



Geniş Bantlı Yüksek Performanslı Antipodal Vivaldi Anteni: Kablosuz İletişim Sistemleri için Verimli Bir Tasarım

Mehmet DUMAN*¹ , Volkan BERK² 

¹ Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Türkiye.
mehmetduman@duzce.edu.tr mehmetduman@ieee.org

² Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Türkiye.
volkanberkpa@gmail.com

ÖZ

Bu çalışma, CST Studio bilgisayar programı ve bu programın optimize yöntemlerini kullanarak; imal edilen antipodal Vivaldi anteninin, FR-4 dielektrik alt-taban malzemesi yüzeylerine baskı devre aşamalarını; akabinde vektör ağ analizörü cihazında yapılan ölçümleri kapsar. Temel gaye, antenin çeşitli mobil haberleşme teknolojileriyle uyumlu bir şekilde çalışabilmesi için, istenen frekanslarda, en iyileme işlemi uygulanmasıyla elde edilen antenin tasarım ve üretim süreçlerini geliştirmektir. En iyileme işlemi için genetik algoritma, parçacık sürü algoritması ve parametrik tarama algoritması olmak üzere üç farklı yöntem kullanılmıştır. Her bir optimizasyon yönteminden sonra CST Studio programı tarafından zaman alanında üretilen benzetim grafikleri yorum yapılarak paylaşılmıştır. Teorik hesaplamalar, tasarım, benzetim, optimizasyon ve üretim süreçlerinden sonra gerçek test ortamındaki deneylerde VNA cihazı tarafından ölçülen grafikler bilgisayar programı vasıtasıyla varılan grafiklerle karşılaştırılmıştır. Laboratuvar analizlerine göre ilk ölçümler, tasarımı ve üretimi yapılan antipodal Vivaldi anteninin sırasıyla 807 MHz, 2643 MHz ve 3050 MHz frekanslarında başarıyla çalıştığını göstermektedir. Merkez frekanslar olarak kullanılacak bu frekansların S11 saçılma değerlerini en düşük olarak verdiği tespit edilmiştir. Laboratuvar ölçümünde elde edilen 2,64 GHz merkez frekansı için bant genişliği -17,719 dB'nin 3 dB fazlası olan -14,719 dB verisinin ölçüldüğü sol ve sağ aralıklar arası olan 2,53 GHz ve 2,77 GHz frekansları arası olup bant genişliği yaklaşık 240 MHz'dir. Aynı şekilde, diğer merkez frekansların bant genişliği de hesaba katılırsa; tüm bu veriler, antenin farklı iletişim teknikleriyle uyumluca kullanılabileceğini ve geniş spektrum uyumluluğuna sahip olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, en iyileme süreci geçiren antipodal Vivaldi antene ait bilgiler, endüstriyel uygulamalar ve yeni akademik çalışmalar için değerli referanslar sunarak gelecekteki kablosuz iletişim teknolojilerinin gelişimine katkı sağlayabilecek niteliktedir.

Anahtar Kelimeler: Antipodal Vivaldi anten, geniş bant iletişim, kablosuz haberleşme sistemleri.

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: mehmetduman@duzce.edu.tr

Broadband High-Performance Antipodal Vivaldi Antenna: An Efficient Design for Wireless Communication Systems

ABSTRACT

This study covers the printed circuit stages on the surfaces of FR-4 dielectric substrate materials of the manufactured antipodal Vivaldi antenna using the CST Studio computer program and its optimization methods. Subsequently, measurements conducted on a vector network analyzer device are included. The primary objective is to improve the design and production processes of the antenna obtained through the application of optimization processes at the desired frequencies for the antenna to work compatibly with various mobile communication technologies. Three different methods, namely genetic algorithm, particle swarm algorithm, and parametric scanning algorithm, are used for the optimization process. Simulation graphics generated in the time domain by the CST Studio program after each optimization method are interpreted and shared. Theoretical calculations, design, simulation, optimization, and production processes are compared with the graphs reached through the computer program in experiments in the real test environment by the VNA device. According to laboratory analyses, initial measurements show that the designed and manufactured antipodal Vivaldi antenna successfully operates at frequencies of 807 MHz, 2643 MHz, and 3050 MHz, respectively. It is determined that these frequencies, which can be used as center frequencies, provide the lowest S_{11} scattering values. The bandwidth for the 2.64 GHz center frequency obtained in laboratory measurements is approximately 240 MHz, with frequencies between 2.53 GHz and 2.77 GHz where the -14.719 dB data, 3 dB beyond -17.719 dB, is measured. Similarly, considering the bandwidth of other center frequencies, all these data indicate that the antenna can be used compatibly with different communication techniques and has wide spectrum compatibility. In conclusion, the information related to the antipodal Vivaldi antenna undergoing the optimization process provides valuable references for industrial applications and new academic studies, contributing to the development of future wireless communication technologies.

Keywords: Antipodal Vivaldi antenna, broadband communications, wireless communication systems.

1 Giriş

Mikrodalga antenler, kablosuz iletişim sistemlerinin temel bileşenleri olarak büyük bir öneme sahiptirler. Kablosuz iletişim teknolojilerindeki hızlı gelişmeler, yüksek veri hızlarına ve geniş kanal kapasitesine ihtiyaç duyulmasına neden olduğundan verimli bir geniş bant antene olan ihtiyaç artmıştır [1]. Antipodal Vivaldi anteni yeterli bant genişliğine sahip olmak, yönlülüğü korumak ve verimliliği artırmak gibi zorlukların üstesinden gelmek için uygun bir çözüm sunar [2]. Tasarım ilkeleri, geniş bant spektrumu elde etmek için farklı bir yapının kullanılmasını içerir.

Antipodal Vivaldi anten ile ilgili son yıllarda birçok çalışma yapılmıştır. M. Wang çalışmasında karaciğer mikrodalga termal ablasyonunu izlemek için bir görüntüleme sistemi tasarımı sunmuştur. Bu sistemin bir parçası olarak, kompakt bir yuva yüklü antipodal Vivaldi anten kullanılmaktadır [3]. S. Kumar 5G iletişimi için yüksek verimli, geniş bant genişliğine sahip ve güçlü iletim performansı sağlayan çift bant antipodal Vivaldi anten dizaynını ele alan bir çalışma gerçekleştirmiştir [4]. J. Wang uzak alanda ultra geniş bant sinyal tespiti için gelişmiş hassasiyet ve doğruluk sağlama amacı güden bir antipodal vivaldi anten tasarımı gerçekleştirmiştir [5]. Antipodal Vivaldi anten (diğer bir adı Tapered Slot Antenna (TSA)), geniş bant genişliği ve yüksek yönlülük özellikleri nedeniyle çeşitli uygulamalarda tercih edilen bir

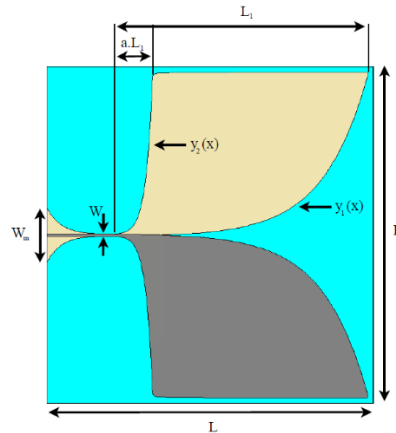
tasarımdır [6]. Gerçekleştirilen tüm bu çalışmaların ortak noktaları olarak antipodal Vivaldi antenlerin geniş bant iletme sahip olması, boyutlarının küçük olabilmesi, doğru yönlendirebilme kabiliyetleri sıralanabilir. İlgili çalışmalarla birlikte antipodal Vivaldi antenin, mikrodalga frekans bandındaki iletişim sistemlerinin performansını artırmak ve tasarım zorluklarının üstesinden gelmek için önemli bir potansiyele sahip olduğu görülmektedir.

