

YOLCU UÇAKLARINDA İNTERNET HABERLEŞMESİ KAPSAMINDA KULLANILMAK ÜZERE KA BANT 2X2 FAZ DİZİNLİ MİKROŞERİT DİZİ ANTEN TASARIMI VE LİNK BÜTÇESİ HESABI

Batuhan Koyuncu¹, Berkin Fenli³,
Esra Benli Öztürk⁴
Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş., Ankara

Özgür Dündar²
Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya

ÖZET

Bu çalışma gelişen havacılık endüstrisinde yolcuların uçuş sırasında uydu üzerinden internet hizmetini kullanabilmesi için Ka Bant gönderme hattı frekans aralığında (26-40 GHz) 2x2 mikroşerit dizi anten tasarımını ve dizi antenin uçak üzerine konumlandırılması sonrası GEO uydu ile link bütçesi hesaplarının incelenmesini amaçlamaktadır. Bu kapsamda ilk olarak 2x2 Ka bant faz dizinli mikroşerit anten tasarımı ve optimizasyonları gerçekleştirilmiştir. Anten tasarımının tamamlanmasının ardından potansiyel bir GEO uydu ile bir yolcu uçağı üzerine entegre edilmiş 2x2 Ka bant faz dizinli mikroşerit antenin haberleşme ve veri aktarım performansının değerlendirilmesi kapsamında simülasyonlar ve analizler yapılmış ve link bütçesi analizleri gerçekleştirilmiştir.

GİRİŞ

Havacılık endüstrisi, teknolojinin hızla ilerlemesiyle birlikte büyük bir dönüşüm geçirmektedir. Yolcu uçaklarının sunduğu hizmetlerin kapsamı genişlerken, yolcuların beklentileri de artmaktadır. Günümüzde, uçak yolculuğu sırasında internet bağlantısına sahip olma talebi önemli bir gereksinim haline gelmiştir. Bu bağlamda, uydu iletişim teknolojileri, yolcu uçaklarında internet hizmeti sunmak için en etkili çözümlerden biri olarak öne çıkmaktadır [Bağcı, 2019]. Uydu iletişimi, geniş kapsama alanı ve yüksek veri iletim kapasitesi ile dikkat çekmektedir. Özellikle Ka bant (26-40 GHz) frekans aralığı, geniş bantlı iletişim hizmetleri sunmak için ideal bir çözüm sunmaktadır. Ka bant uydu iletişimi, düşük frekans bantlarına kıyasla daha yüksek veri hızları ve daha düşük gecikme süreleri ile yolculara daha kaliteli bir internet deneyimi sunmaktadır [Elbert, 2008]. Ancak, bu yüksek frekans aralığının etkin bir şekilde kullanılabilmesi için gelişmiş anten teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır [Skolnik, 2001].

Son yıllarda faz dizinli anten teknolojilerinde önemli gelişmeler kaydedilmiştir [Jones & Smith, 2020]. Sektörde Ka-Bant uygulamaları için yüksek kazançlı mikroşerit antenler geliştirilmektedir [Wang & Li, 2022]. Bu çalışmada, Ka bant frekans aralığında (26-40 GHz) yolcu uçaklarında kullanılmak üzere 2x2 mikroşerit dizi anten tasarımı ve bu antenin GEO (Jeosenkron) uydu ile iletişimdeki performansının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Ka-bant mikroşerit antenler, uydu iletişiminde yaygın olarak kullanılmaktadır [Patel & Gupta, 2019]. Mikroşerit antenler, hafif ve kompakt yapıları, düşük maliyetleri ve kolay üretilebilmeleri nedeniyle havacılık uygulamaları için oldukça uygundur [Balanis, 2016]. Faz dizinli anten yapısı ise, yüksek yönlendirme yeteneği ve hızlı yön değişimi sağlayarak uydu iletişimi için ideal bir çözüm sunmaktadır [Mailloux, 2017].

Anteni tasarlamak ve optimize etmek için High Frequency Structural Simulator (HFSS) yazılımı kullanılmıştır. HFSS, elektromanyetik alanların simülasyonunu gerçekleştiren ve anten tasarımı için

¹ Tasarım Mühendisi, E-posta: batuhan.koyuncu@tai.com.tr

² Dr.Öğr.Üyesi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: ozdundar@erbakan.edu.tr

³ Başmühendis, E-posta: bfenli@tai.com.tr

⁴ Başmühendis, E-posta: esra.benli@tai.com.tr

detaylı analizler yapabilen ileri düzey bir simülasyon aracıdır [Ansys, 2020]. Bu yazılım sayesinde, antenin performansı, kazancı, yönlendirme yeteneği ve diğer önemli parametreleri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Tasarlanan 2x2 mikroşerit faz dizinli antenin uçak üzerine entegre edilmesi sonrası, GEO uydu ile iletişim simülasyonları ve analizleri Systems Tool Kit (STK) programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. STK, uydu ve hava aracı gibi hareketli platformlar arasındaki iletişim linklerinin simülasyonunu yapabilen kapsamlı bir yazılımdır [AGI, 2023]. Bu yazılım ile antenin GEO uydu ile bağlantısının sürekliliği, sinyal gücü, veri iletim hızı ve diğer önemli iletişim parametreleri değerlendirilmiştir.

