktadır.

2.1. Frekans Bandı ve Kanal Planlaması: Tasarım için çalışma frekansı olarak 8 GHz bandı (7.725 - 8.500 GHz aralığı) seçilmiştir. Bu seçimde, noktadan noktaya (P2P) sistemler için belirlenen uluslararası standartlar dikkate alınmıştır. Şekil 2'de sunulan kanal düzenleme tablosunda görüldüğü üzere, 8 GHz bandı için CEPT ve ITU-R tarafından belirlenen standartlar, spektrumun en verimli şekilde kullanılmasına olanak tanımaktadır. Projemizdeki kanal yerleşimi bu frekans planı sınırları içerisinde kalarak diğer bantlara müdahale etmeyecek şekilde kurgulanmıştır.

Table 11: Channel arrangement for the ECC/REC/(02)06 – version 2011

ECC/REC/(02)06	Frequency ranges (MHz)				
	7125 - 7425	7425 - 7725	7725 - 7900	7900 - 8275	8275 - 8500
Annex 1 (1 st Option for the whole range)	1st range Arrangement ECC/REC/(02)06 V.2011 An.1.1 (ECC/REC/(02)06 V.2002 An 1.1)	2nd range Arrangement ECC/REC/(02)06 V.2011 An.1.1 (ECC/REC/(02)06 V.2002 An 1.2)	3rd range Arrangement ECC/REC/(02)06 V.2011 An.1.2.2 or An.1.2.1 (new 28 MHz channel arrangement)		4th range Arrangement ECC/REC/(02)06 V.2011 An.1.3 (from ITU-R F.386-8 Annex 2)
Annex 2 (2 nd Option for the whole range)	1st range Arrangement ECC/REC/(02)06 V.2011 An.2.1 (same as ECC/REC/(02)06 V.2011 An.1.1 (ECC/REC/(02)06 V.2002 An 1.1)	2nd range Arrangement ECC/REC/(02)06 V.2011 An.2.2 (from ITU-R F.385-9 Annex 4)		3rd range Arrangement ECC/REC/(02)06 V.2011 An.2.3 (ECC/REC/(02)06 V.2002 An 2)	

Şekil 2: 8 GHz Bandı İçin Uluslararası Frekans Kanal Planlaması.

2.2. Trafik Kapasitesi ve Bit Hızı Hesaplamaları Sistemin toplam taşıma kapasitesi, telefon kanalları üzerinden aşağıdaki parametrelerle belirlenmiştir:

- **Birim Kanal Hızı:** Her bir standart telefon kanalı için bit hızı 64 kb/s olarak baz alınmıştır.
- **Toplam Kanal Sayısı:** Sistemin 2000 adet telefon kanalını eşzamanlı olarak taşıması hedeflenmiştir.
- **Toplam Bit Hızı (R_{top}):** 2000 kanal x 64 kb/s hesabı ile sistemin toplam veri hızı 128 Mb/s olarak hesaplanmıştır.

2.3. Modülasyon Seçimi ve Spektral Verimlilik Analizi

Sistemin hedeflenen 128 Mb/s toplam bit hızını, mevcut spektrum kaynaklarını israf etmeden taşıyabilmesi için modülasyon tekniği kritik bir rol oynamaktadır. Bu doğrultuda yapılan teknik

analizler sonucunda **16-QAM (16-Quadrature Amplitude Modulation)** modülasyonu tercih edilmiştir.

- **Veri Taşıma Kapasitesi:** 16-QAM, genlik ve faz kaydırmalı anahtarlama birleştirilerek her bir sembolde 4 bit veri taşınmasına olanak tanır ($\log_2(16) = 4$ bit/symbol). Bu durum, QPSK gibi daha basit modülasyonlara göre aynı bant genişliğinde iki kat daha fazla veri iletimi sağlar.
- **Hata Olasılığı ve BER Performansı:** Sistemin yıllık 5 saniye kesinti hedefi doğrultusunda, 16-QAM modülasyonunun bit hata oranı (BER) performansı incelenmiştir. Yapılan simülasyon ve tablo analizleri sonucunda, 1.586×10^{-7} düzeyindeki düşük BER hedefine ulaşmak için gerekli olan E_b/N_0 değerinin yaklaşık 15 dB olduğu saptanmıştır.
- **Sistem Esnekliği (Alt Kanallara Bölme):** Toplam 128 Mb/s trafik tek bir taşıyıcı üzerinden gönderilmek yerine, donanımsal yükü hafifletmek ve frekans seçici sönmülemelere karşı direnç oluşturmak amacıyla $n=6$ adet alt kanala bölünmüştür. Bu yapılandırma ile her bir alt kanal 21.33 Mb/s hızında veri taşımakta, böylece daha düşük sembol hızları ile ISI (semboller arası girişim) riski minimize edilmektedir.

