

Atıf İçin: Kalınay, G., Kaburcu, F., Kok, O. M. (2025). 24 GHz’de Geniş Bantlı ve Düşük Maliyetli Mikroşerit Slot Anten Tasarımı ve Analizi. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 15(2), 459-469.

To Cite: Kalınay, G., Kaburcu, F., Kok, O. M. (2025). Design and Analysis of A Wideband and Low-Cost Microstrip Slot Antenna at 24 GHz. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 15(2), 459-469.

24 GHz’de Geniş Bantlı ve Düşük Maliyetli Mikroşerit Slot Anten Tasarımı ve Analizi

Gürkan KALINAY^{1*}, Fatih KABURCUK², Mehmet Onur KÖK³

Öne Çıkanlar:

- 5G
- Genişbant anten
- FDTD

Anahtar Kelimeler:

- 5G anten
- Genişbant anten
- Slot anten
- Düşük maliyetli anten
- FDTD

ÖZET:

Bu çalışmada, beşinci nesil (5G) mobil iletişim uygulamaları için düşük maliyetli bir mikroşerit slot anteninin tasarımına, sayısal analizine ve üretimine odaklanılmıştır. Bu araştırmanın temel amacı 5G frekans bandında 24 GHz frekansında çalışan bir mikroşerit slot anteninin incelenmesidir. Bu frekans bandı, yüksek hızlı kablosuz iletişim için çeşitli frekans bantlarını kullanan 5G iletişim aralığının oldukça içerisindedir. Anten düşük maliyetli ve mobil iletişim cihazlarına uygun olacak şekilde tasarlanmıştır. Anten, baskılı devre kartlarında yaygın ve uygun fiyatlı olarak kullanılan ve $25 \times 20 \times 1.6 \text{ mm}^3$ kompakt boyutuna sahip bir FR-4 alt tabaka üzerine tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu alt tabaka seçimi, uygun maliyetli bir anten oluşturma hedefiyle uyumludur. Antenin performansını analiz etmek için iki hesaplama aracı kullanıldı. Bunlardan ilki, Sonlu Fark Zaman Alanı (FDTD) yöntemini temel alan Hesaplamalı Elektromanyetik Simülasyon (CEMS) yazılımı, ikincisi ise Sonlu Entegrasyon Tekniği (FIT) tabanlı CST yazılımıdır. Bu araçlar, çeşitli parametreleri değerlendirmek için anten tasarımında ve simülasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. 24 GHz’de önerilen antenin maksimum kazanç değeri 3.56 dBi’dir. Önerilen antenin ölçümleri Keysight Network Analizörü kullanılarak yapılmıştır.

Design and Analysis of A Wideband and Low-Cost Microstrip Slot Antenna at 24 GHz

Highlights:

- 5G
- Wideband antenna
- FDTD

Keywords:

- 5G antenna
- Wideband antenna
- Slot antenna
- Low cost antenna
- FDTD

ABSTRACT:

In this study the design and numerical analysis of a low-cost microstrip patch antenna for fifth-generation (5G) mobile communication applications are focused. The main objective of this research is to investigate a microstrip patch antenna that operates in the 5G frequency band at 24 GHz. These frequency band is well within the range of 5G communication, which utilizes a variety of frequency band for high-speed wireless communication. The antenna is designed to be low-cost and suitable for mobile communication devices. The antenna is designed and fabricated on a low-cost FR-4 substrate having compact size $25 \times 20 \times 1.6 \text{ mm}^3$, which is a common and affordable material used in printed circuit boards. This choice of substrate aligns with the goal of creating a cost-effective antenna. Two computational tools are used to analyze the antenna's performance. The first is a Computational Electromagnetic Simulator (CEMS) software based on the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method, and the second is CST software, which is based on the Finite Integration Technique (FIT). These tools are commonly used in antenna design and simulation to assess various parameters. The maximum gain value of the antenna is 3.56 dBi at 24 GHz. The measurement of the proposed antenna has been performed using the Keysight Network analyzer.

¹ Gürkan Kalınay ([Orcid ID: 0000-0002-2362-4188](https://orcid.org/0000-0002-2362-4188)) Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye

² Fatih Kaburcu ([Orcid ID: 0000-0002-7527-3850](https://orcid.org/0000-0002-7527-3850)), Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Sivas, Türkiye

³ Mehmet Onur Kök ([Orcid ID: 0000-0002-3318-7751](https://orcid.org/0000-0002-3318-7751)), Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Nevşehir, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Gürkan Kalınay, e-mail: gurkan.kalinay@erzurum.edu.tr

