



T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOK AMAÇLI AÇIKLIĞI DARALAN YARIK ANTEN
TASARIMI VE PERFORMANS ARTIRIMINA YÖNELİK
ANTEN PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

Emrah UĞURLU

DOKTORA TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül - 2016

KONYA

Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Emrah UĞURLU tarafından hazırlanan “Çok Amaçlı Açıklığı Dar-
alan Yarık Anten Tasarımı ve Performans Artırımına Yönelik Anten
Parametrelerinin Optimizasyonu” adlı tez çalışması 05/09/2016 tarihinde
aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri En-
stitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ**
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof.Dr. Novruz ALLAHVERDİ

Danışman

Yrd.Doç.Dr. Seyfettin Sinan GÜLTEKİN

Üye

Doç Dr. Sabri KOÇER

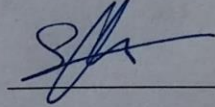
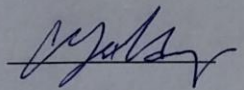
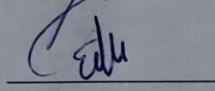
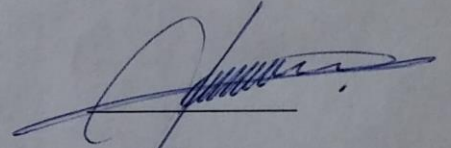
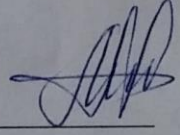
Üye

Doç.Dr. Ercan YALDIZ

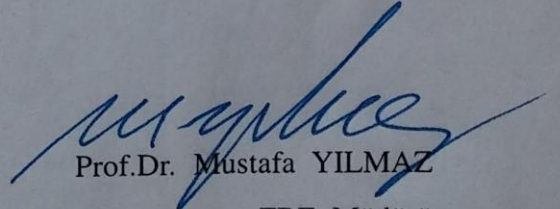
Üye

Doç.Dr. Seral ÖZŞEN

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım.



Prof.Dr. Mustafa YILMAZ

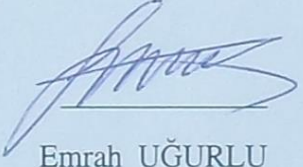
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



Emrah UĞURLU

Tarih: 05/09/2016

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ÇOK AMAÇLI AÇIKLIĞI DARALAN YARIK ANTEN TASARIMI VE PERFORMANS ARTIRIMINA YÖNELİK ANTEN PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

Emrah UĞURLU

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Seyfettin Sinan GÜLTEKİN

2016, 143 Sayfa

Jüri

Prof.Dr. Novruz ALLAHVERDİ

Doç.Dr. Sabri KOÇER

Doç.Dr. Ercan YALDIZ

Doç.Dr. Seral ÖZŞEN

Yrd.Doç.Dr. Seyfettin Sinan GÜLTEKİN

Kablosuz haberleşme ve uydu haberleşmesinde görülen yeni gelişmeler sonucunda ortaya çıkan yüksek bandgenişliği ihtiyaçları, geniş bir frekans aralığında çalışabilecek anten tasarlama konusunu popüler hale getirmiştir. Halihazırda, başta askeri haberleşme uygulamaları olmak üzere, mobil platformlarda genişbantlı ve yüksek veri hızlarında ufuk ötesi haberleşmesi yapabilmeye olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu ihtiyaç yüksek bandgenişliği kapsamında Ultra Genişband (UGB) teknolojisini öne çıkarmaktadır. UGB teknolojisi ile merkez frekansının en az %20'sine veya en az 500 MHz bandgenişliğine sahip elektronik sistemler ve bu sistemlerde kullanılabilecek antenleri tasarlama anlaşılmaktadır. UGB teknolojisini kullanan sistemlerden havacılık ve uzay alanında kullanılanlar, bandgenişliğinin yanında ayrıca boyut, ağırlık ve incelik kriterlerini de sağlamak durumundadır. Bu

durumda hem bandgenişliği büyük olan hem de kk boyutlu olan anten tasarlama ihtiyaı ortaya ıkmıştır.

Hafiflikleri, kk boyutlu oluşları ve üretim maliyetlerinin düşüklüğü gibi özelliklerinden dolayı Mikroşerit Antenler (MşA) günümüzde bu ihtiyaıları karşılayabilecek duruma gelmiştir. Özellikle, mikrodalga teknolojilerindeki gelişmeler bu sistemlerde kullanılacak antenlerin hem daha fazla band genişliğine sahip olmalarını, hem de olabildiğince kk olmalarını gerektirmektedir. Bunlara ilaveten, üretim kolaylığı da anten tasarımı aıısından göz önünde bulundurulacak üçüncü bir faktör olarak sayılabilir. Bu üç hedefe ulaşmaya yönelik en iyi seıimlerden birisi ise Aııklığı Daralan Yarık Antelerdir. Aııklığı Daralan Yarık Anten (ADYA) tipi antenler, yüksek bandgenişlikleri ve hafiflikleri sayesinde hava ve uzay platformlarında kullanılabilecek en iyi adaylardan birisi olarak kaşımıza ıkmaktadır.

ADYA tipi antenlerin ayırt edici özellikleri, besleme noktasından uzaklařtıķa aııklığı giderek artan ve antenin ışıma yapan bölgesini oluşturan bir yarıktan oluşmalarıdır. Veya bir başka bakış aıısıyla, yarık ağzından besleme noktasına doğru giderek daralan bir profile sahiptirler. Antenlerin ışıma yapan bölümlerine ait daralma profilleri, ADYA tipini belirler. Literatürde, ADYA tipi antenlerin daralma profillerinin anten performansı üzerine olan etkileri incelenmekte ve araştırmalar devam etmektedir. Ayrıca ADYA tipi antenlerde mikroşerit hattın aııklık hattına geıişin bandgenişliği üzerine olan etkileri oldukıa fazladır. Balun geıişi, dairesel ve radyal parıalar kullanarak geıiş gibi yöntemler bu alandaki ıalışmaların bazılarıdır.

Bilindiği zere MşA'lerin fiziksel ve elektriksel parametrelerini belirlemek ve amaca göre en iyi sonuıaları elde etmek için optimizasyon yöntemlerini kullanmak oldukıa etkilidir. Fakat, ADYA alanında optimizasyon algoritmaları ile yapılan ıalışma sayısı oldukıa sınırlıdır. Bunun yanında X-Band Uydu Haberleşmesi (Satellite Communication - SATCOM) frekans bölgesine yönelik bu tip antenlerle ilgili özel bir ıalışma yoktur. Bu sebeple ADYA tipi antenler üzerine bir meta-heuristic optimizasyon algoritması ile ve X-Band SATCOM alanında kullanılabilecek, 7250 – 7750 MHz aralığında bir alıcı anten tasarımı bu tez ıalışmasının konusu olmuştur. Söz konusu antenin performansını yeterli seviyeye ulaştırarak en az 500 MHz lik bir aralıķta ıalışabilecek bir UGB anten olmasına ıalışılmıştır. ADYA tipi bu antenin hava veya uzay platformlarında kullanılması beklendiğinden, boyutlarda küçültme sayesinde hafiflik ve yüzey alanı gibi özelliklerde de iyileştirme amaılanmıştır.

ıalışmada  daralma profili tasarlanıp incelenmiştir. Bunlar, Dual

Ekspansiyel Daralma, Dual Doğrusal Daralma ve Dual Dairesel Daralma profilleridir. Dual Ekspansiyel Daralma profili literatürde daha önce yer alan bir profildir. Fakat bu profilden hareketle Dual Doğrusal Daralma ve Dual Dairesel Daralma profilleri bu çalışma ile literatüre kazandırılmıştır. Ayrıca bu profillerdeki antenlerden doğrusal daralan hariç diğer iki profilde varyasyonlar üretilerek mikroşerit hat ilaveli ve mikroşerit hat ilavesiz olmak üzere toplamda beş farklı anten tipi geliştirilmiştir.

Tüm anten tipleri ve daralma profilleri üç parametre cinsinden ifade edilmiştir. Bu parametreler a , b , w dir. Her bir parametrenin optimum değeri, High Frequency Structure Simulator (HFSS) yazılımı içerisinde Genetik Algoritma kullanılarak hesaplanmıştır.

Sonuç olarak, 7250 – 7750 MHz SATCOM frekans bölgesi hedeflenerek yapılan çalışmalarda elde edilen bandgenişliğinin bu bölgeyi önemli ölçüde kapsadığı görülmüştür. Buna ilave olarak geri dönüş kaybı performansı, verim ve kazanç gibi parametrelerin literatürdeki benzerlerine göre yüksek olması ve uyumlu olması sağlanmıştır. Ayrıca Dual Ekspansiyel Daralan profilin iyileştirilmesinin yanı sıra, Dual Doğrusal Daralan ve Dual Dairesel Daralan profilli anten tasarımları da gerçekleştirilerek literatüre iki yeni daralma profili ve yarım halka şekilli parçalar içeren yeni bir besleme tekniği kazandırılmıştır

Üretilen antenler, konvansiyonel SATCOM alıcı antenlerine göre oldukça küçük, hafif ve çok daha düşük maliyetlidir. Bu özellikleri sayesinde söz konusu antenlerin, İHA (İnsansız Hava Aracı) veya benzeri hava platformlarında kullanılabilecekleri değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Açıklığı Daralan Yarık Anten, Band Genişliği, Dual Doğrusal Daralma Profili, Dual Dairesel Daralma Profili, Dual Ekspansiyel Daralma Profili, Genetik Algoritma Ultra Genişband, HFSS, X-Band Uydu Haberleşmesi.

ABSTRACT

Ph.D THESIS

MULTI-OBJECTIVE TAPERED SLOT ANTENNA DESIGN AND OPTIMIZATION OF ANTENNA PARAMETERS FOR PERFORMANCE IMPROVEMENT

Emrah UĞURLU

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE
OF SELÇUK UNIVERSITY
DOCTOR OF PHILOSOPHY IN ELECTRICS ELECTRONICS
ENGINEERING**

Advisor: Asst. Prof. Dr. Seyfettin Sinan GÜLTEKİN

2016, 143 Pages

Jury

Prof.Dr. Novruz ALLAHVERDİ

Assoc.Prof.Dr. Sabri KOÇER

Assoc.Prof.Dr. Ercan YALDIZ

Assoc.Prof.Dr. Seral ÖZŞEN

Asst.Prof.Dr. Seyfettin Sinan GÜLTEKİN

Large bandwidth requirements brought up by the recent advances in satellite and wireless communications increased the popularity of designing antennas that are capable of operating with large bandwidths. Currently, there is a growing demand in obtaining wideband high data rate for beyond-line-of-sight (BLOS) communications on mobile platforms. This demand emphasizes Ultra Wideband (UWB) technology, which is one of the terms used to indicate high bandwidth usage. It is used in designing of antennas that are capable of operating within %20 of their center frequencies or having bandwidth of at least 500 MHz. The airborne and satellite systems implementing UWB technology should also satisfy other requirements, such

as aerodynamic compatibility, small dimensions, being lightweight and having small profiles. In this case one can say that for airborne and satellite platforms there is an emerging need of designing antennas having both wide bandwidth and low dimensions.

MSAs are very popular in many airborne and space research activities with their features like low weight and low fabrication costs. In order to reach these three objectives, Tapered Slot Antennas (TSAs) are one of the best options. TSAs have wide bandwidths and they are lightweight, which make them good candidates for airborne and space applications. Besides, manufacturing process for TSA is practical and cheap. TSAs are very advantageous, because they can be manufactured simultaneously with the manufacturing process of antenna feeds, compatible with integrated circuits. Also, they have great potential due to their symmetrical radiation patterns, satisfactory gain levels and adequate polarization levels, in addition to their wide bandwidths. The distinctive features of TSAs are their slots which form the radiating regions and the gradual increase of their slot openings when going away from the feed point. The tapering profile of the radiating edge determines the type of the TSA. In the studies that are done so far, tapering profile for various TSAs have been investigated, return losses and radiation patterns are measured. Today, the effects of taper profile on antenna performance is one of the important topics that is still under investigation. Since the early designs of TSAs, the importance on bandwidth of the transition from microstrip to slotline has been known. To improve the bandwidth of these kind of transitions, various techniques, such as using balun transitions, circular stubs and radial stubs were applied. Even today, transition from microstrip to slotline is important and should be taken into account in TSA designs.

Benefiting from optimization algorithms to determine electrical and physical parameters of MSAs has been proven to be effective. However, the researches containing an optimization algorithm for TSA design are very limited in literature. Although the importance of TSA is well understood, no research work has been detected containing an optimization algorithm for design of TSAs for a specific frequency band. Therefore, to fill this gap, a meta-heuristic optimization algorithm is utilized to design receiver TSAs for X-Band SATCOM that are capable of operating in 7250 – 7750 MHz frequency band. By improving the antenna performances, an UWB antenna that is capable of operating with 500 MHz bandwidth is aimed. Since, the designed TSAs are expected to be used on airborne and space platforms, improvements in terms of weight and surface area are aimed by reducing the

dimensions of the antennas.

For this purpose, three tapering profiles are investigated. One of these is the dual exponentially tapered profile, which already exists in literature. By inspiring from this profile, two new profiles are proposed, which are dual linear and dual circular tapering profiles. Among these, the two profiles other than the dual linear tapering variations are developed, both with and without microstripline extensions, making a total of five antenna types.

All the antennas and tapering profiles are defined in three parameters, which are a , b , w . The optimum values for each parameter are calculated using Genetic Algorithm tool in High Frequency Simulator Software (HFSS).

As a result, majority of the antennas cover the whole desired frequency band, and the remaining antennas cover important portion of the 7250 – 7750 MHz range. Additionally, parameters such as return loss performance, efficiency and gain are either improved or show agreement with other studies in literature. By this thesis work, two new profiles, which are Dual Linearly Tapering and Dual Circularly Tapering, have been introduced to the literature, in addition to existing Dual Exponential Tapering profile. Also, for transition from microstripline to slotline a new technique has been brought up by utilizing semi-annular stubs on both sides of the SMA connectors.

The manufactured antennas are considerably smaller, lighter and much more cheaper than conventional SATCOM receiver antennas. Because of their small dimensions and their being lightweight, these antennas can be used in UAVs or other airborne platforms.

Keywords: Bandwidth, Dual Circular Tapering Profile, Dual Exponential Tapering Profile, Dual Linear Tapering Profile, Genetic Algorithm, HFSS, Tapered Slot Antenna, Ultra Wideband, X-Band Satellite Communication.

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında engin tecrübesi ve bilimsel katkılarıyla yol gösteren, farklı açılardan bakmamı tavsiye edip cesaretlendiren ve gece-gündüz demeden beni desteklemeye devam eden çok değerli hocam, danışmanım Sayın Yrd.Doç.Dr. Seyfettin Sinan GÜLTEKİN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Tez izleme komitemde bulunarak tez çalışmamı kıymetli fikirleri ile yönlendiren saygıdeğer hocalarım Doç.Dr. Ercan YALDIZ ve Yrd.Doç.Dr. Ömer Kaan BAYKAN'a ayrıca teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca türlü fedakârlıklarla bana destek olan Annem ve Babama minnetlerimi sunarım.

Doğdukları günden beri, bilgisayar başında akademik çalışmalar yürüten bir baba gören ve “Baba senin ödevin ne zaman bitecek?” sorularıyla beni daima motive eden, zaman zaman oyunlarından fedakarlık etmek zorunda kalarak tez çalışmalarım boyunca sabırla beni bekleyen çocuklarım Eren, Erdem ve Ece'ye de teşekkürlerimi sunarım.

Ve en büyük destekçim olan, tüm sıkıntılarımı paylaşarak desteğini her zaman ve her koşulda bana hissettiren, tüm yükümü üstüne almak suretiyle bana çalışma imkânı yaratan, gücüme güç katan, hayat arkadaşım, sevdiceğim, canım karıcım Sayın Kevser Ayça UĞURLU'ya minnettar olduğumu ifade eder, bu tezin ortaya çıkmasındaki desteği ve fadakarlıklarından ötürü şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	x
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiv
ÇİZELGELER LİSTESİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xviii
1. GİRİŞ	1
2. MİKROŞERİT ANTENLER	6
2.1. Mikroşerit Antenlerin Kullanım Alanları	6
2.2. Mikroşerit Antenlerin Özellikleri	7
2.3. Mikroşerit Antenler Alanındaki Gelişmeler	13
2.4. Açıklığı Daralan Yarık Antenler (ADYA).....	14
2.4.1. Açıklığı doğrusal daralan yarık antenler (ADODYA).....	16
2.4.2. Açıklığı eksponansiyel daralan yarık antenler (AEDYA)....	19
2.5. Mikroşerit Antenleri Analiz Etmek İçin Kullanılan Yöntemler ..	25
2.5.1. Analitik yöntemler.....	26
2.5.1.1. İletim hattı modeli	26
2.5.1.2. Kavite modeli.....	29
2.5.1.3. Çok girişli ağ modeli (MNM)	33
2.5.2. Numerik yöntemler.....	34
2.5.2.1. Moment metodu (Method of Moments-MoM)	35
2.5.2.2. Zamanda sonlu farklar (Finite Difference Time Domain- FDTD)	36
2.5.2.3. Sonlu elemanlar metodu (Finite Element Method-FEM). 38	
3. MİKROŞERİT ANTENLERİN OPTİMİZASYONU	45
3.1. En Genel Olarak Optimizasyon	45
3.2. Metasezgisel Optimizasyon Algoritmaları	49
3.2.1. Benzetilmiş tavlama algoritması	51
3.2.2. Türevsel evrim algoritması	52
3.2.3. Karınca koloni optimizasyonu	53

3.2.4. Arı algoritması.....	54
3.2.5. Parçacık sürü algoritması.....	56
3.2.6. Tabu arama algoritması.....	57
3.2.7. Harmoni arama algoritması.....	57
3.2.8. Ateşböceği algoritması.....	59
3.2.9. Guguk kuşu arama algoritması.....	59
3.2.10. Yapay bağışıklık sistemi algoritması.....	61
3.2.11. Yayılmacı ot algoritması.....	62
3.2.12. Genetik algoritma.....	63
3.2.12.1. Genetik algoritma aşamaları.....	64
3.2.12.2. Genetik algoritma işlem basamakları.....	66
3.3. Mikroşerit Antenlerin Optimizasyonu Alanında Yapılan Çalışmalar	71
4. ADYA TASARIMI VE PERFORMANSININ ARTIRILMASI.....	75
4.1. Giriş.....	75
4.2. Geliştirilen ADYA Tipleri.....	78
4.3. Simülasyon Ayarları ve Genetik Algoritmanın Probleme Uygulanması.....	83
4.3.1. Mikroşerit hat ilaveli ADYA tipi antenler.....	88
4.3.1.1. Mikroşerit hat ilaveli açıklığı doğrusal daralan yarık anten	88
4.3.1.2. Mikroşerit hat ilaveli açıklığı eksponansiyel daralan yarık anten.....	90
4.3.1.3. Mikroşerit hat ilaveli açıklığı dairesel daralan yarık anten	92
4.3.1.4. Mikroşerit hat ilavesiz açıklığı dairesel daralan yarık anten.....	94
4.3.1.5. Mikroşerit hat ilavesiz açıklığı eksponansiyel daralan yarık anten.....	96
4.4. Üretim Süreci.....	100
4.5. Deneysel ölçümler ve simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırma.....	103
5. SONUÇLAR, DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER.....	106
5.1. Sonuçlar.....	106
5.2. Değerlendirme.....	108
5.3. Öneriler.....	111
KAYNAKLAR.....	113



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
2.1 Dikdörtgensel mikroşerit anten geometrisi	8
2.2 Dikdörtgensel MŞA ışıma yapan bölgeler	8
2.3 MŞAlerde ortaya çıkan dalgalar	9
2.4 Koaksiyel hat ile doğrudan besleme	13
2.5 Mikroşerit hat ile doğrudan besleme	13
2.6 MŞA dolaylı besleme yöntemleri	14
2.7 Farklı ADYA profilleri	15
2.8 Kenarlara atılan kesiklere örnekler	19
2.9 Vivaldi anten geometrisi	20
2.10 Daire dilimi şeklinde iletken ilaveli Vivaldi anten	21
2.11 Çok parçalı daralma profilli Vivaldi	21
2.12 Zıt kutuplu Vivaldi anten geometrisi	22
2.13 Dengelenmiş zıt kutuplu Vivaldi anten geometrisi	23
2.14 Tavşan Kulağı Tarak Şekli Vivaldi	24
2.15 MŞA analiz yöntemleri	26
2.16 Saçaklar nedeniyle oluşan efektif anten boyu	27
2.17 z doğrultusuna dik olan E alan şiddeti değişimi	28
2.18 Işıma yapan bölgelerin empedans olarak gösterimi	28
2.19 İletim hattı modeli	29
2.20 Kavite modeli	30
2.21 MNM modeli	34
2.22 Dikdörtgensel bir bölge üzerinde integral alanlarının gösterimi	36
2.23 Analitik türev operatörünün sayısallaştırılması	37
2.24 FDTD birim hücresi	38
2.25 FEM doğrusal ve eğrisel değişim gösteren fonksiyonlar	40
2.26 2B dairesel düzlemde elemanların gösterimi	41
2.27 Üçgensel e'nci eleman üzerindeki baz fonksiyonları	42
3.1 Genetik algoritma aşamaları	64
3.2 Rulet çarkı seçim mekanizması	68
3.3 Çaprazlama mekanizması	69
3.4 Birden fazla noktada çaprazlama	70

3.5	Mutasyon mekanizması	70
4.1	Tasarlanan antenlere ait geometriler	80
4.2	Yarım halka şekilli besleme mekanizması	80
4.3	Kullanılan SMA konnektörlere ait bilgiler	81
4.4	Açıklığı doğrusal daralan yarık anten parametreleri	82
4.5	Açıklığı dairesel daralan yarık anten parametreleri	82
4.6	7.5 GHz frekansı için $S_{11}(dB)$ değişim grafiği	85
4.7	Anten 1 optimizasyon yakınsama grafiği	88
4.8	Anten 1 simülasyon sonuçları	89
4.9	Anten 2 optimizasyon yakınsama grafiği	90
4.10	Anten 2 simülasyon sonuçları	90
4.11	Anten 3 optimizasyon yakınsama grafiği	92
4.12	Anten 3 simülasyon sonuçları	92
4.13	Anten 4 optimizasyon yakınsama grafiği	94
4.14	Anten 4 simülasyon sonuçları	94
4.15	Anten 5 optimizasyon yakınsama grafiği	96
4.16	Anten 5 simülasyon sonuçları	96
4.17	Anten 1 tasarımına ait ölçüler	98
4.18	Anten 2 tasarımına ait ölçüler	98
4.19	Anten 3 tasarımına ait ölçüler	99
4.20	Anten 4 tasarımına ait ölçüler	99
4.21	Anten 5 tasarımına ait ölçüler	99
4.22	a parametresindeki 0.05 mm değişimlerin S_{11} üzerindeki etkileri ...	100
4.23	b parametresindeki 0.05 mm değişimlerin S_{11} üzerindeki etkileri ...	100
4.24	w parametresindeki 0.05 mm değişimlerin S_{11} üzerindeki etkileri ...	101
4.25	Anten 1 üretilmiş hali	101
4.26	Anten 2 üretilmiş hali	102
4.27	Anten 3 üretilmiş hali	102
4.28	Anten 4 üretilmiş hali	102
4.29	Anten 5 üretilmiş hali	102
4.30	Anten ölçümü için kullanılan deneysel düzenek	103
4.31	Anten 1 için simülasyon ile deneysel ölçümlerin karşılaştırılması ..	103
4.32	Anten 2 için simülasyon ile deneysel ölçümlerin karşılaştırılması ..	104
4.33	Anten 3 için simülasyon ile deneysel ölçümlerin karşılaştırılması ..	104

4.34 Anten 4 için simülasyon ile deneysel ölçümlerin karşılaştırılması ..	104
4.35 Anten 5 için simülasyon ile deneysel ölçümlerin karşılaştırılması ..	104
4.36 Bire bir aynı dört antenin lehimleme sonrası karşılaştırılması	105



ÇİZELGELER LİSTESİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Metasezgisel optimizasyon algoritmaları	49
4.1 Eksponansiyel daralma profiline ait parametreler	82
4.2 Her bir anten tipine ait aralıklar	84
4.3 GA parametreleri ve değerleri	86
4.4 Anten 1 optimizasyon çizelgesi	89
4.5 Anten 2 optimizasyon çizelgesi	91
4.6 Anten 3 optimizasyon çizelgesi	93
4.7 Anten 4 optimizasyon çizelgesi	95
4.8 Anten 5 optimizasyon çizelgesi	97
4.9 Deneysel sonuçlara ait özet çizelgesi	105

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

f_r	Rezonans frekansı
ϵ_r	Tabanın dielektrik sabiti
h	Taban kalınlığı
ϵ^*	Dielektrik malzemenin kompleks permitivitesi
ϵ'	Dielektrik sabiti
ϵ''	Kayıp faktörü
ϵ''/ϵ'	Kayıp tanjantı
$\tan \delta$	Kayıp tanjantı
Ω	Ohm
a	Anten Eni
b	Anten Boyu
w	Daralma Profilinin İletken Genişliği
Q	Kalite Faktörü (Quality Factor)
Q_I	Işıma Kalite Faktörü
Q_U	Uzay Dalgası Işıması
Q_Y	Yüzey Dalgası Işıması
W_T	Toplam Depolanan Enerjiyi
P_U	Yzaya Doğrudan Işıyan Dalgaın Gücü
P_Y	Yüzey Dalgasının Gücü
h	Taban Yüksekliği
σ	Yama İletkenliği

Kısaltmalar

ADYA Açıklığı Daralan Yarık Anten

ADODYA Açıklığı Doğrusal Daralan Yarık Anten

ADADYA Açıklığı Dairesel Daralan Yarık Anten

AEDYA Açıklığı Exponansiyel Daralan Yarık Anten

ASYA Açıklığı Sabit Yarık Anten

BG Band Genişliği

BLOS Ufuk Ötesi (Beyond Line-Of-Sight)

CST Computer Simulation Technology

EM Elektromanyetik

FDTD Zamanda Sonlu Farklar (Finite Difference Time Domain)

FEM Sonlu Elemanlar Metodu (Finite Element Method)

GPS Küresel Konumlama Sistemi

HFSS High Frequency Structure Simulator

İHA İnsansız Hava Aracı

MoM Moment Metodu (Method of Moments)

PCB Baskı Devre Kartı (Printed Circuit Board)

SATCOM Uydu Haberleşmesi (Satellite Communications)

$S_{11}(dB)$ desibel Olarak Geri Dönüş Kaybı

SMA Konnektör Sub-Miniature versiyon A Tipi Konnektör

VSWR Duran Dalga Oranı (Voltage Standing Wave Ratio)

TACSAT Taktik Saha Uydu Haberleşmesi

UAV İnsansız Hava Aracı (Unmanned Air Vehicle)

UGB Ultra Geniş Band

UWB Ultra Geniş Band (Ultra Wide Band)

1. GİRİŞ

Mikroşerit Anten kavramı, 1953 yılında Deschamps tarafından yapılan çalışmalara kadar gitmektedir (Deschamps, 1953). Deschamps, çalışmasına “Mikroşerit Mikrodalga Antenler” adını vermiş ve böylece literatüre, mikroşerit anten kavramı girmiştir. Aynı yıllarda Gutton and Baissinot tarafından da çalışmalar yürütülmüş, 1955 yılında da tasarladıkları antenin patentini almışlardır (Gutton ve Baissinot, 1955). Ortaya atıldığı günden itibaren çalışmalar devam etmiş olsa da, literatürdeki bir sonraki çalışma, 1970’lerde Byron tarafından dizi antenlerde kullanımı alanında sunulmuştur (Byron, 1972). Diğer bir çalışma da dikdörtgensel ve dairesel mikroşerit antenler hakkında, literatürde önemli veri kaynaklarından birisi olarak görülen ve Howell tarafından sunulan çalışma olmuştur (Howell, 1972). 1973 yılında Munson tarafından roketlerde ve füzelerde ince profilli mikroşerit antenlerin kullanılabileceği gösterilmiş ve Munson, geliştirdiği antenin patentini almıştır (Krutsinger ve Munson, 1973). Mikroşerit antenlerin havacılık ve uzay çalışmalarında kullanılabilmek potansiyeli farkedilmiş ve Weinschel tarafından roketlerde kullanılmak üzere S-Band frekanslarında çalışan mikroşerit antenler tasarlanmıştır (Weinschel, 1973). Onu, KC-135 tanker uçakları ile ATS-6 uydusu arasındaki L-Band frekansı haberleşmesinde kullanılmak amacıyla tasarladığı yüzeye uyumlu anten dizileriyle Sanford (Sanford, 1974) ve füze yüzeyine monteli ince profilli elektriksel olarak küçük anten tasarımıyla Garwin (Garvin ve dig., 1975) izlemiştir. Aynı yıllarda diğer araştırmacıların çalışmalarıyla mikroşerit alanındaki çalışmalar hız kazanmıştır (Howell, 1975; Weinschel, 1975; James ve Wilson, 1975). Denilebilir ki, Munson’un çalışmaları, mikroşerit antenler alanındaki çalışmaları ivmelendirmiş ve araştırmacılara ilham vermiştir.

Halihazırda, başta askeri haberleşme uygulamaları olmak üzere, mobil platformlarda genişbantlı ve yüksek veri hızlarında ufuk ötesi (Beyond Line Of Sight - BLOS) haberleşmesi yapabilmeye olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Günümüzde kullanılmakta olan UHF bandı taktik uydu haberleşmesi (TACSAT)

teknolojisi, operasyonel ihtiyaçların bir b6l6m6n6 karşılamaktadır. UHF trasponder bulunduran uyduların az sayıda oluşu ve devre kiralama maliyetlerinin y6ksek oluşu gibi nedenlerden 6t6r6 yeni nesil ufuk 6tesi haberleşme alanında X/Ku/Ka Band teknolojilerinin kullanılacağı değerlendirilmektedir.

6zellikle, mikrodalga teknolojilerindeki gelişmeler, bu cihazlarla kullanılacak antenlerin hem daha fazla band genişliğine sahip olmalarını, hem de olabildiğince k66k olmalarını gerektirmektedir. Dolayısıyla, g6n6m6zde çalışmalar bu iki eksen 6zerinde, yani y6ksek bandgenişliğine sahip ve boyutları k66lt6lm6ř antenler 6retme alanında y6r6t6lmektedir. Bunlara ilaveten, 6retim kolaylığı da anten tasarımı açısından g6z 6n6nde bulundurulacak 66nc6 bir fakt6r olarak sayılabilir.

Bu 6 hedefe ulaşmaya y6nelik en iyi seimlerden birisi Açıklığı Daralan Yarık Antelerdir (Tapered Slot Antennas). Açıklığı Daralan Yarık Anten (ADYA) tipi antenler, y6ksek bandgenişlikleri ve hafiflikleri sayesinde hava ve uzay platformlarında kullanılabilecek en iyi adaylardan birisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca, ADYA tipi antenlerin 6retim s6releri kolay ve d6ř6k maliyetlidir. ADYA tipi antenler, entegre devrelerle uyumlu olarak ve antene gelen besleme ile aynı anda 6retilibilmeleri açısından oldukça avantajlıdır. ADYA tipi antenler, genişbantlı, yeterli anten kazancı olan, simetrik ışıma desenli ve uygun polarizasyonlu antenler olarak b6y6k potansiyele sahiptirler.

ADYA tipi antenlerin ayırmedici 6zellikleri, yarık ağzından besleme noktasına doğru açıklığı giderek daralan ve antenin ışıma yapan b6lgesini oluşturan bir yarıktan oluşmalarıdır. Antenlerin ışıma yapan b6l6mlerine ait daralma profilleri, ADYA tipini belirler. Bantgenişliğini artırmaya y6nelik çalışmalardan bazıları da daralma profili 6zerine olmuştur.

İlk ADYA tipi antenler 1979 yılında literat6rde yer almaya başlayan Açıklığı Doğrusal Daralan Yarık Anten (ADODYA) (Prasad ve Mahapatra, 1979) ile Vivaldi olarak bilinen Açıklığı Eksponansiyel Daralan Yarık Anten (AEDYA) (Gibson, 1979) olmuştur.

Bu profiller kısa zamanda yaygın olarak literat6rde kullanım bulmaya başlamıştır. Gazit, Gibson'un ortaya koyduğu ilk tasarımı 1988 yılında daha

da geliştirmiş, zıt kutuplu yarık hattı geçişi sunmuştur. Gazit'in çalışması da, Langley ve ark. tarafından 1996 yılında daha da geliştirilerek, çapraz polarizasyon sorununu çözmek amacıyla Dengelenmiş Zıt Kutuplu Vivaldi literatüre kazandırılmıştır (Langley ve dig., 1996). Tek parçalı eksponansiyel daralma yerine hibrit daralma profilleri de geliştirilerek kazanç performansının, klasik Vivaldi antene göre artırıldığı örnekler de mevcuttur (Fisher, 2000). Literatürdeki tüm bu çalışmaların sonunda asli olarak üç temel tip Vivaldi anten ortaya çıkmıştır: Açıklığı Daralan Vivaldi, Zıt Kutuplu Vivaldi, Dengelenmiş Zıt Kutuplu Vivaldi. ADODYA tipi antenler alanında da çalışmalar devam etmiştir. Örneğin, Simons ve ark. tarafından uydu haberleşmesi için X-Band ve Ka-Bandında çalışan bir ADODYA tipi anten tasarlanmıştır.

ADYA tipi antenler alanındaki gelişmelerden bazıları da dielektrik malzeme seçimi konusunda olmuştur. Taban malzemesi olarak FR4 kullanılması ile baskı devrelerde kolayca üretilebilmesinin hedeflendiği görülmüştür. Örneğin, Hood ve ark. tarafından FR4 kullanılarak küçük boyutlu bir Vivaldi anten tasarlanmıştır (Hood ve dig., 2008). Dielektrik taban olarak FR4 kullanılarak yapılan çalışmalar kadar bir diğer önemli çalışma da, Vivaldi tip antenleri tasarlamak için HFSS (High Frequency Structure Simulator) yazılımının kullanılmaya başlanmasıdır (Che ve dig., 2010). 2000'li yıllardan itibaren, mikroşerit antenlerin analizleri için numerik yöntemler yaygın olarak kullanılmaya başlanmış ve kullanılan yazılımlarla mikroşerit antenlerin davranışları gerçeğe yakın bir şekilde izlenebilmiştir.

Mikroşerit antenler tasarlanırken, matematiksel olarak nasıl modellenebilecekleri konusu da göndeme gelmiştir. İlk çalışmalar iletim hatları ile benzerlik göstermeleri nedeniyle, dikdörgensel mikroşerit antenleri, iletim hatları olarak modelleme şeklinde olmuştur (Munson, 1974; Derneryd, 1975). Daha sonra diğer araştırmacılar da bu alanda çalışmış ve kavite modellemesi (Lo ve dig., 1979) ile Çok Girişli Ağ Modeli (MNM) (Benalla ve Gupta, 1988) yöntemleri ortaya atılmıştır. Analitik yöntemlerin, sadece düzenli ve nispeten basit geometrilere uygulanabilmeleri ve karmaşık geometriler için hatalı sonuçlar vermeleri sonucu, numerik yöntemler önem kazanmaya başlamıştır. Zamanda Sonlu Farklar (FDTD) ve Sonlu Elemanlar Metodu (FEM) ve Moment Metodu (MoM) gibi yöntemler, ADYA tipi antenler de

dahil olmak üzere mikroşerit antenlerin analizi için başarıyla kullanılmaktadır.

ADYA alanındaki diğer bazı çalışmalar da bu antenlerin optimizasyonları üzerine olmuştur. Bunun için önce antenlerin parametrik analizleri yapılmış ve her bir parametrenin anten üzerine olan bireysel etkileri incelenmiştir. Çoğunlukla belirli bir optimizasyon algortiması kullanılmamış ancak parametrelerin etkilerine bakarak istenen özelliklerde anten tasarımı elde edilmeye çalışılmıştır. Bir optimizasyon algoritması kullanılarak yapılan çalışma sayısı literatürde oldukça sınırlı sayıdadır.

NASA tarafından Space Technologies (ST) 5 programında, X-Band Uydu Haberleşme alanında kullanılabilecek heliks tipi bir anten, Genetik Algoritma ile optimize edilerek tasarlanmıştır (Lohn ve dig., 2003; Hornby ve dig., 2006). Ancak, bir optimizasyon algoritması ile belli bir frekans bölgesinde çalışacak ADYA tipi anten tasarımı alanında yapılmış herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu nedenle bu alandaki boşluğu doldurmak üzere ADYA tipi antenler üzerine bir meta-heuristic (metasezgisel) optimizasyon algoritması uygulanmış ve sonuçta X-Band Uydu Haberleşme alanında kullanılabilecek ve 7250 - 7750 MHz aralığında bir alıcı anten tasarlama hedefi konmuştur.

Çalışma sonucunda hava veya uzay platformlarında kullanılabilecek ölçüde hafif, küçük ve FR4 gibi ucuz bir malzemeden baskı devre teknikleri kullanılarak pratik bir şekilde üretilebilen; ayrıca UGB özelliklerinde ve tüm frekans aralığında en az 4.5 dB kazanç sağlayan ve en az %60 ışıma verimine sahip bir anten elde etme hedefiyle bu tez çalışması yapılmıştır. Bunun için doğrusal, eksponansiyel ve yeni geliştirilen dairesel daralma profilleri incelenmiştir.

Bu tezde, Bölüm 2’de mikroşerit antenlerin kullanım alanları ve özellikleri kısaca tanıtılmış; bandgenişliğini artırmak için geliştirilmiş yeni geometrilerden ve Mikroşerit Antenleri analiz etmek için kullanılan yöntemlerden bahsedilmiştir.

Bölüm 3’te genel olarak optimizasyon konusu verildikten sonra, ADYA tipi antenlerin optimizasyonu için kullanılabilecek metasezgisel optimizasyon yöntemleri sunulmuştur. Bu metasezgisel yöntemlerden Genetik Algoritma, bu tez kapsamında tasarlanan antenlerin performansını artırmak için kullanılmıştır. Bu nedenle Genetik Algoritma işlem basamakları sunulduktan sonra, Bölüm

4'te ADYA tipi antenlerin performanslarını artırmaya yönelik HFSS yazılımı içerisindeki uygulaması gösterilmiştir.

Bölüm 5'te optimizasyonu tamamlanan ve hedeflenen özellikleri barındıran ADYA tipi antenlerin üretimi yapılmış olup, üretim sürecine ilişkin bulgular paylaşılmıştır. Üretilen antenlerin deneysel ölçümleri ile simülasyon sonuçları karşılaştırılarak, yapılan gözlemler, elde edilen bulgular ortaya konmuştur.



2. MİKROŞERİT ANTENLER

2.1. Mikroşerit Antenlerin Kullanım Alanları

Mikroşerit antenlerin küçük boyutlu olmaları, ısıma desenlerinin istenildiği gibi kontrol edilebilmelerini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, dizi anten oluşturmak suretiyle ısıma desenleri kontrol edilebilir hale gelmiştir. Mikroşerit antenlerin bir avantajı da, anten dizilerinin üretiminin oldukça kolay olmasıdır. Her bir anten elemanının beslenmesi için gerekli olan besleme ağlarının da kolayca üretilebilmeleri ve antenlerin baskı devre üreten makinalarda üretilebilmeleri, imalatlarının kolay ve ucuz olmasını mümkün kılar. Ayrıca, ortaya çıkan antenler, titreşime ve sarsıntıya karşı dayanıklıdır.

Elektronik cihazların günümüzde küçülmeye devam etmesi ile, anten tasarımcılarının da antenlerini küçültmeleri gerekmektedir. Bu açıdan, hafif, ucuz ve yüzeylere kolayca uyumlanabilen mikroşerit antenler, elektronik devrelerin olduğu baskı devrelerin hemen yanbaşıda anten beslemeleriyle birlikte aynı anda üretilebilmeleri sayesinde oldukça avantajlı duruma gelmiştir. Bununla birlikte, mikroşerit antenlerin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunların başında düşük kazançlı olmaları ve antenlere yüksek güç bağlanamamasıdır. Ayrıca, yüzey dalgalarının uyartılması da bir dezavantaj olarak görülebilir. Bunlara ilave olarak, bantgenişliğinin dar olması ve ısıma veriminin düşük olması da mikroşerit anten çalışmalarının ilk örneklerinde görülmüş, fakat bu dezavantajların günümüzde oldukça azaldığı ve bantgenişliği ve ısıma verimini artıran tasarımların literatürde yer aldığı görülmektedir (Böylelikle yukarıda sayılan özellikleri sayesinde mikroşerit antenler, pek çok alanda kullanılagelmiştir).

Uygulama alanlarından en öne çıkan üç tanesi havacılık, uzay çalışmaları

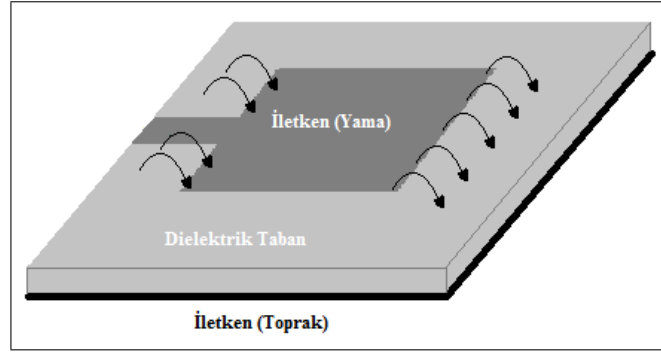
ve tıp alanları olmuştur. Mobil ve uydu haberleşmesinde, küçük, ince, hafif antenlerin kullanıma ihtiyacı vardır. Mikroşerit antenler, bu özelliklerin hepsini birden sağlamaktadır. Kolaylıkla füzelerin ve roketlerin üzerine monte edilebilmekte ve aerodinamik özellikleri kaybettirmeden kullanılabilirler. Ayrıca, mikroşerit antenler günümüzde uçakların, kara ve deniz taşıtlarının konumlarının belirlenebilmesi için de başarıyla kullanılmaktadır. Yine havacılık alanındaki bir diğer uygulama da, radardır. Mikroşerit antenlerin dizi haline getirilmesinin kolaylığı sayesinde, düşük maliyetli ve kolay tasarlanabilir anten dizileri, radar uygulamalarında kullanılmaktadır.

Tıp alanındaki uygulamalara ise giyilebilir teknoloji alanındaki kullanımları örnek verilebilir. Hafifliği ve inceliği sayesinde hastaların üzerinde sıkıntı vermeden çalışabilmektedir. Diğer bir uygulama olarak da, kanser tespit ve tedavisinde kullanım alanı bulmaktadır. Antenlerin hafif ve küçük olmaları sayesinde, doktorlar tarafından kolayca hareket ettirilebilmekte ve tedavi süreci hızlandırılabilir.

2.2. Mikroşerit Antenlerin Özellikleri

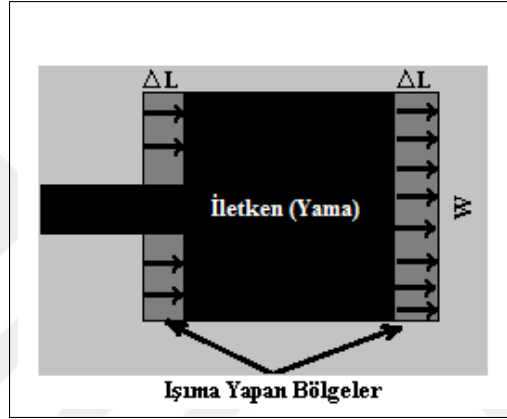
Mikroşerit bir cihaz en basit anlatımla, iki paralel iletken tabakanın arasındaki ince bir dielektrik katmandan oluşan bir yapı biçiminde ifade edilebilir. Bu iletkenlerden altta bulunan tabaka toprak olarak adlandırılırken, üstteki ise yama olarak adlandırılır. İlk mikroşerit anten tasarımlarında, toprak olarak görev yapan iletken, yamaya göre oldukça büyük boyutlarda seçilmiştir. Enerjinin antene ulaştırılması için gerekli olan yola besleme denir. Şekil 2.1’de en basit mikroşerit antenlerden biri olan dikdörtgensel mikroşerit anten ve antenin kenarındaki elektrik alanlar gösterilmiştir.

Dikkat edilirse, alan çizgileri, kenarlarda saçaklar oluşturmakta ve yamadan toprağa doğru olan alanlardan bir kısmı hava üzerinden kaçaklar meydana getirmektedir. Bu kaçaklar ise antenden uzaya yayılmakta ve mikroşerit antenlerin ışıyan kısmını oluşturmaktadır. Antenin üstten görünüşü ve ışıma yapan bölgeler Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Aslında, yamanın diğer kenarlarında da saçaklar bulunmakta, ancak birbirleriyle 180 derece faz farkı oluşturdıklarından



Şekil 2.1. Dikdörtgensel mikroşerit anten geometrisi

birbirlerinin alanlarını yok etmektedir. Sadece Şekil 2.2’de gösterilen alanlar birbirleriyle aynı yönde kaldıklarından ısıma yapabilmektedirler.



