
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

VİVALDİ ANTENLERİN TASARIMI VE PERFORMANS ANALİZİ

Sinem MERZİFONLUOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NİSAN 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Sinem MERZİFONLUOĞLU

24/04/2025

VİVALDİ ANTENLERİN TASARIMI VE PERFORMANS ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Sinem MERZİFONLUOĞLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2025

ÖZET

Bu çalışmada, 4 GHz merkez frekansında çalışacak şekilde tasarlanan 10 elemanlı bir Vivaldi dizi antenin tasarımı, üretimi ve ölçümü gerçekleştirilmiştir. Antenin elektromanyetik modeli, CST Studio Suite yazılımı kullanılarak oluşturulmuş, ardından performans kriterleri doğrultusunda optimizasyon süreci yürütülmüştür. Simülasyonlar sonucunda, antenin kazanç, yönelme özellikleri ve geri dönüş kaybı gibi temel parametreleri değerlendirilmiş ve antenin hedeflenen frekans bandında kararlı çalıştığı gözlemlenmiştir. Fiziksel üretim sürecinde, anten yapısı üç boyutlu yazıcı ile PLA (Polilaktik Asit) hammaddesi kullanılarak üretilmiş; üretim sonrası yüzey pürüzlülüğünü azaltmak için zımparalama işlemi uygulanmıştır. Elektromanyetik iletkenliği artırmak amacıyla anten yüzeyi gümüş bazlı iletken boya ile kaplanmıştır. Gerçekleştirilen ölçümler, temiz oda koşullarında gerçekleştirilmiş ve antenin çalışır durumda olduğu ve simülasyon sonuçlarıyla genel olarak uyumlu performans sergilediği gözlemlenmiştir. Ölçüm sonuçlarında gözlenen küçük frekans kaymalarının, üretim toleransları, boya kalınlığındaki değişiklikler ve malzeme özelliklerindeki sapmalardan kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Elde edilen bulgular, üç boyutlu yazıcılarla düşük maliyetli, hızlı ve tekrarlanabilir anten prototipleme sürecinin mümkün olduğunu ortaya koymakta ve özellikle radar, savunma ve kablosuz haberleşme sistemlerinde kullanılabilecek geniş bantlı anten tasarımları için uygulanabilir bir yaklaşım sunmaktadır.

Bilim Kodu	:	93415
Anahtar Kelimeler	:	3D yazıcı, anten kazancı, verimlilik, vivaldi anteni
Sayfa Adedi	:	59
Danışman	:	Prof. Dr. Nursel AKÇAM
İkinci Danışman	:	Dr. Galip Orkun ARICAN

DESIGN AND PERFORMANCE ANALYSIS OF VIVALDI ANTENNAS

(M. Sc. Thesis)

Sinem MERZİFONLUOĞLU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2025

ABSTRACT

In this study, a 10-element Vivaldi array antenna operating at a center frequency of 4 GHz was designed, fabricated, and measured. The electromagnetic model of the antenna was developed using CST Studio Suite, and an optimization process was conducted based on key performance criteria. Simulation results were used to evaluate fundamental parameters such as gain, radiation pattern, and return loss, demonstrating stable performance within the target frequency band. For the physical realization, the antenna structure was fabricated using a 3D printer with PLA (Polylactic Acid) material. Post-processing included sanding the surface to reduce roughness, followed by coating with a silver-based conductive spray paint to enhance electromagnetic conductivity. Measurements were carried out under cleanroom conditions, and the results confirmed that the antenna was operational and largely consistent with the simulation data. Minor frequency shifts observed in the measurements are attributed to factors such as fabrication tolerances, variations in coating thickness, and slight deviations in material properties. The findings of this study demonstrate that low-cost, rapid, and reproducible antenna prototyping using 3D printing technology is feasible. This approach provides a practical solution for the design of wideband antennas, particularly in applications such as radar systems, defense technologies, and wireless communication.

Science Code : 93415
Key Words : 3D printer, antenna gain, efficiency, vivaldi antenna
Page Number : 59
Supervisor : Prof. Dr. Nursel AKÇAM
Co-Supervisor : Dr. Galip Orkun ARICAN

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında bana destek olan herkese içtenlikle teşekkür ederim. İlk olarak, bana her zaman moral kaynağı olan, bu zorlu süreçte bana güç veren sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Onların sabrı ve desteği, bu yolculukta en değerli motivasyon kaynağım oldu. Tez danışmanım Prof. Dr. Nursel AKÇAM'a, yol gösterici rehberliği ve değerli katkıları için teşekkür ederim. Ayrıca, ikinci danışmanım Dr. Galip Orkun ARICAN'a (Aselsan), bana sağladığı yoğun destek, değerli önerileri ve her aşamada gösterdiği sabır için içtenlikle teşekkür ederim. Kendisi, bu sürecin en önemli destekçilerinden biri olmuştur. Dr. Burak Alptuğ YILMAZ'a (Aselsan) ve Mehmet Akif ÇELİK'e (Aselsan) de bu süreçte bana sağladığı destek ve yardımlar için teşekkür ederim. Kendilerinin bilgileri ve yardımları bu çalışmanın gelişiminde önemli bir rol oynamıştır. Bu çalışmanın hayata geçmesinde büyük rol oynayan ve bana yüksek lisans fırsatını sağlayan Aselsan'a da teşekkürlerimi sunarım. Şirketimin sağladığı imkanlar ve bana gösterdiği güven, bu süreçte her zaman benimleydi. Son olarak, bu yolculukta beni destekleyen, ilham veren tüm arkadaşlarıma ve yakınlarıma teşekkür ederim. Her birinin desteği, bu çalışmanın başarısında önemli bir yer tutmuştur.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

RESİMLERİN LİSTESİ xii

SİMGELER VE KISALTMALAR xiii

1. GİRİŞ 1

2. ANTEN TEORİSİ 19

2.1. Vivaldi Anten 20

2.2. Vivaldi Anten Çalışma Prensibi 20

2.3. Yama Vivaldi Anten 20

2.4. Konnektör Seçimi 21

2.5. Üretim Hammaddesi Seçimi 22

2.6. Simülasyon Programları 23

3. TASARIM SÜRECİ 25

3.1. Tekli Vivaldi Anteni Tasarımı 25

3.2. 10 Elemanlı Dizi Vivaldi Tasarımı 28

4. ANTEN ÜRETİMİ, ÖLÇÜMÜ VE ANALİZİ 33

4.1. Anten Üretim Süreci 33

4.2. Ölçüm Sonuçları 39

4.3. Aktif S Parametresi Ölçümleri ve Hesaplamaları 47

5. SONUÇ VE ÖNERİLER 53

KAYNAKLAR 55

ÖZGEÇMİŞ 59

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Tekli Vivaldi tasarım parametreleri 26

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. Ka bandı geniş bantlı Vivaldi anten dizisi 8

Şekil 2.1. Yama Vivaldi anteni 21

Şekil 3.1. Tekli Vivaldi tasarımı görseli 26

Şekil 3.2. Tekli Vivaldi anten tasarımı S11 parametresi 27

Şekil 3.3. Tekli Vivaldi tasarımı ışıma örüntüsü (4 GHz) 27

Şekil 3.4. Tekli Vivaldi tasarımı ışıma örüntüsü (2 boyutlu) 28

Şekil 3.5. 10 elemanlı dizi Vivaldi anten tasarımı 28

Şekil 3.6. 10 elemanlı dizi anten - 1.port için S11 parametresi 29

Şekil 3.7. 10 elemanlı dizi anten - 2.port için S11 parametresi 29

Şekil 3.8. 10 elemanlı dizi anten - 3.port için S11 parametresi 30

Şekil 3.9. 10 elemanlı dizi anten - 4.port için S11 parametresi 30

Şekil 3.10. 10 elemanlı dizi anten - 5.port için S11 parametresi 30

Şekil 3.11. 10 elemanlı dizi anten - 6.port için S11 parametresi 30

Şekil 3.12. 10 elemanlı dizi anten - 7.port için S11 parametresi 31

Şekil 3.13. 10 elemanlı dizi anten - 8.port için S11 parametresi 31

Şekil 3.14. 10 elemanlı dizi anten - 9.port için S11 parametresi 31

Şekil 3.15. 10 elemanlı dizi anten - 10.port için S11 parametresi 31

Şekil 3.16. 10 elemanlı dizi anten - ışıma örüntüsü (4 GHz)..... 32

Şekil 4.1. 1.port S11 ölçümü..... 42

Şekil 4.2. 2. port S11 ölçümü..... 42

Şekil 4.3. 3. port S11 ölçümü..... 43

Şekil 4.4. 4.port S11 ölçümü..... 43

Şekil 4.5. 5.port S11 ölçümü..... 44

Şekil 4.6. 6.port S11 ölçümü..... 44

Şekil 4.7. 7.port S11 ölçümü..... 45

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.8. 8.port S11 ölçümü..... 45

Şekil 4.9. 9.port S11 ölçümü..... 46

Şekil 4.10. 10.port S11 ölçümü..... 46

Şekil 4.11. Pasif S11 parametresi 47

Şekil 4.12. 1.port ve 2.port etkileşimi..... 48

Şekil 4.13. 1.port ve 3.port etkileşimi..... 48

Şekil 4.14. 1.port ve 4.port etkileşimi..... 49

Şekil 4.15. 1.port ve 5.port etkileşimi..... 49

Şekil 4.16. 1.port ve 6.port etkileşimi..... 50

Şekil 4.17. 1.port ve 7.port etkileşimi..... 50

Şekil 4.18. 1.port ve 8.port etkileşimi..... 51

Şekil 4.19. 1.port ve 9.port etkileşimi..... 51

Şekil 4.20. 1.port ve 10.port etkileşimi..... 52

Şekil 4.21. Aktif S parametresi hesaplaması 52

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 3.1. Kullanılan SMA-50-0-13/111_N konnektörü..... 25

Resim 4.1. 3 boyutlu yazıcıda antenin üretilmesi 33

Resim 4.2. 3 boyutlu yazıcıda üretilen anten kısmı 33

Resim 4.3. Matkap ile deliklerin yüzey temizliğinin yapılması 34

Resim 4.4. Vida bağlantı deliklerinin delinmesi..... 34

Resim 4.5. Vida bağlantı yerlerine helicoil çekilmesi 35

Resim 4.6.Helicoil işlemi sonrası 35

Resim 4.7. Zımpara işlemi sonrası..... 36

Resim 4.8. Maskeleme işlemi ve alkol ile temizlik işlemi 36

Resim 4.9. Boya sonrası maskelerin çıkarılması 37

Resim 4.10. Boya sonrası maskelerin çıkarılması 37

Resim 4.11. Konnektörlerin montajı..... 38

Resim 4.12. Konnektör koruma kapakları takılması 39

Resim 4.13. Ölçümde kullanılan network analizör..... 40

Resim 4.14. Elektronik kalibrasyon modülü..... 40

Resim 4.15. S11 parametresi ölçümleri 41

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
dB	Desibel
dBi	İzotropiğe göre desibel
GHz	GigaHertz
Hz	Hertz
MHz	MegaHertz
Mm	Milimetre

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
2D	İki boyutlu
3D	Üç boyutlu
5G	5. Generation
6G	6. Generation
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
AVA	Antipodal Vivaldi Anteni
CCL	Channel Capacity Loss
DG	Diversity Gain
DGS	Defected Ground Structure
ECC	Envelope Correlation Coefficient
FCC	Federal Communications Commission
FDTD	Finite Difference Time Domain
GPS	Global Positioning System
HFSS	High-Frequency Structure Simulator
ITU	International Telecommunication Union
MG	Mean Effective Gain
MIMO	Multiple Input Multiple Output

Kısaltmalar	Açıklamalar
PLA	Polilaktik Asit
PTFE	PoliTetraFloroEtilen
RCS	Radar Cross Section
RF	Radyo Frekans
SMA	SubMiniature version A
SNR	Signal to Noise Ratio
SRR	Split-Ring Resonator
TV	TeleVizyon
UWB	Ultra Wide Bant
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio

1. GİRİŞ

Gelişen teknolojilerle birlikte iletişim sistemlerinin hayatımızdaki rolü her geçen gün artmaktadır. Anten teknolojileri, basit radyo frekanslarını ileten cihazlardan başlayarak, günümüzde radar, iletişim, uydu sistemleri gibi öncesinden çok daha karmaşık ve çok yönlü işlevler gerçekleştiren bir hale gelmiştir. Günümüzde, sadece bireysel iletişim değil, otonom araçlar, savunma sistemleri ve akıllı şehir uygulamaları gibi pek çok alanda anten teknolojilerine olan ihtiyaç kritik hale gelmiş durumdadır. Gelişen sayısallaşma, beşinci nesil kablosuz iletişim ağı (5. Generation - 5G) gibi yeni teknolojilerin de hayatımıza girmesiyle antenlerin daha geniş frekans aralıklarına ve yüksek veri hızlarına uyum sağlaması bu kritikleşmeyi daha da pekiştirmektedir. Vivaldi antenleri, geniş bant genişliği ve yönlülük özellikleriyle bu talepleri karşılamada önemli bir yer tutmaktadır.

Hızla değişen ve büyüyen iletişim sistemlerinde hem maliyet hem de verimlilik açısından yenilikçi çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır. Örneğin, geleneksel anten üretim yöntemlerinde kullanılan malzemeler ağır ve pahalı olabilmektedir. Ayrıca bu antenlerin üretim süreçleri genellikle uzundur ve üretim için karmaşık (kompleks) makinelere ihtiyaç duyulur. Geleneksel yöntemlerle üretilen antenler hem kullanılan malzemeler hem de üretim süreçleri nedeniyle ekonomik ve pratik olmaktan uzaktır. Bu durum, özellikle hızlı prototiplenebilen düşük maliyetli anten üretimi için engel teşkil etmekte olup alternatif üretim yöntemlerinin araştırılmasını ve tasarım süreçlerinin yeniden ele alınıp geliştirilmesini gerektirmektedir.

Son yıllarda üç boyutlu (3 Dimension - 3D) baskı teknolojilerinin hızla gelişmesiyle birlikte, anten üretimi gibi hassas mühendislik uygulamalarında da bu yöntem yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu süreçte kullanılan filament malzemeleri, yalnızca üretim sürecini değil, aynı zamanda ürünün elektromanyetik performansını da doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda, PLA (Polylactic Acid) malzemesi, özellikle ABS'ye (Akrilonitril Bütadien Stiren) kıyasla sunduğu çeşitli avantajlarla dikkat çekmektedir.

Literatürdeki çalışmalara bakıldığında; Gazit, Vivaldi anteni ve besleme geçişi üzerine yaptığı incelemelerinde [1], düşük dielektrik sabitli bir alt tabaka üzerinde üretilen mikroşerit antenlerin geniş bir frekans aralığında çalışabileceğini göstermektedir. Bu çalışmada, simetrik çift taraflı yuva hattına doğru konik bir geçiş kullanılarak kısa devre deliği olmadan geniş bir frekans bandı elde edilmiştir. Frekansla ışın genişliğinin sabitliğini

etkileyen parametreler tartışılmış ve anten uzunluğunun kontrol edilmesiyle istenilen ışın genişliği sağlanmıştır. Antenin tasarımında iki önemli unsur, besleme geçişi ve konik yuva anteninin boyut ve şeklidir. Besleme geçişi, mikroşerit hattının asimetrik, çift taraflı yuva hattına konik bir şekilde dönüştürülmesiyle gerçekleştirilmiş ve bu geçiş, düşük yansıma katsayısıyla geniş bir frekans aralığında çalışmaktadır. Anten ışın genişliği, anten uzunluğuna bağlı olarak kontrol edilmiştir. Uzun antenlerin daha dar ışınlar sağladığı sonucuna varılmıştır. Ek olarak, antenin uçlarının eğrilmesiyle yan lobların azaltılabileceği ve daha geniş eğrilerle arka lobların da kısılabileceği görülmüştür.

Hood, Karacolak ve Topsakal'ın yaptığı çalışmada [2] incelediği ultra geniş bant (Ultra Wide Band - UWB) uygulamaları için tasarlanan kompakt antipodal Vivaldi anteni, 3,1 GHz - 10,6 GHz arasındaki tüm UWB spektrumunda çalışmakta olup, düşük çapraz polarizasyon seviyeleri ve makul kazanç değerleri sunmaktadır. Anten, FR4 ve Rogers RO3006 alt tabakalarıyla üretilmiş ve her iki alt tabaka için de geri dönüş kaybı, uzak alan deseni, faz tepkisi, grup gecikmesi ve kazanç analizleri yapılmıştır. FR4 ve RO3006 ile yapılan tasarımların, boyut açısından önemli bir küçülme sağladığı görülmüştür. FR4, devre entegrasyonu açısından avantaj sunarken, anten tasarımındaki dengeyi korumanın daha iyi radyasyon desenleri elde edilmesine yardımcı olacağı görülmüştür, ancak bu durumun üretim zorluklarını artıracağı belirtilmiştir. Köşe kırınımlarının azaltılması için yuvarlatma önerilmiş, bunun da kazanç ve yönlülüğü iyileştirdiği sonucuna varılmıştır. Bu kompakt antenlerin, Vivaldi antenlerinin tipik kazanç değerlerine sahip olmasa da düşük güç tüketimi ve kısa menzil gereksinimleri olan mobil cihazlar için uygun olacağı öne sürülmüştür.

Nassar ve Weller tarafından yapılan çalışmada [3], Vivaldi anten yapısındaki yönlendirme ve bant genişliğini iyileştirmek için yeni bir yöntem ortaya atılmıştır. Yönteminde Vivaldi kolları arasındaki bağları iyileştirerek ve eliptik bir yama ekleyerek daha güçlü radyo frekans (Radio Frequency - RF) sinyali elde etmiştir. Bu yaklaşımda düşük frekanslarda bile yönlendirme kabiliyetini artırarak ekstra dielektrik materyal eklenmesi ihtiyacını kaldırmıştır. Bu yöntem ile tasarladığı antenin ölçümlerinde ve benzetim çalışmalarının sonucunda yüksek frekanslarda önemli ölçüde RF kazancı elde etmiş ve frekans kararlılığını artırmıştır. Bu yöntemi ile antenin boyutunu iki katına çıkarmadan ve alt tabaka kalınlığını azaltmadan daha etkili sonuçlar elde edilebileceğini göstermiştir.

Sonkki, Sanchez-Escuderos, Hovinen, Salonen ve Ferrando-Bataller tarafından yapılan çalışmada [4], 10,7:1 gibi yüksek bir bant genişliğine sahip çift polarize bir Vivaldi anteni tasarımı sunulmuştur. Anten, iki dik (ortogonal) Vivaldi anteninin çapraz şekilde yerleştirilmesiyle elde edilmiştir ve bu düzenleme, galvanik temas olmadan gerçekleştirilmiştir. Ölçülen -10 dB empedans bant genişliği, 0,7 GHz ile 7,30 GHz arasında olup, %166'lık bir göreli frekans genişliği sağladığı gözlemlenmiştir. Anten portları arasındaki izolasyon ise 21 dB ile 30 dB arasında değişmiş olup maksimum kazanç 3,8 dB ile 11,2 dB arasında ölçülmüştür. Dik polarizasyonlar 0,7 GHz - 3,6 GHz arasında benzer kazanç değerlerine sahipken, 3,6 GHz sonrası kazançta biraz değişim gözlemlendiği belirtilmiştir. Çapraz polarizasyon ayrımı ise 0,7 GHz - 6,0 GHz arasında 19 dB'nin üzerine çıkmakta ve 4,5 GHz'ye kadar 25 dB'ye kadar iyileştiği görülmüştür. Bu antenin, geniş bant empedans ve radyasyon özellikleriyle başarılı sonuçlar sunduğu, çoklu giriş çoklu çıkış (Multiple Input Multiple Output - MIMO) test sistemlerinde kullanım için uygun olduğu belirtilmiştir. Bunun yanı sıra, aynı polarizasyonu ölçmesi gereken sistemlerde de faydalı olabileceği sonucuna varılmış olup belirlenen ultra geniş bant iletişim bantlarında frekans ölçekli anten kullanımı için de uygun bir seçenek olabileceği görülmüştür.

Tianming, Yuping ve Zhongxia tarafından yapılan çalışmada [5], UWB iletişim sistemlerinde darbeli radyasyon için kullanılabilen bir antipodal Vivaldi anteni tasarlanmıştır. Vivaldi anteni, düzlemsel yapıya sahip ve konik yuva formunda olan özel bir anten türüdür. Kompakt yapısı sayesinde, antenin verici ve alıcı elemanlarla entegre edilmesinin kolay olduğu belirtilmiştir. Tasarlanan antenin, Federal İletişim Komisyonu (Federal Communications Commission - FCC) tarafından UWB kablosuz iletişim için ayrılan 3,1 GHz ile 10,6 GHz frekans bandında etkili bir performans sergilediği sonucuna ulaşılmıştır. Bu anten, UWB darbelerini az bozulma ile yayabilmekte ve iyi yönlendirme ile yüksek verimlilik sunmakta olup antenin tasarımı ve ölçülen sonuçları, çalışmada detaylı şekilde sunulmuştur. Tasarlanan antenin 3,1 GHz ile 10,6 GHz frekans aralığında iyi bir gerilim duran dalga oranı (Voltage Standing Wave Ratio - VSWR) değeri sağladığı görülmüştür. Ayrıca, düşük ışık yansımasıyla kısa darbelerin yayılması ya da alınması mümkün olup, bu özelliklerle yüksek veri hızı ve hatasız iletişim sağlanabileceği belirtilmiştir. Antenin bant genişliği, rasyonel tasarım sayesinde daha da genişletilebilmektedir. Düşük profilli, küçük hacimli ve hafif yapısı ile entegrasyonunun kolay olması gibi avantajlarla, bu anten tasarımının ultra geniş bant iletişim ve radar sistemlerinde önemli bir konuma gelebileceği sonucuna varılmıştır.

Hamid, Gardner, Hall ve Ghanem tarafından yapılan çalışmada [6], geniş bant veya dar bant modunda çalışabilen, ek anahtarlı bant işlevselliğine sahip yeni bir Vivaldi anteni önerilmiştir. Antenin yeniden yapılandırılması, toprak düzlemine dört çift anahtarlanabilir halka yuvasının yerleştirilmesiyle gerçekleştirilmiştir. 1,0 GHz - 3,2 GHz arasında geniş bir bant genişliği modu ve üç dar bant modu seçilebileceği belirtilmiştir. PIN diyot (P+-I-N+ yapısına sahip diyot) anahtarlarına sahip tam işlevsel bir prototip geliştirilmiş ve yapılan ölçümler, önerilen tasarımın iyi bir performans sergilediğini göstermiştir. Halka yuvalarının tanıtılmasıyla, yeni bir anahtarlanmış bant Vivaldi anteni ortaya konmuş ve üç farklı pozisyonda üç çift halka yuvası kullanılarak üç yeniden yapılandırma modu gösterilmiştir. Tasarım kılavuzunun türetildiği ve bant konumlarının optimize edilmesine imkân tanındığı ifade edilmiştir. Antenin daha uzun bir versiyonunda ek rezonatörler ile daha fazla alt bant elde edilebileceği, ancak gösterilen örnekte her bir alt bant için iyi bir geri dönüş kaybı sağlandığı belirtilmiştir. Önerilen antenin, askeri uygulamalar ve bilişsel radyo gibi geniş bant algılama ve dinamik bant anahtarlama gerektiren çok modlu uygulamalar için uygun bir çözüm olabileceği sonucuna varılmıştır.

Natarajan, George ve Kanagasabai tarafından önerilen çalışmada [7], 42×36×1,6 mm³ boyutlarında kompakt bir Antipodal Vivaldi anteni (AVA) sunulmuştur. Bu antenin tasarımında, radyasyon kanatlarındaki yapısal değişiklikler, antenin elektriksel uzunluğunu artırarak, çalışma frekansını 5,2 GHz'den 3,7 GHz'ye düşürmüştür. Antenin, belirtilen frekans bandı boyunca -20 dB ko-polarizasyon ile çapraz polarizasyon oranını koruduğu belirtilmiştir. Prototipin üretimi ve yapılan ölçümler, önerilen antenin performansını doğrulamıştır. Antenin, 3,7 GHz ile 18 GHz arasında çalışabilen, düşük çapraz polarizasyonlu ve kompakt bir yapıya sahip olduğu vurgulanmıştır. Yapısal değişiklikler, antenin boyutlarını değiştirmeden %28,8 oranında bir küçülme sağlamış ve frekans aralığını genişletmiştir. Tasarımda, daralma oranı ve yuva genişliği gibi parametrelerin ayarlanabilirliği tartışılmıştır. Önerilen anten, geniş frekans bandı boyunca ana ışın yönünde -20 dB eş polarizasyonla çapraz polarizasyon oranını koruyarak etkili bir performans sunmaktadır. Gelecekte, bu çalışmanın radar kesit alanı (Radar Cross Section - RCS) küçültmesi gibi uygulamalarda kullanılmasının planlandığı belirtilmiştir.