Link bütçesi analizi, uydu iletişim sistemlerinin performansını belirlemek için kritik bir öneme sahiptir. Bu analiz, gönderilen ve alınan sinyallerin güç seviyelerini, yol kayıplarını, atmosferik etkileri ve diğer zayıflatıcı faktörleri dikkate alarak iletişim sisteminin genel performansını değerlendirir [Freeman, 2011]. Bu çalışmada, 2x2 mikroşerit faz dizinli antenin GEO uydu ile iletişimindeki link bütçesi hesaplamaları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Yapılan hesaplamalar, antenin tasarımı ve optimizasyonunun ne derece başarılı olduğunu ve gerçek dünya koşullarında nasıl bir performans sergileyeceğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma, Ka bant frekans aralığında yolcu uçaklarında internet hizmeti sunmak üzere tasarlanmış 2x2 mikroşerit faz dizinli antenin tasarımı, simülasyonu ve performans değerlendirmesini kapsamaktadır. Bu tür antenlerin kullanımı, yolcu uçaklarında internet hizmetinin kalitesini artıracak ve havacılık endüstrisinde önemli bir yenilik sağlayacaktır. Bu bildirinin amacı, bu teknolojinin teknik detaylarını ve performans analizlerini sunarak, gelecekteki araştırmalar ve uygulamalar için bir referans noktası oluşturmaktır.

YÖNTEM

Mikroşerit Anten Tasarımı

Ka bant (26 – 40 GHz) gönderme frekans aralığında çalışabilecek 2x2 dizi anten tasarımı için ilk olarak tek bir yama anten tasarlanmıştır. Yama anten tasarımına müteakiben anten dizisi oluşturulmuş ve simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Mikroşerit yama anten tasarımı yapılırken ilk olarak yama antenin genişliği (W) değeri hesaplanmıştır. W değerini hesaplayabilmek için anten için kullanacağımız malzemenin dielektrik sabiti (ϵ_r) ve antenin çalışma merkez frekansı (f_r) değeri kullanılmaktadır [Robinson & Clark, 2016]. Anten tasarımında havacılık ve uydu haberleşme sektörlerinde sıklıkla kullanılan 2.2 dielektrik sabiti değerine ve 1.575 mm kalınlığa sahip Rogers RT/Droid 5880 dielektrik malzemesi kullanılmıştır. Serbest uzayın dielektrik sabiti (ϵ_0), manyetik geçirgenliği (μ_0), W hesabı için gerekli diğer parametrelerdendir. Burada ışık hızı $c_0 = 3 \times 10^8$ m/s olarak alınmıştır.

$$W = \frac{1}{(2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0})} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{c_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

W uzunluğunun hesaplanmasının ardından $\frac{W}{h} \geq 1$ koşulu sağlandığı teyit edilip efektif dielektrik sabiti ϵ_{reff} değeri aşağıdaki 2 formülü kullanılarak hesaplanır [Liu & Yang, 2017].

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + \frac{12h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Sonrasında 3 formülü kullanılarak efektif uzunluk değeri L_{eff} hesaplanır.

$$L_{eff} = \frac{c_0}{2f_c \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (3)$$

W , ϵ_{reff} ve L_{eff} değerlerinin hesaplanmasının ardından mikroşerit anten uzunluğu olan L değerinin hesabı 4 ve 5 formülleri kullanılarak yapılmıştır.

$$\Delta L = 0,412 \times \frac{(\epsilon_{reff} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264 \right) h}{(\epsilon_{reff} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8 \right)} \quad (4)$$

$$L = \frac{c_0}{2f_c \sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta L \quad (5)$$

Link Bütçesi Tasarım Parametreleri

RF link bütçesi, uydu haberleşmesi gibi uzak mesafe iletişim sistemlerinde iletim ve alım işlemlerinin başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için gereken tüm parametrelerin analiz edilerek bir bütçe oluşturulmasıdır. Gönderme hattı anteni bu çalışma kapsamında tasarlanan 2x2 faz dizinli Ka bant gönderme anteni, örnek bir GEO uydu üzerinde ise Ka bant alıcı anteni kullanılarak link bütçesi hesabı yapılacaktır. İlk olarak link bütçesinin önemli parametrelerinden biri olan EIRP değeri 6 formülü ile hesaplanır. EIRP, bir antenin belirli bir yönde verdiği radyasyon gücünü ölçer.

$$EIRP = P_t + G_t - L_t \text{ (dB)} \quad (6)$$

Uçak ile uydu arasındaki RF sinyalinin iletiminde mesafeden kaynaklı sinyal kaybı oluşmaktadır. Serbest Uzay Kaybı (Free space path loss (FSPL)) adı verilen bu kayıp 7 numaralı formül ile hesaplanır.