Şekil 2.2. Dikdörtgensel MŞA ısıma yapan bölgeler

Toprak olarak görev yapacak iletkenin yamaya göre oldukça büyük olmasının nedeni, toprak düzlemi olarak kabul edilen yüzeyin altındaki iletkenlerden kaynaklı oluşabilecek kuplajı engellemek ve antenin diğer etkenlerden korunmasını sağlamaktır (Guha ve Antar, 2011).

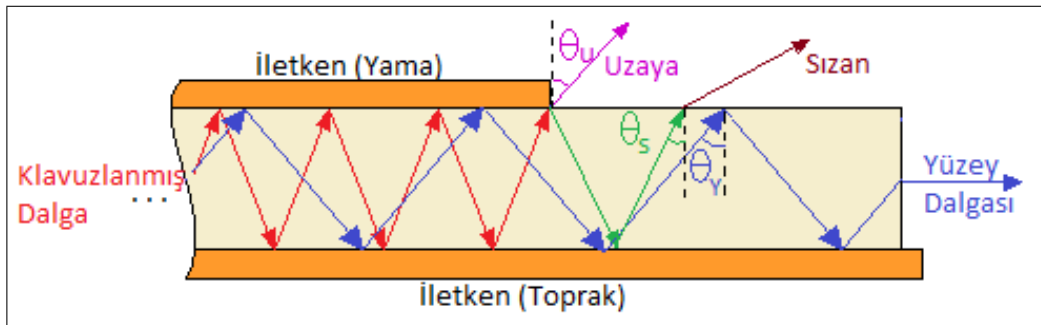
Dielektrik olarak kullanılabilen malzemeler çok çeşitli olabilmekte, dielektrik sabiti 1.7 ile 25 arasında değerler alabilmektedir (Traut, 1980; Olyphant Jr ve Nowicki, 1980). Ayrıca eğer, taban olarak hava kullanılacak olursa, dielektrik sabiti 1’e yakın değerlerde olabilir.

Mikroşerit antenler, düzlemsel rezonans kaviteleri olup kenarlarından sızdırırlar ve ısıma yaparlar (Milligan, 2005). Bir yama, rezonans kavitesi olarak rezonans frekansında çalıştırıldığında, empedans uyumu gerçekleşir ve anten maksimum verimde ısıma yapar. Bir iletim hattının ısıması ise oldukça azdır. Genelde, açık uçlardan veya köşe gibi süreksizliklerden ısıyabilir. Bu

durumda, iletim hattı ile beslenen bir yama, kenarlar boyunca oluşmuş bir yük ile sonlandırılmış bir iletim hattına benzer.

Mikroşerit antenlerde ışıma, yama üzerinde indüklenen elektrik akımları veya yama çevresinde indüklenen manyetik akımlar ya da dielektrik tabakanın içinde indüklenen yüzey dalgaları nedeniyle oluşur. Elektromanyetik dalgalar, dielektrik sabiti ϵ_r olan bir malzeme içerisinde boşluktaki dalgaboyunun $1/\sqrt{\epsilon_r}$ katı dalgaboyu ile hareket eder. Dielektrik tabakanın kenarlarına ulaşan yüzey dalgaları, bir süreksizlikle karşılaşır ve kenarlardan ışıma yaparlar. Çoğu uygulamada, yüzey dalgalarının ışıma verimini düşürdükleri değerlendirildiğinden, istenmeyen dalgalar olarak ele alınıp engellenmeye çalışılır. Bununla beraber, bazı durumlarda, yüzey dalgalarının ışımasının pozitif katkı sağlayacağı değerlendirilir ve ışıma yapması istenebilir (Milligan, 2005). Yüzey dalgalarının kullanımına örnek olarak Vivaldi anten verilebilir.

Mikroşerit antenlerde olan dalgalar Şekil 2.3'de gösterilmiştir (Bhunia, 2013). Normalde istenmeyen yüzey dalgaları, engellenmesi çok zor olan dalgalardır. Dielektrik taban kalınlığı sıfırın dışında herhangi bir değer alınca alt kesim frekansı olmayan TM^{10} modunda yüzey dalgaları ortaya çıkmaya başlamaktadır. Yüzey dalgalarının istenmemesinin nedeni, anten verimini düşürmesi, bantgenişliğini azaltması ve çapraz polarizasyon seviyelerini artırması sonucu antenin çalışabileceği frekans bölgesini daraltmasıdır. Yüzey dalgaları nedeniyle kompakt mikroşerit anten tasarımı ve antenlerin mikrodalga devreleriyle entegre edilebilmesi güçleşmektedir.



Şekil 2.3. MŞAlerde ortaya çıkan dalgalar

Yüzey dalgaları kaybolan enerji değildir; bilakis, kontrolsüz yayılan enerjidir. Yüzey dalgaları iletken yüzeylere dik doğrultuda eksponansiyel olarak sönümlenirken, yüzeylere paralel doğrultuda yayılmaya devam eder.

Yüzey dalgalarını kontrol altına almak için dielektrik tabanı ince tutmak gerekir. Dielektrik taban yüksekliği fiziksel olarak veya dielektrik sabitinin artması sonucu elektriksel olarak dalgaboyu cinsinden artmış olunca, yüzey dalgalarına ayrılan güç miktarı artmaya başlar. Bu durumda antene gelen gücün büyük bölümü uzaya kontrolsüz bir şekilde yayılmaya başlar. Bu durumda, mikroşerit antenlerde empedans bantgenişliği hesaplanırken ışıma verimi de dikkate alınmalı ve antene gönderilen gücün ne kadarının doğrudan ışıma olarak uzaya yayınlandığına bakılmalıdır. Ancak Vivaldi gibi antenlerde, eğer asli olarak kullanılan bileşen yüzey dalgaları ise, bu defa yüzey dalgalarının kontrollü olarak uzaya yayılmasına çalışılmalıdır.

Verimi ifade etmenin yollarından birisi de “Işıma Kalite Faktörü”dür. Işıma Kalite Faktörü, Toplam Kalite Faktörü ifadesi içinde kayıplar çıkınca geriye kalan ve ışımaya ayrılan kısmına ait kalite faktörüdür. *Kalite Faktörü* (Q), depolanan enerjinin harcanan güce oranıdır (Guha ve Antar, 2011). İdeali, bu harcamanın, ışıma şeklinde olmasıdır. Büyük dielektrik sabiti olan bir madde, düşük dielektrik sabiti olan bir başka malzemeye göre daha fazla enerji depolayabilir ve sonuçta daha büyük Q değerine sahip olur. Buna göre, dielektrik taban olarak kullanılabilecek en iyi malzeme havadır. Ancak pratikteki zorluklar nedeniyle, ona en yakın dielektrik sabiti olan köpüklü polietilen veya polistren kullanılabilir. Çünkü bu malzemeler, zaten büyük bölümü hava olan, sadece içine az bir miktar düşük dielektrik sabitli plastik eklenmiş malzemelerdir. Buna göre, eğer düşük dielektrik sabiti olan bir taban kullanılırsa, Kalite Faktörü de düşük olacak, yani depolanan enerjinin harcanan güce oranı düşük olacak, yani güç depolanmaktansa harcanacaktır. Bu durumda ışıma veriminin de yüksek olması beklenir. Sonuç olarak, antenin verimi ile bantgenişliği birbirine zıt yönlerde hareket edecek, birini artırmak için diğlerinden fedakarlık yapılması gerekecektir (Guha ve Antar, 2011).

Işıma Kalite Faktörü (Q_I), Uzay Dalgası ışıması (Q_U) ve Yüzey Dalgası ışıması (Q_Y)’nin kombinasyonu olup, $\omega = 2\pi f$ ile ifade edilen açısal frekansı, W_T toplam depolanan enerjiyi, P_U ve P_Y sırasıyla uzaya doğrudan ışıyan dalganın gücü ve yüzey dalgasının gücü olmak üzere, Denklem (2.1)’deki gibi ifade edilebilir (Milligan, 2005):

$$\frac{P_U + P_Y}{\omega W_T} = \frac{P_U}{\omega W_T} + \frac{P_Y}{\omega W_T} = \frac{1}{Q_U} + \frac{1}{Q_Y} = \frac{1}{Q_I} \quad (2.1)$$

İşıma Kalite Faktörü (Q_I) aslında, toplam depolanan enerjinin açılal frekans başına ortalama ışıma gücüne oranını gösteren bir ölçüdür. Bu durumda bantgenişliği $\frac{1}{Q_I}$ ile doğru orantılıdır. Yani, antene gelen enerji, dar bir frekans bölgesinde ışıma için kullanılıyorsa (yani bantgenişliği dar ise), frekans başına ortalama güç fazla olacak (yani güç dar bir frekans bölgesine yoğunlaşmış); bu durumda da Q_I değeri büyük olacaktır.

Mikroşerit antene gelen gücün bir kısmı ışımaya dönüşürken ($P_U + P_Y$), bir kısmı da kaybedilecektir. Bu kayıpların bir kısmı dielektrik sabitinin kayıp tanjantı nedeniyle, diğer bir kısmı da yamanın elektriksel direnci nedeniyle kayıp şeklinde olacaktır. Bu yeni iki terim de dahil edilerek daha genel bir Kalite Faktörü ifade edilirse son hali Denklem (2.2) gibi olacaktır:

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_U} + \frac{1}{Q_Y} + \frac{1}{Q_\delta} + \frac{1}{Q_\sigma} \quad (2.2)$$

Bu son formüldeki, Q_δ ve Q_σ için karşılıklar Denklem (2.3)'de verilmiştir (h = taban yüksekliği, $\tan \delta$ = kayıp tanjantı, σ = yama iletkenliği).

$$\frac{1}{Q_\delta} = \frac{1}{\tan \delta} \quad \frac{1}{Q_\sigma} = h \sqrt{\pi f \mu_0 \sigma} \quad (2.3)$$

Bu durumda, eğer ince bir dielektrik taban kullanılırsa, bu defa da $\frac{1}{Q_\delta}$ ve $\frac{1}{Q_\sigma}$ ifadeleri, $\frac{1}{Q_I}$ ifadesiyle başa baş olmaya başlayacak ve ışıma verimini oldukça düşürecektir. Sonuç olarak, dielektrik taban yüksekliğini düşürmek, bantgenişliğini de düşürecektir.

Mikroşerit antenlerde bantgenişliğini artırmak güç bir işlemdir. Bu alanda elli yıldan fazla araştırmalar yapılmış ve halen yapılmaya devam etmektedir. Bantgenişliğini kontrol eden asli faktörler, yama ve toprak arasındaki mesafe, aradaki tabanın dielektrik sabiti ve antenin verimidir. Buna tasarlanan antenin geometrisi de ilave edilebilir. Çünkü bazı geometriler, diğerlerine göre daha fazla bantgenişliği sağlamaktadır.

Mikroşerit antenler, kavite antenlerdir ve kavite için belirli bir hacme

ihtiyaç duyarlar. Bantgenişliğinin (diğer faktörler hariç tutulursa) kabaca yama ile toprak arasındaki hacimle orantılı olduğu söylenebilir (Guha ve Antar, 2011). Dielektrik taban, yüksek tutulduğunda daha fazla bantgenişliği elde etmek mümkündür. Ancak, yükseklik belli bir değeri aşınca, yüksek dereceli modlar olarak ifade edilen, temel mod dışındaki modlar da uyarılmaya başlar. Aynı zamanda da malzemeden kaynaklanan kayıplar da artmaya başlar.

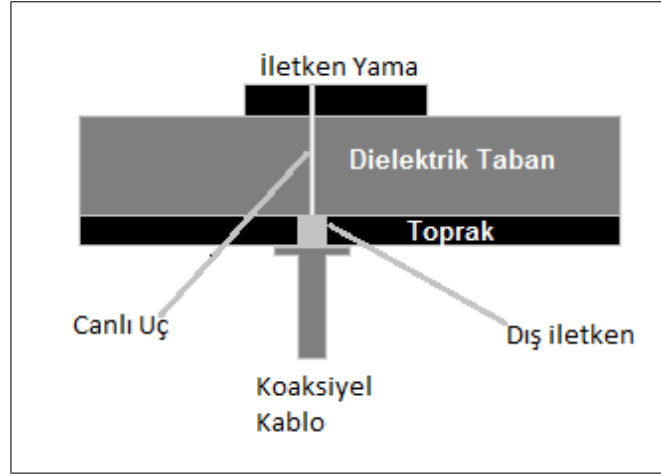
Sonuçta, mikroşerit antenler dielektrik taban yüksekliği açısından iki limit değer arasındadır. Bunlardan yüksek değerli modları uyarmadan, tek bir tane en düşük modu üretecek yükseklik üst limiti belirler. Dielektrik taban yüksekliği giderek azaltılmaya başlandığında bantgenişliği de azalmaya başlayacak, bir noktadan sonra kayıplar daha belirgin olmaya başlayacak ve bantgenişliği sabit kalırken, ışıma veriminin kayıplar nedeniyle olağanüstü azaldığı görülecektir (Milligan, 2005). Yani alt limiti de, bantgenişliğinden ne kadar fedakarlık edileceği ve ışıma veriminin ne kadar düşeceği belirler.

Mikroşerit Antenler, doğrudan beslemeli ve dolaylı beslemeli olmak üzere iki şekilde beslenebilir. Besleme hattı, doğrudan temas veya dolaylı enerji aktarımı ile antenlerin ışıma yapmasını sağlayan güç aktarım vasıtasıdır. En popüler besleme teknikleri olarak dört yöntem sayılabilir. Bunlar, koaksiyel hat ile veya mikroşerit hat ile doğrudan besleme; açıklık kuplajlı veya yakınlık kuplajlı şeklide de dolaylı besleme yöntemleridir (Garg ve dig., 2001).

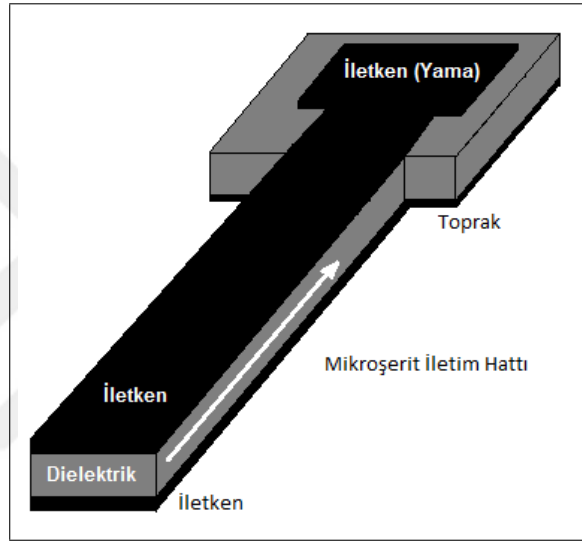
Doğrudan besleme yöntemlerinden koaksiyel hat ile beslemeye ait gösterim Şekil 2.4’de sunulmuştur. Dış iletkeni, toprak düzlemine; içindeki canlı uç da iletken yamaya temas etmektedir.

Diğer bir doğrudan besleme yöntemi de mikroşerit hat ile beslemedir. Mikroşerit hat ile beslemeye ait gösterim ise Şekil 2.5’de sunulmuştur. En basit besleme yöntemlerinden birisi olup, mikroşerit antenin devamı gibi, antenle aynı anda baskı devre üzerinde üretilebilir.

Anten performansını artırmak amacıyla, doğrudan besleme yöntemlerine nazaran daha karmaşık olan dolaylı besleme yöntemleri tercih edilebilir. Bu yöntemlerden birisi açıklıklı kuplajlama yöntemidir. Bu yöntemde besleme hattı, ışıma yapan iletken yamaya temas etmez. Bunun yerine, üzerinde bir açıklık veya bir yarık bulunur. Bu açıklık, ışıma yapan iletken yamaya güç ulaştıran



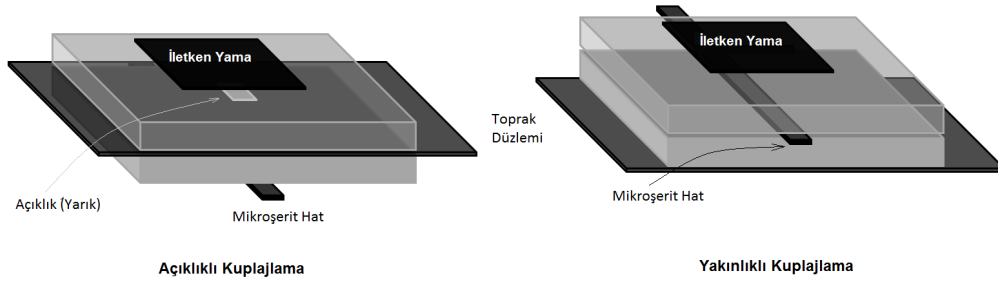
Şekil 2.4. Koaksiyel hat ile doğrudan besleme



Şekil 2.5. Mikroşerit hat ile doğrudan besleme

vasıtasıdır. İletim hattı ile açıklığın üzerine kadar güç ulaştırılır ve buradan da açıklığın uyarılması ile iletken yamanın ışıma yapması sağlanır. İki dielektrik katman bulunur. Bunlardan birisi antenin dielektrik tabanı iken, diğeri de iletim hattına ait besleme tabanıdır. Bu yöntemin tercih edilmesinin en büyük nedeni, bantgenişliğini artırıcı etkisidir.

Dolaylı besleme yöntemlerinden bir diğeri de yakınlıklı kuplajlamadır. Bu yöntemin öne çıkan yönü, yukarıda bahsedilen besleme yöntemleri içerisinde en yüksek bantgenişliğine sahip olmasıdır. Besleme yine temas etmez, ancak bu defa bir açıklıktan gelen enerji yerine, mikroşerit hatla kuplajlanan enerji, iletken yamaya aktarılarak ışıma sağlanır. Açıklı kuplajlama ve yakınlıklı kuplajlama yöntemleri Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. MŞA dolaylı besleme yöntemleri

2.3. Mikroşerit Antenler Alanındaki Gelişmeler

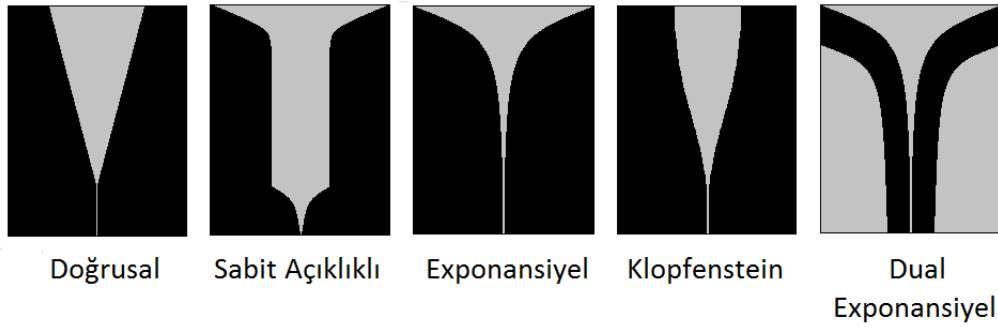
Mikroşerit antenler alanında pek çok çalışma yapılmış olup, hala da yapılmaya devam etmektedir. Ancak çalışmaların sona ermesinden bahsedilemez. Hala alınacak çok yol olduğu değerlendirilmektedir. Özellikle, mikrodalga teknolojilerindeki gelişmeler, bu cihazlarla kullanılacak antenlerin hem daha fazla bantgenişliğine sahip olmalarını, hem de olabildiğince küçük olmalarını gerektirmektedir. Dolayısıyla, günümüzde çalışmalar bu iki eksen üzerinde, yani yüksek bantgenişliğine sahip ve boyutları küçültülmüş antenler üretme alanında yürütülmektedir.

Bantgenişliğinin artırılması kapsamında, uydu, kablosuz haberleşme, uzaktan algılama ve radar teknolojileri artık Ultra Genişband (Ultra Wideband-UWB) elektronik sistemlerde kullanılabilecek anten tasarlama hedefi anlaşılabılır. Ultra Genişband (UGB) teknolojinin tanımından, merkez frekansının en az %20'sine veya en az 500 MHz bantgenişliğine sahip teknolojiler anlaşılmaktadır (Commission ve diğ., 2002).

UGB teknolojisini kullanan sistemlerden havacılık alanında kullanılanlar, ayrıca boyut, ağırlık ve incelik şartlarını da sağlamak durumundadır. Bu durumda hem bantgenişliği büyük olan hem de küçük boyutlu olan anten tasarlama ihtiyacı vardır. Bu ihtiyacı karşılamaya yönelik en iyi adaylardan birisi de Açıklığı Daralan Yarık Antenlerdir (Tapered Slot Antennas). Açıklığı Daralan Yarık Antenler (ADYA), genişbantlı, yeterli anten kazancı olan, simetrik ışıma desenli ve uygun polarizasyonlu antenler olarak büyük potansiyele sahiptirler. Bir sonraki kısımda, ADYA tipi antenlerin kısa tarihçesi verilecek ve özellikleri sunulmuştur.

2.4. Açıklığı Daralan Yarık Antenler (ADYA)

Açıklığı Daralan Yarık Anten (ADYA)'lerin ayırt edici özellikleri, besleme noktasından uzaklaştıkça açıklığı giderek artan ve antenin ışıma yapan bölgesini oluşturan bir yarıktan oluşmalarıdır. Başka bir bakış açısıyla da açıklığın ağız kısmından besleme noktasına doğru açıklığın git gide daralması söz konusudur. ADYA'lerin ışıma yapan bölümlerine ait daralma profilleri, ADYA tipini belirler. En çok bilinen ADYA tipleri, Açıklığı Doğrusal Daralan Yarık Anten (ADODYA) (Prasad ve Mahapatra, 1979), Açıklığı Sabit Yarık Anten (ASYA) ve Vivaldi olarak da bilinen Açıklığı Eksponansiyel Daralan Yarık Anten (AEDYA) (Gibson, 1979) olup Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Bunların dışında da daralma profilleri mevcut olup, diğerlerine göre daha az bilinen bu daralma profillerinden iki tanesi, Klopfenstein daralma profili (Schantz, 2005) ve dual eksponansiyel daralma profilidir (Lee ve Livingston, 1993).



Şekil 2.7. Farklı ADYA profilleri

Bunlardan Klopfenstein daralma profili, eksponansiyel daralma profilinin geliştirilmiş bir versiyonu olarak da değerlendirilebilir. Bu yapı, aynı boylardaki bir antene göre ya daha fazla empedans uyumu sağlar ya da aynı uyumu daha kısa bir antenle sağlar (Schantz, 2005).

ADYA tipi antenler, mikroşerit antenlerin basitlik, ucuzluk, hafiflik gibi tüm özelliklerine sahip olmanın yanında, klasik mikroşerit antenlerden farklı olarak, büyük bantgenişlikleri, yüksek yönelticilik ve düşük yan kulakçık seviyeleri gibi özelliklere de sahiptir.

ADYA antenlerin asıl gücü, entegre devrelerle uyumlu olarak ve antene gelen besleme ile aynı anda üretilebilmeleridir. Haberleşme teknolojilerindeki

gelişmeler, üretilen elektronik devrelerin giderek küçülmelerini gerektirirken, antenlerin de onlara uyumlu bir şekilde küçülmeleri kaçınılmazdır. ADYA tipi antenler, bu açıdan oldukça avantajlıdır.

2.4.1. Açıklığı doğrusal daralan yarık antenler (ADODYA)

İlk ADYA tipi antenler 1979 yılında literatürde yer almaya başlayan ADODYA (Prasad ve Mahapatra, 1979) ile Vivaldi Anten (Gibson, 1979) olmuştur.

Bunlardan birincisi olan ADODYA, faz kaydırmalı bir dizi oluşturarak kısa menzilli radar modülü uygulamasında yer almıştır. Yarık kısmından ışıma yapan bu anten ile X-band bölgesinde çalışan ve 6 dB kazancı olan bir radar tasarlanmış ve kendinden sonra gelen ADODYA tipi tasarımlarının öncüsü olmuştur.

Daha sonra, Yngvesson ve ark. tarafından, ADODYA, ASYA ve AEDYA tipi antenleri için dielektrik tabanın ve farklı şekillerin etkileri incelenmiştir. Sonuçta, ADODYA tipi antenin AEDYA tipine göre daha dar bir hüzmeye ve daha yüksek kazançlı oldukları gösterilmiştir (Schaubert ve dig., 1985). Anten boyu artırıldıkça, ışıma demeti daralırken, yan demetlerin de artmakta olduğunu ortaya koymuşlardır.

Schaubert tarafından 1989 yılında, ADODYA tipi antenlerin avantajlarının yanı sıra polarizasyon özelliklerine de dikkat çekilmiş, tasarlanan sistemi olumsuz yönde etkileyebileceği belirtilmiştir (Schaubert, 1989). Schaubert çalışmasında, hem geniş hüzmeli hem de dar hüzmeli antenler tasarlayarak ışıma özelliklerini incelemiştir.

1992 yılında Simons ve ark., ADODYA tipi antenleri beslemek için eşdüzlemsel dalgaklavuzu kullanarak iki yeni teknik sunmuşlardır (Simons ve dig., 1992a). Her ikisinde de yüksek kazançlı ve demet genişliği dar olan ışıma desenleri elde etmişlerdir. Sonuçta, elektromanyetik kuplaj ile beslenen ADODYA tipi antenin, doğrudan kuplajlanan ADODYA tipine göre daha fazla bantgenişliği olduğu gösterilmiştir.

Simons ve ark. tarafından 1992 yılında yapılan bir başka çalışmada, 8-32 GHz arasındaki frekanslarda çalışabilen ADODYA tipi anten tasarlanmıştır (Simons ve dig., 1992b). Çalışmalarında dönüş kaybını ve ışıma desenlerini incelemişlerdir. Uydu haberleşmesi için X-Band ve Ka-Bandında çalışan bu anten ile literatüre giren en yüksek bantgenişliğine sahip ADODYA tipi anten tasarlanmıştır.

Aynı yıl, Ekstroem ve ark. tarafından, birden fazla daralma profilinin birleşiminden oluşan, Parçalı ADODYA tipi anteni geliştirmişlerdir (Ekstroem ve dig., 1992). 45 GHz gibi yüksek frekanslarda çalışabilecek bir ADODYA tasarlayarak terahertz frekanslarına çıkmışlardır.

1995 yılında, Simons ve Lee, ilk defa ADODYA tipi antenlerin giriş empedansını yüksek doğrulukta hesaplamak için bir teknik önermişlerdir (Simons ve Lee, 1995). Sonuçta, giriş empedansının anten boyuna ve daralma açısına bağlı olarak değiştiğini ortaya koymuşlardır. Sonuçların yüksek bantgenişliğinde empedans uyumu açısından ADODYA tipi antenler için taşıdığı potansiyel gösterilmiştir.

Onların çalışmasından 10 yıl sonra, 2005 yılında Hao ve Hong tarafından Zıt Kutuplu ADODYA için tabanla entegre olmuş dalgaklavuzu ile besleme tekniği gösterilmiştir (Hao ve dig., 2005). Kullandıkları besleme tekniğini, standart baskı devre işlemleri ile başarıyla uygulamışlardır. Pratik bir şekilde üretim kolaylığını göstererek, çok düşük maliyetlerle seri üretim yapmanın mümkün olduğunu göstermişlerdir.

2007 yılında, Sharma ve ark. tarafından kenarları kesikli ADODYA tipi antenler geliştirilmiştir (Sharma ve dig., 2007). İyileştirilmiş ışıma desenleri ve yüksek bantgenişliğine sahip antenler ortaya koymuşlardır. 50Ω empedansına sahip beslemeye uyumlu bir anten tasarlamışlardır. Işıma desenlerindeki bozuklukları ortadan kaldırmak için RT-Duroid gibi düşük dielektrik sabitine sahip taban malzemesi ve kenarları testere dişine benzer şekilde kesikli profiller kullanmışlardır. Silikon gibi yüksek dielektrik sabiti olan malzemeler ile de ışıma veriminin artırıldığını göstermişlerdir. Özellikle Silikon tabanlı ADODYA antenlerin, genişbantlı entegre devreler için anten olarak kullanılabilme potansiyelini ortaya koymuşlardır.

2007 yılında Jordan ve ark. tarafından ilk defa bir silindirin etrafına uyumlanabilen ADODYA tipi antenler geliştirilmiştir (Jordan ve dig., 2007). Esnek yapıyı elde etmek için dielektrik sabiti 3.1 ve kayıp tanjantı 0.003 olan 200 mikrometre kalınlığında likit kristal polimer (LCP) üzerine 18 mikrometre kalınlığında bakır iletkenli ADODYA anten tasarlanmıştır. Önce HFSS yazılımı ile 5-15 GHz arası simüle edilmiş, sonra da bir silindirin etrafına kıvrılacak şekilde imal edilmiştir.

2010 yılında Ultra Genişband frekans aralığında çalışabilen bir anten tasarımında, kenarlara yarım daire şeklinde kesikler atarak anten ışıma desenini ve kazancını iyileştirmeye yönelik çalışmalar, In ve ark. tarafından yapılmıştır (In ve dig., 2010). Kenarlara birbiriyle eşit olmayan yarım daire şeklinde kesikler ile kazancın 3.5 dB kadar daha iyileştirilebileceğini ortaya koymuşlardır. Bu yarım dairesel kesikler ile, iletkenler üzerinde oluşan akımların değiştirilebileceğini göstermişlerdir. Tasarladıkları antenin, çalışma frekans bölgesinin tamamında nispeten sabit değerli kazanç sağlayabildiğini ortaya koymuşlardır.

Zhang ve ark. tarafından, %66 empedans bantgenişliğine sahip ve -3 dB demet genişliği 117° olan ADODYA tipi anten tasarlamışlardır (Zhang ve dig., 2011). Faz kaydırmalı ve yüksek bantgenişliğine sahip anten dizilerinde kullanım için uygun oldukları belirtilmiştir.

2012 yılında ADODYA kullanarak UGB özellikli görüntü aktarım sistemi, Zhu ve ark. tarafından sunulmuştur (Zhu ve dig., 2012). Özellikle anten boyutlarını azaltmaya çalışmış ve kompakt bir anten elde edebilmişlerdir. Daralan yarık kısmının yarısı, fiziksel boyutu azaltmak için ışıma yapan bölge üzerinde kazınmıştır. Anten performansını daha da artırmak için kenarlara kesikler de atılmıştır. Simülasyon ve deneysel ölçüm sonuçlarını karşılaştırmışlar ve sonuçta tasarım kriterlerini karşılayan bir ADODYA tipi anten üretmişlerdir.

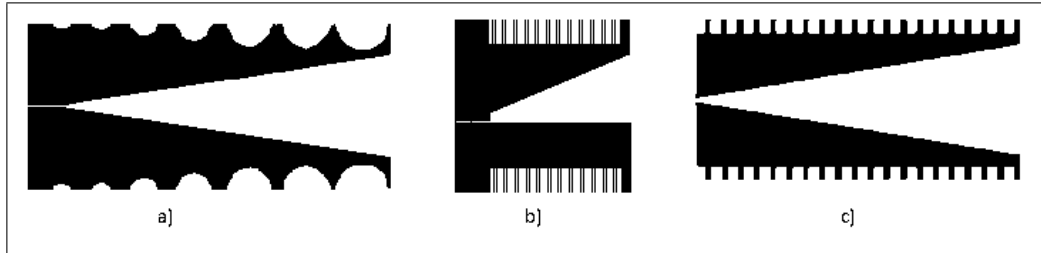
Yakın döneme gelindiğinde, 2015 yılında Mohamed ve Sebak tarafından, 50-70 GHz gibi yüksek frekanslarda çalışmak üzere tasarlanmış ADODYA tipi anten geliştirilmiştir (Mohamed ve Sebak, 2015). Tasarladıkları anten, simetrik ışıma desenlerine sahip olup, çapraz polarizasyonu -22 dB ve yan kulakçık seviyesini de -21 dB seviyesine çekebilmişlerdir. Anten verimi %94 olarak ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları HFSS ve CST gibi yazılımlarla da teyit

edilmiştir. Yine bu çalışmada da ışıma desenini iyileştirmek için, kenarlara dikdörtgensel kesikler atıldığı görülmektedir. Sonuçta 60 GHz frekans bölgesi civarında kablosuz uygulamalarında kullanılabilecek ve yan kulakçık seviyeleri düşürülmüş bir anten ortaya koymuşlardır.

ADODYA tipi antenler içeren çalışmalara bakıldığında, öne çıkan iki husus olduğu görülmektedir. Bunlardan birincisi olabildiğince yüksek bantgenişliği elde etmek; ikincisi ise ışıma deseni iyileştirmektir. Bantgenişliğinin artırılması kapsamında, anten geometrik özellikleri değiştirilmiş ve daralma profilleri doğrusal olan farklı boyut ve görünümelerde antenler tasarlanmıştır.

Işıma deseninde iyileştirme elde etmek için ise, antenlerin ışıma yapan alanlarını kontrol altına almaya çalışmışlardır. Anten akımlarının sadece ışıma yapan yarık bölgesinde değil, aynı zamanda dış kısımlarında oldukça önemli miktarda olduğu belirlenmiştir.

Bunun üzerine, kenarlara kesikler atma suretiyle, istenmeyen akımların sönümlenmesini sağlayarak anten kazancını artırmışlardır. Aslında bu durum, sadece daralma bölgesinde ışıma yapacak akımlara izin verilmesi ve diğer akımların engellenmesi anlamına gelmektedir. Yapılan çalışmalarda kenarlarda atılan kesiklere örnekler Şekil 2.8’de sunulmuştur (Zhu ve dig., 2012; Mohamed ve Sebak, 2015).

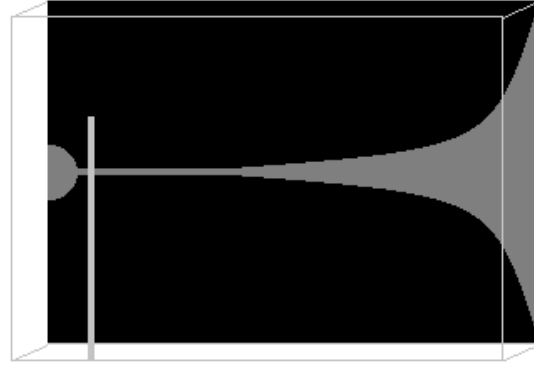


Şekil 2.8. Kenarlara atılan kesiklere örnekler

Benzer yaklaşımların diğer daralma profillerindeki ADYA tipi antenlerde de izlendiği görülmektedir. Literatüre ADODYA ile aynı yıllarda giren diğer bir popüler anten tipi de Açıklığı Ekspansiyel Daralan Yarık Anten (AEDYA) dir. Tezin bundan sonraki kısmında, AEDYA tipi antenler alanındaki gelişmeler sunulacaktır.

2.4.2. Açıklığı eksponansiyel daralan yarık antenler (AEDYA)

İlk AEDYA tipi antenler 1979 yılında Gibson tarafından literatüre sokulmuş olup bugün Vivaldi Anten olarak da bilinmektedir (Gibson, 1979). Gibson tarafından geliştirilmiş Vivaldi antene ait gösterim Şekil 2.9'da sunulmuştur.

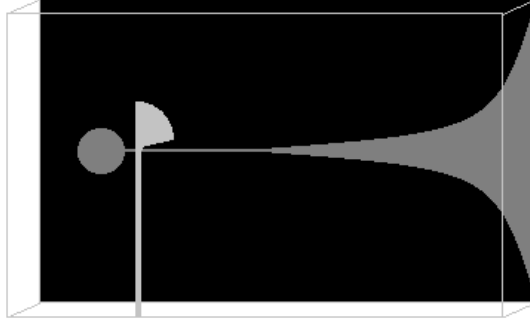


Şekil 2.9. Vivaldi anten geometrisi

Basitçe Vivaldi anten, bir besleme hattı, besleme hattından yarık hattına geçiş ve ışıma yapan bölgelerden oluşur. Işıma yapan bölge, eksponansiyel olarak daralan bir profile sahiptir. Literatürde parabolik, hiperbolik ve eliptik gibi başka daralma profilleri de mevcuttur (Schantz, 2005). Vivaldi antenler, 4 – 8 dBi kazanç sağlayabilmektedir (Schantz, 2005). Eksponansiyel daralma profili sayesinde, çalışma frekansı aralığında neredeyse sabit kalan demet genişliği sağlamaktadır (Gibson, 1979; Gazit, 1988). Daralma profilinde herhangi bir rezonatör kısım bulunmaması nedeniyle de sinyallerde bozulmaya yol açmaz. Bu özelliklerinden dolayı Vivaldi anten UGB bir antendir.

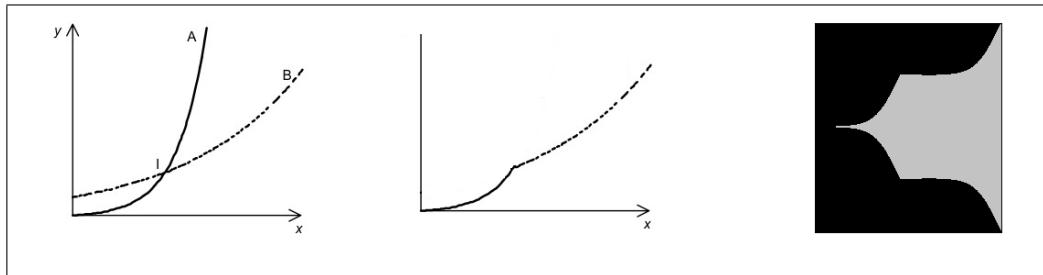
Gibson tarafından ortaya atıldığı günden sonra Vivaldi antenler, UGB teknolojisinde en çok kullanılan ADYA tipi antenlerden birisi olmuştur. Çalışmasında Gibson, 2 – 40 GHz arası frekanslarda yüksek kazanç ve doğrusal polarizasyon değerleri elde edilebileceğini göstermiştir. Schaubert ve ark. tarafından, Vivaldi antenler ile diğer daralma profillerine sahip ADYA tipi antenlerin performansı karşılaştırılmıştır (Schaubert ve dig., 1985). Karşılaştırdığı ADODYA, ASYA ve AEDYA arasında en küçük yan kulakçık ve en büyük hüzmeye değerlerinin AEDYA tipi antenlerde olduğunu ortaya koymuştur.

Besleme hattından yarık hattına geçiş için de bazı çalışmalar yapılmıştır. Schuppert tarafından dairesel bölgeler (Shuppert, 1988), daha sonra da Sloan ve ark. tarafından daire dilimi şeklinde iletkenler önerilmiştir (Zinieris ve dig., 1998). Schaubert tarafından her ikisini birden kullanan antenler tasarlanmıştır (Shin ve Schaubert, 1999). Bu alışmalar sonucunda bantgenişliğinin daha da artırılabil-diği grlmştir. Daire dilimi şeklinde iletken ilaveli bir Vivaldi anten şekil 2.10’da gösterilmiştir.



şekil 2.10. Daire dilimi şeklinde iletken ilaveli Vivaldi anten

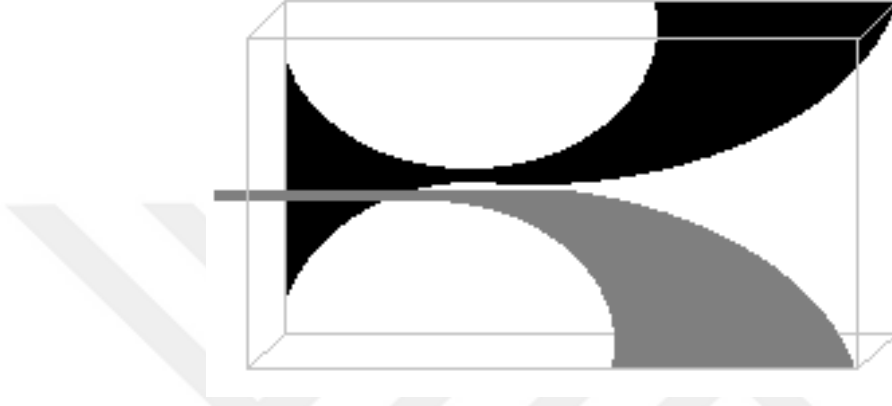
Bantgenişliğini artırmaya yönelik çalışmalardan bazıları da daralma profili üzerine olmuştur. Tek parçalı eksponansiyel daralma profili yerine hibrit eksponansiyel daralan ve birden fazla parçanın birleşiminden oluşan daralma profilleri geliştirilmiştir. Örneğin Fisher tarafından, hızlı daralan düşük frekanslı ve yavaş daralan yüksek frekanslı bölümlerin birleştirilmesiyle ortaya çıkan iki parçalı bir eğriden oluşan daralma profili kullanılarak, yüksek frekanslardaki kazanç performansı, klasik Vivaldi antene göre artırılmıştır (Fisher, 2000). Daha sonra çalışmasını genişleterek 2006 yılında patent almıştır (Fisher, 2006). Çok parçalı eğrilerden oluşan Vivaldi, şekil 2.11’de gösterilmiştir.



şekil 2.11. Çok parçalı daralma profilli Vivaldi

Gazit, Gibson’un ortaya koyduğu ilk tasarımı 1988 yılında daha da geliştirmiş iki yeni değişiklik önermiştir (Gazit, 1988). Bunlardan ilki, düşük

dielektrik sabitli ($\epsilon_r = 2.45$) olan cuclad malzemesini kullanmak, diğeri de zıt kutuplu yarık hattı geçişi kullanmak olmuştur. Zıt kutuplu yarık hattı geçişini oluşturmak için, zıt kutuplu iki iletkeni, dielektrik tabanın iki tarafına koyarken eksponansiyel olarak daralan profil kullanmış, anteni beslemek için ise mikroşerit hattı simetrik olarak iletkenin karşısına gelecek şekilde dielektrik tabanın diğ er tarafına yerleştirmiştir. Gazit tarafından önerilen Zıt Kutuplu Vivaldi antene ait gösterim Şekil 2.12’de sunulmuştur.



Şekil 2.12. Zıt kutuplu Vivaldi anten geometrisi

Gazit’in çalışması, Langley ve ark. tarafından 1996 yılında daha da geliştirilmiştir. Çünkü, zıt kutuplu Vivaldi, klasik Vivaldi’ye göre avantajlı yönler barındırır da yeni bir sorunu da beraberinde getirmiştir. Bu sorun, çapraz polarizasyon sorunu olarak bilinmekte olup, nedeni iletkenlerin arasında oluşan elektrik alanın yönünün, anten düzlemleriyle oluşturduğu açıdır. Langley ve ark. tarafından, bu açığı dengeleyecek ve simetri oluşturacak üçüncü bir iletken kullanılmıştır (Langley ve dig., 1996). Böylece elektriksel alanların bileşkesi, anten düzlemleriyle paralel hale gelecektir. Bu anten tipine de Dengelenmiş Zıt Kutuplu Vivaldi denmiştir. Dengelenmiş Zıt Kutuplu Vivaldi antene ait gösterim Şekil 2.13’de sunulmuştur:

Bu çalışmanın ardından, Langley ve ark. tarafından yüksek bantgenişliğine sahip ve çapraz polarizasyon sorunu olmayan faz kaydırmalı dizi antenler üretilmiştir. Bu çalışmalar sırasında gözlemlenen bir diğ er sorun kaynağı da daralma profilinin bitimindeki keskin köşelerde oluşan saçılmalar olmuştur. Buna yönelik çözümlerden biri Greenberg ve ark. tarafından önerilen köşeleri yuvarlatma yöntemi olmuştur (Greenberg ve dig., 2003).



Şekil 2.13. Dengelenmiş zıt kutuplu Vivaldi anten geometrisi

Literatürdeki tüm bu çalışmaların sonunda üç temel tip Vivaldi anten ortaya çıkmıştır: Açıklığı Daralan Vivaldi, Zıt Kutuplu Vivaldi, Dengelenmiş Zıt Kutuplu Vivaldi.

AEDYA alanındaki çalışma alanları, ADODYA tipi antenlerde olduğu gibi bantgenişliğini artırarak ultra genişbant teknolojisini destekleyen antenler üretmek, anten ışıma deseni ile anten kazancını iyileştirmek ve boyutları küçültmek olarak listelenebilir.

Günümüze doğru biraz daha yakın zamandaki çalışmalardan örnekler vermek gerekirse, Yang ve ark. tarafından 2008 yılında, bir tane Açıklığı daralan, bir tane de Zıt Kutuplu olmak üzere iki tane Vivaldi anten imal etmişlerdir (Yang ve dig., 2008). Çalışmalarında, beton içinden geçen elektromanyetik dalgalar ile çalışan ve duvarın diğer tarafına geçişte sinyallerin bozulmaya uğramadığı geniş bantlı antenler tasarlanmıştır.

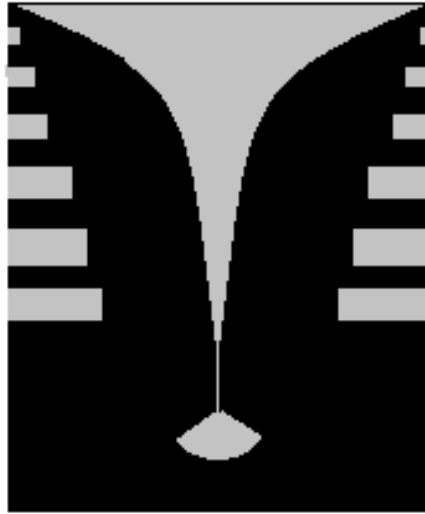
Birinci anten 8 – 12 GHz arasında çalışabilen 16 elemanlı bir anten dizisi olup, ikinci anten de 2 – 4 GHz aralığında çalışabilen 8 elemanlı bir anten dizisidir. Ürettikleri antenlerle sırasıyla 13 ve 12 dBi kazançlar elde etmişlerdir.

