T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HIZLANDIRILMIŞ VEKİL MODEL TABANLI DİJİTAL İKİZ ile VİVALDİ ANTEN OPTİMİZASYONU

Enes BEYAZ

DANIŞMAN

Doç. Dr. Ahmet Arif ULUSLU

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı (Disiplinlerarası)

Savunma Teknolojileri, Tezli Yüksek Lisans Programı

Ocak, 2026

TEZ KABUL VE ONAYI

Enes BEYAZ tarafından, **Doç. Dr. Ahmet Arif ULUSLU** danışmanlığında hazırlanan **" Hızlandırılmış Vekil Model Tabanlı Dijital İkiz ile Vivaldi Anten Optimizasyonu "** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **21/01/2026** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

		İmza	**Sonuç**
DANIŞMAN	Doç. Dr. Ahmet Arif ULUSLU İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Mana SEZDİ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Dr. Öğr. Üyesi Necdet Tuğrul ARTUĞ Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi		☒ Kabul ☐ Ret

Annem ve Babama ithaf ediyorum…

BÜTÇE DESTEKLERİ

HIZLANDIRILMIŞ VEKİL MODEL TABANLI DİJİTAL İKİZ ile VİVALDİ ANTEN OPTİMİZASYONU

Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının yürütülmesi sürecinde değerli bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, her aşamada sabırla destek sağlayan ve akademik anlamda gelişmeme büyük katkı sunan danışmanım **Doç. Dr. Ahmet Arif ULUSLU** 'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ocak 2026 **Enes BEYAZ**

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI ..... **ii**
BEYAN ..... **iii**
BÜTÇE DESTEKLERİ ..... **v**
TEŞEKKÜR ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **x**
TABLO LİSTESİ ..... **xi**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xii**
ÖZET ..... **xiii**
ABSTRACT ..... **xiv**
1. GİRİŞ **1**
1.1. PROBLEM DURUMU VE LİTERATÜRDEKİ BOŞLUK 2
1.2. ARAŞTIRMANIN AMACI VE KAPSAMI 3
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE **5**
2.1. ANTEN KAVRAMI VE KABLOSUZ İLETİŞİMDEKİ ROLÜ 5
2.2. VİVALDİ ANTENİNİN YAPISI VE ÖZELLİKLERİ 6
2.3. ANTEN OPTİMİZASYONU KAVRAMI 8
2.3.1. Anten Tasarımında Optimizasyonun Gerekçesi 8
2.4. OPTİMİZASYON ALGORİTMALARININ GENEL SINIFLANDIRMASI 9
2.4.1. Doğadan İlham Almayan Klasik Optimizasyon Yaklaşımları 10
2.4.1.1. Deterministik Yöntemler *11*
2.4.1.2. Arama Tabanlı Heuristikler Algoritması *11*
2.4.2. Doğadan İlham Alan Optimizasyon Yöntemleri 12
2.4.3. Evrimsel Algoritmalar 12
2.4.3.1. Genetik Algoritma *12*
2.4.3.2. Diferansiyel Evrim *12*
2.4.3.3. Evrim Stratejileri *12*
2.4.4. Sürü Zekâsı Algoritmaları 12
2.4.4.1. Parçacık Sürü Optimizasyonu *13*
2.4.4.2. Yapay Arı Kolonisi *13*
2.4.4.3. Ateş Böceği Algoritması *13*