$$L_{FS}(\text{dB}) = 20 \log(f) + 20 \log(r) + 32.44 \quad (7)$$

Link bütçesi hesabı yapılırken sistemdeki tüm kayıplar hesaba katılmalıdır. FSPL'e ek olarak ITU-R P.618 standardı baz alınarak atmosferik kayıplar, uygulama kayıpları ve anten hizalama kayıpları da hesaba katılarak toplam kayıp değeri elde edilir. İlgili ifade 8 numaralı formül ile gösterilir.

$$L_{Total} = FSPL + L_{atm} + L_{pointing} + L_{imp} \text{ dB} \quad (8)$$

Alıcı anten tarafında sistem performansını ölçmek için G/T değeri hesaplanır. Bu terim, bir alıcı antenin (G) kazancını ve sistemin toplam gürültü sıcaklığını (T) ifade eder. Uydu tarafındaki G/T değeri 9 formülü ile hesaplanmıştır.

$$\frac{G}{T} = Gr - 10 \log_{10}(T_{sys}) \text{ dB} \quad (9)$$

Sayısal haberleşme sistemlerinde önemli bir parametre olan sembol oranı hesaplanmalıdır. Sembol oranı bir sinyalde her saniyedeki sembol sayısını ifade eder. Sembol oranı SR (Msps), net veri hızı DR (Mbps), hata düzeltme kodlaması FEC ve modülasyon katsayısı (QPSK için M=2) olmak üzere 10 formülü ile hesaplanır.

$$SR \text{ (Msps)} = \frac{DR}{M * FEC} \quad (10)$$

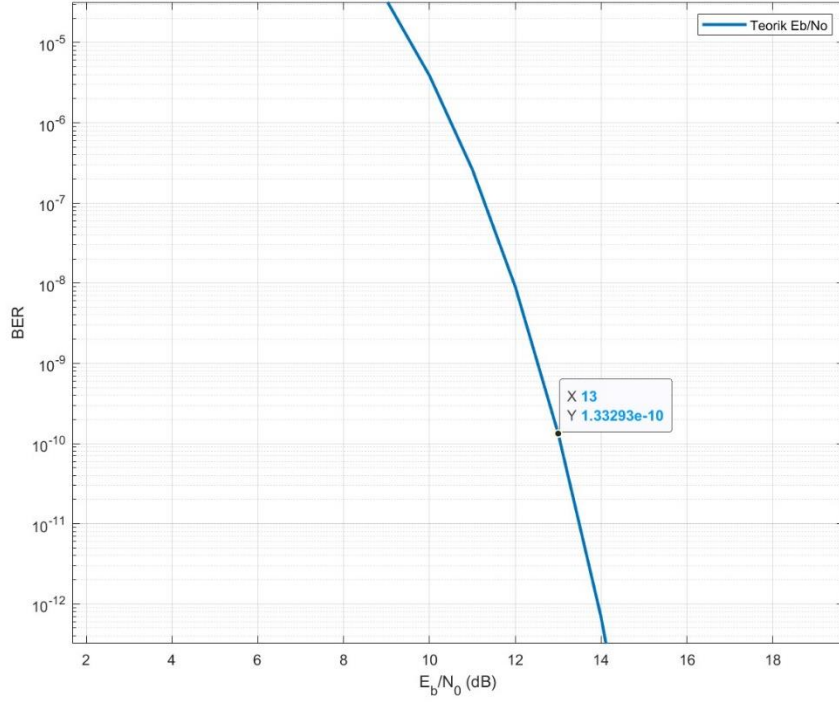
Taşıyıcı bant genişliği için ise roll-off (RO) değeri işleme dahil edilir ve bant genişliği (BW) 11 formülü ile hesaplanır.

$$BW \text{ (MHz)} = SR * (1 + RO) \quad (11)$$

Performans parametreleri hesaplamalarında ilk olarak Taşıyıcı Gürültü Oranı (Carrier to Noise Ratio, C/N) değeri 12 formülü ile hesaplanır [Balanis, 2016]. C/N bir sinyalin alındığı ortamdaki taşıyıcı sinyalin gücünün, aynı ortamdaki gürültü gücüne oranını ifade eder.

$$\left(\frac{C}{N}\right) = EIRP + \left(\frac{G}{T}\right) - (L_{fspl} + L_{other losses}) - 228,6 - B_N \quad (12)$$

Bütçe hesaplarında hesaplanması gereken bir diğer parametre ise enerji bit başına gürültü oranı (Eb/N0), elektriksel sinyal gücünün her bit başına düşen gürültü spektral yoğunluğuna oranını ifade eden bir ölçümdür. Sistem performansının sağlıklı bir şekilde değerlendirilebilmesi için sistemin ihtiyaç duyacağı minimum Eb/N0 değerinin ne olacağını belirlemek önem arz etmektedir. Bu bağlamda teorik Eb/N0 değeri ile sistemde elde edilen Eb/N0 değerlerinin karşılaştırılması ile sağlıklı bir değerlendirme yapılabilir. Sistemde QPSK modülasyonu ile 10⁻¹⁰ BER (Bit Error Rate) değerini sağlayacak bir yapı kurmak istediğimizi düşünürsek ihtiyaç duyulan teorik Eb/N0 değeri Şekil 1'de görülebilir.