Adamiuk ve ark. tarafından, 2008 yılında da çift polarizasyonlu ve kompakt yapıda bir Vivaldi anten, ultra genişbant uygulamalarında kullanılmak üzere geliştirilmiştir (Adamiuk ve dig., 2008). Bunun için iki Vivaldi anten birbirlerine dik açı oluşturacak şekilde içiçe geçirilmiştir. Tüm çalışma frekansı bölgesinde ışıma yapan noktalar her iki antende de aynı noktadadır. Bu özelliği

ile ultra genişbant görüntü aktarımı ve radar gibi yüksek kazanç değerine ihtiyaç duyan uygulamalarda potansiyel bir aday konumuna gelmiştir.

Hood ve ark. tarafından FR4 kullanılarak küçük boyutlu bir Vivaldi anten tasarlanmıştır (Hood ve dig., 2008). Bu çalışmada öne çıkan husus, taban malzemesi olarak FR4 kullanılması ile baskı devrelerde kolayca üretilebilmesinin sağlanması ve devre üretilirken aynı anda ışıma için gerekli olan antenin de üretilebilmesidir.

Zhang ve Brown tarafından yapılan bir çalışmada, çapraz polarizasyonu azaltmak için tavşan kulağına benzer ve kenarlarındaki kesiklerle tarak şeklini de andıran bir Vivaldi anten üretilmiştir (Şekil 2.14). Bu çalışmada hem oldukça küçük, hem de tüm bantgenişliği boyunca düşük çapraz polarizasyonlu bir anten üreterek, yüksek modla ortaya çıkan boyuna doğrultudaki akımları baskılamışlardır. Sonuçta akımlar daralma profili civarına toplanmış ve çapraz polarizasyon seviyesi -10 dB altına inmiştir (Zhang ve Brown, 2011).



Şekil 2.14. Tavşan Kulağı Tarak Şekilli Vivaldi

Dielektrik taban olarak FR4 kullanılarak yapılan çalışmalar kadar bir diğer önemli gelişme de, Vivaldi tip antenleri tasarlamak için HFSS (High Frequency Structure Simulator) yazılımının kullanılmasıdır (Che ve dig., 2010). Che ve ark. tarafından HFSS ile tasarım sonucunda ultra genişbant frekans bandında çalışabilen, 6.3 dBi anten kazancına sahip, küçük boyutlu bir Zıt Kutuplu Vivaldi üretilmiştir. 2000’li yıllardan itibaren, mikroşerit antenlerin analizleri için numerik yöntemler yaygın olarak kullanılmaya başlanmış ve

kullanılan yazılımlarla mikroşerit antenlerin davranışları gerçeğe yakın bir şekilde izlenebilmiştir. Mikroşerit Antenlerin analizinde kullanılan yöntemler, ilerleyen bölümlerde daha geniş olarak tanıtılacak olup, HFSS yazılımı bu numerik yöntemlerden birisi olan Sonlu Elemanlar Metodunu kullanır.

Kenarlara kesik atma yöntemi, yukarıda örnekleri verildiği üzere, hem ADODYA tipi antenlerde hem de AEDYA tipi antenlerde izlenilmiştir. Kesikler sonucu, ışıma desenlerinde iyileştirme sağlanırken, kesiklerden kaynaklanan kapasitif etkiler nedeniyle sinyallerde bozulmalar olmaya başlamıştır. Ana amacı, iletkenlerden akan akımı sadece ışıma yapması istenen daralma profiline odaklamak olan bu kesiklerin yerine, iletkenleri ince tutmanın bir çözüm olabileceği değerlendirilmektedir.

Bu varsayım üzerine doğrusal, eksponansiyel ve yeni geliştirilen dairesel daralma profilleri incelenmiştir. Bu tezde iletken yamalar olarak ince iki iletken kullanılmış ve hem yüksek bantgenişliği sağlanmış hem de kapasitif etki oluşturmada akımın sadece daralma profili üzerinde kalması sağlanmıştır. Sonuçta toplam sayısı beş olmak üzere iki grup ADYA anten tasarlanmıştır.

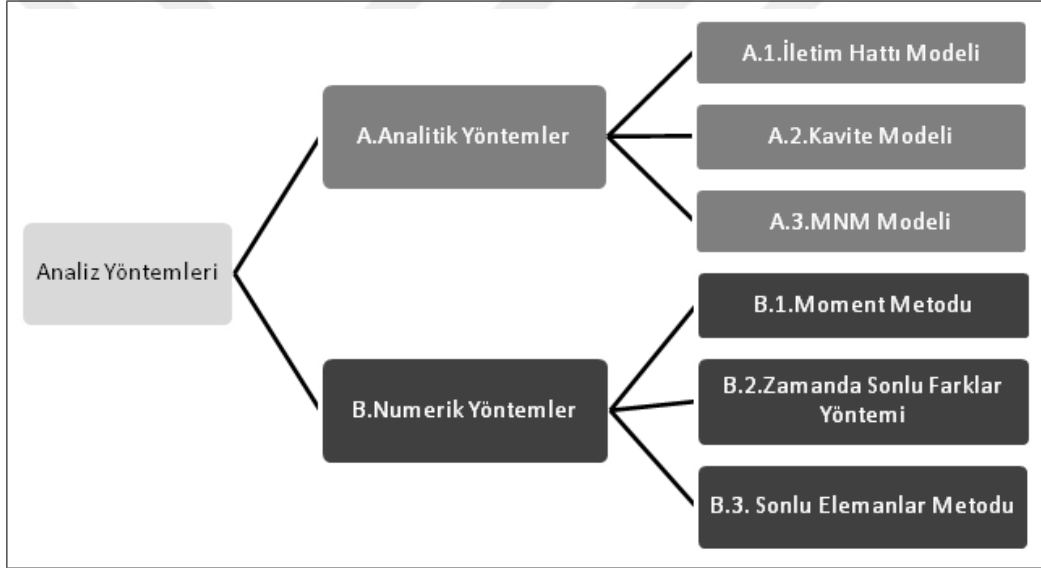
Bunlardan birinci gruptaki üç tanesinde besleme noktasından bir miktar uzaklaştıktan sonra daralma profili başlatılmış, diğer gruptaki iki tanesinde de daralma profili hemen besleme noktasından itibaren başlatılmıştır. Beş antenden birincisi, Dual Doğrusal Daralan, ikincisi Dual Eksponansiyel Daralan, Üçüncüsü Dual Dairesel Daralan profillerde olmuştur. Dördüncü anten Dual Dairesel Daralan ve beşinci anten Dual Eksponansiyel Daralan profilinde olup her ikisinde de, hemen besleme noktasından itibaren iletkenler arası açılmaya başlamıştır.

Aslında hemen besleme noktasından itibaren başlayan Dual Doğrusal Daralan profilili altıncı bir anten tasarlanmak istenmiş, ancak iletkenlerin antenleri beslemek için kullanılan SMA konnektörün bacaklarına temas etmesi nedeniyle bu mümkün olmamıştır.

Tasarlanan bu beş antene ait detaylı açıklamalar, tezin ağırlık noktasını oluşturan ve yapılan çalışmanın anlatıldığı Bölüm 5'te verilecektir.

2.5. Mikroşerit Antenleri Analiz Etmek İçin Kullanılan Yöntemler

Anten analizini yapmak, birkaç nedenden ötürü önemlidir. Bunların başında, tasarım sürecini kolaylaştırma ve deneyerek üretim maliyetlerini en aza indirme gelmektedir. Ayrıca, parametrik olarak antenleri inceleyerek bazı kısıtların sağlandığından veya bazı avantajların elde edildiğinden emin olunur. Tüm bunlara ilave olarak, yeni tasarımlarda faydalı olabilecek, çalışma prensiplerinin anlaşılmasını da sağlar. Şekil 2.15’de mikroşerit antenleri analiz etmek için kullanılabilecek temel yöntemler gösterilmiştir. Buna göre antenler, ya analitik yöntemlerle ya da numerik yöntemlerle analiz edilebilir.



Şekil 2.15. MŞA analiz yöntemleri

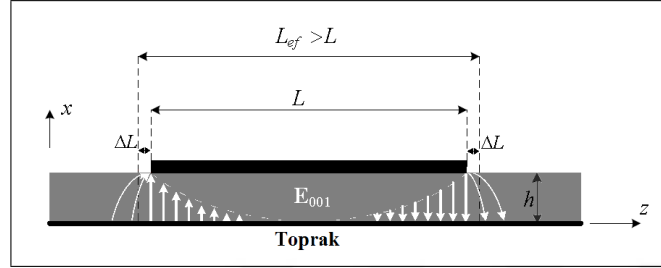
2.5.1. Analitik yöntemler

Bu bölümde, Mikroşerit Antenleri analiz etmek için kullanılan analitik yöntemlerden kısaca bahsedilecektir. Literatürde yer alan üç yöntem, İletim Hattı Modeli, Kavite Modeli ve MNM Modelidir.

2.5.1.1. İletim hattı modeli

En basit modellerden biri olan iletim hattı modelinde, mikroşerit anten, iki ucunda yük bulunan bir iletim hattı olarak görülür (Derneryd, 1976, 1978).

Antenin iki kenarında iletim hattı sonlandığından saçaklar oluşmakta ve ışıma bu bölgelerden olmaktadır. Mikroşerit anten, saçakların olduğu bölgeler nedeniyle Şekil 2.16'daki gibi gösterilen ve z eksenı boyunca anten boyu L 'ye bağılı olan iki ucunda neredeyse açık devre olarak davranan yüksek değeri iki empedans arasındaymış gibi davranır.



Şekil 2.16. Saçaklar nedeniyle oluşan efektif anten boyu

Yamanın rezonans frekansını belirleyen ana faktör, kenarlardaki saçaklar nedeniyle fiziksel boyu L 'den daha uzun olan ve efektif uzunluk olarak adlandırılan bir parametredir. Efektif uzunluk $L_{ef} = L + 2\Delta L$ olup ΔL ifadesi Denklem (2.4)'de verilmiştir (Milligan, 2005).

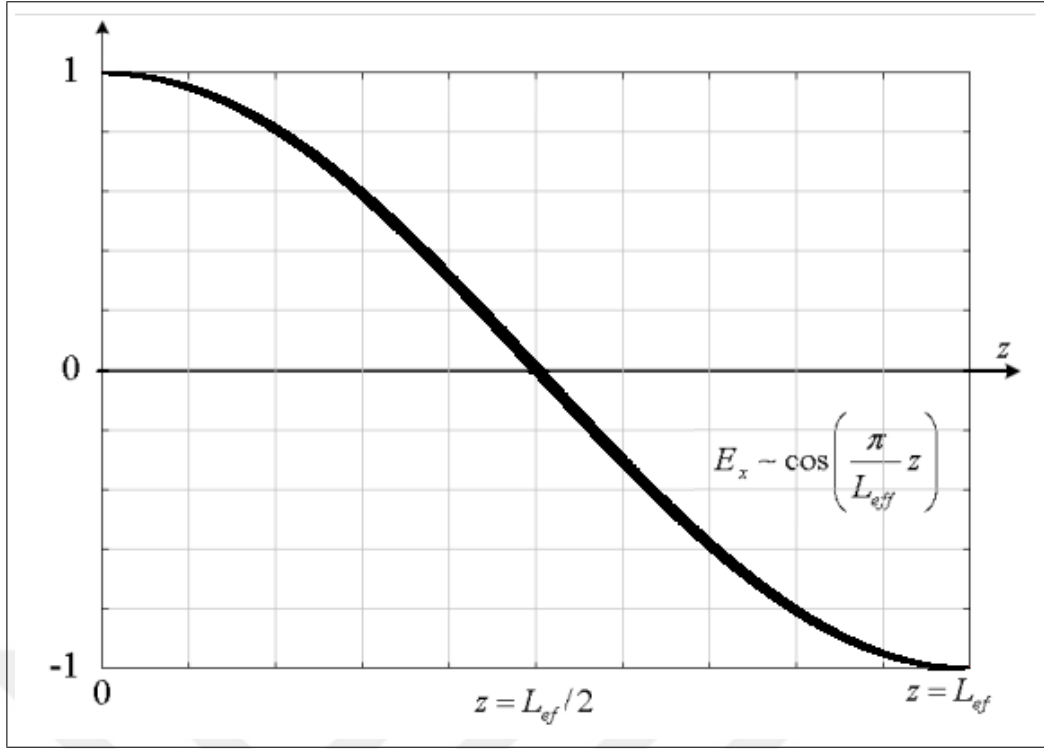
$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{ref} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.262 \right)}{(\epsilon_{ref} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.813 \right)} \quad (2.4)$$

Baskın mod olan TM^{001} için rezonans frekansına ait ifade Denklem (2.5)'de çıkarılmıştır:

$$L_{ef} = \frac{\lambda_0}{2} = \frac{v}{2f^{(001)}} = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_{ref}}f^{(001)}} \rightarrow f^{(001)} = \frac{c}{2L_{ef}\sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (2.5)$$

TM^{001} modu z koordinatına bağılı olup z doğrultusuna dik olan E alan değışimi Şekil 2.17 olarak gösterilmiştir.

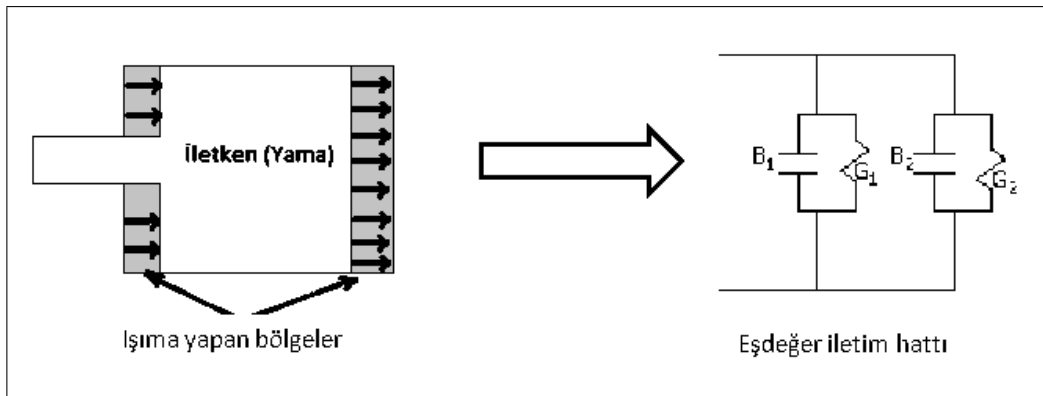
Efektif anten uzunluğuna göre rezonans frekansı hesaplandıktan sonra da ideal genişlik değeri (W) için Denklem (2.6) kullanılır.



Şekil 2.17. z doğrultusuna dik olan E alan şiddeti değişimi

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2.6)$$

Böylece, mikroşerit yama anten, sonsuz sayıda çok ince yarım dalgaboyu dipollerden oluşan düzlemsel bir kaynak olarak görülebilir. Temel mod olan TM^{001} modunda çalışan bir antenin, iki ucunda $\frac{1}{Z} = Y = G + jB$ olarak ifade edilebilen iki empedansın arasında yer alan bir iletim hattı olarak gösterimi Şekil 2.18'deki gibidir.



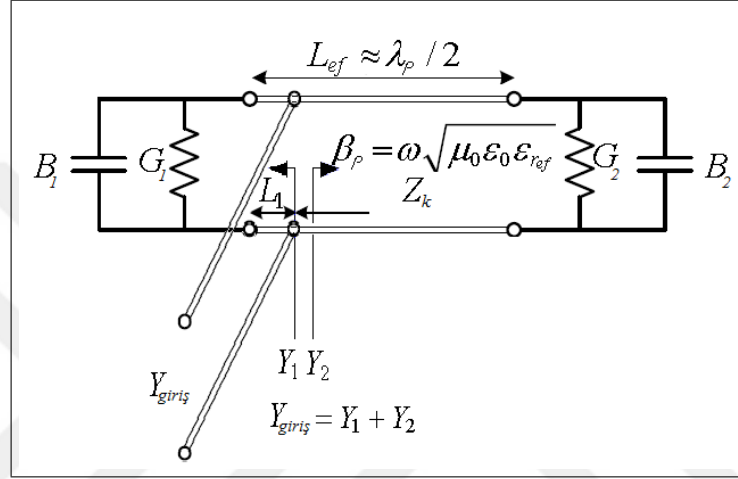
Şekil 2.18. Işıma yapan bölgelerin empedans olarak gösterimi

Işıma kaybı $G = \frac{1}{R}$ ile ve ışıma yapan açıklıkların oluşturduğu kapasitans nedeniyle ortaya çıkan suseptans ise $B = \omega C$ ile gösterilmiştir. Dielektrik taban

yüksekliği, dalgaboyunun onda birinden az olduğu durumlarda ısıma kaybı ve saçakların suseptans ifadeleri Denklem (2.7) olarak verilebilir.

$$\begin{aligned} G &= \frac{W}{120\lambda_0} \left[1 - \frac{1}{24} \left(\frac{2\pi h}{\lambda_0} \right)^2 \right] \\ B &= \frac{W}{120\lambda_0} \left[1 - 0.836 \ln \left(\frac{2\pi h}{\lambda_0} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (2.7)$$

Bu durumda her iki tarafında empedans olan paralel R-C devresi şeklindeki iletim hattı modeli Şekil 2.19'daki gibi gösterilir:



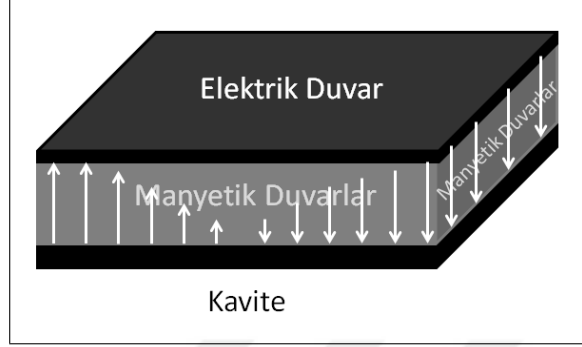
Şekil 2.19. İletim hattı modeli

Z_k ile iletim hattının karakteristik empedansı, β_p ile de onun faz sabiti gösterilmiştir. Böylece giriş admittansı $Y_{giris} = Y_1 + Y_2$ olan bir iletim hattı elde edilir. Bu modelin eksikliği, sadece yatay yönlü bir ışımanın olduğu varsayımına dayanması nedeniyle düzleme dik yöndeki ışımaların dikkate alınmamasıdır. Ancak, en büyük avantajı, basit oluşu ve kullanım kolaylığıdır.

2.5.1.2. Kavite modeli

İletim hattı modelinde, sadece z doğrultusu boyunca ilerleyen TM^{00n} modları dikkate alınır. Bu yaklaşım, x ve y doğrultusundaki alan dağılımının her yerde aynı olduğu varsayımına dayanmaktadır. TM^{001} modunun baskın olan mod olması nedeniyle bunda bir miktar doğruluk payı olsa da, mikroşerit yama, aslında yüksek dereceli diğer modlar tarafından da etkilenmektedir. Bu nedenle, mikroşerit antenleri analiz için kullanılan bir diğer yöntem olarak

yüksek dereceli modları da modelleyebilen kavite modellemesi geliştirilmiştir (Lo ve dig., 1979). Bu modelde, yama ile toprak arasındaki bölge, bir rezonans boşluğu yani kavite olarak değerlendirilir. Söz konusu bu kavite, Şekil 2.20’de görüldüğü üzere, altta ve üstte elektrik duvarlar, yanlardan da manyetik duvarlarla kuşatılmıştır.



Şekil 2.20. Kavite modeli

Kavitenin içinde alan sıfırdır. Antenin yan kenarlarında ise manyetik akımlar dolaşmaktadır. Bu yöntemin, temel mantığı, kavitenin kenarlarını çevreleyen eşdeğer manyetik akımın, uzak alan ışımasının hesaplanmasında kullanılabilmesidir. Manyetik duvar için Denklem (2.8)’deki koşullar sağlanmalıdır:

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H} &= 0 \\ \hat{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{E} &= 0\end{aligned}\tag{2.8}$$

Yani $\vec{H}$ alanının tümüyle yüzeye normal ve $\vec{E}$ alanının sadece yüzeye teğetsel bileşeni mevcuttur. Ancak, mikroşerit anteni sadece bir kavite olarak ele alırsak, bu defa da ışıma söz konusu olmayacaktır. Zira, manyetik duvarlarla çevrili kayıpsız bir kavitenin ışıma yapması beklenmez. Bu nedenle ışımanın mümkün olabilmesi için efektif kayıp tanjantı (δ_{ef}) cinsinden bir kayıp mekanizması oluşturulur. Taban kalınlığı çok küçük bir değerde alınır. Yama altında oluşan dalgalar ileri geri ilerlerken kenarlardan yansıma yaparlar. Bunların çok küçük bir bölümü ışıma olarak uzaya gönderilebilir. Yani, bu modelde anten çok verimsiz ışıma yapmaktadır. Kavite modeli, $\vec{E}$ alanının tamamen toprak düzlemi ile yama kenarları arasındaki açıklıklara (yani manyetik duvarlara) teğetsel olduğunu varsayar. Ayrıca sadece, H_x bileşeni olmayan TM^x modlarını dikkate alır.

TM^x modlarını ifade etmek için, Denklem (2.9) ile ifade edilen A_x (manyetik vektör potansiyelinin x bileşeni) skaler fonksiyonu kullanılabilir.

$$\mathbf{A} = A_x \hat{\mathbf{x}} \quad (2.9)$$

Kaynaksız homojen ortamlarda A_x Denklem (2.10) dalga denkleminin sağlar:

$$\nabla^2 A_x + k^2 A_x = 0 \quad (2.10)$$

Dikdörtgensel kavite gibi düzenli şekiller için değişkenlerin ayrımı ile her bir bileşeni ayrı gösterilebilir:

$$\frac{\partial^2 A_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial z^2} + k^2 A_x = 0 \quad (2.11)$$

Denklem (2.11) için çözüm, Denklem (2.12) olarak yazılabilir:

$$A_x = X(x)Y(y)Z(z) \quad (2.12)$$

Bu durumda Denklem (2.13)'teki gibi her bir bileşen için ayrı ayrı yazılabilir:

$$\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + k^2 X = 0, \quad \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} + k^2 Y = 0, \quad \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} + k^2 Z = 0 \quad (2.13)$$

Denklem (2.13) için çözümler harmonik açılım olarak Denklem (2.14)'teki gibi yazılır:

$$\begin{aligned} X(x) &= \sum_n A_n^c \cos(k_{xn}x) + A_n^s \sin(k_{xn}x) \\ Y(y) &= \sum_n B_n^c \cos(k_{yn}y) + B_n^s \sin(k_{yn}y) \\ Z(z) &= \sum_n C_n^c \cos(k_{zn}z) + C_n^s \sin(k_{zn}z) \end{aligned} \quad (2.14)$$

Denklem (2.14) içindeki fonksiyonlar, Denklem (2.12) içinde yerine konursa, Denklem (2.10) için genel çözüm elde edilmiş olur.

Kısmi çözüm için ise sınır koşulları dahil edilmelidir. Toprak düzleminde ($x = 0$) ve iletken yama üzerinde ($x = h$) elektrik duvarlar nedeniyle $\vec{E}$ alanının yüzeye teğetsel bileşenleri kaybolur $\left(E_y = E_z = 0 \Big|_{x=0, h} \right)$. $\vec{E}$ alanının bileşenleri Denklem (2.15)'teki gibidir.

$$\begin{aligned}
E_x &= \frac{1}{j\omega\mu\epsilon} \left(\frac{\partial^2 A_x}{\partial x^2} + k^2 A_x \right), \\
E_y &= \frac{1}{j\omega\mu\epsilon} \left(\frac{\partial^2 A_y}{\partial x \partial y} \right), \\
E_z &= \frac{1}{j\omega\mu\epsilon} \left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial x \partial z} \right)
\end{aligned} \tag{2.15}$$

Üst ve alt duvarlarda $\left(\frac{\partial A_x}{\partial x} = 0 \Big|_{x=0, h} \right)$ ifadesi, yan duvarlarda da $\left(\frac{\partial A_x}{\partial z} = 0 \Big|_{x=0, L} \right)$ ile $\left(\frac{\partial A_x}{\partial y} = 0 \Big|_{x=0, W} \right)$ ifadeleri ve $\vec{H} - A_x$ ilişkisi kullanılırsa Denklem (2.16)'daki gibi manyetik alan çözümleri elde edilir:

$$\begin{aligned}
H_x &= 0, \\
H_y &= \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A_x}{\partial z^2} \right), \\
H_z &= \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A_x}{\partial y^2} \right),
\end{aligned} \tag{2.16}$$

Denklem (2.16) için çözümler harmonik açılım olarak Denklem (2.17) gibi yazılır:

$$\begin{aligned}
X(x) &= \sum_n A_n^c \cos(k_{xn}x), k_{xn} = n \frac{\pi}{h} \\
Y(x) &= \sum_n B_n^c \cos(k_{yn}y), k_{yn} = n \frac{\pi}{W} \\
Z(x) &= \sum_n C_n^c \cos(k_{zn}z), k_{zn} = n \frac{\pi}{L}
\end{aligned} \tag{2.17}$$

Özdeğer (Eigenvalue) denklemi Denklem (2.18) gibidir:

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k^2 \tag{2.18}$$

Denklem (2.18) için karşılıkları yerine konursa (2.19) elde edilir.

$$\left(\frac{m\pi}{h} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{W} \right)^2 + \left(\frac{p\pi}{L} \right)^2 = (\omega_r^{(mnp)})^2 \mu\epsilon \tag{2.19}$$

Böylece dikdörtgensel mikroşerit anten için rezonans frekans ifadesi Denklem (2.20) gibi yazılabilir:

$$f_r^{(mnp)} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{h} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{W} \right)^2 + \left(\frac{p\pi}{L} \right)^2} \tag{2.20}$$

En küçük rezonans frekans değerine sahip olan mod, **baskın mod** olarak adlandırılır. Genelde, $L > W$ olduğu için TM^{001} modu, en düşük frekanslı mod olup rezonans frekansı için ifade yazılacak olursa Denklem (2.21) elde edilir:

$$f_r^{(001)} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \frac{\pi}{L} = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon}} \quad (2.21)$$

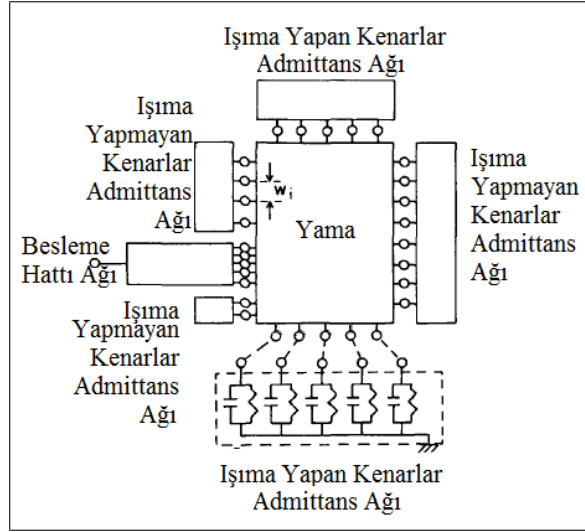
Görüldüğü üzere, TM^{001} modu için rezonans frekans ifadesi, iletim hattı modeliyle hesaplanan rezonans frekansı ile bire bir aynı sonucu vermektedir.

2.5.1.3. Çok girişli ağ modeli (MNM)

Diğer bir analitik yöntem olan Çok Girişli Ağ Modeli (MNM), İngilizce Multiport Network Model kelimelerinin baş harflerinden oluşur (Benalla ve Gupta, 1988). Kavite modelinin genişletilmiş hali olarak da görülebilen bu modelde, antenin çeşitli kenarlarının birbirlerine olan kuplajları da göz önünde bulundurulur ve antenin içindeki ile dışındaki alanlar ayrı ayrı modellenir.

MNM modelinde kavite modelinde olduğu gibi yama altındaki alan, yamayı iki boyutlu bir düzlemsel bileşen olarak görerek yapılmaktadır. Ayrıca, tabanın da oldukça ince olduğu kabul edilir. Ancak, kavite modelinden farklı olarak efektif kayıp tanjantı tanımlanmaz ve ışıyan alanlar hesaba katılmaz. bunun yerine düzlemsel rezonatörün kenarlarında çok sayıda giriş-çıkış noktaları olduğu düşünülür ve harici alanlar (ışınma, yüzey dalgaları ve saçaklar) bu giriş-çıkış noktalarına bağlanan eşdeğer ağlar olarak Şekil 2.21’de görüldüğü gibi temsil edilirler.

Her giriş-çıkış noktası, yamanın kenarındaki küçük bir parçayı (W_i) temsil etmektedir. W_i değerleri oldukça küçük alınarak, üzerindeki alanın değerinin değişmediği kabul edilir. İç bölgesi, yama çevresi etrafında birden çok giriş-çıkışlı düzlemsel bir ağ olarak modellenir, empedans matrisi çözülür. Z-Matrisinin her bir elemanı, geometriye literatürde karşılık gelen Green fonksiyonu kullanılarak Denklem (2.22)’deki formül yardımıyla hesaplanır.



Şekil 2.21. MNM modeli

$$Z_{ij} = \frac{1}{W_i W_j} \int_{W_i} \int_{W_j} G(x_i, y_i | x_j, y_j) ds_i ds_j \quad (2.22)$$

Denklem (2.22) içindeki $(x_{i,j}, y_{i,j})$ ifadeleri, genişlikleri W_i ve W_j olan giriş-çıkış noktalarının konumlarını göstermektedir.

Yukarıda bahsi geçen analitik yöntemler, ışın mantığını anlamak açısından faydalıdır. Ancak, sadece düzenli ve nispeten basit geometrilere uygulanabilirler. Karmaşık geometriler için hatalı sonuçlar verebilirler. Bu durumda numerik yöntemlere başvurmak daha uygun olacaktır.

2.5.2. Numerik yöntemler

Numerik Yöntemler, matematiksel formülasyona bağlı olarak iki ana başlık altında incelenebilir: Diferansiyel denklem temelli yöntemler ve integral denklem temelli yöntemler. Zamanda Sonlu Farklar (FDTD) ve Sonlu Elemanlar Metodu (FEM), diferansiyel denklem temelli yöntemlere örnek olarak verilebilirken, Moment Metodu (MoM) da integral denklem temelli yöntemlere örnek olarak verilebilir. Bu yaklaşımlardan hangisinin kullanılacağını belirleyen pek çok kriter mevcuttur. Bu kriterlerden öne çıkan iki tanesi çözülmek istenen problemin karmaşıklığı ve problemdeki bilinmeyenleri depolamak için gereken bellek miktarıdır. Hangi yaklaşım

izlenirse izlensin, sonuçta $[A][x] = [b]$ şeklinde katsayı matrislerinden oluşan bir denklem elde edilir.

Diferansiyel denklem temelli çözümlerde ortaya çıkan katsayılar matrisi büyük ve seyrek yapıda olurken, integral denklem temelli çözümlerdeki katsayılar matrisi küçük ve yoğun yapıdadır.

2.5.2.1. Moment metodu (Method of Moments-MoM)

Mikroşerit antenleri analiz için kullanılan yöntemlerden ilki ve belki de en yaygın kullanılmış olanı, Moment Metodudur (Method of Moment-MOM). 1968 yılında Harrington tarafından geliştirilmiş olan integral denklem temelli bu yaklaşım, incelenen yapı üzerinde oluşan yüzey akımlarının sayısal hesaplanmasına dayanır (Harrington, 1968). Bunun için açılım ve ağırlık fonksiyonları cinsinden ifade edilen yüzeydeki akım kaynakları kullanılarak bir integral denklem oluşturulur. Sonuçta bir matris denklemi elde edilerek, bilgisayar yardımıyla çözülür. Moment Metodu, kenarlarda oluşan saçakları da hesaba katabildiğinden, analitik yöntemlere göre çok daha doğru sonuçlar verir. Literatürde kısaca MoM olarak bilinen Moment Metodu, birçok EM problemin çözümünde başarıyla uygulanagelmıştır. Aslında MoM, bir uyarma problemi veya başka bir deyişle, sağ tarafında dürtü fonksiyonu şeklinde bir terim bulunan Green fonksiyonu problemidir. Öncelikle ele alınan yapıya ait Green fonksiyonunun bulunması gerekir. Bunun için analiz edilen yapı, segment adı verilen küçük parçalara ayrılır ve yüzey akımlarının matris şeklinde yazılarak çözülmesi hedeflenir. Matrisin boyutu, ortaya çıkan segment sayısına bağlıdır. Segment sayısı arttıkça hesap hacmi ve hesap süresi üstel olarak artmaktadır. MoM, karmaşık integral denklemlerinin doğrusal denklem sistemine indirgenip, ağırlıklı kalanlar (weighted residuals) kullanılarak çözülmesine dayanır. Basitçe Denklem (2.23) ile özetlenebilir:

$$L\Phi = u \quad (2.23)$$

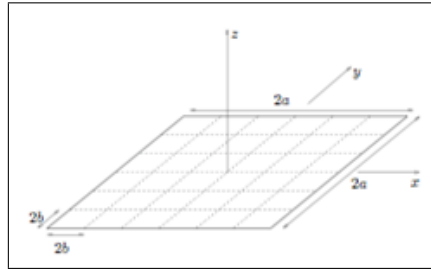
Denklemde L bilinen lineer bir operatör, u ise bilinen bir kaynak

fonksiyonudur. Φ ise bilinmeyen bir fonksiyondur. Bu bilinmeyen fonksiyon, bilinen açılım fonksiyonları cinsinden gösterilir:

$$\Phi = \sum_{n=1} a_n f_n \quad (2.24)$$

Buradaki a_n katsayıları bilinmemektedir. Çözüm, bu katsayıların bulunmasıyla elde edilir. Aslında L lineer operatörüne göre, her segment üzerinde, ağırlıklı kalan uygulandığında, gerçek çözüme yakınsayacak şekilde yaklaşık çözümler bulunmasından ibarettir. Eğer ağırlık fonksiyonu olarak Dirac fonksiyonu seçilirse, her segmentte tek bir noktada gerçek çözümle örtüşecek şekilde yakınsama hedeflenmiş demektir. Bu yöntemle Nokta Eşleme (Point Matching) denmektedir. Eğer ağırlık fonksiyonu olarak, basamak fonksiyonu seçilirse, ağırlık aralığının tümünde gerçek çözümle örtüşecek şekilde yakınsama hedeflenmiş demektir. Bu çözüme de Galerkin Metodu denmektedir. Dikdörtgensel bir yama üzerinde integral aralıklarının gösterimi Şekil 2.22'de görülmektedir.

$$\begin{aligned} \Phi(x, y, z) &= \int_{-b}^b dy' \int_{-a}^a dx' \sigma(x', y') g(\bar{r}, \bar{r}'), \\ g(\bar{r}, \bar{r}') &= \frac{1}{4\pi\epsilon R}, \\ R &= \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + z^2} \end{aligned} \quad (2.25)$$

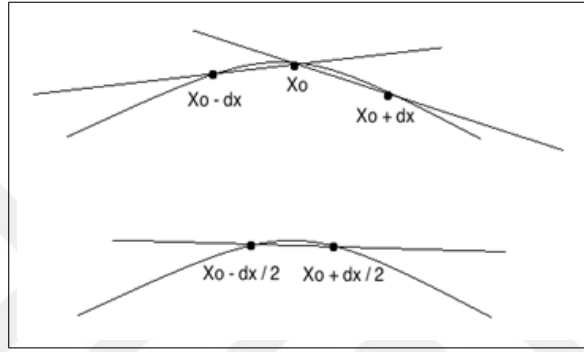


Şekil 2.22. Dikdörtgensel bir bölge üzerinde integral alanlarının gösterimi

2.5.2.2. Zamanda sonlu farklar (Finite Difference Time Domain-FDTD)

Mikroşerit Antenlerin numerik olarak modellenmesinde kullanılan yöntemlerden ikincisi Zamanda Sonlu Farklar Yöntemidir (Finite Difference

Time Domain-FDTD). Elektrik ve manyetik alanlar için uzaysal ve zamansal bir ızgara üzerinde çözüm aranır. Aslında basitçe, analitik türev operatörünün sayısallaştırılmasına dayanır. Tüm çözüm uzayı, hücre ifade edilen küçük küçük kübik bölgelere ayrılır. Türevsel formdaki Maxwell denklemlerinin zamanda ve uzayda merkezi farklar yöntemine göre ayrıklaştırılıp iterative olarak adım adım çözülmesine dayanır (Yee, 1966). İlk kez 1966 yılında ortaya atılmasından bu yana, hemen her tür elektromanyetik problemin çözümünde kullanılan bir yöntem olmuştur. FDTD yöntemi, analitik türev operatörünün sayısallaştırılmasına dayanır (Şekil 2.23).



Şekil 2.23. Analitik türev operatörünün sayısallaştırılması

Kendisi ve türevleri her noktada sürekli olan bir $f(x)$ fonksiyonunun bir x_0 noktasındaki türevi, fonksiyonun o noktadaki eğimidir ve Denklem (2.26) gibi tanımlanır:

$$\left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x_0} = \lim_{(\Delta x \rightarrow 0)} \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} \quad (2.26)$$

Taylor açılımı kullanılarak ve gerekli düzenlemelerle limit operatörü kaldırılırsa Denklem (2.27) elde edilir:

$$\left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x_0} = \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (2.27)$$

İleri sonlu farklar adı verilen yukarıdaki bağıntıda $O(\Delta x)$ ifadesi, katkıları ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu var sayılan üst mertebeli terimleri göstermektedir. Benzer şekilde Geri Sonlu Farklar ifadesi yazılabilir:

$$\left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x_0} = \frac{f(x_0) - f(x_0 - \Delta x)}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (2.28)$$

Yine benzer şekilde Merkezi Farklar Denklemi de yazılabilir:

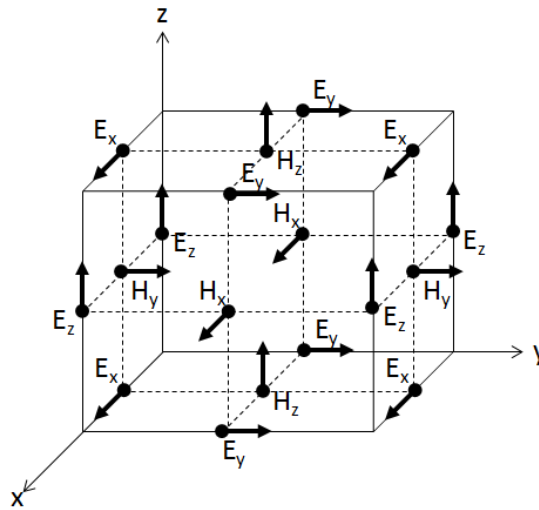
$$\left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x_0} = \frac{f(x_0+\Delta x) - f(x_0-\Delta x)}{2\Delta x} + O(\Delta x^2)$$

veya

$$\left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x_0} = \frac{f(x_0+\frac{1}{2}\Delta x) - f(x_0-\frac{1}{2}\Delta x)}{\Delta x} + O(\Delta x^2) \quad (2.29)$$

Merkezi Farklar Denkleminin avantajı ise hata ifadesinin diğer iki denkleme göre daha küçük hale gelmiş olmasıdır.

Sonlu Farklar yöntemi uzun yıllar bilinmesine rağmen, zamanda Maxwell denklemleri için ilk kez kullanımı 1966 yılında Yee tarafından olmuştur (Yee, 1966). Bunun sonucunda da elektromagnetik dalga yayılımını modelleyen Maxwell denklemlerinin zamana göre türevlerinin sayısallaştırılarak geliştirilmesiyle FDTD özel adıyla ortaya çıkmıştır. Üç boyutlu (3B) problemlerde uzaydaki ayrıklaştırma, Şekil 2.24'de gösterildiği gibi Yee tarafından önerilen birim hücre kullanılarak gerçekleştirilmektedir.



Şekil 2.24. FDTD birim hücresi

FDTD yöntemi ile tutarlı sonuçlar elde etmek için FDTD hücresinin bir kenarı, ilgilenilen frekanstaki dalgaboyunun onda birini geçmemelidir. Bu durumda hücrelerin küçük olması ihtiyaç duyulan bilgisayar belleğini artıracaktır. Her hücrede 6 alan değeri ve hücreye ait ortam bilgisi tutulması gerekecek ve işlem süresi de artacaktır.

2.5.2.3. Sonlu elemanlar metodu (Finite Element Method-FEM)

Kullanılabilecek üçüncü bir yöntem de Sonlu Elemanlar Metodudur (Finite element Method-FEM). 1943’de Courant tarafından ortaya konan diferansiyel denklem temelli bu yöntemde, çözüm uzayı sınır koşulları kullanılarak sınırlandırılır ve küçük parçalar cinsinden tanımlanmış çözüm uzayı elde edilir (Courant, 1943). Bu yöntemin doğruluğunu, kullanılan sınır koşulları belirler. Çünkü, bilgisayar tarafından modellenebilmesi için çözüm uzayının sınırlandırılması gerekir. Bunun için bazı kabullerle, yeterince büyük bir hacimde çözüm uzayı daraltılır. Sonlu Elemanlar Metodunun 4 ana basamağı vardır:

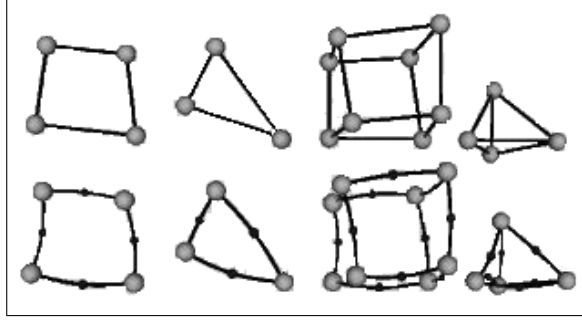
- Çözüm uzayının ayrıklaştırılması ve elemanların oluşturulması,
- Baz fonksiyonlarının seçilmesi,
- Matris denklem sisteminin oluşturulması,
- Denklem sisteminin çözülmesi

İlk ve en önemli basamak, çözüm uzayının ayrıklaştırılması ve elemanların oluşturulmasıdır. Gerekli bellek miktarı, işlem süresi ve yaklaşık çözümün hassasiyeti, çözüm uzayının nasıl ayrıklaştırıldığına bağlı olarak bu basamakta belirlenir. Bu basamakta tüm çözüm uzayı (Ω), Ω^e ile gösterilen daha küçük bölgelere ayrılır ($e = 1, 2, \dots, M$). Bu bölgelere eleman denmektedir. M sayısı, toplam eleman sayısını göstermektedir.

Bir boyutlu (1B) çözüm uzayı için bu elemanlar, birbirlerine eklenerek orijinal doğruyu oluşturan kısa doğru parçaları şeklindedirler. İki boyut (2B) için bu elemanlar üçgen veya dörtgenlerden oluşan küçük düzlem parçalarıdır. 3B için ise dört yüzlü, üçgen prizma veya dörtgen prizma şeklinde küçük hacimlerden oluşur.

Bu lineer modelleme türlerinden başka daha yüksek mertebeli elemanlar oluşturmak da mümkündür. Yani Şekil 2.25’de gösterildiği üzere, doğrusal değişim gösteren fonksiyonların yerini eğrisel değişim gösteren fonksiyonlar

alırlar.



Şekil 2.25. FEM doğrusal ve eğrisel değişim gösteren fonksiyonlar

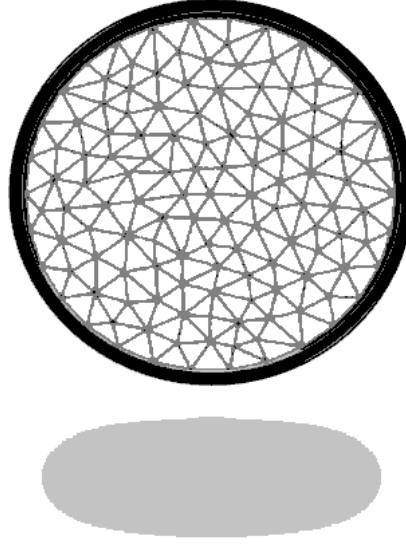
Elementlerin tanımlanabilmeleri için düğüm noktalarına gerek vardır, çünkü bilinmeyen fonksiyonu Φ , elementlerin düğüm noktaları cinsinden tanımlıdır. Lineer doğru parçaları için doğru parçasının iki ucu; 2B lineer düzlem parçaları ve 3B hacimler için üçgenlerin, dörtgenlerin, prizmaların köşeleri elemanların düğüm noktalarını oluşturur.