GİRİŞ

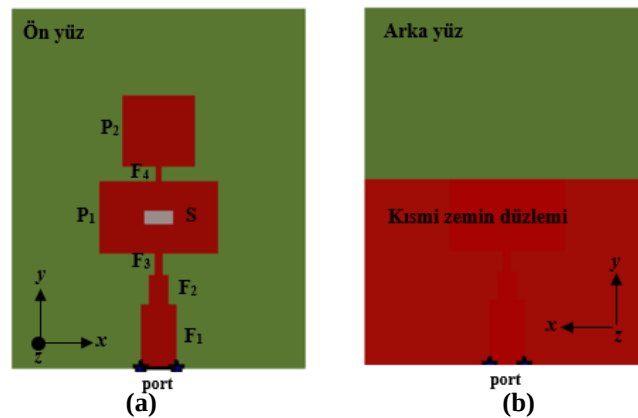
Akıllı cihazların gün geçtikçe artan kullanımı, yeni nesil teknolojik cihazların piyasaya sürülmesi ve multimedya uygulamalarının yaygınlaşması, kablosuz veri talebinin artmasına neden olmaktadır. Bu durum, mevcut hücresel ağları önemli bir şekilde etkilemektedir. 4. Nesil (4G) ve önceki mobil iletişim ağlarına kıyasla, yeni bir küresel iletişim standardı olan 5. Nesil (5G) mobil iletişim teknolojisinin bu artan talepleri karşılamak için önemli bir evrim geçirmesi beklenmektedir. (Yang ve ark.) Bu talep artışı beşinci nesil (5G) haberleşme teknolojisinde (Andrews ve ark.) milimetre dalga (mmW) spektrumunun araştırılmasına yol açmıştır. 5G teknolojisi, ultra yüksek veri hızları, çok düşük iletim gecikme süreleri, artan güvenilirlik, büyük ölçekli ağ kapasitesi ve daha kusursuz bir kullanıcı deneyimi sunma amacını taşımaktadır (Türk Telekom,2018). Bu özellikleriyle gelecekte el cihazları, tabletler ve bilgisayarlar için Nesnelerin İnterneti (IoT) uygulamalarına yönelik kablosuz haberleşme teknolojisinin geliştirilmesine izin verecektir. Ayrıca, 5G endüstriyel alanda, sağlık hizmetlerinde, tarım teknolojileri, araç uygulamaları (Zhang ve ark., 2018; Chen ve ark., 2019; Arumugam ve ark., 2025) gibi birçok alanda yenilikçi kullanım hizmetleri sunulmasına yardımcı olacaktır (Niu ve ark.). 5G haberleşme teknolojileri, 4G ve daha önceki teknolojiler için kullanılanlardan daha yüksek çalışma frekansına sahiptir. Bu nedenle, 5G ile uyumlu anten tasarımlarının, yeni nesil haberleşme teknolojisi için gerekli frekans bantlarında daha yüksek verim, daha geniş bant genişliği, düşük maliyet ve artan hassasiyet özellikleri taşıması öngörülmektedir. Bu bağlamda, küçük boyutlu, düşük güç tüketen, kolayca üretilebilen ve milimetre dalga bandında yüksek performansa sahip mikroşerit yama antenler, bu gereksinimleri karşılayabilme potansiyeline sahip önemli bir seçenek olarak değerlendirilmektedir. Federal İletişim Komisyonu (FCC) (2020) tarafından belirlenen 6 GHz üzerindeki 5G frekans bantları (5G Americas 2018; Qualcomm,2019) 24-30 GHz (24.25-24.45 GHz, 24.75-25.25 GHz ve 27.5-28.35 GHz), 37-50 GHz (37-37.6 GHz, 37.6-40 GHz ve 47.2-48.2GHz), 57-64 GHz, 64-71 GHz ve >95 GHz olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu 5G frekanslarında çalışmaya uyumlu yeni nesil antenlerin tasarımı ve üretimi de bu bakımdan önem arz etmektedir. 5G mobil haberleşme teknolojisinin önceki tüm teknolojilerden önemli farkları bulunmaktadır. Bu farklar daha geniş bant genişliği, yüksek verim ve yüksek performans olarak sıralanabilir. 5G teknolojisinin getirdiği bu farkları elde edebilmek ve mevcut mobil haberleşme sistemlerine entegre edebilmek için yüksek frekanslarda çalışabilen, verimli ve yüksek performanslı antenlerin kullanılması gerekmektedir. Bu sebeple, antenin tasarımı 5G teknolojisinin vazgeçilmez bir bileşeni haline gelmektedir. Yaygın olarak kullanılan mikroşerit yama antenler, düşük maliyetleri, kompakt boyutları ve hafiflikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Özellikle 5G teknolojisinde kullanılacak antenlerin üretimi için maliyeti azaltmak üzere kullanılan alt tabaka malzeme piyasada kolay bulunması ve maliyeti daha uygun olması sebebiyle FR-4 (Bano ve ark 2014; Ramli ve ark.,2020)'tür. Ancak özellikle yüksek frekanslı bantlarda, düşük maliyetli FR-4 alt tabakası üzerinde küçük boyutlu bir antenin üretilmesi, yüksek kayıplar nedeniyle sorun teşkil etmektedir. Ne var ki, FR-4 malzemesi, düşük maliyeti, yaygın bulunabilirliği, sağlam mekanik özellikleri ve uygun elektriksel karakteristikleri nedeniyle yaygın bir PCB üretim malzemesi olarak tercih edilmektedir. Bu, anten üreticilerine önemli maliyet avantajları sunmaktadır. Daha yüksek frekansta çalışan antenlerin tasarımı ve üretimi ise küçültülmüş boyutları, konnektör modellerindeki hatalar, konnektör pimi ile besleme hattı arasındaki lehim hataları ve üretim süreçlerindeki diğer potansiyel hatalar nedeniyle daha karmaşık hale gelmektedir.

Literatür incelendiğinde bu yeni nesil teknoloji için anten tasarım çalışmalarının (Ali ve ark., 2016; Haraz ve ark., 2015; Marzouk ve ark., 2019; Mohamed ve Himdi, 2019; Venkateshkumar ve ark., 2020; Kim ve Kim.,2021) birkaç yıl önce başladığı görülmektedir. Literatür incelemesi, 6 GHz ve üzeri frekans

aralığında çalışan birçok mikroşerit yama antenin önerildiğini ve bu antenlerin genellikle kompakt boyutları, küçük geometrik ölçüleri, geniş bant genişliği ve yüksek kazanç gibi karakteristiklere sahip olduğunu göstermektedir. Bu antenlerin çoğu, düşük dielektrik sabitli, ultra düşük kayıp tanjantı değeri ve yüksek maliyetli alt tabakalar üzerine tasarlanmıştır. Ancak, bu çalışmada sunulan anten, düşük maliyetli ve düşük kayıplı bir FR-4 alt tabaka üzerine tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu antenin, düşük maliyetli ve kayıplı bir alt tabaka kullanmasına rağmen, kazanç modelleri ve maksimum kazanç değerleri, literatürde 5G mobil iletişim için önerilen antenlerle benzer bir uygunluk sergilemektedir.