Şekil 1: Teorik Eb/N0 Değeri

Bütçe hesabında son olarak tasarlanan anten sisteminin elde ettiği Eb/N0 değeri hesaplanacak ve sonrasında teorik değer ile kıyası yapılacaktır. 13 formülü ile sistemin elde ettiği Eb/N0 değeri bulunur. Sonrasında ise teorik Eb/N0 ile alınan Eb/N0 değerleri için marjin 14 formülündeki gibi hesaplanır.

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right) = \frac{BW}{DR} * \left(\frac{C}{N}\right) \quad (13)$$

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\text{marjin}} = \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\text{alınan}} - \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\text{teorik}} = 21,19 - 7,94 = 13,25 \text{ dB} \quad (14)$$

UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Mikroşerit Anten Tasarımı Simülasyon ve Değerlendirmeleri

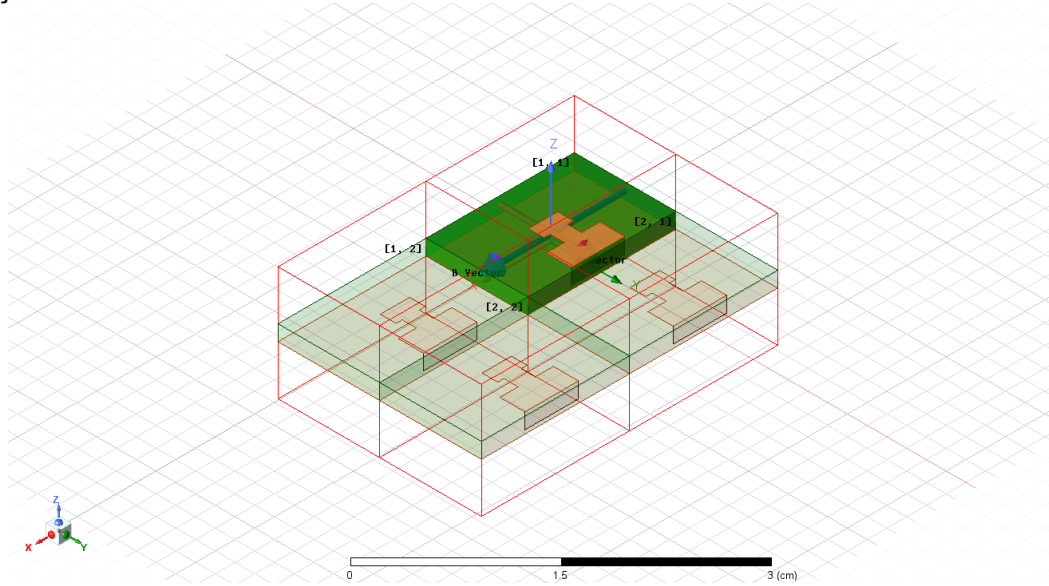
İlgili tasarım yöntemleri kullanılarak yapılan işlemler sonucunda Ka-Bant alma ve gönderme hatları için yapılan tek mikroşerit yama anten tasarım parametreleri belirlenmiştir. Tek yama anten hesapları sonrası 2x2 dizi anten yapısında tasarım yapılmıştır. Tek yama anten ve 2x2 dizi anten için yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen değerleri içeren bilgiler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Anten Tasarım Parametreleri

Parametre	Tek Yama Anten	2x2 Dizi Anten
Dielektrik Malzeme	Rogers RT/Duroid 5880	Rogers RT/Duroid 5880
W	2,97 mm	2,97 mm
L	1,6 mm	1,6 mm
ϵ_r	2,2	2,2