Ortaya konduğu günden bu yana FEM'in hassasiyeti ve verimliliği açısından önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu ilerlemelerden biri de yüksek dereceli elemanların 2B ve 3B uygulamalarda kullanılmasıdır. Sadeliği yitirmeden geometrik modelleme kabiliyeti artırılmıştır. Daha sonra da farklı bir eleman türü olan kenar elemanlar ya da başka bir deyişle vektörel elemanlar geliştirilmiştir.

FEM'in hassasiyeti tekil özellik gösteren kenar, köşe gibi noktalarda, özel şekil fonksiyonları kullanarak artırılabilir. Örneğin Şekil 2.26'da 2B bir dairesel düzlem parçası, iç bölgelerde doğrusal değişim gösteren üçgensel elemanlar cinsinden tanımlanmıştır. Kenarlarda ise eğrisel değişim gösteren fonksiyonlar kullanan elemanlar ile hassasiyet artırılmıştır.

Elektromanyetik problemlerdeki FEM'in başarısı, esnekliği ve kullanım kolaylığına bağlanabilir. Bütün bu çekici özelliklerinin yanında katsayılar matrisinin seyrek yapıda olmasıyla da oldukça büyük işlem kolaylığı sağlamaktadır. FEM, bir yandan kenarlarda yüksek mertebeli elemanlar kullanarak hassasiyeti sağlarken, diğer yandan da içerilerde düşük mertebeli elemanlar kullanarak matrisin seyrekliğini de bir arada sağlamaktadır.

Sonlu elemanlar metodunun ikinci basamağı, bilinmeyen fonksiyonuna bir eleman üzerinde yaklaşık çözüm elde etmede kullanılacak, baz fonksiyonlarının seçilmesidir. Baz fonksiyonları, genellikle birinci dereceden bir polinom



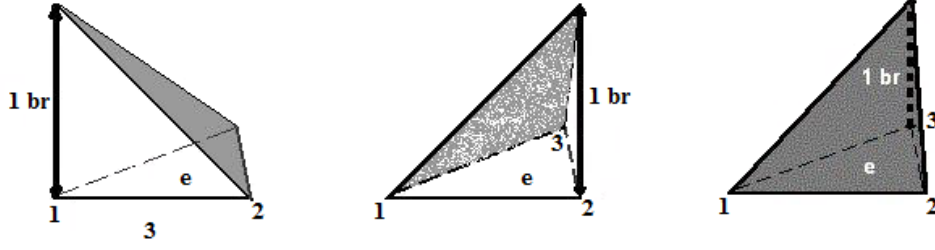
Şekil 2.26. 2B dairesel düzlemde elemanların gösterimi

yani lineer fonksiyonlardan oluşurlar. Bundan başka ikinci veya daha yüksek dereceden polinomlar da kullanılabilir. Yüksek dereceli polinomlardan oluşan baz fonksiyonları daha hassas çözüm vermekle beraber, daha karmaşık formülasyona neden olurlar. Günümüzde kullanımı basit temel lineer fonksiyonlar yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Her bir eleman üzerinde baz fonksiyonlarıyla yaklaşık çözüm Denklem (2.30) ile ifade edilebilir:

$$\overline{\Phi}^e = \sum_j^n N_j \Phi_j^e \quad (2.30)$$

Burada n sayısı bir eleman üzerindeki düğüm sayısını göstermektedir. Φ_j^e ile Φ 'nin j 'nci düğüm üzerinde aldığı değer gösterilmektedir. N_j^e baz fonksiyonlarını göstermektedir. N_j^e nin en yüksek derecesi, elemanın derecesini de göstermektedir. Yani N_j^e bir lineer fonksiyon ise, eleman e bir lineer elemandır. Bu N_j^e lerin en belirgin özelliği ise, e 'nci eleman üzerinde sıfırdan farklı, bu elemanın dışarısında ve köşelerinde ise sıfır değer almalarıdır (Şekil 2.27).

Sonlu elemanlar metodunun üçüncü basamağı denklem sisteminin formülize edilmesidir. Öncelikle sonlu elemanlar metodu kullanılarak çözümü aranan sınır değer problemi yazılacak olursa, bir Ω bölgesi için en genel olarak ifade Denklem (2.31) şeklindedir.



Şekil 2.27. Üçgensel e'nci eleman üzerindeki baz fonksiyonları

$$L\Phi = f \quad (2.31)$$

L ile gösterilen operatör, bir diferansiyel işleç olarak tanımlanmıştır. f ile uyarıcı fonksiyon gösterilmiştir. Burada bilinmeyen büyüklük, Φ ile gösterilmiştir. Ağırlıklı kalan ifadesinden kastedilen, diferansiyel denklemin kalanını tartarak çözümü aramaktır. Burada kalan (residual) ile ifade edilen büyüklük, gerçek çözüm ile yaklaşık çözüm arasındaki farklılıktan kaynaklanmakta olup Denklem (2.32) ile ifade edilebilir.

$$r = L\Phi - f \neq 0 \quad (2.32)$$

Φ için en iyi yaklaşık çözüm, Ω bölgesinin her noktası için kalan r 'yi sifıra götüren çözüm olacaktır. e'nci elemandaki ağırlıklı kalan ifadesi yazılırsa:

$$R_i^e = \int_{\Omega^e} N_i^e (L\Phi^e - f) d\Omega, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.33)$$

Düğüm noktaları cimsinden baz fonksiyonları kullanılarak yeniden yazılırsa da Denklem (2.34) elde edilir.

$$R_i^e = \sum_{j=1}^n \left(\int_{\Omega^e} N_i^e L N_j^e \Phi_j^e d\Omega - \int_{\Omega^e} N_i^e f d\Omega \right), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.34)$$

Yukarıdaki ifade matris denklemi olarak yazılırsa,

$$\{R^e\} = [K^e]\{\Phi^e\} - \{b^e\} \quad (2.35)$$

$[K^e]$ ve $\{b^e\}$ ifadelerinin karşılıkları Denklem (2.36)'de verilmiştir:

$$K_{ij}^e = \int_{\Omega^e} N_i^e L N_j^e \Phi^e d\Omega, \quad b^e = \int_{\Omega^e} N_i^e f d\Omega \quad (2.36)$$

Bir düğüm noktasıyla ilgili olan tüm açılım fonksiyonlarının etkisi, o düğüm noktasına doğrudan bağlı olan elemanların katkılarının toplamı şeklindedir. Yerel-genel numaralandırma dönüşümüyle, tek bir eleman üzerindeki ağırlıklı kalanlardan tüm çözüm bölgesindeki ağırlıklı kalanlara geçilebilir. Bu işleme genişletme (augmentation) denmektedir. Tüm elemanlardan gelen katkı sonucu, her bir eleman için bulunan R^e ler toplanarak, $\{R\}$ elde edilir.

$$\{R\} = \sum_{e=1}^M \overline{R^e} = \sum_{e=1}^M ([\overline{K^e}] \{\overline{\Phi^e}\} - \{\overline{b^e}\}) \quad (2.37)$$

Görülen üst çizgiler, matris genişletmesini göstermektedir. Bunun sonucunda bir denklem sistemi ortaya çıkacaktır. Yani,

$$\sum_{e=1}^M [K^e] \{\Phi^e\} - \{b^e\} = \{0\} \quad (2.38)$$

Başka bir ifadeyle

$$[K^e] \{\Phi^e\} = \{b^e\} \quad (2.39)$$

denklem sistemi elde edilir. Bunun çözülmesi için sınır koşullarının dahil edilmesi gereklidir. Problem, baz fonksiyonları ve onların katsayılarıyla yakınsanan bilinmeyen fonksiyonunun yer aldığı ağırlıklı kalan ifadesinin, verilen sınır koşulları altında en küçük değerini almasını sağlayan, baz fonksiyon katsayılarının bulunmasıdır.

Denklem sisteminin oluşturulması basamağı, aslında üç alt basamaktan oluşmaktadır. Önce bireysel eleman denklemleri oluşturulmakta; daha sonra eleman denklemleri tüm elemanlar üzerinden toplanarak genel denklem sistemi şekline getirilmekte; en son olarak sınır koşulları bu sisteme dahil edilmektedir. Böylece nihai denklem sistemi çözülmeye hazır hale gelmektedir.

Sonlu elemanlar metodunun son basamağı, elde edilen denklem sisteminin çözülmesidir. Nihai denklem sistemi çözüldükten sonra bilinmeyen fonksiyonu,

elde edilen Φ değerleri cinsinden gösterilir. Bu aşamada fonksiyon, grafikte veya renklendirilmiş resimlerle, yorumlamaya kolaylık sağlayacak şekilde gösterilir.

Elektromanyetik czmler açısından sayısal yöntemler konusunun önemi bugün iyice anlaşılmıştır. Ancak czm ifadelerin nümerik olarak değerlendirilmesi nümerik yakınsama hatalarına sebep olmaktadır. Doğruluğu artırmak için daha fazla bilgi işlem gücü gerekmektedir.

Bugün, yukarıda bahsi geçen nümerik yöntemlerden faydalanarak, çok değişik ve karmaşık geometrilerdeki mikroşerit antenleri analiz edebilen ticari hazır yazılımlar mevcuttur. Bunlardan çok bilinen bir tanesi de HFSS (High Frequecy Structure Simulator) yazılımıdır. HFSS yazılımının en büyük avantajlarından biri de optimizasyon için kullanılabiliyor olmasıdır. Tasarım sırasında geometrik ölçüler veya dielektrik sabiti gibi değerler parametrik olarak tanımlanırsa, bu parametrelerin değişimlerinin grafiğini çizdirerek veya bir optimizasyon algoritması yardımıyla, istenen özelliklerde bir anten tasarlanabilir.

HFSS simülasyon, görsel hale getirme ve 3 Boyutlu modellemeyi bir kullanıcı arayüzü ile basitleşirmiştir. Czm uzayını, tetrahedral hacimlerden oluşan elemanlar kullanarak tanımlar. S-parametreleri, rezonans frekansı ve alan değerlerini hesaplamak için etkinlikle kullanılabilir. Bu tez çalışmasında da HFSS yazılımından faydalanmıştır ve ADYA tipi antenlerde kullanımına ilişkin detaylar, tezin ağırlık noktasını oluşturan ve yapılan çalışmanın anlatıldığı Bölüm 4'te verilmiştir.

3. MİKROŞERİT ANTENLERİN OPTİMİZASYONU

Bu bölümde, genel olarak optimizasyonun ne olduğu anlatılıp matematiksel olarak ifade edildikten sonra, optimizasyon yöntemleri sınıflandırılacaktır. Bu sınıflandırmaya göre stokastik yöntemler grubunda yer alan metasezgisel yöntemlerden en çok bilinen on iki tanesi kısaca tanıtıldıktan sonra, bunlardan tez çalışmasında kullanılan yöntem olan Genetik Algoritma sunulacaktır.

3.1. En Genel Olarak Optimizasyon

Optimizasyonun ya da Türkçe ifadesiyle eniyilemenin hayatın her alanında olduğu söylenebilir. Neredeyse her faaliyette gerek kâr, gerek kalite, gerekse zaman açısından belirli hedefleri yakalamaya çalışarak sistemler optimize edilir. Çünkü kaynaklar ve/veya zaman sınırsız değildir. Matematiksel olarak eniyileme, matematiksel araçlar kullanarak problemleri tanımlama ve sorunların çözümüne yönelik plan yapma faaliyetidir. Her optimizasyon problemi genel olarak aşağıdaki gibi matematiksel ifadelerle gösterilebilir;

$$\text{En Küçük Değerini Bul } f_i(x) \quad (i = 1, 2, \dots, M)$$

$$\text{Sağlanması Gereken Eşitlikler } h_j(x) \quad (j = 1, 2, \dots, J)$$

$$\text{Sağlanması Gereken Eşitsizlikler } g_k(x) \quad (k = 1, 2, \dots, K)$$

Yukarıdaki ifadelerdeki x ile gösterilenler, $f_i(x)$ ile gösterilen amaç fonksiyonunu optimize edecek tasarım parametreleridir.

Eğer optimizasyon, problemde yer alan hedef sayısına göre sınıflandırılacak olursa, tek amaçlı ($M = 1$) veya çok amaçlı ($M > 1$) olarak sınıflandırılabilir. Çok amaçlı optimizasyon, aynı zamanda çoklu kriterle eniyileme olarak da ifade edilebilir. Gerçek dünyadaki eniyileme problemleri,

çoğunlukla çok amaçlı eniyilemelerdir.

Bir optimizasyon probleminin doğru bir şekilde formulize edilmesinden sonraki adım, doğru matematiksel teknikleri kullanarak en iyi çözümleri bulabilecek bir prosedür izlenmesidir. En iyi çözümü aramak, belirli bir süre kısıtı varken, engebeli bir arazide gizli bir hazineyi bulmaya benzer. Uç bir örnek vermek gerekirse, diyelim ki hiçbir rehber olmadan körlemesine arama yapılsın. Bu durumda arama, tamamen rastgele olacaktır ki, pek de verimli bir arama olması beklenilmez. Diğer bir uç örnek olarak da, gizli hazinenin belirli bir bölgede yer alan en yüksek tepede olduğunun haberine ulaşılsın. Bu durumda doğrudan dik tepelere tırmanıp en yüksek tepeye ulaşmaya çalışılır. Gerçek hayatta ise durum bu ikisinin arasındadır. Arama yaparken körlemesine yapılmaz, ancak belirli bir bölgeye yoğunlaşmayı sağlayacak bir bilgi de mevcut değildir. Ayrıca, yüksek bir tepenin her santimetresine de bakmak pek akıllıca değildir. Çok yüksek olasılıkla böyle bir durumda yapılacak iş, hazineye ilişkin ipuçları yakalamaya çalışarak arama bölgesini daraltıp, sonrasında da neredeyse rastgele şekilde tahmin edilen yerlere bakmaktır. Hazine bulunamadığında da eldeki bulgulara bakıp durum değerlendirmesi yaptıktan sonra bir sonraki makul tahmine bakarak aramaya devam edilir. İşte bu rastgele arama, modern arama algoritmalarının temelini oluşturur. Hazine avı ya tek başınadır ki bu durumda aynı “Benzetilmiş Tavlama” yönteminde olduğu gibi, güzergah bazlı bir aramadan söz edilir. Veya hazine avı, grup olarak icra edilir. “Parçacık Sürüsü Optimizasyonu” olarak bilinen yöntemde bir grup birey ortaklaşa çalışarak ve buldukları bilgileri paylaşarak ararlar. Arama stratejisini daha da ileri götürmek gerekirse ve hazine avında bazı bireylerin diğerlerinden daha yetenekli olduğunu ve daha iyi ipuçları elde ettiklerini varsayılırsa, bu durumda iyi avcılar elde tutmaya devam ederken, performansı yetersiz olanları gruptan çıkarıp, yerlerine yeni bireyler koyarak devam edildiği düşünülün. Genetik Algoritma veya Evrimsel Algoritmaların yer aldığı bu stratejide, arama yapan bireylerin giderek daha iyi sonuçlara ulaşması söz konusudur. Aslında, doğadaki olaylardan esinlenen ve kısmen örnekleri bulunan bu metasezgisel algoritmaların temelinde yukarıda verilen örneklerin hepsinden bir şeyler bulunmaktadır. Genel bir kaide olarak en iyi çözümler veya bireyler kullanılırken, her bireyin performansına bakılarak yeterince iyi olmayan bireylerin rastgele seçimler sonucu bulunan

yeni bireylerle değiştirilmesi suretiyle eniyilemenin yapılması vardır.

Optimizasyon yöntemlerinin sınıflandırılması, pek çok şekilde olabilir. En basit şekilde sınıflandıracak olunursa, optimizasyon yöntemleri deterministik ve stokastik olarak ikiye ayrılabilir. Deterministik algoritmalar kesin kurallarla tanımlı olup, aynı adımları izleyerek her defasında aynı sonuçlara ulaşmak mümkündür. Örneğin, tepe tırmanma probleminde, eğer hep aynı noktadan başlanılırsa, hep aynı güzergah izlenerek her seferinde aynı sonuca ulaşılır. Stokastik algoritmalarda ise bir rasgelelik durumu mevcuttur. Buna en iyi örnek olarak “Genetik Algoritma” verilebilir. Her seferinde farklı bireyler oluşturulacak ve her seferinde farklı güzergah izlenilerek öncekine yakın fakat bire bir aynı olmayan bir sonuca varılacaktır. Elde edilen sonuç neredeyse aynı olsa da kullanılan bireyler ve izledikleri güzergahlar kesinlikle tekrar edilebilir olmayacaktır. Aslında bu iki tipin melezlenmesiyle ortaya çıkan üçüncü bir yaklaşım daha vardır. Örneğin, tepe tırmanma probleminde rastgele başlangıç noktaları alarak her seferinde farklı güzergah ve farklı sonuçlar elde edilebilir. Temel prensibi, deterministik bir algoritmayı rasgele başlangıç değerleri ile kullanmaktır. Bu yaklaşımın klasik tepe tırmanma algoritmasına üstünlüğü, yerel tepe noktalarına takılıp kalmadan, en genel ve en yüksek tepenin bulunmasına olanak vermesidir.

Pek çok klasik algoritma, deterministik sınıfındadır. Deterministik algoritmalar, gradyan bilgisini kullandıklarından bunlara gradyan temelli algoritmalar denir. Bu tip algoritmalara verilebilecek örneklerin başında da fonksiyon değeri ve bunların türevlerini kullanan “Newton-Raphson” algoritması gelir. Newton-Raphson, kesintisiz ve sürekliliği olan problemlerde başarılıdır. Ancak amaç fonksiyonunda bir süreksizlik olduğunda başarılı olamaz. Gradyansız algoritmalar ise türevleri kullanmaz, sadece fonksiyonları kullanır. Bunlara örnek olarak ise “Hooke-Jeves” desen arama yöntemi verilebilir. Stokastik yöntemlerde ise iki alt dal mevcuttur: “sezgisel (heuristic)” ve “metasezgisel (meta-heuristic)” yöntemler. En geniş anlamıyla sezgisel demek, deneme-yanılma ile bulma ve keşfetmeyle ilgili demektir. Bir eniyileme probleminde sezgisel yöntemlerle makul bir süre zarfında tatmin edici çözümler elde edilebilir. Bu çözümler mümkün olan en iyi çözümler olmasalar da, kolaylıkla ve kısa sürede bulunabilen ve oldukça iyi olan

çözümlerdir. Bu algoritmalar, çoğu zaman işe yarasalar da, her zaman işe yarayacakları garanti değildir. Sezgisel algoritmaların geliştirilmesiyle metasezgisel algoritmalar ortaya çıkmıştır. Metasezgisel demek, sezgisel ötesi, sezgisel algoritmaları kontrol eden demektir. Sezgisel ve meta sezgisel algoritmaların tanımları iç içe olduklarından çoğu zaman birbirlerine karıştırılsalar da, stokastik algoritmaların genelde metasezgisel olduklarına dair kuvvetli bir kanaat oluşmaktadır. Bunun en büyük nedeni olarak, stokastik yöntemlerin doğasında bulunan rasgeleliğin kullanımı sayesinde yerel en iyi çözümlerden, genel en iyi çözümlere daha da yaklaşma öne sürülebilir. Bu nedenle neredeyse tüm metasezgisel algoritmaların, genel en iyi çözümleri elde etmeye uygun olduğu kabul edilmektedir.

Metasezgisel kelimesi ilk olarak Fred Glover tarafından ortaya atılmıştır (Glover, 1986). Ayrıca, metasezgiselin tarifi, yerel en iyi çözümlerin aranmasında kullanılan sezgisel yöntemlerin ötesinde sonuçlar elde etmek üzere sezgisel yöntemlerin yönlendirilmesi ve değiştirilmesini içeren ana strateji olarak ifade edilmiştir (Glover ve Laguna, 1997).

Her metasezgisel algoritma, iki ana bileşenden oluşur: yoğunlaştırma ve farklılaştırma. Başka bir ifadeyle bulunanları kullanma ve yenileri keşfetme (Blum ve Roli, 2003).

Farklılaştırma veya yenileri keşfetme ile, genel eniyi çözümü bulmak ve çözüm uzayının küresel ölçekte keşfedilmesi amacıyla farklılaştırılmış bireylerle çok çeşitli çözümlerin üretilmesi hedeflenirken, yoğunlaştırma ile, yerel bir arama bölgesinde, bu bölgedeki iyi çözümün peşine düşülür ve bu kısıtlı alana odaklanılır.

Algoritma yakınsamasını hızlandırmak için en iyi çözümlerin seçimi esnasında yoğunlaştırma ve farklılaştırma arasında denge sağlanmalıdır. En iyilerin seçimi ile eniyi noktaya doğru yakınsama sağlanırken, rastgele farklılaştırma ile çözüm uzayının her yanına dağılma ve yerel eniyi noktadan ziyade genel eniyi noktaya doğru yakınsama sağlanır. Bu iki ana bileşenin uygun şekilde kullanımı ile genel eniyi noktanın ulaşılması mümkün olur.

Metasezgisel yöntemlerde kendi içlerinde alt başlıklara pek çok şekilde ayrılabilir. Bunlardan literatürde kabul gören, “Tek Çözüme Dayalı” ya da

“Toplum Tabanlı Metasezgisel Yöntemler” olarak sınıflandırılabilir (Blum ve Roli, 2003).

Tek Çözüme Dayalı (Güzergah Tabanlı) yöntemler denince akla ilk gelen “Benzetilmiş Tavlama” ve “Tepe Tırmanma Algoritmaları”dır. Bu yöntemlerde, bir defada tek bir birey veya çözüm kullanılır. Denemeler devam ettikçe, her bir denenen değerin birleştirilmesiyle ortaya bir güzergah izi çıkar. Toplum Tabanlı çözümlere örnek olarak ise Genetik Algoritma ve Parçacık Sürü Eniyilemesi verilebilir. Bu yöntemlerde, aralarında etkileşim bulunan ve herbiri ayrı bir güzergah izi oluşturan birden fazla birey veya çözüm kullanılır (Kennedy ve Eberhart, 1995).

Metasezgisel Optimizasyon Algoritmaları Çizelge 3.1 gibi listelenmiş olup her bir metasezgisel algoritmanın tanıtımından önce, kısaca bu konuda günümüze kadar olan çalışmalara ait bilgiler sunulacaktır.

Çizelge 3.1. Metasezgisel optimizasyon algoritmaları

Benzetilmiş Tavlama Algoritması	Harmoni Arama Algoritması
Türevsel Evrim Algoritması	Ateşböceği Algoritması
Karınca Koloni Optimizasyonu	Guguk Kuşu Arama Algoritması
Arı Algoritması	Yapay Bağışıklık Sistemi Algoritması
Parçacık Sürü Algoritması	Yayılmacı Ot Algoritması
Tabu Arama Algoritması	Genetik Algoritma

3.2. Metasezgisel Optimizasyon Algoritmaları

İnsanlık tarihi boyunca, biz insanların problem çözmeye yaklaşımı, asli olarak deneme yanılma şeklinde ortaya çıkmıştır. Pek çok önemli buluş, ya alışılmış kalıpların dışında düşünenlerin çalışmaları veya biraz da şans eseri yaşanan tecrübeler sonucu olmuştur ki, bu durumda bunların sezgisel olduklarından bahsedilebilir. Çocukluk döneminde edinilen tecrübelerle öğrenilenler de sezgisel yaklaşımın bir sonucudur. Metasezgisel yöntemin ilk defa kim tarafından ve nerede kullanıldığını kesin olarak söylenememekle birlikte, günümüzde kabul gören modern bir bilimsel yöntem olduğu aşikardır. Metasezgisel yöntemlerin temellerinin tahmini olarak 1940’larda atıldığı düşünülmektedir. İkinci Dünya Savaşı sırasında Alan Turing tarafından Bletchly

Park'ta Almanlara ait Enigma kriptosunun kırılması sırasında kullanıldığı bilinmektedir. Turing, yöntemini her zaman çalışması garanti olmayan, bununla beraber genelde başarılı olmasının beklenebileceği şeklinde ifade ederek yöntemine sezgisel arama adını vermiştir. Sonuçta yönteminin başarısı çok büyük olmuş ve Almanların kriptosu kırılabilmiştir. 1960'larda sezgisel yöntemler pek çok uygulamada kullanılmıştır. Ancak asıl önemli adım, Evrimsel Algoritmaların çıkışıyla atılmıştır. 1963'te Ingo Rechenberg and Hans-Paul Schwefel Berlin Teknik Üniversitesinde Evrimsel Stratejileri geliştirmiş ve daha sonra da L. J. Fogel ve arkadaşları 1966'da Evrimsel Programlamayı geliştirmişlerdir. Genetik Algoritma, 1960 ve 1970'lerde J. Holland tarafından geliştirilmiş ancak literatüre ilk defa 1975 yılında yayımlanan kitabı ile girmiştir (Holland, 1975).

1980 ve 1990'lar metasezgisel algoritmalar için hareketli yıllar olmuş, metallerin ısıtıldıktan sonra soğumaya bırakıldıkları tavlama işleminden ilham alan Benzetilmiş Tavlamanın, 1983 yılında S. Kirkpatrick ve arkadaşları tarafından ortaya atılmasıyla önemli bir adım daha atılmıştır (Kirkpatrick ve dig., 1983).

Diğer bir önemli atılım da 1986 yılında Farmer ve arkadaşları tarafından Yapay Bağışıklık Algoritmasının ortaya atılması ile olmuştur (Farmer ve dig., 1986).

Daha sonra 1980'lerde kullanılmış olsa da, literatüre 1997 yılında giren Tabu Arama ile metasezgisel yöntemlerde bellek kullanımı (Glover ve Laguna, 1997) geliştirilmiştir. Bu yöntemde çözüm denemeleri bir listede tutulmakta ve sonraki denemeler bu listenin dışında olacak şekilde yapılmaktadır.

1992 yılında Marco Dorigo tarafından Karınca Kolonisi Eniyilemesi yöntemi ortaya atılmıştır (Dorigo, 1992). Daha sonra Gezgin Satıcı Probleminde Karınca Kolonisinin uygulanması gösterilmiştir (Dorigo ve Gambardella, 1997). Bu yöntem, feromon adlı mesaj taşıyan kimyasal maddelerle haberleşebilen, karınca sürüsünün davranışı ve Sürü Zekasından ilham almaktadır.

Daha sonra 1992 yılında, John R. Koza tarafından hazırlanan eser ile, Genetik Algoritmanın makine öğrenmesindeki temelleri ortaya koyarak, bilgisayar programlama kavramını derinden etkilemiştir (Koza, 1992). 1995

yılında, James Kennedy and Russell C. Eberhart tarafından Parçacık Sürü Algoritması geliştirilmiştir (Kennedy ve Eberhart, 1995). 1996 yılında ise, R. Storn and K. Price tarafından vektör tabanlı evrimsel algoritma olarak da ifade edilebilecek Türevsel Evrim yöntemi geliştirilmiş ve bu algoritmanın, Genetik Algoritmadan daha verimli ve başarılı olduğu gösterilmiştir (Storn ve Price, 1997).

2001 yılında Zong Woo Geem ve arkadaşları tarafından, müzikten ilham alarak geliştirilen Harmoni Arama algoritması (Geem ve dig., 2001), 2002 yılında da Passino tarafından Bakteri Çoğalma Algoritması literatüre girmiştir (Passino, 2002).

2004 yılında Nakrani tarafından Internet web sunucu merkezlerinin eniyilemesinde Bal Arısı Algoritmasının kullanımı gösterilmiş (Tovey, 2004) ve hemen ardından yeni Arı Algoritması ((Pham ve dig., 2005)) tarafından geliştirilmiştir. 2005 yılında Karaboğa tarafından Suni Arı Kolonisi Yöntemi ortaya atılmış (Karaboga, 2005); 2008 yılında Yang tarafından Ateş Böceği Algoritması tanıtılmıştır (Yang, 2008). 2009 yılında Yang ve Deb tarafından verimli bir algoritma olan Guguk Kuşu Araması Algoritması geliştirilmiştir (Yang ve Deb, 2009). Bu yöntemle gösterilmiştir ki, Guguk Kuşu Arama Algoritması, mevcut olan Parçacık sürü Algoritması dahil pek çok metasezgisel algoritmalarından daha başarılı sonuçlar vermektedir (Yang ve Deb, 2010).

Metasezgisel Optimizasyon Algoritmalarına bu kısa bir girişten sonra, bundan sonraki bölümde, her bir algoritmanın kısaca açıklaması yapılacak ve en sonda da Genetik Algoritma ile eniyileme üzerinde durulacaktır. Şunu da vurgulamak gerekir ki, metasezgisel yöntemlerle eniyileme sürekli gelişmekte olan bir alan olup, metasezgisel algoritmalar bu tezde bahsedilenlerle sınırlı değildir. Bu çalışmada en çok bilinen algoritmalara yer verilmeye çalışılmıştır.

3.2.1. Benzetilmiş tavlama algoritması

Benzetilmiş Tavlama, metallerin tavllanması sırasında önce ısıtılıp sonra da dikkatli bir şekilde soğutulmaya bırakılarak düşük enerji durumlarının elde

edilmesine dayanmaktadır (Kirkpatrick ve dig., 1983). Metalurji biliminde tavlama süreci iki adımdan oluşmakta olup, bir katının önce ısı banyosunda katının eriyeceği maksimum sıcaklık değerine dek yükseltilmesi ve daha sonra da tanecikler en düşük enerji durumuna ininceye kadar kontrollü bir şekilde soğutulmaya bırakılmasıdır.

Gradyan tabanlı metodlara veya diğer deterministik arama metodlarına üstünlüğü, yerel optimum noktalarına takılıp kalmaktan kaçınabilmesidir. Genel mantığını anlatmak için, zıplayan topların bir yamaçtan aşağıya doğru bırakılması örnek olarak verilebilir. Toplar kendi haline bırakıldığında, enerjilerini kaybedip bir yerel minimum noktasında dururlar. Ancak topların yeterince uzun süre zıplatılması sağlanabilirse eninde sonunda, toplardan bazıları en dip noktaya birikecek, yani global optimum noktasına ulaşmış olacaktır. Benzetilmiş tavlama algoritması, bir başlangıç değerinin belirlenmesi ile başlar. Başlangıç değeri, bir başlangıç sıcaklığındaki değerdir. Sonraki süreçte yeni çözümler oluşturulur ve bu yeni aday çözümler değerlendirilir. Ardından da sıcaklığın uyarlanması ile devam eder. Benzetilmiş Tavlama'da arama güzergahı, parçalardan oluşan bir yol olacaktır.

Yeni çözümler, ya rastgele ya da önceden belirlenmiş bir kurala göre oluşturulur. Her bir turda, mevcut çözüm ile yeni oluşturulan aday çözüm karşılaştırılır. Mevcut çözümü iyileştiren yeni çözümler yanında, mevcut çözümü iyileştirmeyen yeni çözümlerin bir bölümü de sıcaklığa göre değişen olasılık parametresine bağlı olarak kabul edilmektedir. Mevcut çözümü iyileştirmeyen yeni çözümlerin de kabul edilmesinin amacı, küresel en iyinin bulunabilmesidir.

Yeni çözümün kabulünde, olasılığa dayanan bir fonksiyonunun kullanılması sayesinde amaç fonksiyonundaki küçük değişimlerin, büyük değişimlere kıyasla daha çok kabul edilmesi sağlanmış olur. Sıcaklığın yüksek olduğu durumlarda yeni bulunan çözümlerin çoğu, iyileştirme sağlamasa bile kabul edilirken, sıcaklık en düşük değere yaklaştığında amaç fonksiyonunda iyileştirme sağlayan çözümlerin bile çoğu, yeterince iyi olmadıklarından ötürü reddedilebilir. Bu nedenle, başlangıç sıcaklığının ve başlangıç çözümünün nispeten yüksek bir sıcaklık değeri ile başlaması, global optimuma ulaşmada daha büyük başarı sağlayacaktır (Eglese, 1990).

3.2.2. Türevsel evrim algoritması

Türevsel Evrim, 1996-1997 yıllarında R. Storn and K. Price tarafından geliştirilmiş olup, vektör-tabanlı bir evrimsel algoritmadır (Storn ve Price, 1997). Neredeyse her işlem vektörel olarak yapılmakta olup, Türevsel Evrim algoritması, optimum noktaya doğru yönelmiş bir aramadır. Genetik Algoritmayla benzer benzer özelliklere sahiptir. Ancak en büyük farklılık, Genetik Algoritmada çaprazlamanın büyük rol oynamasına karşın, Türevsel Evrim Algoritmasında mutasyonun önemli rol oynamasıdır. Türevsel Evrim algoritması üç ana adımdan oluşur. Mutasyon, çaprazlama ve seçim. En başta d sayıda parametrelili bir optimizasyon probleminde n sayıda bireyden oluşan başlangıç vektörleri üretilir. Bu vektörler, Genetik algoritmadaki kromozomlar gibidir.

Mutasyon aşamasında, her bir vektör için bir donör vektör oluşturulur. Bunun için herhangi bir zamanda üç farklı vektör daha seçilir ve belirlenmiş mutasyon mekanizmasına göre bir donör vektör elde edilir.

Çaprazlama, 0 ile 1 arasında değişen bir olasılık değeri ile kontrol edilmektedir. Ebeveyn vektör, mutasyona uğramış vektör ile karıştırılarak aday vektör elde edilir.

Mutasyon ve çaprazlama sonrası elde edilen her çözüm adayının, uygunluk değerine bakılmaksızın ebeveyn olma şansı aynıdır. Ancak seçim safhasında, elde edilen yeni nesil bireylerin performansına bakılarak seçim yapılır. Çocuklar ve ebeveynlerden hangisinin performansı daha iyiye o bir sonraki nesile geçmek üzere seçilir.

Türevsel Evrim algoritmasının öne çıkan üstünlüğü, optimizasyon probleminin gradyanını kullanmadığı için sürekli olmayan, gürültülü ve zaman içerisinde değişim gösteren optimizasyon problemlerinde de başarılı olabilmesidir (Rocca ve diğ., 2011).

3.2.3. Karınca koloni optimizasyonu

Karınca Koloni Optimizasyonu, 1991 ve 1992 yıllarında Marco Dorigo tarafından karınca toplumunun besin toplama davranışları esinlenerek ortaya

atılmış bir yöntemdir (Colorni ve dig., 1991; Dorigo, 1992). Karınca Koloni Optimizasyonunun gezgin satıcı problemine başarılı bir şekilde uygulanabileceği gösterilmiştir (Dorigo ve Gambardella, 1997). Karıncalar, birey sayıları yirmi beş milyona varabilen koloniler kurabilmekte olup, feromon adlı kimyasal bir haberleşme aracı kullanarak etkileşime girerler. Besin arama sırasında karınca sürüsündeki arama yapan bireyler, birbirleriyle etkileşim içindedirler. Her bir karınca kimyasal bir iz bırakarak ilerlerken, başka karıncalar bu izi takip ederek öncekinin bulduğu besine ulaşabilir. Sonuçta yuva ile besin arasında bir iz ortaya çıkar. Ancak feromon, sabit bir hızda buharlaşarak yoğunluğunu kaybetmeye başlar. Üzerinde fazla sayıda karınca gezinen izlerde ise feromon yoğunluğu yüksek kalmaya devam eder. Eğer bir iz üzerinden fazla sayıda karınca geçiyorsa, o güzergahın rağbet gördüğünden bahsedilebilir. Yani bir pozitif geri besleme mekanizması mevcuttur. Sistem kendini geliştirdikçe karıncaların besin taşıma izlerinin yuva ile en çok besin bulunan bölgeler arasındaki hat üzerine veya sık geçildiği için en kısa hat üzerine geldiği görülecektir.

Eğer yuva ile besin kaynağı arasına bir engel konacak olursa, bireyler eşit olasılıkla her yöne dağılmaya ve besin kaynağını tespit etmeye çalışacaklardır. Şans eseri yuva ile besin arasındaki en kısa yolu bulan karıncalar, o güzergahta diğerlerine nazaran daha sık geçtikleri için daha yoğun feromon bulunmasını sağlarlar. Bu durumda da diğer karıncaların en yoğun feromona doğru yönelmesiyle o güzergah rağbet görür ve feromon yoğunluğu daha da artar. Sonuçta yuva ile besin arasındaki en kısa yol belirlenmiş olur. Karınca Koloni Optimizasyonunda da benzer şekilde, bulunan çözüm kalitesine göre güzergaha bırakılan feromon miktarı belirlenir.

3.2.4. Arı algoritması

Arı algoritması, arıların beslenme davranışını örnek alarak geliştirilmiş bir metasezgisel yöntemdir. Balarısı Algoritması, Yapay Arı Kolonisi, Arı Algoritması, Sanal Arı algoritması, Bal Arısı Çiftleşme Algoritması gibi varyasyonları mevcuttur. Arılar da karıncalar gibi feromonlarla ve karınlarını

sallayarak yaptıkları danslarla haberleşirler. Eğer bir arı, iyi bir balözü kaynağı bulursa, bulduğu balözünü kovana getirdiğinde, kaynağın yeri ve kalitesini gösteren bir dans yapar. Birden fazla balözü veya polen kaynağı mevcut olduğunda, kovana balözü getiren sınırlı sayıdaki arının en verimli şekilde çalışabilmeye yönelik bir yapılanmaya geçtikleri ve kovana getirilen balözü miktarını maksimize edebildikleri görülmüştür (Southwick ve Moritz, 1992).

Bal Arısı Algoritması 2004 yılında Craig A Tovey ve Sunil Nakrani tarafından farklı istemci bilgisayarlar ve web sunucuları arasından bilgisayarları tahsis için bir yöntem olarak ortaya atılmıştır (Tovey, 2004). Daha sonra, 2005 yılında, Xin-She Yang tarafından optimizasyon problemlerinde kullanılmak üzere Sanal Arı Algoritması geliştirilmiştir (Yang, 2005).

Aynı yıllarda da, Pham ve arkadaşları tarafından Arı Algoritması (Pham ve dig., 2005), Haddad ve Afshar tarafından Bal Arısı Çiftleşme Optimizasyon Algoritması (Haddad ve dig., 2006), Karaboğa tarafından Yapay Arı Kolonisi Algoritması (Karaboga, 2005) geliştirilmiştir. Daha sonra, Yapay Arı Kolonisi Algoritmasının literatürdeki Türevsel Evrim, Parçacık Sürü Optimizasyonu ve Evrimsel Algoritma ile performansları açısından karşılaştırması yapılmıştır (Karaboga ve Basturk, 2007, 2008; Karaboga ve Ozturk, 2011).Yapay Arı Kolonisi Algoritmasının, daha az kontrol parametresi kullanması sayesinde, diğer toplum tabanlı optimizasyon algoritmalarına göre üstünlüğü ortaya konmuştur.

Yapay Arı Kolonisi Algoritmasını kısaca anlatacak olursak, optimizasyon problemine önerilen her bir çözüm, kovana getirilecek bir besin kaynağına benzetilmiştir. Her bir arama döngüsünde üç aşama vardır: Birincisi, işçi arıların besin kaynaklarına kaydırılması; İkincisi, her bir besindeki balözü miktarının hesaplanması; Üçüncüsü de, yeni bölgeleri keşfetmek üzere keşif bireylerinin gönderilmesidir. Besin kaynağındaki balözü miktarı, denenen çözümün kalitesinin bir ölçüsü olmaktadır. Eğer belirlenmiş bir sayı kadar deneme sonucunda, işçi arılar tarafından bir besin bölgesi civarında hala yeterince ilerleme sağlanamamışsa, o bölgeden vazgeçilmekte, işçi arılar keşif yapan arılara dönüştürülmekte ve yeni bölgeler taranmaktadır. Bir yandan belirlenmiş bölgeler civarında detaylı arama yapılmakta, bir yandan da henüz bakılmamış bölgelerin taranmasına devam edilmektedir. Bu yöntemde en önemli parametre, kaç denemenin ardından iyileştirme sağlanamazsa o bölgenin terkedileceğini

belirleyen, limit değeridir.

Arı algoritmaları oldukça basit, fakat bir o kadar da etkili mekanizmalarıyla dikkat çekmekte olup, bu güne kadar pek çok optimizasyon probleminde başarıyla uygulanagelmıştır.

3.2.5. Parçacık sürü algoritması

Sürü zekâsına dayalı metasezgisel yöntemlerden biri olan Parçacık Sürüsü Optimizasyonu, Kennedy ve Eberhart tarafından 1995 yılında geliştirilmiş; kuş ve balık sürüleri gibi doğadaki bazı canlıların davranışlarından ilham alan bir yöntemdir (Kennedy ve Eberhart, 1995). Ortaya atıldığı günden bu yana pek çok problemin çözümünde kullanılmıştır. O kadar ilgi çekmiştir ki, birçok varyasyonu üretilmiştir.

Parçacık ile kastedilen, rastgele çözümlerden her birisidir. Parçacık Sürüsü Eniyilemesinde, amaç fonksiyonuna ait çözüm uzayının her yeri, parçacıkların yörüngeleri ayarlanarak taranır. Parçacıkların başlangıç değerlerinin olabildiğince tüm çözüm uzayına homojen şekilde dağılması, global optimum noktasının bulunmasını kolaylaştıracaktır. Parçacıklar, geçmiş davranışlarına bağlı olarak dinamik bir biçimde ayarlanan hızlar ile hareket etmekte olup, her bir parçacık için karşılık gelen bir hız bulunmaktadır (Grosan ve dig., 2006).

Her bir parçacık kendi güncel konumunu, parçacık tarafından o ana kadar bulunmuş en iyi çözümü ve sürüde o ana kadar bulunan en iyi konumu bilmektedir (Yu ve Gen, 2010). Her parçacık, zamana bağlı değişen bir konumsal vektör olarak modellenen bir parçalı izi takip etmekte olup, hareketinin stokastik ve deterministik iki ana bileşeni vardır. Yani, her bir parçacık o anki global optimum noktasına ve kendisine ait o ana kadarki en iyi noktaya doğru çekilirken, aynı zamanda da rastgele hareket etme eğilimindedir. Eğer parçacık, daha önceki konumundan daha iyi bir konum yakalarsa, bu yeni konumu kendisinin en iyi noktası olarak günceller ve diğer parçacıkların buldukları en iyi konumdan daha iyi olup olmadığını karşılaştırır. Eğer bu yeni bulunan nokta, aynı zamanda da tüm parçacıkların arasındaki en iyi nokta ise, yeni global optimum noktası olarak kaydedilir. İterasyon, ya belirli yineleme sayısı

kadar veya global optimum değerinde artık değişim olmayıncaya dek sürer.

3.2.6. Tabu arama algoritması

Tabu Arama Algoritması, 1977’de Fred Glover tarafından geliştirilmiş (Glover, 1977), ve optimizasyon problemlerine uygulama örnekleri sunulmuştur (Glover, 1986; Glover ve Laguna, 1997). Tabu Arama Algoritması, günümüzde yaygın olarak kullanılan meta sezgisel yöntemlerden birisidir. Dayandığı temel prensip, daha önce denenmiş çözümlere dönülmesinin tabu listesi adı verilen bir bellek ile engellenmesidir. Bununla beraber daha cazip noktaların işaretlenmesi olarak ta değerlendirilebilir. Deneme sayısı arttıkça, yetersiz çözümlerin gereksiz yere denenmesinin engellenmiş olmasıyla işlemsel kaynakların verimli bir şekilde kullanılmasını ve oldukça fazla zaman tasarrufu sağlar. Tabu Arama Algoritmasında, daha önce uğranmış çözümlere tekrar tekrar dönülmesini önlemek için yasaklanmış (tabu) listesi tutulur. Bir çözümün tabu olduğuna karar verilmesi için, kısa bir süre içerisinde yeniden uğranması veya belirlenmiş bir kuralı ihlal etmesi gereklidir. Bunu kontrol edebilmek için bellek kullanılır. Eğer artık yeni bir ilerleme kaydedilememeye başlanmışsa, mevcut durumdan daha kötüye götüren çözümler tabu listesinden çıkarılarak çeşitlilik artırılmaya çalışılır.

Ayrıca döngü oluşturmeyen potansiyel iyi çözümlerin de tabu listesine girmesi mümkün olabilmektedir. Aspirasyon adı verilen özellik ile tabu listesine giren çözümlerden bazıları listeden çıkartılabilir. Aspirasyona imkan veren temel mantık, döngü oluşturmadığı sürece tabuların göz ardı edilebileceğidir.

Özellikle vurgulanması gereken bir husus da, Tabu Arama Algoritmasının diğer metasezgisel yöntemlerle birlikte hibrit bir şekilde kullanılmasıyla yeni teknikler geliştirilebilmesine açık oluşudur.

3.2.7. Harmoni arama algoritması

Harmoni Arama Algoritması, nispeten yeni sayılabilecek metasezgisel bir algoritmadır. 2001 yılında Z. W. Geem ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir (Geem ve dig., 2001). Genel olarak beş adımdan oluşur:

- Optimizasyon probleminin tanımlanması
- Harmoni belleğinin oluşturulması
- Yeni harmoni oluşturulması
- Harmoni belleğinin güncellenmesi
- Durma kriterinin kontrolü

Harmoni Arama Algoritması, bir müzisyenin doğaçlama yaparken izlediği yaklaşımı esas almaktadır. Doğaçlama yaparken notaların birbirleriyle uyumlu olmasına çalışır ve üç seçeneği bulunmaktadır: birincisi, ezberinde bulunan, bilinen bir nota dizilimini, örneğin bir akoru çalabilir; İkincisi, ezberindeki notalara benzer fakat biraz değiştirilmiş, uyarlanmış fakat birbirleriyle ahenkli notalar kullanır; Üçüncü olarak da tamamen yeni veya rastgele notalar çalar. Eğer Harmoni Arama Algoritması formülize edilecek olursa, bu üç seçenek üç bileşene karşılık gelir: harmoni hafızasının kullanımı, ton uyarlama ve rastgele üretim.