MATERYAL VE METOT

Önerilen antenin geometrisi Şekil 1'de gösterilmiştir. Anten, göreceli geçirgenliği 4.4, kayıp tanjantı 0.025 ve kalınlığı 1.6 mm olan düşük maliyetli bir FR-4 alt katmanının her iki tarafına tasarlanmış ve üretilmiştir. Antenin toplam boyutu 20 mm × 25 mm × 1.6 mm'dir. Alt tabakanın ön tarafında iki ışıma yapan parça, büyük parçada boşluk bulunmakta ve alt tabakanın arka tarafında kısmi bir zemin düzlemi vardır. Büyük parçada bulunan boşluk ile antenin rezonans frekansı, radyasyon deseni, bant genişliği, empedans uyumlaması ve polarizasyon gibi önemli parametrelerinin iyileştirilmesi ve kontrolü sağlanmıştır. Antenin sayısal analizi, sonlu farklar zaman alanı (FDTD) yöntemini (Elsherbeni ve Demir, 2016) temel alan hesaplamalı elektromanyetik simülatör (CEMS) yazılımı (Elsherbeni ve Demir, 2016) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca CST yazılımı (2008) yardımıyla imalat ve test öncesinde simülasyon tutarlılıklarını doğrulamak için analizler yapılmıştır. FDTD simülasyonunda problem alanı kübik hücrelerden oluşmakta ve hücre boyutunun seçimi çözümlerin doğruluğunu belirlemektedir. Sayısal kararlılığı sağlamak için, hücre boyutu $\lambda_{\min}/20$ 'den küçük olmalıdır; Burada $\lambda_{\min}$, problem uzayındaki en yüksek frekansın dalga boyudur. Bu nedenle bu çalışmada problemin tüm yönlerdeki hücre boyutu $\lambda_{\min}/20$ 'den küçük olan 0.1 mm olarak belirlenmiştir. Problem alanı, 15 hücreli hava katmanına sahip 10 kat evrişimli mükemmel şekilde eşleşen katman (CPML) (Kuzuoğlu ve Mittra, 1996) ile sonlandırılmıştır. Problem uzayındaki toplam hücre sayısı 4.950.000'dir. Simülasyon, saniyede neredeyse 2 milyar hücre (MCPS) yürütme kapasiteli GPU hesaplama kapasitesi ile 8000 zaman adımından sonra makul yakınsama göstermektedir. Bu antenin sonuçta ortaya çıkan toplam simülasyon süresi, Intel® Core™ i7-4790 CPU, 32 GB RAM ve Windows 10 sisteminde çalışan NVIDIA RTX 2070 Süper GPU ile kullanılan CEMS'de 19,8 saniyedir.



Şekil 1. Önerilen antenin (a) ön ve (b) arka yüz görünümü

Anten tasarımı yapılırken antenin temel elamanlarını hesaplayarak sürece devam etmek gerekmektedir. Bu temel elemanlar ise antenin boyutu, ışıma yapan yamanın boyutu ve besleme hattının boyutları olarak sıralanabilir. Ayrıca anten tasarımı sırasında dikkat edilmesi gereken önemli parametreler ise alt tabakanın dielektrik sabiti (ϵ_r), antenin çalışacağı rezonans frekansı (f_r) ve at

tabakanın yüksekliğidir(h) (Balanis 2016; Goyal ve Modani 2018). Bu önemli elemanların, belirtilen parametreler dikkat alınarak hesaplanabilmesi için aşağıdaki formüller kullanılmaktadır.

Yamanın genişliğini (W) ve uzunluğunu (L) belirleyebilmek için aşağıdaki formüller kullanılmaktadır.

$$W = \frac{v_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

Burada v_0 ışık hızını, f_r rezonans frekansını ve ϵ_r ise alt tabakanın dielektrik sabitini temsil etmektedir.

Bir mikroşerit antenin etkin dielektrik sabiti (ϵ_{reff}), denklem 2'deki dielektrik sabiti (ϵ_r), alt tabaka kalınlığı (h) ve genişlik W kullanılarak hesaplanır.

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} + \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}}} \quad (2)$$

Mikroşerit slot anten için uzatılmış artış uzunluğu (ΔL) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (3)$$

Slot anten için ana uzunluk, serbest uzaydaki ışık hızı (v_0), etkin dielektrik sabiti (ϵ_{reff}) ve uzatılmış artış uzunluğu (ΔL) içeren denklem 4 kullanılarak formüle edilir.

$$L = \frac{v_0}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta L \quad (4)$$

Belirli bir karakteristik empedans (Z_0) ve dielektrik sabiti (ϵ_r) için, $\frac{W}{h} > 2$ koşulu altında aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$\frac{W}{h} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \quad (5)$$

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (6)$$

Çeyrek dalga transformatörü, empedans uyumsuzluklarını eşleştirmek için kullanılan bir mikroşerit hattıdır. Mikroşerit hattı ile dikdörtgen slot antenin merkez noktasındaki genişlik arasındaki empedansı hizalar. Çeyrek dalga transformatörü için denklem aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir.