2.4. X-Y-Z Yöntemi ile Bant Genişliği ve Spektrum Planlaması

Mikrodalga sistemlerde gerçek bant genişliği ihtiyacı, sadece verinin hızıyla değil; aynı zamanda filtreleme karakteristikleri, koruma bantları (guard bands) ve kanallar arası yerleşim mesafeleriyle belirlenir. Bu tasarımda, endüstri standardı olan **X-Y-Z yöntemi** kullanılarak toplam bant genişliği (BW) hesaplanmıştır.

- **Pratik Katsayıların Belirlenmesi:** Hesaplamalarda sistemin spektral verimliliğini ve filtre keskinliğini temsil eden pratik katsayılar $X = 1.75$, $Y = 2.35$ ve $Z = 1$ olarak tanımlanmıştır.
- **Frekans Parametrelerinin Hesaplanması:** Alt kanal bit hızı ve modülasyon verimi dikkate alınarak temel frekans bileşenleri şu şekilde bulunmuştur:
 - **XS (Kanal Aralığı):** $1.75 * 5.33 = 9.33$ MHz olarak hesaplanmış olup, ana kanalların merkez frekansları arasındaki mesafeyi tanımlar.
 - **YS (Orta Boşluk):** $2.35 * 5.33 = 12.52$ MHz olarak belirlenmiş olup, gidiş ve dönüş (Tx/Rx) bantları arasındaki izolasyon mesafesini ifade eder.
 - **ZS (Kenar Boşluk):** $1 * 5.33 = 5.33$ MHz olarak hesaplanmış, sistemin komşu bantlara müdahale etmesini engelleyen koruma mesafesi olarak tanımlanmıştır.
- **Toplam Bant Genişliği İhtiyacı:** Tüm alt kanalları ve koruma boşluklarını kapsayan toplam bant genişliği formülü $BW = 2 * [ZS + 3XS + (YS/2)]$ şeklinde uygulanmıştır.
- **Sonuç:** Yapılan matematiksel modelleme neticesinde, 8 GHz bandı üzerinde ayrılması gereken toplam spektrum genişliğinin **79.16 MHz** olduğu saptanmıştır. Bu değer, tahsis edilen 8 GHz kanal planı sınırları içerisinde kalarak yüksek verimlilik sunmaktadır.

3. FRESNEL BÖLGESİ, DÜNYA EĞRİLİĞİ VE GÖRÜŞ HATTI (LOS) ANALİZİ

Kablosuz haberleşme sistemlerinde, iki nokta arasında sadece optik bir görüşün olması yeterli değildir; radyo dalgalarının yayıldığı hacmin de belirli oranda engellerden arındırılmış olması gerekir. Bu bölümde, Kabataş ve Nakkaştepe arasındaki hattın fiziksel uygunluğu matematiksel modellerle analiz edilmiştir.

3.1. Birinci Fresnel Yarıçapı ve Açıklık Kriteri:

Radyo dalgalarının enerjisinin büyük kısmının toplandığı eliptik hacmi tanımlayan Fresnel bölgesi, linkin güvenilirliği için en kritik parametredir.

- **Hesaplama:** 8 GHz çalışma frekansı ve 1.609 km toplam mesafe (D) baz alınarak, hattın tam orta noktasında birinci Fresnel yarıçapı formülü uygulanmıştır.
- **Sonuç:** Yapılan hesaplamalar sonucunda hattın orta noktasındaki birinci Fresnel yarıçapı 3.88 metre olarak saptanmıştır.
- **Açıklık Standardı:** Mikrodalga sistem tasarımlarında kabul gören yüzde 60 Fresnel açıklığı kriterine göre, sinyal yolunun en az 2.33 metre kadar bir yarıçapta hiçbir fiziksel engele temas etmemesi gerekmektedir.