Harmoni Arama, Genetik Algoritmaya benzerlik gösterir. Farklı olan yönü, Genetik Algoritmaya yeni bir birey oluşturulduğunda iki adet birey ebeveyn olarak kullanılırken, Harmoni Arama metodunda oluşturulan yeni birey toplum içindeki tüm bireylerin özelliklerini taşıyabilmektedir. Beş adımdan oluşur.

Birinci adımda, optimizasyon problemi tanımlanır. Toplam parametre sayısı, orkestradaki enstrüman sayısına karşılık gelir. Amaç fonksiyonu, birbirleriyle en uyumlu olacak şekilde ayarlanan enstrümanlardan çıkan tonların uyum derecesidir. Optimizasyon sürecini kontrol eden 3 farklı parametre mevcuttur. Bunlar harmoni belleği kapasitesi, harmoni belleğini dikkate alma derecesi ve ton ayarlama oranıdır.

İkinci adımda rastgele üretilen çözüm vektörlerinin ve karşılık gelen amaç fonksiyon değerlerinin saklandığı harmoni belleği oluşturulur. Üçüncü adım, bellekte bulunan bu tonlar ve tamamen rastgele seçilen tonlar kullanılarak yeni harmoninin oluşturulmasıdır. Değişkenlerin harmoni belleğinden seçilip seçilmeyeceğinin belirlenmesi, değeri 0 ile 1 arasında değişen harmoni belleğini dikkate alma derecesine göre yapılmaktadır. 0, çözüm uzayı içerisinde rastgele seçime karşılık gelmekteyken, 1 harmoni belleğinden seçilmeye karşılık gelir.

Bundan sonraki aşama, ton ayarlama işleminin gerekli olup olmadığının belirlenmesidir. Bunun için, değeri 0 ile 1 arasında değişen ton ayarlama oranı kullanılır.

Dördüncü adım, Harmoni belleğinin güncellenmesidir. Bu esnada yeni üretilen harmoni vektörü, bellekte mevcut olan en kötü bireyden daha iyi performans sağlıyorsa belleğe dahil edilir ve en kötü birey bellekten çıkarılır.

Beşinci adım ise durma kriterinin kontrolüdür. Optimizasyonu sona erdirmeye koşunun sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilir ve sağlanıncaya kadar üçüncü ve dördüncü adımlar tekrarlanır.

3.2.8. Ateşböceği algoritması

Ateş Böceği Algoritması, Xin-She Yang tarafından 2008 yılında geliştirilmiştir (Yang, 2008). Dayandığı temel prensip, ateş böceklerinin çiftleşmede cazibe için çıkardıkları ışıklarının diğer böcekleri çekmek için kullanılmasıdır. Ateş böceklerinde cinsiyet ayrımı olmadığından, her ateş böceği diğer bir ateş böceğinin cazibesine kapılabilir. Parlaklığı daha fazla olan veya daha yakında olduğu için diğerlerinden daha parlak görünen ateş böcekleri, daha fazla cazibeye sahip olacaktır. Dolayısıyla, kendisinden daha parlak bir ateşböceği gören diğer bir ateşböceği, ona doğru yaklaşacaktır. Eğer parlaklıkları arasında ayırım yapmaya yetecek kadar belirgin farklılık yoksa ateş böceklerinin hareketi tamamen rastgele olacaktır. Bu davranışlardan esinlenen Ateş Böceği Algoritmasında parlaklık, amaç fonksiyonuna; ateş böceklerinin konumları, optimizasyon parametrelerinin aldığı değerlere karşılık gelmektedir.

3.2.9. Guguk kuşu arama algoritması

Guguk Kuşu Araması, Xin-She Yang ve Suash Deb tarafından 2009 yılının sonlarında ve 2010 yılının başlarında ortaya konan en yeni metasezgisel algoritmalarından birisidir (Yang ve Deb, 2010).

Guguk Kuşlarının bazı türlerinde görülen kuluçka asalaklığından ilham almıştır. Guguk Kuşları, kendi yumurtaları için kuluçkaya yatmak yerine, yumurtalarını başka kuşların yuvalarına bırakırlar. Kendi koydukları yumurtanın belli olmaması için de, yuvadaki yumurtalardan birisini yuvanın dışına atarlar. Buna kuluçka asalaklığı denmektedir. Guguk Kuşunun yumurtası, yuva sahibi kuşunki gibidir. Yuvanın asıl sahibi olan kuş, nadiren farkedebilse de, çoğu zaman yuvasına konan bu yumurtayı kendi yumurtası sanır. Zaman zaman yuvayı kontrol eden guguk kuşu, yuva sahibi kuşun avlandığını veya yuvasının bozulduğunu görürse, yumurtasını oradan alarak başka bir yuvaya bırakır. Guguk yavrusu genellikle diğer yavrulardan daha önce doğar ve onları tek tek yuvadan atar. Tüm besini tek başına aldığından, üvey annesinden daha iri olur ve kısa bir süre sonra yuvayı da dağıtarak eş aramaya çıkar. Her kuş türü guguk kuşunun yumurtasını kabul etmez. Fark edebilen yuva sahibi kuş, yumurtayı ya yuvadan atar veya yuvayı terk eder. Guguk Kuşu Algoritmasında üç kabul yapılmıştır:

- Bir guguk kuşu rastgele seçilmiş bir yuvaya her defasında sadece bir yumurta bırakır.
- Kaliteli yumurtaların çıkabildiği en iyi yuvalar bir sonraki nesile taşınır.
- Kullanılabilir konak yuvaların sayısı sabittir ve bırakılan yumurtaların konak kuş tarafından keşfedilme olasılığı 0 ile 1 arasındadır.

Algoritmada öncelikle başlangıç ortamı oluşturulur ve her kuşa rastgele sayıda yumurta atanır. Her bir guguk kuşu için yumurta bırakabileceği maksimum yarıçap belirlenir. Sonra, belirlenen yarıçap içinde yumurta bırakılır. 0 ile 1 arasındaki keşfedilme olasılığına bağlı olarak fark edilen yumurtalar yok edilir. Fark edilmeyen yavruların yumurtadan çıkmasına, büyümesine izin verilir ve her kuşun yaşam alanı değerlendirilir. Yaşam alanı içinde bulunabilecek

birey sayısı sınırlandırılır ve fazla olanlar yok edilir. Kuşlardan belirlenmiş sayıdaki en iyi bireylere bakarak en iyi kuşlar grubu tespit edilir. Bir sonraki nesil için hedef yaşam alanı seçilir. En iyi kuşlar grubundaki bireylerin hedef yaşam alanına göç etmesi sağlanır. Durma kriterleri sağlanmışsa optimizasyon durdurulur, sağlanmamış ise yeniden her kuşa rastgele sayıda yumurta atanır ve aynı şekilde devam edilir.

Son araştırmalar göstermiştir ki, Guguk Kuşu Araması Parçacık Sürüşü Optimizasyonu ve Genetik Algoritmadan daha başarılı sonuçlar verebilmektedir (Yang ve Deb, 2010).

3.2.10. Yapay bağışıklık sistemi algoritması

Yapay Bağışıklık Sistemleri, 1986 yılında Farmer ve arkadaşları tarafından ortaya konmuş (Farmer ve dig., 1986), 1990’larda Bersini and Varela tarafından geliştirilmiş (Bersini ve Varela, 1990), Yapay Sinir Ağları gibi biyolojik tabanlı birçok hesaplama yönteminden istifade eden ve onları birleştiren yeni bir sistem olarak ortaya çıkmıştır (Nasraoui ve dig., 2002).

Oldukça yeni bir problem çözme tekniği olan Yapay Bağışıklık Sistemleri, Yapay Sinir Ağları ve Genetik Algoritmalarla benzer birçok özellik barındırır ve birçok alanda uygulaması bulunmaktadır. Bu güne dek pek çok varyasyonu geliştirilmiş olup, bunlardan bilinen üç tanesi “Klonal Seçim Algoritması”, “Negatif Seçim Algoritması” ve “Bağışıklık Ağları”dır.

Popülasyon içerisindeki her bir birey antikor olarak isimlendirilir ve yeni nesiller benzerlik değeriyle orantılı bir klonlama sonucu oluşturulur. Popülasyon büyüklüğü, çözüme ulaşmada önemli bir parametredir. Yapay bağışıklık sistemlerinde çaprazlama kullanılmamakta; bunun yerine yeni çözümler keşfetme sürecinde ince ayar yapılmasını sağlayan mutasyon kullanılmakta ve genelde büyük mutasyon oranları seçilmektedir.

Antijen adı verilen bir yabancı madde vücutta tespit edildiği zaman, antikor adı verilen hücre algılayıcıları devreye sokularak bağışıklık tepkisi veren lenfosit adlı hücreler salgılanır. Antikorlar antijenlerle birleştiği zaman lenfositler

uyarılır ve bölünerek çoğalırlar. Antijenlere antikorların bağlanabilmesi için anahtar-kilit gibi uyumlu olmaları gereklidir. Uyum ne kadar fazlaysa, bağlanma o ölçüde fazla olacaktır. Üretilen lenfosit miktarı, bağlanmayla orantılıdır.

Bağışıklık sisteminin öne çıkan en belirgin özelliği öğrenmedir. Yani bağışıklık sistemi, daha önce maruz kalmadığı bir antijenle karşılaştığında ona bağlanabilmek için o antijene göre antikor üretmek amacıyla farklılaşarak uyumlarını artırmaya çalışırlar. Uyumlu hale geldiklerinde de bağlanmaya başlarlar. Daha önce maruz kalınmış bir antijenle tekrar karşılaşıldığında da, tüm antikorlar arasından o antijene uyumlu olan antikorların belirlenmesi ve karşılık gelen lenfositlerin vakit kaybetmeksizin çoğaltılması gerekir. Yapay Bağışıklık Algoritmasında amaç fonksiyonu, antijen-antikor arasındaki uyumun derecesine karşılık gelmektedir (De Castro ve Von Zuben, 2000).

3.2.11. Yayılmacı ot algoritması

Bu algoritma, ilk defa Mehrabian ve Lucas tarafından dinamik ve kontrol sistem teorisinde kullanılmış, otların koloni oluşturmaktan esinlenen stokastik bir yöntemdir (Mehrabian ve Lucas, 2006). Otlar, zirai bitkilere tehdit teşkil eden, özel bir gayret sarfetmeden her yerde yetişebilen bitkilerdir. Ortam koşullarına hızla ve kolayca uyum sağlayıp zor koşullarda da hayatta kalabilirler. Yayılmacı Ot Eniyilemesi, otların dayanıklılıkları, kolayca uyum sağlamaları ve yayılmacı özelliklerinden ilham alan bir yöntemdir. Oldukça yeni olan bu yöntem, mevcut olan diğer optimizasyon yöntemleriyle karşılaştırılmış ve diğer bazı optimizasyon yöntemlerine üstünlük sağlayabildiği görülmüştür. Algoritma, otların aşağıdaki özellikleri sağladığı kabulüne dayanmaktadır:

- Çözüm uzayına sınırlı sayıda tohum yayılmaktadır.
- Her bir tohum, büyüyüp bitki haline gelecek, uygunluk değeriyle orantılı şekilde tohum üretecektir.
- Üretilen tohumlar, arama alanının her tarafına rastgele şekilde dağılacak ve yeni bitkiler yetiştirecektir.
- Bu işlem, maksimum bitki sayısına ulaşıncaya kadar devam edecek ve bir süre sonra bitki sayısı sabit kalmaya başlayacaktır.

Bu durumda, düşük uygunluk değerine sahip bitkiler elenecek, diğerleri de tohum üretmeyle bir sonraki nesli üretecektir. Yüksek uygunluk değerine sahip bireyler, bulundukları bölgelerde çok sayıda tohum üretecek ve sonraki nesillerin, yine yüksek uygunluk değerine sahip çözümler civarında kümelenmesine hizmet edecektir. Düşük uygunluk değerine sahip olan bireylerden üretilen tohum sayısı giderek azalacak ve bir noktada tohum üretilmeyince, o bölgeden vazgeçilmiş olacaktır. Algoritmanın ana hatları aşağıda verilmiştir.

Öncelikle, başlangıç popülasyonu oluşturulur. Bunun için, çözüm uzayının her yerine dağılacak şekilde rastgele olarak bireyler dağıtılır. Tüm bireylerin uygunluk değerleri hesaplanır ve uygunluk değerleriyle orantılı olarak tohum üretmeleri sağlanır. Minimum ve maksimum tohum sayıları, en büyük uygunluk değeri ile en küçük uygunluk değeri ölçek alınarak belirlenir.

Sonraki safhada tohumlar, ebeveyn bitkinin etrafında dağılarak yeni yerler keşfedilir. Yeni bireylerin uygunluk değerlerine bakılır. Eğer bir ebeveyn, uygunluk değeri düşük olduğu için hiç tohum üretmezse, sonraki nesile geçemez ve yok olur. Böylece, bitkiler arasında bir rekabet yaratılmış olur. Birkaç nesil sonra, uygunluk değeri yüksek olan bireyler, uygunluk değeri düşük olan bireyleri bastırmaya başlar. Böylece, geriye en yüksek uygunluk değerine sahip bireyler kalmaya başlar ve bireyler global optimum noktasına toplanırlar.

3.2.12. Genetik algoritma

Genetik algoritmalar, evrimsel algoritmaların bir alt dalı olup, birbirinden çok farklı birçok alanda uygulamaları olan metasezigel yaklaşımlardır. Belli başlı bütün meşhur optimizasyon problemlerine çözüm sunabilmiştir. Ayrıca, toplum tabanlı olan Genetik Algoritmalar, diğer toplum temelli algoritmalara ilham kaynağı olmuştur. 1960'lerde geliştirilmeye başlanmış ve ilk defa 1975 yılında John Holland tarafından literatüre sokulmuştur (Holland, 1975).

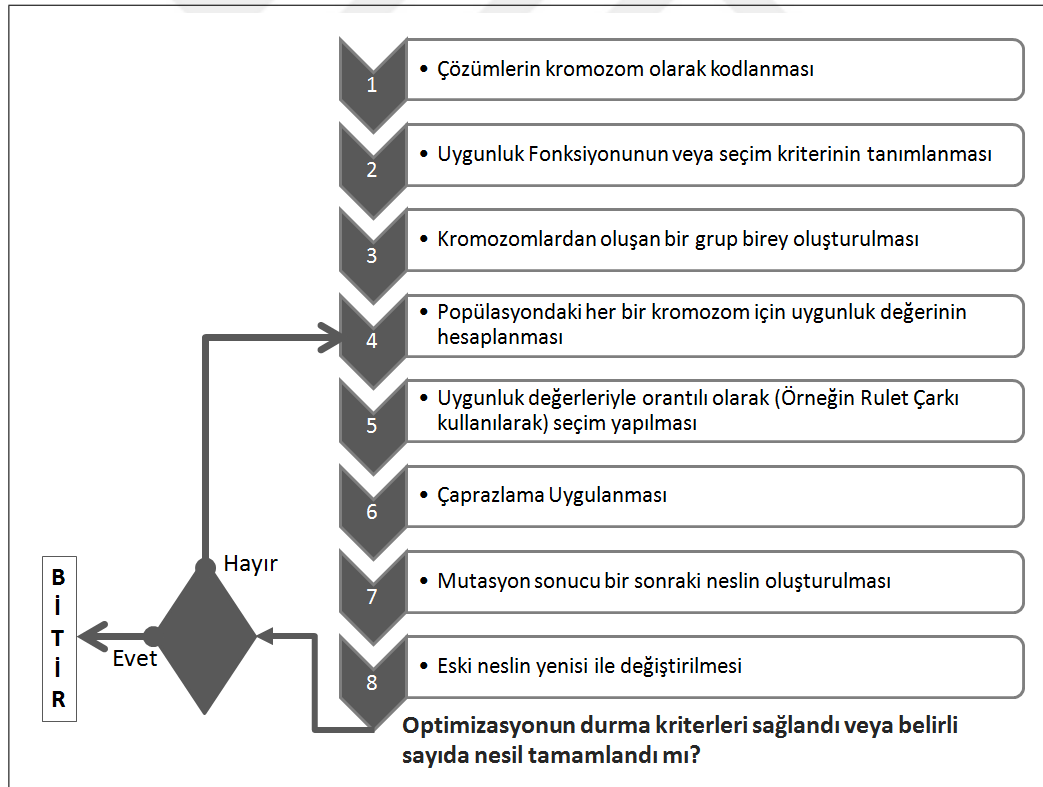
Adaptif ve yapay sistemlerde ilk defa çaprazlama, rekombinasyon, mutasyon ve seleksiyon operatörlerini uygulayan Holland olmuştur. Bu genetik operatörler, Genetik algoritmanın temel bileşenleridir. İlk ortaya atıldığından

bugüne kadar pek çok varyasyonu geliştirilmiş ve pek çok probleme başarıyla uygulanmışlardır.

Genetik Algoritmada çözümler, kromozom olarak adlandırılan ve bit veya karakter dizilerinden oluşan kodlamalar şeklinde gösterilmektedir. Her bir kromozom için temsil ettiği çözümün uygunluğunu belirten bir değer mevcuttur. Belirli bir aday çözümün ne kadar iyi olduğunun değerlendirilmesinde bu uygunluk değeri kullanılmaktadır. Bu kromozomların, hesaplanan uygunluk değerlerine göre genetik operatörler tarafından değiştirilmelerinin ardından seçim uygulanır.

3.2.12.1. Genetik algoritma aşamaları

Genel olarak Şekil 3.1’de görülen aşamalardan oluşur:



Şekil 3.1. Genetik algoritma aşamaları

Nesil ile kastedilen, her bir yinelemede elde edilen yeni popülasyondur. Kromozom karakter uzunluğu değişken olan araştırmalar literatürde mevcut olsa da, genelde kromozom uzunlukları sabittir. Genetik Algoritmada önemli

olan bir faktör, uygunluk fonksiyonunun veya seçim kriterinin belirlenmesidir. Uygunluk fonksiyonu en basit şekliyle $F = A - y$ şeklindedir. Burada A ile gösterilen, örneğin 500 gibi, büyük bir sayıdır. Eğer uygunluk pozitif değerli olmak zorunda değilse, $A = 0$ olması da mümkündür. Bu durumda amaç, uygunluk fonksiyonunu maximize etmek veya diğer bir deyişle, $y = f(x)$ değerini minimize etmektir. Şunu da belirtmek gerekir ki, uygunluk fonksiyonu pek çok değişik şekilde tanımlanabilir. Nasıl tanımlanırsa tanımlansın, önemli olan, yüksek uygunluk değerine sahip olan kromozomların, düşük uygunluk değerli kromozomlardan daha sık seçilmesini sağlayabiliyor olmasıdır. Aksi takdirde, yetersiz tanımlanmış uygunluk fonksiyonları hatalı veya anlaşılmaz sonuçlar elde edilmesine yol açacaktır. Önemli olan bir diğer husus da, çeşitli parametre değerlerinin seçimidir. Genetik Algoritmada çaprazlama önemli bir yer tutarken, mutasyon daha az önem taşır. Genelde çaprazlamanın gerçekleşme olasılığı 0.7 ile 1 arasında değişirken, mutasyon görülme olasılığı 0.001 ile 0.005 arasındadır. Bunların nedeni, eğer çaprazlama olasılığı çok düşük tutulursa, yakınsamanın yavaş olacak; mutasyon görülme olasılığı büyük olursa da, optimum noktasına çok yakinken birden zıplayarak uzaklaşmaya yol açacak olmasıdır.

Bu mekanizmaların dışında, mevcut nesildeki en iyi bireylerin bir sonraki nesile aktarılabilmesi için, gerekiyorsa ebeveynlerden bazıları da doğrudan bir sonraki nesile aktarılabilir. Buna elitizm denmektedir. Elitizm, özellikle ebeveynlerden bazılarının uygunluk değerinin yeni üretilen çocukların uygunluk değerinden daha yüksek olduğu durumlarda, global optimum noktasının kaybedilmesini engeller. Böylece bu global optimum noktasına karşılık gelen bireyin bir sonraki nesilin ötesindeki nesillerde de ebeveyn olarak kullanılması sayesinde üretilen çocukların global optimum noktasını daha iyiye taşıması mümkün olabilecektir. Elit birey sayısının sınırlı sayıda tutulması gerekir. Aksi takdirde, nesiller birbirinden fazla farklı olmaz ve yakınsama çok yavaş olur. Elitizm pek çok şekilde olabilir. En basiti her bir nesildeki en iyi birkaç bireyin, genetik operatörlere maruz kalmadan bir sonraki nesile doğrudan aktarılmasıdır.

Mutasyon için de birkaç seçenek mevcuttur. Mutasyon, kromozomlar üzerinde tek bir noktayı değiştirebileceği gibi, birden çok noktada değişiklik

de yapabilir. Böylece yakınsama daha hızlı olabilir. Diğer yandan, mutasyon noktalarının çok fazla sayıda olması da, yüksek mutasyon olasılığı gibi, optimum noktadan uzaklaşmaya neden olacaktır. Gerçek hayatta, yüksek derecede mutasyon görülen türlerin hayatta kalma ihtimali çok düşüktür ve yok olmaya mahkumdur.

Genetik Algoritmanın performansını etkileyecek bir başka parametre de popülasyondaki birey sayısıdır. Eğer birey sayısı çok az tutulursa, Genetik Algoritmanın gücü ortaya çıkmayacak, evrimsel olarak en iyi çözüme doğru bir yakınsama yeterince belirgin olmayacaktır. Hatta, tüm bireylerin optimum dışındaki bir noktaya doğru kaymaları söz konusu olabilecektir. Çünkü, eğer bireylerden birinin uygunluk değeri diğerlerine nazaran çok büyük ise, tüm çocukların kendi bulunduğu noktaya doğru toplanmasına yol açacak ve global yerine lokal optimum noktasına takılıp kalacaktır. Gerçek hayatta ise, eğer bir türün dünya üzerindeki birey sayısı az ise, türün yok olma tehlikesiyle karşı karşıya olduğundan söz edilir. Diğer yandan, birey sayısı çok büyük alınırsa, işlemsel yoğunluk artacak ve işlem süresi uzayacaktır.

3.2.12.2. Genetik algoritma işlem basamakları

Genetik Algoritmanın yapı taşları gen olarak ifade edilen, kromozom parçalarıdır. Veya diğer bir deyişle, kromozomlar genlerden oluşan dizilerdir. Bir gen, bir parametrenin ikili sistemde kodlanmış karşılığıdır. Her bir kromozomun da, karşılık gelen bir uygunluk değeri bulunur. Bu uygunluk değeri ile o kromozomun ne kadar iyi bir çözüm olduğu derecelendirilir. GA, rastgele üretilmiş kromozomlardan oluşan büyükçe bir liste ile başlar. Kromozomlar, en yüksek uygunluk değerinden en düşük uygunluk değerine doğru sıralanırlar. Bunlardan, birey sayısının dışında kalanlar elenir ve sonuçta birey sayısı kadar, eldeki en iyi uygunluk değerine sahip bir ilk nesil elde edilir.

Kromozomlar oluşturulurken, optimize edilecek parametre sayısı kadar gen olmalıdır. Genler ikili sistemde kodlanabilir. Örneğin, 30 bit uzunluğundaki bir kromozomun ilk 10 bitlik kısmı bir gen, sonraki 4 bitlik kısmı ikinci bir gen, sonraki 6 bitlik kısmı üçüncü gen, kalan son 10 bit de dördüncü gen için kullanılıyor olabilir. Bu durumda 30 bitlik kromozomda 4 gen ve optimizasyon algoritmasıyla optimize edilecek 4 parametre var demektir. Bunu daha detaylı

izah etmek için bir kromozom aşağıdaki gibi kodlanabilir.

$$kromozom = \left[\underbrace{111111001}_{gen_1} \underbrace{1101}_{gen_2} \underbrace{110101}_{gen_3} \underbrace{1000110111}_{gen_4} \right] \quad (3.1)$$

Optimize edilecek parametre sayısı, problemin boyutunu belirler. Aşağıda bir kromozom örneği gösterilmiştir. Burada p ile her bir parametre gösterilmekte olup gen olarak kodlanmıştır.

$$kromozom = [p_1 p_2 p_3 p_4] \quad (3.2)$$

Her bir kromozoma karşılı gelen uygunluk fonksiyonu da Denklem (3.3)'deki gibi hesaplanır:

$$Uygunluk = f(p_1, p_2, p_3, p_4) \quad (3.3)$$

Her bir parametrenin belirli bir aralık içinde değerler alması gerektiğinde, kromozomları ikili sistemde kodlamak iyi bir çözüm olacaktır. Bu işleme kuantalama denir. Bir parametre Denklem (3.4)'de olduğu gibi kuantalanabilir:

$$q_n = \sum_{k=1}^{S_n} b_w[k] 2^{1-k} Q, \quad (3.4)$$

q_n : p_n parametresinin kuantalanmış hali,

S_n : p_n parametresi için kuantalama seviye sayısı,

$b_w[k]$: q_n için karşılık gelen ikili sistem gösterimi,

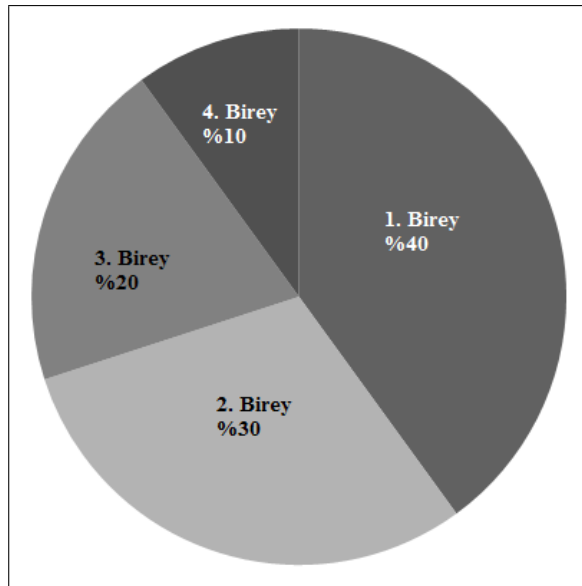
Q : En büyük kuantalama değeri (aynı zamanda q_n parametresinin alabileceği değerin yarısıdır).

Bir parametre kodlanırken kaç bit olarak kodlanacağı, algoritmanın performansını etkiler. Fazla sayıda bit ile kodlanması, çözünürlüğü ve hassasiyeti artırırken, yakınsamayı da yavaşlatır.

Kromozomların kodlanması ve kod çözümü için gerekli mekanizma oluşturulduktan sonra, rastgele üretilmiş uzunca bir kromozom listesi oluşturulur

ve karşılık gelen uygunluk değerleri hesaplanarak çizelge haline getirilir. Bu çizelgedeki satırlar, uygunluk değerlerine göre sıralanır. Belirlenecek yeterlilik kriterine göre bunlardan yetersiz olan bireyler listeden çıkartılır. Yeterlilik kriterinin ne olduğu ve hangi bireylerin eleneceği probleme göre değişebilir. Örneğin, listedeki bireylerin belli bir oranı kalacak şekilde geri kalanların elenmesi veya uygunluk değeri belli bir sınır değer altında olan bireylerin listeden çıkartılması şeklinde olabilir.

En iyi bireyleri süzüp, uygun olmayan adayları eledikten sonraki adım, bireylerin ebeveyn olmak ve bir sonraki neslin adaylarını oluşturmak üzere eşleştirilmesidir. Herhangi iki kromozom birbirleriyle eşleştirilebilir. Bu safhada farklı yaklaşımlar tercih edilebilir. Bunlardan birinci yaklaşım, tüm kromozomların birbirleriyle rastgele şekilde eşleştirilmeleridir. Rastgele seçim işlemi için en çok tercih edilen yöntem rulet çarkı yöntemidir. Her birey, uygunluk değeriyle orantılı olarak rulet çarkında bir alan kaplar. Bir ebeveyn seçileceğinde rulet çarkı döndürülür. Rulet çarkında daha fazla alan kaplayan bireylerin seçilmeansı daha fazla olacak; yani karakteristik özelliklerini bir sonraki nesle aktarma ihtimalleri daha fazla olacaktır. Örneğin, Şekil 3.2’de gösterildiği gibi, 1 numaralı bireyin seçilme olasılığı 4 numaralı bireyin seçilme olasılığının dört katıdır.

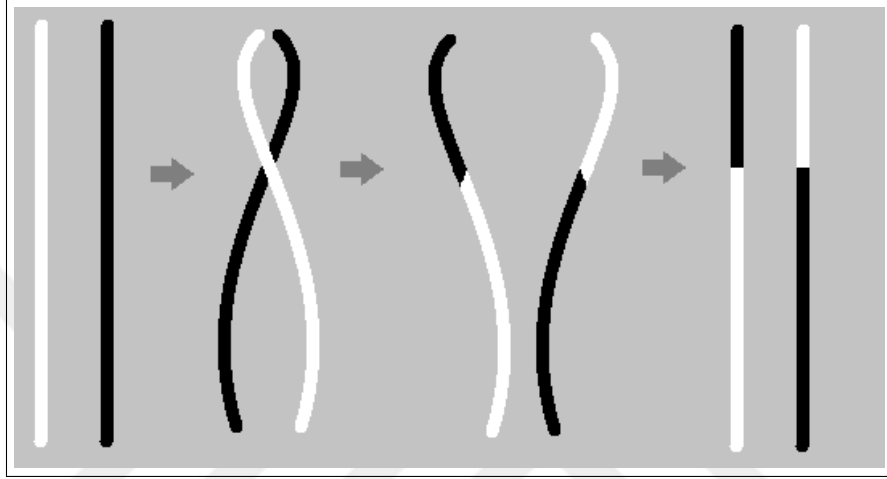


Şekil 3.2. Rulet çarkı seçim mekanizması

Diğer bir yöntem de, en yüksek uygunluk değerine sahip bireylerin, en düşük uygunluk değerine sahip bireylerle eşleştirilerek çeşitliliğin artırılmaya

çalışılmasıdır. Üçüncü bir yaklaşım olarak da, listenin tepesinden başlayarak en iyi bireylerin birbirleriyle eşleştirilmesidir.

Eşler belirlendikten sonra çaprazlama uygulanır. Genellikle 0.7 — 1 aralığındaki bir olasılıkla gerçekleştirilen çaprazlama, iki bireyin bazı bölgelerinin karşılıklı olarak birbirleriyle değişimidir. Şekil 3.3’de görüldüğü üzere, biyolojik kromozomlardan esinlenerek iki kromozom çiftine ait bölgeler arasında genetik bilgi alışverişi gerçekleşmektedir.



Şekil 3.3. Çaprazlama mekanizması

Hangi bölgelerinin değişileceğini rastgele seçilen çaprazlama noktasına göre belirlenir. Örnek olarak, aşağıda gösterildiği şekilde çaprazlama noktası olarak, soldan 4’incü ile 5’inci bit arası seçilmiştir.

$$ebeveyn_1 = \underbrace{1010}_{\text{parent 1}} \underbrace{100001}_{\text{parent 1}}$$

$$\text{çocuk}_1 = \underbrace{1101}_{\text{child 1}} \underbrace{100001}_{\text{parent 1}}$$

$$\text{çocuk}_2 = \underbrace{1010}_{\text{parent 1}} \underbrace{101101}_{\text{child 2}}$$

$$ebeveyn_2 = \underbrace{1101}_{\text{parent 2}} \underbrace{101101}_{\text{parent 2}}$$

Çaprazlama noktası birden fazla da olabilir. Örneğin Şekil 3.4’de görüleceği üzere 3 ve 4’üncü bitler arasında birinci çaprazlama noktası ile beraber 6 ve 7’inci bitler arası ikinci çaprazlama noktası seçilmiştir.

Çaprazlama sonrasındaki işlem, mutasyondur. Bu esnada rastgele noktalarda bazı bitler $0 \rightarrow 1$ veya $1 \rightarrow 0$ şekilde değişime uğrar. Örneğin, Şekil 3.5’de 5’inci bit mutasyona uğrayacak gen olarak seçilmiş ve değeri $0 \rightarrow 1$ şeklinde değiştirilmiştir.

Mutasyonun artırılması, çözüm arama bölgesinin o anki mevcut

Kesim ₂ = 6											
Kesim ₁ = 3											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Uygunluk Değeri
Ebeveyn 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.7
Ebeveyn 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4.8
Çocuk 1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	3.5
Çocuk 2	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	5.9

Şekil 3.4. Birden fazla noktada çaprazlama

Mutasyona Uğrayacak Gen										Mutasyon Öncesi / Sonrası Uygunluk Değeri
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	5.9
1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	6.2
Mutasyona Uğramış Gen										

Şekil 3.5. Mutasyon mekanizması

değerlerin dışına da taşınmasını sağlayarak bir miktar özgürlük kazandırır. Bu yetenek, özellikle bireyler belli bir noktaya doğru toplanmaya başlarken, diğer alternatiflerin de değerlendirmeye alınabilmesini sağlar. Bu sayede yerel optimum noktalarına takılıp kalmadan global optimum noktaları da değerlendirmeye alınabilmektedir. Bir süre sonra çaprazlamalar nedeniyle, kromozomlar birbirlerine benzemeye başlarlar. Mutasyon, algoritmanın döngüye girmesini engeller. Eğer varsa, daha iyi çözümler ortaya çıkmaya başlar. Bununla beraber, mutasyonla eğer daha kötü çözümler üretiliyorsa, bunlar eleneceğinden olumsuz bir etkisi olmayacak ve geride kalan bireyler global optimum noktasına doğru ilerlemeye devam edecektir. Mutasyon görülme olasılığı genellikle 0.05 civarındadır.

Mutasyonlar da tamamlandıktan sonra, üretilen çocuklar için uygunluk değerleri hesaplanır. Elit birey sayısınca ebeveyn doğrudan bir sonraki nesle

aktarılır. Çocuklardan uygunluk değeri yüksek olanlar da bir sonraki nesle taşınır. Algoritma bu şekilde devam eder. Ta ki, kabul edilebilir bir çözüm elde edilinceye veya belirli bir sayıda nesil geçinceye kadar. Yüksek uygunluk değerine sahip, yani optimum değere daha yakın olan bireylerin özellikleri, sonraki nesilde daha fazla taşınır ve böylece optimum çözüme doğru adım adım nesil olarak topluca bir kayma olur.

Genetik Algoritmalar, elektromanyetik problemlerde optimizasyon için çok kullanışlıdır. Algoritmanın biraz yavaş olduğundan söz edilebilir ancak, fazla sayıda parametrelili optimizasyon problemlerinde çok başarılıdır ve gradyan hesaplamasına ihtiyaç duymaz. Genetik Algoritmanın bir diğer avantajı da ayrık değerli parametreleri de optimize edebilir. Gerçek hayatta parametre sayıları fazla ancak sınırlı sayıdadır. Bunaltıcı rastgele arama yöntemleri çok daha fazla uzun sürebilmektedir. Hatta bazı yöntemler, yerel optimum noktalarına takılıp kalabilmektedir. Genetik Algoritma ise genelde global optimum noktasını bulabilmektedir.

Bölüm 3.3’de, bahsi geçen optimizasyon algoritmalarından bazılarının Mikroşerit Antenlerin optimizasyonu alanında kullanımından bahsedilecek ve literatürdeki çalışmalardan örnekler sunulacaktır.

3.3. Mikroşerit Antenlerin Optimizasyonu Alanında Yapılan Çalışmalar

Nümerik yöntemler kullanılarak Mikroşerit Antenlerin optimizasyonu, en az 1990’lı yıllara kadar gitmekte olup, 1989 yılında Johansson tarafından ADODYA tipi antenlerin Moment Metodu ile analizi yapılmıştır (Johansson, 1989). Anten üzerindeki akım dağılımları hesaplanmış, ve deneysel verilerle hesaplanan değerler karşılaştırıldığında ışıma desenlerinin benzerlik gösterdiği gösterilmiştir. Problemi basitleştirmek için, dielektrik malzeme yerine hava olduğu varsayılmıştır. Böylece, dielektrik tabanlı ADODYA tipi antenlerin nasıl davrandığını anlama imkanı elde edilmiştir.

Bir başka çalışmada yine ADODYA tipi antenin geometrisi, Moment

Metoduyla analiz edilmiştir. Çalışmalarında dielektrik taban da incelenmiştir (Köksal ve Kauffman, 1991). Aynı yıllarda bir başka çalışmada da yine ADODYA tipi anten Moment Metoduyla analiz edilmiştir (Köksal ve Kauffman, 1993). Hesaplanan değer, deneysel ölçümlerle karşılaştırılmış ve sonuçların tutarlı oldukları görülmüştür. Çalışmada antenin besleme mekanizması ve mikroşerit hattan yarık hattına geçiş de yer almıştır.

Oraizi ve Jam tarafından daralma profili basamaklı olarak değişen ADYA tipi bir anten için anten geometrisine ve daralma profiline ait parametrelerin optimum değerleri bulunmuştur (Oraizi ve Jam, 2003). Bu kapsamda yarık genişliği ve daralma profilinin basamak artış hızı için optimizasyon yapılmıştır.

Mikroşerit Anten optimizasyonu için Genetik Algoritma kullanımını 2005 yılında Alijibouri'nin çalışmasında görülmektedir. Tasarlanan Mikroşerit Antenlerin hem empedans uyumunu hem de dairesel polarizasyonlu olmasını sağlamak için kullanılmıştır (Al-Jibouri, 2005). Yöntemlerini kare şekline yakın yama antenlerde, çift beslemeli yama antenlerde ve anten dizilerinde uygulamışlardır.

Mikroşerit anten giriş empedansının veya bandgenişliğinin Yapay Sinir Ağı (YSA) kullanılarak hesaplanabileceğini öneren çalışmalar da literatürde mevcuttur (Gültekin ve dig.; Güney ve Gültekin, 2007). Örneğin, dikdörtgensel bir mikroşerit anten için dielektrik malzeme içindeki dalgaboyu cinsinden taban yüksekliği, anten genişliği ve dielektrik kayıp tanjantı giriş olarak verildiğinde, antenin bandgenişliği elde edilebilmekte veya bu üç parametreye ilave olarak besleme noktasının uzaklığı ile anten boyu da giriş olarak verildiğinde giriş empedansı hesaplanabilmektedir.

Mikroşerit Antenlerin optimizasyonu alanında, Yayılmacı Ot Algoritması kullanılan bir çalışma 2008 yılında Mallahzadeh ve ark. tarafından ortaya konmuştur (Mallahzadeh ve dig., 2008). Çalışmalarında doğrusal dizilimli anten dizilerinde, her bir anten elamanının konumlarını hesaplamışlar ve minimum yan kulakçık seviyesi ile ve dizinin sıfırlarının istenen doğrultularda olmasını sağlayan bir anten ışıma deseni elde etmişlerdir. Bu çalışmalarıyla Yayılmacı Ot Algoritmasına dikkatleri çekmişlerdir.

2009 yılında Erdoğan tarafından Vivaldi anten ve anten dizilerinin

parametrik incelenmesi ve tasarımı çalışılmıştır (Erdogan, 2009). Tek anten ve dizi anten parametrelerinin tasarım üzerindeki etkileri incelenmiştir. Vivaldi anteni oluşturan parametreler belirlenmiş ve her bir parametrenin değişiminin, nasıl bir etki ürettiğine bakılmıştır. Sonuçta 8.5 – 10.5 GHz frekans bandında -15 dB'den daha düşük $S_{11}(dB)$ değerine sahip, iki farklı şerit kılavuzdan yarıklı hatta geçişli, Vivaldi doğrusal anten dizileri tasarlanmıştır.

Aynı yıl (Jolani ve dig., 2009) tarafından yapılan bir çalışmada, metasezgisel yöntemlerden biri kullanılarak yapılan bir optimizasyon örneği görülmektedir. Parametrelerdeki değişikliklerin anten üzerindeki etkilerini incelemek yerine, antenin optimizasyonu tercih edilmiştir. Optimizasyon sırasında Karınca Kolonisi Algoritması kullanılmıştır. Sonuçta 32 mm × 35 mm × 1.6 mm boyutlarında, 3.1 – 10.6 GHz aralığında maksimum kazanç değeri 5.25 dBi olan, ultragenişbant özelliğine sahip ve FR4 malzemesi kullanarak imal edilmiş bir Dengelenmiş Zıt Kutuplu Vivaldi antenin üretimini gerçekleştirmişlerdir.

Vivaldi antenlerin parametrik analizi alanında yapılan bir başka çalışma da Bayat ve Mirzakhani tarafından 2012 yılında yapılmıştır (Bayat ve Mirzakhani, 2012). Çalışmalarında Dengelenmiş Zıt Kutuplu Vivaldi antenlerin genişbant dizi anten tasarımında kullanımını incelemişlerdir. Dielektrik sabiti 2.94 olan RT/duroid 6002 malzemesinden taban kullanarak 1 – 20 GHz frekans bölgesinde çalışan bir antenin analizi için HFSS yazılımını kullanmışlardır. Tasarım hedefi olarak -10 dB den daha düşük $S_{11}(dB)$ ve düşük çapraz polarizasyonlu yüksek bandgenişliği elde etmeyi belirlemişlerdir.

En yeni çalışmalardan birisi de 2015 yılında Lekshmi ve Raglend tarafından yapılan, genişbant uygulamalar için ADODYA tipi antenlerin parametrik analizidir (Lekshmi ve Raglend, 2015). X-Band bölgesinde çalışacak bir antenin fiziksel parametrelerinin değişiminin, ışıma deseni üzerine olan etkileri incelenmiştir. Daralma profilinin en geniş kısmındaki açıklığın farklı genişlik değerleri alması sağlanmıştır. Sonuçta, açıklığı genişletmenin, $S_{11}(dB)$ değerini azalttığı, kazancı artırdığı, yan kulakçık seviyesini azalttığı ve ışıma deseniindeki ana kulakçığın hüzmeye genişliğini artırdığı tespit edilmiştir.

Yukarıda örnekleri verilen çalışmalarda, Mikroşerit Antenlerin parametrik analizlerinin çeşitli yöntemlerle yapıldığı, farklı ADYA tiplerinin değişkenler cinsinden tanımlandığı ve her bir parametrenin değişiminin tasarım üzerine etkileri incelenmiştir. Bunlardan bir bölümünde de metasezgisel yöntemlerden bazıları kullanılmış ve parametrelerin optimum değerlerinin belirlenmesine çalışılmıştır. Bahsi geçen çalışmalar incelenerek bu tezin kapsamı belirlenmiştir. Bu kapsamda ADYA tipi antenlerin incelenmesine karar verilmiş, antenlerin fiziksel parametreleri belirlenmiş; bu parametreler cinsinden antenler ifade edilmiştir. Daralma profili olarak doğrusal, eksponansiyel ve dairesel daralma profilleri çalışılmıştır. Taban malzemesi olarak, daha önce de bazı araştırmacıların kullandığı FR 4 epoksi kullanılmıştır. Böylece, baskı devre üretim teknolojisinden faydalanılmış ve daha ucuza imal edilmesi mümkün olmuştur. Bir sonraki bölümde, tez kapsamında yapılan çalışmalara ait detaylar sunulacaktır.

4. ADYA TASARIMI VE PERFORMANSININ ARTIRILMASI

4.1. Giriş

İsminden de anlaşılacağı üzere, tez çalışmasında ön plana çıkan hususlar “tasarım” ve “performans artırma”dır. Bu kapsamda Açıklığı Daralan Yarık Anten (ADYA) tipinde özel tasarlanan antenler analiz edilerek simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyon ve analiz için Ansoft HFSS® yazılımı kullanılmıştır. Sonlu Elemanlar Metodu tabanlı bir yazılım olan HFSS ile hem antenlerin parametrik olarak tanımlanması yapılmış, hem de bu parametrelerin optimum değerlerinin belirlenmesi için yazılımın Optimetrics fonksiyonu kullanılmıştır. Sonraki süreçte, optimize edilen ve simüle olarak incelenen antenlerin imal edilmesi ve deneysel ölçümlerin yapılması gerçekleştirilmiş ve simülasyonlarla deneysel ölçümlerin karşılaştırması yapılmıştır.

Öncelikle, performans artırımına yönelik etkili olan faktörlerin neler olması gerektiği sorgulanmıştır. ADYA performansını etkileyen faktörlerin temel olarak anten ve yarık parametreleri, yarık daralma profili, besleme metodu olduğu değerlendirilmektedir. Bu nedenle her bir faktörü oluşturan parametreler tanımlanmıştır. Daha sonra da ADYA tipleri için tasarım kriterleri belirlenmiş ve istenen özelliklerdeki antenlerin tasarımı için parametrik hale getirilmiş değişkenlerin optimize edilmesi sağlanmıştır. Sonuçta da, kriterleri en iyi sağlayacak anten özelliklerinin nasıl olması gerektiği elde edilmiştir.