$$L_t = \frac{\lambda_g}{4} \quad (7)$$

Yönlendirilmiş dalga boyu (λ_g) aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (8)$$

Çeyrek dalga transformatörü için empedans denklemi aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

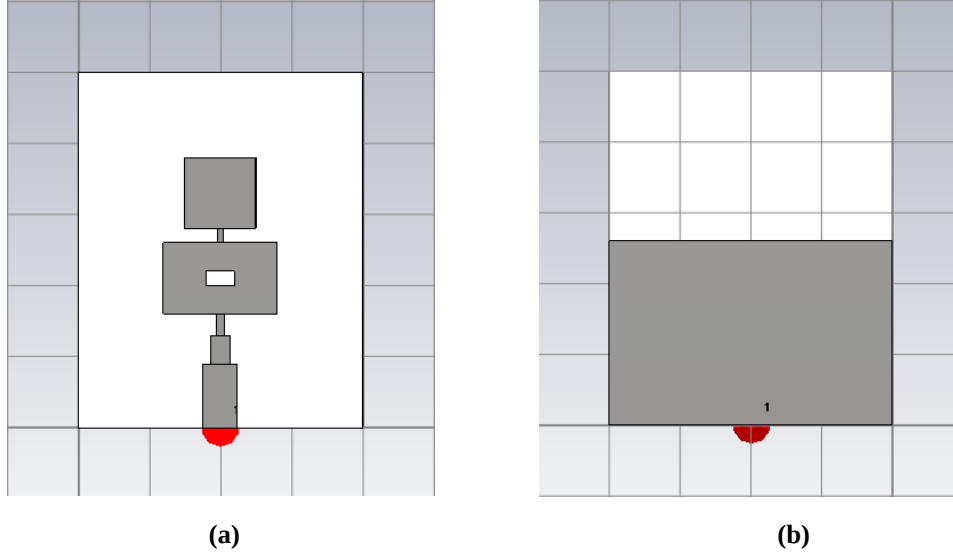
$$Z_t = \sqrt{Z_0 Z_p} \quad (9)$$

Besleme hattı empedansı (Z_0) 50 Ω olduğunu varsayarak, Z_p yama elemanının genişliği boyunca elde edilen empedansı belirtir. Rezonans oluştuğunda, merkez noktadaki giriş empedansı aşağıdaki denklemle verilir.

$$Z_p = \frac{1}{2G_1} \quad (10)$$

$$G_1 \begin{cases} \frac{1}{90} \left(\frac{W}{\lambda_o}\right)^2 & W \leq \lambda_o \\ \frac{1}{120} \left(\frac{W}{\lambda_o}\right) & W \geq \lambda_o \end{cases} \quad (11)$$

Gerekli hesaplamalar yapıldıktan sonra Şekil 1’de önerilen anten CST kullanılarak simülasyon ortamına aktarılmıştır. Şekil 2’ de simülasyon ortamına aktarılan önerilen mikroşerit slot anten gösterilmiştir. Ayrıca anten ölçüleri Çizelge 1’de verilmiştir.

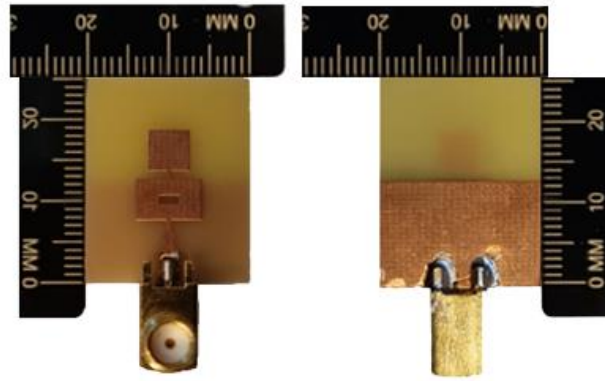


Şekil 2. Önerilen antenin CST ile tasarlanmış (a) ön ve (b) arka yüz görünümü

Önerilen anten için gerekli tasarım işlemleri yapıldıktan sonra üretim için 0.05 mm hassasiyete sahip CNC cihazına eklenen ve tarafımızca tasarlanan PCB kazıma cihazı yardımıyla antenin FR-4 alt tabaka üzerinde üretimi gerçekleştirilmiştir. Normal şartlarda CNC cihazı hassas üretimler için uygun değildir. Fakat antenin üretileceği alt tabaka olan FR-4 plakanın CNC cihazının anten geometrisini kazıması sırasında herhangi bir milimetrik kayma olmamasını önlemek için vakum tablası geliştirilmiştir. Bu vakum tablası çelik bir blok üzerine tasarlanmış ve bu çelik blok üzerine açılan delik sayesinde vakum pompasına bağlanmıştır. Kazıma sırasında vakum pompası çalışarak bakır plakayı çelik blok üzerinde sabit kalmasını sağlamıştır. Böylelikle kazıma işlemi milimetrik hata olmadan gerçekleştirilmiştir. Üretim yapılan sistem görselleri Şekil 3’te verilmiştir. Ayrıca üretilen antenin görselleri Şekil 4’te gösterilmiştir. Üretilen antene SMA dişi PCB dayanağı olan konnektör (50 Ω) lehimlenerek gerekli ölçümlerin yapılabilmesi sağlanmıştır.