3.2. Çevresel Engeller ve Toplam Yükseklik Gereksinimi:

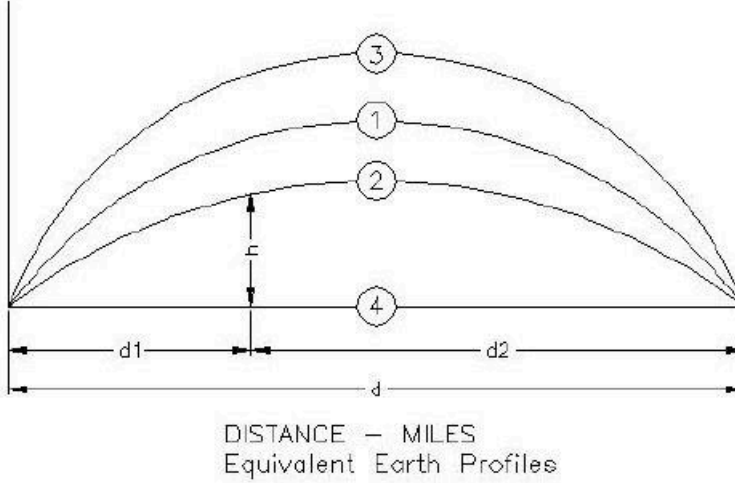
Hattın geçtiği bölgedeki coğrafi ve kentsel engeller, gereken minimum yüksekliği artırmaktadır:

- **Fiziksel Engeller:** Saha analizleri doğrultusunda güzergah üzerindeki olası ağaç varlığı için 5 metre ve yapısal engeller için 1 metrelik ek paylar öngörülmüştür.
- **Gerekli Minimum Yükseklik:** Yüzde 60 Fresnel payı ile çevresel engeller toplandığında, sinyal yolunun yer düzleminden veya engellerden en az 8.37 metre yüksekte seyretmesi gerektiği hesaplanmıştır.

3.3. Dünya Eğriliği ve Atmosferik Kırılma (Earth Bulge) Etkisi:

Dünya Eğriliği ve Atmosferik Kırılma (Earth Bulge) Etkisi Mikrodalga sinyallerinin yayılımı, atmosferik koşullardan ve yer kürenin eğriliğinden doğrudan etkilenmektedir. Bu etkileri analiz etmek amacıyla, farklı atmosferik kırılma katsayıları (k) kullanılarak eşdeğer dünya modelleri incelenmiştir. **Şekil 3**'te gösterildiği üzere, standart atmosfer koşullarında (k=4/3) dünya eğriliğinin sinyal yoluna etkisi 1.6 km'lik bu kısa mesafede yaklaşık 0.038 metre (4 cm) olarak hesaplanmış ve ihmal edilebilir düzeyde olduğu saptanmıştır.

- ① $K = 1$, TRUE EARTH
- ② $K = 4/3$, EARTH FLATTENING
- ③ $K = 2/3$, EARTH BULGING
- ④ $K = \infty$, FLAT EARTH



Şekil 3: Atmosferik Kırılma Katsayısına (k) Bağlı Eşdeğer Dünya Profilleri ve Bulge Analizi.

3.4. Kule Yükseklikleri ve Görüş Hattı (LOS) Uygunluk Denetimi:

İstasyonların mevcut yükseklikleri, yukarıdaki kriterlere göre test edilmiştir:

- **Kabataş (Tx) Terminali:** Bina yüksekliği, kule ve ekipman payları ile birlikte toplam 19.5 metre yüksekliğe sahiptir.
- **Nakkaştepe (Rx) Terminali:** Bölgenin doğal rakımı ve kule yapısı ile toplam 64.4 metre yüksekliğe ulaşmaktadır.
- **Orta Nokta Seyir Yüksekliği:** İki uç arasındaki doğrusal hattın orta noktadaki yüksekliği yaklaşık 41.95 metre olarak hesaplanmıştır.
- **Nihai Sonuç:** Mevcut 41.95 metrelik seyir yüksekliği, gereken 8.37 metrelik minimum yükseklik sınırından 33.6 metre daha fazladır. Bu durum, linkin tam görüş hattına sahip olduğunu teknik olarak kanıtlamaktadır.