ADYA tipi ve bunlardan oluşan anten dizileri pek çok uygulamada kullanılmaktadır. Ancak, bu antenlerin fiziksel yapıları henüz tam olarak anlaşılmış ve formülize edilmiş değildir. Buna ek olarak ADYA tipi antenler üzerine yapılan ve antenin parametrik özelliklerini inceleyen çalışma sayısı

giderek artmakla birlikte yine de sınırlı sayıdadır. Bu tip antenlerin karmaşık yapıları nedeniyle deneysel ölçümler oldukça zaman almakta ve basit yapılar için kullanılan analiz yöntemleri bu anten tipleri için yeterli doğrulukta sonuçlar verememektedir. Bu nedenle bu tezde anten parametrelerinin etkileri empedans, yansıma katsayısı, bantgenişliği, ışıma deseni, ışıma verimi, kazanç gibi faktörler açısından incelenmiştir.

Bu güne kadar farklı anten parametreleri üzerine yapılmış olan ve parametrelerin anten performansını nasıl etkilediği ile ilgili literatürdeki çalışmalardan örnekler verilmiştir. Ancak bu çalışmalarda, genelde sadece parametrelerin tek başlarına olan etkileri üzerinde durulmuştur. Bu tezde ise, bir optimizasyon algoritmasıyla parametrelerin birleştirilmesi yoluna gidilerek, kriterlerin tam olarak sağlandığı çok daha iyi performansa sahip antenlerin tasarlanması hedeflenmiştir. Bu kapsamda ADYA tipi antenlerin fiziksel yapısının optimizasyonuna önem verilmiştir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde geliştirilmeye açık diğer bir alanın da “daralma profili” olduğu tez çalışması içinde değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmenin dayandığı temel mantık, literatürdeki çalışmalardan verilen örneklerde de vurgulanmış olan, daralma profilinin bantgenişliği, ana kulakçık demet genişliği, yan kulakçık değerleri, ışıma deseni ve yüzey akımları üzerinde etkili olduğudur. Bu güne kadarki çalışmalarda sabit genişlikli, doğrusal ve eksponansiyel daralan, çok parçalı eksponansiyel profiller denenmiş ve bazı sonuçlar elde edilmiştir. Literatürde yer alan daralma profillerinin dışında da yeni profillerin mümkün olabileceği değerlendirildiğinden, literatürde karşılaşılmamış olsa da daire denklemini sağlayan daralma profilleri de incelenmiştir. Üretilen antenlerden bazıları dairesel daralma profilinde tasarlanmıştır. Sonuçta hem literatürdeki doğrusal ve eksponansiyel daralma profilleri hem de yeni ortaya konan dairesel daralma profili için, Genetik Algoritma ile parametrelerin optimizasyonu yapılmıştır.

Literatürdeki çalışmalarda, yüzeydeki akımların kontrol edilmesinin öne çıkan bir başka husus olduğu görülmektedir. Bazı araştırmacılar tarafından, kenarlara kesikler atarak yüzey akımları kontrol edilmeye çalışılmıştır. Ancak bu tür yaklaşımların hem optimizasyonu daha da zorlaştıracığı hem de oluşturdukları kapasitif etkileri nedeniyle sinyallerde bozulmaya yol açacağı

değerlendirilmektedir. Buna bir alternatif olarak, iletkenlerin olabildiğince dar seçilmesi ile akımların sadece daralma bölgesi veya civarında oluşması sağlanabileceği öngörülmüş, bu yaklaşımın da fiziksel parametrelerin optimizasyonu ile mümkün olabileceği değerlendirilmiştir. Bu nedenle antenlerin hem iç hem de dış kenarı için daralma, yani dual daralma profili olması gerektiği sonucuna varılmıştır. Sonuçta, mikroşerit hattın devamı gibi olan bir adet dual doğrusal daralan anten, iki adet dual dairesel daralan anten ve iki adet dual eksponansiyel daralan anten tasarımları ortaya çıkmıştır.

ADYA tipi antenlerin incelenmeye başlandığı ilk günden beri, besleme mekanizmasının bantgenişliği üzerindeki etkileri bilinmektedir. Uygun ayarlanmayan mikroşerit hattan yarık hattına geçişin, bantgenişliğini kısıtlayabildiği görülmüş; bu kısıtlamaları ortadan kaldırabilmek için empedans dönüştürücüler, dairesel veya daire parçası şeklinde parçaların kullanıldığı yöntemler önerilmiştir. Bu tezde, incelenen bir başka nokta da besleme mekanizması üzerine olmuş ve tasarlanan antenlerin simetrik özelliklerinden de faydalanıp, yeni geliştirilen yarım halka şeklindeki parçalar kullanılarak mikroşerit hattan yarık hattına geçiş başarılmıştır. Üretilen düzlemsel antenler, bir yüzünden koaksiyel kablo ile beslenmiş ve kablodan gelen güç, yarım halka parçalar ile antenlere aktarılmıştır.

Tasarlanan antenin kullanım amacı olarak X-Band SATCOM (Satellite Communications-Uydu Haberleşmesi) için kullanılabilecek hafif ve küçük boyutlu bir anten tasarlama düşünülmüştür. X-Band SATCOM frekans bantlarını (7250 – 7750 MHz) kapsayan ve piyasada veya laboratuvarındaki mevcut ekipmanla kolayca üretilen bir alıcı anten tasarlamak hedeflenmiştir. Tasarım hedefleri belirlenirken anten performansını artıran faktörler değerlendirilmiştir. Anten performansını artırma kriterleri olarak dört farklı kriter belirlenmiştir. Bunlar,

- a. Üretilen antenin dönüş kaybı, $S_{11}(dB)$ değerinin, antenin çalışma frekans bölgesinde -10 dB veya daha aşağı olması;
- b. Duran dalga oranının (Voltage Standing Wave Ratio) 2 den aşağı olması;
- c. Işıma veriminin (Radiation Efficiency) %60 veya daha fazla olması;
- ç. Maksimum kazancın (Peak Gain) 4.5 dB veya daha fazla olması şeklindedir.

Çalışmanın uydu haberleşmesi üzerine olmasının başlıca nedeni, ADYA tipi antenlerin, uzay ve hava platformlarında kullanılacak antenlerin kriterlerini karşılayabilecek özellikte olmasıdır. Örnek vermek gerekirse, uydu ve kablosuz haberleşme alanında görülen gelişmeler bantgenişliği yüksek antenlere olan ihtiyacı artırmıştır. ADYA tipi antenlerin yüksek bandgenişliklerini destekleyebildikleri örnekleriyle sunulmuştur. Ayrıca, hava ve uzay platformlarındaki antenlerin hafiflik, dengeyi bozmama, aerodinamik uyumluluk kriterlerini de sağlamaları gerekir. ADYA tipi antenler, oldukça küçük boyutlarda üretilebilmeleri ve düzlemsel özellikleri sayesinde tüm bu kriterleri sağlar. Mikroşerit antenlerin hava ve uzay araçlarında kullanımı literatürde mevcuttur. Yukarıdaki nedenlerden ötürü, ADYA tipi antenler tercih edilerek X-Band uydu haberleşmesinde kullanılabilecek bir alıcı anten tasarlanmış ve imal edilmiştir. Tezin bu bölümünde öncelikle tasarım hedeflerinin neler olduğu, incelenen ADYA tipleri ve onlara ait daralma profilleri detaylı olarak sunulacaktır. Daha sonra, kullanılan HFSS yazılımının ve Genetik Algoritmanın probleme nasıl uygulandığı ve ayarların, parametrelerin nasıl seçildiği ele alınacaktır. Sonrasında ise HFSS yazılımı kullanılarak analizi ve optimizasyonu yapılan antenlerin üretim basamakları ve üretim sürecinde karşılaşılan zorluklar anlatılacaktır. En son olarak da deneysel ölçüm düzeneği tanıtılacak ve deneysel ölçümlerin simülasyon sonuçları ile karşılaştırması yapılacaktır.

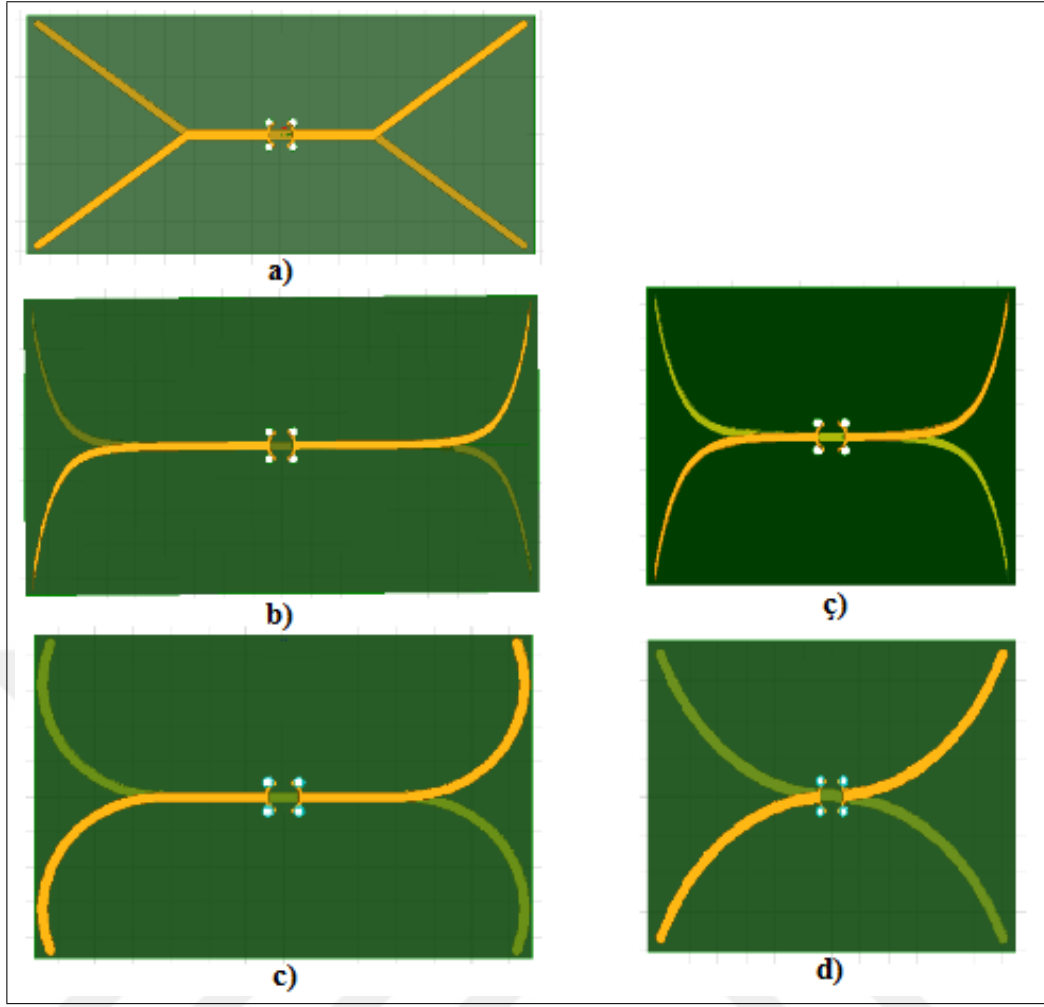
4.2. Geliştirilen ADYA Tipleri

Tez çalışmasında kullanılacak daralma profilleri seçilirken, önceki araştırmacıların kullandığı daralma profilleri incelenmiştir. Çalışmaların en çok, doğrusal ve eksponansiyel daralma profilleri üzerine olduğu görülmüştür. Ancak bu çalışmalarda çoğunlukla iletkenlerin sadece iç kenarlarının daralma gösterdiği, bununla beraber bir çalışmada da hem iç hem de dış kenarları daraltarak dual eksponansiyel daralma profili kullanıldığı tespit edilmiştir. İç kenarla beraber dış kenar için doğrusal daralma profili kullanan herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Ayrıca, literatürde yer almayan bir profil olan dairesel daralma profili de bu tez kapsamında incelenmiştir.

Bu tez çalışmasında öne çıkan bir başka husus da besleme mekanizmasıdır. Her üç daralma profili için de özgün, yarım halka şeklinde parçalar barındıran beslemeler kullanılmıştır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, mikroşerit hattan yarık hatta geçiş için empedans dönüştürücüler, dairesel / daire parçaları şeklinde beslemeler kullanıldığı görülmüştür. Tüm bu besleme mekanizmaları, eğer koaksiyel kabloya da bağlanacaksa, önce taban yan kenarı üzerinden yüzeyine dik olmayacak şekilde bir mikroşerit hatta, sonra yarık hattına bağlantı yapılmaktadır. Bu yöntemin bir mahsuru, hava araçlarında aerodinamik uyumu zorlaştırmasıdır. Eğer üretilen antenler, bir hava aracında yüzeye uyumlu olarak kullanılacaksa, koaksiyel kablunun, aracın iç kısmında kalması ve yüzeyin üzerinde çıkıntıya yol açmaması gerekir. Aerodinamik uyumsuzluk sorununu çözmek için, özgün besleme şekli de bu tezde önerilmekte olup hat empedansı 50Ω olan koaksiyel kablo, empedans uyumunu bozmadan, doğrudan dielektrik tabanın her iki yanındaki iletkenlere temas etmektedir.

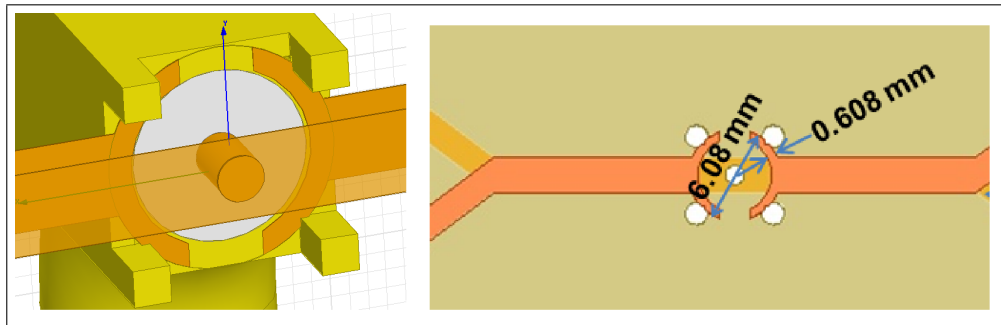
Sonuçta toplam sayısı beş olmak üzere iki grup ADYA anten tasarlanmıştır. Bunlardan birinci gruptaki üç tanesinde besleme noktasından mikroşerit hat ile 16 mm kadar uzaklaştıktan sonra daralma profili başlatılmış, diğer gruptaki iki tanesinde de daralma profili hemen besleme noktasından itibaren başlatılmıştır. Bu 16 mm, herhangi bir hesaplama sonucu bulunmamış olup SMA konnektörden makul bir miktar uzaklaşmak amaçlanmıştır. Bu beş anten a) Mikroşerit Hat İlaveli Dual Doğrusal Daralan, b) Mikroşerit Hat İlaveli Dual Ekspansiyel Daralan, c) Mikroşerit Hat İlaveli Dual Dairesel Daralan, ç) Mikroşerit Hat İlavesiz Dual Ekspansiyel Daralan ve d) Mikroşerit Hat İlavesiz Dual Dairesel Daralan profillerde olmuştur. Dördüncü ve beşinci antenlerde daralma profilleri hemen besleme noktasından itibaren başlamış olup, tasarlanan beş anten profiline ait gösterimler Şekil 4.1 olarak sunulmuştur.

Her bir anten, 1.57 mm kalınlığında bağıl dielektrik sabiti 4.4 olan FR4 malzemesinden dikdörtgensel bir dielektrik tabanın iki yüzündeki ince iki iletken tarafından oluşmaktadır. Bu görünümleriyle, Zıt Kutuplu Vivaldi antenleri andırmaktadırlar. İletkenlerin bakır kalınlığı her bir yüzde 35 mikrometredir. Resimlerde, antenlerin bir yüzünden bakıldığında sanki dielektrik taban şeffafmış gibi, her iki iletken birden görülmektedir. Antenlerin tam orta noktasında, SMA



Şekil 4.1. Tasarlanan antenlere ait geometriler

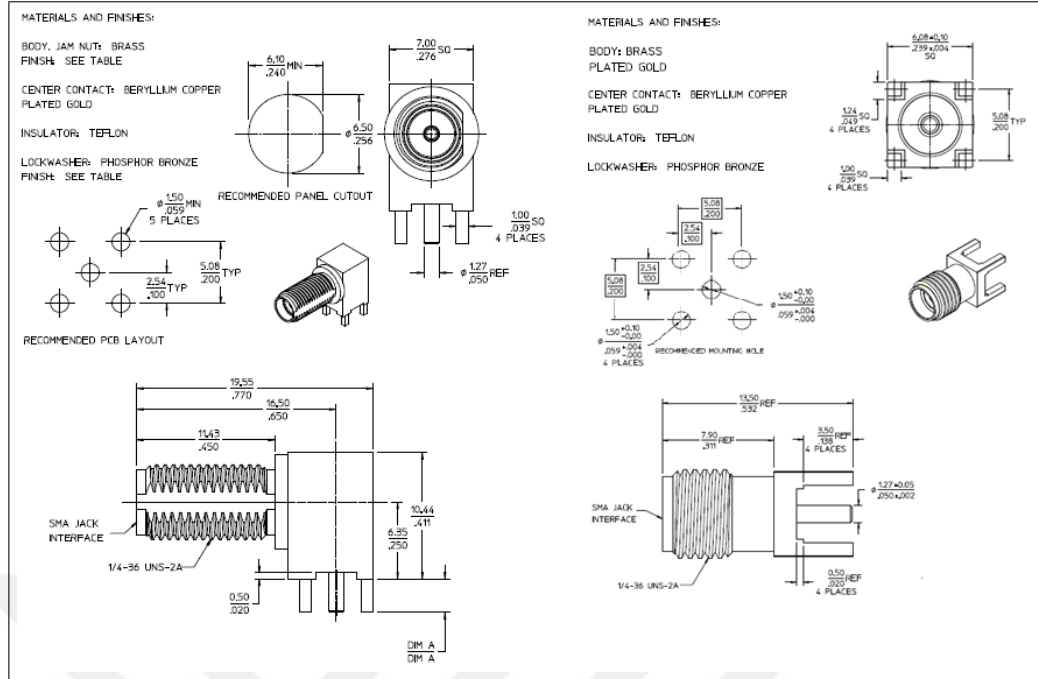
konnektörün lehimlendiği yarım halka şeklindeki parçalar görülmektedir. SMA konnektörün köşelerindeki bacakları, iletkenlerden yalnız biri üzerinde bulunan bu yarım halka parçalara temas etmekte olup detayları Şekil 4.2’de gösterilmiştir. SMA konnektörün ortadaki bacağı da diğer yüzdeki iletkene temas etmektedir. Bu temaslar, imalat aşamasında lehimleme suretiyle uygulanmıştır.



Şekil 4.2. Yarım halka şekilli besleme mekanizması

Üretilen antenlerin koaksiyel kablo bağlantıları için kullanılan SMA

konnektörler ve bilgileri Şekil 4.3'de sunulmuştur.

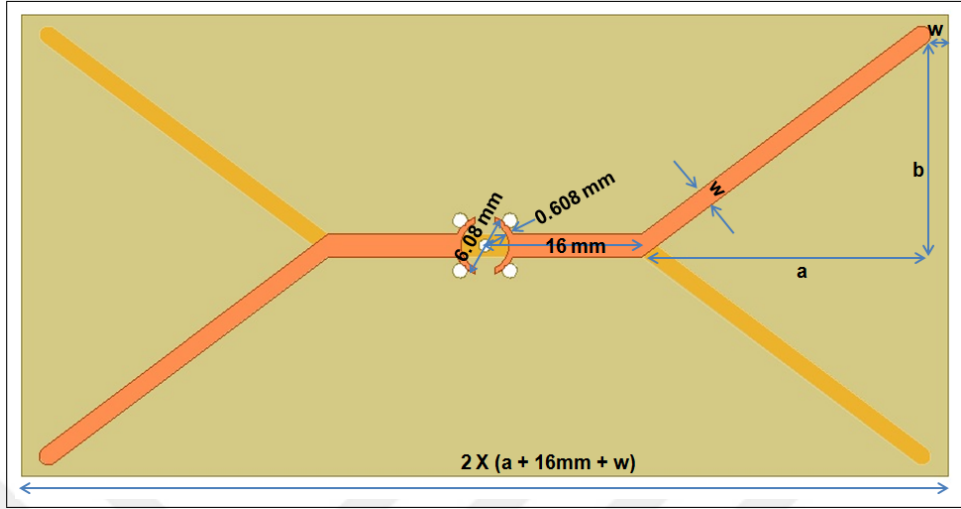


Şekil 4.3. Kullanılan SMA konnektörlere ait bilgiler

Antenler, aslında ince şerit şeklinde zıt kutuplu iletkenlerin, daralma profiline uygun olarak bükülmesi olup simetrik yapılarıyla iki daralma profilini aynı anda barındırmaktadırlar. Bu antenlerin öne çıkan ortak bir özelliği, sadece daralma profili bölgesinde iletken bulunması, başka bir bölgede üzerinde akım bulundurabilecek bir iletken olmamasıdır. Böylece, yüzeyde istenmeyen akımlar da önlenmiş olmaktadır.

Antenlerin performanslarını artırmak için, her bir anten tipini oluşturan parametrelerin belirlenmesi ve bu parametrelerin optimize edilmesi gereklidir. Antenlerin genel görünümlerine bakıldığında, dikdörtgensel görünüşte olduklarından parametreler, dikdörtgenlerin eni boyu cinsinden tanımlanmıştır. Tasarım kolaylığı açısından dielektrik taban boyutları için ortak parametreler kullanılmıştır. Her bir anten için dielektrik tabanları, daralma profillerini kapsayacak şekilde ayarlanmaktadır. Tüm antenler üç parametre kullanılarak ifade edilebilir. Bunlar, daralma profilinin boyu (a), daralma profilinin eni (b), iletkenin genişliğidir (w). Açıklığı doğrusal daralan anten için parametreler aşikar olup, optimizasyon için a ve b parametrelerinin kendisi doğrudan kullanılabilir. w ile kastedilen ise merkezde değil, daralma profilinin başladığı noktadan sonraki iletkenin genişliğidir. 16 mm uzunluğundaki mikroşerit hat

ilavesinin genişliği de, birleşme noktasında sürekliliği sağlayacak şekilde bu w değerine göre belirlenir. Açıklığı doğrusal daralan anten için parametreler Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



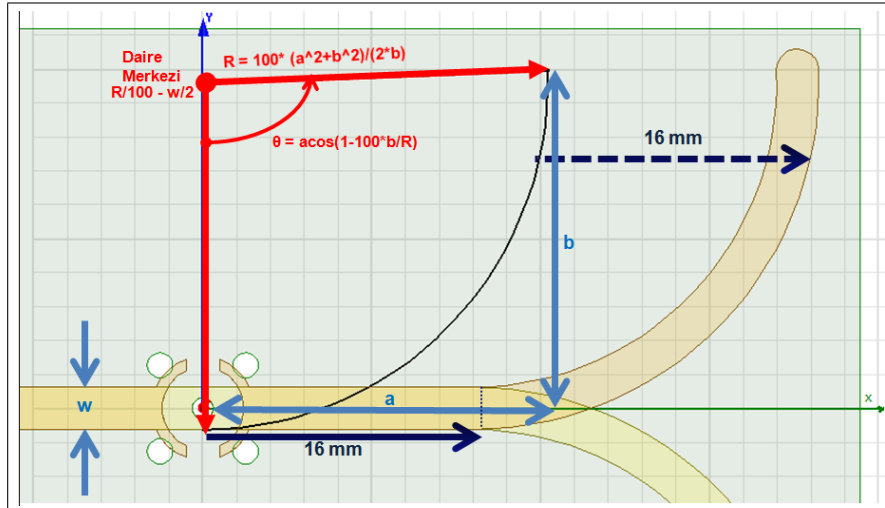
Şekil 4.4. Açıklığı doğrusal daralan yarık anten parametreleri

Açıklığı eksponansiyel daralan antenler için, eksponansiyel ifadelerin bu parametreler kullanılarak yazılması gerekir.

Çizelge 4.1. Eksponansiyel daralma profiline ait parametreler

Parametre	Aldığı Değer ($t; a, b, w$)
$X(t)$	t
$Y(t)$	$-w/2 + (b + w/2(1 - 100b/R))(e^{(300 \cdot t)} - 1)/(e^{(300 \cdot a)} - 1)$
t	Başlangıcı :0 , Bitişi : a

Açıklığı dairesel daralan antenler için de şekil üzerinde göstermek daha açıklayıcı olacaktır. Şekil 4.5’te dairesel profilin nasıl olduğu gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Açıklığı dairesel daralan yarık anten parametreleri

Adından da anlaşılacağı üzere, önce a ve b parametreleri cinsinden bir daire merkezi ve yarıçap belirlenmiş, daha sonra yine a ve b parametreleri cinsinden bir açı hesaplanmış ve bir yay çizdirilmiştir. Bu çizdirilen yay, yukarıdaki şekilde görüldüğü üzere, besleme hattının ucuna eklenmek üzere 16 mm kaydırılmıştır.

Doğrusal ve dairesel daralma profillerinde, daralma profillerinin uç noktalarındaki köşelerden olan saçılmayı engellemek için, köşeler yuvarlatılmıştır. Bunun için uçlarına iletkenin genişliğine eşit bir çapı olan yarım daire şeklinde parçalar eklenmiştir.

Sonuç olarak, dielektrik tabanları ve iletkenleri ile beraber her beş anten tipi üç parametre ile çizdirilebilir hale getirilmiştir. Böylece bu parametrelerin optimum kombinasyonlarını bularak anten performansını artırmak mümkün olacaktır. Bundan sonraki aşama, HFSS yazılım içerisinde bu antenleri oluşturmak ve simülasyonları ayarlamak olup detayları sonraki kısımda anlatılacaktır.

4.3. Simülasyon Ayarları ve Genetik Algoritmanın Probleme Uygulanması

Simülasyon ve analiz yapabilmek için, önce antenleri HFSS içindeki 3 Boyutlu nesneler haline getirmek gereklidir. Bunun için antenleri çizdirmek için gereken parametrelere değer atanması gerekir. Bazı parametrelerin değerleri zaten belirlidir. Bunlar yarım halka şeklindeki besleme parçaları, mikroşerit besleme hattı, dielektrik taban kalınlığı ve iletkenlerin kalınlıklarıdır. Bunun dışında SMA konnektörün boyutları da belirlidir. Bunun dışında a , b , w olarak belirlenen üç parametre de optimizasyon sonucu hesaplanan ve henüz değeri belli olmayan değişkenlerdir. Bunlar için bir aralık belirlenir ve bu aralık içinde bir başlangıç değeri atanır. Bu aralıklar her bir anten için farklılık göstermekte olup, bir kaç faktöre bağlıdır. Bunlardan ilki, SMA konnektörün bacakları arasındaki mesafedir. Optimizasyon sırasında, bazı parametre değerleri için her iki iletkenin birden SMA konnektörünün bacaklarına temas etmesi, antenlerin çözüm uzayının dışına geçmesi veya sınır koşullarının birbirlerinin

üzerine binmesi gibi nedenlerden ötürü optimizasyonun hata verip sonlandığı görülmüştür. Bu durumda deneme yanılma ile aralıkların değerleri değiştirilmiştir. Yani, bir anten tipi için sorun yaratmayan bir parametre kombinasyonu, bir başka anten tipi için sorun olabilmektedir. Her bir anten tipine ait aralıklar Çizelge 4.2 olarak sunulmuştur.

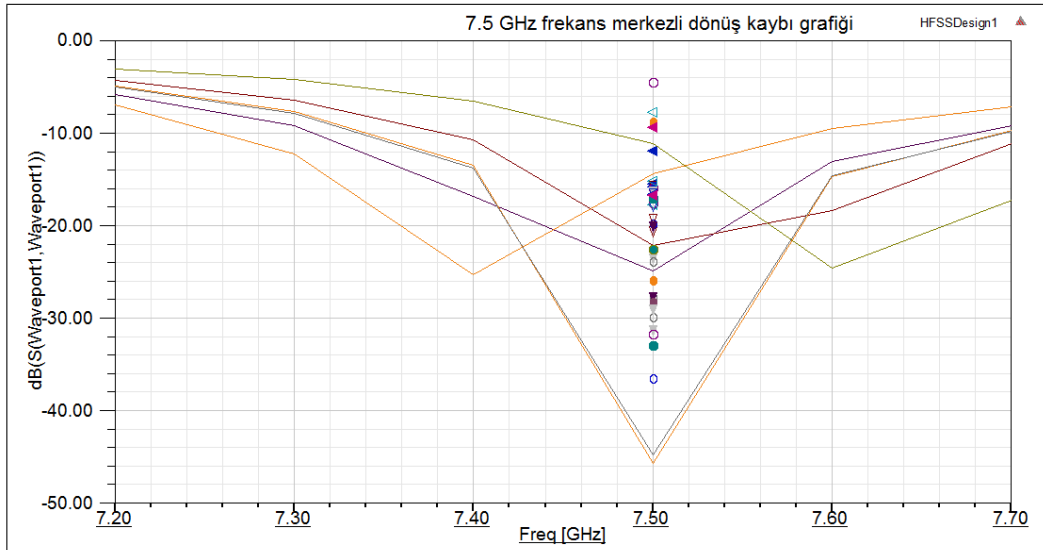
Çizelge 4.2. Her bir anten tipine ait aralıklar

Anten Tipi	Parametre	Minimum Değer (mm)	Maksimum Değer (mm)
Doğrusal Daralan	w	1.1	1.9
Mikroşerit Hat	a	15	35
İlaveli	b	13	24
Ekspansiyonlu	w	0.635	1.905
Daralan Mikroşerit	a	15	40
Hat İlaveli	b	10	23
Dairesel Daralan	w	1.1	2.5
Mikroşerit	a	15	35
Hat İlaveli	b	15	23
Dairesel Daralan	w	1.1	2.5
Mikroşerit	a	15	35
Hat İlavesiz	b	15	24
Ekspansiyonlu	w	0.635	2.2
Daralan Mikroşerit	a	15	35
Hat İlavesiz	b	10	23

Antenlerin dışında da bazı simülasyon ayarları bulunmaktadır. Örneğin, çözüm uzayını antenlerden yeterli bir uzaklıkta sonlandırmak gerekmektedir. (Literatürde çeyrek dalgaboyu uzaklıkta koymanın yeterli olduğu bildirilmekle birlikte, incelemelerde sonuçların değişkenlik gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, deneme ve tecrübe ile yaklaşık dört dalgaboyu uzakta sınırlandırılmıştır.) Bunun için dikdörtgen prizması şeklinde bir hacim kullanılır. Bu hacim yüzeylerinde radyasyon sınır koşulu uygulanır. Altı yüzden bir tanesinden koaksiyel kablo ile SMA konnektör girdiğinden bu konnektör bölgesi hariç tutulur. Diğer sınır koşulları da SMA konnektör ve iletkenler üzerinde tanımlanır. SMA konnektörün iç ve dış yüzeyleri mükemmel iletken (perfect electrical conductor); bakır iletkenlerin üzerinde de bakır malzemesinden sonlu iletkenlik (finite conductivity) yüzeyleri tanımlanır.

Optimizasyon için de bazı parametreler bulunmaktadır. Metasezgisel yöntemlerden Genetik Algoritma ile optimizasyon için, HFSS içerisinde gömülü

bir fonksiyon olan “Optimetrics” aracı kullanılmıştır. Amaç fonksiyonu, 7250 – 7750 MHz aralığının orta noktası olan “7500 MHz frekansında $S_{11}(dB)$ değerinin -10 dB veya daha aşağı olması” şeklinde belirlenmiştir. Bunda yürütülen temel mantık, Genetik Algoritmanın merkez frekansa odaklanması sonucunda, dönüş kaybına ait grafiğin merkezinin bu frekansa oturacak olması ve diğer frekanslarla beraber topyekün azalmasını sağlayacak olmasıdır. 7500 MHz frekansında -10 dB veya aşağı olduğunda, diğer frekanslarda da bu kriterin sağlanması beklenmiştir. Ancak, optimizasyon devam ederken, bunun eksik bir yaklaşım olduğu görülmüştür. Çünkü tüm grafiğin merkezi 7500 MHz frekansında olmadan da 7500 MHz için -10 dB altına düşebildiği anlaşılmıştır. Bu durumda yeni bir yaklaşım izlenmiş ve -10 dB yerine daha düşük bir dönüş kaybı istenirse, grafiğin merkezinin 7500 MHz frekansına oturacağı varsayılmıştır. Bu nedenle amaç fonksiyonu, “7500 MHz frekansında $S_{11}(dB)$ değerinin -40 dB veya daha aşağı olması” şeklinde güncellenmiştir. Ayrıca, optimizasyon sonucunda -40 dB altına inemese bile, amaç fonksiyonunda hesaplanan maliyet değerini en düşük değere çekmeye çalışacaktır. Bu durumda optimizasyon sırasında çizdirilen tüm grafikler incelenip, manuel olarak içlerinden en iyisini seçmek mümkün olacaktır. Bunun grafik üzerinde gösterimi Şekil 4.6’da sunulmuştur.



Şekil 4.6. 7.5 GHz frekansı için $S_{11}(dB)$ değişim grafiği

Grafikten açıkça görülebileceği gibi, 7.5 GHz frekansında $S_{11}(dB)$ değerini düşürdükçe, grafiğin merkezinin de 7.5 GHz frekansına oturduğu görülmektedir. Dönüş kaybı için sınır -10 dB ve aşağı olarak seçilseydi,

7.6 GHz merkezli olan grafik bu şartı sağlayacak, fakat asıl istenen hedefe ulaşamamış olacaktı. Eğer -20 dB seçilseydi, merkezi 7.55 GHz civarı olan grafiğin bu kriteri sağladığı fakat bunun da istenen hedefe ulaştırmayacağı görülecektir. -40 dB seçilirse, grafiğin merkezinin de 7.5 GHz frekansına oturduğu görülmektedir. Merkezi 7.5 GHz olan ve -40 dB altında olan iki değişim görülmektedir. Bunlardan birisi Optimetrics tarafından çözüm uzayı taranarak bulunan dokuz ondalık basamak içeren parametreler, diğeri de bu bulunan bu değerlerin manuel olarak üç ondalık basamağa düşürülmesi ile elde edilen sonuçtur. Örneğin, w değeri 1.807452017 yerine 1.807 olarak alınmıştır. Bu şekilde ondalık düşürmenin gayesi, üretim kolaylığıdır. Ancak parametrelerin değerlerindeki küçük değişimlerin, performans üzerinde büyük etkiler oluşturduğu bilindiğinden, dokuz ondalık yerine üç ondalık basamak kullanmanın nasıl bir etkisi olacağı incelenmiştir.

Anten parametrelerine ilave olarak Genetik Algoritmanın bazı parametreleri bulunmaktadır. Bunlar Çizelge 4.3 olarak sunulmuştur.

Çizelge 4.3. GA parametreleri ve değerleri

Açıklama	Parametre Orijinal Adı	Değeri
Ebeveyn Parametreleri	Number of individuals in Parents	5
	Roulette Selection Pressure in Parents	3
	Number of individuals in Mating Pool	5
	Crossover Type	Simulated binary crossover
	Individual Crossover Probability	1
	Variable Exchange Probability	0
	Variable crossover probability	1
Eşleşme Parametreleri	Mu	1
	Mutation Type	Polynomial
	Variable Mutation Probability	1
	Individual Mutation Probability	1
	Standard Deviation	0.05
Çocuklar	Number of Survivors in Children	3
Elit Bireyler	Number of Survivors in Parents	2
Bir Sonraki Nesil için Parametreler	Number of individuals	5
	Roulette Selection Pressure	3

Birey sayısı olarak da 5 seçilmiştir. Bunun başlıca nedeni, tek bir hesaplama turunun uzun sürmesidir. Aslında amaç fonksiyonunu hesaplamak ve performansı ölçmek uzun sürmemektedir. Ancak, tek bir frekans için bile $S_{11}(dB)$ değerini hesaplamak için Sonlu Elemanlar Yöntemiyle bir

elektromanyetik problemin çözülmesi gerekmektedir. İşte bu işlem oldukça uzun sürmektedir. Dört çekirdekli, 6 GB belleğe sahip ve 64 bit işlemcili bir dizüstü bilgisayarda tek bir iterasyon, anten boyutlarına bağlı olarak değişmekte olup, en az 8 dakika 52 saniye, en çok da 25 dakika 50 saniye sürmüştür. Her bir anten için toplam işlem süresi, ortalama 12 saat civarındadır.

Birey sayısı ve nesil sayısı aynı anda yüksek sayıda seçilirse, çok fazla zaman gerekebilecektir. Bu nedenle, Genetik Algoritmanın asıl gücünün, çaprazlama ve mutasyon gibi işlemlerden geldiği düşünülerek, birey sayısından ziyade, nesil sayısının yüksek tutulması gerektiği değerlendirilmiştir. Böylece, genetik operatörler nesiller boyu çalışacak ve etkiler belirgin olmaya başlayacaktır. Örneğin, 30 birey ve 1 nesil seçmek demek, GA işlemlerinden hiçbirini uygulanmadan, çözüm uzayına 30 bireyi rasgele dağıtmak anlamına gelir. Bunun yerine 5 birey ve 6 nesil seçilirse, bu 5 birey, çaprazlama ve mutasyon uygulamasına maruz kalacak ve Genetik Algoritma 6 nesil sonunda gücünü gösterebilecektir. Dolayısıyla, her bir anten tipi için her nesilde 5 birey denenmek suretiyle 6 nesil sonunda 30 deneme yapılmıştır. Optimizasyon başlangıç noktası olarak aralıkların orta noktaları alınmıştır.

Tasarlama safhasında iki grup anten incelenmiştir. Bunlardan birinci gruptaki üç tanesinde besleme noktasından mikroşerit hat ile 16 mm kadar uzaklaştıktan sonra daralma profili başlatılmış, diğer gruptaki iki tanesinde de daralma profili hemen besleme noktasından itibaren başlatılmıştır. Bu 16 mm, herhangi bir hesaplama sonucu bulunmamış olup SMA konnektörden makul bir miktar uzaklaşmak amaçlanmıştır. Beş antenden birincisi, Dual Doğrusal Daralan, ikincisi Dual Eksponansiyel Daralan, Üçüncüsü Dual Dairesel Daralan profillerde olmuştur. Dördüncü anten Dual Eksponansiyel Daralan ve beşinci anten Dual Dairesel Daralan profilinde olup her ikisi de hemen besleme noktasından itibaren daralmaya başlamıştır.

Aslında hemen besleme noktasından itibaren daralan Dual Doğrusal Daralan profilili altıncı bir anten daha tasarlanmak istenmiş, ancak her iki iletkenin birden, antenleri beslemek için kullanılan SMA konnektörün bacaklarına temas etmesi nedeniyle bu profili tasarlamak mümkün olmamıştır. Optimizasyon uygulanan antenler, mikroşerit hat ilaveli ve mikroşerit hat ilavesiz olmak üzere

iki alt başlıkta incelenecektir.

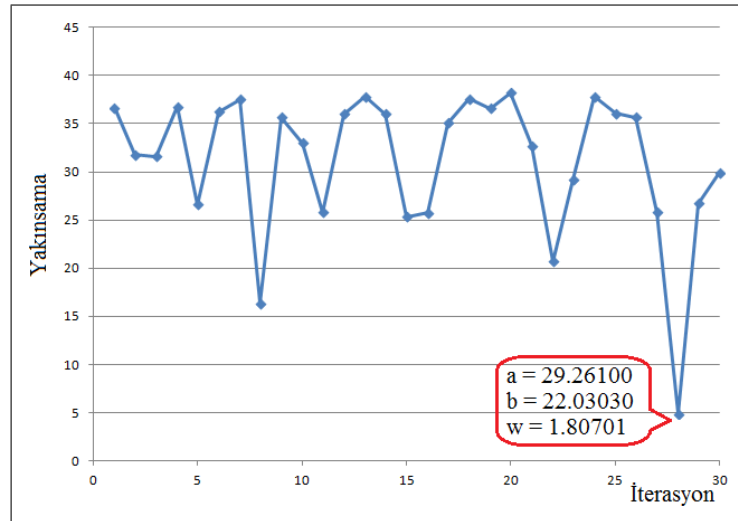
4.3.1. Mikroşerit hat ilaveli ADYA tipi antenler

Mikroşerit Hat İlaveli ADYA Tipi Antenler kapsamında üç adet anten optimize edilmiş olup bunlar Açıklığı Doğrusal Daralan Yarık Anten, Açıklığı Eksponansiyel Daralan Yarık Anten ve Açıklığı Dairesel Daralan Yarık Antendir.

4.3.1.1. Mikroşerit hat ilaveli açıklığı doğrusal daralan yarık anten

a parametresi için 15 — 35 mm aralığı; b parametresi için 13 — 24 mm aralığı; w parametresi için 1.1 — 1.9 mm aralığı optimizasyon için seçilmiştir.

Optimizasyon esnasında, uygunluğu değerlendirilen bireyler ve yakınsama grafikleri Şekil 4.7’de; bireylere ait uygunluk değerlendirmeleri Çizelge 4.4’de sunulmuştur.

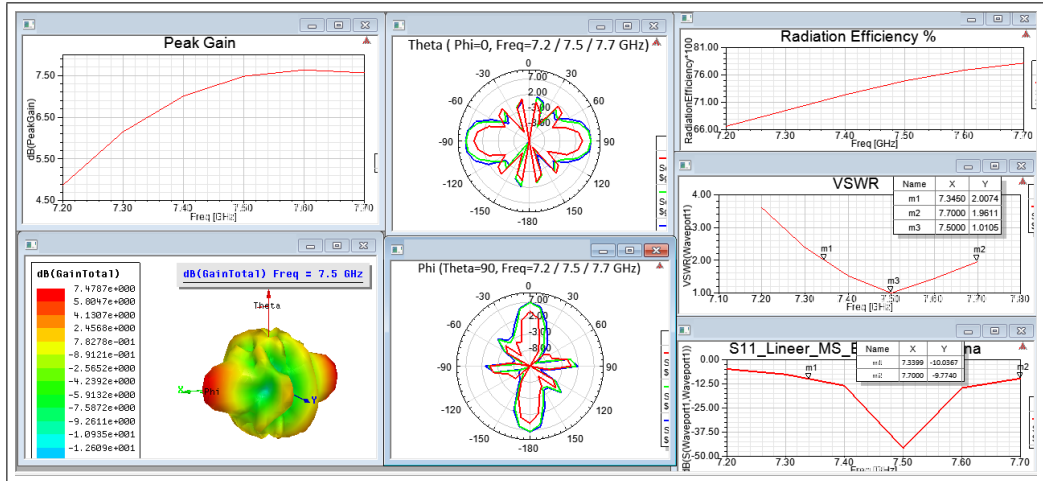


Şekil 4.7. Anten 1 optimizasyon yakınsama grafiği

Optimizasyon ile Şekil 4.8’de görülen simülasyon sonucu elde edilmiştir.