Bu çalışma, antipodal Vivaldi anten odaklı olup FR-4 dielektrik alt-tabanı kullanılarak 800 MHz ve 2,6 GHz merkez frekanslarındaki uygulamalarda çalışabilecek bir çift-bant (dual-band) anten tasarımı oluşturmayı ve optimizasyon araçlarıyla beraber anten tasarım parametrelerinin anten performansına olan etkisini incelemeyi amaçlamaktadır. Antipodal Vivaldi antenin performansı benzetim ve deneysel tabanlı bir yaklaşım benimsenerek analiz edilmiştir. Benzetim kısmında anten tasarımının iyileştirilmesi için üç farklı yöntem kullanılmıştır. Bunlar sırasıyla “Genetic” (Genetik) algoritması, “Particle Swarm” (Parçacık Sürüsü) algoritması ve “Parameter Sweep” (Parametrik Tarama) optimizasyonlarıdır. Bu yöntemler sayesinde antenin tasarım parametreleri istenilen çalışma bölgesine göre optimum sonucu göstererek ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmanın kablosuz haberleşme sistemleri için daha etkin ve verimli anten tasarımlarının geliştirilmesine katkı sağlaması beklenmektedir.

2 Metodoloji

Kablosuz haberleşme sistemlerinden telefon iletişimi, WiFi, WiMAX gibi uygulamalarda kullanılabilecek olan nihai antenin sorunsuz çalışabilmesi için çeşitli parametrik taramalardan geçirilerek en iyinin elde edilmesi çalışmanın ana hedefidir. 2G, 3G, 4G, 4,5G ve 5G kablosuz iletişim standartlarına uyan bir tasarım gerçekleştirmek çalışmanın kapsamı içerisindedir. Türkiye için 2G bağlantısı 900 MHz ve 1800 MHz civarlarında, 4,5G bağlantısı 800 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz ve 2600 MHz frekansı çevrelerinde olurken; İspanya baz alındığında 2G bağlantılar için 900 MHz ve 1800 MHz, 3G bağlantıları için 900 MHz ve 2100 MHz, 4G bağlantıları için 800 MHz, 1800 MHz ve 2600 MHz, 5G bağlantılar için ise 700 MHz ve 3500 MHz frekanslarında bahsedilen haberleşmeler gerçekleşmektedir. Kullanılması planlanan antenlerin girişten geri yansıma parametresinin (S11) -10 dB ve altındaki değerlerde olması beklenmektedir [7]. Eğer S11, güç, verimlilik gibi faktörler yeterli seviyede olursa üretilecek olan anten ülkeden ülkeye farklı kullanım alanlarına sahip olabilir.

100 – 900 MHz aralığında çalışmaya elverişli olması sebebiyle, Şekil 1’deki Vivaldi anten tasarımı tercih edilerek yeni bir tasarım sürecine girilmiştir, Şekil 1’deki her bir uzunluğun anten ışınmasına etkisi vardır [8]. CST programında çizilip istenilen yapı oluşturulduktan sonra FR-4 dielektrik alt-tabana baskısı yapılacaktır.



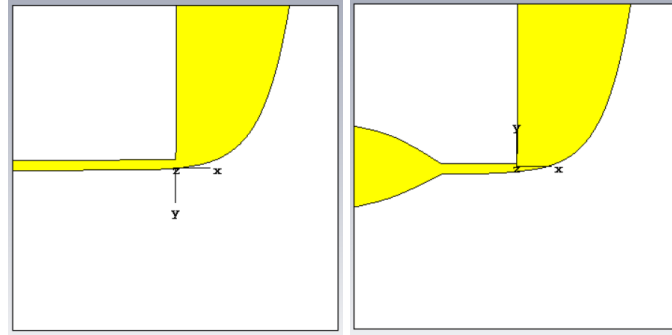
Şekil 1. Esneyebilen Vivaldi anten tasarımı [8]

2.1 Tasarım Süreci

Anten tasarımının bilgisayar ortamında oluşturulması ve benzetiminin gerçekleştirilmesi için CST Studio Suite programı kullanılmıştır. CST Studio Suite, elektromanyetik alan simülasyonu ve analizi için kullanılan kapsamlı bir yazılım paketidir. Tasarımda kullanılan parametreler Tablo 1’de görülebilir. Tasarıma ait görsel Şekil 2’de yer almaktadır.

Tablo 1. Tasarım Parametreleri

Sembol	Açıklama	Değişken	Birim
Uzunluk	Alt-taban Uzunluk	130	mm
Genişlik	Alt-taban Genişlik	130	mm
a	En uzak nokta çarpanı	0,7	-
b	En kısa nokta çarpanı	0,01	-
G_1	a × Genişlik	91	mm
G_2	b × Genişlik	0,91	mm
TK	Alt-taban Kalınlık	1,5	mm
N_1	Üst yüzey en yakın nokta	0,0927682426293416	mm
N_2	Üst yüzey en uzak nokta	9,14040238101027	mm
N_{-1}	Alt yüzey en yakın nokta	0,0921134159581726	mm
N_{-2}	Alt yüzey en uzak nokta	9,07062502207712	mm
U_{mikro}	Mikroşerit kalınlığı	4	mm
U_{gnd}	Toprak yüzeyi kenar uzunluğu	$L/4 = 32,5$	mm



(a)

(b)

Şekil 2. Antipodal Vivaldi anten tasarımı

Şekil 2 (a)’da antenin ön yüzeyi, Şekil 2 (b)’de antenin arka yüzeyi yer almaktadır. Arka yüzey toprak yüzeyi olarak kullanılırken, ön yüzey canlı uç teması ile tasarlanmıştır. Tasarımda sarı renkteki alan bakır yüzeyi gösterirken beyaz renkteki alan ise FR-4 içindeki dielektrik malzemeye ait alanı göstermektedir.