Dixit ve Kumar tarafından yapılan çalışmada [8], AVA performansını artırmak için farklı iyileştirme yöntemleri ele alınmıştır. UWB, 5G ve mikrodalga iletişim sistemleri için yüksek kazanç ve geniş bant genişliği sağlayabilen antenlere olan ihtiyaç artmaktadır. AVA, bu

gereksinimleri karşılayan antenlerden biri olup, kompakt hale getirilmesi için alt tabaka seçimi, yuva tasarımı, metamalzemeler ve dielektrik lens gibi çeşitli teknikler önerilmiştir. Çalışma, bu iyileştirme yöntemlerini detaylı şekilde incelemekte ve her birinin antenin kazanç, geri dönüş kaybı, polarizasyon ve radyasyon deseni gibi performans parametreleri üzerindeki etkilerini açıklamaktadır. Ayrıca, bu yöntemlerin anten tasarımında nasıl uygulandığı ve sağladığı faydalar tartışılmaktadır. Genel olarak, bu araştırma AVA antenlerinin daha verimli hale getirilmesi için önemli bir rehber olarak değerlendirilmektedir.

Wang, Chen ve Parini tarafından yapılan çalışmada [9], farklı yapıdaki Antipodal Vivaldi antenlerinin özellikleri ve performansını etkileyen temel faktörler incelenmiştir. Çalışma, çeşitli eliptik yükleme boyutları, açılma oranları ve toprak düzlemi boyutları gibi parametrelerin, geri dönüş kaybı, radyasyon deseni ve akım dağılımı üzerindeki etkilerini analiz etmek amacıyla tam dalga simülasyonu kullanarak karşılaştırmalar yapmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, 2.1 GHz ile 20 GHz arasındaki geniş bir bant genişliği elde edilebilmiştir. Antipodal antenlerin üç ana parametresinin, özellikle geri dönüş kaybı ve radyasyon kazancı üzerindeki etkileri simülasyonlar aracılığıyla araştırılmış ve daha sonra deneysel doğrulamalar yapılması planlanmıştır. Öne çıkan bulgular arasında, eliptik yükleme eklemenin antenin bant genişliğini artırmakla birlikte anten boyutunu büyüttüğü; konik yuva hattı açılma oranını artırmanın düşük frekans bandını uzatmakla birlikte radyasyon kazancını azalttığı; toprak düzlemi boyutunun küçültülmesinin ise empedans bant genişliğini artırırken radyasyon desenine zarar vermediği görülmüştür. Bu gözlemler doğrultusunda, daha verimli anten yapıları için çalışmalara devam edilmektedir.

Zhang, Chen, Tian, Liu ve Liu tarafından yapılan çalışmada [10], kompakt geniş bantlı bir AVA tasarlanmıştır. Antenin tasarımında, geleneksel üstel sivrilmiş kenar yerine, daha kompakt bir yapı sağlamak amacıyla yay eğrisi kullanılmıştır. Ayrıca, antenin yüksek frekans performansını artırmak için "yönlendirici" ve "dışbükey mercek" gibi yapısal iyileştirmeler eklenmiştir. Önerilen anten, 34 × 16 × 0,8 mm³ boyutlarındadır ve 3,01 ila 10,6 GHz arasında geniş bir frekans aralığında çalışmaktadır. Ölçülen sonuçların, simülasyonlarla uyumlu olması nedeniyle tasarımın etkili ve uygulanabilir olduğu belirtilmiştir. Yapısal değişiklikler sayesinde antenin boyutu küçültülmüş ve düşük frekansta kazanç artışı sağlanmıştır. Ayrıca, enerji dağılımını iyileştirmek ve odaklamak için kullanılan lens ve yönlendirici yapıların, antenin kazancını artırdığı sonucuna varılmıştır.

Deng ve Xie tarafından önerilen çalışmada [11], geleneksel Vivaldi antenlerinin bant genişliğini artırmak amacıyla yeni bir yapı geliştirilmiştir. Eşdeğer devre teorisi kullanılarak yapılan tasarımda, yüksek çip direnci ve kısa pinler kullanılarak antenin bant genişliğinin genişletilebileceği sonucuna varılmıştır. Tasarlanan antenin boyutları 62 mm uzunluk, 70 mm genişlik ve 0,5 mm kalınlık şeklinde olup, ölçüm sonuçları 1 GHz - 20 GHz arasında bir bant genişliği sağlandığını göstermektedir. Antenin kazancı ise 0,9 dB ile 7,8 dB arasında değişmektedir. Bu yeni tasarım, geleneksel Vivaldi antenlerine göre daha küçük boyutlu ve düşük profilli olup, aynı zamanda iki boyutlu (2 Dimension - 2D) yapısal bir özellik göstermektedir. Geleneksel mikroşerit beslemeli Vivaldi antenlerinin boyutları büyük ve bant genişlikleri sınırlıyken, önerilen antenin boyutları geleneksel antenlerin yaklaşık yarısına indirgenmiştir. Çalışmada, Vivaldi antenlerinin bant genişliğini sınırlayan faktörler analiz edilerek, bunlar çip direnci ve kısa pin kullanılarak minimize edilmiştir. Sonuç olarak, önerilen anten modelinin 1 GHz - 20 GHz arasında yüksek performans sergileyen ve daha kompakt bir yapıya sahip bir çözüm sunacağı belirtilmiştir.

Ba, Shirai ve Ngoc tarafından yapılan çalışmada [12], UWB uygulamaları için Antipodal bir Vivaldi anteni tasarlanmıştır. Anten, basit bir yapıya sahip olmasına rağmen, geniş bir frekans bandında (3,1 GHz - 10,6 GHz) yüksek kazanç ve düz kazanç sağlamaktadır. Tasarım, ticari HFSS (High-Frequency Structure Simulator) 14 simülasyon yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve 4,4 dielektrik sabiti ile 1,6 mm kalınlığında popüler FR4 alt tabakası üzerinde üretilmiştir. Üretilen anten, geri dönüş kaybı ve yön deseni açısından test edilmiştir ve ölçülen sonuçlar, simülasyonla uyumlu bulunmuştur. Bu çalışma, önerilen Antipodal Vivaldi anteninin UWB uygulamaları için uygun olduğunu ve gelecekte, antenin kazancını artırmak için alt tabakasının şekillendirilmesi gibi iyileştirmelerin yapılabileceğini vurgulamaktadır.

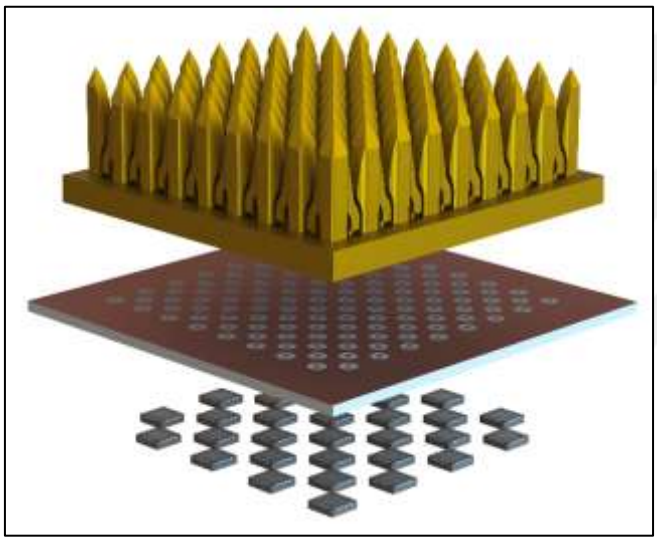
Rajesh ve diğerlerinin çalışmasında [13], Vivaldi anteninin RCS azaltılması için yapısal değişiklikler önerilmektedir. RCS azaltımı, radyatörden metal bir kısmın çıkarılması ve radyasyon kenarına yakın periyodik yuvaların uygulanmasıyla elde edilmiştir. Bu yuvalar, antenin dik yansıma yaparak monostatik RCS'nin azalmasını sağlar. Önerilen anten, 4 GHz ile 12 GHz arasındaki frekans bandında, referans antene kıyasla 10 dB daha fazla RCS azaltımı sağlamaktadır. Prototip üretildikten sonra, antenin performansı ölçümlerle doğrulanmıştır. Tasarımda, ek katman kullanılmadan antipodal bir Vivaldi anteni ile yapısal mod radar kesit alanı azaltılmıştır. Bu anten, çalışma bandı boyunca radyasyon özelliklerini

etkilemeden minimum 10 dBsm RCS azaltımı sağlamaktadır. Antenin kazancı ise, referans antenin kazancına yakın şekilde 2,3 dBi ile 6,3 dBi arasında değişmektedir. Bu özellikleriyle önerilen anten, düşük gözlemlenebilirlik gerektiren gizlilik uygulamaları için uygun bir çözüm sunmaktadır.

Bai, Shi ve Prather tarafından yapılan çalışmada [14], Vivaldi antenlerinin düşük frekans performansını iyileştirmek için yeni bir yaklaşım sunulduğu belirtilmiştir. Geleneksel tasarımların, dairesel şekilli yük veya yuvalı yük gibi yükleme yapılarının eklenmesiyle değiştirilerek daha geniş bir empedans bant genişliği elde edilebildiği gösterilmiştir. Çalışmada, bu yöntemle tasarlanan antenlerin 25:1'in üzerinde empedans bant genişliğine ulaştığı ve 4 GHz - 50 GHz aralığında 3 ila 12 dBi arasında değişen kazanım değerleri ile hem E hem de H düzlemlerinde simetrik radyasyon desenleri sergilediği ifade edilmiştir. Dairesel şekilli yük ile yüklenen antenin düşük dönüş kaybı sağladığı, yuvalı yüklenen antenin ise yaklaşık 2 GHz daha geniş bir empedans bant genişliği sunduğu ve belirli spektrum aralıklarında bastırılmış yan loblar ve yüksek yönlülük gibi avantajlara sahip olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, yükleme yapılarının bant genişliği gereksinimlerini hafiflettiği ve antenin kompakt bir yapıya kavuşmasına olanak tanıdığı vurgulanmıştır. Yuvalı yükleme yönteminin, daha düşük frekanslı bir rezonans oluşturmak için yuva boyutlarının manipüle edilebildiği, bunun da geniş bant genişliğine katkıda bulunduğu ifade edilmiştir. Değiştirilen Vivaldi antenlerinin radyasyon desenlerinin, frekans 30 GHz'in üzerine çıktığında kararlılık gösterdiği ve anten düzleminde yönlendirici bir desen ile opto-elektronik devrelerle kolay entegrasyon sağladığı sonucuna varılmıştır. Bu yaklaşımın, Vivaldi antenlerinin performansını iyileştirmek ve UWB uygulamaları için uygun kompakt yapılar elde etmek amacıyla kullanılabileceği belirtilmiştir.

Kähkönen, Ala-Laurinaho ve Viikari tarafından yapılan çalışmada [15], 5G milimetre dalga (mmWave) iletişim sistemlerinde kullanılmak üzere Ka bandı (26 - 40 GHz) için tamamen metalik, çift polarize ve geniş bantlı bir Vivaldi anten dizisinin tasarımını ve performansını sunmaktadır (Şekil 1.1). Anten elemanları, aktif bileşenlerin anten elemanlarına yakın bir şekilde entegre edilmesine olanak tanıyan tek bir baskılı devre kartı (PCB) üzerine monte edilebilir. Simülasyon ve ölçüm sonuçları, antenin geniş bir yönlendirme açısı aralığında (-60° ile +60°) düşük yansıma katsayısı (-10 dB'nin altında) ve düşük tarama kaybı (3 dB'den az) sağladığını göstermektedir. Antenin tamamen metalik yapısı ve dielektrik içermemesi, yüksek verimlilik sunarken, çapraz polarizasyon değerlerinin geniş frekans aralığında (-22

dB ile -18 dB arasında) düşük olduğu gözlemlenmiştir. Üretilen 8×8 anten dizisi prototipinde, farklı elemanların yansıma katsayıları ve kazanç desenleri ölçülmüş ve bu değerlerin simülasyon sonuçlarıyla büyük ölçüde uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışma, anten elemanlarının küçük boyutuna ve besleme noktalarının yakınlığına rağmen, yüksek performanslı, çift polarize bir anten dizisinin başarılı bir şekilde üretilebileceğini ve ölçülebileceğini ortaya koymaktadır. Önerilen anten tasarımının, 5G iletişim ağları ve Ka bandında yüksek bant genişliği ve küçük boyut gereksinimi duyulan algılama uygulamaları için umut verici bir çözüm sunduğu belirtilmektedir.



Şekil 1.1. Ka bandı geniş bantlı Vivaldi anten dizisi

Rana, Khanom ve Rahman'ın yaptığı çalışmada [16], Vivaldi antenlerinin Ku frekans bandında çalışabilen ve beyin tümörü tespiti gibi biyomedikal uygulamalar için kullanılabilen tasarımları üzerinde durulmuştur. Araştırmanın, bu antenlerin tasarım ve performans analizlerini gerçekleştirmeyi hedeflediği belirtilmiştir. CST Mikrodalga Stüdyosu kullanılarak tasarlanan dört farklı Vivaldi anten dizisinin basit, taşınabilir ve üretimi kolay bir yapıda olduğu ifade edilmiştir. Mikro şerit besleme hattının, tasarımın basitliği ve güvenilirliği nedeniyle tercih edildiği vurgulanmıştır. Tasarım prosedürleri, adım adım açıklanmış ve antenlerin performansının geri dönüş kayıpları, radyasyon desenleri ve VSWR açısından değerlendirildiği belirtilmiştir. Elde edilen sonuçlar, anten dizisi sayısının artmasıyla kazancın iyileştiğini göstermiştir. Mikrodalga görüntüleme, tıbbi implantlar ve kablosuz iletişimler gibi çeşitli tıbbi uygulamalara uygun dört farklı anten tasarlandığı ve bu tasarımların simüle edildiği belirtilmiştir. Özellikle, tekli, 2 dizili, 3 dizili ve 4 dizili anten

tasarımlarının simüle edildiği ve 4 dizili antenin diğerlerine kıyasla daha iyi VSWR performansı sağladığı sonucuna varılmıştır. Gelecekte, bu antenlerin gerçek zamanlı biyomedikal uygulamalara entegre edilmesinin planlandığı ifade edilmiştir.

Behara tarafından yapılan çalışmada [17], UWB iletişimleri için bir Vivaldi anteni tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Tasarımın, 3,1 GHz ile 10,6 GHz arasındaki frekans aralığında yüksek kazanç elde etmeyi amaçladığı belirtilmiştir. Rogers RT 5870 alt tabakasının ($\varepsilon_r = 2,33$) kullanıldığı ve simülasyonların zamanda sonlu farklar yöntemi (Finite Difference Time Domain - FDTD) alan çözücü ile gerçekleştirildiği ifade edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, antenin 5 GHz ile 12 GHz arasında sabit bir şekilde 10 dBi'nin üzerinde kazanç sağladığını ve en yüksek frekansta 12,27 dBi kazanca ulaştığını göstermiştir. Bu performansın, özellikle X-Bant uygulamaları gibi ileriye dönük geniş kapsamlı uygulamalar için uygun olduğu vurgulanmıştır. Genetik Algoritma (GA) kullanılarak gerçekleştirilen parametrik optimizasyonların, anten performansının iyileştirilmesine ve operasyon kapsamlarının genişletilmesine yardımcı olduğu belirtilmiştir. Antenin, tıbbi uygulamalar için 0 - 3 GHz, S-Bant için 2 GHz - 4 GHz, C-Bant için 4 GHz - 8 GHz ve X - Bant için 8 GHz - 12 GHz arasında operasyonel frekanslar ürettiği ve kablosuz iletişim sistemlerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Gelecekte, Bölünmüş Halka Rezonatörleri (Split-Ring Resonator - SRR) kullanılarak frekans çentiği elde edilmesinin ve antenin etkinliğinin daha da artırılmasının planlandığı ifade edilmiştir. Bu çalışmanın, UWB iletişimleri ve geniş bantlı anten tasarımları için önemli bir temel oluşturduğu sonucuna varılmıştır.

Chiappe ve Gragnani tarafından yapılan çalışmada [18], Vivaldi antenlerinin geometrik ve elektriksel özellikleri, frekanstan bağımsız anten teorisi kapsamında incelenmiş ve teorik analizlerle tasarım sorunlarına yönelik çözümler sunulmuştur. Üssel konikliğin ölçekleme değişmezliği özelliği temel alınarak bir ölçekleme ilkesi geliştirilmiş ve anten boyunca akım dağılımını açıklayan kapalı formda bir model önerilmiştir. NEC2 (sayısal elektromanyetik kodu) koduyla gerçekleştirilen sayısal simülasyonların, bu modelle yüksek uyum gösterdiği ifade edilmiştir. Akımın üstel eğrisel koordinatlar boyunca modellenmesiyle doğru faz değişimi elde edilmiş ve bu modelin, anten kazancı, empedans ve yönlülük gibi temel parametrelerin analitik formülasyonunda kullanılabileceği belirtilmiştir. Ayrıca, slotline (açıklık) ile eş düzlemli dalga kılavuzu arasında geçiş sağlamak için çift-Y balun tabanlı yenilikçi bir geniş bant besleme sistemi geliştirilmiş ve bu sistemin anten tasarımına daha sistematik bir yaklaşım sunduğu belirtilmiştir. Deneysel ölçümlerle desteklenen prototip

çalışmaları, başlangıç aşamasında da olsa umut verici sonuçlar vermiştir. Çalışmanın, Vivaldi antenlerinin geniş bant uygulamalarında ve mikrodalga ile milimetre dalga görüntüleme sistemlerindeki önemini vurguladığı sonucuna varılmıştır.

Guo, Gao, Yuan ve Xu tarafından yapılan çalışmada [19], iki klasik Vivaldi anteninin geniş bantta empedans uyumu, anten yapısının yükseklik etkisi ve özellikle çift polarizasyon dizilerinde önemli olan E-düzlemi ve H-düzlemindeki çapraz polarizasyon performansı analiz edilmiştir. Asimetrik uyum yapısına sahip bir Vivaldi anteni önerilmiş ve bu antenin, geniş bant, geniş tarama, düşük ekleme kaybı ve düşük profil gibi avantajlar sunduğu belirtilmiştir. Teorik analizler, yüksek çapraz polarizasyonun nedenlerini açıklamış ve bu sonuçlar üçgen bir dizi simülasyonu ile doğrulanmıştır. Çift polarizasyonlu uygulamalarda çapraz polarizasyonun eleman karakteristiği üzerinde kontrolün kritik öneme sahip olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, Vivaldi anteninin çapraz polarizasyon üzerine sentez analizinin, farklı eşleşen yuvalara dayalı olarak gerçekleştirildiği ve radyasyon yüzgecinin yüzeyine dik elektrik alanını açıklamak için mıknatıs halkası kavramının önerildiği ifade edilmiştir. İlk tasarım aşamasında, eşleşen yuvanın ve ilgili emici malzemelerin yerleştirilebilmesi için gerekli alanın ayrılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Çalışmanın, çapraz polarizasyon sorunlarının çözümüne yönelik teorik ve pratik katkılar sunduğu belirtilmiştir.

Wu, Zhao, Nie ve Liu tarafından yapılan çalışmada [20], düzlemsel baskılı bir Vivaldi anteninde slotline ile üssel olarak daralan yamalar arasında yeni bir basamaklı bağlantı yapısı kullanılarak empedans uyumunun iyileştirilmesi ve geniş bir bant genişliği elde edilmesi hedeflenmiştir. Tasarımın etkinliği, üretilen prototipin deneysel testleriyle doğrulanmış ve 3 GHz -15,1 GHz frekans bandında empedans uyumunun önemli ölçüde iyileştiği, ayrıca 5 dBi'den daha yüksek bir kazanç sağladığı gösterilmiştir. Ölçülen ve simüle edilen sonuçlar, bu teknikle geniş bant genişliği ve düz bir grup zaman gecikmesi tepkisinin elde edilebildiğini ortaya koymuştur. Diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında, önerilen teknik genel anten boyutlarını değiştirmeden empedans uyumunu etkili bir şekilde iyileştirmekte ve bant genişliğini genişletmektedir. Çalışmanın, kompakt boyutlu anten tasarımlarında geniş bant ve yüksek performans hedefleyen uygulamalar için önemli bir katkı sunduğu belirtilmiştir.

Kerarti, Marouf ve Meriah tarafından yapılan çalışmada [21], UWB uygulamaları için küçük boyutlu bir AVA tasarlanmış ve simüle edilmiştir. CST Microwave yazılımı kullanılarak

gerçekleştirilen simülasyonlarda, antenin S11, VSWR ve radyasyon deseni gibi parametreleri değerlendirilmiş ve UWB sistemlerine uygunluğu doğrulanmıştır. 58×60 mm boyutlarındaki anten, 2,14 GHz - 11,33 GHz frekans aralığında %136'lık kesirli bant genişliği ile tatmin edici empedans uyumu ve radyasyon performansı sergilemektedir. TACONIC TLX-8 alt tabakasıyla tasarlanan antenin 2 GHz ile 12 GHz aralığında 2 GHz ile 9,6 dBi arasında değişen bir tepe kazancı ve 2,0'dan düşük bir VSWR sağladığı belirlenmiştir. Küçük boyutlu ve düzlemsel devrelerle kolayca entegre edilebilen bu tasarımın, gelecekte anten dizileri için temel bir eleman olarak kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Moosazadeh ve Kharkovsky tarafından yapılan çalışmada [22], mikrodalga ve milimetre dalga görüntüleme uygulamalarında yüksek performans sergileyebilecek modifiye edilmiş kompakt bir antipodal Vivaldi anteni tasarlanmıştır. Tasarımda, geleneksel AVA üzerinde yapılan iyileştirmelerle yüksek bant genişliği, küçük boyut, yüksek kazanç, yönlülük ve ışın eğimi iyileştirmeleri hedeflenmiştir. Periyodik yarık kenarlar eklenerek, antenin alt uç sınırlamaları iki katına çıkarılmış ve kazancı artırılmıştır. Testlerde, antenin 3,4 GHz ile 40 GHz arasında S11 < -10 dB frekans bandı sağladığı ve simülasyonlarla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Trapezoid şekilli dielektrik lens sayesinde kazanç daha da artırılmış, ışın eğimi düzeltilmiş ve yan lob seviyeleri azaltılmıştır. Bu antenin, yüksek çözünürlüklü mikrodalga görüntüleme için uygun bir seçenek olarak öne çıktığı sonucuna varılmıştır.

Lazaro, Villarino ve Girbau tarafından yapılan çalışmada [23], erken meme kanseri tespiti için ultra geniş bantlı mikrodalga görüntüleme sistemlerinde kullanılabilecek bir konik yuva anteni önerilmiştir. Antenin, ultra geniş bant frekans bandında havada çalışacak şekilde tasarlandığı ve antenler arasındaki karşılıklı kuplaj etkilerinin tıbbi görüntüleme uygulamaları için uygunluğunu doğrulamak amacıyla incelendiği belirtilmiştir. UWB bandında nispeten yüksek bir kazanca sahip olduğu ve bant üzerindeki kazanç değişiminin kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığı sonucuna varılmıştır. Deneysel çalışmalar, önerilen tasarımın meme kanseri tespiti için etkili olduğunu ortaya koymuştur.

Eichenberger, Yetisir ve Ghalichechian tarafından yapılan çalışmada [24], eliptik bir psödoelement ve konik yuvalı antene düzensiz aralıklı çentikler ekleyerek yönlülüğü iyileştirmenin ve yan lob radyasyonunu azaltmanın yeni yöntemleri önerilmiştir. Antenin, 2,5 GHz - 57 GHz arasındaki geniş frekans bandında, C, X, Ku, K, Ka, S ve V bantlarının

bazı kısımlarında işlevsel olduğu ve sırasıyla 2,7 GHz ve 29,8 GHz'de 4 dB ve 16 dB'lik minimum ve maksimum kazançları sağladığı belirtilmiştir. 6 GHz'in üzerindeki frekanslar için 40°'nin altında, 32 GHz'in üzerindeki frekanslar için ise 30°'nin altında yarı güç ışın genişliğine sahip yönlü radyasyon desenleri sunduğu ifade edilmiştir. Geçmişte bildirilen diğer Vivaldi antenleriyle karşılaştırıldığında, önerilen tasarımın daha yüksek tepe kazancı ve ortalama kazanç sağladığı, ayrıca daha büyük bir bant genişliği sunduğu vurgulanmıştır. Simülasyon ve ölçüm sonuçları arasında iyi bir uyum gözlemlenmiştir. Bu tasarım, yönlülüğü artırmak için psödoeleman, yan lob seviyelerini azaltmak için çentikli çıkıntılar ve arka lob seviyelerini azaltmak için oluklar kullanarak, 2,5 GHz - 57 GHz bandında yüksek kazanç performansına sahip bir UWB Vivaldi anteni sunmaktadır. Bu antenin, düşük profil, yüksek kazanç, düşük yan lob ve arka lob seviyeleri ile ultra geniş bant genişliği özellikleri, onu uzaktan algılama, görüntüleme sistemleri ve savunma uygulamaları için uygun bir aday yapmaktadır.