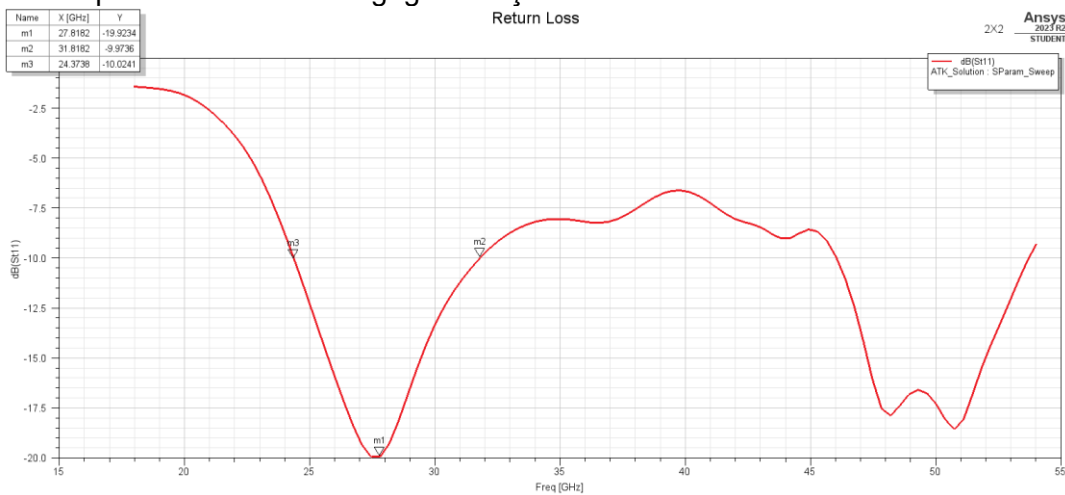
h	1,575 mm	1,575 mm
f_c	29.27 GHz	27.81 GHz
Substrate X	15 mm	30 mm
Substrate Y	10,3 mm	20,6 mm

Tablo 1’de belirtilen Anten Tasarım Parametreleri’ne göre mikroşerit beslemeli 2x2 dizi anten tasarımı simülasyon programı aracılığı ile yapılmıştır. Tasarım yapılırken anten besleme hattı edge feed yöntemi ile tasarlanmıştır. Geri dönüş kaybı (S11) değeri iyileştirilmiş ve merkez frekansı ayarlama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan 2x2 dizi antenin görüntüleri Şekil 2 ‘de belirtilmiştir.



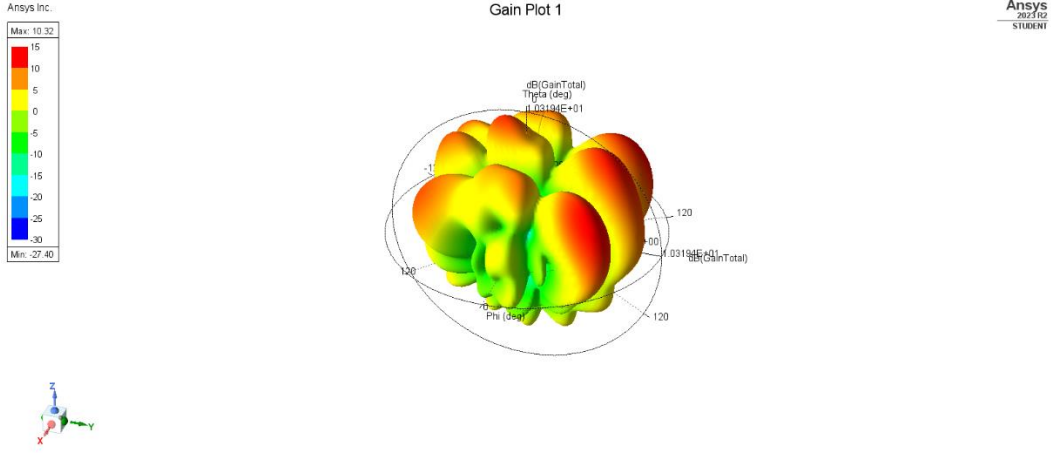
Şekil 2: 2x2 Dizi Anten Genel Görünümü

Tasarlanan antenin simülasyonları incelendiğinde; S11 grafiğinde merkez frekansının 27.81 GHz ve geri dönüş kaybı değerinin -19.92 dBm olduğu görülmüştür. İlgili grafik Şekil 3’de gösterilmiştir. Öte yandan; -10 dBm referans değerinin altında kalan alana baktığımızda 7.44 GHz bant genişliğine sahip bir anten tasarlandığı görülmüştür.



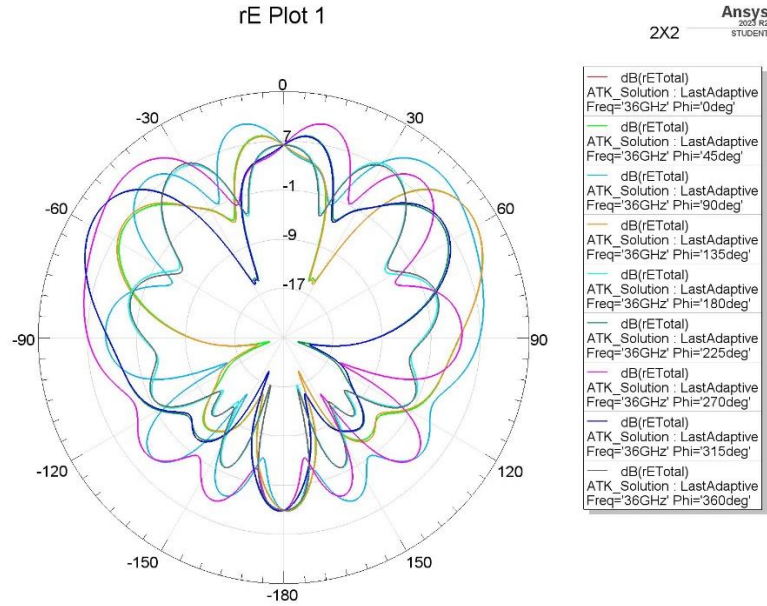
Şekil 3: 2x2 Dizi Anten Geri Dönüş Kaybı Grafiği

Öte yandan; tasarlanan mikroşerit antenin Şekil 4’deki kazanç grafiği incelendiğinde 3 boyutlu ışınma görüntüsü görülmekte ve kazancınının 10.32 dBi olduğu simülasyon sonucunda elde edilmiştir.