2.4.4.4. Kuş Göçü Algoritmaları *13*
2.4.4.5. Guguk Kuşu Arama Algoritması *14*
2.4.5. Fizik Tabanlı Optimizasyon Algoritmaları 14
2.4.5.1. Benzetimli Tavlama Algoritması *14*
2.4.5.2. Armoni Arama Algoritması *14*
2.4.5.3. Kütleçekimsel Arama Algoritması *15*
2.4.6. Hibrit Optimizasyon Yöntemleri 15
2.4.7. Veri Tabanlı ve Vekil Model Entegrasyonlu Optimizasyon 15
2.4.8. IBI Mantık Algoritmasının Sınıflandırmadaki Konumu 16
2.4.9. Anten Tasarımı İçin Algoritma Seçim Kriterleri 17
2.5. VERİ ODAKLI VEKİL MODELLERİN KULLANIMI 19
2.6. LİTERATÜRDE YAPILAN BENZER ÇALIŞMALAR 20
3. YÖNTEM 22
3.1. ARAŞTIRMANIN MODELİ VE UYGULAMA AKIŞI 22
3.2. MATEMATİKSEL MODEL VE TEORİK ALTYAPI 23
3.2.1. Vivaldi Anteninin Teorik Modeli 23
3.2.2. Anten Tasarım Parametrelerinin Açıklanması 25
3.3. IBI MANTIK ALGORİTMASI (ILA) 27
3.3.1. IBI Mantık Algoritmasının Teorik Temeli 28
3.3.1.1. Hazırlık Fazı (Preparation Phase) *30*
3.3.1.2. 1. Aşama Grup Çalışması *31*
3.3.1.3. 2. Aşama Grup Çalışması *33*
3.3.1.4. 3. Aşama Grup Çalışması *33*
3.3.1.5. Amaç Fonksiyonları ve Maliyet Fonksiyonu *34*
4. BULGULAR 36
4.1. IBI MANTIK ALGORİTMASI İÇİN OPTİMAL GİRİŞ PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE KLASİK ALGORİTMALARLA KARŞILAŞTIRILMASI 36
4.2. GİRİŞ PARAMETRE AĞIRLIKLARININ BELİRLENMESİ 38
4.3. SABİT VE DEĞİŞKEN GİRİŞ VERİ SETİ ARALIĞININ OPTİMİZASYON PERFORMANSINA ETKİSİ 40
4.4. EN BAŞARILI ANTEN TASARIMININ SİMÜLASYON SONUÇLARI 42
5. TARTIŞMA 45
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 47
6.1. ÖNERİLER 48
KAYNAKLAR 49
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI 53
ETİK KURUL İZİN YAZISI 54

KURUM İZNİ YAZILARI **55**
ÖZGEÇMİŞ **56**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1: Vivaldi antenin şematik görünümü ve tasarım parametreleri 25

Şekil 3.2: IBI mantık algoritmasının genel akış diyagramı 29

Şekil 3.3: Uzmanların gruplandırılması: (a) Arama alanında kümeleme yaklaşımı, (b) Uzmanları her gruba atama..... 30

Şekil 4.1: Çok bantlı Vivaldi anten tasarımında IBI mantık algoritması ile popülasyon tabanlı 10 koşu içerisinden seçilen optimizasyonun en iyi performansının yinelemeli tipik maliyet ve fd varyasyonları 37

Şekil 4.2: Çok bantlı Vivaldi anten tasarımında IBI mantık algoritması ile diğer algoritmalar ile 10 koşu içerisinden seçilen optimizasyonun en iyi performansının yinelemeli tipik maliyet ve fd varyasyonları 38

Şekil 4.3: Çok bantlı Vivaldi anten tasarımında IBI mantık algoritması ile sabit/değişken giriş veri seti değer aralığı seçim tabanlı 10 koşu içerisinden seçilen optimizasyonun en iyi performansının yinelemeli tipik maliyet ve fd varyasyonları..... 41

Şekil 4.4: Çok bantlı Vivaldi anten tasarımında IBI mantık algoritması ile elde edilen en başarılı antenin şematik görünümü..... 43

Şekil 4.5: Çok bantlı Vivaldi anten tasarımında IBI mantık algoritması ile elde edilen en başarılı antenin S_{11} (dB) parametresi simülasyonu..... 44

Şekil 4.6: Çok bantlı Vivaldi anten tasarımında IBI mantık algoritması ile elde edilen en başarılı antenin yönlülük parametresi simülasyonu..... 44

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1: Vivaldi anten tasarımı için parametrelerin tanımı ve aralıkları 26

Tablo 3.2: IBI mantık algoritmasının parametreleri 29

Tablo 4.1: Çok bantlı Vivaldi anten tasarımında IBI mantık algoritması ile popülasyon tabanlı optimizasyonun performans sonuçları 37

Tablo 4.2: Çok bantlı Vivaldi anten tasarımında IBI mantık algoritması ile azaltılmış sabit giriş parametre yöntemi ile optimizasyonun performans sonuçları 40

Tablo 4.3: Çok bantlı Vivaldi anten tasarımında IBI mantık algoritması ile sabit/değişken giriş veri seti değer aralığı seçim tabanlı optimizasyonun performans sonuçları 42

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
$\mathbf{f}$	: Frekans (Hz)
$\mathbf{f_n}$	: Merkez frekans
$\boldsymbol{\varepsilon_r}$	: Dielektrik bağıl geçirgenliği
$\mathbf{h}$	: Dielektrik (Substrat) kalınlığı
$\mathbf{W}$	: Anten genişliği
$\mathbf{L}$	: Anten uzunluğu
$\mathbf{A}$	: Vivaldi anten açıklık (aperture) genişliği
$\boldsymbol{\alpha}$	: Üstel flare (açılma) katsayısı
$\mathbf{Z_0}$	: Karakteristik empedans
$\mathbf{S_{11}}$	: Geri dönüş kaybı
$\mathbf{G}$	: Anten kazancı
$\mathbf{D}$	: Yönlülük (Directivity)
$\mathbf{C}$	: Amaç (maliyet) fonksiyonu
$\mathbf{w_i}$	: i'inci giriş parametresinin ağırlığı
$\mathbf{x_i}$	: i'inci tasarım parametresi
$\mathbf{N}$	: Parametre sayısı
$\mathbf{t}$	: İterasyon (yineleme) sayısı