Çizelge 4.4. Anten 1 optimizasyon çizelgesi

İterasyon	w (mm)	b (mm)	a (mm)	Yakınsama
1	1.50557	23.65858	34.94422	36.648
2	1.80639	15.10553	30.74206	31.750
3	1.88451	16.40168	16.08341	31.617
4	1.86281	20.91220	26.16977	36.741
5	1.67394	20.49962	30.87817	26.602
6	1.61232	14.38511	22.53075	36.247
7	1.68215	20.84170	19.73220	37.538
8	1.80854	19.60475	30.85275	16.344
9	1.69093	18.02648	17.45349	35.645
10	1.87203	17.71532	29.50809	33.022
11	1.66997	13.46983	15.98851	25.794
12	1.78188	17.80525	18.21568	36.015
13	1.82295	22.44288	15.40418	37.816
14	1.21958	18.58376	18.89660	35.996
15	1.16306	23.39238	28.36833	25.358
16	1.64994	23.44072	28.94757	25.734
17	1.60785	18.25786	16.27034	35.109
18	1.57759	22.47744	23.55581	37.587
19	1.62834	19.81080	16.78613	36.621
20	1.86625	23.73721	15.69452	38.190
21	1.75551	17.30742	15.62019	32.736
22	1.46421	14.73868	15.66358	20.671
23	1.61651	15.48390	31.24038	29.248
24	1.72025	21.91043	19.01481	37.791
25	1.57744	16.00449	28.13370	36.080
26	1.50472	23.09498	33.23863	35.685
27	1.60315	13.92525	17.28958	25.779
28	1.80701	22.03030	29.26100	4.8314
29	1.62094	19.49211	31.59259	26.703
30	1.70953	14.29300	15.21109	29.920

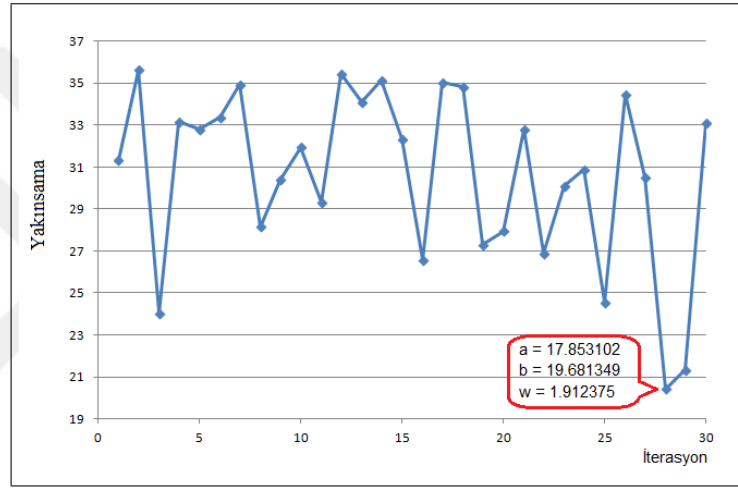


Şekil 4.8. Anten 1 simülasyon sonuçları

4.3.1.2. Mikroşerit hat ilaveli açıklığı eksponansiyel daralan yarık anten

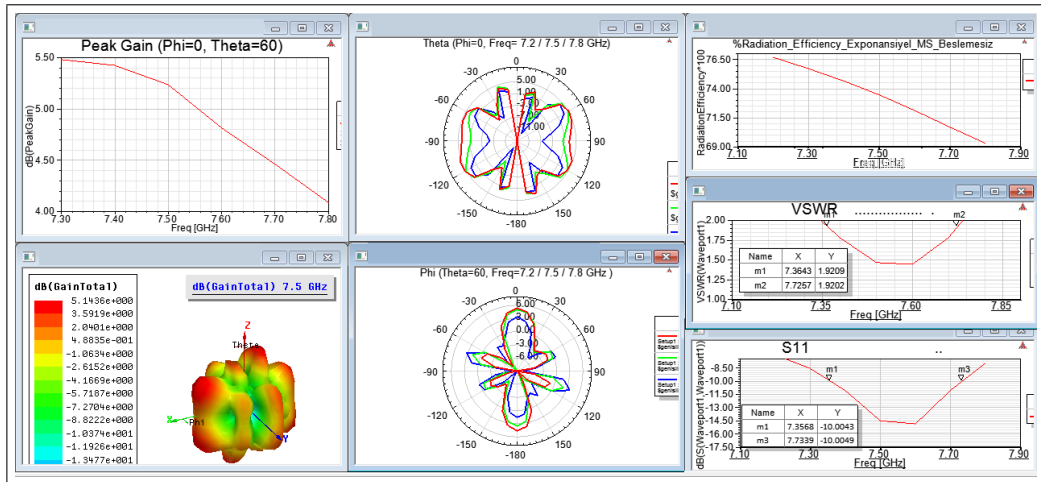
a parametresi için 15 — 40 mm aralığı; b parametresi için 10 — 23 mm aralığı; w parametresi için 0.635— 1.905 mm aralığı optimizasyon için seçilmiştir.

Optimizasyon esnasında, uygunluğu değerlendirilen bireyler ve yakınsama grafikleri Şekil 4.9’da; bireylere ait uygunluk değerlendirmeleri Çizelge 4.5’te sunulmuştur.



Şekil 4.9. Anten 2 optimizasyon yakınsama grafiği

Optimizasyon sonucunda Şekil 4.10’da görülen simülasyon sonucu elde edilmiştir.



Şekil 4.10. Anten 2 simülasyon sonuçları

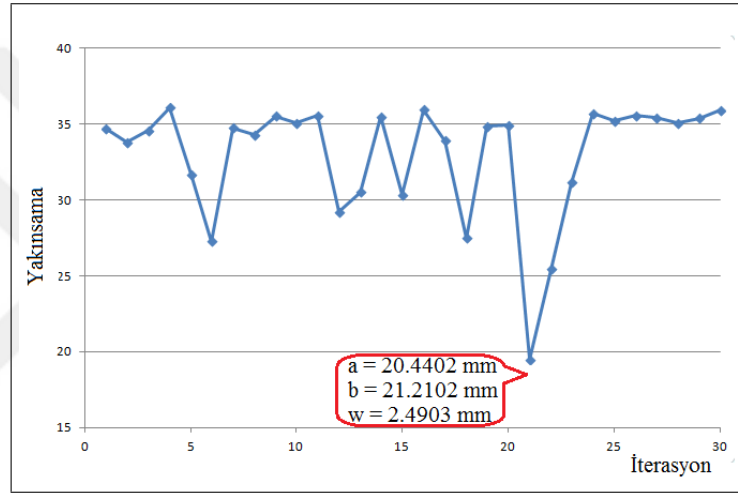
Çizelge 4.5. Anten 2 optimizasyon çizelgesi

İterasyon	w (mm)	b (mm)	a (mm)	Yakınsama
1	1.11247	16.53130	34.67757	31.356
2	1.77384	17.47395	16.35426	35.627
3	1.59009	20.75433	28.96222	24.026
4	1.12604	17.71219	18.23821	33.181
5	1.13022	17.87028	34.75021	32.791
6	1.14384	18.33209	38.61567	33.379
7	1.65845	15.87987	38.05158	34.922
8	1.02812	22.67840	37.44620	28.166
9	1.10477	22.97855	29.88678	30.396
10	0.94517	19.71940	20.47315	31.954
11	1.05263	19.51471	28.71504	29.315
12	1.64636	21.99131	20.94789	35.451
13	1.69722	18.10957	22.86168	34.093
14	1.46541	16.65253	25.71213	35.142
15	1.61421	21.68095	30.84919	32.333
16	1.66119	22.03476	28.50753	26.588
17	1.58274	19.73778	24.07699	35.047
18	1.47122	15.31503	37.85446	34.826
19	1.21698	15.96369	33.16700	27.312
20	1.07017	17.20898	33.81366	27.948
21	1.01640	18.09334	34.70229	32.806
22	1.55674	16.41613	21.02339	26.882
23	1.08639	16.41755	34.12651	30.112
24	1.62505	19.65820	26.85240	30.87
25	1.58356	22.17234	26.88439	24.546
26	1.47644	16.29783	24.55706	34.482
27	1.60232	15.99787	19.83529	30.509
28	1.91238	19.68135	17.85310	20.421
29	1.62458	21.44836	27.73467	21.339
30	1.50744	16.61797	28.89452	33.106

4.3.1.3. Mikroşerit hat ilaveli açıklığı dairesel daralan yarık anten

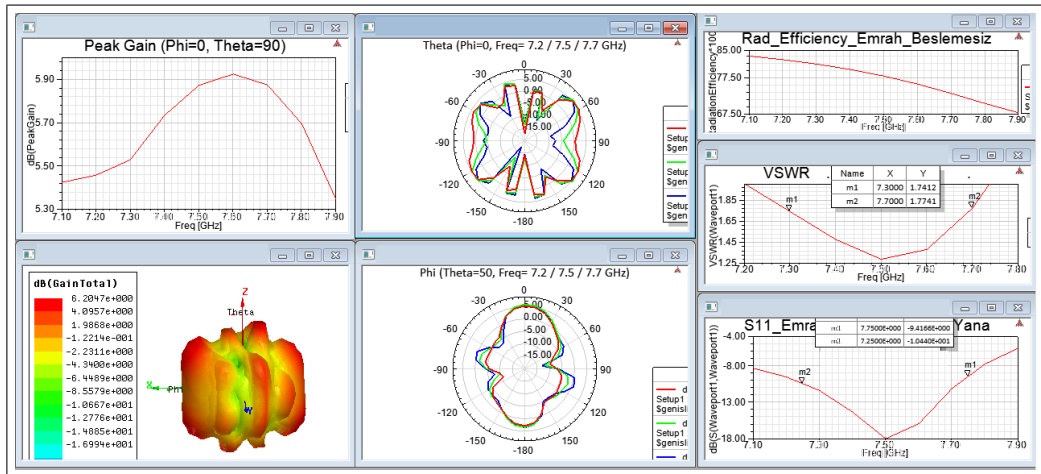
a parametresi için 15 — 35 mm aralığı; b parametresi için 15 — 23 mm aralığı; w parametresi için 1.1 — 2.5 mm aralığı optimizasyon için seçilmiştir.

Optimizasyon esnasında, uygunluğu değerlendirilen bireyler ve yakınsama grafikleri Şekil 4.11’de; bireylere ait uygunluk değerlendirmeleri Çizelge 4.6’da sunulmuştur.



Şekil 4.11. Anten 3 optimizasyon yakınsama grafiği

Optimizasyon sonucunda Şekil 4.12’de görülen simülasyon sonucu elde edilmiştir.



Şekil 4.12. Anten 3 simülasyon sonuçları

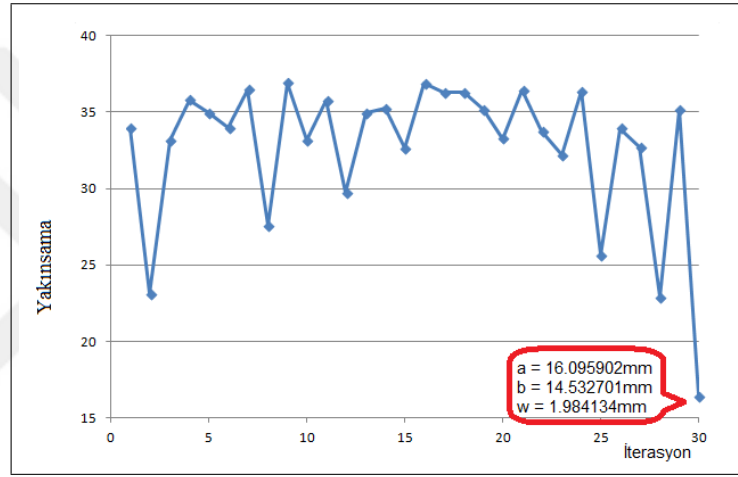
Çizelge 4.6. Anten 3 optimizasyon çizelgesi

İterasyon	w (mm)	b (mm)	a (mm)	Yakınsama
1	1.62634	16.53130	30.74206	34.69
2	2.35542	17.47395	16.08341	33.78
3	2.15285	20.75433	26.16977	34.55
4	2.10440	20.45427	30.87817	36.06
5	1.99656	16.00735	22.53075	31.65
6	2.11876	20.70305	19.73220	27.26
7	2.44474	21.86790	34.54283	34.73
8	2.38722	22.34821	34.58544	34.30
9	2.41119	19.21378	34.81859	35.52
10	2.14671	21.07119	34.45665	35.06
11	2.01518	18.64929	34.97010	35.54
12	2.05617	17.19302	27.59246	29.18
13	2.49389	20.44901	16.97224	30.51
14	2.14146	20.35195	34.07685	35.46
15	2.03194	22.01677	21.85657	30.33
16	2.28439	20.72448	31.84794	35.93
17	2.00320	16.80341	15.47672	33.88
18	2.11429	16.67892	22.63727	27.48
19	2.13684	21.71373	34.67117	34.84
20	2.11780	21.98084	34.45534	34.93
21	2.49030	21.21020	20.44020	19.49
22	2.43267	17.85979	25.41263	25.43
23	2.07600	16.19459	24.26161	31.14
24	2.09550	22.28859	33.04683	35.69
25	2.12832	20.54581	33.82502	35.21
26	2.39711	19.29525	34.40005	35.55
27	2.28843	19.90709	34.67409	35.40
28	2.27906	20.89949	34.64281	35.06
29	2.36527	19.59084	34.93935	35.36
30	2.37177	19.55366	33.53525	35.91

4.3.1.4. Mikroşerit hat ilavesiz açıklığı dairesel daralan yarık anten

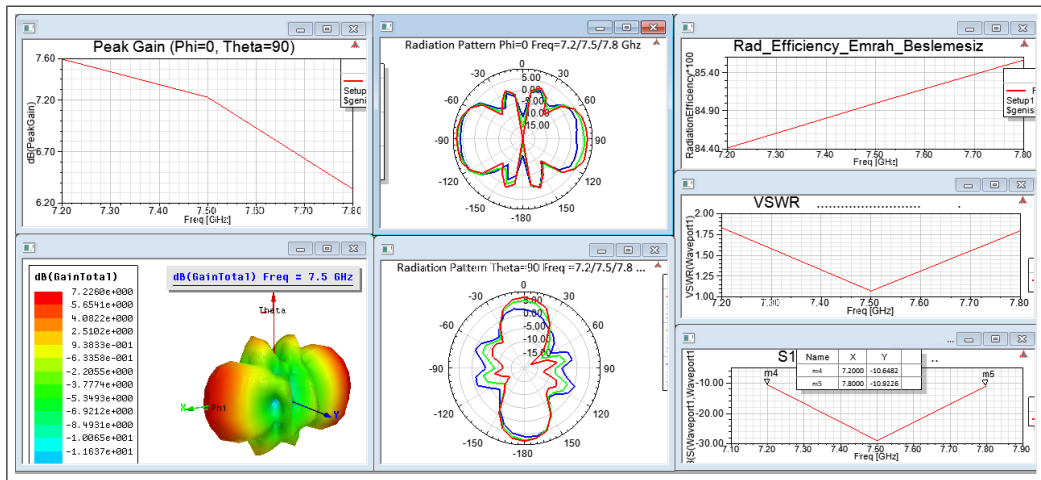
a parametresi için 15 — 35 mm aralığı; b parametresi için 15 — 24 mm aralığı; w parametresi için 1.1 — 2.5 mm aralığı optimizasyon için seçilmiştir.

Optimizasyon esnasında, uygunluğu değerlendirilen bireyler ve yakınsama grafikleri Şekil 4.13’de; bireylere ait uygunluk değerlendirmeleri Çizelge 4.7’de sunulmuştur.



Şekil 4.13. Anten 4 optimizasyon yakınsama grafiği

Optimizasyon sonucunda Şekil 4.14’de görülen simülasyon sonucu elde edilmiştir.



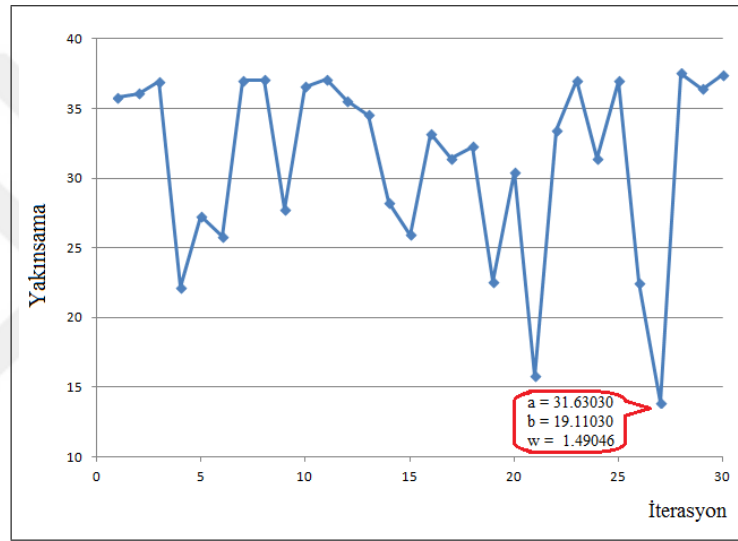
Çizelge 4.7. Anten 4 optimizasyon çizelgesi

İterasyon	w (mm)	b (mm)	a (mm)	Yakınsama
1	1.22337	12.48836	29.16785	33.951
2	2.03838	14.02017	15.97507	23.089
3	1.81194	19.35078	25.05280	33.165
4	2.05224	20.74062	28.82999	35.808
5	2.05931	18.74377	26.60064	34.953
6	2.06574	19.27480	15.88308	33.984
7	1.80102	17.05745	19.83491	36.483
8	2.15507	13.08268	17.19344	27.558
9	2.02251	22.58837	15.31096	36.918
10	2.14879	11.65337	28.76031	33.19
11	2.13893	16.14191	31.98849	35.779
12	2.09959	14.21209	25.79607	29.744
13	2.07944	11.41669	29.73716	34.949
14	2.04806	16.32814	31.87010	35.27
15	2.02150	17.73538	32.92261	32.635
16	1.86109	13.16821	22.30604	36.906
17	2.04110	20.66605	16.46459	36.278
18	1.91753	21.44287	15.72783	36.276
19	1.89248	16.73708	31.81814	35.153
20	2.10981	22.23858	22.61056	33.278
21	2.07370	13.53238	21.01666	36.457
22	1.85386	13.35631	19.58837	33.737
23	2.11244	22.29504	22.21560	32.214
24	1.79815	17.97418	20.04409	36.377
25	1.78761	14.67078	16.83692	25.669
26	2.04968	19.18782	25.25471	33.942
27	2.09853	20.01327	31.22308	32.695
28	2.04578	15.54240	16.59467	22.889
29	2.02781	17.77887	30.15149	35.181
30	1.98413	14.53270	16.09590	15.602

4.3.1.5. Mikroşerit hat ilavesiz açıklığı eksponansiyel daralan yarık anten

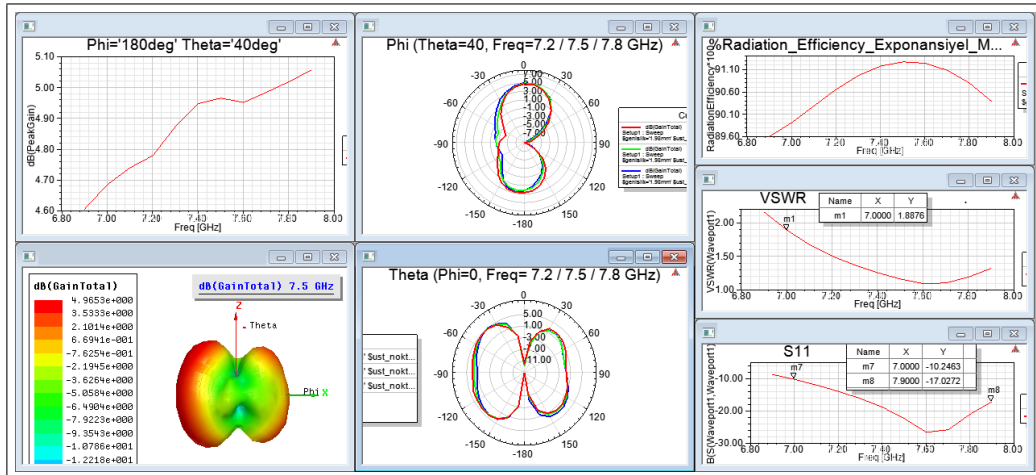
a parametresi için 15 — 35 mm aralığı; b parametresi için 10 — 23 mm aralığı; w parametresi için 0.635 — 2.2 mm aralığı optimizasyon için seçilmiştir.

Optimizasyon esnasında, uygunluğu değerlendirilen bireyler ve yakınsama grafikleri Şekil 4.15'te; bireylere ait uygunluk değerlendirmeleri Çizelge 4.8'de sunulmuştur.



Şekil 4.15. Anten 5 optimizasyon yakınsama grafiği

Optimizasyon sonucunda Şekil 4.16'da görülen simülasyon sonucu elde edilmiştir.

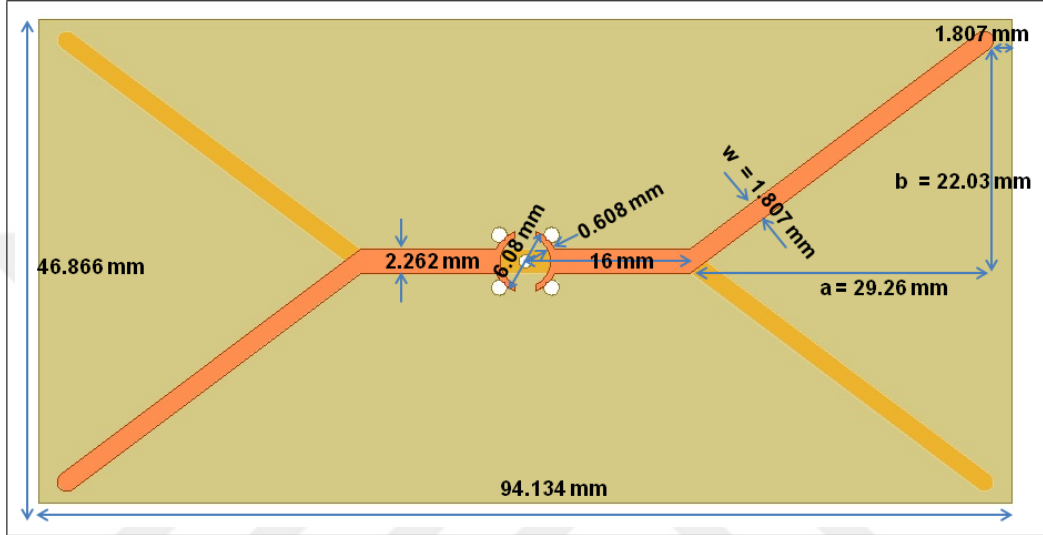


Şekil 4.16. Anten 5 simülasyon sonuçları

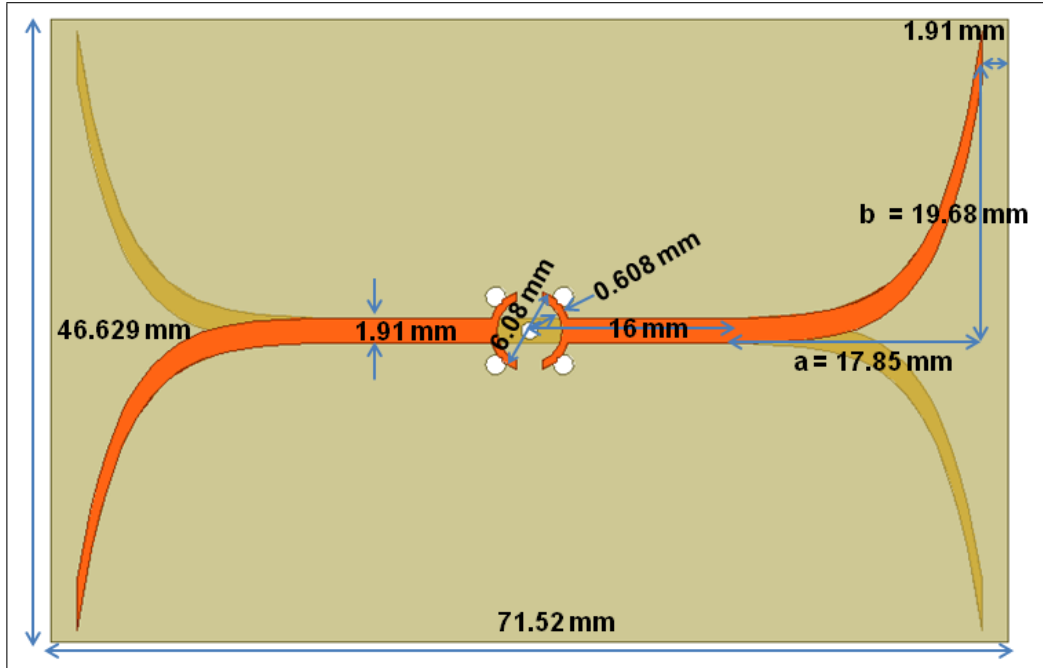
Çizelge 4.8. Anten 5 optimizasyon çizelgesi

İterasyon	w (mm)	b (mm)	a (mm)	Yakınsama
1	1.51355	12.87118	30.31626	35.789
2	2.08640	14.63866	14.19175	36.053
3	1.92724	20.78936	25.28675	36.931
4	1.52676	21.40460	30.45600	22.152
5	1.56783	11.99507	34.87184	27.254
6	1.63424	16.56709	33.94150	25.788
7	1.56939	11.95407	13.50211	37.006
8	1.46497	22.71067	23.09376	37.028
9	1.48741	22.29775	27.81348	27.736
10	1.53121	10.95718	15.94899	36.553
11	1.53132	21.16218	19.64738	37.083
12	1.53207	15.91601	24.08741	35.531
13	1.58290	11.61783	26.37783	34.513
14	1.57660	20.19611	15.25444	28.254
15	1.50128	21.82085	30.89635	25.921
16	1.54316	23.60957	33.93523	33.182
17	1.52341	23.58955	31.71647	31.403
18	1.37343	22.98287	34.12934	32.262
19	1.49874	14.97697	18.49070	22.557
20	1.43638	17.40923	34.86166	30.452
21	1.68399	17.77579	32.48139	15.794
22	1.58113	17.19745	29.94339	33.429
23	1.38612	22.86674	16.96530	36.993
24	1.49319	24.64387	31.48353	31.399
25	1.53450	15.75982	26.25790	36.949
26	1.37213	21.26842	29.73547	22.462
27	1.49046	19.11030	31.63030	13.885
28	1.64563	22.40150	22.64740	37.513
29	1.53288	11.18150	29.36968	36.389
30	1.43951	18.87746	24.32914	37.406

Simülasyon sonunda, en başta bakılmasına karar verilen diğer kriterler de incelenmiştir. Analizi tamamlanan antenlerin sonuçta, antenin çalışma frekans bölgesinde -10 dB veya daha aşağı dönüş kaybına sahip; duran dalga oranının (VSWR) 2 den aşağı; ışıma veriminin %60 veya daha fazla ve maksimum kazancın en az 4.5 dB olup olmadığı kontrol edilmiştir. Program ile ayrıca ışıma desenlerine de bakılmıştır. Optimizasyon sonucu elde edilen parametreler, her bir anten tipine ait şekiller üzerinde aşağıda gösterilmiştir.

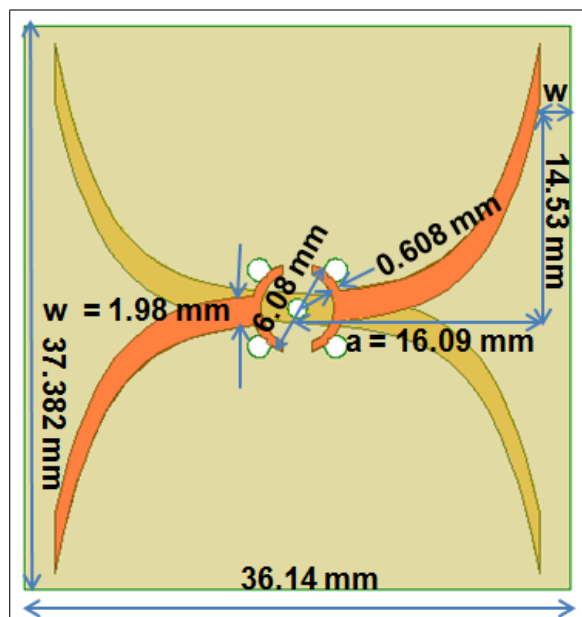
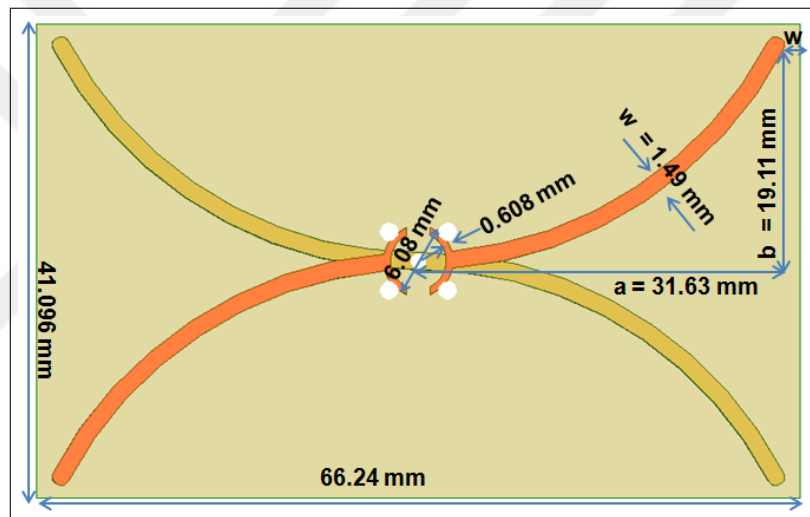
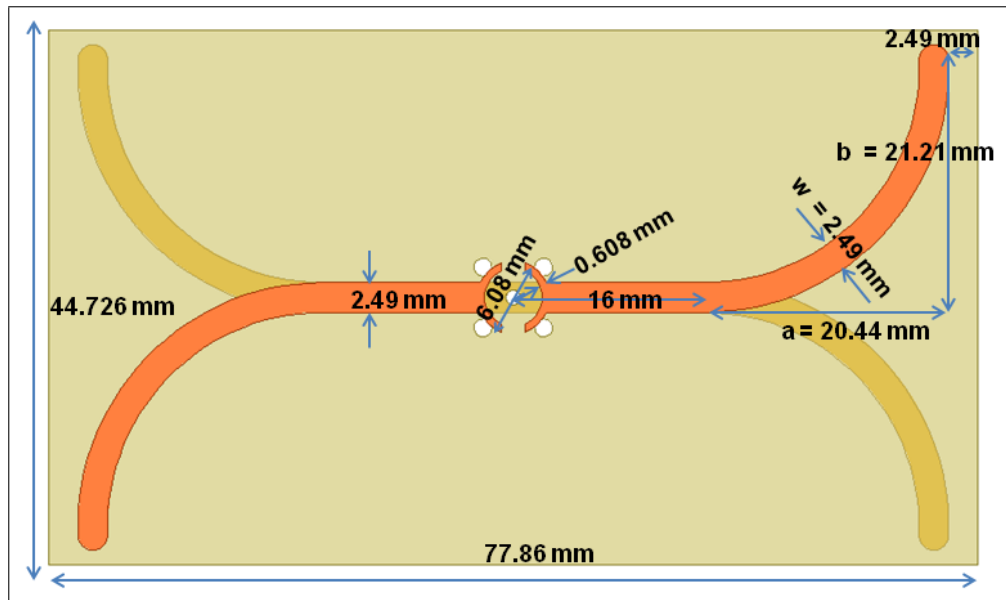


Şekil 4.17. Anten 1 tasarımına ait ölçüler



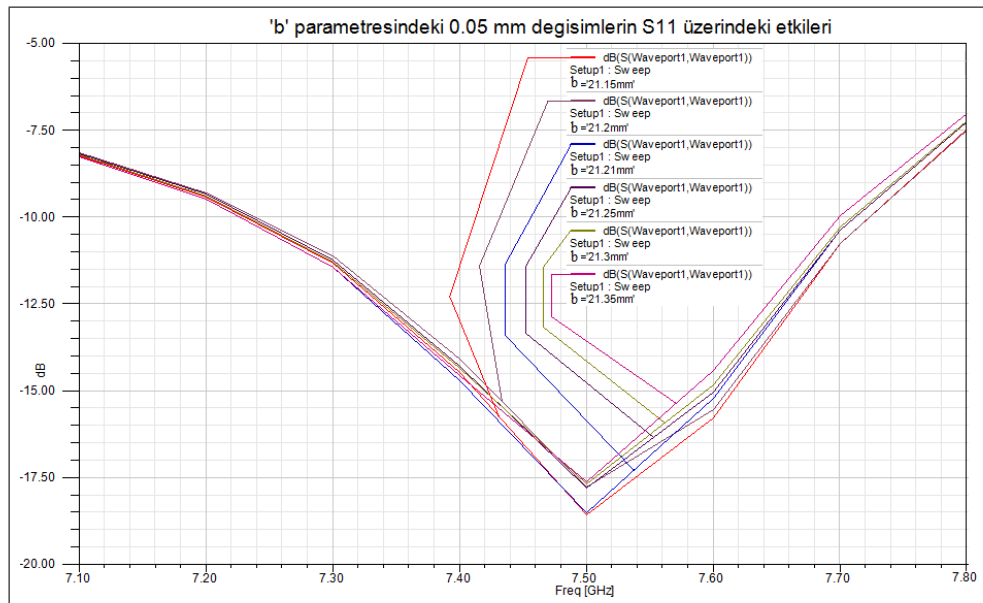
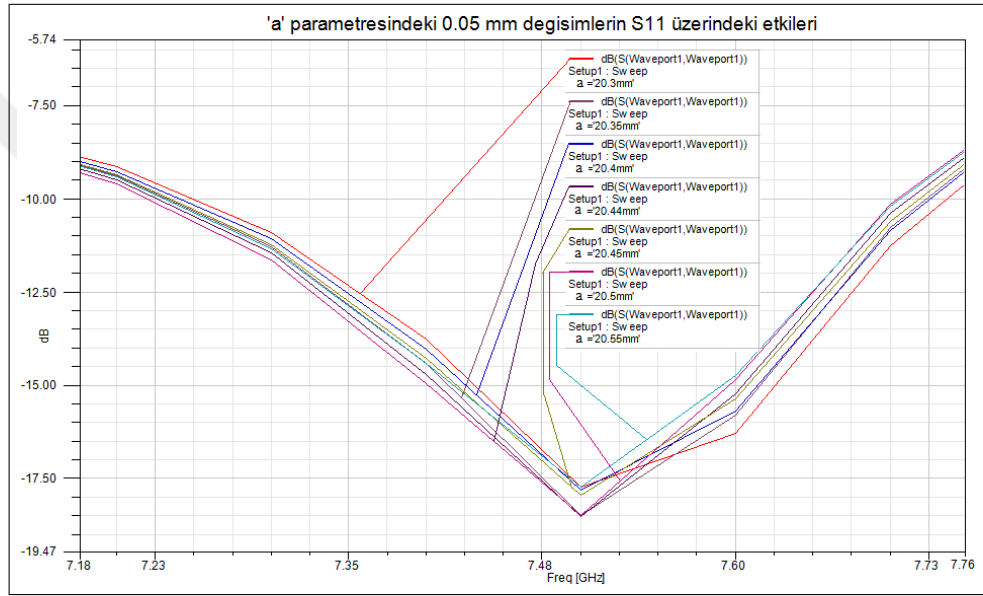
Şekil 4.18. Anten 2 tasarımına ait ölçüler

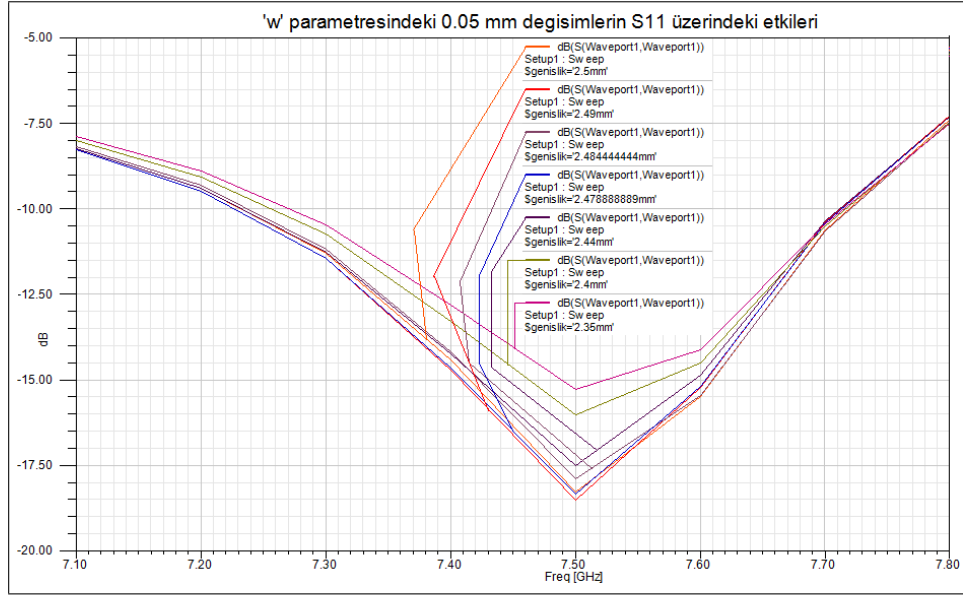
Tüm antenler için Simülasyon sonuçlarının olumlu olduğu görüldükten sonra ADYA tipinde özel tasarlanan antenlerin üretilmesi aşamasına geçilmiştir



4.4. Üretim Süreci

Dielektrik taban malzemesinin FR4 olarak seçilmesi sayesinde, baskı devre teknolojisi kullanarak antenleri üretmek mümkün olmuştur. Ancak, antenlerin performanslarının, geometrik boyutlardaki değişimlere karşı oldukça hassas olması nedeniyle optimizasyon sonucu hesaplanan değerlere olabildiğince yakın şekilde üretilmeleri gerekmektedir. Zira simülasyon safhasında, anten parametrelerindeki küçük oynamaların anten performansı üzerinde büyük etkiler meydana getirebileceği gözlemlenmiştir (Şekil 4.22, 4.23 ve 4.24).

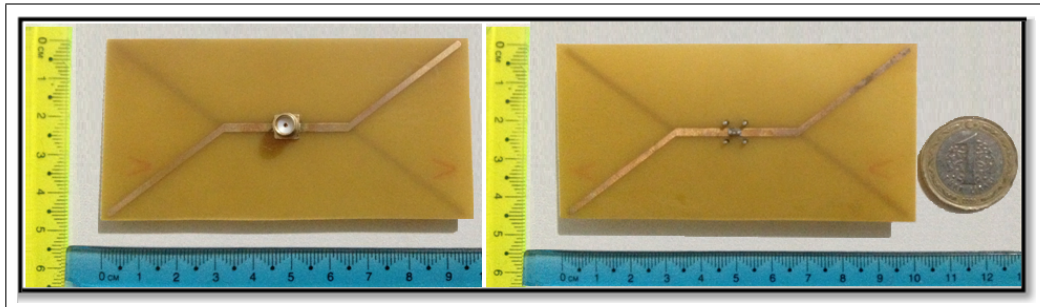




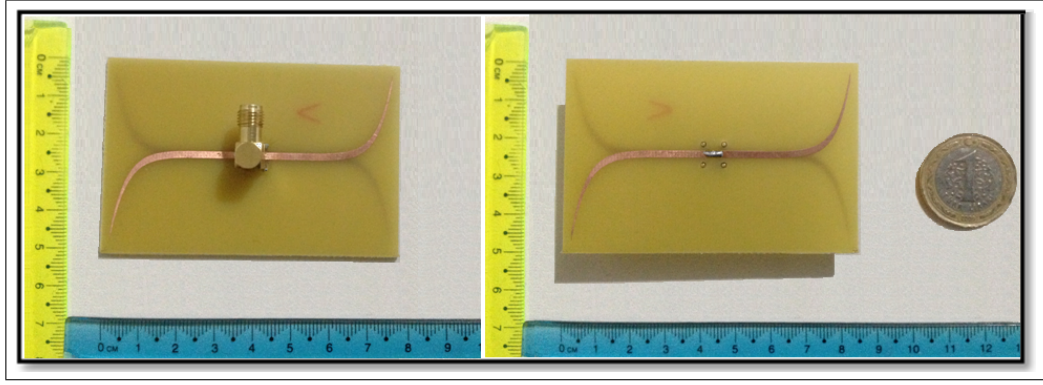
Şekil 4.24. w parametresindeki 0.05 mm değişimlerin S₁₁ zerindeki etkileri

Görüldüğü üzere, a , b , w parametrelerindeki milimetrenin yirmide biri kadar oynamalar, $S_{11}(dB)$ değerini 1-3 dB kadar etkileyebilmektedir. Bu nedenle hassas üretim yapabilen CNC makineler kullanılarak baskı devre üretiminin gerçekleştirilmesine karar verilmiştir.

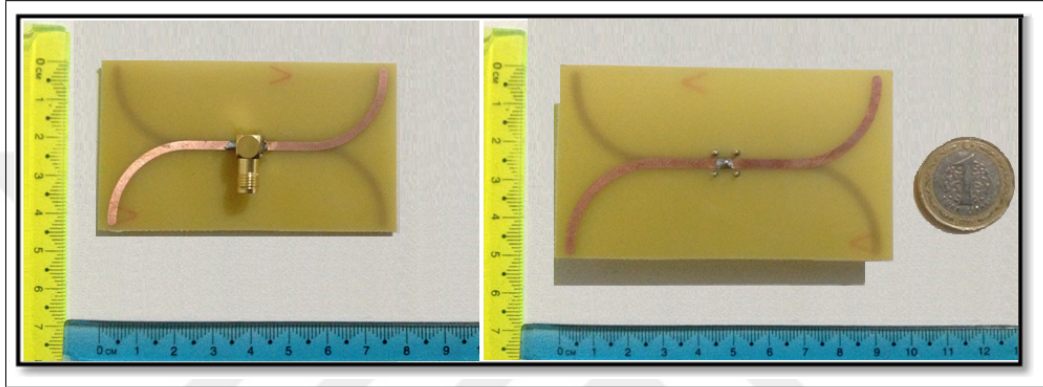
HFSS ile simülasyonu ve analizi yapılan antenlerin, CNC makinalı baskı devre üreticilerin kullandığı “GERBER” dosya formatına dönüştürülmesinde de bazı zorluklar yaşanmıştır. HFSS, GERBER formatında sonuç üretememektedir. Bu nedenle, ara dönüşüm yöntemleri izlenmiştir. nce AUTOCAD yazılımının kullandığı dwg formatına çevrilmiş, sonra dosya içinde elle düzeltmeler yapılmış ve en son olarak Altium programında bu AUTOCAD doyası kullanılarak GERBER dosyaları üretilmiştir. Gönderilen GERBER dosyaları üzerinden firmalarla görüşülmüş ve antenlerin anlaşılması sağlanmış, delik konumları ve nasıl yerleştirilecekleri anlatılmıştır. Sonuçta istenen özelliklerde antenlerin imalatı tamamlanmış olup antenlere ait resimler aşağıda sunulmuştur.



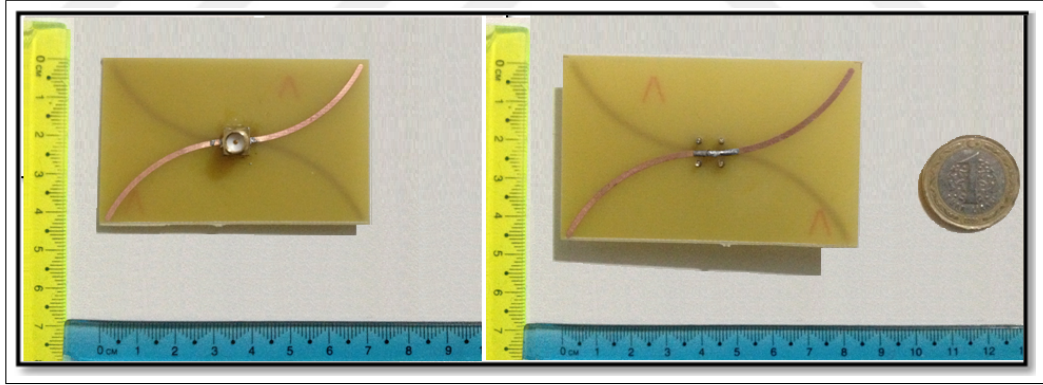
Şekil 4.25. Anten 1 üretilmiş hali



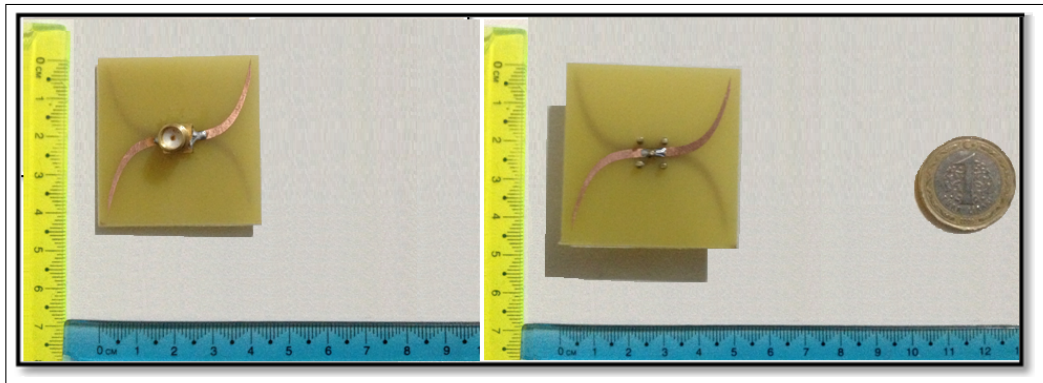
Şekil 4.26. Anten 2 üretilmiş hali



Şekil 4.27. Anten 3 üretilmiş hali



Şekil 4.28. Anten 4 üretilmiş hali

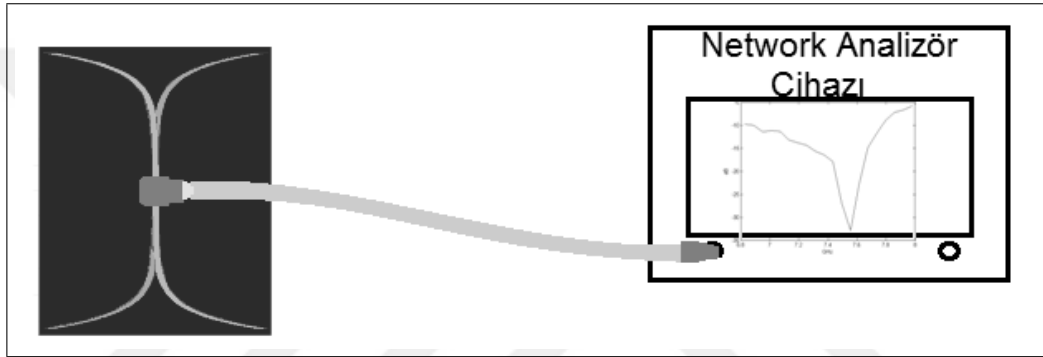


Şekil 4.29. Anten 5 üretilmiş hali

4.5. Deneysel ölçümler ve simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırma

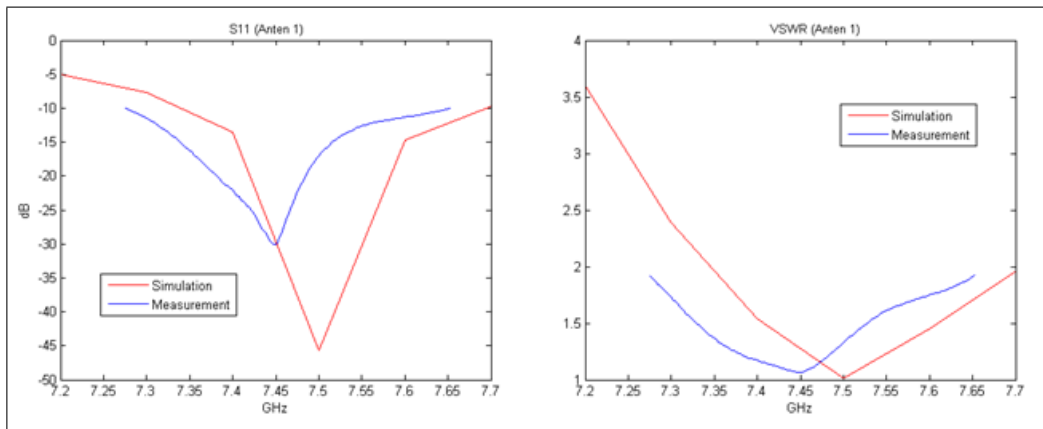
Ölçümlerde, laboratuvardaki mevcut deneysel düzenek kullanılarak, antenlerin dönüş kaybı $S_{11}(dB)$ ve duran dalga oranı (VSWR) değerleri incelenebilmiştir. Böylece, 50Ω değerindeki koaksiyel besleme ile antenler arasındaki uyumun frekans değiştiğinde nasıl değiştiğine bakılmıştır.