4. HESAPLAMALAR VE LİNK BÜTÇESİ ANALİZİ

Amacımız belirlediğimiz aşağıdaki parametrelerle Kabataş Erkek Lisesi'nin çatısı ve Üsküdar Nakkaştepe arasında yılda sadece 5 saniye kesintiye tolerans gösterecek bir link tasarımı yapmaktır. Kullanılacak parametreler aşağıda listelenmiştir:

- Frekans (f) = 8 GHz
- Mesafe (D) = 1,6 km = 1 mil
- Çevre faktörü (a) = 4 (Su üstü veya düzgün yüzey)
- İklim faktörü (b) = ¼ (Ortalama ve ılıman iklim)
- Verici gücü (Pt) = 20 dBm
- Verici ve Alıcı anten çapı (m) = 0,16m

Bu parametreler sabit tutularak link tasarımı yapılacak ve ardından uzay ve frekans diversiteli sistem varsayımlarıyla karşılaştırma yapılacaktır.

4.1. Aşım Olasılığı (P(o))

Yılda sadece 5 saniye kesintiye tolerans vermek istiyoruz. İlk adım olarak 1 yıldaki saniye sayısını bulmamız gerekiyor:

$$365 \times 24 \times 3600 = 31,536,000 \text{ s}$$

Yılda 5 saniye kesinti için outage (aşım olasılığı):

$$P(o) = 5 / 31,536,000 = \mathbf{1.586 \times 10^{-7}}$$

Bu oldukça düşük bir olasılıktır ve yüksek kullanılabilirlik gerektiren linkler için tipik bir hedeftir.

4.2. Serbest Uzay Yol Kaybı (Lp)

Serbest uzay yol kaybı; frekans ve mesafenin büyümesiyle karesel olarak zayıflayan bir parametredir. Bu kayıp temelde verici anten ve alıcı anten gücü arasındaki şu ilişkiden doğmuştur:

$$P_t/P_r = (4\pi/\lambda)^2$$

Bu ifadede Pt verici gücü, Pr alıcı gücü, λ ise dalga boyunu ifade etmektedir. Bu ifadenin logaritmasının alınması ile 2 güç arasındaki fark serbest uzay yol kaybı olarak isimlendirilir ve formülü şu şekildedir:

$$L_p = 96,6 + 20\log(f) + 20\log(D)$$

Bu formülde f GHz, D ise mil cinsinden verilmiştir. Eğer mesafe parametresini kilometre cinsinden ifade etmek istersek de formül şöyle olur:

$$L_p = 92,4 + 20\log(f) + 20\log(D)$$

Bizim link tasarımımda f= 8 Ghz ve D= 1,6 km parametreleri yerine konulunca serbest uzay yol kaybımız:

$$L_p = 92,4 + 20\log(8) + 20\log(1,6) = \mathbf{114,64 \text{ dB}}$$
 olarak bulunur.

Bu değer, link bütçesindeki en büyük kayıp kalemidir ve tasarımda mutlaka karşılanması gereken bir büyüklüktür.

4.3. Fade Marjı (F)

Fade Marjı linkin olumsuz durumlara karşı ne kadar toleransa sahip olduğunu gösterir. Olumsuz durumlara örnek olarak yansıma, çok yollu yayılım veya çevresel etkiler gösterilebilir.

Korumasız link için Fade Marjı formülü:

$F=30 \log (D) + 10 \log (a*b*f) - 56 - 10 \log (P(o))$ olarak verilmiştir.

Bu formülde D mil cinsinden mesafeyi, a çevre faktörünü, b iklim faktörünü ve P(o) aşım olasılığını göstermektedir. Sırasıyla parametrelerimizi formülde yerlerine koyarsak korumasız link için Fade Marjı:

$F=30\log(1)+10\log(4^{1/4}*8)-56-10\log(1.586 \times 10^{-7}) = \mathbf{21,02 \text{ dB}}$ olarak bulunur.