Şekil 4: 2x2 Dizi Anten Kazanç Grafiği

Ayrıca tasarlanan dizi antenin 2 boyutlu elektrik alan grafiği Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5: 2x2 Dizi Anten 2 Elektrik Alan Grafiği

Literatür araştırması yapıldığında benzer şekilde uydu haberleşme alanında kullanılmak üzere tasarlanan 2x2 mikroşerit dizi anten yapıları incelenmiştir. Ka-Bant'ta olduğu gibi Ku-Bant faz dizinli antenler de havacılık iletişimlerinde etkin çözümler sunmaktadır [Chen & Zhang, 2021]. Örnek bir çalışmada Ku bant frekans aralığında çalışabilecek 2x2 dizi anten yapısına sahip bir çalışmada dielektrik malzeme olarak Rogers4003c kullanıldığı ve anten kazancının 10 dBi seviyelerinde olduğu görülmektedir [Karami, 2021]. Bu çalışma ile 2x2 Ka bant tasarımı karşılaştırıldığında kazançlarının birbirine yakın seviyelerde olduğu görülmektedir. Anten kazancı frekans, dielektrik malzeme ve dolayısıyla dielektrik katsayısı gibi değişkenlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

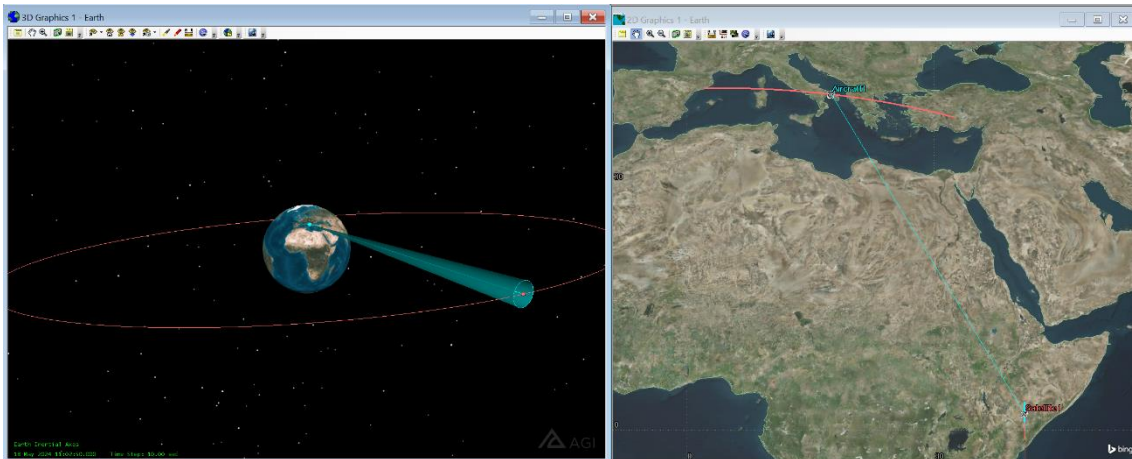
Link Bütçesi Simülasyon ve Değerlendirmeleri

Yöntem bölümünde ifade edilen link bütçesi parametreleri kullanılarak elde edilen teorik hesaplama sonuçları ve simülasyon kapsamında kullanılan değerler Tablo 2'te gösterilmiştir. Tablo incelendiğinde teorik Eb/N0 değerinin 0,52 dB olarak hesaplandığı görülmektedir.

