



## ÇOK BANDLI UYGULAMALAR İÇİN YÜKSEK PERFORMANSLI MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI

Mehmet Ali BELEN\*

İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Hatay, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Mikroşerit, Anten, GSM, Çok Bandlı, LTE.</i>	Bu çalışmada, kablosuz iletişim sistemlerinde kullanılan çok bandlı mikroşerit antenlerin tasarımı ve optimizasyonu ele alınmıştır. Çok bandlı antenler, GSM, LTE, Wi-Fi ve 5G gibi farklı ağlar üzerinde çalışabilen, cihazların farklı frekans bandlarına erişimini sağlayan kritik bileşenlerdir. Ancak, bu antenlerin tasarımı, geniş bir frekans aralığında yüksek kazanç sağlarken, anten boyutu ve band genişliği gibi çeşitli parametreleri dengelemeyi gerektiren zorlu bir süreçtir. Bu nedenle, literatürde anten performansını iyileştirmek amacıyla parazitik elemanlar, fraktal yapılar ve metamateryaller gibi çeşitli yenilikçi yaklaşımlar önerilmiştir. Çalışmada, 3B simülasyon programı kullanılarak özgün bir mikroşerit anten tasarımı gerçekleştirilmiş ve literatürdeki rakip modellerle kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen antenin yüksek elektromanyetik performans karakteristiklerine sahip olduğunu göstermektedir.

## HIGH-PERFORMANCE MICROSTRIP ANTENNA DESIGN FOR MULTIBAND APPLICATIONS

Keywords	Abstract
<i>Microstrip, Antenna, GSM, Multiband, LTE.</i>	In this study, the design and optimization of multiband microstrip antennas used in wireless communication systems are addressed. Multiband antennas are critical components that enable devices to access different frequency bands, operating on various networks such as GSM, LTE, Wi-Fi, and 5G. However, designing these antennas is a challenging process that requires balancing conflicting parameters like antenna size and bandwidth while achieving high gain across a wide frequency range. In this context, the literature has proposed various innovative approaches, such as parasitic elements, fractal geometries, and loading elements, to improve antenna performance. In this study, a unique microstrip antenna design was developed using 3D simulations, and this design was compared with competing models from the literature. Additionally, the results demonstrate that the proposed antenna exhibits high electromagnetic performance characteristics.

### Alıntı / Cite

Belen, M. A., (2024). Çok Bandlı Uygulamalar için Yüksek Performanslı Mikroşerit Anten Tasarımı, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(4), 866-875.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Mehmet A. BELEN/ 0000-0001-5588-9407

### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	18.09.2024
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	05.11.2024
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	18.11.2024
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	25.12.2024

\* İlgili yazar / Corresponding author: mali.belen@iste.edu.tr, +90-326-310-1010

# HIGH-PERFORMANCE MICROSTRIP ANTENNA DESIGN FOR MULTIBAND APPLICATIONS

Mehmet Ali Belen<sup>†</sup>

Iskenderun Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Electrical and Electronics Engineering, Hatay, Türkiye

---

## Highlights

- The design and optimization of a multiband microstrip antenna, targeting GSM, LTE, Wi-Fi, and 5G.
- The proposed antenna design employs innovative techniques such as parasitic elements, fractal geometries.
- 3D simulations and optimization using Particle Swarm Optimization,
- Experimental results confirmed the design's effectiveness compared with designs in the literature.

---

## Purpose and Scope

The primary aim of the research presented in this paper is to design and optimize a multiband microstrip antenna that can operate effectively across various wireless communication networks such as GSM, LTE, Wi-Fi, and 5G. The paper addresses the challenge of balancing antenna size, gain, and bandwidth while achieving high electromagnetic performance across multiple frequency bands. The research also seeks to develop innovative solutions, such as incorporating parasitic elements and fractal geometries, to improve antenna performance. Additionally, the study aims to validate the proposed design through 3D simulations and experimental measurements, comparing its effectiveness with existing models in the literature.

## Design/methodology/approach

The antenna design process begins with creating a multiband microstrip antenna using 3D electromagnetic simulation tools. These simulations help to analyze the antenna's performance across various frequency bands and guide design improvements. To further refine the antenna's performance, the PSO algorithm is employed. This optimization technique is used to adjust the antenna's design variables to maximize its efficiency across targeted frequency bands (1.5 GHz, 5.2 GHz, and 10 GHz). Experimental Validation: After the simulations and optimizations, a prototype of the antenna is fabricated. The antenna is then tested in a laboratory setting, and its performance is measured using a network analyzer. These experimental results are compared with the simulated data to ensure consistency.

## Findings

**Successful Multiband Performance:** The proposed microstrip antenna was found to operate effectively across three targeted frequency bands: 1.5 GHz (GSM), 5.2 GHz (Wi-Fi/ISM), and 10 GHz (X-band applications). The antenna achieved a return loss ( $S_{11}$ ) of less than -10 dB in all these bands, indicating good impedance matching and efficient signal transmission.

**High Gain and Compact Size:** The antenna demonstrated competitive gain values of 1.6 dBi, 3 dBi, and 5 dBi for the three frequency bands, respectively. Despite its compact size (35x43.8 mm), the design performed well, balancing antenna size with performance.

**Optimization Success:** The use of Particle Swarm Optimization (PSO) played a significant role in fine-tuning the antenna's design variables, leading to enhanced performance across multiple bands. The optimized design provided high electromagnetic performance without compromising the antenna's compact form.