2.1.1 Hesaplama

Şekil 1’de yer alan tasarımda $y_1(x)$ ve $y_2(x)$ fonksiyonları birer üstel fonksiyondur ve denklemleri:

$$y_{u1}(x) = e^{N_1 x} - \frac{U_{mikro}}{2} - 1 \quad (1)$$

$$y_{u2}(x) = e^{N_2 x} + \frac{U_{mikro}}{2} - 1 \quad (2)$$

$$N_{u1} = k_{u1} * \ln\left(\frac{U_{uzunluk} + U_{mikro}}{2} + 1\right) [k_{u1} = (G_1)^{-1}] \quad (3)$$

$$N_{u2} = k_{u2} * \ln\left(\frac{Uzuntluk - U_{mikro}}{2} + 1\right) [k_{u2} = (G_2)^{-1}] \quad (4)$$

olarak yazılabilir. Bu denklemler üst tabanı oluşturan denklemlerdir. Alt taban için kullanılan formül:

$$y_{a1}(x) = -e^{N_1 x} + \frac{U_{mikro}}{2} + 1 \quad (5)$$

$$y_{a2}(x) = -e^{N_2 x} - \frac{U_{mikro}}{2} + 1 \quad (6)$$

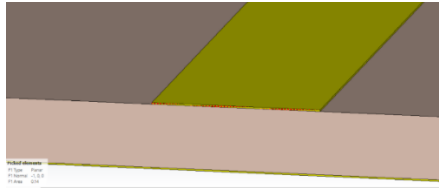
$$N_{a1} = k_{a1} * \ln\left(\frac{Uzuntluk}{2} + \frac{U_{mikro}}{2} + 1\right) [k_{a1} = G_1^{-1}] \quad (7)$$

$$N_{a2} = k_{a2} * \ln\left(\frac{Uzuntluk}{2} - \frac{U_{mikro}}{2} + 1\right) [k_{a2} = G_2^{-1}] \quad (8)$$

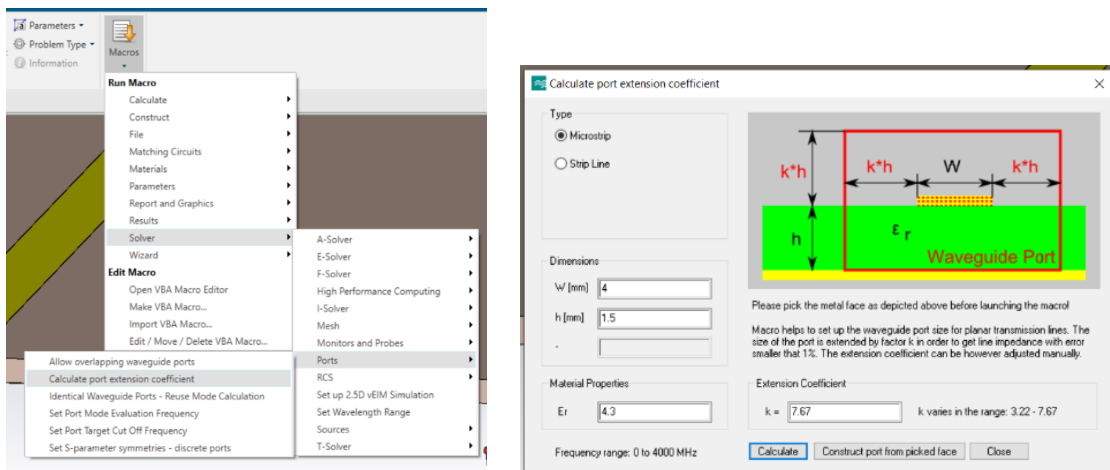
denklemleri ile aktarılabilir.

2.2 Benzetim Süreci

Simülasyon süreci için mikroşerit anten uygulamalarında yapılan adımlar izlendi. Bu adımların başında port yerleştirilecek olan yüzeyin seçilmesi gelmektedir. Şekil 3’te olduğu gibi port için yüzey seçilmesi ile beraber port büyüklüğünün hesaplanması gerekir. Program üzerinde “Macros” sekmesinden seçilen yüzey için “Calculate Port Extension Coefficient (Port Uzatma Katsayısını Hesapla)” işlemi gerçekleştirilebilir. Böylece program, yüzey için gerekli olan port ayarlarını gerçekleştirmiş olur.



Şekil 3. Port için seçilen yüzey

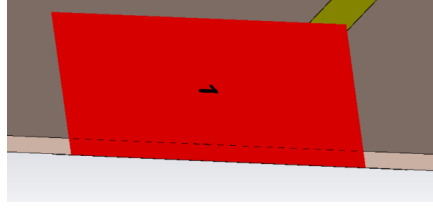


(a)

(b)

Şekil 4. Port hesaplamaları

Şekil 4'te görüleceği üzere mikroşerit yüzeyi (W) 4 mm, alt-taban kalınlığı 1,5 mm, program üzerinden hesaplanan katsayı değeri (k) 7,67 bulunmuştur. Şekil 4 (b)'de yer alan "Construct port from picked face (Seçilen yüzey üzerinde port oluştur)" butonuna basılması ile birlikte Şekil 5'te yer alan port oluşturulmuş olur. Portun ayarlanması ile birlikte simülasyon işlemi başlatılır ve antenin karakteristiğine ait bulgular elde edilir.



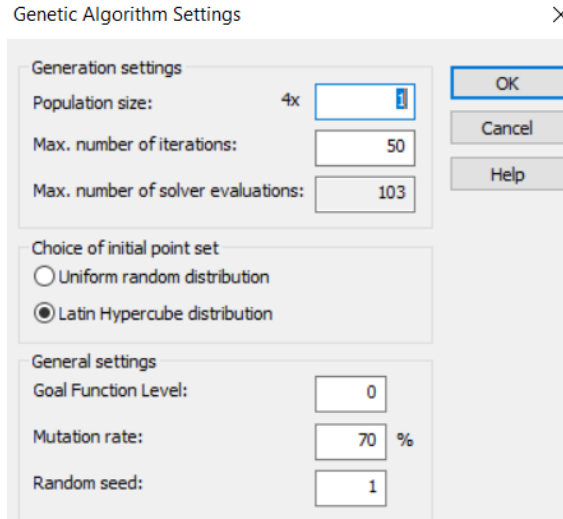
Şekil 5. Portun ayarlanması

2.3 Optimizasyon Süreci

2.3.1 Genetik Algoritma

Bu çalışmada optimizasyon için 3 yöntem kullanılacağı belirtilmişti. Bunlardan ilki genetik Algoritma'dır. Genetik Algoritma (GA), ilk olarak 1960'larda Michigan Üniversitesi'nden John Holland tarafından tanıtılan çokça kullanılan bir doğal sezgisel algoritmadır. Algoritma, biyolojik kalıtım ve doğadaki evrim ilkelerine dayanmaktadır [9].

Genetik algoritma; bir problemin çözümünü, her kromozomun bir çözümü temsil ettiği farklı kromozomlara kodlayarak çalışır. Her bireyin uygunluğu değerlendirilir ve daha yüksek çaprazlama ve mutasyon olasılığı ile bir sonraki nesil için seçilir. Seçilen son birey, problemin en uygun çözümüdür [10]. CST programında genetik algoritmanın ayarlanması gereken birkaç parametre bulunmaktadır. Bu parametre ayarlarıyla ilgili görsel Şekil 6'daki gibidir:



Şekil 6. Genetik algoritma parametre ayarları

Şekil 6'da genetik algoritmayla ilgili birçok parametre yer almaktadır. Bu parametrelerin özellikleri şöyle sıralanabilir:

"Population size" (nüfus boyutu): Genetik algoritmanın her bir iterasyonu veya jenerasyonu için kullanılan birey sayısını belirtir. Her bir birey, potansiyel bir çözümü temsil eder.

“Max. number of iterations” (maksimum iterasyon sayısı): Genetik algoritmadaki iterasyon yapısının ne kadar süreyle devam edeceğini belirler.