Liu, Zhou, Shijie Yang, Weihao Li, Pengfei Li, Shuai Yang tarafından yapılan çalışmada [25], düzlemsel baskılı geleneksel Vivaldi anteninin tasarımını iyileştirmek için yeni bir konik yuva kenarı yapısı önerilmiştir. Bu yeni yapının, antenin düşük uç bant genişliği sınırlamasını genişletme kapasitesine sahip olduğu ve aynı boyutta geleneksel Vivaldi antenine kıyasla yönlülüğü ve anten kazancını özellikle düşük frekansta önemli ölçüde artırdığı belirtilmiştir. Ancak, bu yapının yüksek frekanslarda kazancı biraz düşürdüğü de ifade edilmiştir. Değiştirilen antenin prototipi üretilip test edilmiştir ve ölçülen sonuçların simülasyonlarla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir, buna göre tasarımın uygulanabilir olduğu belirtilmiştir. Önerilen anten, alt uç S11 $\leq$ -10dB sınırlamasını 1,2 GHz'den 0,5 GHz'e indirgemiş, bant genişliğini %14,6 oranında artırmış ve geleneksel modellere göre %19,5 daha küçük boyutlar sunmuştur. Simülasyon ve ölçümlerin, yeni yapının geleneksel tasarıma göre daha yüksek uçtan ateşleme yönlülüğü sunduğunu ve daha düşük frekansta anten kazancını artırdığı ifade edilmektedir. Bu özellikleriyle, önerilen antenin uçtan ateşleme yönlü UWB radyo frekansı uygulamaları için oldukça uygun bir aday olduğu sonucuna varılmıştır.

Sandora ve Charvat'ın yaptığı çalışmalarda [26], yakın alan faz dizili radar sistemlerinde kullanılmak üzere yeni bir UWB anten elemanının geliştirilmiş olduğu belirtilmiştir. Antenin, PCB'ine uygulanan Vivaldi tarzı konik bir yuva kullandığı ve 800 MHz ile 25 GHz arasında 30:1 bant genişliği sağladığı, ayrıca 2:1 VSWR'den daha iyi elektromanyetik enerji

geçişi ürettiği ifade edilmiştir. Radyasyon özelliklerinin, 2 ila 4 GHz arasındaki frekanslarda yüksek kazanç (10-15 dBi) sağlamak amacıyla optimize edildiği belirtilmiştir. Antenin, 10,8 Hz kare hızında gerçek zamanlı radar görüntüleri üreten bir yakın alan faz dizili radar görüntüleme sisteminde kullanılmak üzere tasarlandığı sonucuna varılmıştır. Vivaldi benzeri anten elemanlarının faz dizili sistemlerde daha yaygın hale geldiği ifade edilmiştir. Bu çalışmada, 2 katmanlı bir PCB üzerinde kolayca üretilebilen, 2 GHz ila 5 GHz arasındaki frekanslar için yüksek kazanç sağlayan 30:1 empedans bant genişliği sunan benzersiz bir Vivaldi ve doğrusal konik hibrit anteninin tanıtıldığı belirtilmiştir. Elemanların, üretim öncesinde simülasyonlarla optimize edilerek bir MIMO yakın alan faz dizili görüntüleme sisteminde kullanıldığı ifade edilmiştir. Antenin yüksek kazancının, küçük hedeflerde yüksek sinyal-gürültü oranı (Signal to Noise Ratio - SNR) sağladığı ve alçaltılmış çınlama ile yan lob performansının iyileştirildiği sonucuna varılmıştır. Gelecek çalışmaların, daha düşük frekanslarda ve çift polarizasyonlu faz dizili radar sensörleri için benzer antenler geliştirmeye odaklanacağı belirtilmiştir.

Yang, Zhang, Lin ve Fathy'nin çalışmalarında [27], duvarların ötesini görme (See-Through-Walls) gibi ultra geniş bantlı uygulamalar için 1x16 alt dizi anten yapısı geliştirilmiştir. Anten elemanları, genişletilmiş antipodal bir tasarıma sahip olup, 5 GHz bant aralığında sabit kazanç ve ışın genişliği sağladığı gözlemlenmiştir. Alt diziyi beslemek için 1'den 16'ya kadar geniş bantlı bir Wilkinson güç bölücüsü kullanılmış ve yapılan ölçümler, 8 GHz - 12 GHz aralığında sabit 13 dB kazanç ve 40° ışın genişliği elde edildiğini doğrulamıştır. Ayrıca, yüksek kazanç ve dar ışın genişliği sunan antipodal Vivaldi dizisi tasarımının başarılı performansı gösterilmiştir. Bu tasarım, See-Through-Walls uygulamaları için 16x16 sentetik açıklıklı antenlerde etkili bir şekilde kullanılabilecektir. Yapılan çalışma doğrultusunda bu geliştirme, radar teknolojilerinde yüksek performanslı çözümler elde edilmesine katkı sağlamaktadır.

Ojaroudiparchin, Shen ve Pedersen'in yaptığı çalışmada [28], 5G hücresel iletişimleri için yeni bir faz dizi anten tasarımını öneriyor. Bu anten, 60x130x0,8 mm³ boyutlarında ve düşük maliyetli bir N9000 PTFE (politetrafloroetilen) alt tabakası üzerinde tasarlanmıştır. Anten, cep telefonu PCB'sinin üst kenarına yerleştirilen sekiz adet 28 GHz Vivaldi anten elemanından oluşan doğrusal bir faz dizisiyle çalışmaktadır. Simülasyonlar, antenin 27,4 GHz - 28,6 GHz frekans aralığında -10 dB'den düşük yansıma katsayısına sahip olduğunu göstermektedir. Tasarım, yüksek kazanç, verimlilik ve 3D ışın yönlendirme özellikleri

sunarak, milimetre dalga 5G iletişimleri için uygun bir çözüm oluşturmaktadır. Ayrıca, antenin kullanıcı elinin yakınında nasıl performans gösterdiği de incelenmiştir. Sonuçlar, önerilen tasarımın anten kazancı, verimliliği ve ışın yönlendirmesi açısından 5G iletişimlerinin gereksinimlerini başarıyla karşıladığını ortaya koymaktadır.

Zhu, Liu, Wen ve Chen'in yaptığı çalışmada [29], 5G mmWave uygulamaları için geliştirilmiş kompakt geniş bant AVA dizisinin karşılıklı kuplajını azaltmaya yönelik bir yöntem sunulmaktadır. Tasarım, sekiz anten elemanından oluşur ve elemanlar arasındaki kuplaj, toprak düzlemine eklenen çentik yapılarıyla %37,3 oranında iyileştirilmiştir. Bu değişiklik, empedans bant genişliğini 24,65 GHz - 28,5 GHz'den 24,55 GHz - 28,5 GHz'e genişletmiş ve kazancı artırmıştır. Ölçülen kazanç, 5G mmWave frekans bandında 6,96 dB - 11,32 dB arasında olup, önceki diziden daha yüksektir. Önerilen AVA dizisi, 24,75 GHz - 28,35 GHz aralığında geniş bantlı performans sunarak, gelecekteki 5G iletişim frekans bandını kapsamaktadır. Bu iyileştirmeler, anten elemanları arasındaki izolasyonu artırarak, kazancı ve performansı iyileştirmiştir.

Kindt ve Pickles'ın yaptığı çalışmada [30], geniş kenarlı tarama sağlamak için tasarlanmış tamamen metal bir UWB anten elemanı sunulmuştur. Tasarım, hem tek hem de çift polarizasyon yapılandırmalarında simülasyon ve ölçüm sonuçlarına dayanmaktadır. Anten, geniş bir bant genişliğine sahip olup, 12:1 oranında geniş kenar tarama ve tüm düzlemlerde 45 derecelik tarama için 8:1 bant genişliği sunmaktadır. Besleme, doğrudan koaksiyel-yuva hattı geçişiyle, radyatörün tabanına montelenmiştir. Tasarımda herhangi bir lehimleme işlemi gerekmemekte olup, montaj basit ve modülerdir. Anten elemanları, yüksek hassasiyetli tel EDM kesme teknolojisiyle işlenmiş ve SMA (SubMiniature version A) koaksiyel konnektörler aracılığıyla beslenmiştir. Bu işleme yöntemi, ölçümlerin tekrarlanabilirliğini sağlamakta ve modüler yapı sayesinde teoriyle uyumlu sonuçlar elde edilmektedir. Makale, 32 elemanlı yatay bir doğrusal dizi ve 8×8 düzlemsel çift polarize dizi yapılandırmalarına ait ölçüm sonuçlarını sunmakta ve bunlar, tam dalga simülasyonları ile karşılaştırılmaktadır. Elde edilen sonuçlar, büyük bant genişliği, düşük VSWR, modülerlik ve yapının basitliği gibi istenen özelliklere sahip bir anten tasarımının başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğini göstermektedir. Ancak, tasarımın sınırlamalarından biri, diğer elektriksel olarak uzun radyatörlere benzer şekilde, D düzlemindeki çapraz polarizasyon performansının zayıf olmasıdır. Bu sorun, dik besleme portlarının bağımsız kontrolüyle giderilebilir. Tasarımın küçük yapılandırmalarda iyi performans göstermesi, bu çalışmanın

daha büyük bir UWB dizi tasarımı araştırmasının bir parçası olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, gelecekte kenar işlemlerinin ve parazitik elemanların eklenmesinin genel performansı artırması beklenmektedir. Çalışma, tam dalga simülasyonlarının, karmaşık eleman tasarımlarına sahip sonlu dizilerin performansını doğru bir şekilde tahmin edebileceğini ve bu simülasyonların büyük dizi sistemlerinin tasarımında önemli bir araç olacağını vurgulamaktadır.

Yılmaz (2023) çalışmasında [41], sivil ve askeri uygulamalarda tercih edilen ultra geniş bantlı, çift kutuplu, tamamen metal Vivaldi anten dizilerinin tasarımını ve üretimini ele almaktadır. Yazarlar, geleneksel yöntemlerin aksine, yüksek tarama kabiliyeti ve yansıma/izolasyon performansı sağlamak amacıyla frezeleme ve tel erezyon işlemlerini ardışık kullanan yenilikçi bir monoblok üretim süreci geliştirmiştir. Geliştirilen anten yapısı, özellikle 70°'ye kadar tüm temel düzlemlerde tarama yapabilme yeteneği ve geniş frekans aralığı ile dikkat çekmektedir. Mekanik toleransların artırılmasıyla, önceki çalışmalarda bildirilen yüksek hata paylarına bağlı performans düşüşlerinin önüne geçilmiş, böylece hem empedans uyumu hem de yönlü performans iyileştirilmiştir. Konferans kapsamında, antenin ölçüm sonuçları ve tam dalga simülasyonlarla karşılaştırmaları da sunulacaktır.

Cuneray, Akçam, Okan ve Arıcan (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada [42], 5G uygulamaları için 28 GHz ve 38 GHz frekans bantlarında çalışan, dört elemanlı ve çift bantlı kompakt bir MIMO anten tasarımı sunulmuştur. Anten tasarımında, hilal biçimli bir yapı kullanılarak hem yüksek kazanç hem de geniş bant hedeflenmiş; Kusurlu Zemin Yapısı (Defected Ground Structure - DGS) teknikleri ve dik yerleşimle elemanlar arası izolasyon artırılmıştır. Anten, simülasyon ve deneysel çalışmalarla doğrulanmış; her iki bantta da başarılı bant genişliği ve kazanç değerleri elde edilmiştir. Ayrıca sistemin Zarf Korelasyon Katsayısı (Envelope Correlation Coefficient - ECC), Çeşitlilik Kazancı (Diversity Gain - DG), Ortalama Etkili Kazanç (Mean Effective Gain - MEG) ve Kanal Kapasite Kaybı (Channel Capacity Loss - CCL) gibi MIMO performans metrikleri açısından da 5G standartlarını karşılayacak düzeyde olduğu belirtilmiştir. Bu yönüyle çalışma, özellikle yüksek hızlı kablosuz iletişim altyapılarında kullanılabilecek etkili bir anten çözümü sunmaktadır.

Bu tez çalışmasında, bir dizi Vivaldi anteni tasarlanarak maliyeti düşürmek, üretim sürecini kolaylaştırmak ve performans açısından verimliliği artırmak amaçlanmıştır. Üç boyutlu

yazıcı kullanılarak yapılacak üretim, tasarımı daha hafif ve ekonomik hale getirirken, aynı zamanda hızlı prototip oluşturma avantajı sunmaktadır. Bu yenilikçi yaklaşım, anten tasarımında geleneksel yöntemlerden bir adım öteye geçerek yeni bir perspektif sunmayı hedeflemektedir. Bu çalışmanın sonuçlarının, özellikle geniş bant iletişim ve radar sistemleri gibi alanlarda yeni ufuklar açması beklenmektedir. Bu tez kapsamında tasarlanan 4 GHz merkez frekanslı Vivaldi dizi anteni, özellikle C-bant frekans aralığında çalışan uygulamalar için optimize edilmiştir. Bu bant aralığı; hava trafik kontrol radarları, bazı uydu haberleşme sistemleri ve çeşitli savunma sistemlerinde aktif olarak kullanılmaktadır. Bu bağlamda geliştirilen anten yapısının, söz konusu uygulamalarda performans iyileştirmesi ve tasarım esnekliği sağlaması hedeflenmiştir.

Bu çalışmada, Vivaldi anten tasarımını optimize etmek ve üretim sürecini yenilikçi hale getirmek için iki temel yöntem üzerinde çalışılmıştır. İlk aşamada, geliştirilen 4 GHz merkez frekanslı Vivaldi dizi antenin elektromanyetik analizi ve performans değerlendirmeleri, yüksek frekanslı uygulamalar için endüstride yaygın olarak kullanılan CST Studio Suite yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. CST Studio Suite, geniş bantlı ve karmaşık anten yapılarına yönelik hassas modelleme, analiz ve optimizasyon olanakları sunan güçlü bir elektromanyetik simülasyon aracıdır.

Anten yapısının üç boyutlu geometrisi CST ortamında detaylı biçimde modellenmiş, fiziksel boyutlar ve malzeme parametreleri dikkatlice tanımlanmıştır. Simülasyon sürecinde, geniş frekans aralığında güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlayan zaman bölgesinde çözümleyici (Time Domain Solver) kullanılmıştır. Bu çözümleyici sayesinde antenin yönelme karakteristikleri, kazanç değeri, bant genişliği ve geri dönüş kaybı (S11) gibi temel performans parametreleri analiz edilmiştir.

Yapılan simülasyonlar, antenin hedeflenen frekansta etkin bir şekilde çalışabileceğini öngörmüş ve fiziksel prototip üretimi öncesi tasarımın doğrulanmasına olanak tanımıştır. Ayrıca, CST ortamında elde edilen sonuçlar, üretim sonrası gerçekleştirilen deneysel ölçümlerle karşılaştırılarak tasarımın güvenilirliği açısından da temel teşkil etmiştir.

Simülasyon aşamasından sonra prototip üretimi üç boyutlu yazıcı ile gerçekleştirilmiştir. Üç boyutlu yazıcı, maliyeti düşürmenin yanı sıra, hafif ve ergonomik bir anten üretimi sağlamak

amacıyla kullanılmıştır. Bu yaklaşımın bir diğer avantajı, tasarım üzerinde hızlı değişiklikler yaparak sonuçları kısa sürede test edebilme imkânı sunmasıdır.

Bu tez kapsamında tasarlanan ve fiziksel olarak üretilen 4 GHz Vivaldi dizi anten, hem kullanılan yöntem hem de elde edilen sonuçlar itibarıyla literatürdeki benzer çalışmalardan farklılaşmaktadır. Antenin 3 boyutlu yazıcı teknolojisiyle, PLA hammaddesi kullanılarak üretilmiş olması; karmaşık geometrilere sahip, geniş bantlı anten yapılarının düşük maliyetli ve hızlı bir şekilde üretilebileceğini göstermektedir. Yüzey iletkenliğini sağlamak amacıyla uygulanan gümüş bazlı boya tekniği ise, özellikle geleneksel metal üretim süreçlerine alternatif arayan araştırmalar için pratik bir çözüm sunmaktadır. Bu tezde amaçlanan anten tasarımı radar, savunma sistemleri ve kablosuz haberleşme gibi geniş bantlı ve yönlü antenlerin kritik rol oynadığı uygulamalar hedeflenmiştir. Ölçümler, temiz oda koşullarında gerçekleştirilmiş ve simülasyon sonuçlarıyla örtüşen çıktılar elde edilmiştir. Bu sayede, hem akademik hem de endüstriyel çalışmalar için üretilebilirliği, maliyet etkinliği ve performansı bir araya getiren özgün bir örnek ortaya konmuştur. Bu çalışma, özellikle prototipleme sürecinde zaman ve kaynak tasarrufu sağlamak isteyen araştırmacılar için ilham verici bir yaklaşım sunmaktadır.

2. ANTEN TEORİSİ

Kablosuz iletişim sistemlerinde antenin tasarımı oldukça önemlidir, çünkü iyi bir anten tasarımı, sistem gereksinimlerini karşılamaya yardımcı olur ve genel sistem performansını artırır. Örneğin, TV (televizyon) yayınlarının kalitesi yüksek performanslı antenlerle iyileştirilebilir. Anten, elektromanyetik dalgaları yaymak veya almak için tasarlanmış bir bileşendir. İletim modunda, iletim hattındaki yönlendirilmiş dalgaları serbest uzay dalgalarına, alıcı modunda ise serbest uzay dalgalarını yönlendirilmiş dalgalara dönüştürür. Modern kablosuz sistemlerde antenler, enerji iletimini veya alımını optimize etmek amacıyla yönlendirme fonksiyonu da üstlenir. Anten, bir iletişim sisteminde gözlükler ve gözler gibi bir rol oynar, yani iletişimin sağlanmasına yardımcı olur [31]. Elektriksel iletişim sistemlerinin temel bileşenlerinden biri antenlerdir. Antenler, serbest alan ile verici veya alıcı arasındaki bağlantıyı sağlar ve RF sinyallerini elektromanyetik dalgalara dönüştürürken, aynı zamanda elektromanyetik dalgaları elektriksel sinyallere dönüştürmek için de kullanılır. Bu cihazlar, kablosuz iletişimde elektromanyetik dalga sinyalleri aracılığıyla bilgi iletimi için tasarlanmıştır. Antenlerin verimliliği, radyasyon direnciyle doğrudan ilişkilidir; yüksek radyasyon direncine sahip antenler daha verimli olur. Antenler, radyo, televizyon, uydu iletişimi ve hücresel sistemler gibi farklı alanlarda önemli bir rol oynar. İletişim gereksinimlerine göre antenler, ses, video veya grafik biçiminde bilgi iletimi için kullanılır ve bu kullanım zamanla gelişen ihtiyaçlara göre şekillenir. Farklı uygulamalar için özel olarak tasarlanmış antenler, belirli sistemlerin özelliklerine göre özelleştirilir. Örneğin, bazı antenler yüksek yönelticilik gerektiren sistemlerde kullanılırken, diğerleri daha geniş bir alanı kapsayacak şekilde tasarlanır. Ayrıca, bazı sistemlerde antenlerin artan kazanç ve empedans özellikleri, nokta noktaya iletişim için kritik olabilir. Bu bağlamda, antenlerin özellikleri ve kullanım alanları hakkında daha fazla bilgi sahibi olmak, bu sistemlerin etkinliğini artırmada önemlidir [32].

Bir antenin ışınım diyagramının analiz edilebilir bir hale gelmesi için antenin yeterli mesafeye yerleştirilmiş olması önemlidir. Antenin yakın alan ve uzak alan bölgesi mevcuttur ve yakın alanda elektromanyetik alan henüz kararlı değildir, ölçümler güvenilir değildir. Uzak alan bölgesinde ise kararlı yapıda ve nettir.

2.1. Vivaldi Anten

Vivaldi anten bir tür konik açıklı antendir ve yönlü kazanca sahip olup geniş bant performansı için tasarlanır. Vivaldi antenler üstel olarak konik bir açıklığa sahiptir, bu da geniş bir frekans aralığında etkili yayılım oluşmasını ve pürüzsüz empedans geçişi sağlar. Anten, besleme noktasından konik açıklığa doğru yürüyen dalga modunda çalışması ile de yansımayı en aza indirerek bant genişliğini artırır. Standart PCB teknolojisi kullanılarak üretilmesi kolaydır ve bu da onu etkin maliyetli ve yüksek frekanslı uygulamalar için uygun hale getirir. Vivaldi antenler, geniş bantta yayılım (propagasyon) olanağı ve yüksek kazançları ön plana çıkarak yer altı radarı, yön bulma, mikrodalga görüntüleme ve milimetre dalga sistemlerinde tercih edilmektedirler [31,34-35].

2.2. Vivaldi Anten Çalışma Prensibi

Vivaldi anten yürüyen dalga anten sınıfına aittir ve boyuna ışımaya sahiptir. Antenin radyasyon prensibi, uzunluğu boyunca kademeli olarak konik bir şekilde genişleyen ağız tarafına doğru yayılmasına dayanır [37].

Vivaldi anten açıklık denklemi Eş. (2.1)'deki gibidir [31].

$$y(x) = \pm c\, e^{\{\alpha x\}} \tag{2.1}$$

Bu denklem, klasik Vivaldi antenlerin açıklık yapısını tanımlar. Açıklığın eksponansiyel olarak genişlemesi, empedans uyumu ve geniş bant performansı sağlar.

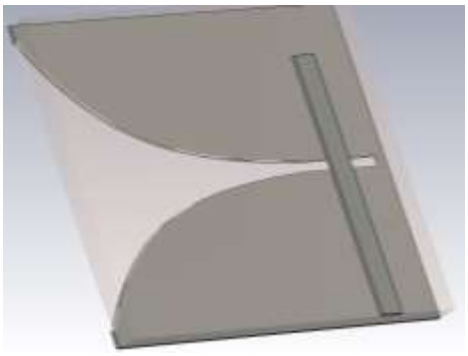
Eş. (2.2)'de verilen dizi faktörü formülü, N elemanlı doğrusal bir anten dizisinin yönelimini hesaplar. Burada, elemanlar arası mesafe; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ dir [31].

$$AF(\theta) = \sum_{n=1}^{N} a_n e^{jkd(n-1)\cos\theta} \tag{2.2}$$

2.3. Yama Vivaldi Anten

Yama Vivaldi Anteni, hem mikroşerit hem de Vivaldi antenin özelliklerini içeren kompakt, UWB ve uçtan uca yayılım özellikleriyle birleştirmeyi amaçlayan bir hibrit tasarımdır (Şekil 2.1). Bu anten tipik olarak mikroşerit beslemeli konik bir yuva hattından oluşur, geniş bant

ışımasına (radyasyonuna) izin veren Vivaldi'nin üstel konikliği ve yama elemanı ise empedans uyumunu ve bant genişliği performansını artırmak için bir besleme geçişi veya parazitik bir yapı görevini görür [38].



Şekil 2.1. Yama Vivaldi anteni

Yama Vivaldi konfigürasyonundaki mikroşerit hattından Vivaldi konik hattına bir geçiş yer alır. Mikroşerit hat taban yama vivaldinin alt katmanında iletken halde bulunurken, üst katmanında konik Vivaldi ve slotline bulunur. Mikroşerit hat, dalga boyunun dörtte biri kadar açıklık çizgisini geçecek şekilde uzanır [39].

2.4. Konnektör Seçimi

Anten tasarımında kullanılan konnektörler, antenin performansını doğrudan etkileyen önemli bileşenlerdir. Özellikle yüksek frekanslı uygulamalarda, sinyal iletiminin verimli ve doğru bir şekilde yapılabilmesi için uygun konnektörlerin seçilmesi gerekir. Anten tasarımında empedans uyumu, sinyal kaybını en aza indirmek ve güç iletimini verimli hale getirmek için kritik bir rol oynar. Antenin besleme hattı ile uyumlu olması, özellikle geniş bantlı antenlerde önemlidir. Kullanılacak olan konnektörler, antenin giriş empedansını besleme hattının empedansı ile uyumlu hale getirerek, yansıma kayıplarını minimuma indirir ve antenin performansını artırır.