Şekil 3. Üretim için kullanılan (a) çelik blok ve (b) CNC cihazı



(a)

(b)

Şekil 4. Önerilen antenin üretilen prototipi (a) ön yüz (b) arka yüz

Çizelge 1. Tasarlanan antenin boyutları

Parametre	Boy(mm)	En(mm)
F1	4.5	2.4
F2	2	1.4
F3	1.5	0.6
F4	1	0.4
P1	5	8
P2	5	5
S	1	2
G	13	20

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada önerilen mikroşerit slot antenin performansı, hem simülasyon hem de ölçüm teknikleri kullanılarak değerlendirilmiş ve sonuçlar Çizelge 2’de gösterilmiştir. Ayrıca antenin üç düzlem kesitindeki (x-y, x-z ve y-z) simüle edilmiş kazanç desenleri, Şekil 8’de sunulmuştur. Bu grafikler, antenin x-y ve x-z düzlemlerindeki kazanç desenlerinin neredeyse tüm yönlere eşit olduğunu göstermektedir. Özellikle, antenin x-z düzlemindeki çok yönlülüğü dikkat çekicidir. Antenin giriş yansıma katsayısı (S_{11}) değerleri 24 GHz’de geniş bir bant genişliğinde incelenmiştir ve elde edilen sonuçlar, antenin 5G mobil haberleşme uygulamaları için uygun geniş bant özelliklerine sahip olduğunu göstermiştir. Antenin simülasyonu için Computational Electromagnetic Simulator (CEMS) yazılımı ve CST yazılımı kullanılmıştır. CEMS yazılımında, Finite-Difference Time-Domain (FDTD) yöntemi temel alınmıştır. CEMS ile yapılan simülasyon sonuçlarına göre, anten 24.7 GHz rezonans frekansında -23.36 dB S_{11} değerine ulaşmış ve 23.8-27.6 GHz aralığında 3800 MHz bant genişliği sergilemiştir. CST simülasyonlarında ise, anten 24.9 GHz’de -22.62 dB değerine ve 23.85-28 GHz aralığında 4150 MHz bant genişliği elde etmiştir. Her iki simülasyon yöntemi de antenin 3.2 ila 3.56 dBi aralığında kazanç değerlerine sahip olduğunu göstermiştir ve CST ile elde edilen kazanç 3 boyutlu (3D) olarak Şekil 7’de gösterilmiştir. İki farklı simülasyon aracı ile önerilen antenin tutarlılığı kanıtlandıktan sonra üretimi yapılan antenin ölçümleri Keysight marka network analizör kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 2. Önerilen antenin performans parametreleri

Parametre	CEMS	CST	Ölçüm
Rezonans Frekansı (GHz)	24.7	24.9	24.4
S_{11} (dB)	-23.36	-22.62	-32.44
Frekans Aralığı (GHz)	23.8-27.6	23.85-28	23.7-27
Bant Genişliği (GHz)	3.8	4.15	3.3
Kazanç(dBi)	3.2	3.56	-

Ölçüm yapılan sistem Şekil 5’te gösterilmiştir. Ölçüm sonuçları, antenin 24.4 GHz’de -32.44 dB S_{11} değeri gösterdiğini ve 23.7-27 GHz frekans aralığında 3300 MHz bant genişliği sağladığını ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, simülasyon sonuçlarıyla oldukça uyumlu olup, önerilen anten tasarımının teorik tahminlerle tutarlı olduğunu kanıtlamaktadır.

Bu çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar ile literatürdeki benzer çalışmalar Çizelge 3’te karşılaştırılmıştır. Çizelge 3 ile benzer çalışmalar için alt tabaka, geri dönüş kaybı, kazanç, bant genişliği ve anten türü değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmalara bakıldığında, kullanılan alt tabakaların dielektrik özelliklerinin çok iyi olduğu görülmektedir. Bu durum anten performansını artırırken, üretim maliyetlerini de artırmaktadır. Bu çalışma kapsamında önerilen anten tabloda da görüldüğü üzere benzer çalışmalarla rekabet edebilecek performansla sahipken ayrıca maliyet olarak daha uygundur.

Çizelge 3. Önerilen antenin farklı çalışmalarla karşılaştırılması

Kaynak	Alt Tabaka Malzemesi	Rezonans Frekansı (GHz)	Geri Dönüş Kaybı (dB)	Kazanç (dBi)	Bant Genişliği (GHz)	Anten Türü
(Christina ve ark., 2017) **	Roger RT 5880	24.2	-22.1	5.95	1.2	Tekil anten
(Yu ve ark., 2019) **	Rogers RO4003C	24	-24	13.5	1.1	Dizi anten
(Sandi ve Marani, 2019) **	Rogers RT 5880	24.6	-20.65	-	1.219	Dizi anten
(Özpınar ve Akşimşek, 2020) *	Roger RT 5880	24	-18.5	8.446	7.2	Tekil anten
(Kaburçuk ve ark., 2021) **	FR-4	24	-14.86	3.20	0.9	Tekil anten
(Mollik ve ark., 2022) *	Rogers RO4003C	24.068	35.8	5.42	0.769	Tekil anten
(Zhu ve Liu, 2025) **	Roger RT 5880	24	-40.52	15.34	0.38	Dizi anten
(Önerilen)**	FR-4	24.4	-32.44	3.56	3.3	Tekil anten