**Experimental Validation:** The fabricated prototype showed good agreement between the simulated and measured results, confirming the effectiveness of the design and optimization process. The measured scattering parameters and gain values closely matched the simulation data, validating the antenna's real-world performance. Overall, the findings demonstrated that the proposed antenna design met the objectives of achieving high performance across multiple frequency bands while maintaining a compact size, making it suitable for modern wireless communication applications like GSM, LTE, Wi-Fi, and 5G.

## Research limitations/implications

The taken geometry is only applicable for up to 12 GHz application due to the limitation of the material. With more complex substrate material designs for higher operation band can be achieved.

## Originality

The paper is the design and optimization of a high-performance multiband microstrip antenna that operates efficiently across three key frequency bands: 1.5 GHz, 5.2 GHz, and 10 GHz. The use of Particle Swarm Optimization (PSO) for fine-tuning the antenna's parameters is a significant innovation, allowing for enhanced performance in multiple bands while maintaining a compact form factor. The paper introduces innovative design techniques, such as the incorporation of parasitic elements, fractal geometries, and loading elements, to balance size, gain, and bandwidth.

---

<sup>†</sup> İlgili yazar / Corresponding author: mali.belen@iste.edu.tr, +90-326-310-1010

## 1. Giriş (Introduction)

Kablosuz iletişim sistemlerinin gelişmesi ile günümüzdeki modern teknoloji en temel yapısı haline gelmiştir (Zheng, J., 2024). Günlük tüketici cihazlarından, kritik altyapılara kadar geniş bir yelpazede uygulamalar için temel oluşturan bu sistemler, bilginin, fiziksel bağlantıların sınırlamaları olmadan geniş mesafeler boyunca kesintisiz bir şekilde aktarılmasına olanak sağlamaktadır. Sistemin genişlemesi ve ihtiyaçların artması ile birlikte, hız, hareketlilik ve esnekliğin ön planda olması ile bu sistemlerin ihtiyaç duyduğu performans gereksinimleri de ciddi şekilde artmaktadır (Asghar, M. Z., 2022).

Bu sistemdeki en önemli unsurlardan biri ise, sistemin çeşitli frekans bandlarında çalışabilmesidir. Cihazların aynı anda iletişim, veri transferi ve multimedya akışı gibi çeşitli işlevleri yerine getirmesinin beklendiği senaryolarda, çok bandlı çalışma talebi hızla artmıştır, dolayısı ile birden fazla frekansta çalışabilen sistemler modern iletişim ağlarının çeşitli ihtiyaçlarını karşılamak için temel bir gereklilik haline gelmiştir (Aboagye, S., 2024). Bu bağlamda, çok bandlı antenler, kablosuz iletişim ekosistemde kritik bileşenler olarak ortaya çıkmışlardır (Arnaoutoglou, D. G, Vetrichelvi, G., 2024; Bagheri, N., 2024; Narula, A. K., 2024). Bu antenler, cihazların GSM, LTE, Wi-Fi ve 5G gibi farklı ağlar üzerinden iletişim kurmasını sağlayarak farklı frekans bandlarına erişim sunar (Muhammad, H. A, 2024; Makal, S., 2021; Mahouti, P., 2021; H Patel, D., 2021; Ur Rehman, M.,2018; Khan, R., 2018). Bu bandlar arasında geçiş yapabilme yeteneği, cihazların çevreden bağımsız olarak, yoğun parazitten bulunduğu bir kentsel alan veya sınırlı kapsama alanına sahip uzak bir bölgede gibi her türlü ortamda bağlantıda kalmasını sağlar. Bu esneklik sadece kullanıcı deneyimini geliştirmekle kalmaz, aynı zamanda sınırlı ve oldukça değerli bir kaynak olan mevcut spektrumun kullanımını da optimize eder (Aboagye, S., 2024). Ancak, çok bandlı antenlerin tasarımı, kendine özgü zorlukları da beraberinde getirmektedir. Tasarımcılar, performanstan ödün vermeden, geniş bir frekans aralığında verimli, yüksek kazançlı bir şekilde çalışabilecek kompakt antenler tasarlamak zorundadırlar. Bunu başarmak, genellikle karmaşık geometriler içeren tasarımlar veya ileri düzey malzemelerin kullanılması gibi yenilikçi yaklaşımlar gerektirir (Kannadhasan, S., 2022). Ayrıca, anten ile cihaz gövdesi arasındaki etkileşim, performansta öngörülemeyen değişikliklere yol açabilir ve bu da kapsamlı test ve optimizasyon gerektirir. Bunun yanı sıra, anten boyutu, kazanç ve band genişliği arasındaki birbirine zıt ilişkiler, özellikle çok bandlı tasarımlarda daha da belirgin hale gelmektedirler (Gocen, C.; Akdag, 2024). Daha küçük bir anten, mobil cihazlar için tercih edilebilir, ancak genellikle birden fazla bandta güçlü bir iletişim için gereken yüksek kazancı sağlamakta zorlanır. Bunun tersine, bir frekans bandı için yapılan optimizasyon, diğerinde performans kaybına neden olabilir ve bu da kaçınılmaz olarak karmaşık bir dengeleme süreci yaratır (Malik, P. K., 2022). Birçok çalışma, parazitik elemanların kullanımıyla ek rezonans frekansları oluşturarak çok bandlı anten performansı elde etmeye odaklanmıştır. Örneğin, bazı araştırmalarda, temel anten yapısına eklenen parazitik elemanlar sayesinde birden fazla rezonans noktası oluşturulmuştur (Jin, P.,2011; Kumar, P.2021). Bu teknik, özellikle küçük antenlerin yüksek performans göstermesi gerektiğinde tercih edilmektedir. Parazitik elemanlar, antenin boyutunu arttırmadan birden fazla bandda çalışmasını sağlar (Kalis, A., 2014).