Anten tasarımında sıkça kullanılan konnektör tiplerinden biri SMA konnektörleridir. SMA konnektörleri, yüksek frekanslı sinyallerin iletilmesinde düşük kayıplar sağlar. Bu durum özellikle radar sistemleri, iletişim cihazları ve uydu antenleri gibi uygulamalarda kritik öneme sahiptir. Bu konnektörlerin frekans yanıtı, yüksek frekanslı sinyallerde bile minimum kayıp ile iletim sağlar, bu da antenin genel verimliliğini doğrudan etkiler. Anten tasarımında

kullanılan konnektörlerin, çevresel faktörlere ve titreşime karşı dayanıklı olması, uzun ömürlü ve güvenilir performans sağlamaları açısından çok önemlidir. SMA konnektörleri, mekanik açıdan oldukça sağlam bir yapıya sahiptir ve zorlu koşullarda dahi yüksek performans gösterirler. Ayrıca, bu konnektörlerin montajı son derece kolaydır, bu da tasarım sürecinde zaman tasarrufu sağlar ve hatalı montajı engeller. Bu özellikleri, özellikle prototip aşamasında olan tasarımlar için büyük bir avantaj sunar. SMA konnektörlerinin bir diğer avantajı, antenin besleme hattı ile kolayca entegre olabilmesidir. Bu konnektörler, mikroşerit hatlar ve koaksiyel kablolarla uyumlu olup, antenin elektriksel özelliklerine zarar vermeden doğru bir bağlantı sağlarlar. Besleme hattı ile doğru entegrasyon, antenin verimli çalışabilmesi için kritik öneme sahiptir. SMA konnektörleri, özellikle iletişim, radar, Küresel Konumlama Sistemi (Global Positioning System - GPS)'leri gibi yüksek frekanslı ve güvenilir bağlantı gerektiren uygulamalarda kullanılırlar. Bu konnektörlerin sağladığı güvenilir bağlantılar, antenlerin çok çeşitli uygulamalarda yüksek performans göstermesini mümkün kılar. Bu durum, antenin verimli ve doğru bir şekilde sinyal iletmesi ve alması için gereklidir. Örneğin, radar sistemlerinde, sinyalin doğru bir şekilde iletilmesi için kullanılan SMA konnektörleri, tasarımcıların daha hassas ve güvenilir antenler üretmesine yardımcı olur.

2.5. Üretim Hammaddesi Seçimi

PLA, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen biyobozunur bir termoplastiktir. Bu yönüyle çevre dostu bir alternatif sunmasının yanı sıra, düşük baskı sıcaklığı (200–220°C) ve ısıtmalı tabla gerektirmemesi gibi özellikleriyle kullanıcı dostu bir malzemedir. Özellikle düşük büzülme oranı ve minimum deformasyon eğilimi, anten gibi geometrik hassasiyetin kritik olduğu yapılar için PLA'yı cazip hale getirmektedir [36].

Elektromanyetik uygulamalar açısından değerlendirildiğinde, PLA'nın düşük dielektrik kayıpları sunması ve stabil yapısıyla radyo frekanslı sistemlerde uygun bir yalıtkan ortam sağlaması mümkündür. Bu, anten performansını doğrudan etkileyen bir faktördür. ABS ise daha yüksek mekanik dayanıklılığa sahip olmakla birlikte, baskı sürecinde daha fazla deformasyon eğilimi gösterir ve yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyar. Ayrıca, ABS'nin baskı sırasında ortaya çıkardığı uçucu organik bileşikler nedeniyle sağlık açısından daha dikkatli bir kullanım gerektirir [36].

PLA’nın bir diğer önemli avantajı, estetik açıdan kaliteli baskı sonuçları vermesi ve geniş renk skalasında sunulmasıdır. Anten tasarımında görsel prototipleme yapılırken bu özellikler kullanıcıya esneklik sağlar. Buna karşın, PLA’nın darbe dayanımı ve esneklik açısından sınırlı olması, özellikle dış ortam koşullarında ya da mekanik stres altında çalışan antenler için bir dezavantaj olabilir [36].

Sonuç olarak, PLA; kolay işlenebilirliği, düşük termal ve geometrik bozulma riski, elektromanyetik uyumluluğu ve çevresel sürdürülebilirliği ile anten üretiminde ABS’ye kıyasla güçlü bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Ancak malzeme seçimi, antenin kullanım alanı ve maruz kalacağı çevresel koşullar göz önünde bulundurularak yapılmalıdır.

2.6. Simülasyon Programları

HFSS ve CST Studio Suite, elektromanyetik simülasyon alanında sıklıkla karşımıza çıkan simülasyon programlarıdır. Her ikisi de anten tasarımı ve analizinde farklı avantajlar sunar. HFSS, sonlu elemanlar yöntemi (Finite Element Method - FEM) tabanlıdır ve özellikle dar bantlı ve yüksek frekanslı uygulamalarda yüksek doğruluk sağlar. Bu nedenle, rezonans etkilerinin önemli olduğu karmaşık geometrilerde tercih edilir. CST Studio Suite, zaman ve frekans alanı çözücülerine sahip olup, geniş bantlı uygulamalarda daha hızlı simülasyon süreleri sunar. Kullanıcı dostu arayüzü ve çoklu fiziksel analiz yetenekleriyle dikkat çeker. Bu iki yazılımın karşılaştırıldığı bir çalışmada, HFSS'in dar bantlı uygulamalarda daha doğru sonuçlar verdiği, CST'nin ise geniş bantlı uygulamalarda daha hızlı simülasyonlar gerçekleştirdiği görülmüştür [39].

Sonuç olarak, yazılım seçimi, tasarımın frekans bandı, doğruluk gereksinimleri ve simülasyon süresi gibi faktörlere bağlıdır. Her iki yazılım da kendi alanlarında güçlü araçlar sunar ve spesifik uygulama ihtiyaçlarına göre tercih edilmelidir.

3. TASARIM SÜRECİ

Bu tez çalışmasında, Vivaldi anten CST Studio Suite programı kullanılarak tasarlanmıştır. CST Studio ortamında antenin elektromanyetik davranışlarının gerekli analizini yapılarak, tasarım sürecinde ihtiyaç duyulan optimizasyonların gerçekleştirilmesi sağlanmıştır.

Anten tasarımında kullanılan konnektörler, antenin performansını doğrudan etkileyen önemli bileşenlerdir. Özellikle yüksek frekanslı uygulamalarda, sinyal iletiminin verimli ve doğru bir şekilde yapılabilmesi için uygun konnektörlerin seçilmesi gerekir. Bu tasarımda HUBER+SUHNER marka SMA-50-0-13/111_N üretici tip numarasına sahip koaksiyel konnektör kullanılmıştır. (Resim 3.1) Bu bağlamda, SMA-50-0-13/111_N konnektörü, 50 ohm empedans değerine sahip, kompakt ve dayanıklı yapısı ile anten tasarımlarında kullanılan bir bağlantı elemanıdır. Yüksek frekanslı performansı, kolay montajı ve dayanıklılığı sebebiyle tercih edilmiştir.

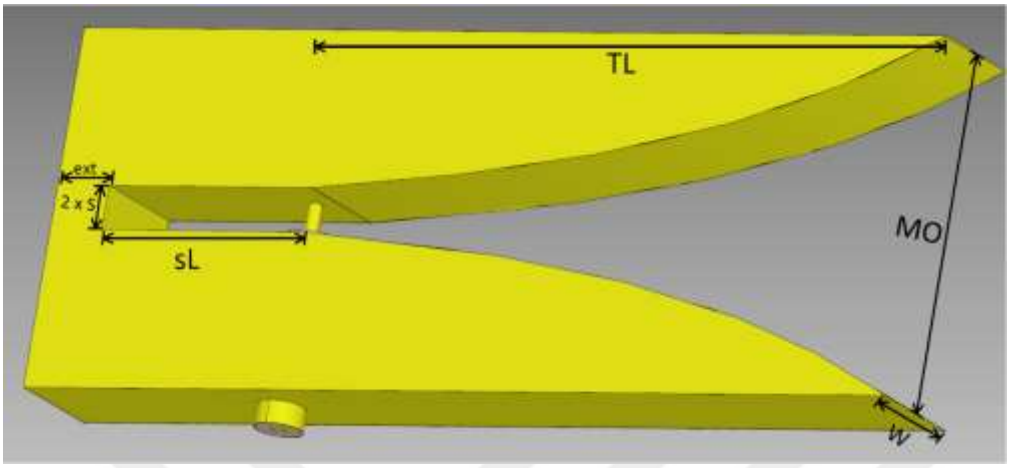


Resim 3.1. Kullanılan SMA-50-0-13/111_N konnektörü

3.1. Tekli Vivaldi Anteni Tasarımı

Tasarım aşamasına öncelikle tekli Vivaldi anteni tasarımı yapılarak başlanmış ve istenen frekansta minimum yansıma kaybını (S11) sağlamak amacıyla optimizasyon çalışmaları

yapılmıştır. (Şekil 3.1) İstenen sonuca tekli Vivaldi anteni çalışmasında ulaşıldıktan sonra dizi Vivaldi anteni tasarımına geçiş yapılmıştır.



Şekil 3.1. Tekli Vivaldi anteni tasarım görseli

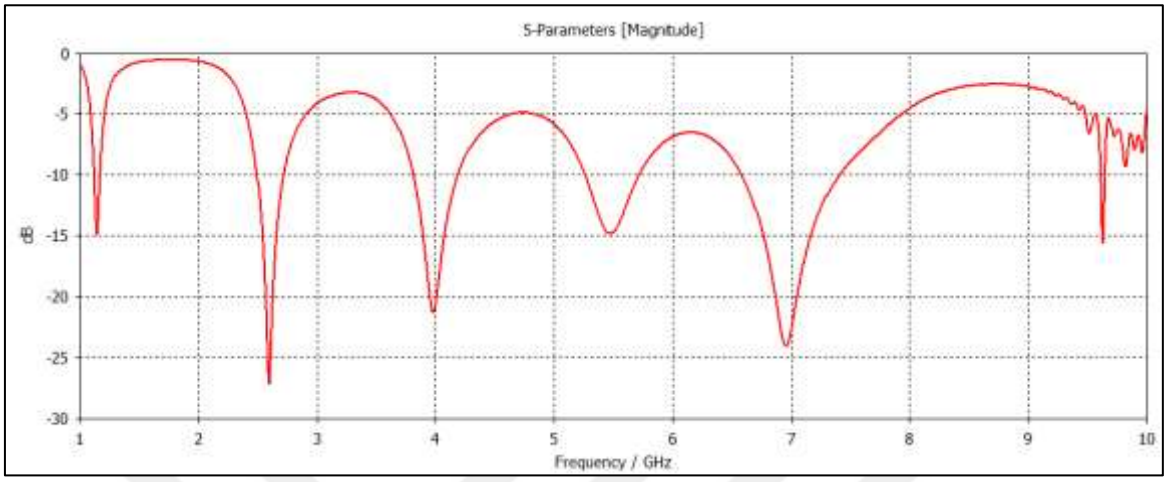
Tasarımı ve optimizasyonu yapılan tekli Vivaldi anteninin parametreleri Çizelge 3.1'de yer almaktadır.

Çizelge 3.1. Tekli Vivaldi anteni tasarım parametreleri

Parametre Tanımı	Parametre Adı	Değer (mm)
Düz Yarık Hat Genişliği	s	2
Düz Yarık Hat Uzunluğu	sL	20
Koniklik Oranı	r	$3{,}44x10^{-2}$
Konik Uzunluğu	TL	60
Ağız Açıklığı	MO	31.60
Kenar Boşluğu	ext	5
Profil Kalınlığı	w	10
Konnektör İç İletken Yarıçapı	Coax Core Radius	0,63
Konnektör Dış Yarıçapı	Coax Outer Radius	2,04

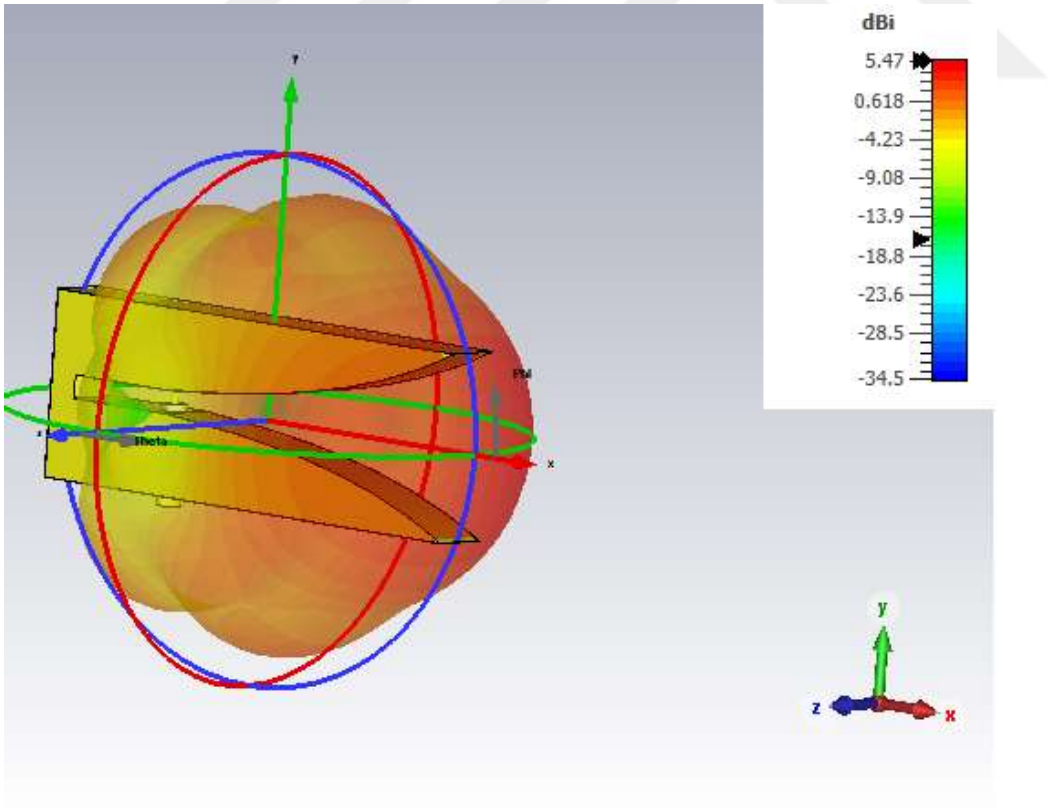
Tasarım programına üretim aşamasında 3 boyutlu yazıcıda kullanılacak hammadde olan PLA maddesinin özelliklerine göre tanımlama yapılmıştır. Kuzmanic, Vujovic, Petkovic ve Soda'nın yaptığı çalışmalara göre PLA malzemesinin dielektrik sabiti 1,7778 ile 2,8141 arasında değişmektedir [33]. Tasarımda PLA malzemesinin dielektrik sabiti 2,5 alınmıştır. Tasarımda 50 Ω empedansa sahip koaksiyel SMA konnektör kullanılmıştır.

Tasarlanan tekli Vivaldi antenin S11 parametresi Şekil 3.2'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere anten üç farklı bantta çalışmaktadır.



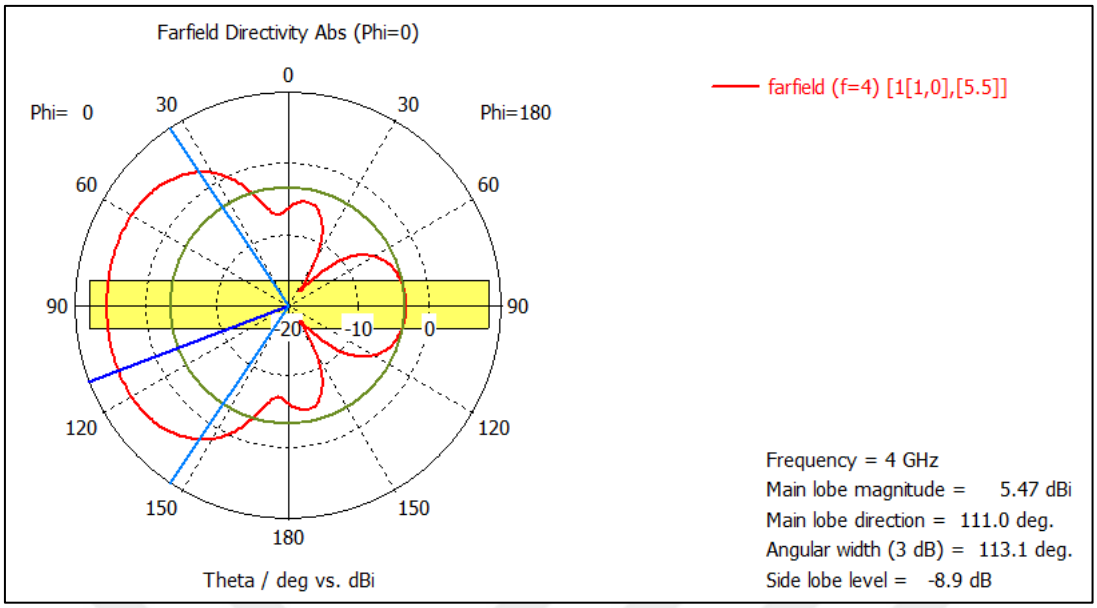
Şekil 3.2. Tekli Vivaldi anten tasarımı S11 parametresi

Tasarlanan tekli Vivaldi antenin 3 boyutlu ışıma örüntüsü Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Tekli Vivaldi tasarımı ışıma örüntüsü (4 GHz)

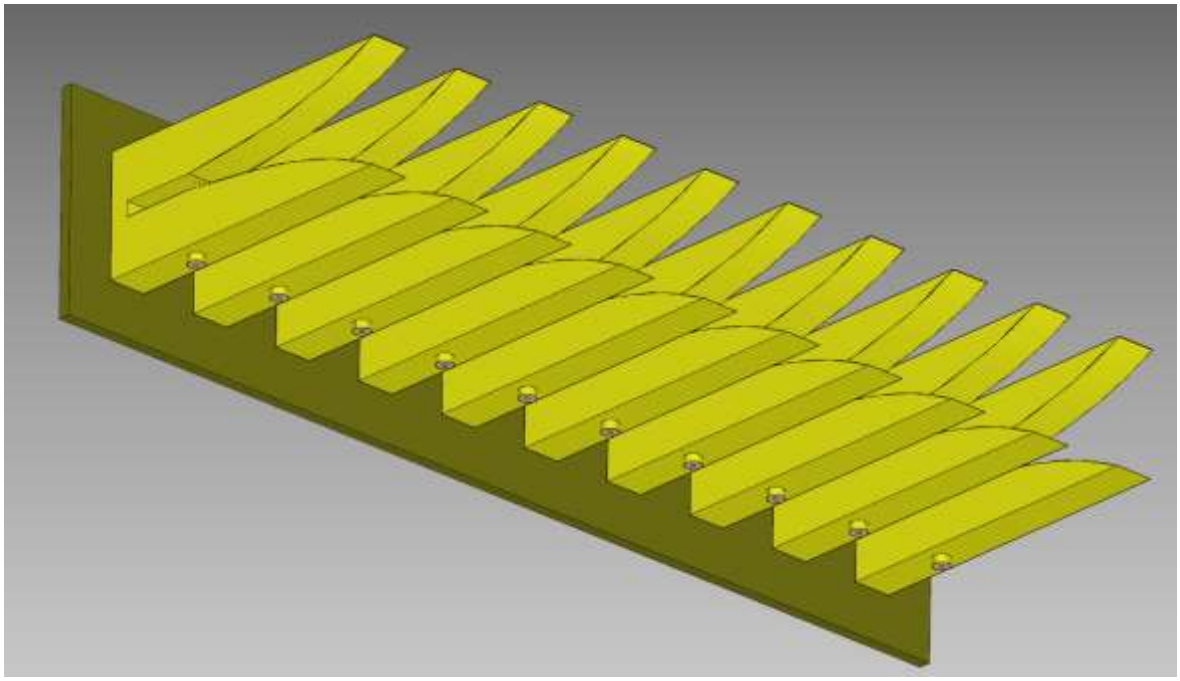
Tasarlanan tekli Vivaldi antenin 2 boyutlu ışıma örüntüsü Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Tekli Vivaldi tasarımı ışıma örüntüsü (2 boyutlu)

3.2. 10 Elemanlı Dizi Vivaldi Tasarımı

Tekli Vivaldi tasarımı tamamlandıktan sonra 10 elemanlı dizi Vivaldi tasarımına geçilmiştir. 10 elemanlı tasarlanan dizi Vivaldi anten Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



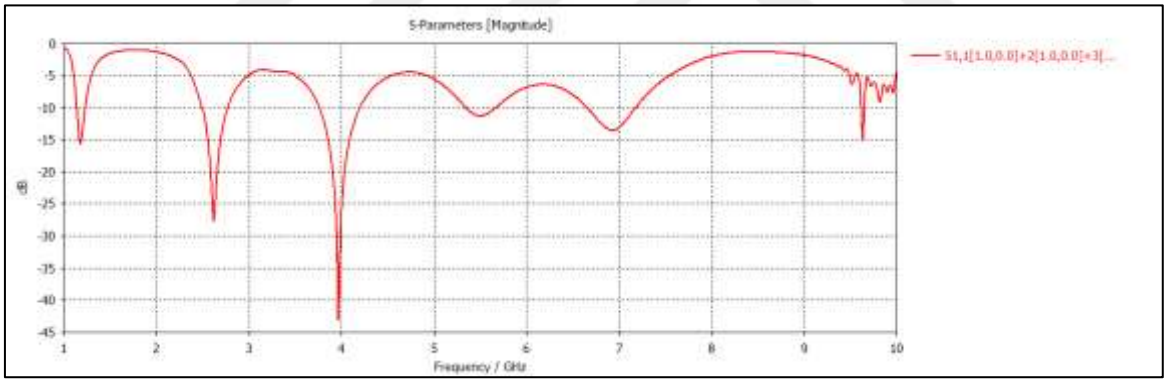
Şekil 3.5. 10 elemanlı dizi Vivaldi anten tasarımı

10 elemanlı dizi Vivaldi anten tasarımında anten aralıkları 25 mm olarak belirlenmiştir. Burada bu belirlemelerde anten üretiminde kullanılacak üç boyutlu yazıcının imkanları göz önünde bulundurulmuştur. Bu ürünün üretiminde kullanılacak üç boyutlu yazıcının üretim sınırlaması 30 cm x 30 cm'dir. Anten tasarlanırken bu ölçüler dikkate alınarak tasarım yapılmıştır.

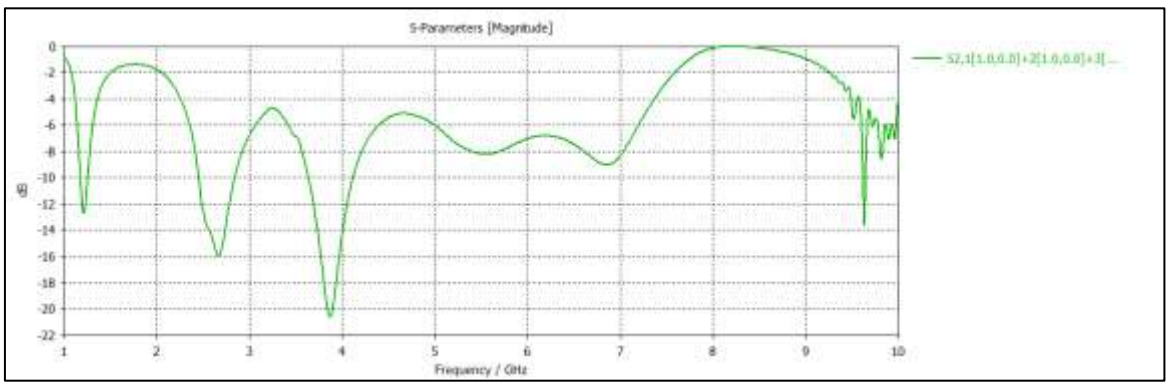
Antenin yaklaşık dalga boyunun 5 katı mesafede yer aldığı noktada anten stabil ve kararlı bir ışınım diyagramına sahip olacağından 5 λ mesafesi dikkate alınarak birimler arası boşluk λ/2 olacak şekilde 10 elemanlı bir dizi planlanmıştır.

Toprak yüzeyinin artırılması için dizi antenin alt tablasının boyu kenarlarından λ/4 uzunluğunda genişletilmiştir.

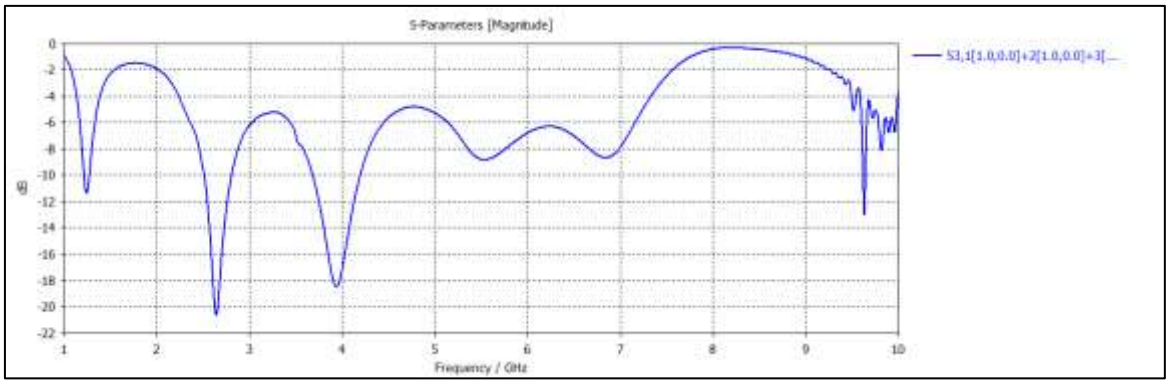
Portların her birinin CST Studio simülasyonunda alınan S11 parametreleri Şekil 3.6 - Şekil 3.15'de görülmektedir.