Kısaltmalar	Açıklama
WLAN	: Kablosuz Yerel Alan Ağı (Wireless Local Area Network)
Wi-Fi	: Kablosuz Bağlantı (Wireless Fidelity)
IOT	: Nesnelerin İnterneti (Internet of Things)
UWB	: Ultra Geniş Bant (Ultra Wideband)
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization)
IBI	: Giriş Tabanlı Zeka (Input-Based Intelligence)
ILA	: IbI Öğrenme Algoritması (IbI Learning Algorithm)
EM	: Elektromanyetik

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HIZLANDIRILMIŞ VEKİL MODEL TABANLI DİJİTAL İKİZ ile VİVALDİ ANTEN OPTİMİZASYONU

Enes BEYAZ

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı (Disiplinlerarası)

Savunma Teknolojileri, Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışman : Doç. Dr. Ahmet Arif ULUSLU

Anten tasarımında performansı etkileyen en önemli unsurlardan biri, tasarım parametrelerinin doğru şekilde belirlenmesi ve bu parametrelerin hangi değer aralıklarında seçileceğinin optimize edilmesidir. Giriş veri seti parametrelerinin değer aralıklarının belirlenmesi, optimizasyon problemlerinde hâlâ çözülmeyi bekleyen önemli bir araştırma sorusu olarak öne çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında, bu soruna yanıt bulmak amacıyla giriş veri setinin değer genişlik aralığının optimizasyon performansı üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışma kapsamında, WLAN/Wi-Fi kablosuz iletişim sistemlerinde kullanılan 2,4 GHz, 3,5 GHz ve 5 GHz frekansları için çok bantlı bir Vivaldi anten tasarımı ele alınmıştır. Anten optimizasyon sürecinde, giriş parametrelerinin ağırlıklarına göre değişken veri aralığı seçilerek optimizasyon performansındaki değişim analiz edilmiştir. Ayrıca, giriş parametre sayısının fazla olması ve antenin üç bantlı yapısı tasarım problemini karmaşık hâle getirmiştir. Bu karmaşık yapı, anten optimizasyon alanında daha önce kullanılmamış olan ve güncel algoritmalara göre üstün performans sergileyen **IBI (Input-Based Intelligence) mantık algoritması** kullanılarak aşılmıştır.

Tasarım ve analiz süreci **MATLAB** ortamında gerçekleştirilmiş, antenin geri yansıma katsayısı (**S_{11} (dB)**) ve yönlülük parametreleri simülasyonlarla elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, optimizasyon maliyetinin azaldığını ve genel performansın iyileştiğini göstermiştir. Böylece, değişken giriş veri seti aralığı seçiminin optimizasyon problemlerinde başarım üzerinde önemli bir etkisi olduğu ortaya konulmuştur. Bu yaklaşımın, diğer optimizasyon problemlerine de kolaylıkla uyarlanabileceği değerlendirilmektedir.

Ocak 2026 , 71 sayfa.

Anahtar kelimeler: Vivaldi anten, optimizasyon, IBI mantık algoritması, değişken veri seti aralığı, anten tasarımı

ABSTRACT

M.Sc. THESIS

VİVALDİ ANTENNA OPTİMİZATİON with an ACCELERATED SURROGATE MODEL–BASED DİGİTAL TWİN

Enes BEYAZ

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Engineering Sciences

Defence Technology (Master) (With Thesis)

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Ahmet Arif ULUSLU

One of the key factors of determining antenna performance is the proper identification of design parameters and the selection of appropriate value ranges for these parameters. Determining the range of input dataset parameters remains a significant challenge in optimization problems. In this thesis, a detailed study is presented to investigate the effect of the input dataset range width on optimization performance.

The study focuses on the design of a multiband Vivaldi antenna operating at 2.4 GHz, 3.5 GHz, and 5 GHz for WLAN/Wi-Fi communication systems. During the optimization process, the variation of performance was analyzed by selecting variable input data ranges according to the weights of the input parameters. In addition to the large number of input parameters, the triple-band structure of the antenna increased the complexity of the design problem. This difficulty was overcome by employing the **IBI (Input-Based Intelligence) logic algorithm**, which has proven superior to traditional methods and has not been previously applied in antenna optimization studies.