“Max. number of solver evaluations” (çözücü değerlendirmelerinin maksimum sayısı): Genetik algoritmanın belirli bir iterasyon sayısı içinde problemin çözümüne yönelik olarak gerçekleştirdiği değerlendirme veya hesaplamaların maksimum sayısını belirtir.

“Initial point set” (başlangıç noktası seti): Rastgele sayı dağılım türleri seçilir. “Uniform random distribution” (düzgün rastgele dağılım) belirli bir aralıktaki her değer için eşit olasılıkla seçilmesini sağlar. “Latin hypercube distribution” (Latin hiperküp dağılımı) ise her bir boyutta belirli bir aralıktaki değer için sadece bir kere seçilmesini sağlar. Bu dağılım her boyutta düzgün dağılmış örnekler elde etmek için kullanılır.

“Goal function level” (hedef fonksiyon seviyesi): Bu parametre; algoritmanın, maksimum iterasyon sayısına ulaşmadan hedefe ulaşması sonucunda durdurulmasını sağlayan hedefi belirtir. Eğer algoritma bu parametredeki değeri elde ederse algoritma maksimum iterasyona ulaşmadan kendini durduracaktır.

“Mutation rate” (mutasyon yüzdesi): Bu parametre, iki bireyin değeri birbirine yakın ise mutasyonun meydana gelme olasılığını belirler.

“Random seed” (rastgele tohum): Bu parametre programın rastgele sayı üretici tarafından kullanılan başlangıç değeridir. Rastgele sayı üreticilerinin başlangıç değerine sahip olmasından dolayı bu değer boş bırakılmaması gerekir.

2.3.2 Parçacık Sürüsü Optimizasyonu

Algoritma ilk olarak 1995 yılında Kennedy ve Eberhart tarafından önerilmiştir. [11] Parçacık sürüsü optimizasyonu balık, kuş gibi sürü halinde yaşamını sürdüren canlıların sosyal davranış biçimlerini kullanan popülasyon tabanlı algoritmadır [12].

Programda parçacık sürü optimizasyonu ile ilgili parametre ayarları Şekil 7’deki gibidir:

Şekil 7. Parçacık sürüsü optimizasyonu parametre ayarları

Şekil 7 incelendiğinde parçacık sürü algoritmasının ayarları genetik algoritmadaki ayarların çoğuna benzerdir. Tek farkı bu algorithmada sürü büyüklüğü olan “Swarm size” parametresidir. Bu parametre bir sürüdeki birey sayısını belirlemektedir. Maksimum iterasyon sayısı ile beraber bu algoritma sürüdeki her birey için 10 farklı çözüm oluşturur. Böylece 10 bireylik bir sürüde 10 iterasyonlu algorithmada 101 adet çözüm ortaya çıkar.

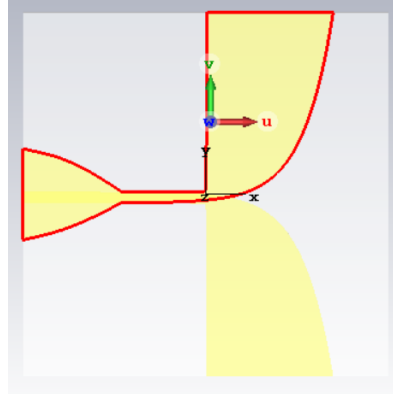
2.3.3 Parametre Taraması

Parametre taraması belirli bir simülasyon modelindeki parametrelerin farklı değerlerini otomatik olarak değiştirir ve her bir parametre kombinasyonu için simülasyonu yeniden çalıştırır. Tasarım sürecinde verimliliği artırmak ve tasarım seçeneklerini değerlendirmek için önemli bir araçtır.

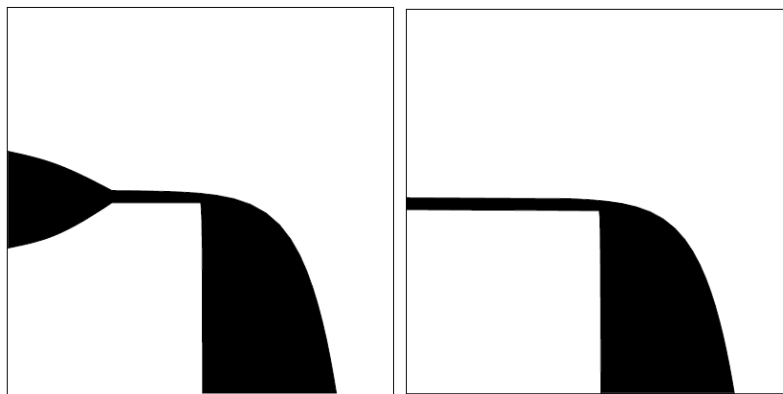
Parametre taramasının gerçekleştirilmesi için öncelikle parametreler belirlenir. Ardından belirlenen parametrelerin hangi aralıkta taranacağı ve örnek sayısı tanımlanır. Tasarım parametrelerinin taranması ile ilgili 3 adet parametre hedeflenmiştir. Bu parametreler a katsayısı, Genişlik ve Uzunluk parametreleridir. a katsayısı parametresi 0,3 ile 0,7 arasında 9 örnek oluşturacak şekilde seçilmiştir. Genişlik ve Uzunluk parametreleri ise 120 mm ile 130 mm arasında 11 örnek oluşturacak şekilde girilmiştir.

2.4 Üretim Süreci

CST Studio Suite programında tasarlanan antenin üretilmesi için tasarımın baskısının alınması gerekir. Gerber dosyasını, ayarlanan koordinat yüzeyinde bulunan malzemeyi seçerek oluşturmak önemlidir. Yüzey materyali (örneğin; bakır) seçildikten sonra alınacak çıktı Şekil 8'deki gibi olacaktır. Şekil 9'da her iki yüzeyin çıktısı görülmektedir.



Şekil 8. Koordinat ayarlarından sonra seçilen yüzey

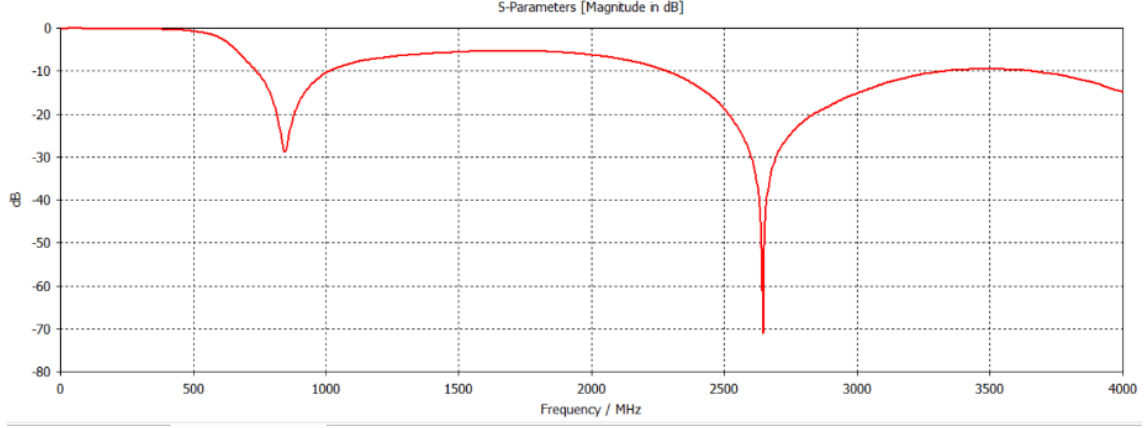


Şekil 9. PDF formatında çıkartılan tasarım dosyası

Üretim için çift tarafı 0,035 mm kalınlıkta bakır kaplı olan FR-4 plaketi kullanılmıştır. FR-4 plaketi CST Studio programında oluşturulan 1,5 mm kalınlığa sahiptir. Son olarak SMA port lehimlenerek anten nihai halini almıştır. Böylece anten, ölçüm alınması için hazır hale getirilmiştir.