Yani bizim link tasarımıımız ortalama sinyal seviyesinin yaklaşık 21 dB altına düşse dahi servis kalitesini muhafaza edebilmektedir.

4.4. Anten Kazançları (G)

Anten kazancı kullanılan verici ve alıcı antenlerin frekanslarına ve çaplarına bağlıdır:

$G= 17,8 + 20 \log (f) + 20 \log (D)$

Formüldeki D parametresi link mesafesi ile karıştırılmamalıdır. D metre cinsinden anten çapını göstermektedir. Biz link tasarımıımızda hem verici hem de alıcı tarafta aynı anteni kullandık. Formülde istenen parametreler yerine konunca verici ve alıcı anten kazanlarımız:

$G_t = G_r = G(dBi) = 17.8 + 20\log(8) + 20\log(0.16) = \mathbf{20 \text{ dB}}$ olarak bulunur.

5. SİSTEM KAZANCI, KAYIPLARI VE ALICI EŞİĞİ (RSLm)

5.1. Sistem Kayıpları

- **Lt (İletim Yol Kaybı):** Sistem ile anten arasındaki iletim yolunun iletim kaybı

Biz sistemimizde anten ile cihaz arasında 11,5 metrelik bir besleme hattı bulunan dikdörtgen dalga kılavuzu tercih ettik. Aşağıdaki tablo incelenirse iletim kaybımız alıcı ve verici tarafta toplam $L_t = 2 * 0.087 * 11,5 = 2 \text{ dB}$ olarak bulunur.

Transmission Line Loss Factors (decibels/meter)				
Transmission Line Type	2	Frequency Band (GHz)		
		4	6	8
Rectangular waveguide (WR)	—	0.027 (WR 229) ^a	0.068 (WR 137) ^a	0.087 (WR 112) ^a
Elliptical waveguide (EW)	—	0.028 (EW 37) ^a	0.039 (EW 52) ^a	0.058 (EW 77) ^a
Circular waveguide (WC)	—	0.013 (WC 269) ^a	0.030 (WC 166) ^a	0.022 (WC 166) ^a
Coaxial (1/2", air dielectric)	0.062 (HJ 5) ^b	—	—	—

^aDesignates type of waveguide.
^bDesignates type of coaxial cable.

Şekil 4: İletim Hattı Yol Kaybı Hesaplama Tablosu (desibel/metre)

- **Lb (Filtre Kaybı):** Antende alıcı ve verici işaretleri ayırmak için kullanılan filtrelerdeki dallanma kaybıdır. Sistemimizde **1 dB** olarak kabul edilmiştir.
- **Lm (Kurulum Kaybı):** Anten ayarsızlığı veya alıcı verici sistemlerdeki eskimelerden kaynaklanan kayıplardır. Sistemimizde **1 dB** olarak kabul edilmiştir.

5.2. Sistem Kazancı (Gs)

En basit tabiriyle sistem kazancı; bir linkin çalışabilmesi için ne kadar toplam toleransa ihtiyacımız olduğunu gösterir. Bu kazanç ifadesi radyolink sisteminin kazanç ve kayıpları cinsinden verilebilir:

$$G_s = L_p + F + L_t + L_m + L_b - G_r - G_t$$

Bulduğumuz kazanç ve kayıplar:

$$L_p = 114,64 \text{ dB}$$

$$F = 21,02 \text{ dB}$$

$$G_t = G_r = 20 \text{ dB}$$

$$L_t = 2 \text{ dB}$$

$$L_m = 1 \text{ dB}$$

$$L_b = 1 \text{ dB}$$

Bu durumda yerine konulduğunda toplam sistem kazancı:

$$G_s = 114.64 + 21.02 + 2 + 1 + 1 - 20 - 20 = 99.66 \text{ dB} \text{ olarak bulunur.}$$

5.3. RSLm (Alıcı Eşiği)

RSLm, alıcının istenen servis kalitesini sağlayabilmesi için girişinde bulunması gereken minimum sinyal seviyesini ifade eder.