Başka bir teknik olarak, fraktal geometrilerin kullanımı öne çıkmaktadır. Fraktal geometriler, karmaşık ve kendi kendini tekrar eden yapılarıyla, antenlerin farklı frekans bandlarında çalışmasına olanak tanımaktadır (Saraswat, R. K., 2021). Bu yöntem, özellikle sınırlı alanlarda daha geniş bir band genişliği elde etmek için etkilidir. Fraktal antenler, geniş bandlı performans ve çok bandlı işlevsellik sunma yetenekleri nedeniyle literatürde sıkça incelenmiştir (Tesfaye, B. C., Dwivedy, B., 2022). Yükleme elemanları da başka bir popüler yaklaşımdır. Bu elemanlar, antenin rezonans frekanslarını ayarlamak için kullanılır. Örneğin, kapasitif ve endüktif yüklemeler kullanılarak antenin fiziksel boyutları küçültülürken, belirli frekanslarda rezonans sağlanabilir (Oh, J., 2011). Bu yöntem, antenin boyutunun kritik olduğu mobil cihazlar gibi uygulamalarda oldukça etkilidir. Aktif devre elemanı tabanlı ayarlanabilir anten teknikleri ise daha esnek anten tasarımları için kullanılmıştır (Mohamadzade, B., 2020). Bu çalışmalarda, antenlerin farklı frekans bandlarında çalışabilmesi için PIN diyotlar, MEMS anahtarları gibi aktif elemanlar entegre edilmiştir (Ojaroudi Parchin, 2020). Bu teknikler, antenin çalışma frekanslarını elektronik olarak değiştirebilmesine olanak tanır ve bir antenin birden fazla bandı desteklemesini sağlar. Bu tür antenler, özellikle değişken çevresel koşullara adapte olabileme yetenekleri ile öne çıkmaktadır (Ding, Z. F.,2015). Son olarak, çok katmanlı yapıların kullanımı da literatürde dikkat çekmektedir. Çok katmanlı antenler, farklı dielektrik katmanlarının bir araya getirilmesiyle tasarlanır. Bu katmanlar, antenin birden fazla bandta çalışmasını sağlayacak şekilde düzenlenmektedir. Çok katmanlı antenler, özellikle yüksek performans gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir (Ding, Z. F.,2015).

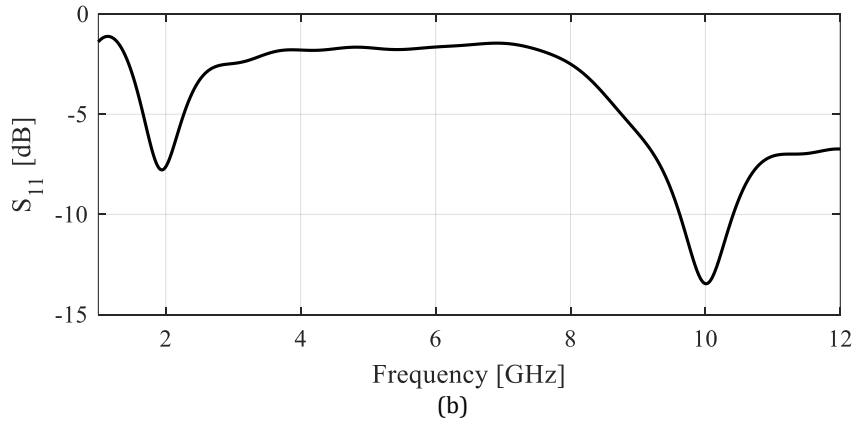
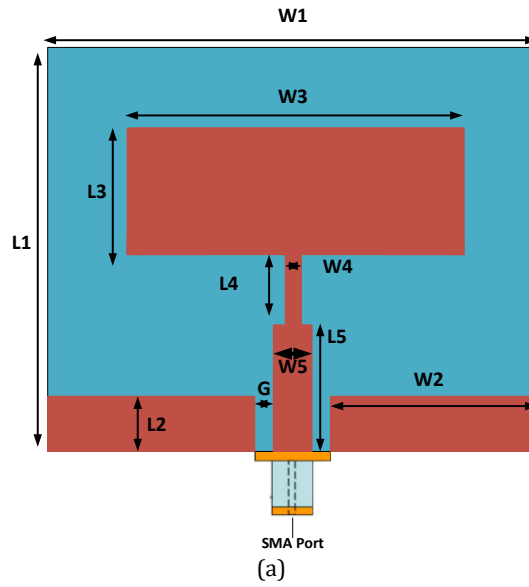
Bu çalışma kapsamında çok bandlı uygulamalar için özgün, yüksek elektromanyetik performans karakteristiğine sahip bir mikroşerit anten tasarımı ele alınmıştır. Önerilen antenin tasarım aşamaları 3B simülatör aracılığı ile gerçekleştirilmiş olup, elde edilen nihai tasarım üretilerek literatürdeki rakip tasarımlar ile kıyaslanmıştır.

## 2. Anten Tasarımı (Antenna Design)

Çalışmanın bu bölümünde, önerilen yüksek performanslı çok bantlı anten yapısının tasarım aşamaları detaylıca incelenmiştir. Önerilen anten yapısına erişmek için öncelik ile Şekil 1 (a) da sunulan temel kare mikroşerit anten yapısı ele alınmıştır. İlgili anten literatürde en çok karşılaşılan yapı olmasına rağmen hedeflenen elektromanyetik performans kriterlerine sahip değildir (Şekil 1 (b)).