2.5 Yöntem Süreçlerine Ait Çıktılar

Portun ayarlanması ile birlikte başlatılan simülasyon işlemi sonucunda oluşan S11 parametresi Şekil 10'da aktarılmıştır.



Şekil 10. S11 parametresi grafiği

Gerçekleştirilen ilk benzetimin ardından optimizasyon çalışmaları başlar ve ilk sonuçlar baz alınarak optimize edilecek değerler belirlenir. İlk optimizasyon olarak genetik algoritma optimizasyonu kullanılmıştır. Bu hususta elde edilen sonuç Şekil 11'deki gibidir:

```
Algorithm: Genetic Algorithm
103 of maximal 103 solver runs done

Number of evaluations: 103
(solver: 102, reloaded: 1)
First goal function value = 7.39719696238
Best goal function value = 0.460749554557
Last goal function value = 0.460749554557 (reloaded)

Last solver evaluation time = 00:03:25 h

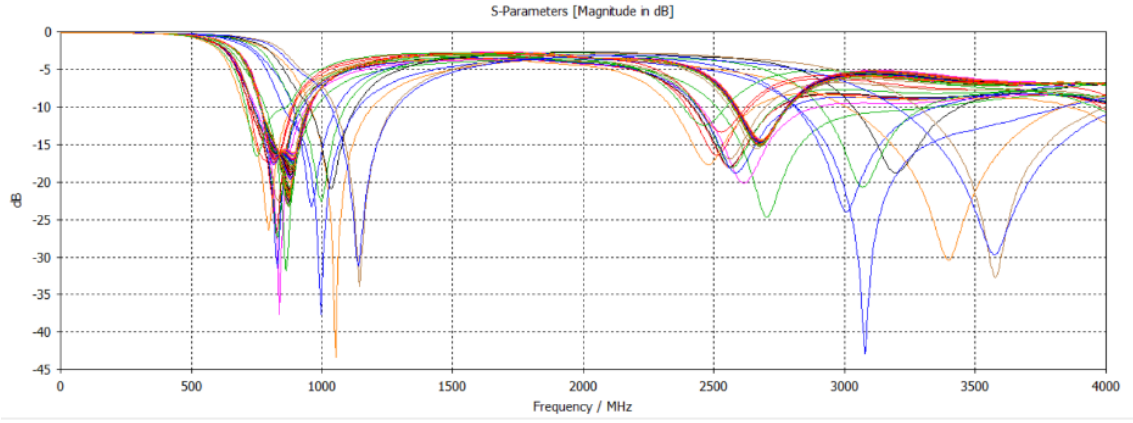
Best parameters so far:

a = 0.301785
b = 0.09936
Genislik = 110.653
Uzunluk = 135.593
W = 3.69333

(Corresponding run ID: 1382)
```

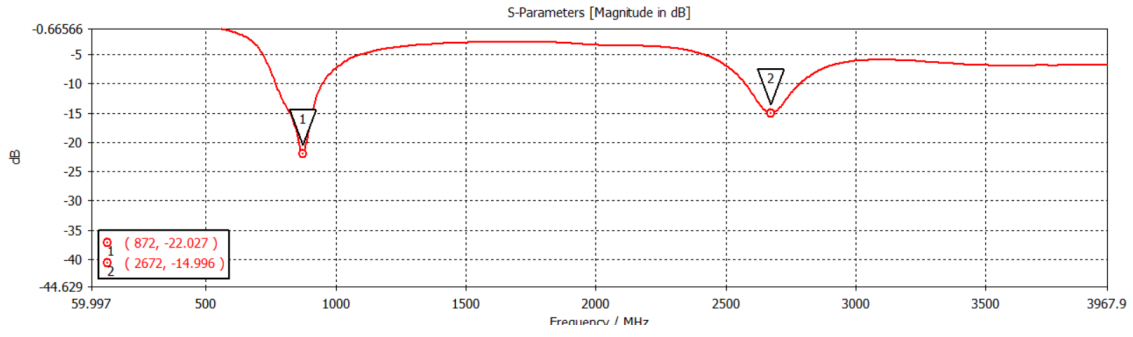
Şekil 11. Genetik algoritma sonuçları

Gerçekleştirilen benzetimde nüfus boyutu 1, maksimum iterasyon sayısı 50 olarak ayarlanmıştır. Geri kalan parametreler CST programının temel ayarlanmaları olarak bırakılmıştır. Sonuç olarak elde edilen optimizasyon grafiklerine Şekil 12'de yer verilmiştir.



Şekil 12. Genetik algoritma sonuçlarına ait S11 grafikleri

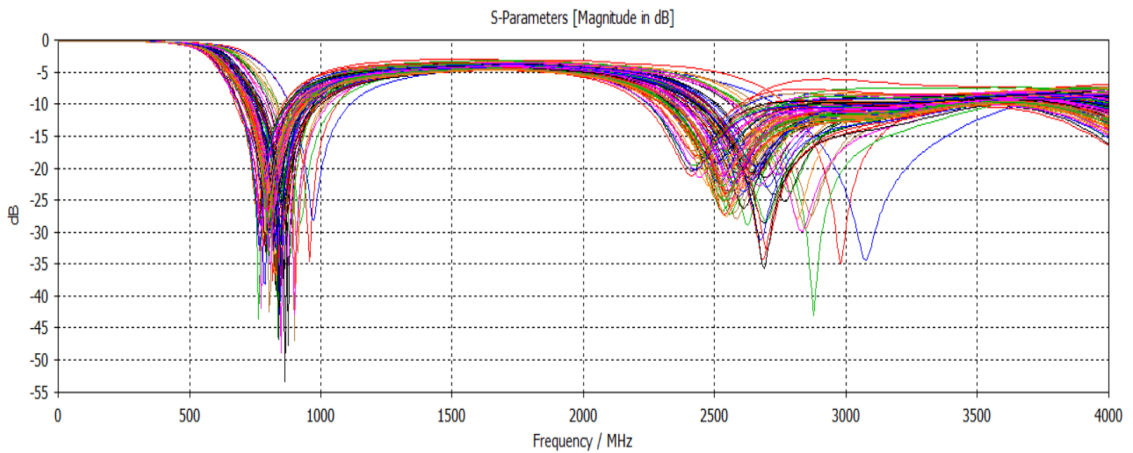
Şekil 12’de yer alan grafikte genetik algoritma ile üretilen 100 adet çözüm görülmektedir. Elde edilen sonuçlar ve grafik incelendiğinde algoritmaya göre en iyi sonuç Şekil 13’teki gibidir:



Şekil 13. Genetik algoritmaya göre en iyi sonuca ait grafik

Şekil 13’te en iyi sonucun elde edilmesi için anten tasarımında Genişlik ve Uzunluk parametrelerinin sırasıyla 110,65 mm ve 135,6 mm olması gerektiği anlaşılır. Ayrıca mikroşerit yolun kalınlığının 3,69 mm’ye indirilmesi, a ve b katsayılarının 0,301785 ve 0,09936 değerlerine göre ayarlanması gerektiğini gösterir.