$$RSLm = kT_0 \cdot R \cdot NF + E_b/N_0$$

k = Boltzmann sabiti = 1.38×10^{-23} J/K

T₀ = Oda sıcaklığına karşı gelen referans sıcaklığı = 290 K

NF = Noise Figure

E_b/N₀ = Bit enerjisinin gürültüye göre gücü

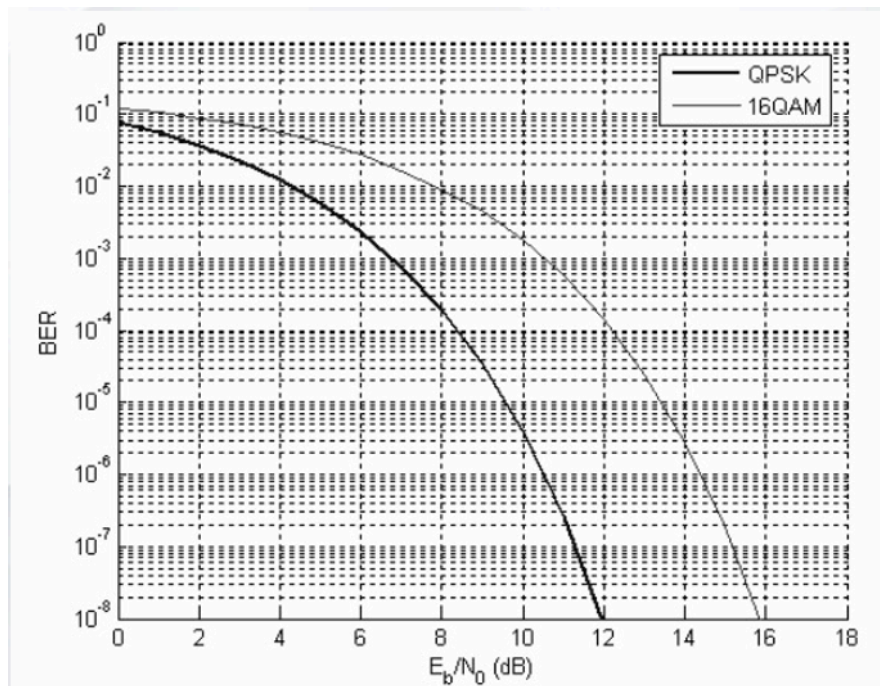
Bu denklemi dBm cinsinden çözümlersek:

RSLm (dBm) = -174 + 10 log (Rb) + NF + (E_b/N₀)_{req} olarak tanımlanabilir.

Sistemimizde Rb önceki sayfada gösterildiği üzere 16QAM modülasyonu için 128 Mb/s olarak bulunmuştur. Pratik RF alıcılar için Noise Figure değeri 5-8 dB arasındadır. Biz sistemimizde 7 dB olarak kabul ettik. E_b/N₀ değeri ise aşağıdaki tablodan 1.586×10^{-7} BER için yaklaşık olarak 15 dB bulunmuştur. Bu durumda alıcı eşiğimiz (RSLm):

$$RSLm = -174 + 10 \log (128 \times 10^6) + 7 + 15$$

RSLm = -70.93 dBm olarak bulunmuştur.



Şekil 5: BER / E_b/N₀ Grafiği

Bu durumda gerekli minimum sistem kazancı (dB biriminde) verici çıkış gücü (P_t) ile verilen bir BER isterine karşı gelen minimum alıcı işaret seviyesi (RSLm) arasındaki fark olarak tanımlanır:

$$G_s = P_t - RSLm$$

$$P_t = 20 \text{ dBm}$$

RSLm= -70.93 dBm

Gs = **90.93 dBm** olarak bulunur.

5.4. Toplam Sistem Kazancı ve Tasarımın Güvenlik Marjı Analizi

Yukarıda hesaplanan **90.93 dB** değeri, sistemin teorik olarak ihtiyaç duyduğu minimum kazanç eşiğidir. Bu değer, verici gücü ile alıcı hassasiyeti arasındaki farkı temsil eder ve linkin kurulabilmesi için aşılması gereken temel engeldir.

Öte yandan, link bütçesi yöntemiyle (serbest uzay yol kaybı, fade marjı, anten kazançları ve donanımsal kayıplar dikkate alınarak) yapılan hesaplamada, sistemimizin sağladığı gerçek kazanç **99.66 dB** olarak saptanmıştır.