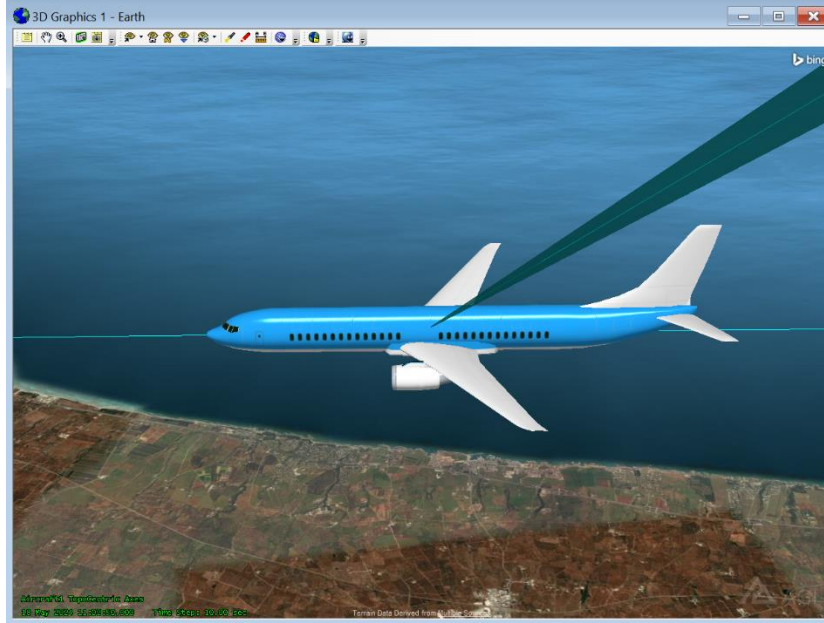
Tablo 2: Link Bütçesi Parametreleri

Parametre	Sembol	Değer
Frekans	f_c	27,81 GHz
Uydu Mesafesi	r	38779 km
Uydu Yörüngesi	Sat-Lon	41° Doğu
Efektif İzotropik Alınan Güç	EIRP	50 dBW
Serbest Uzay Kaybı	L_{FS}	213,09 dB
Atmosferik Kayıplar	L_{atm}	1,71 dB
Hizalama Kayıpları	$L_{pointing}$	0,25 dB
Uygulama Kayıpları	L_{imp}	0,25 dB
Toplam İletim Kaybı	L_{Total}	215,30 dB
Gain / Temperature	G/T	19,5 dB
Bant Genişliği	BW	16 MHz
Teorik Eb/N0	$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{teorik}$	13 dB
Alınan Eb/N0	$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{alınan}$	13,52 dB
Marjin	$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{marjin}$	0,52 dB

Yukarıdaki parametreler kullanılarak simülasyon programı aracılığı ile de link bütçesi analizleri yapılmıştır. Bu kapsamda Konya'dan Barselona konumuna giden bir yolcu uçağı üzerine yerleştirilen 2x2 faz dizimli anten ve 41°Doğu yörüngesinde bulunan potansiyel bir GEO uydu ile haberleşme performans analizleri gerçekteştirilmiştir. Simülasyon programı görselleri Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 6: 2D - 3D Simülasyon Programı Görselleri



Şekil 7: Faz Dizinli Anten Uydu Takip Görseli

Tasarlanan anten yapısı ile yolculuk süresi boyunca GEO uydunun kesintisiz takibi amaçlanmıştır. Bu kapsamda anten yapısı faz dizinli şekilde oluşturulmuş ve elektronik olarak faz yönlendirme kabiliyeti olan sistem uygulaması ile anten faz açıları uydu beacon sinyal seviyesine göre otomatik değiştirilerek sürekli olarak uydunun takibi hedeflenmiştir [Kumar & Verma, 2023].

Yolcu uçağı ve uydu tanımlamalarının ardından, uçağın yolculuk süresi boyunca link bütçesi simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Konya lokasyonundan Barselona lokasyonuna kadar olan link bütçesi değerleri ve değişimleri Şekil 8 ve Şekil 9'da görülmektedir.

Time (UTCG)	EIRP (dBW)	Rcvd. Frequency (GHz)	Rcvd. Iso. Power (dBW)	Flux Density (dBW/m ²)
18 May 2024 09:00:00.000	50.000	27.809996	-162.786	-112.445815
18 May 2024 09:30:00.000	50.000	27.809995	-162.806	-112.465840
18 May 2024 10:00:00.000	50.000	27.809994	-162.829	-112.488950
18 May 2024 10:30:00.000	50.000	27.809994	-162.855	-112.515251
18 May 2024 11:00:00.000	50.000	27.809993	-162.885	-112.544829
18 May 2024 11:30:00.000	50.000	27.809992	-162.917	-112.577744
18 May 2024 12:00:00.000	50.000	27.809991	-162.954	-112.614021
18 May 2024 12:30:00.000	50.000	27.809991	-162.993	-112.653649
18 May 2024 13:00:00.000	50.000	27.809990	-163.036	-112.696574
18 May 2024 13:02:46.539	50.000	27.809990	-163.040	-112.700708

Şekil 8: Link Bütçesi Simülasyon Sonuçları – 1

g/T (dB/K)	C/No (dB*Hz)	Bandwidth (kHz)	C/N (dB)	Eb/No (dB)	BER
19.500000	85.313619	16000.000	13.2724	13.2724	3.554857e-11
19.500000	85.293595	16000.000	13.2524	13.2524	3.928468e-11
19.500000	85.270485	16000.000	13.2293	13.2293	4.406258e-11
19.500000	85.244183	16000.000	13.2030	13.2030	5.017466e-11
19.500000	85.214605	16000.000	13.1734	13.1734	5.801358e-11
19.500000	85.181691	16000.000	13.1405	13.1405	6.810737e-11
19.500000	85.145413	16000.000	13.1042	13.1042	8.116709e-11
19.500000	85.105785	16000.000	13.0646	13.0646	9.815096e-11
19.500000	85.062861	16000.000	13.0217	13.0217	1.203499e-10
19.500000	85.058726	16000.000	13.0175	13.0175	1.227243e-10