Genetik algoritma optimizasyonu sonrası parçacık sürüsü optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Parçacık sürüsü optimizasyonuna ait grafik Şekil 14’deki gibidir:



Şekil 14. Parçacık sürüsü optimizasyonu sonuçlarına ait S11 grafikleri

Şekil 14’de yer alan grafikte 100 adet sonuç yer almaktadır. Bu sonuçlar genetik algoritma ile kıyaslanırsa daha iyi performans gösteren anten parametrelerine sahip olduğu görülür. Grafikte 101 adet tarama bulunmaktadır. Optimizasyon tarafından en iyi sonuca ait parametre bilgileri Şekil 15’teki gibi açıklanmıştır.

```
Algorithm: Particle Swarm Optimization
101 of maximal 101 solver runs done

Number of evaluations: 101
(solver: 100, reloaded: 1)
First goal function value = 67.19694894
Best goal function value = 28.7765992127
Last goal function value = 28.7765992127 (reloaded)

Last solver evaluation time = 00:04:54 h

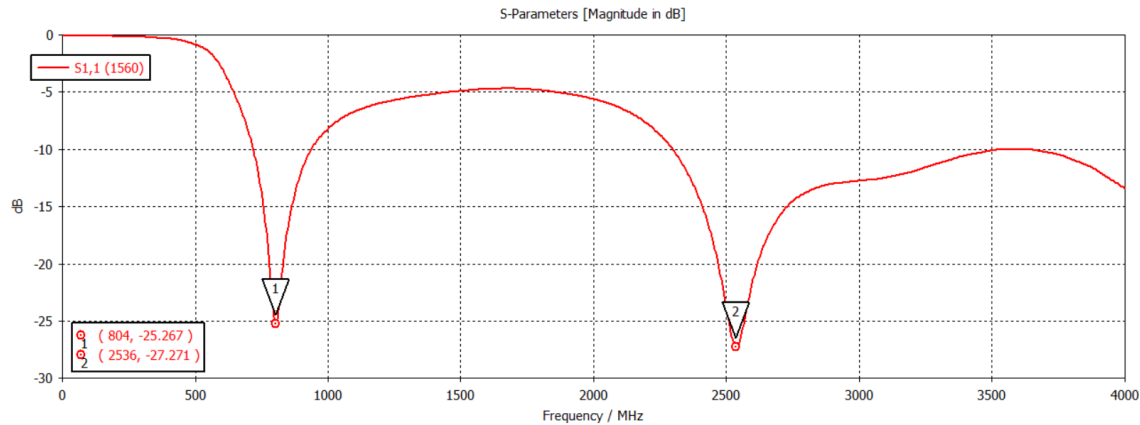
Best parameters so far:

a = 0.497348
b = 0.0131695
Genislik = 146.71
Uzunluk = 139.454
W = 3.63868

(Corresponding run ID: 1560)
```

Şekil 15. Parçacık sürüsü optimizasyonu parametre sonuçları

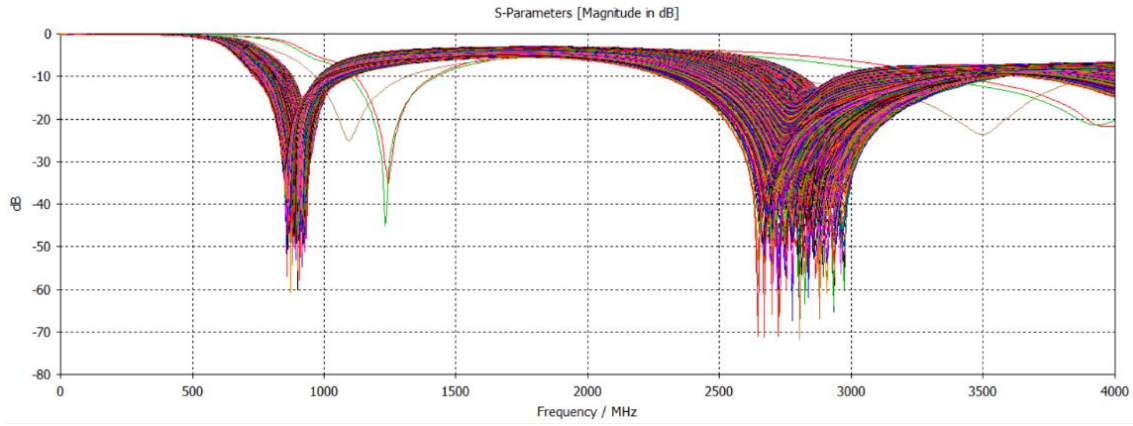
Şekil 15’teki sonuca göre en iyi anten performans grafiği Şekil 16’da yer almaktadır.



Şekil 16. Parçacık sürüsü optimizasyonu en iyi ölçüm sonucu

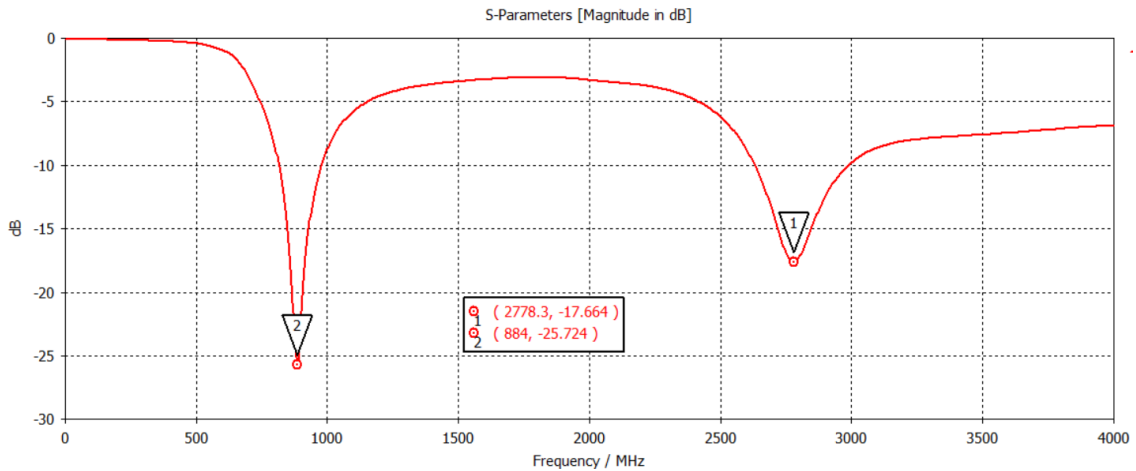
Bu durumda parçacık sürü optimizasyonuna göre anten performansı 804 MHz ve 2536 MHz noktalarında en iyi sonuca ulaşmaktadır. Bunun için anten tasarımında Genişlik ve Uzunluk parametreleri 146,71 mm ve 139,454 mm olmalıdır. Mikroşerit yolun kalınlığı 3,63868 mm değerinde olması gerekmektedir Aynı zamanda a ve b katsayılarının 0,497348 ve 0,0131695 değerlerinde olması gerekir.