**Tablo 1.** Temel kare mikroşerit anten yapısına ait tasarım değişkenleri değerleri (mm)  
(The design variable values (mm) for the basic square microstrip antenna structure)

<b>w1</b>	35	<b>L1</b>	43.8
<b>w2</b>	20	<b>L2</b>	5
<b>w3</b>	22	<b>L3</b>	12
<b>W4</b>	2	<b>L4</b>	5
<b>W5</b>	2.5	<b>L5</b>	10
<b>g</b>	0.4		

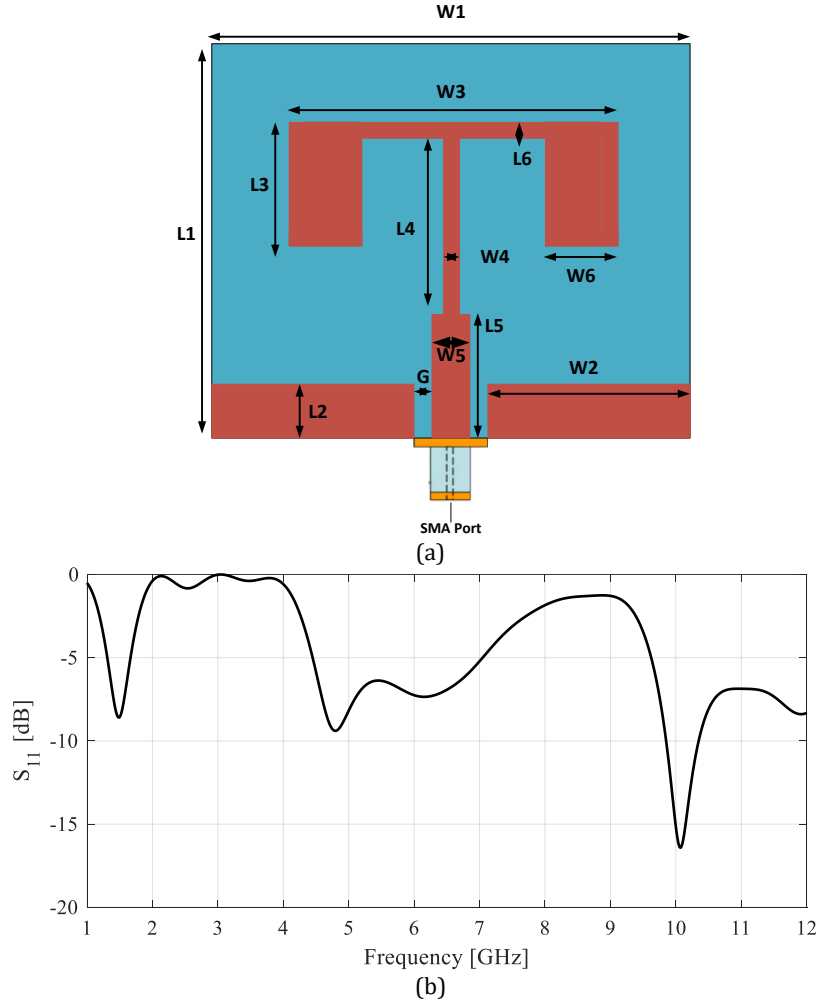


**Şekil 1.** Temel bir kare şeklinde mikroşerit anten (a) görseli, (b) simüle edilmiş  $S_{11}$  karakteristiği  
(a) Image of a basic square-shaped microstrip antenna, (b) Simulated  $S_{11}$  characteristic)

Antende ek rezonans frekansları oluşturmak için besleme ağının üstünde yer alan mikroşerit kısım, iletim hattından merkez alınarak kollara doğru kesilmiştir (Şekil 2(a)). Bu sayede antenin elektromanyetik karakteristiği değiştirilerek 5.2 GHz frekansında ek bir rezonans frekansı elde edilmiştir, ancak antenin verimli çalışması için,  $S_{11}$  seviyesi tek başına yeterli değildir. Bu iyileştirme istenilen elektromanyetik karakteristiğe uygun değildir.

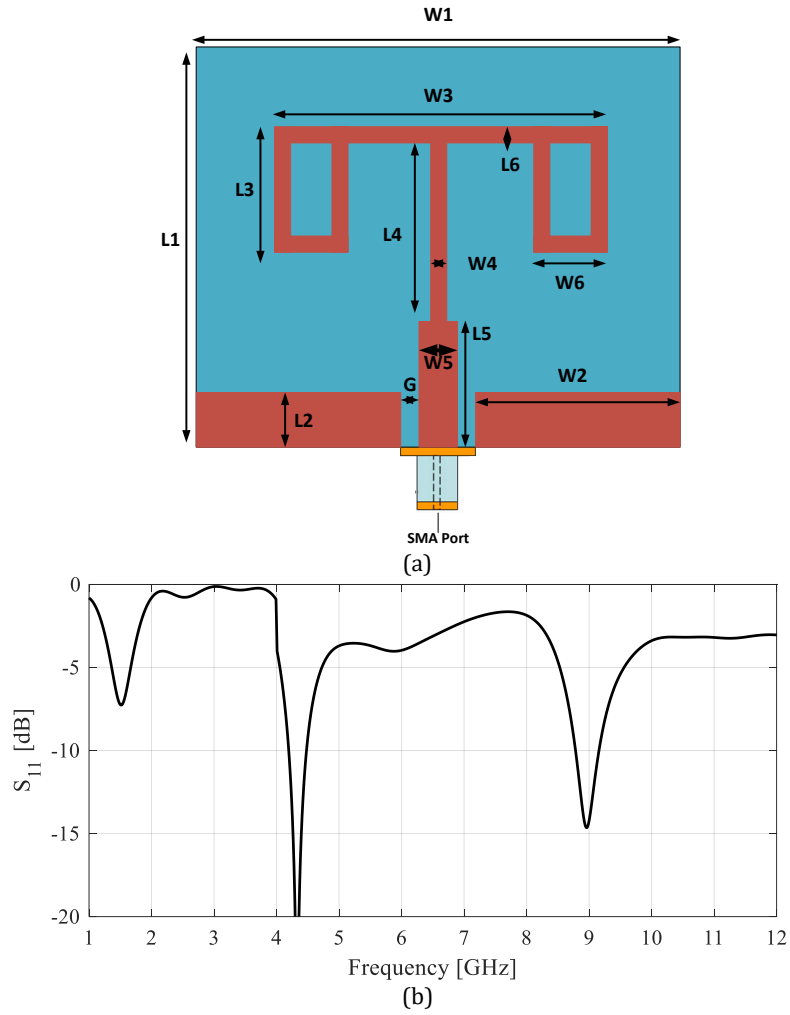
**Tablo 2.** İkinci aşama kare mikroşerit anten yapısına ait tasarım değişkenleri değerleri (mm)  
(the design variable values (mm) for the second stage square microstrip antenna structure)