Dönüş kaybı ve duran dalga oranlarını ölçebilmek için Network Analizör cihazı kullanılmış olup gereken deneysel düzenek Şekil 4.30’da gösterilmiştir.

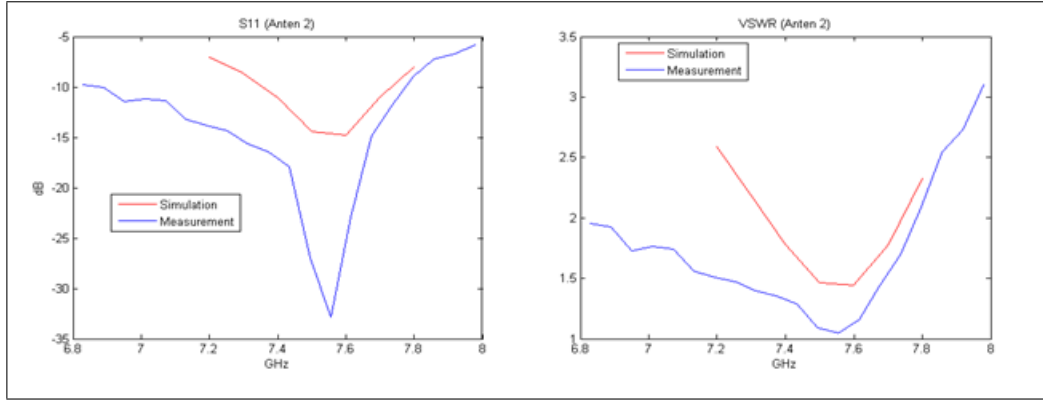


Şekil 4.30. Anten ölçümü için kullanılan deneysel düzenek

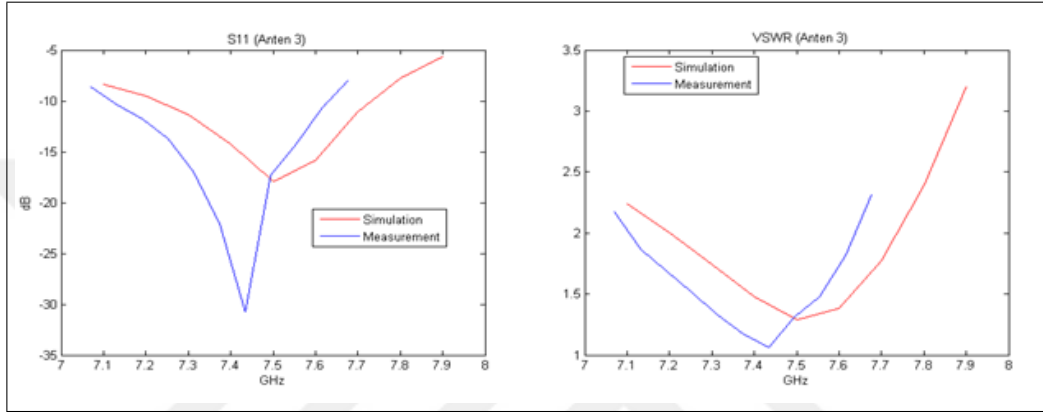
Antenler sırayla Network analizör cihazının tek bir portuna bağlanmış olup S_{11} için dB olarak, VSWR için de bir oran olarak ölçümler yapılmıştır. HFSS programında tasarlanan antenlere ait Simülasyon sonuçları ile deneysel ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması aşağıda sunulmuştur.



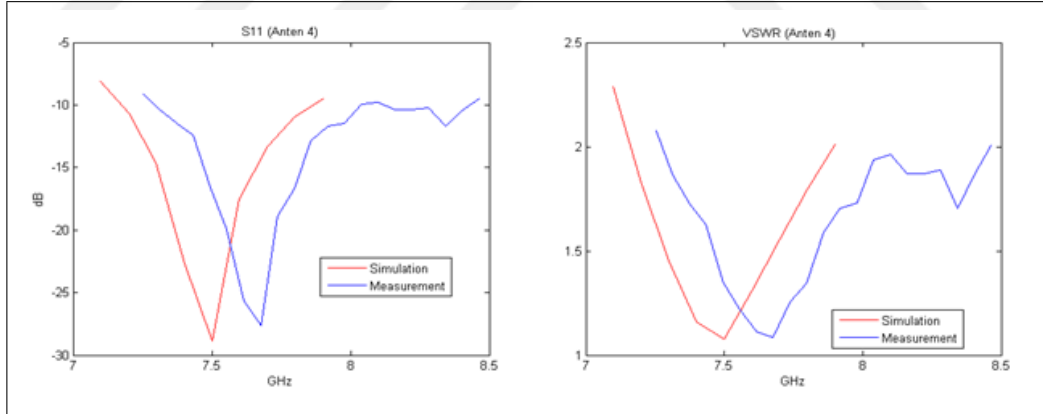
Şekil 4.31. Anten 1 için simülasyon ile deneysel ölçümlerin karşılaştırılması



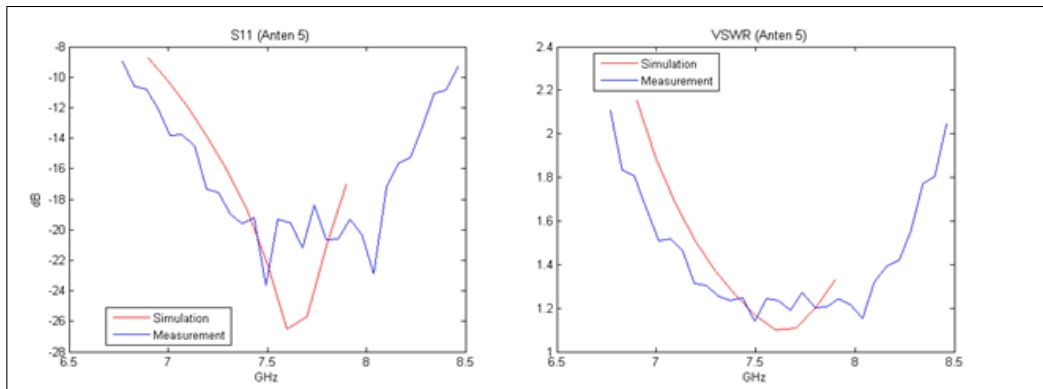
Şekil 4.32. Anten 2 için simülasyon ile deneysel ölçümlerin karşılaştırılması



Şekil 4.33. Anten 3 için simülasyon ile deneysel ölçümlerin karşılaştırılması

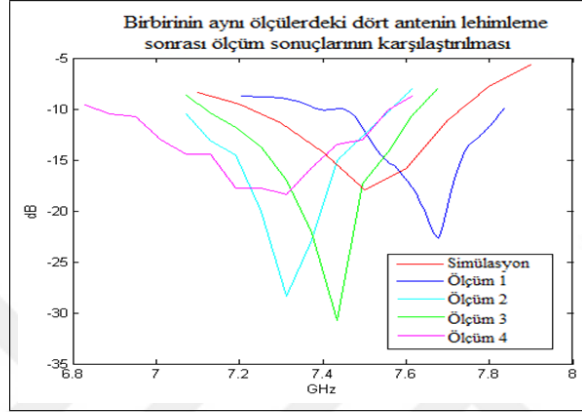


Şekil 4.34. Anten 4 için simülasyon ile deneysel ölçümlerin karşılaştırılması



Şekil 4.35. Anten 5 için simülasyon ile deneysel ölçümlerin karşılaştırılması

Üretim yüksek hassasiyetle yapılmış olsa da sonuçları etkileyebilecek bir başka faktör de lehimlemedir. Lehimleme sırasında, fazla lehim bulaşması nedeniyle SMA konnektörlerin bacakları arasındaki mesafe azalmış olmaktadır. Bu durumda hatasız olarak tasarlanan ve üretilen bir antenin en düşük $S_{11}(dB)$ değeri 7500 MHz frekansında olmayacaktır. Örneğin Şekil 4.36'da görüleceği üzere, birbirinin aynı ölçülerde dört adet anten üretilmiş ancak elle lehimleme sonrası yapılan ölçümlerde dört farklı merkez frekans olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.36. Bire bir aynı dört antenin lehimleme sonrası karşılaştırılması

Tasarımlar sonucunda üretilen beş antene ait fiziksel parametreler, boyutlar ve deneysel ölçüm sonuçlarına ait özet, Çizelge 4.9 olarak sunulmuştur.

Çizelge 4.9. Deneysel sonuçlara ait özet çizelgesi

	Anten 1	Anten 2	Anten 3	Anten 4	Anten 5
a (mm)	29.26	17.85	20.44	31.63	16.09
b (mm)	22.03	19.68	21.21	19.11	14.53
Genişlik-w (mm)	1.807	1.91	2.49	1.49	1.98
Genişlik-Besleme (mm)	2.262	1.91	2.49	-	-
Toplam En (mm)	48.866	46.628	44.726	41.096	37.382
Toplam Boy (mm)	94.134	71.52	77.86	66.24	36.14
Yüzey Alanı (mm ²)	4600	3335	3482	2722	1351
Küçülme Oranı (%)	0	24.3	27.5	40.83	70.6
Alt frekans (MHz)	7270	6830	7100	7280	6830
Üst frekans (MHz)	7650	7780	7620	8430	8400
Merkez Frekansı (MHz)	7448	7550	7434	7.676	7494
Band Genişliği (MHz)	380	950	520	1150	1570

5. SONUÇLAR, DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Tez çalışmasında X-Band Uydu Haberleşmesinde ve 7250 – 7750 MHz (SATCOM) frekans bölgesinde kullanılmak amacıyla piyasada veya laboratuvarındaki mevcut ekipmanlarla kolayca üretilebilen hafif ve küçük boyutlu mikroşerit anten tasarımları hedeflenmiştir. Bu amaçla, Açıklığı Daralan Yarık Anten (ADYA) tipi üzerinde üç daralma profili baz alınarak beş farklı tipte anten tasarlanmıştır. Bunlar; “Mikroşerit Hat İlaveli ve Mikroşerit Hat İlavesiz Dual Eksponansiyel Daralma”, “Mikroşerit Hat İlaveli ve Mikroşerit Hat İlavesiz Dual Dairesel Daralma” ve “Mikroşerit Hat İlaveli Dual Doğrusal Daralma” profilleridir. Tüm antenlerin HFSS yazılımı kullanılarak tasarımları ve analizleri yapılmıştır. Antenlerin tasarım parametrelerini belirlemek amacıyla, öncelikle metasezgisel yöntemlerden biri olan Genetik Algoritma kullanılarak ve birey sayısı / nesil sayısı ile optimizasyon süresi arasında denge gözetilerek optimizasyonları yapılmış; daha sonra da elde edilen optimum parametrelerle tasarımları gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon için HFSS yazılımının Optimetrics fonksiyonu kullanılmıştır. Tasarlanan antenler imal edilerek deneysel ölçümleri yapılmış ve bu ölçümlerle simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır.

Bulgular incelendiğinde, HFSS simülasyonlarının ölçümler ile benzerlik gösterdiği ve iyi sonuçlar alındığı, bir miktar frekansta kayma olsa da, genel karakteristik özelliklerinin benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, konnektör lehim bağlantılarının sonuçlar üzerinde büyük etkiler yaptığı görülmüştür.

Ölçümlerinin özel ortam gerektirmesi nedeniyle anten kazancı ve ışıma verimliliği ölçülememiştir. Ancak simülasyon hesaplamalarının deneysel ölçümlerle tutarlı olması, üretilen antenlerin X-Band bölgesi uydu

haberleşmesinde alıcı antenler olarak kullanılma potansiyelleri olduğu anlaşılmış ve tespit edilmiştir. Minimal boyutlarda olmaları ile uçak, İHA, füze, roket ve benzeri hava/uzay platformlarında kullanımlarının mümkün oldukları değerlendirilmektedir.

NASA tarafından Space Technologies (ST) 5 programında, X-Band Uydu Haberleşme alanında kullanılmak üzere Genetik Algoritma ile optimize edilerek tasarlanan heliks tipi anten (Lohn ve dig., 2003; Hornby ve dig., 2006) ile karşılaştırıldığında, bu tezde daha iyi duran dalga oranları elde edildiği; kazanç ve çalışma frekans aralığı açısından bakıldığında benzer sonuçlara ulaşıldığı; hafiflik ve küçüklük açısından bakıldığında ise çok daha hafif ve küçük boyutlarda antenler üretildiği görülmüştür. Halihazırda kullanılmakta olan büyük hacimli ve ağır çanak antenlerle kıyaslandığında ise oldukça küçük ve hafif oldukları görülmektedir (Şekil 4.25– 4.29).

Üretilen antenler birbirleriyle performansları açısından kıyaslandıklarında, bandgenişlikleri, kazançları, ışıma desenleri, ışıma verimleri ve boyutları başlıkları altında incelenebilir. Beş anten arasından en yüksek bandgenişliğinin, 1570 MHz ile mikroşerit hat ilavesiz açıklığı dual eksponansiyel daralan antende (Çizelge 4.9); en düşük bandgenişliğinin ise 380 MHz ile açıklığı doğrusal daralan antende olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 4.9).

Anten kazancı açısından incelendiğinde ise, 7.5 GHz frekansında en yüksek kazancın 7.5 dBi ile açıklığı doğrusal daralan antende olduğu (Şekil 4.8); en düşük kazancın ise 4.96 dBi ile mikroşerit hat ilavesiz açıklığı dual eksponansiyel daralan antende (Şekil 4.16) olduğu anlaşılmaktadır. Ancak, tüm frekanslar dahil edilirse en büyük kazanç değerinin 7.6 dBi ile mikroşerit hat ilavesiz açıklığı dairesel daralan antende olduğu (Şekil 4.14) sonucuna varılabilir.

İşıma desenleri karşılaştırıldığında, mikroşerit hat ilaveli açıklığı doğrusal daralan anten, mikroşerit hat ilavesiz açıklığı dairesel daralan anten ve mikroşerit hat ilavesiz açıklığı eksponansiyel daralan anten için merkez kulakçıklarının açıklık yönünde ve tek bir kulakçık olarak oluştuğu görülmektedir (Şekil 4.8, Şekil 4.14, Şekil 4.16). Mikroşerit hat ilaveli açıklığı dairesel daralan anten ve mikroşerit hat ilaveli açıklığı eksponansiyel daralan anten için ise çoklu

kulakçık oluşmuş durumdadır (Şekil 4.12, Şekil 4.10).

Işıma verimleri açısından bakıldığında, en yüksek ışıma verimi olan antenin %91 gibi büyük bir oran ile mikroşerit hat ilavesiz açıklığı eksponansiyel daralan anten olduğu görülmektedir (Şekil 4.16). Tüm frekans bölgesinde en düşük değerli ışıma verimine sahip olan anten ise mikroşerit hat ilaveli açıklığı doğrusal daralan antendir (%66, Şekil 4.8). Sonuç olarak, tüm antenlerin 7250 – 7750 MHz frekans bölgesinde %66 ve daha fazla olacak şekilde ışıma verimi olduğu, simülasyon sonuçlarında görülmektedir.

Anten boyutları açısından karşılaştırma, antenlerin yüzey alanları üzerinden yapılmıştır. Antenler dikdörtgensel yapıda olduklarından, basitçe en-boy çarpımı ile hesaplanmıştır. Karşılaştırma için en büyük yüzey alanına sahip olan mikroşerit hat ilaveli açıklığı doğrusal daralan yarık anten alanı baz alınmıştır. Mikroşerit hat ilaveli olan antenler, diğer antenlere göre dezavantajlı durumdadır. Bu nedenle, karşılaştırmaları mikroşerit hat ilaveli ve mikroşerit hat ilavesiz olarak ikiye ayırmak daha doğru olacaktır. Ancak her iki grup için de en küçük yüzey alanına sahip olanların hep eksponansiyel daralma profiline sahip olan antenler olduğu görülmektedir. Anten fiziksel parametreleri ve boyutları özet olarak Çizelge 4.9’de verilmiştir.

5.2. Değerlendirme

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, optimizasyon ile tasarlanan antenlerin X-band uydu haberleşmesi alıcı frekans bantları içinde oldukları görülmüştür. Ancak bu antenlerden sadece eksponansiyel daralmaya sahip olanların, 7250 – 7750 MHz frekans bandını tümüyle kapsadığı görülmektedir. Diğer antenlerin de oldukça büyük bir ölçüde bu hedeflenen aralık içerisinde oldukları; bununla birlikte, TÜRK SAT 2A gibi bazı uyduların X-Band transponder frekanslarını kapsadıkları söylenebilir.

Tasarlanan antenlerin performanslarını artırmaya yönelik olarak, frekans kriteri dışında dört kriter daha belirlenmiştir. Bunlar, üretilen antenin çalışma frekans bölgesinde

- a. Dönüş kaybı, $S_{11}(dB)$ değerinin, -10 dB veya daha aşağı olması;
- b. Duran dalga oranının (Voltage Standing Wave Ratio) 2 den aşağı olması;
- c. Işıma veriminin (Radiation Efficiency) %60 veya daha fazla olması;
- ç. Maksimum kazancın 4.5 dB veya daha fazla olması şeklindedir.

Bununla beraber, ilk simülasyon sonuçları değerlendirildiğinde, dönüş kaybı $S_{11}(dB)$ ile ilgili kriterin, diğer kriterleri geride bıraktığı ve birinci kriteri sağlayan tasarımların diğer kriterleri de sağladığı gözlemlenmiştir. Bu gözlem üzerine, ana tasarım hedefi olarak, yüksek bantgenişliği için dönüş kaybının -10 dB veya daha düşük değerli olması seçilmiştir. Diğer tasarım hedeflerinin ise antenlerin performanslarının değerlendirilmesi aşamasında bu kriterleri sağladıkları gözlemlenmiştir.

Simülasyon sırasında, anten parametrelerindeki küçük oynamaların anten performansı üzerinde büyük etkiler meydana getirebileceği gözlemlenmiştir. Şekil (4.22, 4.23 ve 4.24)'de görülebileceği üzere a , b , w parametreleri için milimetrenin yirmide biri kadar oynamalar oluşturulmuş ve $S_{11}(dB)$ grafiği üzerinde nasıl bir etki oluşturduğu incelenmiştir. Özellikle w parametre değerindeki oynamaların $S_{11}(dB)$ ölçümleri üzerinde 3 dB kadar değişim yaratabildiği tespit edilmiştir.

Bu nedenle üretilen antenlerin, simülasyonu yapılan antenlerle bire bir aynı olabilmesi için üretimde CNC makinalar kullanılarak yüksek hassasiyetle üretim hedeflenmiştir. Bununla beraber yine de bazı antenler için en düşük $S_{11}(dB)$ değerlerinin 7500 MHz frekansında olmadığı görülmüştür. Bunun temel nedeninin lehimleme işleminde yapıldığı düşünülen küçük hatalar olduğu söylenebilir. Çünkü, Şekil 4.36'da görüleceği üzere, birbirinin aynı ölçülerde dört adet anten üretilmiş ancak elle lehimleme sonrası yapılan ölçümlerde dört farklı merkez frekans olduğu tespit edilmiştir. Fakat bütün bunlara rağmen, üretilen antenlerle tez çalışmasında amaçlanan sonuçlara ulaşıldığı ve sonuçların oldukça ümit vadeci olduğu değerlendirilmektedir.

Mikroşerit hattın yarık hattına geçiş için, SMA konnektörün iki tarafında yarım halka şeklinde parçalar içeren yeni bir teknik kullanılmıştır. Klasik yöntemle beslenen ADYA tipi antenler, yüzeylerine paralel olacak şekilde yan

kenarlarından beslenmektedirler. Bu çalışmada ise farklı bir besleme mekanizması uygulanmış ve antenler yüzeye dik olacak şekilde beslenmiştir. Aerodinamik kriterlerin öne çıktığı platformlarda kullanılmak üzere üretilen antenlerin, bu yaklaşım ile platformların yüzeylerine uyumlu bir şekilde yerleştirilmeleri sağlanmıştır. Antenlerin simetrik yapıları ve yeni geliştirilen yarım halka şeklindeki bu parçalar ile etkin bir geçiş sağlanmıştır.

Hem simülasyon sonuçları, hem de deneysel ölçüm sonuçları incelendiğinde, besleme için yeni önerilen yarım halka şeklinde parçaların, başarılı oldukları değerlendirilmektedir. Bununla beraber, SMA konnektörün anten bağlantısında bu parçaların, uçlarında lehimleme için daha fazla alan oluşturma suretiyle daha da geliştirilmeye açık olduğu ve başka çalışmalarda da kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Çünkü, üretilen antenlerdeki deliklere SMA konnektörlerin lehimlenmesi sırasında güçlüklerle karşılaşılmıştır. SMA konnektörün orta bacağı bir yüzdeki iletkenle lehimlenirken, dıştaki dört bacak diğer yüzdeki iletkenle lehimlenmektedir. Ancak, yarım halka şekilli parçaların uçlarında yeterince büyük iletken bırakılmadığından, antenin altında kalmış ve bir yüzü lehimledikten sonra diğer yüzü lehimlerken ya kısa devreye ya da fazla lehim bulaşmasına yol açarak, antenin tasarlandığından farklı davranmasına sebep olmuştur.

Bulgular incelendiğinde, HFSS simülasyonlarının ölçümler ile benzerlik gösterdiği ve iyi sonuçlar alındığı; bir miktar frekansta kayma olsa da, genel karakteristik özelliklerinin benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, konnektör lehim bağlantılarının sonuçlar üzerinde büyük etkileri olduğu görülmüştür. Aynı anten tipinden birden fazla sipariş verilmiş ve bu antenlere aynı SMA montajı yapılmıştır. Fakat ölçümlerde dönüş kaybı performanslarının kimisinin beklendiği şekilde, kimisinin de beklenin çok altında oldukları görülmüştür. Lehimlemenin performans üzerinde çok etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Tasarım sırasında bu durum öngörülmediğinden, besleme için kullanılan ve özgün tasarım olan yarım halka şeklindeki parçaların uç kısımlarındaki iletkenlerin daha büyük olması gerektiği anlaşılmıştır. Ancak, yeni anten üretimine başvurmadan, eldeki antenlerin lehimlenmesi için yeni bir yöntemle başvurulmuştur. Bunun için sıvı lehim kullanılmış ve antenler fırınlanmıştır. SMA konnektörlerin monte edileceği delikler civarına macun

kıvamında sıvı lehim bulaştırılmış ve SMA konnektörler yerleştirilmiştir. Daha sonra antenlerin ve SMA konnektörlerin ısıdan etkilenmeyeceği değerlendirildiğinden özel baskı devre fırınlarına verilmiştir. Sonuçta üretilen antenler ölçüldüğünde de, bu yöntemin başarılı olduğu gözlemlenmiştir.

Tez çalışmasında, ölçümlerinin özel ortam gerektirmesi nedeniyle anten kazancı ve ışıma verimliliği ölçülememiştir. Ancak simülasyon hesaplamalarının deneysel ölçümlerle tutarlı oldukları değerlendirildiğinden, üretilen antenlerin X-Band bölgesi uydu haberleşmesinde kullanılabilecek alıcı antenler olarak kullanılma potansiyelleri bulunmaktadır. Halihazırda kullanımda olan büyük hacimli ve ağır antenlerle kıyaslandığında oldukça küçük ve hafif oldukları görülmektedir.

Ayrıca, üretilen antenler, konvansiyonel SATCOM alıcı antenlerine göre oldukça küçük, hafif ve çok daha düşük maliyetlidir. Söz konusu antenlerin küçük boyutlu ve hafif oluşları sayesinde İHA veya benzeri hava platformlarında kullanılabilecekleri değerlendirilmektedir.

5.3. Öneriler

Bu tezde tek başına antenler şeklinde uygulamalar yapılmış ve her bir antene ait sonuçlar sunulmuştur. Bu çalışmaların devamı olarak, incelenen bu antenlerden anten dizileri üretmek suretiyle ışıma deseni açısından da performansın artırılmasının mümkün olabileceği değerlendirilmektedir.

Bu tezde izlenen yaklaşım ile, 5G gibi, diğer frekans bölgelerinde çalışabilecek ADYA tipi antenler tasarlamının mümkün olabileceği ve izlenen yöntemlerin diğer mobil haberleşme alanlarındaki araştırmalara da referans olabileceği düşünülmektedir.

Bunun dışında metasezgisel optimizasyon algoritmalarından Genetik Algoritma dışındaki algoritmalar ile de optimizasyon yapılması mümkündür. HFSS yazılımının MATLAB kodlarını destekleme özelliği sayesinde, yeni geliştirilecek olan özgün bir optimizasyon algoritması ile anten performansını artırmaya yönelik optimizasyon yapılabileceği değerlendirilmektedir.

Bu çalışmanın ileriki safhası olarak farklı dielektrik taban malzemeleri kullanarak, performansın daha da artırılması mümkün olabilecektir. Esneyebilen malzemeler kullanarak, uzay araçları veya diğeri hava platformlarının kıvrımlı yüzeylerine uyumlu olarak monte edilebilen antenler tasarlanması da mümkündür.



KAYNAKLAR

- Adamiuk, G., Zwick, T., ve Wiesbeck, W. (2008). Dual-orthogonal polarized vivaldi antenna for ultra wideband applications. In *XVII International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications*, s. 282–285.
- Al-Jibouri, B. (2005). Applications of the genetic algorithms optimisation approach in the design of circular polarised microstrip antennas.
- Bayat, A. ve Mirzakhani, R. (2012). A parametric study and design of the balanced antipodal vivaldi antenna (bava. In *PIERS Proceedings, August 19-23, Moscow, RUSSIA 2012*, s. 778–782. JPIER.
- Benalla, A. ve Gupta, K. C. (1988). Multiport network model and transmission characteristics of two-port rectangular microstrip patch antennas. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 36(10):1337–1342.
- Bersini, H. ve Varela, F. J. (1990). Hints for adaptive problem solving gleaned from immune networks. In *International Conference on Parallel Problem Solving from Nature*, s. 343–354. Springer.
- Bhunia, S. (2013). Microstrip patch antenna's limitation and some remedies. *International Journal of Electronics & Communication Technology*, 4.
- Blum, C. ve Roli, A. (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 35(3):268–308.
- Byron, E. (1972). A new flush mounted antenna element for phased array application. *Phased array antennas*, s. 187–192.
- Che, Y., Li, K., Hou, X., ve Tian, W. (2010). Simulation of a small sized antipodal vivaldi antenna for uwb applications. In *2010 IEEE International Conference on Ultra-Wideband*, volume 1, s. 1–3. IEEE.

- Colorni, A., Dorigo, M., ve Maniezzo, V. (1991). Distributed optimization by ant colonies. In *Proceedings of the first European conference on artificial life*, volume 142, s. 134–142. Paris, France.
- Commission, F. C. ve others (2002). First order and report: Revision of part 15 of the commission's rules regarding uwb transmission systems.
- Courant, R. (1943). Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 49(1):1–23.
- De Castro, L. N. ve Von Zuben, F. J. (2000). The clonal selection algorithm with engineering applications. In *Proceedings of GECCO*, volume 2000, s. 36–39.
- Derneryd, A. (1976). Linearly polarized microstrip antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 24(6):846–851.
- Derneryd, A. (1978). A theoretical investigation of the rectangular microstrip antenna element. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 26(4):532–535.
- Derneryd, A. G. (1975). *Linear microstrip array antennas*.
- Deschamps, G. A. (1953). Microstrip microwave antennas. In *3rd USAF Symposium on Antennas*, s. 22–26.
- Dorigo, M. (1992). Optimization, learning and natural algorithms. *Ph. D. Thesis, Politecnico di Milano, Italy*.
- Dorigo, M. ve Gambardella, L. M. (1997). Ant colonies for the travelling salesman problem. *BioSystems*, 43(2):73–81.
- Eglese, R. (1990). Simulated annealing: a tool for operational research. *European journal of operational research*, 46(3):271–281.

- Ekstroem, H., Gearhart, S., Acharya, P., Dave, H., Rebeiz, G., Jacobsson, S., Kollberg, E., ve Chin, G. (1992). Slot-line end-fire antennas for thz frequencies.
- Erdogan, Y. (2009). Parametric study and design of vivaldi antennas and arrays.
- Farmer, J. D., Packard, N. H., ve Perelson, A. S. (1986). The immune system, adaptation, and machine learning. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 22(1):187–204.
- Fisher, J. (2000). Design and performance analysis of a 1-40ghz ultra-wideband antipodal vivaldi antenna. In *Proceedings of the German Radar Symposium GRS*, s. 237–241.
- Fisher, J. J. (2006). Vivaldi antenna. US Patent 7,088,300.
- Garg, R., Bhartia, P., ve Ittipiboon, A. (2001). *Microstrip antenna design handbook*. Boston (Mass.) : Artech house.
- Garvin, C., Munson, R., Ostwald, L., ve Schroeder, K. (1975). Low profile, electrically small missile base mounted microstrip antennas. In *Antennas and Propagation Society International Symposium, 1975*, s. 244–247. IEEE.
- Gazit, E. (1988). Improved design of the vivaldi antenna. In *IEE Proceedings H-Microwaves, Antennas and Propagation*, volume 135, s. 89–92. IET.
- Geem, Z. W., Kim, J. H., ve Loganathan, G. (2001). A new heuristic optimization algorithm: harmony search. *Simulation*, 76(2):60–68.
- Gibson, P. (1979). The vivaldi aerial. In *Microwave Conference, 1979. 9th European*, s. 101–105. IEEE.
- Glover, F. (1977). Heuristics for integer programming using surrogate constraints. *Decision Sciences*, 8(1):156–166.
- Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial

- intelligence. *Computers & operations research*, 13(5):533–549.
- Glover, F. ve Laguna, M. (1997). Tabu search. *Kluwer Academic Publishers*.
- Gültekin, S. S., Güney, K., ve Sağiroğlu, S. Neural networks for the calculation of bandwidth of rectangular microstrip antennas. Technical report, DTIC.
- Güney, K. ve Gültekin, S. (2007). A comparative study of neural networks for input resistance computation of electrically thin and thick rectangular microstrip antennas. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 52(5):483–492.
- Greenberg, M. C., Virga, K. L., ve Hammond, C. L. (2003). Performance characteristics of the dual exponentially tapered slot antenna (detsa) for wireless communications applications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 52(2):305–312.
- Grosan, C., Abraham, A., ve Chis, M. (2006). Swarm intelligence in data mining. In *Swarm Intelligence in Data Mining*, s. 1–20. Springer.
- Guha, D. ve Antar, Y. M. (2011). *Microstrip and printed antennas: new trends, techniques and applications*. John Wiley & Sons.
- Gutton, H. ve Baissinot, G. (1955). Flat aerial for ultra high frequencies. *French patent*, 703113.
- Haddad, O. B., Afshar, A., ve Mariño, M. A. (2006). Honey-bees mating optimization (hbmo) algorithm: a new heuristic approach for water resources optimization. *water resources management*, 20(5):661–680.
- Hao, Z. C., Hong, W., Chen, J., Chen, X., ve Wu, K. (2005). A novel feeding technique for antipodal linearly tapered slot antenna array. In *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, volume 3, s. 1641–1643. Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Harrington, R. (1968). Field computation by moment methods.

- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. U Michigan Press.
- Hood, A. Z., Karacolak, T., ve Topsakal, E. (2008). A small antipodal vivaldi antenna for ultrawide-band applications. *IEEE Antennas and Wireless propagation letters*, (7):656–660.
- Hornby, G. S., Globus, A., Linden, D. S., ve Lohn, J. D. (2006). Automated antenna design with evolutionary algorithms. In *AIAA Space*, s. 19–21.
- Howell, J. Q. (1972). Microstrip antennas. In *Antennas and Propagation Society International Symposium, 1972. AP-G. Digest*, s. 177–180.
- Howell, J. Q. (1975). Microstrip antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 23(1):90–93.
- In, D.-M., Pyo, S., Lee, H.-S., Lee, M.-J., ve Kim, Y.-S. (2010). Antipodal linearly tapered slot antenna using unequal half-circular slotted sides for gain improvements. In *2010 Asia-Pacific Microwave Conference*, s. 2036–2039. IEEE.
- James, J. ve Wilson, G. (1975). New design techniques for microstrip antenna arrays. In *Microwave Conference, 1975. 5th European*, s. 102–106. IEEE.
- Johansson, J. F. (1989). A moment method analysis of linearly tapered slot antennas. In *Antennas and Propagation Society International Symposium, 1989. AP-S. Digest*, s. 383–386. IEEE.
- Jolani, F., Dadashzadeh, G. R., Naser-Moghadasi, M., ve Dadgarpour, A. M. (2009). Design and optimization of compact balanced antipodal vivaldi antenna. *Progress In Electromagnetics Research C*, 9:183–192.
- Jordan, J. L., Ponchak, G. E., Tavassolian, N., ve Tentzeris, M. M. (2007). Characteristics of a linearly tapered slot antenna (ltsa) conformed longitudinally around a cylinder. In *2007 IEEE Antennas and Propagation*

Society International Symposium, s. 3848–3851. IEEE.

Karaboga, D. (2005). An idea based on honey bee swarm for numerical optimization. Technical report, Technical report-tr06, Erciyes university, engineering faculty, computer engineering department.

Karaboga, D. ve Basturk, B. (2007). Artificial bee colony (abc) optimization algorithm for solving constrained optimization problems. In *International Fuzzy Systems Association World Congress*, s. 789–798. Springer.

Karaboga, D. ve Basturk, B. (2008). On the performance of artificial bee colony (abc) algorithm. *Applied soft computing*, 8(1):687–697.

Karaboga, D. ve Ozturk, C. (2011). A novel clustering approach: Artificial bee colony (abc) algorithm. *Applied soft computing*, 11(1):652–657.

Kennedy, J. ve Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. In *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on*, s. 1942–1948. IEEE.

Köfksal, A. ve Kauffman, J. F. (1993). Analysis of linearly tapered slot antennas on a dielectric substrate. In *Antennas and Propagation Society International Symposium, 1993. AP-S. Digest*, s. 338–341. IEEE.

Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., ve Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *science*, 220(4598):671–680.

Köksal, A. ve Kauffman, F. (1991). Moment method analysis of linearly tapered slot antennas. In *Antennas and Propagation Society International Symposium, 1991. AP-S. Digest*, s. 314–317. IEEE.

Koza, J. R. (1992). *Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection*, volume 1. MIT press.

Krutsinger, J. ve Munson, R. (1973). Single slot cavity antenna assembly. US Patent 3,713,162.

- Langley, J., Hall, P., ve Newham, P. (1996). Balanced antipodal vivaldi antenna for wide bandwidth phased arrays. *IEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation*, 143(2):97–102.
- Lee, J. ve Livingston, S. (1993). Wide band bunny-ear radiating element. In *Antennas and Propagation Society International Symposium, 1993. AP-S. Digest*, s. 1604–1607. IEEE.
- Lekshmi, B. S. K. ve Raglend, I. J. (2015). Parametric study of tapered slot antenna for wideband applications. In *Computation of Power, Energy Information and Commuincation (ICCPEIC), 2015 International Conference on*, s. 0071–0077. IEEE.
- Lo, Y., Solomon, D., ve Richards, W. (1979). Theory and experiment on microstrip antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 27(2):137–145.
- Lohn, J. D., Hornby, G. S., Rodriguez-Arroyo, A., Linden, D. S., Kraus, W. F., ve Seufert, S. E. (2003). Evolutionary design of an x-band antenna for nasa's space technology 5 mission.
- Mallahzadeh, A. R. R., Oraizi, H., ve Davoodi-Rad, Z. (2008). Application of the invasive weed optimization technique for antenna configurations. *Progress In Electromagnetics Research*, 79:137–150.
- Mehrabian, A. R. ve Lucas, C. (2006). A novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization. *Ecological informatics*, 1(4):355–366.
- Milligan, T. A. (2005). *Modern antenna design*. John Wiley & Sons.
- Mohamed, I. ve Sebak, A. (2015). A 50-70 ghz siw-based linearly tapered slot antenna with low cross polarization. In *2015 IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB)*, s. 1–4. IEEE.
- Munson, R. (1974). Conformal microstrip antennas and microstrip phased arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 22:74–78.

- Nasraoui, O., Dasgupta, D., ve Gonzalez, F. (2002). The promise and challenges of artificial immune system based web usage mining: Preliminary results. In *workshop on Web Analytics at Second SIAM International Conference on Data Mining (SDM)*, Arlington, VA.
- Olyphant Jr, M. ve Nowicki, T. E. (1980). Microwave substrates support mic technology. *Microwaves Part 1*, 19:74–76.
- Oraizi, H. ve Jam, S. (2003). Optimum design of tapered slot antenna profile. *IEEE transactions on Antennas and Propagation*, 51(8):1987–1995.
- Passino, K. M. (2002). Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control. *IEEE control systems*, 22(3):52–67.
- Pham, D., Ghanbarzadeh, A., Koc, E., Otri, S., Rahim, S., ve Zaidi, M. (2005). The bees algorithm. tech. note. *Manufacturing Eng. Centre, Cardiff University, UK*.
- Prasad, S. ve Mahapatra, S. (1979). A novel mic slot-line antenna. In *Microwave Conference, 1979. 9th European*, s. 120–124. IEEE.
- Rocca, P., Oliveri, G., ve Massa, A. (2011). Differential evolution as applied to electromagnetics. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 53(1):38–49.
- Sanford, G. G. (1974). Conformal microstrip phased array for aircraft test with ats-6. In *National Electronics Conference, 30 th, Chicago, Ill, Proceedings*, volume 29, s. 252–257.
- Schantz, H. (2005). The art and science of ultrawideband antennas, norwood, ma, usa: Artech house.
- Schaubert, D., Kollberg, E., Korzeniowski, T., Thungren, T., Johansson, J., ve Yngvesson, K. (1985). Endfire tapered slot antennas on dielectric substrates. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 33(12):1392–1400.
- Schaubert, D. H. (1989). Radiation characteristics of linearly tapered slot

- antennas. In *Antennas and Propagation Society International Symposium, 1989. AP-S. Digest*, s. 1324–1327. IEEE.
- Sharma, P., Koul, S. K., ve Chandra, S. (2007). Broadband linearly tapered slot antenna with corrugated edges for phased array and multi-beam systems. In *2007 International workshop on Antenna Technology: Small and Smart Antennas Metamaterials and Applications*, s. 420–423. IEEE.
- Shin, J. ve Schaubert, D. H. (1999). A parameter study of stripline-fed vivaldi notch-antenna arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 47(5):879–886.
- Shuppert, B. (1988). Microstrip/slotline transitions: Modeling and experimental investigation. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 36(8):1272–1282.
- Simons, R., Lee, R., ve Perl, T. (1992a). New techniques for exciting linearly tapered slot antennas with coplanar waveguide. *Electronics Letters*, 28:620.
- Simons, R. N. ve Lee, R. Q. (1995). Linearly tapered slot antenna impedance characteristics. In *Antennas and Propagation Society International Symposium, 1995. AP-S. Digest*, volume 1, s. 170–173. IEEE.
- Simons, R. N., Lee, R. Q., ve Perl, T. D. (1992b). Nonplanar linearly tapered slot antenna with balanced microstrip feed.
- Southwick, E. ve Moritz, R. (1992). Bees as superorganisms: an evolutionary reality.
- Storn, R. ve Price, K. (1997). Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of global optimization*, 11(4):341–359.
- Tovey, C. (2004). Honey bee algorithm: a biologically inspired approach to internet server optimization. *Engineering Enterprise, Spring*, s. 13–15.

- Traut, G. (1980). Clad laminates of ptfе composites for microwave antennas. *Microwave journal*, 23:47–51.
- Weinschel, H. (1973). Progress report on development of microstrip cylindrical arrays for sounding rockets. *Physic. and Sci. Lab., New Mexico State Univ., Las Cruces*.
- Weinschel, H. (1975). A cylindrical array of a circularly polarized microstrip antenna. In *Antennas and Propagation Society International Symposium, 1975*, volume 13, s. 177–180. IEEE.
- Yang, X.-S. (2005). Engineering optimizations via nature-inspired virtual bee algorithms. In *International Work-Conference on the Interplay Between Natural and Artificial Computation*, s. 317–323. Springer.
- Yang, X.-S. (2008). Nature-inspired metaheuristic algorithms. *Luniver Press, Beckington, UK*.
- Yang, X.-S. ve Deb, S. (2009). Cuckoo search via lévy flights. In *Nature & Biologically Inspired Computing, 2009. NaBIC 2009. World Congress on*, s. 210–214. IEEE.
- Yang, X.-S. ve Deb, S. (2010). Engineering optimisation by cuckoo search. *International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation*, 1(4):330–343.
- Yang, Y., Wang, Y., ve Fathy, A. E. (2008). Design of compact vivaldi antenna arrays for uwb see through wall applications. *Progress In Electromagnetics Research*, 82:401–418.
- Yee, K. S. (1966). Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell’s equations in isotropic media. *IEEE Trans. Antennas Propag*, 14(3):302–307.
- Yu, X. ve Gen, M. (2010). *Introduction to evolutionary algorithms*. Springer Science & Business Media.

- Zhang, F., Zhang, F.-S., Zhao, G., Lin, C., ve Jiao, Y.-C. (2011). A loaded wideband linearly tapered slot antenna with broad beamwidth. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 10:79–82.
- Zhang, Y. ve Brown, A. K. (2011). Bunny ear combline antennas for compact wide-band dual-polarized aperture array. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 59(8):3071–3075.
- Zhu, F., Gao, S., Ho, A. T., ve Brown, T. (2012). Compact size asymmetric linearly tapered slot antenna for portable ultra-wideband imaging radar system. In *Radar Systems (Radar 2012)*, *IET International Conference on* s. 1–4. IET.
- Zinieris, M., Sloan, R., ve Davis, L. (1998). A broadband microstrip-to-slot-line transition. *Microwave and Optical technology letters*, 18(5):339–342.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Emrah UĞURLU

Uyruğu : T.C.

Doğum Yeri ve Tarihi : Konya 1978

e-mail : eugurlu@rocketmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	Ankara Fen Lisesi	1996
Lisans	Yeditepe Üniversitesi	2001
Yüksek Lisans	Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü	2007

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2003	HvKK.lığı	Subay

UZMANLIK ALANI

Mikroşerit Antenler.

YABANCI DİLLER

YDS (95)

YAYINLAR

Emrah Uğurlu, S. Sinan Gültekin, Özgür Dündar, Dilek Uzer, The Effects of Variations in Rectangular Microstrip Antenna Parameters on The Agreement Between Experimental and Simulation Results, 12th Conference of Society for Electronics, Telecommunications, Automotion and Informatics (ETAI), 24-26 September 2015, Makedonya.

Dilek Uzer, S. Sinan Gültekin, Özgür Dündar, **Emrah Uğurlu**, Rabia Çalışkan, Bandwidth Enhancement of Equilateral Triangle Microstrip Patch Antenna with Slot Loading and Dielectric Superstrate, 2nd International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering, (ICCESEN-2015), 14-19 October 2015, Antalya-Turkey.

Dilek Uzer, S. Sinan Gültekin, Özgür Dündar, **Emrah Uğurlu**, Rabia Top, Bandwidth Enhancement of Equilateral Triangle Microstrip Patch Antenna with Slot Loading and Dielectric Superstrate, International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering (IJCESEN), Vol.2-No.1(2016) pp.1-5.