Şekil 9: Link Bütçesi Simülasyon Sonuçları - 2

SONUÇ

Bu çalışma kapsamında yolcu uçaklarının yolculuk süresi boyunca kesintisiz olarak GEO uydu ile haberleşmesi için kullanılacak 2x2 faz dizinli mikroşerit anten tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan anten Ka-Bant gönderme hattı frekans aralığında operasyonel olabilecek olup 24,37-31,81 GHz frekans aralığında 7,44 GHz bant genişliğine sahiptir. Merkez frekansı 27,81 GHz olan 2x2

mikroşerit dizi antenin geri dönüş kaybı -19,91 dB olarak simüle edilmiştir. Anten kazancı ise 10,32 dBi elde edilmiştir.

Tasarlanan 2x2 mikroşerit dizi antenin performans analizleri hem teorik olarak hem de STK simülasyon programı aracılığı ile yapılmıştır. Simülasyon senaryosu kapsamında uçak ve uydu bileşenlerinin de eklenmesi ile yapılan analizler sonucunda. Konya'dan Barselona lokasyonuna giden bir yolcu uçağının 41° Doğu yörüngesinde 38779 km mesafede bulunan potansiyel bir uydu ile haberleşmesi incelenmiş ve link bütçesi analizleri yapılmıştır. Uçak gönderme hattının EIRP değeri 50 dBW, uydu G/T değeri 19,5 dB alındığında teorik hesaplamalarda elde edilen Eb/N0 değeri 13,52 dB, simülasyon ile elde edilen Eb/N0 değeri ise 13,27 dB olarak elde edilmiştir. Teorik sonuçlar ile simülasyon sonuçları birbirine oldukça yakın değerler olarak elde edilmiştir. Ayrıca sistemde QPSK modülasyonu ile 10^{-10} BER değeri elde edilmek istendiğinden BER değerinin en az 13 olması gerektiği Şekil 1'de görülmektedir. Bu bağlamda gerek teorik sonuçlar gerekse simülasyon sonuçları incelendiğinde yaklaşık 4 saat süren yolculuk süresi boyunca Eb/N0 değerinin 13 dB üzerinde olduğu ve BER değerinin 10^{-10} değerinden daha aşağıya inmediği görülmüştür. Dolayısıyla 2x2 mikroşerit dizi anten ile GEO uydunun başarılı bir şekilde haberleşmesinin sağlandığı görülmüştür.

Kaynaklar

- AGI., 2023. *Systems Tool Kit (STK) Software Manual*. Exton, PA: Analytical Graphics, Inc.
- Ansys., 2020. *High Frequency Structural Simulator (HFSS) User Guide*. Canonsburg, PA: Ansys, Inc.
- Bağcı, A., 2019. *Uydu Haberleşme Sistemleri*. Ankara: ABC Yayınları.
- Balanis, C. A., 2016. *Antenna Theory: Analysis and Design* (4th ed.). Hoboken, NJ: Wiley.
- Chen, Y., & Zhang, H., 2021. *Design and Analysis of Ku-Band Phased Array Antenna for Aeronautical Communications*. IEEE Access, 9, 56789-56797. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3069692>
- Elbert, B. R., 2008. *The Satellite Communication Applications Handbook*. Norwood, MA: Artech House.
- Freeman, R. L., 2011. *Telecommunication System Engineering* (4th ed.). Hoboken, NJ: Wiley.
- Jones, A., & Smith, B., 2020. *Advances in Phased Array Antenna Technology*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 68(4), 1234-1242. <https://doi.org/10.1109/TAP.2020.2967382>
- Karami, M., 2021. *Advanced Antenna Theory and Design*. New York, NY: Springer.
- Kumar, S., & Verma, P., 2023. *Optimization Techniques for Phased Array Antennas in Satellite Communication*. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 37(2), 100-112. <https://doi.org/10.1080/09205071.2022.2079834>
- Liu, Y., & Yang, J., 2017. *Microstrip Antenna Design Handbook*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Mailloux, R. J., 2017. *Phased Array Antenna Handbook* (3rd ed.). Norwood, MA: Artech House.
- Patel, K., & Gupta, R., 2019. *Ka-Band Microstrip Antenna for Satellite Communication*. International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 11(5), 456-462. <https://doi.org/10.1017/S1759078719000154>
- Robinson, T., & Clark, J., 2016. *Microwave Engineering* (2nd ed.). London: Academic Press.
- Skolnik, M. I., 2001. *Introduction to Radar Systems* (3rd ed.). New York, NY: McGraw-Hill.
- Wang, M., & Li, X., 2022. High Gain Microstrip Array Antenna for Ka-Band Applications. *Progress In Electromagnetics Research C*, 118, 45-57. <https://doi.org/10.2528/PIERC21110901>