The design and analysis were conducted using **MATLAB**, where the antenna's return loss (**S_{11} (dB)**) and directivity parameters were simulated. The results show that the optimization cost decreased and the overall performance improved. Consequently, it has been demonstrated that the selection of variable input dataset ranges has a significant impact on optimization performance. This approach can be confidently adapted to other optimization problems as well.

January 2026, 71 pages.

Keywords: Vivaldi antenna, optimization, IBI logic algorithm, variable dataset range, antenna design

1. GİRİŞ

Son yıllarda kablosuz iletişim teknolojilerinde yaşanan hızlı gelişmeler, anten tasarımı alanında yoğun bir araştırma ilgisini beraberinde getirmiştir. Günlük yaşamın dijitalleşmesiyle birlikte, akıllı şehir uygulamaları, giyilebilir cihazlar ve nesnelerin interneti (IOT) sistemleri gibi alanlarda çok sayıda kablosuz cihazın kullanımı kaçınılmaz hale gelmiştir. Bu cihazların sınırlı fiziksel alan içinde yüksek performans gösterebilmesi için antenlerin kompakt yapıda, geniş bant genişliğine sahip, verimli, düşük maliyetli ve yeterli kazanç sağlayacak şekilde tasarlanması gerekmektedir.

Mikroşerit antenler bu özelliklerin çoğuna sahiptir ve bu nedenle son birkaç üç yılda büyük ilgi görmüştür (Truong ve diğ., 2015; Uluslu, 2023). Kablosuz sistemlerin kullanım alanı, günümüzde WLAN, Bluetooth, RFID, 5G, akıllı ulaşım sistemleri (ITS) ve IOT tabanlı haberleşme teknolojileriyle genişlemiştir. IOT cihazları; uzaktan izleme, veri toplama, üretim süreçlerinin takibi ve çoklu ortam uygulamaları gibi işlevlerle günlük yaşamda giderek daha fazla yer edinmektedir. Bu sistemlerin verimli biçimde çalışabilmesi için, yüksek veri aktarım hızını destekleyen ve iletim gecikmesini azaltan anten yapıları büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, geniş bant davranışı, yüksek yönlülük, düşük kayıp ve üretim kolaylığı gibi avantajlarıyla Vivaldi antenleri, modern kablosuz haberleşme sistemlerinde öne çıkan anten tiplerinden biri olarak değerlendirilmektedir (Prasad ve diğ., 2018).

Literatürde geniş bantlı antenlerin tasarımına yönelik olarak yarıklı radyasyon yamaları veya arızalı toprak yapıları gibi çeşitli teknikler önerilmiştir (Prasad ve diğ., 2018). Ancak Vivaldi anteni, bu yöntemlere kıyasla hem daha basit geometrik yapıya hem de üretim açısından kolaylık sağlayan bir düzlemsel tasarıma sahiptir.

Bu anten türü, üstel açıklık geometrisi sayesinde geniş bant karakteristiği ve yüksek yönlülük sunmaktadır (Gibson, 1979). Bu özellikleri nedeniyle Vivaldi antenleri, yalnızca kablosuz haberleşme uygulamalarında değil, aynı zamanda duvardan görüntüleme sistemleri ve dizi anten tasarımlarında da tercih edilmektedir.

1.1. PROBLEM DURUMU VE LİTERATÜRDEKİ BOŞLUK

Klasik optimizasyon yöntemleri, çözüm uzayının boyutu, problemin doğasındaki karmaşıklık ve işlem süresinin kısıtlı olması gibi nedenlerle birçok durumda en iyi çözümü bulmakta yetersiz kalabilmektedir (Li ve Han, 2020; Li ve diğ., 2020; Wang ve diğ., 2014).

Bu yöntemler bazı problemlerde teorik olarak kesin çözüm sunabilse de pratikte çözüm süresi oldukça uzayabilmekte ve kabul edilebilir bir doğruluk seviyesine ulaşmak büyük zaman gerektirebilmektedir.

Yumuşak bilişim alanında gerçekleşen ilerlemeler, optimizasyon yaklaşımlarının daha yüksek hızda ve daha makul doğruluk oranlarıyla yeniden tanımlanmasına olanak sağlamıştır (Dhiman ve diğ., 2021; Faramarzi ve diğ., 2020; Hayyolalam ve Pourhaji Kazem, 2020). Optimizasyon yöntemleri, mühendislikten ekonomiye kadar pek çok bilim dalında etkin biçimde kullanılmakta olup, araştırmacılar bu yöntemlerin çözüm kalitesini ve performansını sürekli olarak değerlendirmektedir (Uluslu, 2023). Son yıllarda yenilikçi algoritmaların optimizasyon amaçlı kullanımı giderek artış göstermektedir (Jain ve diğ., 2019). Bu yöntemler, her zaman mutlak optimumu garanti etmese de geleneksel algoritmalara kıyasla çok daha kısa sürede tatmin edici çözümler üretebilmektedir.