Analiz ve Karşılaştırma:

- **Gerçekleşen Sistem Kazancı:** 99.66 dB
- **Gerekli Minimum Sistem Kazancı:** 90.93 dB
- **Tasarım Güvenlik Marjı:** 8.73 dB

Bu veriler ışığında, tasarlanan linkin sağladığı kazancın, ihtiyaç duyulan minimum eşikten yaklaşık **8.73 dB** daha fazla olduğu görülmektedir. Bu fark, sistemin sadece teorik sınırları karşılamakla kalmadığını, aynı zamanda öngörülemeyen atmosferik değişimlere veya ekipman performansındaki küçük dalgalanmalara karşı ciddi bir güvenlik payına sahip olduğunu kanıtlamaktadır. Sonuç olarak tasarımıımız, yıllık 5 saniye kesinti hedefini karşılayabilecek yüksek bir kararlılık seviyesine sahiptir

6. ÇEŞİTLİLİK (DİVERSİTE) TEKNİKLERİ VE VARSAYIMLAR

6.1. UZAY DİVERSİTESİ

Uzay diversitesi, kablosuz haberleşme sistemlerinde sinyalin maruz kaldığı fading etkilerini en aza indirmek amacıyla kullanılan temel anten çeşitliliği tekniklerinden biridir. Bu teknik alıcı veya verici tarafta veya her ikisinde de genellikle dikey olarak konumlandırılmış birden fazla anten kullanarak sinyalin kalitesini yükseltme prensibine dayanır. Çok yollu yayılım etkisine karşı bir çözüm üretmek amacıyla kurulan bu sistem sayesinde antenlerden biri çevresel faktörlerden dolayı sinyalleri çok zayıf alıyorsa birkaç feet yükseklikteki başka bir antenin sönümlemeye uğramama ihtimali daha yüksektir. Alıcı devreleri bu antenlerden gelen sinyalleri karşılaştırır ve seçiciliği yüksek olan filtreler sayesinde güçlü olanı seçer veya combiner sayesinde birleştirilerek SNR iyileştirilir. Bu sayede daha güvenli bir link tasarımı sağlanmış olur.

6.2. UZAY DİVERSİTESİ - VARSAYIM

Varsayım: Aynı parametreleri kullanarak uzay diversiteli bir link tasarım sistemi kurmak istersek ve antenler arası düşey mesafeyi $S = 2$ feet (0.609 m) (histerezis $(h) = 0,5$) ayarlarsak nasıl bir sonuç elde ederiz?

Cevap:

Histerezis; hangi antenin sinyali daha güçlüyse o antene geçme prensibinin sınırlandırıcıdır. Bir sinyal seçimi için en önemli kural gücünden çok sürekliliğidir. Yani sinyal güçleri arasında çok yakın bir fark bulunan antenler arasında hemen daha güçlü olan anteni referans alalım demeyiz. Bunun için histerezis bir güç farkı ortaya koyar ve iki sinyal gücü arasında en az bu kadar oran varsa diğer antene geçebilirsin şartını sunar.

Uzay diversiteli bir sistem için fade marjı formülü:

$F = 20 \cdot \log(D) - 10 \cdot \log(S) + 5 \cdot \log((h^2 + h^2 - 2)/2) + 5 \cdot \log(a \cdot b) - 7.2 - 5 \cdot \log(P(o))$ olarak verilmiştir. Aynı parametreleri kullanırsak:

$F = 20 \log(1) - 10 \log(2) + 5 \log(2.125) + 5 \log(1) - 7.2 - 5 \log(1.586 \times 10^{-7}) = 25.426 \text{ dB}$ olarak bulunur.

Sistem kazancı (G_s) hesabından:

$$G_s = L_p + F + L_t + L_m + L_b - G_r - G_t$$

$$G_s = 114.64 + 25.426 + 2 + 1 + 1 - 20 - 20 = 104.066 \text{ dB}$$
 sistem kazancı elde edilir.

6.3. FREKANS DİVERSİTESİ

Frekans diversitesi, kablosuz haberleşmede sinyal kalitesini artırmak için kullanılan bir diğer temel tekniktir. Bu yöntemde, aynı bilgi sinyali aynı anda iki veya daha fazla farklı taşıyıcı frekans üzerinden gönderilir.