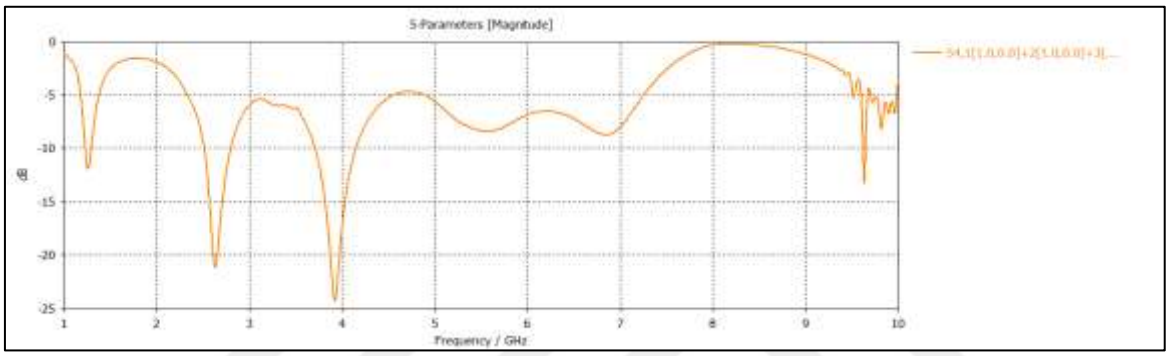
Şekil 3.6. 10 elemanlı dizi anten - 1.port için S11 parametresi



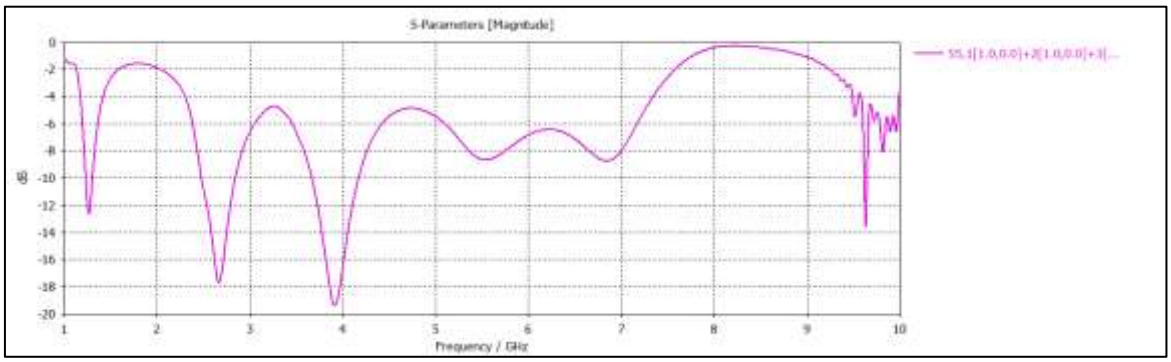
Şekil 3.7. 10 elemanlı dizi anten - 2.port için S11 parametresi



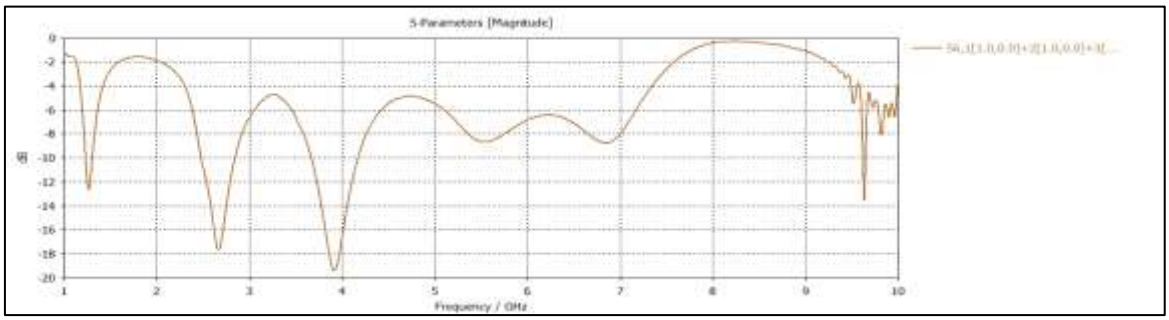
Şekil 3.8. 10 elemanlı dizi anten - 3.port için S11 parametresi



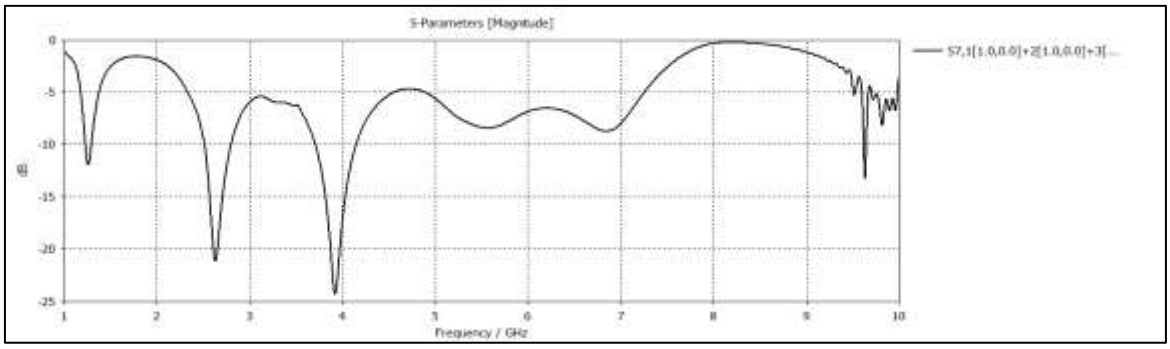
Şekil 3.9. 10 elemanlı dizi anten - 4.port için S11 parametresi



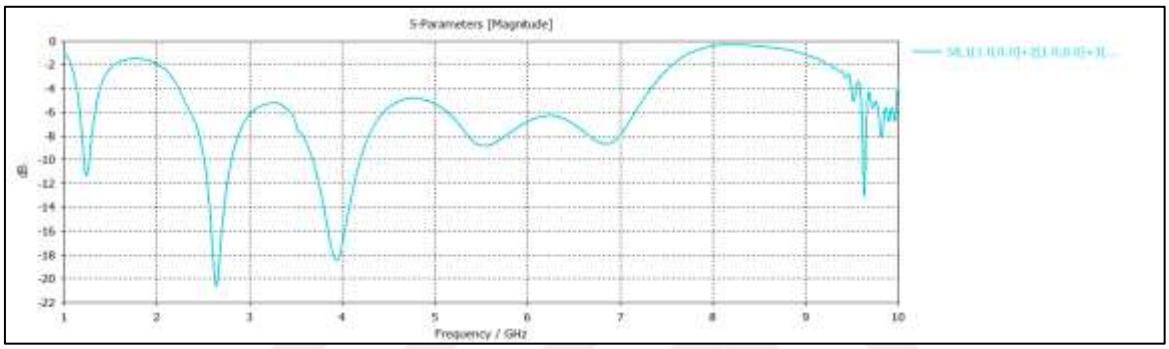
Şekil 3.10. 10 elemanlı dizi anten - 5.port için S11 parametresi



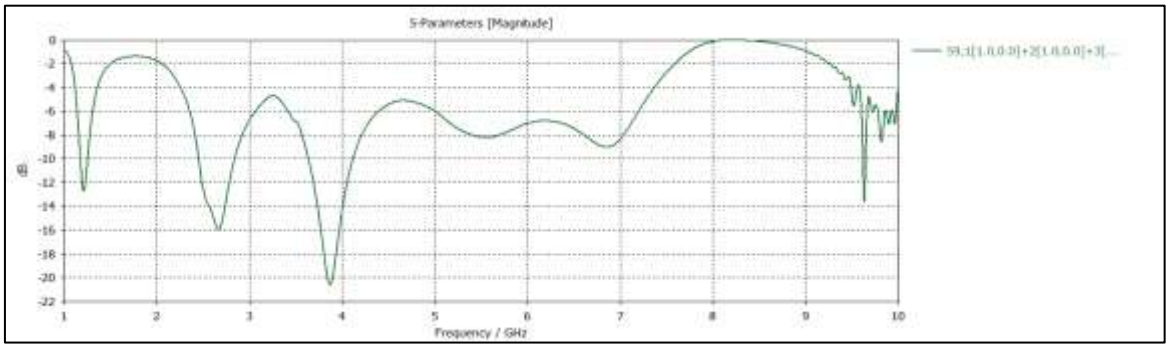
Şekil 3.11. 10 elemanlı dizi anten - 6.port için S11 parametresi



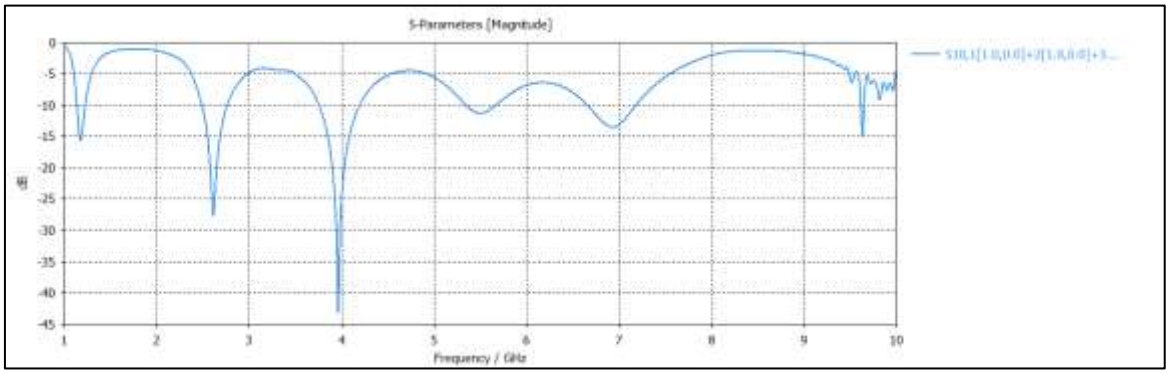
Şekil 3.12. 10 elemanlı dizi anten - 7.port için S11 parametresi



Şekil 3.13. 10 elemanlı dizi anten - 8.port için S11 parametresi



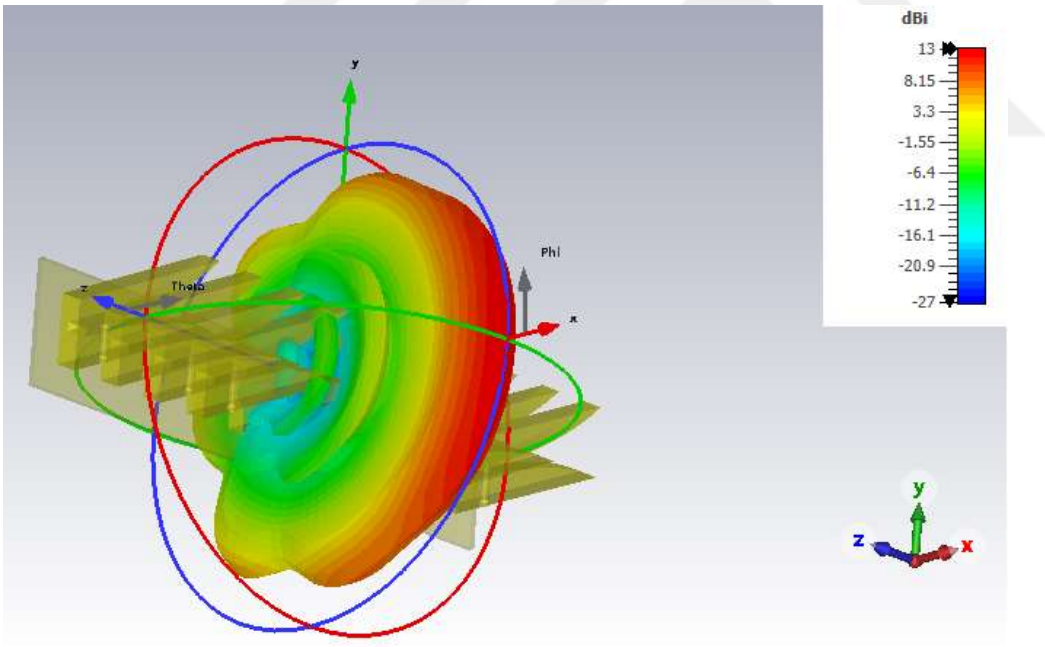
Şekil 3.14. 10 elemanlı dizi anten - 9.port için S11 parametresi



Şekil 3.15. 10 elemanlı dizi anten - 10.port için S11 parametresi

Tasarımı gerçekleştirilen 10 elemanlı dizi Vivaldi anten yapısı, elektromanyetik simülasyon ortamında detaylı şekilde analiz edilmiştir. Her bir port ayrı ayrı uyarılarak elde edilen S-parametre sonuçları incelendiğinde, tüm anten elemanlarının benzer performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Şekil 3.6 - Şekil 3.15'te gösterilen yansıma katsayısı (|S11|) grafiğinde, antenin geniş bantlı bir davranış sergilediği ve 1 GHz ile 10 GHz aralığında çoklu frekans noktalarında -10 dB altında çalıştığı görülmektedir. Özellikle 2,6 GHz ve 4 GHz civarlarında derin rezonans noktaları tespit edilmiştir. Tüm portlardan elde edilen sonuçların büyük oranda örtüşmesi, anten elemanlarının eş performanslı ve tasarıma uygun çalıştığını doğrulamaktadır. Bu simülasyon sonuçları, anten dizisinin geniş bantta iyi bir empedans uyumu sağladığını ve çok elemanlı yapıdaki elektromanyetik bütünlüğün başarıyla sağlandığını ortaya koymaktadır.

Simülasyonda da görülen ışıma örüntüsüne göre tasarlanan antenin yönü 90°'dir. (Şekil 3.16)

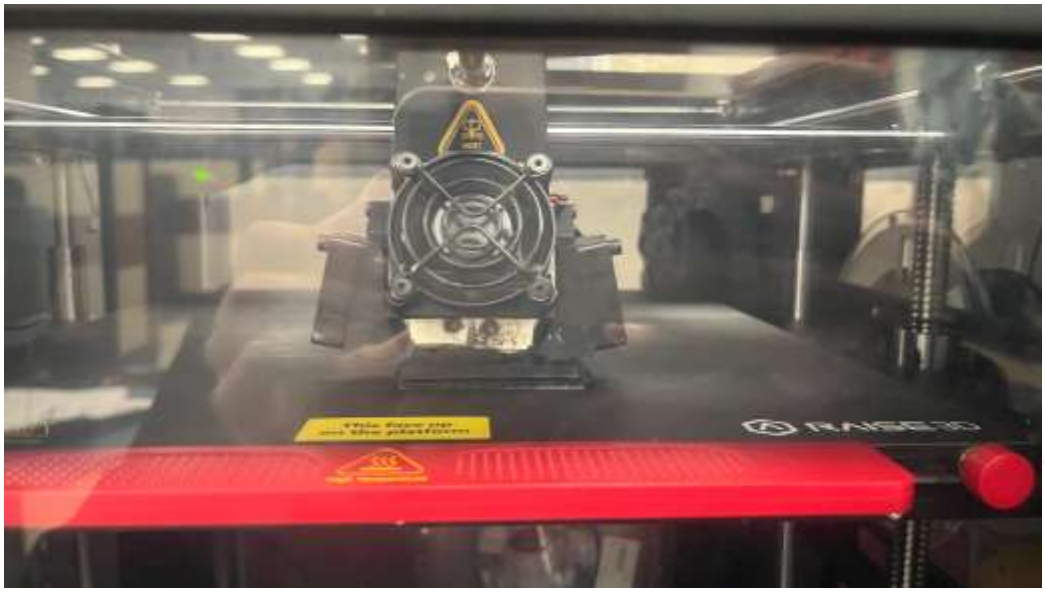


Şekil 3.16. 10 elemanlı dizi anten - ışıma örüntüsü (4 GHz)

4. ANTEN ÜRETİMİ, ÖLÇÜMÜ VE ANALİZİ

4.1. Anten Üretim Süreci

Simülasyon programında tasarlanmış olan 10 elemanlı dizi Vivaldi anteni, Raise3D marka ve Pro 2 modeline sahip 3 boyutlu yazıcıda üretilmiştir. Üretim malzemesi olarak PLA maddesi kullanılmıştır. Anten 100% oranında dolulukla basılmış olup hassasiyet oranı 0,1'dir. Yazıcıdaki üretim 55 saat sürmüştür (Resim 4.1, Resim 4.2).



Resim 4.1. 3 boyutlu yazıcıda antenin üretilmesi



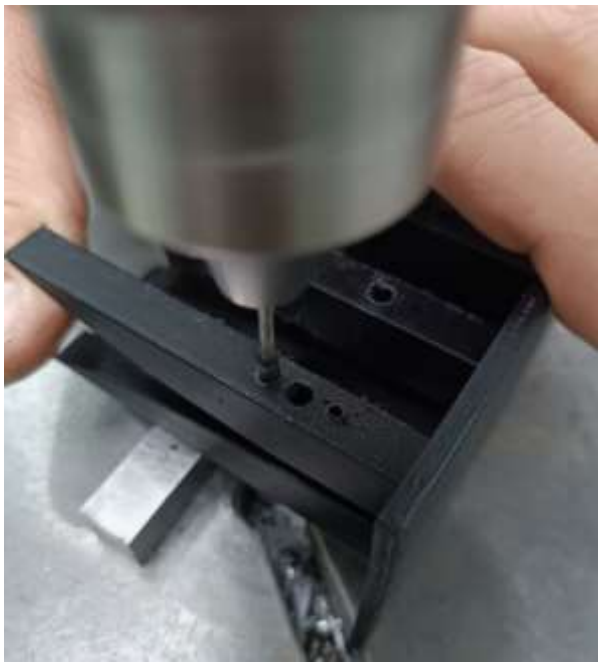
Resim 4.2. 3 boyutlu yazıcıda üretilen anten kısmı

Üç boyutlu yazıcıda üretim tamamlandıktan sonra deliklerde kalan yazıcı hammaddelerinin temizliği 4.1'lik matkap ile yapılmıştır (Resim 4.3).



Resim 4.3. Matkap ile deliklerin yüzey temizliğinin yapılması

Tasarımda kullanılacak SMA konnektörünün vidaları için delme işlemi gerçekleştirilmiştir (Resim 4.4).



Resim 4.4. Vida bağlantı deliklerinin delinmesi

Kullanılacak konnektörün vidalanması işleminde vidaların sağlam şekilde montajının sağlanabilmesi için helicoil çekilme işlemi yapılmıştır (Resim 4.5, Resim 4.6).

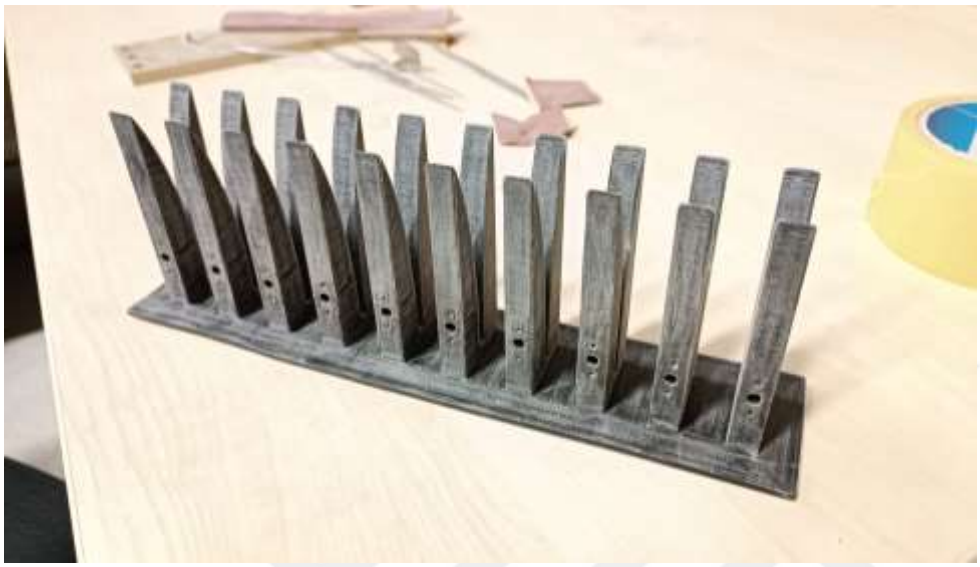


Resim 4.5. Vida bağlantı yerlerine helicoil çekilmesi



Resim 4.6.Helicoil işlemi sonrası

Boyama öncesi boyanın daha iyi tutunmasını sağlamak, düzgün olmayan yüzey pürüzlerinden kurtulmak ve düzgün şekilde yüzey pürüzlüğünü artırmak amacıyla 400 numara zımpara ile zımpara yapılmıştır (Resim 4.7).



Resim 4.7. Zımpara işlemi sonrası

İletken boya ile boyama öncesi deliklere boya gelmesini önlemek amacıyla maskeleme işlemi yapılmıştır ve ürün alkol ile temizlenmiştir (Resim 4.8).

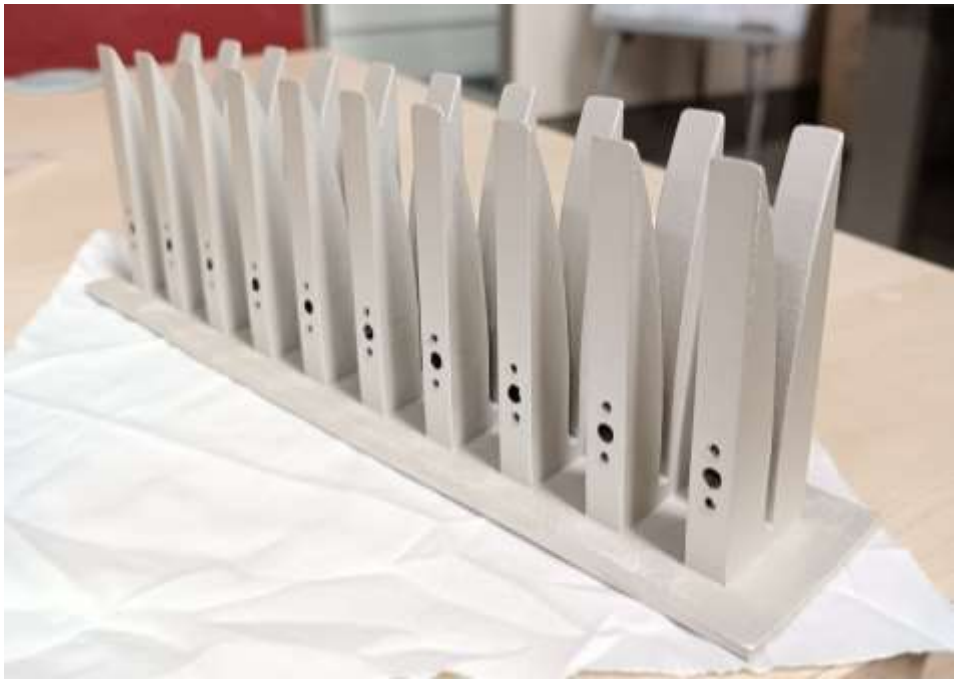


Resim 4.8. Maskeleme işlemi ve alkol ile temizlik işlemi

Tasarlanan ürün iletken gümüş boya ile boyanmıştır. Kullanılan boya Loctite Edag 1415M E&C'dir. Bu boyanın özelliği doğa şartlarına maruz kaldıktan sonra düşük direnci korumasıdır. Astar veya son kat gerektirmez. Sprey ya da fırça kullanılarak kolayca uygulanır. Boya sonrası deliklerin maskeleri çıkarılmıştır (Resim 4.9, Resim 4.10).