Literatürde farklı optimizasyon stratejileri geliştirilmiş olup, bu algoritmalar genel olarak doğadan esinlenen ve doğadan esinlenmeyen yöntemler olarak iki temel kategoriye ayrılmaktadır (Yang, 2020). Doğadan ilham alan algoritmaların ilk örneklerinden biri, evrim teorisine dayalı olan genetik algoritmadır**.** Buna karşılık, Uyum Araması gibi bazı yöntemler doğadan bağımsız sınıfa dâhildir. Ayrıca, bireysel etkileşim yerine kolektif zekâ davranışına dayanan algoritmalar sürü zekâsı kapsamında değerlendirilmektedir (Kennedy, 2006; Li ve Han, 2020). Bu yaklaşımda, tek bir bireyin performansından ziyade tüm popülasyonun iş birliğiyle ortaya çıkan kolektif hareket, karmaşık problemlerde etkin çözümler üretebilmektedir.

Sürü zekâsı tabanlı yöntemlerin en bilinen örnekleri arasında Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Yapay Arı Kolonisi (ABC) algoritmaları yer almaktadır (Hang ve Li, 2018; Karaboga ve Basturk, 2008). Farklı literatür kaynaklarında bu algoritmaların çeşitli varyasyonları tanıtılmıştır. Bununla birlikte, optimizasyon problemlerinin doğası gereği hiçbir algoritma tüm problem tiplerinde mutlak en iyi çözümü garanti edememektedir. Bu nedenle, araştırmacılar her yıl yeni algoritmalar geliştirerek bu alandaki eksiklikleri gidermeye çalışmaktadır (Gao ve diğ., 2020; Gu ve Wang, 2020; Yang, 2020; Zhang ve diğ., 2020).

Bu algoritmalar, mühendislikten bilgi işlem alanına kadar pek çok uygulama sahasında başarılı sonuçlar vermiştir. Örneğin, bir çalışmada (Pierezan ve diğ., 2021) kafes optimizasyonu üzerine, bir diğer çalışmada (Abderazek ve diğ., 2020) ise sismik kırılganlık ve kam takip mekanizması üzerine uygulamalar gerçekleştirmiştir. Benzer biçimde, optimizasyon algoritmaları yapay zekâ alanında da önemli bir rol oynamaktadır. Makine öğrenimi süreçlerinde kullanılan bu algoritmalar, eğitim performansını artırmakta ve karmaşık mühendislik problemlerinde yüksek doğrulukla sonuçlar üretmektedir (Mirrashid ve Naderpour, 2021; Naderpour ve diğ., 2021; Naderpour ve Mirrashid, 2020a; 2020b; 2020c).

Bu kapsamda son yıllarda **IBI Mantık Teorisi**'ne dayalı yeni bir optimizasyon algoritması, yani **IBI Learning Algorithm (ILA)** önerilmiştir (Mirrashid ve Naderpour, 2023). Söz konusu algoritmanın performansı, 73 kısıtlı ve kısıtsız kıyaslama problemi üzerinde değerlendirilmiş ve farklı optimizasyon teknikleriyle karşılaştırıldığında yüksek başarı elde edilmiştir. Bu sonuçlar, ILA algoritmasının çeşitli karmaşık problemlerde etkili bir alternatif sunduğunu göstermektedir.