*Simülasyon Çalışması

**Simülasyon ve Üretim Çalışması

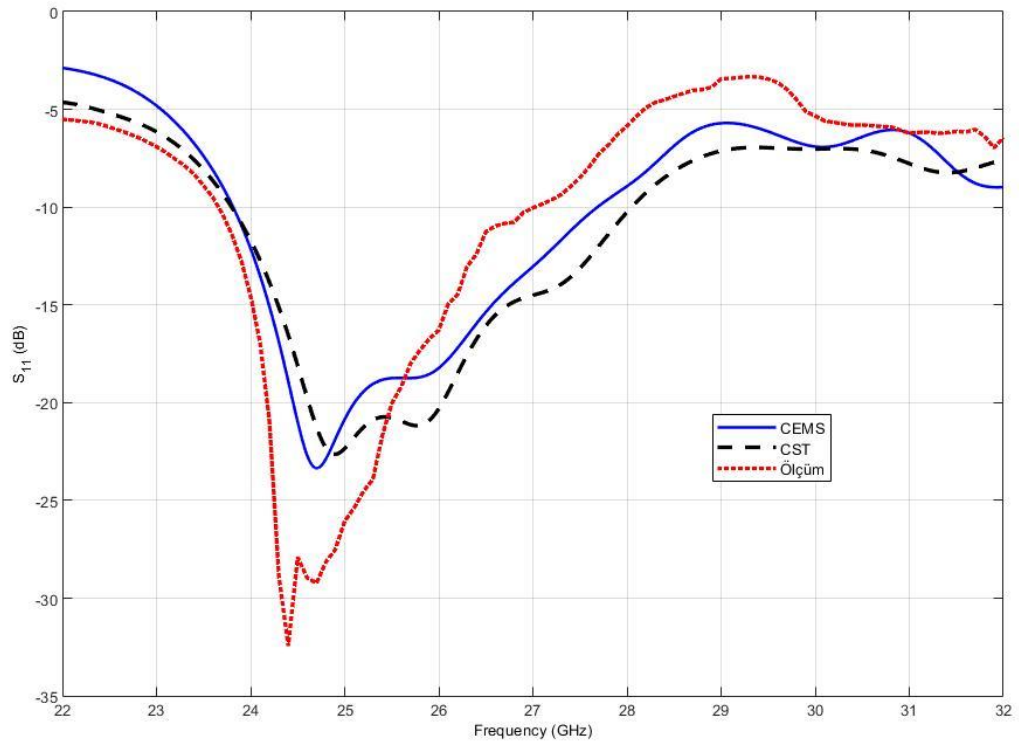
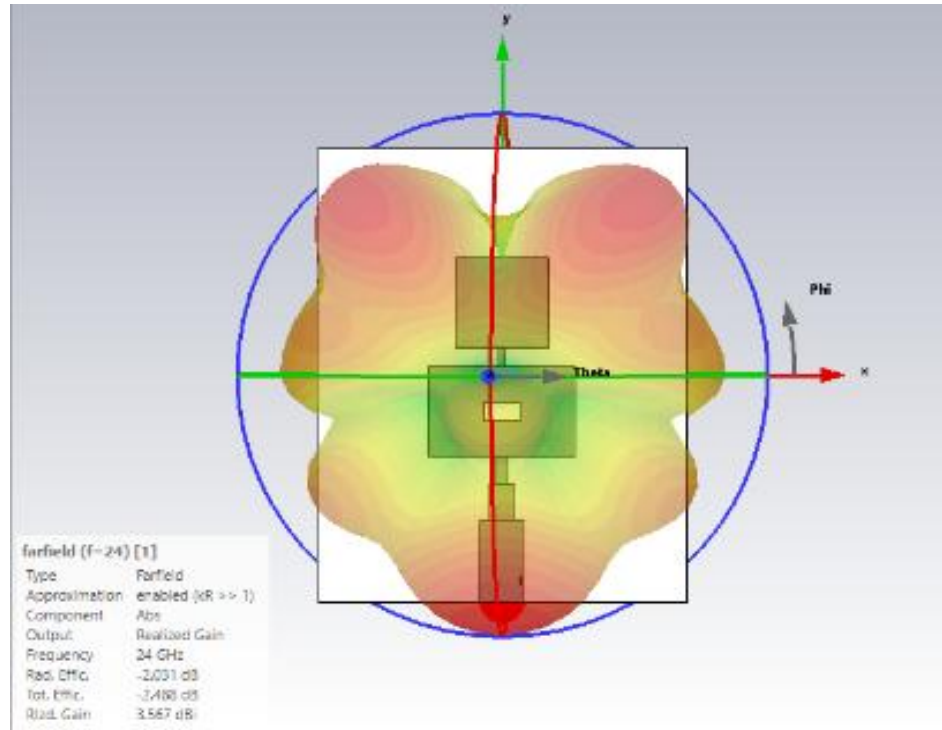
Bilindiği üzere FR-4 malzemesi için yüksek frekanslarda kayıplar belirgin bir şekilde artmaktadır. Önerilen anten 24 GHz frekansında çalışmaktadır. Bu durumda oluşacak olan kayıplar aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır. Bu formülde σ iletkenliği, f_c frekansı, ϵ_r malzemenin dielektrik sabitini ϵ_0 boşluğun dielektrik sabitini temsil etmektedir.