Resim 4.9. Boya sonrası maskelerin çıkarılması



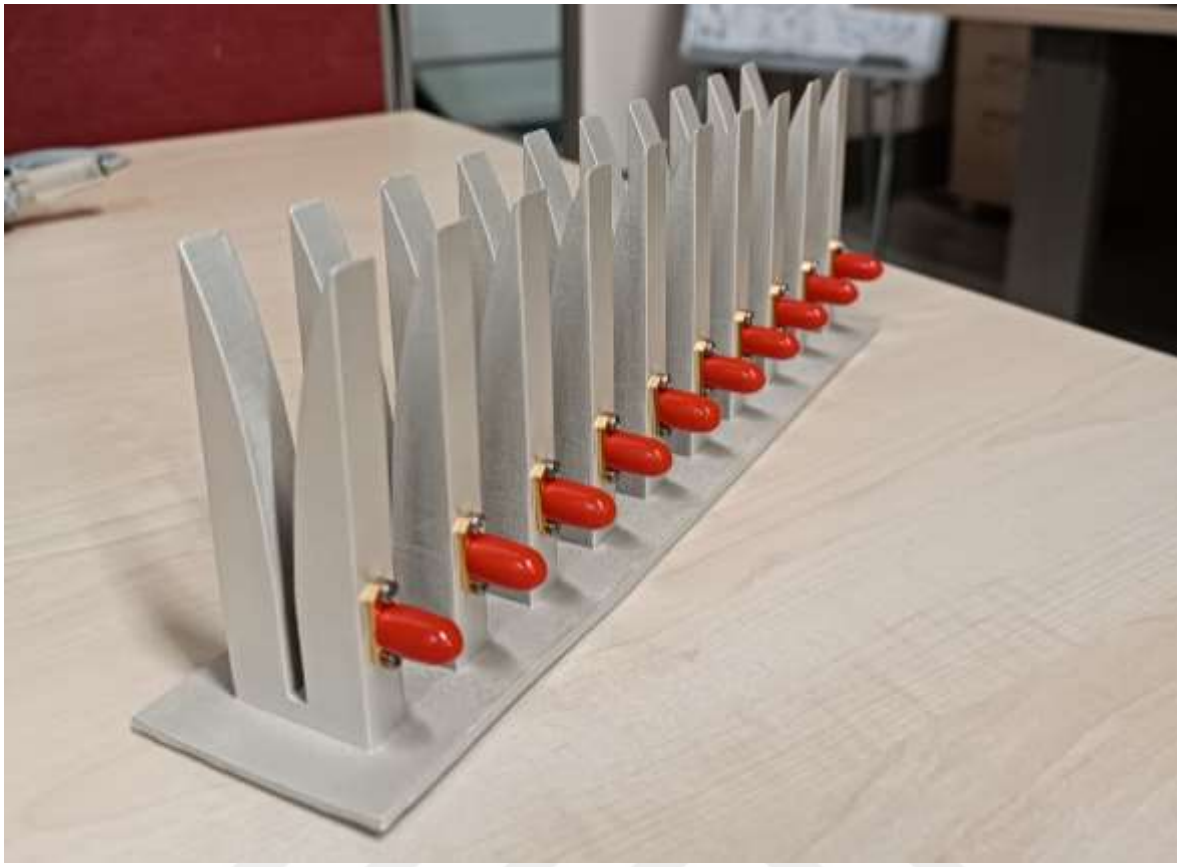
Resim 4.10. Boya sonrası maskelerin çıkarılması

Boyama sonrası konnektörler takılıp vida bağlantıları yapıldı. Bu konnektör modelinin kullanılmasının en önemli sebeplerinden olan uzunluğunun yardımıyla konnektör pininin anten içerisinde yer alan boşluktan antenin karşı tarafına temasına özellikle dikkat edilmiştir (Resim 4.11).



Resim 4.11. Konnektörlerin montajı

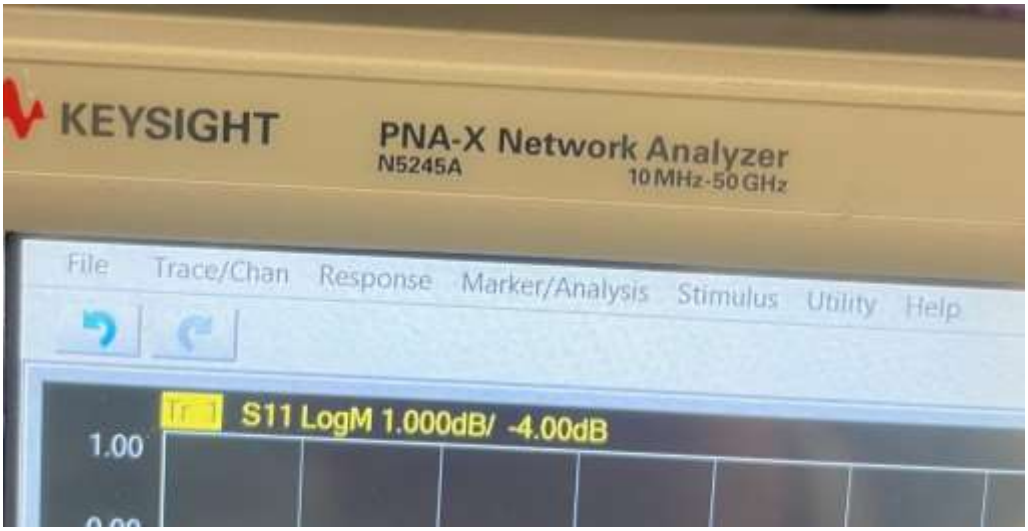
Konnektör montajı sonrası konnektörlerin sağlıklı kalması amacıyla konnektör koruma kapakları takılmıştır (Resim 4.12).



Resim 4.12. Konnektör koruma kapakları takılması

4.2. Ölçüm Sonuçları

Üretilen anten temiz oda koşullarında KEYSIGHT marka ve PNA-X N5245A modeline sahip bir Network Analizör ile ölçülmüştür. İlgili Network Analizör 10 MHz ile 50 GHz arasında ölçüm yapabilme kabiliyetine sahiptir (Resim 4.13).



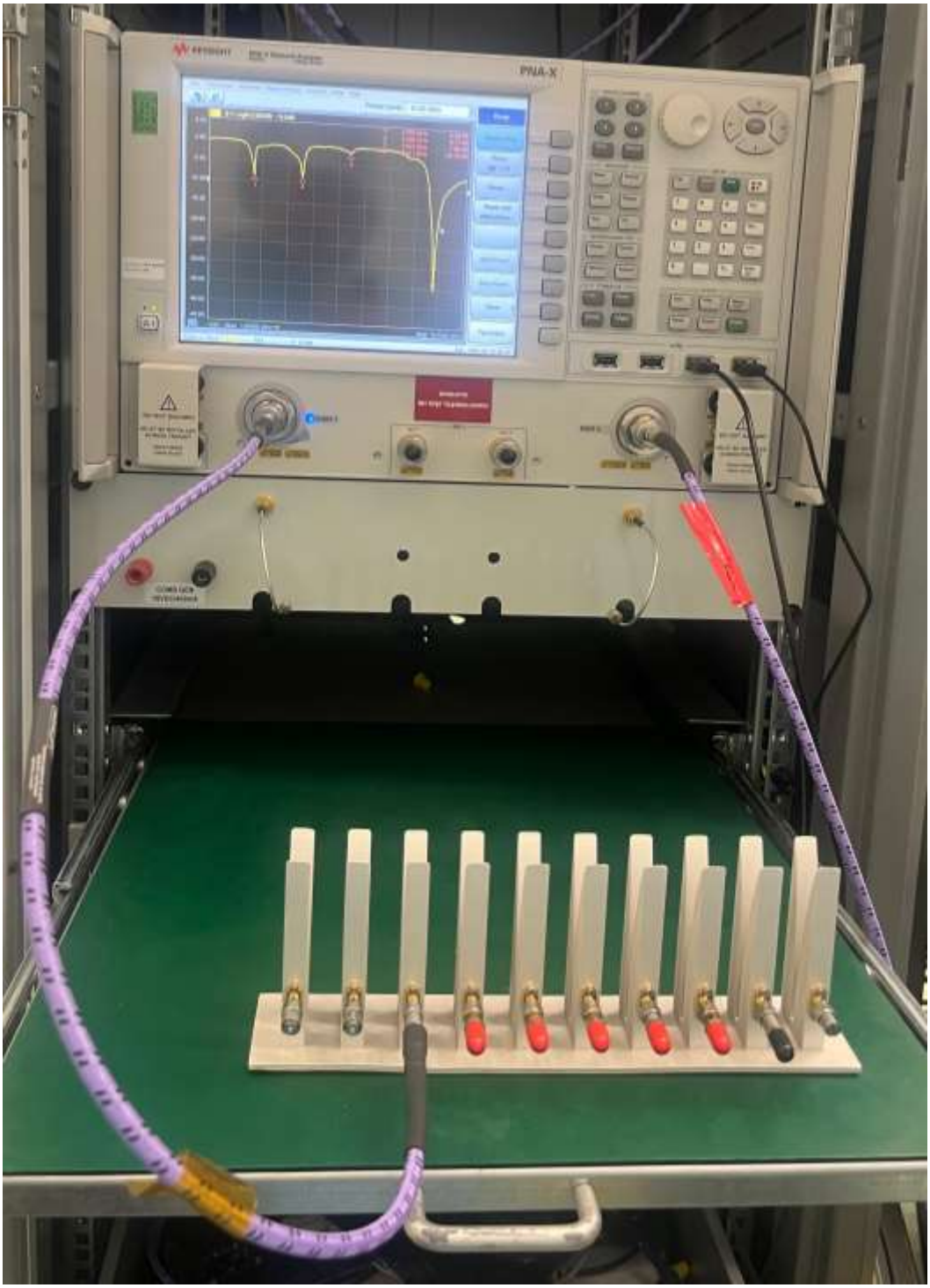
Resim 4.13. Ölçümde kullanılan network analizör

Ölçüme başlamadan önce cihazın KEYSIGHT marka ve N4693A modeline sahip elektronik kalibrasyon modülü ile kalibrasyonu yapılmıştır (Resim 4.14).



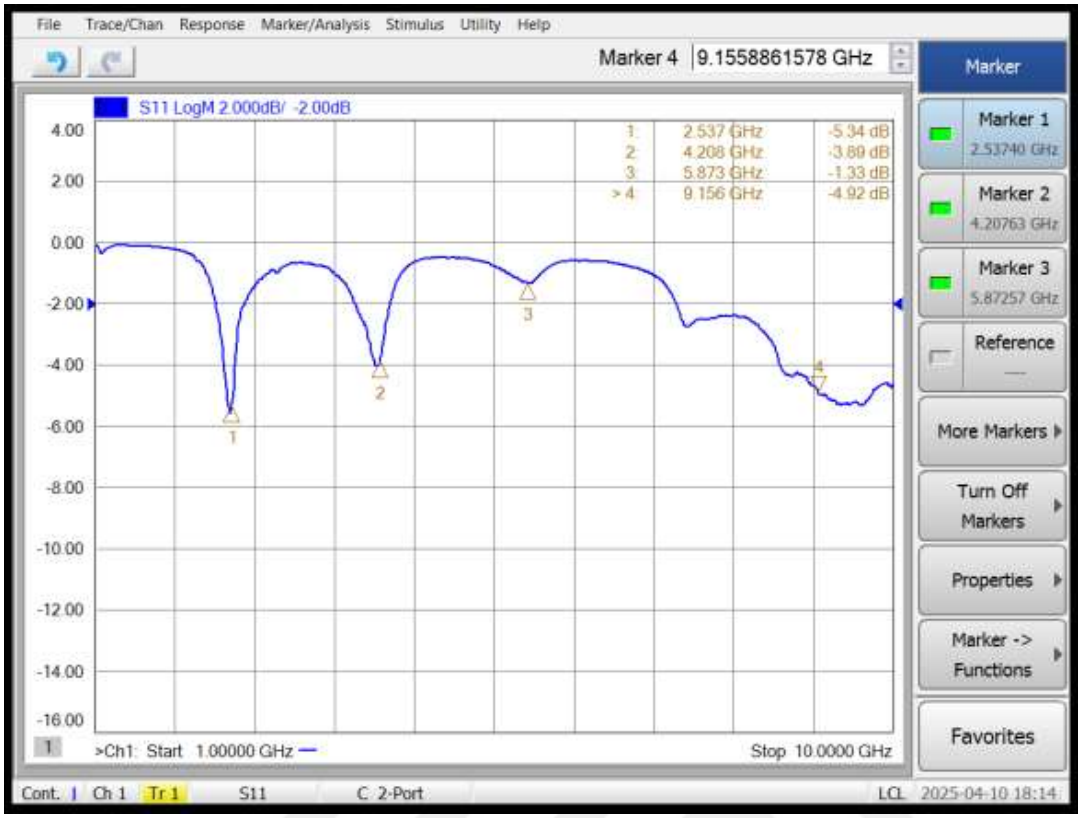
Resim 4.14. Elektronik kalibrasyon modülü

S11 parametresinin ölçümleri ölçüm yapılacak porta network analizör bağlanarak ve diğer portlar yüklerle bağlanıp kapatılarak yapılmıştır (Resim 4.15).

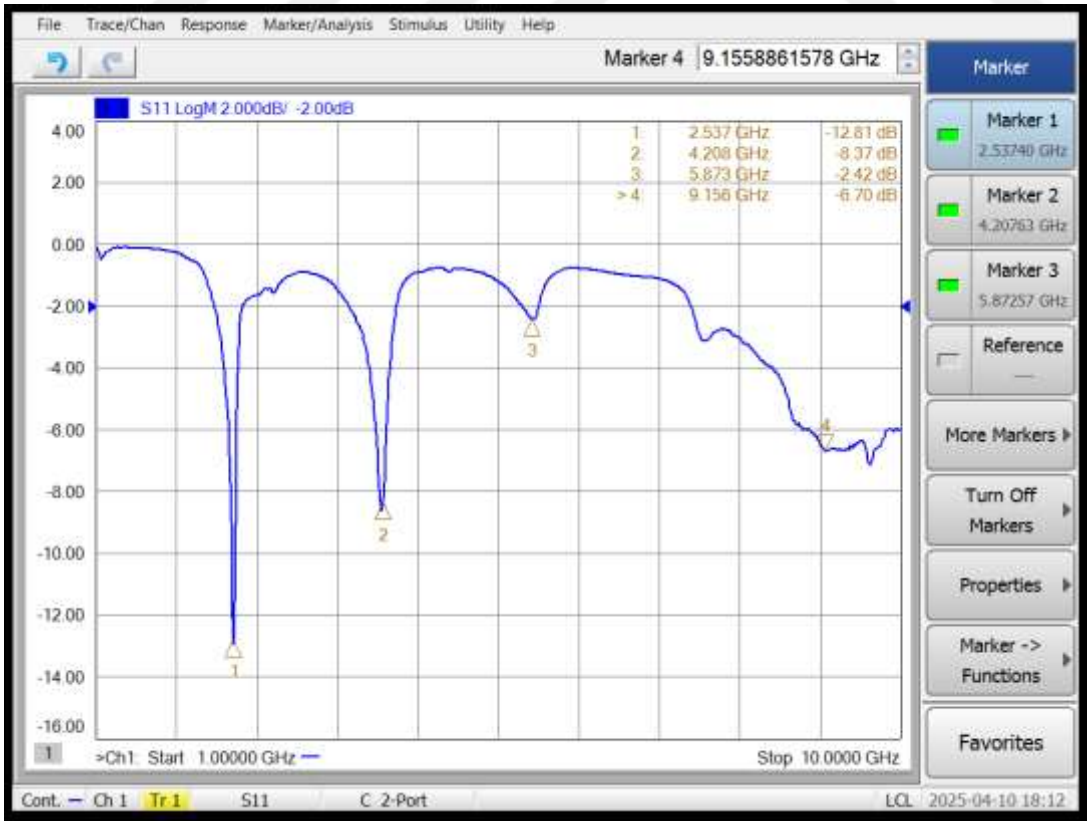


Resim 4.15. S11 parametresi ölçümleri

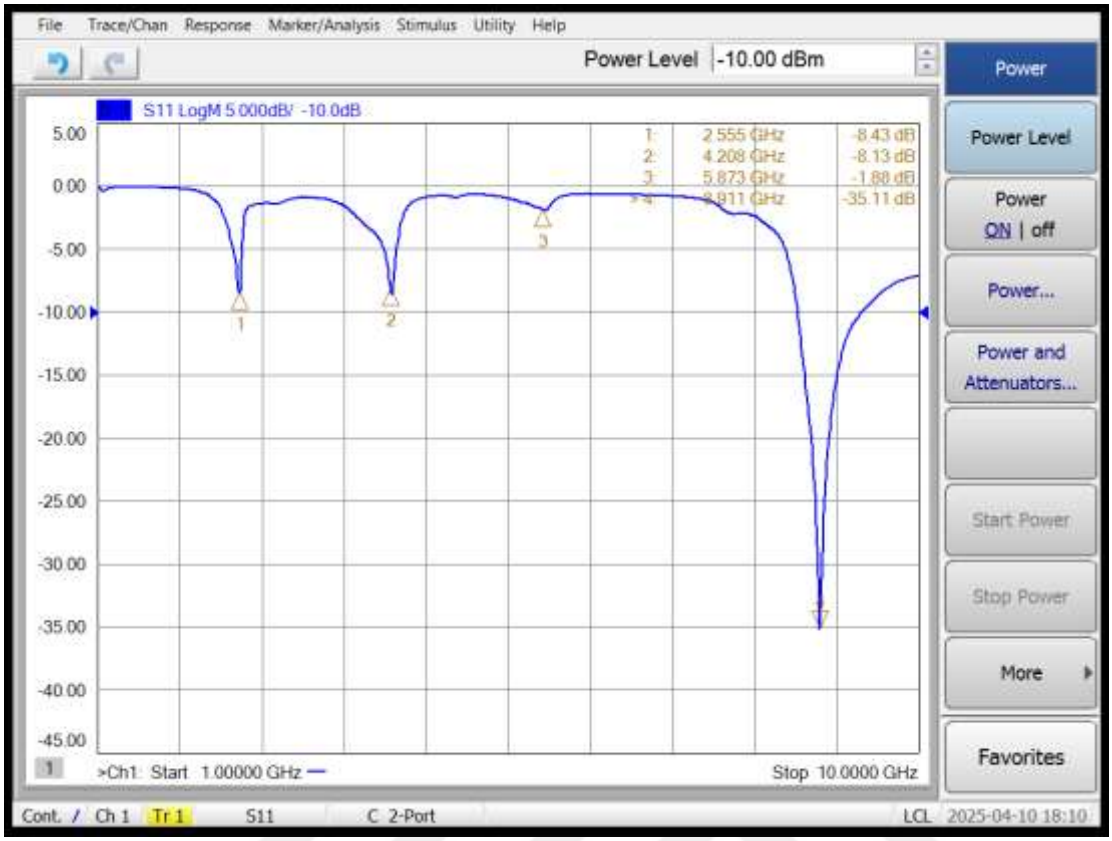
Network analizör ile 10 port sırasıyla sol baştan ölçülmüş ve yapılan ölçümlerde S11 sonuçları elde edilmiştir (Şekil 4.1 - Şekil 4.10).