1.2. ARAŞTIRMANIN AMACI VE KAPSAMI

Bu tez çalışması kapsamında, kablosuz iletişim sistemlerinde kullanılmak üzere çok bantlı bir Vivaldi antenin optimizasyonuna yönelik bir yöntem geliştirilmiştir. Çalışmada, IBI Mantık algoritması güncel amaç fonksiyonlarıyla birlikte kullanılarak anten tasarım süreci yürütülmüştür (Uluslu, 2023). Elde edilen sonuçlar, giriş parametrelerinin ağırlıklarına göre değişken veri aralığı seçiminin optimizasyon performansını doğrudan etkilediğini ortaya koymuştur. Böylelikle, önerilen yaklaşımın hem anten verimliliği hem de çözüm doğruluğu açısından iyileştirici bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu yönüyle çalışma, benzer araştırmalara metodolojik bir referans sağlayarak gelecekteki tasarım ve optimizasyon süreçlerinde daha başarılı sonuçların elde edilmesine katkı sunmaktadır. Araştırmanın temel çıktıları şu şekilde özetlenebilir: WLAN/Wi-Fi tabanlı kablosuz iletişim sistemleri için 2,4 GHz, 3,5 GHz ve 5 GHz frekans bantlarını kapsayan çok bantlı bir Vivaldi anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, giriş parametrelerinin ağırlıklarına göre belirlenen değişken veri aralıklarının optimizasyon performansı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Anten tasarımı MATLAB ortamında simüle edilmiş ve S_{11} (dB) ile Yönlülük (directivity) parametreleri üzerinden performans değerlendirmesi yapılmıştır. Çalışma, daha önce çift bantlı mikroşerit bağlantılı kombine bant geçiren filtre tasarımında uygulanan yöntemi temel alarak, bu

yaklaşımı daha güncel bir optimizasyon algoritmasıyla ve farklı bir problem üzerinde yeniden yorumlamıştır. Ayrıca, her bir giriş parametresinin anten performansına olan etkisi detaylı biçimde incelenmiş ve bu parametrelerin optimizasyon sürecindeki göreceli önemi ortaya konulmuştur.

Bu çalışma, geniş bantlı ve yönlü anten tasarımlarının optimizasyonunu hedefleyerek, savunma teknolojilerinde kritik öneme sahip haberleşme ve algılama sistemlerine katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Özellikle askeri haberleşme, radar, elektronik harp ve insansız sistemlerde kullanılan RF ön yüz birimlerinde, anten performansı sistemin genel etkinliğini doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda, önerilen optimizasyon yaklaşımı ile antenin yansıma katsayısı, bant genişliği ve yönlülük gibi temel performans parametrelerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Çalışmanın kapsamı, savunma sanayisinde yaygın olarak kullanılan geniş bant anten yapılarının, sezgisel optimizasyon algoritmaları yardımıyla daha verimli ve düşük maliyetli şekilde tasarlanabileceğini ortaya koymaktır. Bu durum, hem donanımsal kaynakların etkin kullanımına olanak sağlamakta hem de farklı görev senaryolarına uyarlanabilir anten çözümlerinin geliştirilmesine katkı sunmaktadır. Dolayısıyla elde edilen sonuçlar, savunma teknolojilerinde güvenilir, esnek ve yüksek performanslı haberleşme sistemlerinin tasarımına yönelik önemli bir referans niteliği taşımaktadır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. ANTEN KAVRAMI VE KABLOSUZ İLETİŞİMDEKİ ROLÜ

Kablosuz iletişim sistemleri, modern yaşamın vazgeçilmez bir bileşeni hâline gelmiştir. Akıllı cihazların, endüstriyel otomasyon sistemlerinin ve nesnelerin interneti (IOT) uygulamalarının giderek yaygınlaşması, yüksek hızlı ve güvenilir veri iletimine olan ihtiyacı önemli ölçüde artırmıştır. Bu sistemlerin temel yapı taşı olan antenler, elektromanyetik enerjinin serbest uzaya iletilmesi ve yeniden alınması işlevini üstlenerek, iletişimin verimli ve sürekli biçimde sağlanmasını mümkün kılar (Truong ve diğ., 2015; Yang ve diğ., 2018). Bir antenin temel işlevi, elektromanyetik enerjiyi elektriksel sinyale veya elektriksel sinyali elektromanyetik enerjiye dönüştürmektir. Bu dönüşüm sürecinin verimliliği, antenin fiziksel yapısına, malzeme özelliklerine ve çalıştığı frekans bandına bağlıdır. Bu nedenle antenler, genellikle belirli bir uygulama için optimize edilerek tasarlanır. Örneğin, Wi-Fi, Bluetooth, 5G, araç içi iletişim ve IOT sensör ağları gibi farklı kablosuz sistemlerde antenlerin kazanç, bant genişliği ve yönlülük özellikleri değişiklik göstermektedir. Bu parametrelerin bir arada optimize edilmesi, sistemin toplam performansını doğrudan etkiler.