<b>w1</b>	35	<b>L1</b>	43.8
<b>w2</b>	20	<b>L2</b>	5
<b>w3</b>	22	<b>L3</b>	12
<b>W4</b>	2	<b>L4</b>	5
<b>W5</b>	2.5	<b>L5</b>	10
<b>W6</b>	6	<b>L6</b>	2
<b>g</b>	0.4		

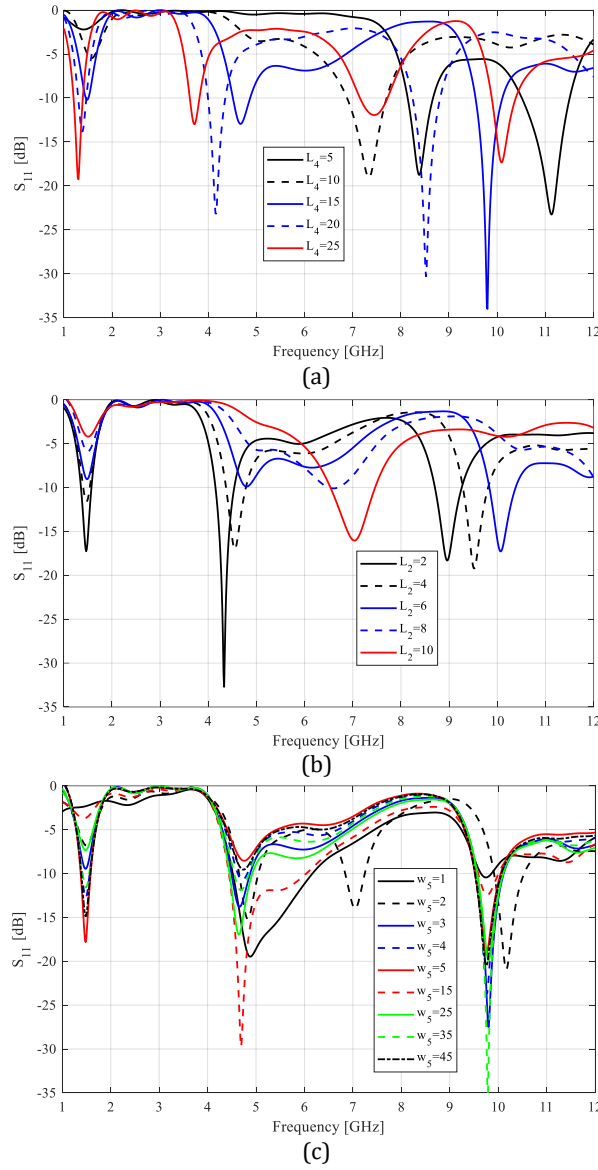


**Şekil 2.** İkinci aşama kare şeklinde mikroşerit anten (a) görseli, (b) simüle edilmiş  $S_{11}$  karakteristiği  
((a) Image of a second stage square-shaped microstrip antenna, (b) Simulated  $S_{11}$  characteristic)

Önerilen anten tasarımına ulaşmak (Şekil 3 (a)) için son aşamada, antenin 3 farklı bandda rezonansa girdiği ve tüm ilgili frekanslarda  $S_{11}$  değeri  $-10$ db den daha düşük olduğu görülmüştür (Şekil 3 (b)). Burada oluşturulan anten yapısının potansiyelinin incelenmesi için tasarım değişkenlerine göre bir hassasiyet analizi gerekmektedir. Şekil 4'den görüleceği üzere, önerilen anten yapısının karmaşık geometrisi ve değişkenlerin genel anten performansına ciddi etkisi olmaktadır. Bu parametrelerin doğru değişimi ile istenilen çalışma frekanslarında ışıma sağlayacak bir anten tasarımı yapılabileceği gibi, bu parametrelerin yanlış seçiminde ise antenin gerçek performansına ulaşamamasına neden olabilir.