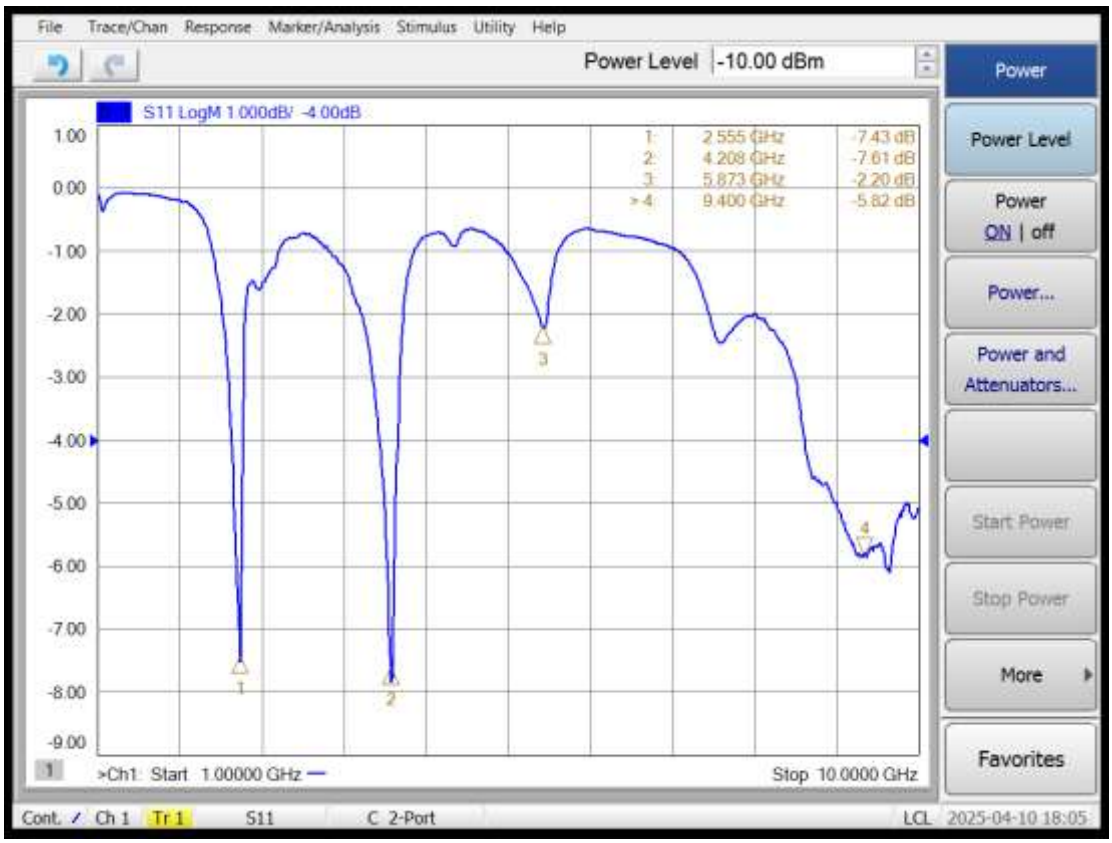
Şekil 4.1. 1.port S11 ölçümü



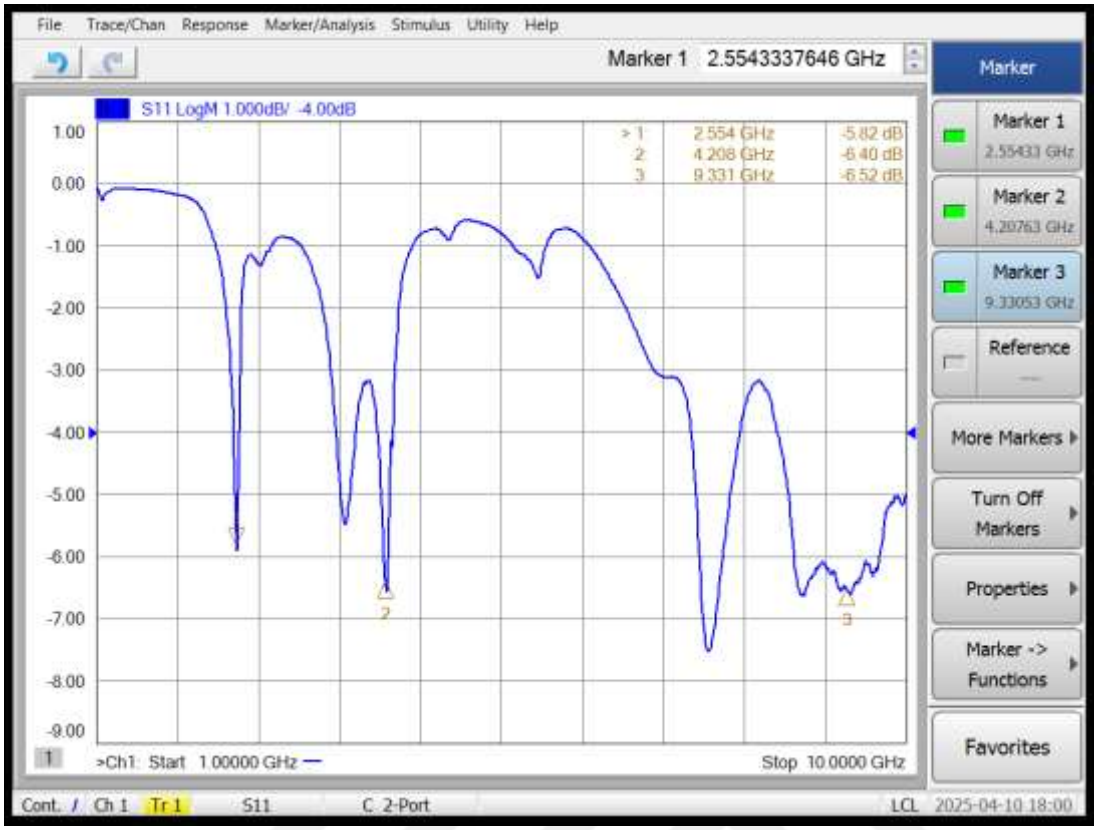
Şekil 4.2. 2. port S11 ölçümü



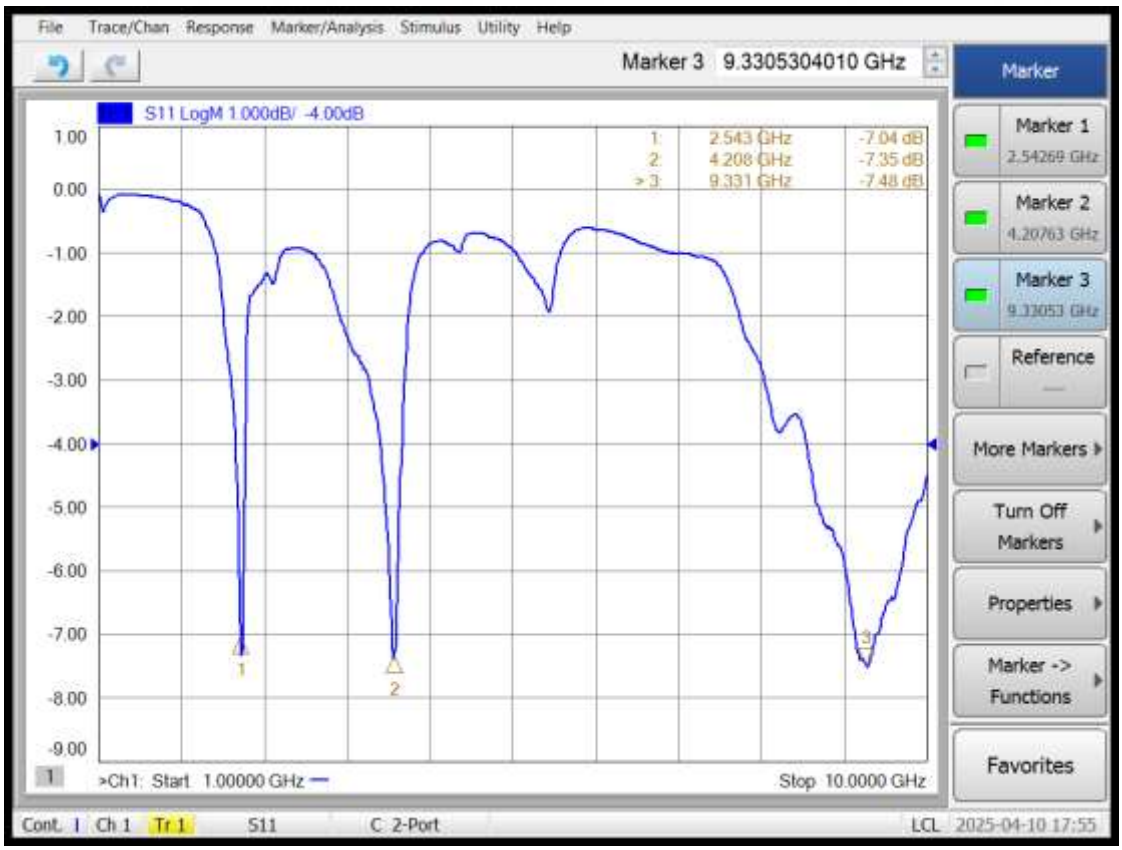
Şekil 4.3. 3. port S11 ölçümü



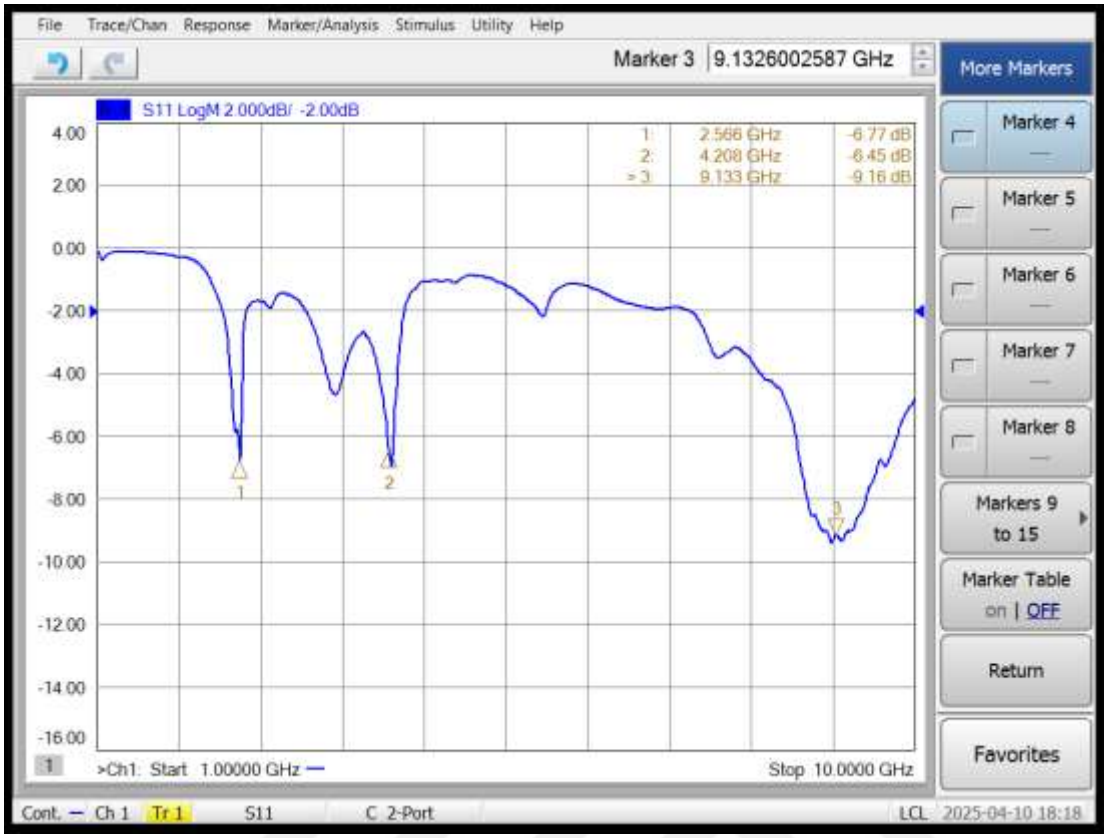
Şekil 4.4. 4.port S11 ölçümü



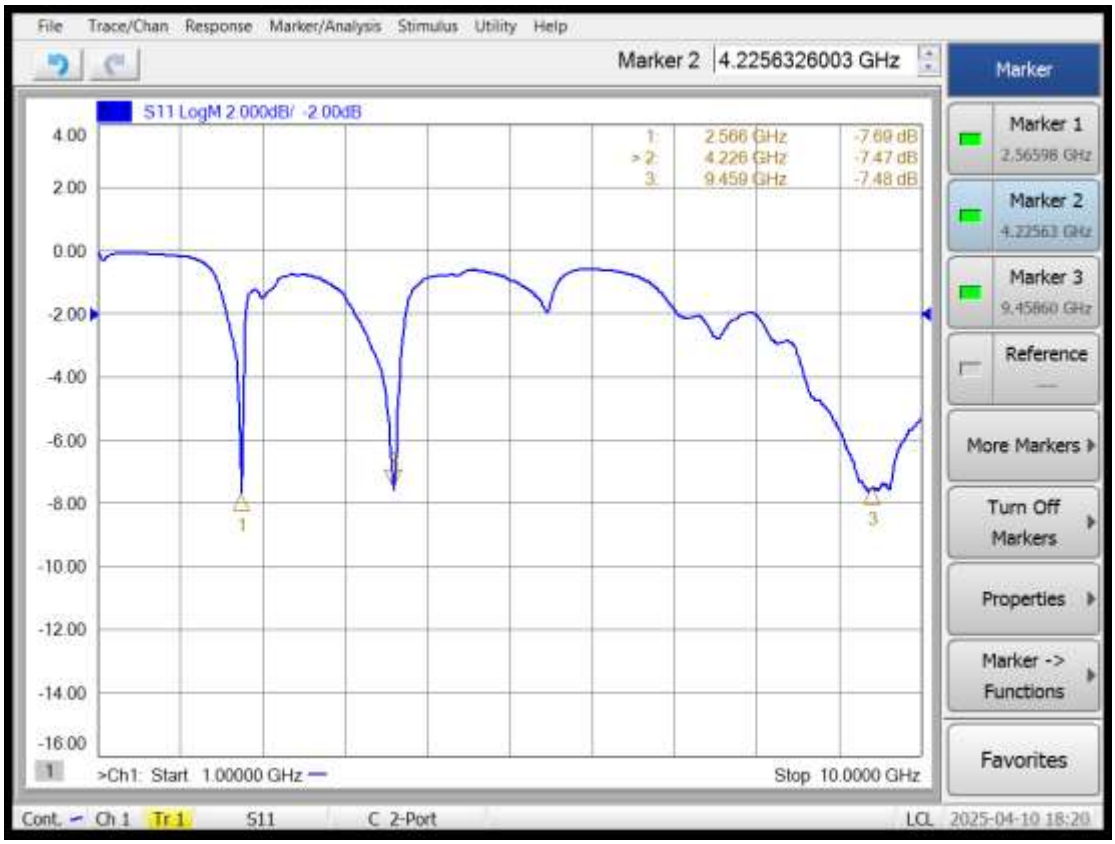
Şekil 4.5. 5.port S11 ölçümü



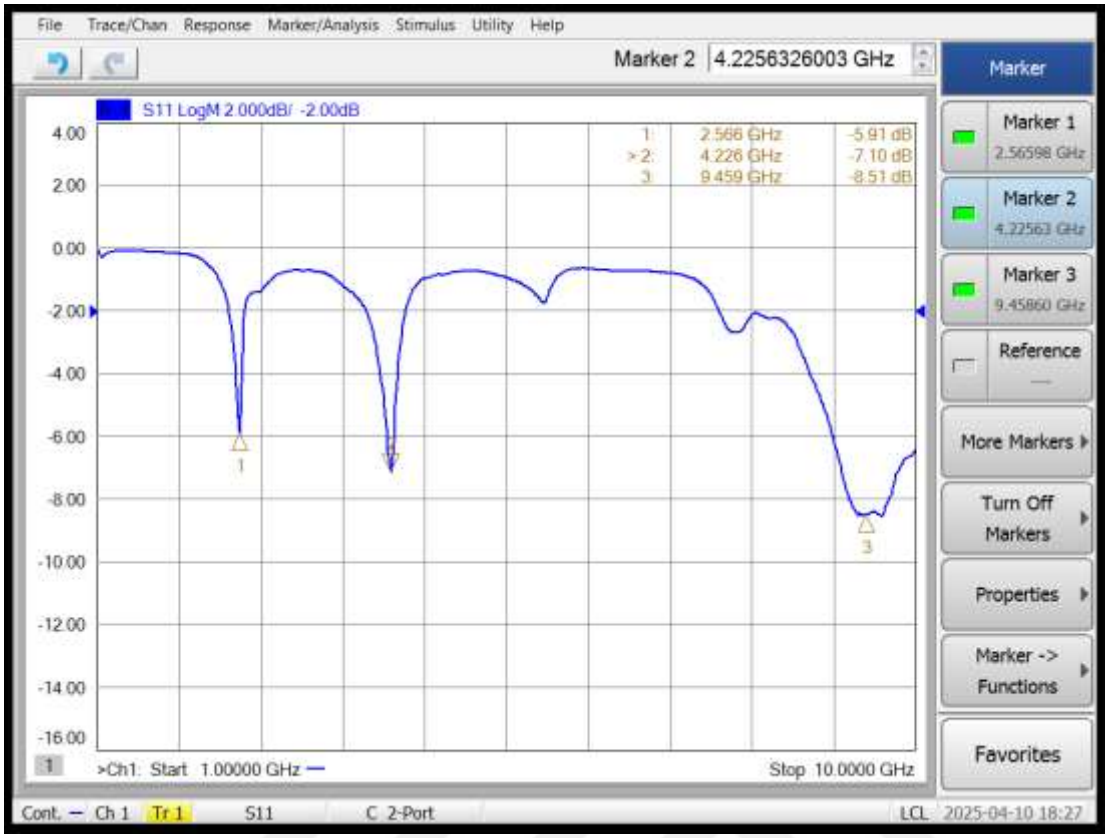
Şekil 4.6. 6.port S11 ölçümü



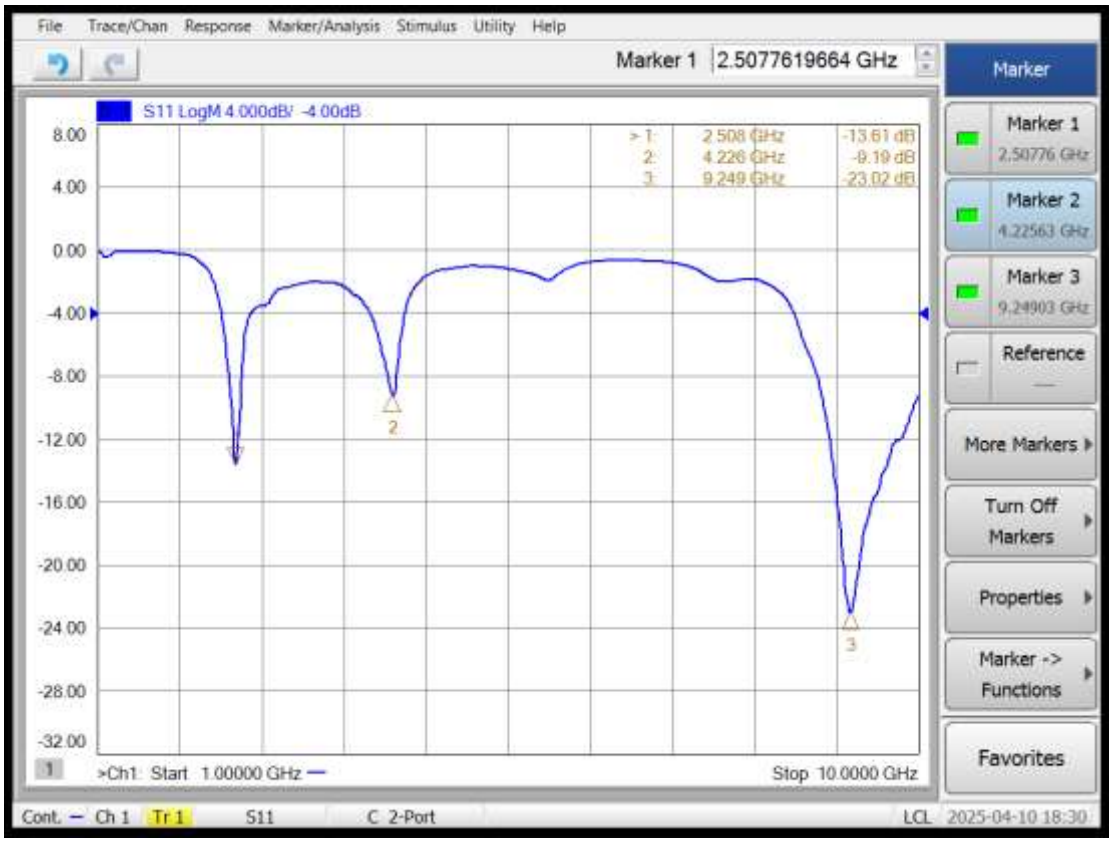
Şekil 4.7. 7.port S11 ölçümü



Şekil 4.8. 8.port S11 ölçümü



Şekil 4.9. 9.port S11 ölçümü



Şekil 4.10. 10.port S11 ölçümü

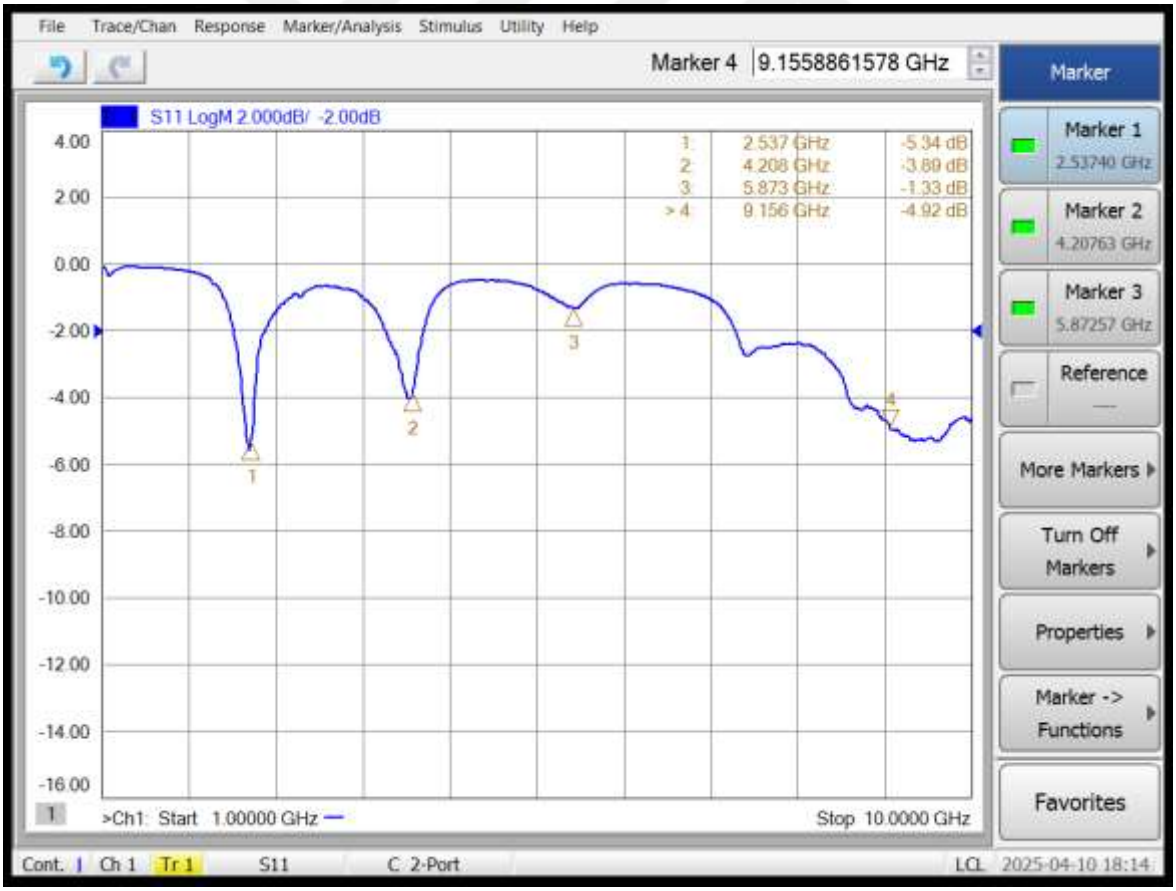
4.3. Aktif S Parametresi Ölçümleri ve Hesaplamaları

Aktif S parametresi hesaplaması yapabilmek için bir port belirlenmiştir. Belirlenen porttan giriş, diğer portlardan sırasıyla çıkış alınarak her bir portun birbirine etkisi ölçülmüştür. Bu ölçüm sonuçları veri olarak network analizör cihazından alınıp Python programı kullanılarak hesaplanmış ve grafiksel olarak sonuçlar elde edilmiştir.

Aktif S parametresi hesabı 1.port için;

$$\left(S_{port1}\right)_{aktif} = (S_{11})_{pasif} + (S_{12} + S_{13} + S_{14} + S_{15} + S_{16} + S_{17} + S_{18} + S_{19} + S_{110} \quad (4.3)$$

gibi yapılmaktadır. Şekil 4.11 – Şekil 4.20 network analizörden elde edilen portların birbiriyle olan etkileşim ölçümleri gösterilmektedir.