$$\tan\delta = \frac{\sigma}{2\pi f_c \epsilon_r \epsilon_0} \quad (12)$$

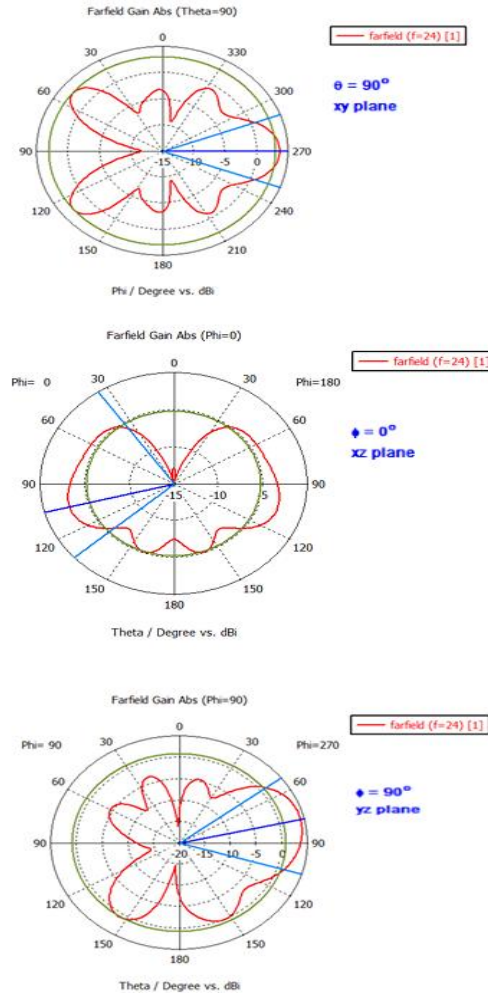
Kullanılan alttaş FR-4 olduğu için kayıp tanjant değeri (0.025) hiçbir frekans değeri için değişmeyecektir. Yüksek frekanslara çıkıldığında iletkenlik (σ) artacak ve buna bağlı olarak kayıplar artacaktır. Bu çalışma kapsamında bu kayıpları azaltabilmek için mikroşerit hatlar kullanılarak antenin giriş yansıma katsayısı ve bant genişliği uygun hale getirilmeye çalışılmış ve bunun sonucunda da literatürde bulunan dielektrik özellikleri daha iyi olan anten tasarımlarına yakın sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 5. Önerilen antenin ölçümü

Şekil 6. Ölçülen ve simüle edilen S_{11} 

Şekil 7. CST ile elde edilen 3D anten kazanç deseni



Şekil 8. 24 GHz'deki üç düzlem kesiti için CST ile elde edilen antenin kazanç desenleri

SONUÇ

Bu çalışmada, beşinci nesil (5G) mobil haberleşme uygulamaları için düşük maliyetli bir mikroşerit slot antenin tasarımı, sayısal analizi ve üretimi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Önerilen anten, FR-4 alt tabakası üzerinde üretimi yapılarak, 5G teknolojisinin yüksek veri hızları ve geniş bant genişliği gibi gereksinimlerini karşılamak için optimize edilmiştir. Antenin performansı hem simülasyon hem de deneysel yöntemlerle değerlendirilmiştir. CEMS sonuçları, antenin -23.36 dB giriş yansıma katsayısına (S_{11}) ve 24.7 GHz'de 3.24 dBi kazanca sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca, geniş bant genişliği ile 3800 MHz aralığında, verimli bir iletişim için gerekli olan şartları sağlamaktadır. CST yazılımı ile yapılan analizler de bu bulgularla tutarlı olup, antenin 4150 MHz bant genişliğine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Laboratuvarda yapılan ölçüm sonuçları da bu simülasyonlarla uyumlu bir performans sergileyerek, antenin 24.4 GHz'de -32.44 dB'lik bir giriş yansıma katsayısı ve 3300 MHz bant genişliğine sahip olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, önerilen antenin 5G haberleşme uygulamaları için uygun bir çözüm olduğunu ve düşük maliyetli bir üretim süreciyle yeterli performans elde edilebileceğini kanıtlamaktadır. Hem sayısal analiz hem de laboratuvar ölçümleri, antenin mobil cihazlarda kullanılabilecek niteliklere sahip olduğunu ve geniş bant gerektiren uygulamalarda kullanılabileceğini göstermektedir. Antenin kompakt yapısı ve kolay üretilebilmesi, 5G mobil cihazları ve diğer kablosuz iletişim uygulamaları için ideal bir çözüm sunmaktadır. Bu tasarım, maliyet etkinliği

ve performans açısından literatürdeki diğer mikroşerit slot antenler ile kıyaslandığında rekabetçi bir konumdadır.

Gelecekteki çalışmalarda, antenin farklı alt tabaka malzemeleri ile optimize edilmesi ve 5G'nin diğer frekans bantlarındaki performansının değerlendirilmesi önerilmektedir. Ayrıca, antenin gerçek dünyadaki mobil iletişim sistemlerinde uygulanabilirliğinin ve performansının test edilmesi de yararlı olacaktır. Bu araştırma, 5G anten tasarımı alanında önemli bir adım olup, düşük maliyetli, yüksek performanslı antenlerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit katkıda bulunduklarını beyan ederler.