Parçacık sürüsü optimizasyonu sonrasında parametre taraması işlemine geçilmiştir. Şekil 17’de yer alan ölçümler parametre taraması yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Tam olarak 1089 tarama bulunmaktadır. Her bir tarama girilen parametre ve adım sayısına göre artmaktadır.



Şekil 17. Parametrik tarama ile gerçekleştirilen ölçümlerin sonuçlarına ait S11 grafikleri

Bu taramada girilen parametre sayısı 3'tür. Bunlar genişlik, uzunluk ve a katsayısı parametreleridir. Genişlik ve uzunluk parametreleri 120 mm ile 130 mm arasında 11 adım olacak şekilde ayarlanmıştır. a katsayısı için ise 0,3 ile 0,7 arasında 9 adım olarak tanımlama yapılmıştır. Belirlenen bu değerler plaka boyutları ve frekans ilişkisi gereği seçilmiştir. Böylece toplam yapılacak olan tarama sayısı $11 \times 11 \times 9 = 1089$ olarak hesaplanmaktadır. Buna yönelik olarak en iyi sonuç veren parametre değerleri; genişlik: 130 mm, uzunluk 130 mm ve a 0,3 değerlerindedir. Bu değere ait grafik Şekil 18'de gösterilmiştir.



Şekil 18. Parametrik tarama sonrası en iyilenen anten boyutlarına göre S11 parametresi grafiği

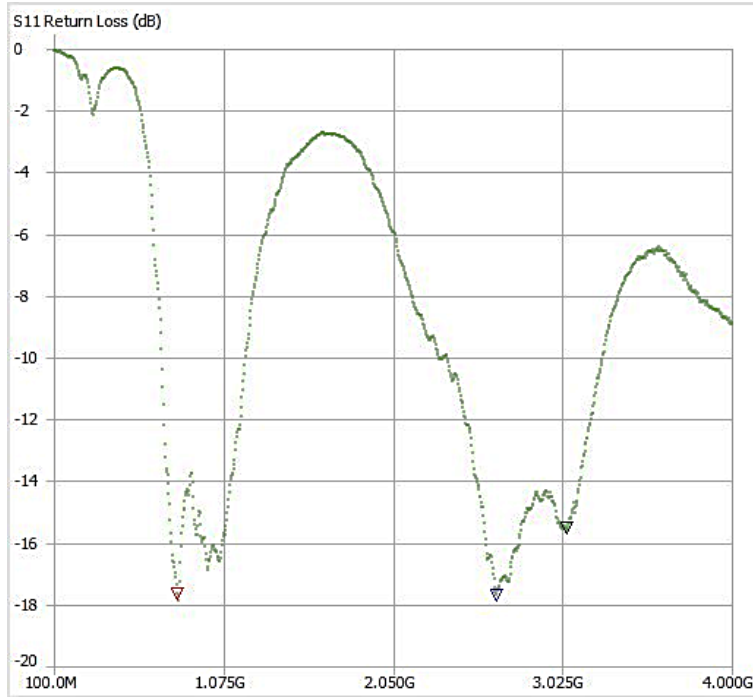
3 Bulgular ve Tartışma

Benzetim grafiklerinden istenen sonuçlar alındıktan sonra laboratuvarında yapılacak olan gerçek ölçüm aşamalarına geçilmiştir. Tasarımı yapıлып baskısı alınan ve FR-4 plakaya aktarılan anten ile VNA cihazının bağlantısı Şekil 19'daki gibidir. Bağlantının gerçekleştirilmesinin ardından ilk olarak VNA'nın kalibrasyon ayarları gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, ölçüm cihazının doğru frekans tepkisini sağlamak ve ölçüm hatalarını minimize etmek amacıyla kullanılır [13]. Kalibrasyonlar gerçekleştirildikten sonra S parametreleri için ölçüm işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 20'de S11 parametresine ait grafik yer almaktadır. S11 değeri, bir devre veya iletim hattının girişindeki yansımanın ölçüsüdür. Düşük S11

değerleri, daha az yansıma ve daha iyi bir eşleşme anlamına gelmektedir [14]. Optimizasyon yöntemleri sadece S11 değerini düşürmek için değil daha iyi yönlendirme sağlamak için de kullanılabilir. Yan lob seviyelerinin azalması üzerine yapılan bir çalışmada genetik algoritma kullanılmıştır [15]. Bu makale için a katsayısı, Genişlik ve Uzunluk değerlerinde parametrik tarama yönteminden elde edilen sonuçlara göre; mikroşerit yolun kalınlığı (W) ve b katsayısı için diğer tarama yöntemlerinden elde edilen bilgilere göre çıktı alınmıştır ve nihayetinde anten baskısı elde edilmiştir. Baskı hassasiyetinden ötürü 1 mm'den daha kısa olan uzunluklar 0'a yakın görülebilir. Uzunluklar kararlaştırılırken en iyi S11 değerlerine göre ve gerçekleştirilebilirliğe en uygun değerlere göre anten baskı uzunlukları ve katsayıları seçilmiştir.



Şekil 19. Anten ile NanoVNA bağlantısı ve ölçüm alınması



Şekil 20. S11 geri dönüş kaybı ölçümü

Şekil 20’de yer alan grafik incelendiğinde en düşük S11 değerleri 800 – 1000 MHz ile 2600 – 2700 MHz frekansları arasında gerçekleşmektedir. Şekil 21’de (Marker 1, Marker 2 ve Marker 3), Şekil 20 grafiğinde işaretlenen noktalara ait sayısal değerler yer almaktadır. Gerçekleştirilen antipodal Vivaldi anten tasarımı 807 MHz, 2643 MHz ve 3,05 GHz değerlerinde -15 dB’in altında bir değere ulaşmaktadır. En iyi çalışabilen merkez frekansın 2643 MHz frekans olduğu düşünülürse bu noktadaki S11 girişten geri yansımaya değeri -17,719 dB’dir. Bant genişliği hesabında 3 yükseldiği noktalar arası belirlenmelidir. Bu demektir ki; -14,719 dB değerleri 2643 MHz frekansının solunda ve sağında aranacaktır. 2,53 GHz ve 2,77 GHz frekanslarında yaklaşık olarak -14,7 dB görülebilmektedir. Dolayısıyla; “Marker 2” ile gösterilen merkez frekansı 2643 MHz olan bölgenin 240 MHz bant genişliğine sahip olduğu anlaşılacaktır.

100 – 900 MHz aralığında çalışan, Şekil 1’deki Vivaldi anten tasarımına [8] çeşitli optimizasyon teknikleri uygulanarak oluşturulan yeni antenimizin sonuçlarının karşılaştırması yapıldığında S11 değeri daha da aşağılara inmiştir ve antenin çalışabileceği yeni frekans bantları oluşturulmuştur.