6.4 FREKANS DİVERSİTESİ - VARSAYIM

Varsayım: Aynı parametreleri kullanarak %10 frekans diversiteli bir link tasarım sistemi kurmak istersek (histerezis (h) = 0,5) nasıl bir sonuç elde ederiz?

Frekans diversiteli bir sistem için uygulanan fade marjı formülü:

$F = 20 \cdot \log(D) + 15 \cdot \log(f) + 5 \cdot \log((h^2 + h^{-2})/2) + 5 \cdot \log(a \cdot b) - 5 \cdot \log(\Delta f) - 36.5 - 5 \cdot \log(P(o))$
olarak verilmiştir. Yine aynı parametreleri kullanırsak:

$F = 20 \log(1) + 15 \log(8) + 5 \log(2.125) + 5 \log 1 - 5 \log(0.8) - 36.5 - 5 \log(1.586 \times 10^{-7}) = \mathbf{13.166 \text{ dB}}$ bulunur.

Sistem kazancı hesabı:

$G_s = L_p + F + L_t + L_m + L_b - G_r - G_t$

$G_s = 114.64 + 13.166 + 2 + 1 + 1 - 20 - 20 = \mathbf{91.806 \text{ dB}}$ sistem kazancı elde edilir.

7. SONUÇ VE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZ

Tasarımı yapılan Kabataş - Nakkaştepe radyolink hattı için elde edilen temel performans verileri, farklı sistem mimarileri (Korumasız, Uzay Diversiteli ve Frekans Diversiteli) bazında analiz edilmiştir. Yapılan karşılaştırmalı değerlendirme sonuçları aşağıdaki tabloda sunulmuştur

	Korumasız Link	Uzay Diversiteli	Frekans Diversiteli
Fade Marjı	21.02 dB	25.426 dB	13.166 dB
Sistem Kazancı	99.66 dB	104.066 dB	91.806 dB

Şekil 6: Korumasız Link, Uzay Diversitesi ve Frekans Diversitesi için Karşılaştırma Tablosu

7.1. Performans Değerlendirmesi Tablodaki veriler detaylıca incelendiğinde; hem en yüksek sistem kazancına hem de en yüksek fade marjına sahip olan **Uzay Diversiteli** sistemin, elektriksel açıdan en güçlü ve en güvenilir seçenek olarak öne çıktığı saptanmıştır.

7.2. Teknik Analiz ve Nihai Karar

- **Uzay Diversitesi:** Sinyal gücünden ödün vermeyerek sönmüleme etkilerine karşı daha dirençli ve kazançlı bir performans sunmaktadır.
- **Frekans Diversitesi:** Tek anten kullanımından kaynaklı kuplör kayıpları nedeniyle, referans kabul edilen korumasız linke kıyasla dahi yaklaşık 8 dB daha düşük sistem kazancı ve fade marjı sergilemiştir. Bu sistem, sinyal gücünden feragat ederek sadece sinyal sürekliliğini sağlamaya odaklanmaktadır.
- **Sonuç:** Yıllık sadece 5 saniye kesinti (yüzde 99.9999 kullanılabilirlik) toleransı ile kurgulanan bu projede, hedeflenen servis kalitesini en kararlı şekilde karşılayan mimarinin **Uzay Diversitesi** olduğu teknik olarak doğrulanmıştır.

8. KAYNAKÇA

1. **İTÜ Ders Notları:** Kartal, M., "EHB 473 Mikrodalga ve RF Haberleşmesi Ders Notları", İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü.
2. **ITU-R Standartları:** "ITU-R F.386-9: Radio-frequency channel arrangements for fixed wireless systems operating in the 8 GHz band", International Telecommunication Union.
3. **CEPT/ECC Raporları:** "ECC Report 163: Range of applications and technical development of terrestrial systems of the Fixed Service operating in the frequency range 7.1 GHz - 8.5 GHz", European Communications Office (ECO).
4. **Yazılım ve Harita Araçları:** Google Earth Pro (Güzergah yükselti profili, mesafe ölçümü ve koordinat analizi için kullanılmıştır).