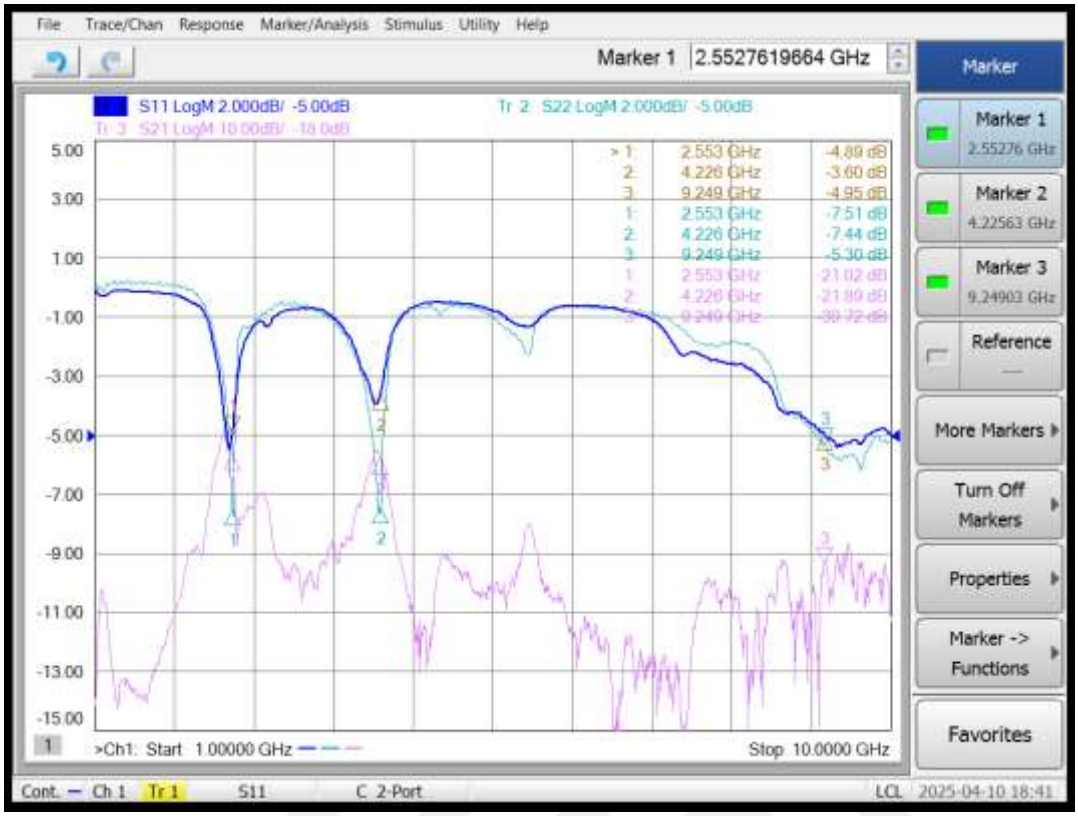
Şekil 4.11. Pasif S11 parametresi



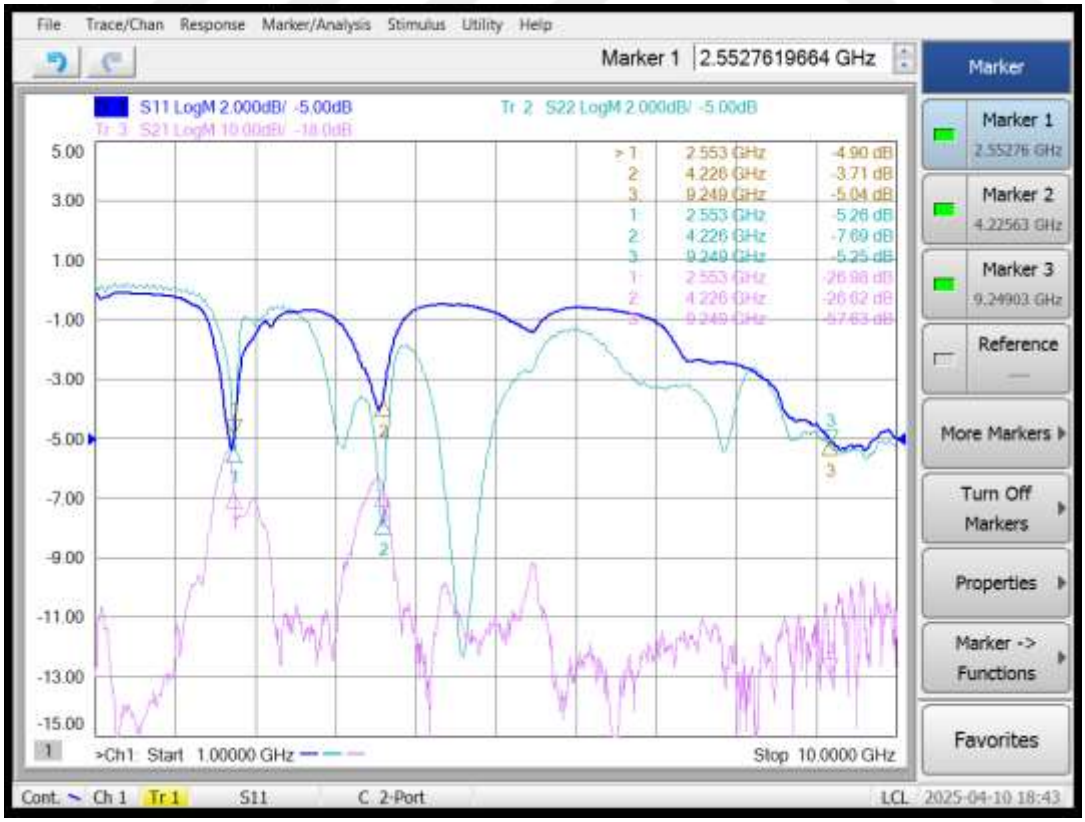
Şekil 4.12. 1.port ve 2.port etkileşimi



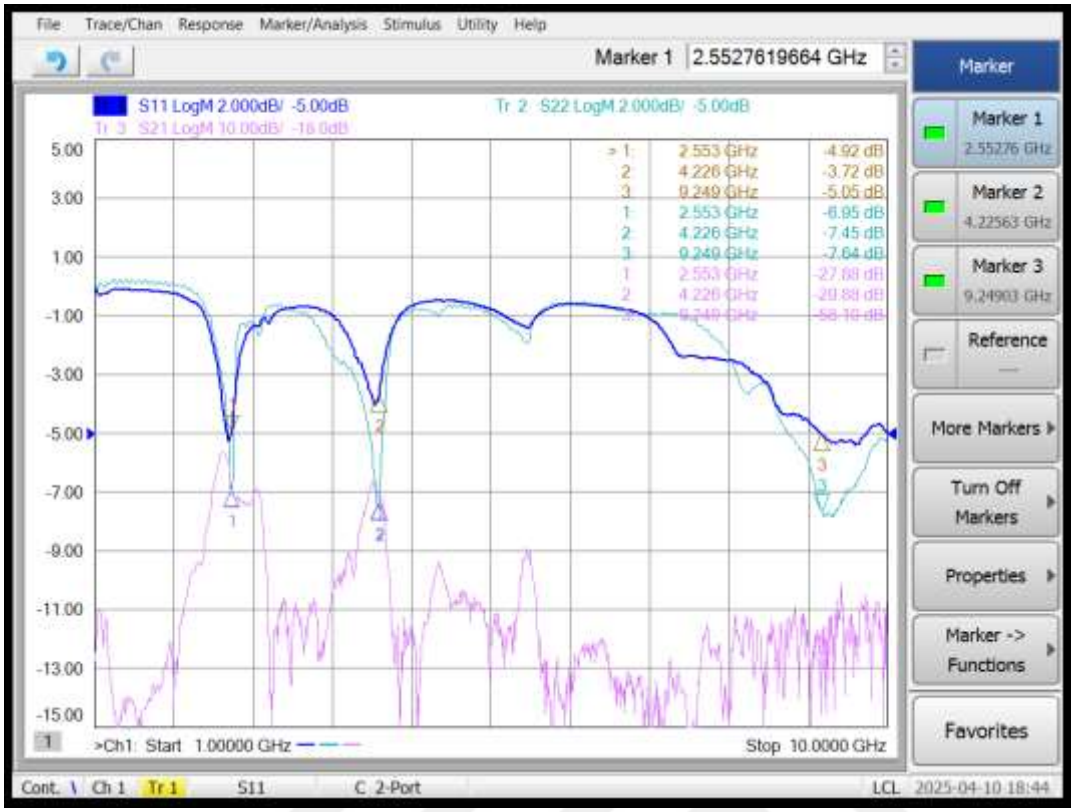
Şekil 4.13. 1.port ve 3.port etkileşimi



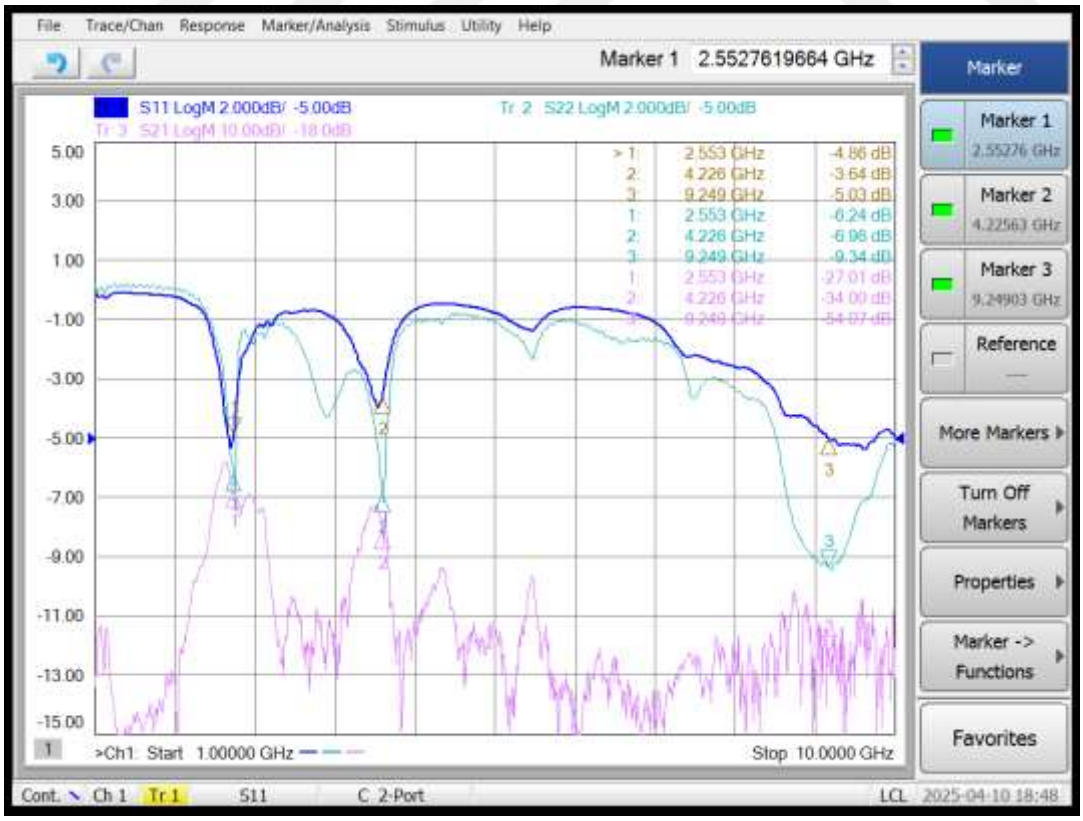
Şekil 4.14. 1.port ve 4.port etkileşimi



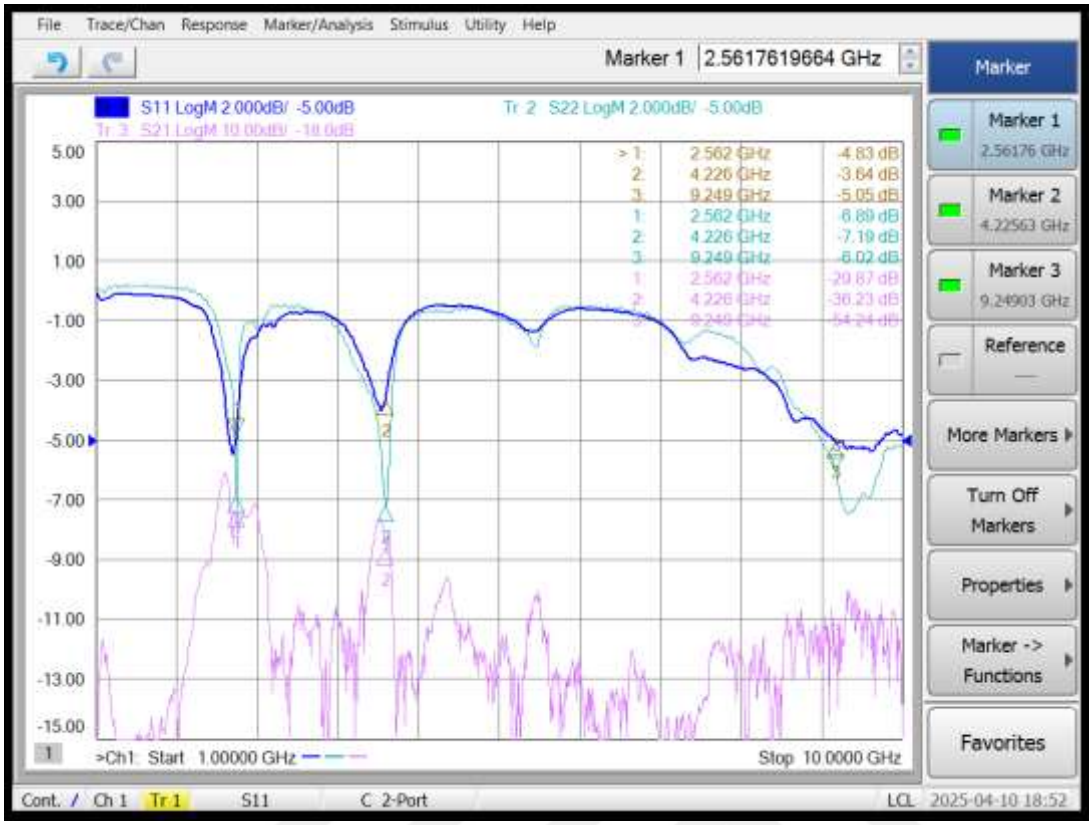
Şekil 4.15. 1.port ve 5.port etkileşimi



Şekil 4.16. 1.port ve 6.port etkileşimi



Şekil 4.17. 1.port ve 7.port etkileşimi



Şekil 4.18. 1.port ve 8.port etkileşimi

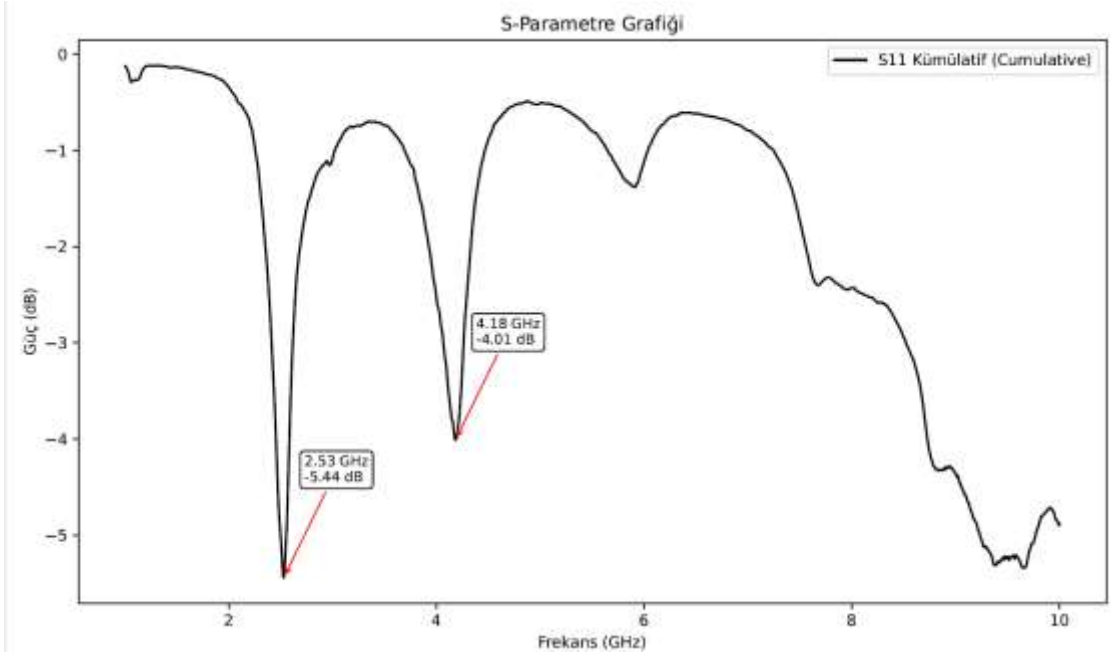


Şekil 4.19. 1.port ve 9.port etkileşimi



Şekil 4.20. 1.port ve 10.port etkileşimi

Sonuçları Pyhton programında görsel olarak topladığımızda aktif S parametresi Şekil 4.21'deki gibi gözlenmiştir.



Şekil 4.21. Aktif S parametresi hesaplaması

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, 4 GHz merkez frekansında hem S bantta hem de C bantta (çift bant) çalışacak şekilde tasarlanan 10 elemanlı bir Vivaldi dizi antenin hem elektromanyetik simülasyonu hem de fiziksel üretimi gerçekleştirilmiştir. Antenin tasarımı, CST Studio Suite yazılımı kullanılarak yapılmış ve optimize edilmiştir. Ardından, üç boyutlu yazıcı teknolojisi kullanılarak PLA malzemesinden üretilmiş, yüzey düzgünlüğü sağlamak amacıyla zımparalanmış ve elektromanyetik iletkenliği artırmak amacıyla gümüş bazlı iletken boya ile kaplanmıştır. Son olarak, antenin performansı temiz oda koşullarında yapılan ölçümlerle test edilmiştir.

Uluslararası telekomünikasyon birliği (International Telecommunication Union - ITU) 2012 tarihli Radyo Yönetmelikleri'ne göre, ölçüm sonuçlarından elde ettiğimiz dip noktalarımız olan 2,555 GHz ve 4,209 GHz frekansları farklı hizmet alanlarına tahsis edilmiştir. 2,555 GHz, mobil iletişim sistemlerinin temelini oluşturan Uluslararası Mobil Telekomünikasyon (International Mobile Telecommunication - IMT) hizmetleri kapsamında değerlendirilir ve dünya genelinde 3G, 4G, hatta 5G gibi teknolojiler için kullanılır. Ancak bu frekansın gerçek kullanımı, ülkelerin ulusal düzenlemelerine bağlı olarak değişir. Öte yandan 4,209 GHz, havacılığa yönelik olarak tahsis edilen 4,2 GHz - 4,4 GHz bandı içinde yer alır ve radyo altimetreler gibi kritik seyrüsefer sistemlerinde kullanılır. Bu nedenle, sivil ve askeri havacılık güvenliği açısından oldukça önemli olup diğer hizmet türlerine genellikle kapalıdır. Her iki frekansın kullanımı da uluslararası ilkelerin yanı sıra, yerel otoritelerin belirlediği tahsis politikaları çerçevesinde şekillenir [40].

Simülasyon ve ölçüm sonuçları genel olarak tutarlı bulunmuştur. Ancak, ölçüm verilerinde gözlemlenen küçük frekans kaymaları; üretim toleransları, iletken boya tabakasının kalınlığındaki düzensizlikler, imalat sürecinde kontrol edilemeyen pürüzlülükler, simülasyonda yüzey pürüzünün hesaplanmamış olması ve PLA malzemesinin simülasyonda kullanılan ideal dielektrik sabitinden sapması gibi nedenlerle ilişkilendirilmektedir. Bu farklara rağmen, antenin temel çalışma prensibi korunmuş ve hedeflenen performans karakteristiklerine büyük oranda ulaşılmıştır.

Üç boyutlu yazıcı teknolojisi ile anten üretimi, özellikle maliyet etkinliği, hızlı prototipleme, hafiflik ve tasarım esnekliği gibi avantajlarıyla geleneksel üretim

yöntemlerine önemli bir alternatif sunmaktadır. Bu bağlamda bu çalışma, hem akademik hem de endüstriyel uygulamalara yönelik yenilikçi bir üretim yaklaşımı önermektedir. Özellikle radar, savunma sistemleri ve geniş bantlı kablosuz iletişim altyapılarında kullanılabilecek Vivaldi antenler için düşük maliyetli prototip üretimi konusunda değerli bir referans niteliğindedir.

Bu çalışmanın literatüre katkılarından biri de, 3D yazıcı teknolojisinin anten tasarımı ve üretiminde uygulanabilirliğini somut bir örnekle ortaya koymasıdır. Literatürde sınırlı sayıda bulunan bu tür uygulamalı çalışmalar, gelecekte farklı malzeme türlerinin (örneğin ABS, karbon katkılı filamentler vb.) ve iletken kaplama yöntemlerinin anten performansı üzerindeki etkilerini araştırmak için bir başlangıç noktası oluşturmaktadır.

İlerleyen çalışmalar kapsamında, aynı antenin farklı frekans bantlarında (örneğin 2 GHz – 4 GHz veya 6 GHz – 8 GHz) performans değerlendirmeleri yapılabilir. Ayrıca, farklı dizi yapılandırmaları ya da hibrit üretim teknikleri ile yönlülük, kazanç ve verimlilik gibi parametrelerin daha da iyileştirilmesi mümkündür. Öte yandan, tasarımın 5G ve gelecekteki 6G sistemleriyle uyumlu olacak şekilde geliştirilmesi, bu anten teknolojisinin uzun vadeli potansiyelini daha da artıracaktır. Gelecekteki çalışmalarda tasarımı daha ileri bir noktaya taşımak için malzemelerin dielektrik katsayısının daha net olması, yüzey pürüzlerinin detaylıca hesaba katılması önerilmektedir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması; yalnızca geniş bantlı anten tasarımı konusunda değil, aynı zamanda alternatif üretim yöntemlerinin uygulanabilirliği ve etkinliği açısından da literatüre anlamlı katkılar sunmaktadır. Elde edilen bulgular, ileride yapılacak daha kapsamlı çalışmalar için sağlam bir temel teşkil etmektedir.

KAYNAKLAR

1. Gazit, E. (1988). Improved design of the Vivaldi antenna. *IEEE Proceedings H Microwaves, Antennas and Propagation*, 135(2), 89.

2. Hood, A. Z., Karacolak, T., & Topsakal, E. (2008). A Small Antipodal Vivaldi Antenna for Ultrawide-Band Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 7, 656–660.

3. Nassar, I. T., & Weller, T. M. (2015). A Novel Method for Improving Antipodal Vivaldi Antenna Performance. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63(7), 3321–3324.

4. Sonkki, M., Sanchez-Escuderos, D., Hovinen, V., Salonen, E. T., & Ferrando-Bataller, M. (2015). Wideband Dual-Polarized Cross-Shaped Vivaldi Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63(6), 2813–2819.

5. Li Tianming, Yuping, R., & Zhongxia, N. (2007). Analysis and Design of UWB Vivaldi Antenna. *2007 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications.*

6. Hamid, M. R., Gardner, P., Hall, P. S., & Ghanem, F. (2011). Switched-Band Vivaldi Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 59(5), 1472–1480.

7. Natarajan, R., George, J. V., Kanagasabai, M., & Kumar Shrivastav, A. (2015). A Compact Antipodal Vivaldi Antenna for UWB Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 14, 1557–1560.

8. Dixit, A. S., & Kumar, S. (2020). A Survey of Performance Enhancement Techniques of Antipodal Vivaldi Antenna. *IEEE Access*, 1–1.

9. Wang, S., Chen, X. D., & Parini, C. G. (2007). Analysis of Ultra Wideband Antipodal Vivaldi Antenna Design. *2007 Loughborough Antennas and Propagation Conference.*

10. Zhang, X., Chen, Y., Tian, M., Liu, J., & Liu, H. (2018). A compact wide-band antipodal Vivaldi antenna design. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, e21598.

11. Chao Deng, & Yong-jun Xie. (2009). Design of Resistive Loading Vivaldi Antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 8, 240–243.

12. Hien Chu Ba, Shirai, H., & Ngoc, C. D. (2014). Analysis and design of antipodal Vivaldi antenna for UWB applications. *2014 IEEE Fifth International Conference on Communications and Electronics (ICCE).*

13. Rajesh, N., Malathi, K., Raju, S., Abhai Kumar, V., Deepak Ram Prasath, S., & Alsath, M. G. N. (2017). Design of Vivaldi Antenna With Wideband Radar Cross Section Reduction. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65(4), 2102–2105.

14. Bai, J., Shi, S., & Prather, D. W. (2011). Modified Compact Antipodal Vivaldi Antenna for 4–50-GHz UWB Application. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 59(4), 1051–1057.

15. Kahkonen, H., Ala-Laurinaho, J., & Viikari, V. (2019). Dual-Polarized Ka-band Vivaldi Antenna Array. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1–1.

16. Rana, M. M., Khanom, R., & Rahman, M. M. (2018). Design and Analysis of Vivaldi Antennas. *2018 International Conference on Innovation in Engineering and Technology (ICIET).*

17. Behera, B. R. (2016). Vivaldi antenna for UWB communications: Design, modelling and analysis of Vivaldi Antenna with genetic algorithm. *2016 International Conference on Control, Computing, Communication and Materials (ICCCCM).*

18. Chiappe, M., & Gragnani, G. L. (2006). Vivaldi Antennas for Microwave Imaging: Theoretical Analysis and Design Considerations. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 55(6), 1885–1891.

19. Guo, X., Gao, T., Yuan, Y., & Xu, Z. (2016). Analysis of Vivaldi antenna on cross-polarization application. *2016 11th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE).*

20. Jiangniu Wu, Zhiqin Zhao, Zaiping Nie, & Qing-Huo Liu. (2014). A Printed UWB Vivaldi Antenna Using Stepped Connection Structure Between Slotline and Tapered Patches. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 13, 698–701.

21. Ziani Kerarti, D., Marouf, F. ., & Meriah, S. M. (2012). New tapered slot vivaldi antenna for UWB applications. *2012 24th International Conference on Microelectronics (ICM).*

22. Moosazadeh, M., & Kharkovsky, S. (2016). A Compact High-Gain and Front-to-Back Ratio Elliptically Tapered Antipodal Vivaldi Antenna With Trapezoid-Shaped Dielectric Lens. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 15, 552–555.

23. Lazaro, A., Villarino, R., & Girbau, D. (2011). Design of tapered slot Vivaldi antenna for UWB breast cancer detection. *Microwave and Optical Technology Letters*, 53(3), 639–643.

24. Eichenberger, P. J., Yetisir, E., & Ghalichechian, N. (2019). High-Gain Antipodal Vivaldi Antenna with Pseudoelement and Notched Tapered Slot Operating at 2.5-57 GHz. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1–1.

25. Liu, Y., Zhou, W., Yang, S., Li, W., Li, P., & Yang, S. (2016). A Novel Miniaturized Vivaldi Antenna Using Tapered Slot Edge With Resonant Cavity Structure for Ultrawideband Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 15, 1881–1884.

26. Sandora, J. S., & Charvat, G. L. (2013). An ultra-wideband Vivaldi and linear hybrid taper antenna for use in a near-field real-time phased array radar system. *2013 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology.*

27. Yunqiang Yang, Cemin Zhang, Song Lin, & Fathy, A. E. (n.d.). Development of an ultra wideband Vivaldi antenna array. *2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium.*

28. Ojaroudiparchin, N., Shen, M., & Pedersen, G. F. (2015). Design of Vivaldi antenna array with end-fire beam steering function for 5G mobile terminals. *2015 23rd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR).*

29. Zhu, S., Liu, H., Chen, Z., & Wen, P. (2018). A Compact Gain-Enhanced Vivaldi Antenna Array With Suppressed Mutual Coupling for 5G mmWave Application. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 17(5), 776–779.

30. Kindt, R. W., & Pickles, W. R. (2010). Ultrawideband All-Metal Flared-Notch Array Radiator. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 58(11), 3568–3575.

31. Balanis, C. A. (1992). Antenna theory: a review. *Proceedings of the IEEE*, 80(1), 7–23.

32. Khan, A. Q., Riaz, M., & Bilal, A. (2016). Various types of antenna with respect to their applications: a review. *International journal of multidisciplinary sciences and engineering*, *7*(3), 1-8.

33. Kuzmanic, Vujovic, Petkovic & Soda (2022). Influence of 3D printing properties on relative dielectric constant in PLA and ABS materials.

34. Yin, S., Liu, Y., Li, H., & Liu, S. (2014). A novel architecture of DSP-oriented reconfigurable processing element. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, *22*(12), 2723–2732.

35. Lee, E. A., & Messerschmitt, D. G. (1987). Synchronous data flow. *Proceedings of the IEEE*, *75*(9), 1235–1245.

36. İnternet: Wevolver. (t.y.). PLA, ABS ve PETG: 3D Baskı Filamentlerinin Karşılaştırılması. https://www.wevolver.com/article/comparison-of-pla-abs-and-petg-filaments-for-3d-printing, Son Erişim Tarihi: 20.04.2025.

37. Gibson, P. J. (1979). The Vivaldi aerial. *9th European Microwave Conference*, pp. 101-105.

38. A. Panahi, A. Sebak, C. W. Trueman, "A Compact Patch-Excited Vivaldi Antenna for Ultra-Wideband Applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 2, pp. 258–262, 2020.

39. Shamshad, F., & Amin, M. (2012). Simulation comparison between HFSS, CST and WIPL-D for design of dipole, horn and parabolic reflector antenna. *Advances in Computational Mathematics and its Applications*, 1(4), 203–207.

40. International Telecommunication Union. (2012). *Radio Regulations: Articles* (pp. 112, 118). Geneva: ITU.

41. Yilmaz, B. A. (2023). A dual polarized all metal ultra-wideband Vivaldi antenna array with 70° scan ability. *In Proceedings of the 2023 IEEE 13th International Conference on Antennas (INCANT)*. IEEE.

42. Cuneray, K., Akcam, N., Okan, T., & Arican, G. O. (2023). 28/38 GHz dual-band MIMO antenna with wideband and high gain properties for 5G applications. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 162, 154518.



Gazili olmak ayrıcalıktır