Marker 1		Marker 2	
Frequency: 807.334 MHz	VSWR: 1.302	Frequency: 2.64331 GHz	VSWR: 1.299
Impedance: 38.4+j543m Ω	Return loss: -17.633 dB	Impedance: 60.4-j10 Ω	Return loss: -17.719 dB
Series L: 107.01 pH	Quality factor: 0.014	Series L: -603.41 pH	Quality factor: 0.166
Series C: -363.17 pF	S11 Phase: 176.97°	Series C: 6.008 pF	S11 Phase: -38.88°
Parallel R: 38.41 Ω	S21 Gain: -81.587 dB	Parallel R: 62.016 Ω	S21 Gain: -82.996 dB
Parallel X: 535.7 nH	S21 Phase: 125.71°	Parallel X: 161.22 fF	S21 Phase: 155.95°

Marker 3	
Frequency: 3.04916 GHz	VSWR: 1.403
Impedance: 35.7+j684m Ω	Return loss: -15.516 dB
Series L: 35.681 pH	Quality factor: 0.019
Series C: -76.356 pF	S11 Phase: 176.81°
Parallel R: 35.674 Ω	S21 Gain: -75.806 dB
Parallel X: 97.139 nH	S21 Phase: -162.53°

Şekil 21. S11 parametre grafiğindeki noktalara ait değerler

4 Sonuçlar

Bu çalışma, antipodal Vivaldi antenin; CST bilgisayar programı üzerinde tasarımını, optimizasyon algoritmaları ile en iyi sonucu elde etme işlemlerini, çift yüzeyi bakır kaplı FR-4 malzeme üzerine baskı devre aşamalarını ve NanoVNA cihazında ölçülmesi bölümlerini içermektedir. Temel hedef, antipodal Vivaldi tipindeki antenin istenen frekanslarda, 2G, 3G, 4G, 4.5G ve 5G gibi farklı mobil haberleşme teknolojileri ile tam uyumlu bir kapasiteyle çalışabilecek hale, optimizasyon algoritmalarıyla gelmesini sağlamaktır.

Yapılan ölçümler, testler ve iyileştirmeler sonucunda, geliştirilen antenin 807 MHz, 2643 MHz ve 3050 MHz frekanslarında -15 dB altındaki S11 değeri ile başarıyla çalıştığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, antenin, frekans alt yapısı uygun olan ülkelerde farklı iletişim teknikleri ile uyum içinde kullanılabileceğini göstermektedir.

Antenin geniş spektrum uyumluluğu, mobil iletişim teknolojilerindeki çeşitliliğe yönelik taleplere cevap verebilme yeteneği vurgulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, benzer uygulamalar ve iletişim sistemleri için temel teşkil edebilir ve gelecekteki kablosuz iletişim teknolojilerinin geliştirilmesine katkı sağlayabilir.

5 Beyanname

5.1 Rakip Çıkarlar

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

5.2 Yazarların Katkıları

Sorumlu Yazar Mehmet DUMAN: Araştırma ve makale için fikir ve hipotezin oluşturulması, sonuçlara ulaşmak için gereç ve yöntemlerin planlanması, ölçüm düzeneklerinin kurulması ve deneylerin yapılması, verilerin düzenlenmesi, bulguların açıklanması, yazının oluşturulması, imla ve dil bilgisi kontrolü aşamalarında katkı sunmuştur.

2. Yazar Volkan BERK: Sonuçlara ulaşmak için deneylerin yapılması, verilerin düzenlenmesi, denklemlerin kurulması, araştırma sırasında literatür taraması, kaynakçalandırma, yazının oluşturulması aşamalarında katkı sunmuştur.

Kaynakça

- [1] Alsharif, M. H., Hossain, M. S., Jahid, A., Khan, M. A., Choi, B. J., & Mostafa, S. M. (2022). Milestones of Wireless Communication Networks and Technology Prospect of Next Generation (6G). *Computers, Materials & Continua*, 71(3).
- [2] Thaiwirot, W., Kamoldej, D., Detchporn, P., Thongdit, P. & Tangwachirapan, S. (2022). Antipodal Vivaldi Antenna with Dielectric Lens for Biomedical Imaging Applications. *IEEE Research, Invention, and Innovation Congress: Innovative Electricals and Electronics (RI2C)*, Bangkok, Thailand, pp. 93-96, doi: 10.1109/RI2C56397.2022.9910304.
- [3] Wang, M., Crocco, L., Costanzo, S., Scapaticci, R. & Cavagnaro, M. (2022). A Compact Slot-Loaded Antipodal Vivaldi Antenna for a Microwave Imaging System to Monitor Liver Microwave Thermal Ablation. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, 3, pp. 700-708, doi: 10.1109/OJAP.2022.3183750.
- [4] Kumar, S., & Dixit, A. (2022). Design of a high-gain dual-band antipodal Vivaldi antenna array for 5G communications. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 14(9), 1159-1167, doi:10.1017/S175907872100163X
- [5] Wang, J., Liu, J., Hou, K., & Li, Y. (2023). A novel antipodal Vivaldi antenna for ultra-wideband far-field detection. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 164, 154626.

- [6] Muchhal, N., Vintimilla, R. Z., Fares, Y., & Elkhoully, M. (2023). Review on Recent Trends and Applications of Vivaldi Antenna in the Range of 1 GHz–40 GHz. The Fifteenth International Conference on Advances in Satellite and Space Communications.
- [7] Stanley, M., Parker-Jervis, R., de Graaf, S., Lindström, T., Cunningham, J. E., & Ridler, N. M. (2022). Validating S-parameter measurements of RF integrated circuits at milli-Kelvin temperatures. *Electronics Letters*, 58(16), 614-616.
- [8] Presse, A., Floch, J. M., Tarot, A. C. and Camus, C.. (2013). Broadband UHF flexible vivaldi antenna. Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC), Loughborough, UK, pp. 277-280, doi: 10.1109/LAPC.2013.6711900.
- [9] Di Trapani, F., Sberna, A. P., & Marano, G. C. (2022). A genetic algorithm-based framework for seismic retrofitting cost and expected annual loss optimization of non-conforming reinforced concrete frame structures. *Computers & Structures*, 271, 106855..
- [10] Han, S., & Li, X. (2022). An improved adaptive genetic algorithm. In *SHS Web of Conferences*, 140. EDP Sciences.
- [11] Xu, H. Q., Gu, S., Fan, Y. C., Li, X. S., Zhao, Y. F., Zhao, J., & Wang, J. J. (2023). A strategy learning framework for particle swarm optimization algorithm. *Information Sciences*, 619, 126-152.
- [12] Gad, A. G. (2022). Particle swarm optimization algorithm and its applications: a systematic review. *Archives of computational methods in engineering*, 29(5), 2531-2561.
- [13] Duan J. & Zhu L. (2022). Numerical Short-On-Load (SOL) Calibration Technique for Accurate Extraction of Electrically-Small Planar/Non-Planar Microstrip-Line Circuits. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 70(4), pp. 2067-2076, doi: 10.1109/TMTT.2022.3143947.
- [14] Cheng, J., Zhang, H., Ning, M., Raza, H., Zhang, D., Zheng, G., ... & Che, R. (2022). Emerging materials and designs for low-and multi-band electromagnetic wave absorbers: the search for dielectric and magnetic synergy? *Advanced Functional Materials*, 32(23), 2200123.
- [15] Satılmış, G. (2022). Genetik Algoritma Kullanarak Dipol Dizi Antenlerde Yan Lob Bastırma. *Muş Alparslan Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 3(2), 50-56.



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).