**Şekil 3.** Önerilen mikroşerit antene ait (a) tasarım görseli, (b) simule edilmiş  $S_{11}$  karakteristiği  
 ((a) Design image of the proposed microstrip antenna, (b) Simulated  $S_{11}$  characteristic)



**Şekil 4.** Önerilen antene ait tasarım değişkenlerinin  $S_{11}$  hassasiyet analizi ( $S_{11}$  sensitivity analysis of the design variables for the proposed antenna)

Bu kapsamda antene ait değişkenlerin istenilen elektromanyetik karakteristiği sağlaması için optimum bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Hedeflenen anten tasarımı çok bantlı bir tasarım olması nedeni ile bu problem çok hedefli bir optimizasyon problemi olarak adlandırılabilir. Bunun nedeni ise birinci çalışma frekansın ayarlanması ile ikinci çalışma frekansının performansı istenmeyen bir şekilde değişebilir bu kriterler birbirleri ile genellikle çelişkilidirler. Bu problemin giderilmesi için bölgesel (Local) bir arama yerine küresel (global) tarama yapabilecek optimizasyon algoritmalarına ihtiyaç vardır. Burada denklem 1 de sunulan maliyet fonksiyonu kullanılarak hedeflenen antene ait tasarım optimizasyonu yapılacaktır.

$$\text{Maliyet} = \sum_{f_{\min 1}}^{f_{\max 1}} \frac{A_1}{|S_{11_i}(f)|} + \sum_{f_{\min 2}}^{f_{\max 2}} \frac{A_2}{|S_{11_i}(f)|} + \sum_{f_{\min 3}}^{f_{\max 3}} \frac{A_3}{|S_{11_i}(f)|} \quad (1)$$

Burada  $A$  değerleri, maliyet fonksiyonuna ait bileşenlerin (alt kriterlerinin) ağırlık katsayılarıdır. Bu çalışmada, her bir bantın önemi eşit olduğundan, bu katsayılar bir değerine eşit alınmıştır. Burada amaç, verilen frekans aralıklarındaki  $S_{11}$  değerlerinin genliklerini maksimize etmektir. Çok bantlı antenin hedeflenen çalışma bantları şu şekilde seçilmiştir: (I) 1.5 GHz GSM band uygulamaları, (II) Wi-Max ve ISM bandı uygulamaları için 5.2 GHz, (III) X bandı uygulamaları için 10 GHz. Bu aşamada literatürde sıklıkla kullanılan Parçacık sürü optimizasyonu yöntemi kullanılarak antene ait optimum değişkenlerin elde edilmesi hedeflenmiştir. PSO ya ait hiper-parametre seti ise şu şekilde alınmıştır: popülasyon sayısı 50 maksimum iterasyon 40, başlangıç noktalarının seçimi latin-hypercube.

Optimizasyon sonucunda elde edilen optimum tasarım değişkenleri Tablo 1' de ve bu tasarıma ait simülasyon sonucu ise Şekil 3 (b) sunulmuştur.

**Tablo 3.** PSO ile optimize edilmiş antene ait tasarım değişkenleri değerleri (mm)  
(The design variable values (mm) for the antenna optimized with PSO)

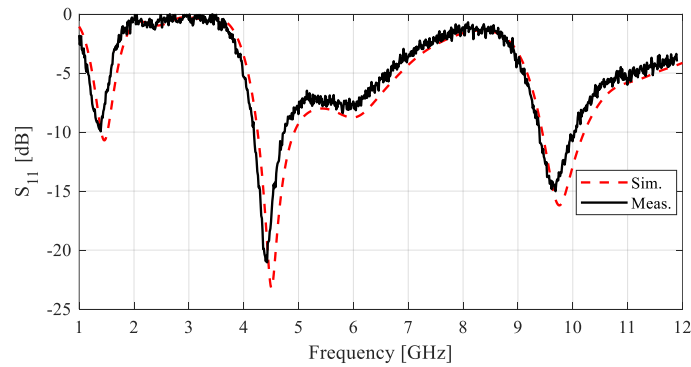
<b>w1</b>	35	<b>L1</b>	43.8
<b>w2</b>	20	<b>L2</b>	5
<b>w3</b>	22	<b>L3</b>	12
<b>w4</b>	2	<b>L4</b>	5
<b>w5</b>	2.5	<b>L5</b>	10
<b>w6</b>	6	<b>L6</b>	2
<b>g</b>	0.4		

### 3. Deneysel Sonuçlar ve Karşılaştırma (Experimental Results and Comparison)

Çalışmanın bu kısmında, önerilen anten tasarımının doğrulanması için, önceki bölümde tasarlanan antenin üretimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 5). Ölçümlerde Yıldız Teknik Üniversitesi Mikrodalga Laboratuvarları bünyesinde bulunan ölçüm cihazları (9 KHz-13.5 GHz ölçüm band genişliğine sahip bir Network Analyzer ve referans anten olarak LB-8180-NF Geniş Bandlı Horn Anten 0.8-18 GHz) kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlardan görüleceği üzere önerilen anten tasarımı hem benzetim hem de ölçüm sonuçları son derece tutarlıdır. Ek olarak, oluşturulan antenin performansı da literatürdeki rakip anten tasarımları ile kıyaslanmıştır (Tablo 2). Çalışma frekansı, geri dönüş kaybı ( $S_{11}$ ), kazanç, malzeme ve boyut gibi temel parametreler karşılaştırılmıştır. Önerilen anten, üç frekans bandında (1.5 GHz, 5.2 GHz ve 10 GHz) çalışmakta ve -10 dB'den düşük  $S_{11}$  değeri ile iyi empedans uyumu sağlamaktadır. Sırasıyla 1.6 dBi, 3 dBi ve 5 dBi kazanç değerleri elde edilmiştir. Diğer tasarımlarla karşılaştırıldığında, önerilen anten çok bandlı çalışmayı, rekabetçi kazanç değerleri ile birlikte, makul bir boyutta sağlamaktadır.