KAYNAKLAR

- 5G Americas. (2018, April). 5G Americas spectrum recommendations for the U.S. https://www.5gamericas.org/wpcontent/uploads/2019/07/5G_Americas_Spectrum_Recommendations_for_the_U.S_Final.pdf
- Ali, M. M. M., Haraz, O., & Alshebeili, S. (2016). Design of a dual-band printed slot antenna with utilizing a band rejection element for the 5G wireless applications. *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, 1865–1866.
- Andrews, J. G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, A. E., Lozano, A., Soong, A. C. K., & Zhang, J. C. (2014). What will 5G be? *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 32(6), 1065-1082.
- Arumugam, S., Sangeetha, M., Charan, C., & Ns, H. (2025) Design of Grid Array Antenna for N258 Band Short Range Radar and N261 Band 5g Applications. Available at SSRN 5087214.
- Balanis, C. A. (2016). *Antenna theory: analysis and design*. <https://books.google.com/books?hl=tr&lr=&id=iFEBcGAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR13&dq=%E2%80%9CAntenna+Theory+Analysis+And+Design&ots=CmXrmU7wo&sig=sZx1zzC4ZxkPK7AV0OFYBQqnygQ>
- Bano, M., Rastogi, A. K., & Sharma, S. (2014). Design and simulation of microstrip patch antenna using different substrates. *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET)*, 3(11). ISSN 2278–1323.
- Chen, Y., Liu, Y., Zhang, Y., Yue, Z., & Jia, Y. (2019, October). A 24GHz millimeter wave microstrip antenna array for automotive radar. In *2019 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)* (pp. 1-2). IEEE.
- Christina, G., Rajeswari, A., & Mathivanan, S. (2017). Real-time analysis of a 24 GHz planar microstrip antenna for vehicular communications. *Wireless Personal Communications*, 97(1), 1129–1139. <https://doi.org/10.1007/s11277-017-4557-9>
- CST Microwave Studio (Version 2008) [Computer software]. (2008). Computer Simulation Technology.
- Demir, V., & Elsherbeni, A. Z. (2021). Computational electromagnetic simulator (Software package version 4).
- Elsherbeni, A. Z., & Demir, V. (2016). *The finite-difference time-domain method for electromagnetics with MATLAB simulations* (2nd ed.). SciTech Publishing, an imprint of IET.
- Federal Communications Commission. (2020, October). America's 5G future. <https://www.fcc.gov/5G>
- Goyal, R. K., & Shankar Modani, U. (2018a). A Compact Microstrip Patch Antenna at 28 GHz for 5G wireless Applications. *3rd International Conference and Workshops on Recent Advances and Innovations in Engineering, ICRAIE 2018*. <https://doi.org/10.1109/ICRAIE.2018.8710417>
- Haraz, O. M., Ali, M. M. M., Alshebeili, S., & Sebak, A. (2015). Design of a 28/38 GHz dual-band printed slot antenna for the future 5G mobile communication networks. *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, 1532–1533.
- Kaburcu, F., Kalinay, G., Chen, Y., Elsherbeni, A. Z., & Demir, V. (2021). A dual-band and low-cost microstrip patch antenna for 5g mobile communications. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*, 824-829.

- Kim, G., & Kim, S. (2021). Design and analysis of dual polarized broadband microstrip patch antenna for 5G mmWave antenna module on FR4 substrate. *IEEE Access*, 9, 64306–64316. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3075495>
- Kuzuoglu, M., & Mittra, R. (1996). Frequency dependence of the constitutive parameters of causal perfectly matched anisotropic absorbers. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 6(12), 447–449.
- Marzouk, H. M., Ahmed, M. I., & Shaalan, A. A. (2019). A novel dual-band 28/38 GHz slotted microstrip MIMO antenna for 5G mobile applications. *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, 607–608.
- Mohamed, B. T., & Himdi, M. (2019). Design of parallel-series microstrip patch antenna array at mmWave for future 5G applications. *7th Mediterranean Congress of Telecommunications (CMT)*, 1–4.
- Mollik, D., Islam, R., Anwar, A. B., Purnendu, P. K. S., Shanto, M. A. H., & Ahmad, M. (2022). Design of 24 GHz ISM band microstrip patch antenna for 5G communication. In *2022 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS)* (pp. 1–6). Toronto, ON, Canada. <https://doi.org/10.1109/IEMTRONICS55184.2022.9795716>
- Niu, Y., Li, Y., Jin, D., Su, L., & Vasilakos, A. V. (2015). A survey of millimeter wave communications (mmWave) for 5G: opportunities and challenges. *Wireless Networks*, 21(8), 2657–2676.
- Özpinar, H., & Akşimşek, H. S. (2020). Design of 24–28 GHz band 5G antenna based on symmetrically located circular gaps. *European Journal of Science and Technology*, (Special Issue), 408–413. <https://doi.org/10.31590/ejosat.843864>
- Sandi, E., & Marani, T. (2020, July). Design of multiband MIMO antenna for 5G millimeterwave application. In *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 852, No. 1, p. 012154). IOP Publishing.
- Qualcomm. (2019, November). Global update on 5G spectrum. <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/spectrum-for-4g-and-5g.pdf>
- Ramli, N., Noor, S. K., Khalifa, T., & Abd Rahman, N. H. (2020). Design and performance analysis of different dielectric substrate based microstrip patch antenna for 5G applications. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 11(8).
- Türk Telekom. (2018). 5G+ Bilgi Notu Beyaz Kitap.
- Venkateshkumar, U., Kiruthiga, S., Mihitha, H., Maheswari, K., & Nithiyasri, M. (2020). Multiband patch antenna design for 5G applications. *Fourth International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*, 528–534.
- Yang, Y., Xu, J., Shi, G., & Wang, C.-X. (2017). *5G wireless systems simulation and evaluation techniques*. Springer.
- Yu, C.-A., Chin, K.-S., & Lu, R. (2019). 24-GHz wide-beam patch antenna array laterally loaded with parasitic strips. In *2019 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC)* (pp. 1–3). <https://doi.org/10.1109/CSQRWC.2019.8799203>
- Zhang, Y., Chen, Y., Liu, Y., & Lu, Y. (2018, July). Millimeter wave microstrip antenna array for automotive collision avoidance radar. In *2018 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium-China (ACES)* (pp. 1–2). IEEE.
- ZHu, J., & Liu, J. (2025). Design of microstrip antenna integrating 24 GHz and 77 GHz compact high-gain arrays. *Sensors*, 25(2), 481. h