Geleneksel anten tasarımları, çoğu zaman tek bir frekans bandında çalışmak üzere oluşturulmuştur. Ancak günümüzde birden fazla frekans aralığında hizmet verebilen, çok bantlı ve geniş bantlı antenlere duyulan ihtiyaç hızla artmaktadır. Bu ihtiyaç, özellikle 5G ve geleceğin 6G teknolojilerinde, yüksek veri hızı ve düşük gecikme süresi gereksinimleriyle daha da belirgin hâle gelmiştir. Çok bantlı antenler, birden fazla kablosuz sistemin tek bir fiziksel yapı üzerinden çalışmasına olanak tanıyarak hem yerden hem de maliyetten tasarruf sağlar. Bu bağlamda mikroşerit antenler, kompakt boyutları, hafif yapıları, düşük üretim maliyetleri ve baskılı devre teknolojilerine kolay entegrasyon imkânı sayesinde öne çıkmaktadır. Mikroşerit antenler, düzlemsel bir yapıya sahip olup genellikle bir iletken yama (patch), bir dielektrik tabaka ve bir toprak düzleminden oluşur. Bu yapısı sayesinde taşınabilir cihazlarda, giyilebilir sistemlerde ve uydularda sıklıkla tercih edilir. Ancak bu antenlerin dar bant genişliği ve düşük kazanç gibi dezavantajları, yeni anten topolojilerinin geliştirilmesini gerekli kılmıştır (Prasad ve diğ., 2018).

Son yıllarda yapılan araştırmalar, antenlerin yalnızca geometrik boyutlarının değil, aynı zamanda elektromanyetik davranışlarının da optimizasyon teknikleriyle iyileştirilebileceğini göstermektedir. Bu doğrultuda, anten performansını artırmak için yapay zekâ destekli optimizasyon algoritmalarının kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bu yaklaşımlar, antenin yönlülük, yansıma katsayısı (S_{11}) ve bant genişliği gibi performans göstergelerini iyileştirmek için uygun parametre setlerini belirlemeyi amaçlar. Özellikle doğadan ilham alan meta-sezgisel algoritmalar, anten tasarımında klasik yöntemlerin ötesine geçilmesini sağlamıştır (Faramarzi ve diğ., 2020; Li ve diğ., 2020). Anten kavramı kablosuz iletişimin merkezinde yer alan çok boyutlu bir mühendislik konusudur. Anten performansını artırmaya yönelik yapılan çalışmalar, iletişim teknolojilerinin evrimiyle doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle antenlerin yapısal, malzeme ve optimizasyon temelli olarak geliştirilmesi; gelecekteki yüksek hızlı haberleşme ağlarının güvenilirliğini ve verimliliğini artıracaktır.

2.2. VİVALDİ ANTENİNİN YAPISI VE ÖZELLİKLERİ

Vivaldi anteni, yüksek kazanç, geniş bant genişliği, düzlemsel yapı ve üretim kolaylığı gibi avantajları nedeniyle öne çıkmaktadır. Ayrıca bu anten türü, dizi yapılar için de uygun bir mimariye sahiptir. Vivaldi anteni ilk olarak 1979'da Gibson tarafından sunuldu, geniş bant karakteristiği sağlayabilen üstel parlama şekline ve düzlemsel yapıya sahiptir (Gibson, 1979). Geniş bant karakteristiği sağlayan üstel parlama (exponential flare) şekline sahip düzlemsel bir yapıdır. Antenin bu yapısı, elektromanyetik dalgaların anten boyunca kademeli olarak yayılmasını ve farklı frekanslarda kararlı bir empedans uyumunun elde edilmesini sağlar. Literatürde, geniş bantlı anten tasarımlarında performansı artırmak amacıyla bozulmuş toprak yapısı (defected ground structure), yarıklı radyasyon yaması (slotted patch) ve simetrik yapı düzenlemeleri gibi farklı teknikler önerilmiştir (Prasad ve diğ., 2018). Bu modifikasyonlar, antenin bant genişliğini artırmakta ve geri dönüş kaybı (S_{11}) değerlerini iyileştirmektedir. Vivaldi anteninin önemli avantajlarından biri, üstel açıklık geometrisi sayesinde kazanç ve yönlülük açısından kararlı bir performans göstermesidir. Ayrıca düzlemsel yapısı, antenin mikroşerit devrelerle kolayca bütünleştirilmesine imkân tanır. Bu özellik, antenin IOT cihazları gibi sınırlı alan gerektiren uygulamalarda tercih edilmesinde belirleyici olmaktadır. Vivaldi anteni hem elektromanyetik performans hem de üretim kolaylığı açısından modern kablosuz iletişim sistemlerinin gereksinimlerini karşılayan güçlü bir adaydır. Bu antenlerin geniş bant karakteristiği, yüksek kazanç kapasitesi ve tasarım esnekliği, onları radar, görüntüleme

sistemleri, 5G iletişimi ve IOT gibi pek çok alanda kullanılabilir hâle getirmiştir. Vivaldi anteninin geniş bant yapısının ardındaki temel nedenlerden biri, anten boyunca ilerleyen modların kademeli olarak dönüşmesidir. Slot bölgesinde başlayan elektromanyetik enerji, açıklığın büyümesiyle birlikte daha yüksek mertebedeki modlara geçiş yapmadan, tek modlu bir yapıda geniş frekans aralığına uyum sağlar. Bu davranış, antenin rezonans tabanlı yapılara kıyasla daha düzgün bir çalışma bölgeleri oluşturmasına olanak tanır.