(a)



(b)

**Şekil 5.** (a) Üretilen anten tasarımı; ölçülmüş (b) saçılma parametreleri  
(a) Fabricated Antenna design; (b) Measured scattering parameters)

**Tablo 4.** Antene ait benzetim ve ölçüme ait maksimum kazanç tablosu  
(Simulation and measurement maximum gain table for the antenna)

Frekans [GHz]	Benzetim [dBi]	Ölçüm [dBi]
1.5	1.6	1.4
5.2	3.9	3.5
10	4.2	3.9



**Tablo 5.** Literatürdeki benzer antenler ile karşılaştırma tablosu (comparison table with similar antennas in the literature)

	Frekans [GHz]	$S_{11}$ [dB]	Kazanç [dBi]	Malzeme	Boyut [mm]
<b>Bu Çalışmada</b>	1.5/ 5.2/10	<-10dB	1.6/3.5/3.9	Fr4	35x43.8
[Gocen, C., 2024]	1.5-2.8	<-10dB	2.1-3	Fr4	39x58
[Kulkarni, J.,2022]	1.5 / 3.3	<-10dB	3.5	FR4	40x52
[Kumar, Y.,2020]	2.4 / 5	<-10dB	5	Fr4	42x30
[Guo, Q., 2020]	3.3/5.2/5.8	<-10dB	4	RT Duroid	14x30
[Aziz, A., 2019]	1.9 / 5.8	<-10dB	0.512	Flexible paper	35x30

#### 4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, kablosuz iletişim sistemleri için özgün çok bandlı mikroşerit anten tasarımı önerilmiş ve optimize edilmiştir. Anten, üç farklı frekans bandında (1.5 GHz, 5.2 GHz ve 10 GHz) etkili bir şekilde çalışmakta, -10 dB'in altında geri dönüş kaybına ( $S_{11}$ ) ve sırasıyla 1.6 dBi, 3 dBi ve 5 dBi kazançla sahiptir. Tasarım süreci 3B simülasyon programları ile gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar, literatürdeki çeşitli tasarımlarla kıyaslanmıştır. Bu karşılaştırma, önerilen antenin frekans aralığı, kazanç ve boyut açısından rekabetçi performans sunduğunu ve GSM, Wi-Fi ve 5G gibi modern iletişim uygulamaları için uygun olduğunu göstermiştir.

Önerilen antenin kompakt boyutu (35 x 43.8 mm) ve FR4 malzemesi, boyut, performans ve malzeme maliyeti arasında dengeli bir çözüm sunmaktadır. Literatürdeki bazı tasarımlar daha yüksek kazançlar veya farklı frekans bandlarını kapsasa da, genellikle daha büyük anten boyutları veya daha pahalı malzemeler kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan optimizasyon teknikleri, özellikle parametre ayarlamaları ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritması, antenin çok bandlı performansını başarılı bir şekilde geliştirmiştir. Prototipin deneysel doğrulaması, simülasyon ve ölçüm sonuçlarının tutarlı olduğunu göstermiştir.

#### Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

#### Kaynaklar (References)

- Asghar, M. Z., Memon, S. A., & Hämäläinen, J. (2022). Evolution of wireless communication to 6g: Potential applications and research directions. *Sustainability*, 14(10), 6356. <https://doi.org/10.3390/su14106356>
- Aboagye, S., Saeidi, M. A., Tabassum, H., Tayyar, Y., Hossain, E., Yang, H. C., & Alouini, M. S. (2024). Multi-band wireless communication networks: Fundamentals, challenges, and resource allocation. *IEEE Transactions on Communications*. DOI: 10.1109/TCOMM.2024.3366816
- Arnaoutoglou, D. G., Emplouk, T. M., Kaifas, T. N., Chryssomallis, M. T., & Kyriacou, G. (2024). A Review of Multifunctional Antenna Designs for Internet of Things. *Electronics*, 13(16), 3200. <https://doi.org/10.3390/electronics13163200>
- Aziz, Ahmed A. Abdel, Ali T. Abdel-Motagaly, Ahmed A. Ibrahim, Waleed MA El Roubi, and Mahmoud A. Abdalla. "A printed expanded graphite paper based dual band antenna for conformal wireless applications." *AEU-International Journal of Electronics and Communications* 110 (2019): 152869.
- Bagheri, N., Teixeira, E., Velez, F. J., & Peha, J. M. (2024, June). Multi-Band Resonant Photonic Crystal Antenna for 5G Applications. In *2024 IEEE 22nd Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)* (pp. 526-531). IEEE. DOI: 10.1109/MELECON56669.2024.10608697
- Dwivedy, B., & Das, T. K. (2022). Introduction to fractal antennas and their role in MIMO applications. In *Multifunctional MIMO Antennas: Fundamentals and Application* (pp. 1-26). CRC Press.
- Dubal, S., & Chaudhari, A. (2020, January). Mechanisms of reconfigurable antenna: A review. In *2020 10th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering (Confluence)* (pp. 576-580). IEEE. DOI: 10.1109/Confluence47617.2020.9057998
- Ding, Z. F., Shaoqi, X., Liu, C., Tang, M. C., Zhang, C., & Wang, B. Z. (2015). Design of a broadband, wide-beam hollow cavity multilayer antenna for phased array applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 15, 1040-1043. DOI: 10.1109/LAWP.2015.2491180
- Guo, Qianqian, Jingwei Zhang, Jijia Zhu, and Dandan Yan. "A compact multiband dielectric resonator antenna for wireless communications." *Microwave and Optical Technology Letters* 62, no. 9 (2020): 2945-2952.
- Gocen, C., Akdag, I., Mahouti, T., Belen, M. A., Palandöken, M., & Mahouti, P. (2024). Knowledge-Based Methodology of CPW-Fed Open Stub Loaded C-Shaped Microstrip Antenna by Surrogate-Based Modeling. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2024(1), 6247693. <https://doi.org/10.1155/2024/6247693>

- H Patel, D., & D Makwana, G. (2021). A comprehensive review on multi-band microstrip patch antenna comprising 5G wireless communication. *International Journal of Computing and Digital System*. DOI: <https://dx.doi.org/10.12785/ijcds/110177>
- Jin, P., & Ziolkowski, R. W. (2011). Multi-frequency, linear and circular polarized, metamaterial-inspired, near-field resonant parasitic antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 59(5), 1446-1459. DOI: 10.1109/TAP.2011.2123053
- Khan, R., Al-Hadi, A. A., Soh, P. J., Kamarudin, M. R., & Ali, M. T. (2018). User influence on mobile terminal antennas: A review of challenges and potential solution for 5G antennas. *IEEE access*, 6, 77695-77715. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2883788
- Kannadhasan, S., Nagarajan, R., & Venusamy, K. (2022, April). Performance, Metrics, and Challenges of Multiband Antenna for Wireless Communication. In *2022 6th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)* (pp. 478-481). IEEE. DOI: 10.1109/ICOEI53556.2022.9776735
- Kulkarni, Jayshri, C. Y. D. Sim, A. K. Poddar, U. L. Rohde, and A. G. Alharbi. "A Compact circularly polarized rotated L-shaped antenna with J-shaped defected ground structure for wlan and V2X applications." *Prog. Electromagn. Res. Lett* 102 (2022): 135-143.
- Kumar, Yatendra, Ravi Kumar Gangwar, and Binod Kumar Kanaujia. "Asymmetrical mirror imaged monopole antenna with modified ground structure for DBDP radiations." *International Journal of Electronics* 107, no. 4 (2020): 596-612.
- Kumar, P., Ali, T., & Pai, M. M. (2021). Electromagnetic metamaterials: A new paradigm of antenna design. *IEEE Access*, 9, 18722-18751. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3053100
- Kalis, A., Kanatas, A. G., & Papadias, C. B. (Eds.). (2014). *Parasitic antenna arrays for wireless MIMO systems*. New York: Springer. DOI 10.1007/978-1-4614-7999-4
- Malik, P. K., Bilandi, N., & Gupta, A. (2022). Narrow band-IoT and long-range technology of IoT smart communication: Designs and challenges. *Computers & Industrial Engineering*, 172, 108572. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108572>
- Mahouti, P., Kızılay, A., Tari, O., Belen, A., & Belen, M. A. (2021, August). Design optimization of ultra wide band vivaldi antenna using artificial intelligence. In *2021 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES)* (pp. 1-4). IEEE.
- Makal, S., & Kizilay, A. (2011). Computation of the scattered fields from a dielectric object buried in a medium with a periodic surface by a decomposition method. *IET microwaves, antennas & propagation*, 5(14), 1703-1709. doi: 10.1049/iet-map.2011.0137
- Muhammad, H. A., Abdulkarim, Y. I., Abdoul, P. A., Awl, H. N., Teksen, F. A., Özkan Alkurt, F. O., ... & Appasani, B. (2024). A highly flexible and low-profile metasurface antenna for wearable WBAN systems. *Optik*, 313, 171974. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2024.171974>
- Mohamadzade, B., Simorangkir, R. B., Maric, S., Lalbakhsh, A., Esselle, K. P., & Hashmi, R. M. (2020). Recent developments and state of the art in flexible and conformal reconfigurable antennas. *Electronics*, 9(9), 1375. <https://doi.org/10.3390/electronics9091375>
- Narula, A. K., & Sappal, A. S. (2024). 21 Multiband Design for Antenna Internet of Things (IoT) Applications. *Robotics and Automation in Industry 4.0: Smart Industries and Intelligent Technologies*, 362.
- Oh, J., & Sarabandi, K. (2011). Low profile, miniaturized, inductively coupled capacitively loaded monopole antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 60(3), 1206-1213.
- Ojaroudi Parchin, N., Jahanbakhsh Basherlou, H., Al-Yasir, Y. I., M. Abdulkhaleq, A., & A. Abd-Alhameed, R. (2020). Reconfigurable antennas: Switching techniques—A survey. *Electronics*, 9(2), 336. <https://doi.org/10.3390/electronics9020336>
- Saraswat, R. K., & Kumar, M. (2020). Implementation of hybrid fractal metamaterial inspired frequency band reconfigurable multiband antenna for wireless applications. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 30(9), e22315. <https://doi.org/10.1002/mmce.22315>
- Tesfaye, B. C., & Singh, R. P. Fractal Antenna for Wireless Applications: A Review. *International Journal For Academic Research and Biradar*, B. S., Swati V. Sankpal, and Mr Sachin Shivaji Taware." *Designing of rectangular microstrip patch antenna for wireless communication at*, 2
- Ur Rehman, M., & Yang, X. (2018). Multiband antennas for LTE femtocells. *LTE Communications and Networks: Femtocells and Antenna Design Challenges*, 209-229. <https://doi.org/10.1002/9781119385271.ch8>
- Vetrichelvi, G., Gowtham, P., Balaji, D., & Rajeshkumar, L. (2024). Functional metamaterials for wireless antenna applications—A review abetted with patent landscape analysis. *Heliyon*.
- Zheng, J., Zhang, J., Du, H., Niyato, D., Sun, S., Ai, B., & Letaief, K. B. (2024). Flexible-position MIMO for wireless communications: Fundamentals, challenges, and future directions. *IEEE Wireless Communications*. DOI: 10.1109/MWC.011.2300428