Vivaldi antenlerinin bir diğer önemli yapısal özelliği, açıklığın konik şekilde şekillendirilmiş olması sayesinde yönlü bir ışın oluşturabilmesidir. Açıklığın genişleme oranı, ana lob genişliğini ve kazanç değerlerini doğrudan etkilediğinden, tasarımcıya belirli hedefler doğrultusunda ışın şekillendirme imkânı sağlar. Bu durum, özellikle yüksek doğruluklu algılama, konumlama ve radar uygulamalarında Vivaldi antenlerini avantajlı bir seçenek hâline getirir.

Besleme mekanizması da Vivaldi anteninin performansını belirleyen önemli bir etkendir. Mikroşerit besleme, koaksiyel sondaj veya geçiş bölgeli slot besleme gibi yöntemler, antenin çalışma aralığını ve empedans davranışını farklı şekilde etkiler. Uygulamanın frekans gereksinimlerine göre doğru besleme yönteminin seçilmesi, geri dönüş kayıplarının azaltılmasında kritik rol oynar. Bunun yanında, besleme bölgesinde kullanılan geçiş yapıları, düşük frekanslarda daha kararlı bir enerji aktarımı sağlar.

Anten geometrisi üzerinde yapılan değişiklikler yalnızca bant genişliğini değil, aynı zamanda antenin fiziksel boyutlarını da doğrudan etkilemektedir. Örneğin, açıklığın başlangıç noktası daraltılarak kompakt bir tasarım elde edilebilirken, daha geniş açıklık boyları yüksek kazanç değerlerini destekler. Bu nedenle Vivaldi anteni, tasarımcıya hem kompakt hem de yüksek performanslı modeller geliştirme esnekliği sunar.

Vivaldi antenlerinin bir başka önemli yönü de çeşitli malzeme türleriyle uyumlu olmasıdır. Dielektrik tabaka kalınlığı ve dielektrik sabiti, antenin yayılım özelliklerini belirlediği için, farklı uygulamalarda farklı malzeme tercihleri yapılabilir. Düşük kayıplı dielektrikler, yüksek frekanslarda çalışacak antenler için daha uygunken, daha ekonomik malzemeler IOT ve taşınabilir cihazlarda tercih edilebilmektedir.

Son olarak, bu anten türünün dizi yapılarında gösterdiği performans, özellikle faz dizili sistemlerde öne çıkmasını sağlamaktadır. Birden fazla Vivaldi anteninin yan yana yerleştirilmesiyle geniş açılı tarama yapabilen sistemler tasarlanabilmekte, böylece hem kazanç hem de yönlülük kapasitesi artırılmaktadır. Bu nedenle Vivaldi anteni, modern haberleşme

sistemlerinde tekil anten olarak kullanılmasının yanı sıra, çok elemanlı dizilerin temel yapı taşı olarak da önemli bir role sahiptir.

2.3. ANTEN OPTİMİZASYONU KAVRAMI

Anten optimizasyonu, anten tasarımında hedeflenen performans kriterlerinin örneğin kazanç, bant genişliği, geri dönüş kaybı (S_{11}) ve yönlülük gibi parametrelerin en uygun kombinasyonlarla elde edilmesini amaçlayan bir süreçtir. Klasik optimizasyon yöntemleri, problemin boyutu, karmaşıklığı ve arama uzayı gibi etkenler nedeniyle çoğu zaman küresel en iyi çözüme ulaşmada yetersiz kalmaktadır (Li ve diğ., 2020; Wang ve diğ., 2014). Son yıllarda, yumuşak bilişim (soft computing) alanındaki gelişmeler, daha hızlı ve doğruluk açısından tatmin edici sonuçlar sunabilen optimizasyon algoritmalarının ortaya çıkmasına yol açmıştır (Dhiman ve diğ., 2021; Faramarzi ve diğ., 2020; Hayyolalam ve Pourhaji Kazem, 2020). Bu tür algoritmalar, anten tasarımında çok boyutlu ve doğrusal olmayan problemlerin çözümünde klasik yöntemlere kıyasla önemli avantajlar sağlamaktadır. Anten optimizasyonunda kullanılan yaklaşımlar genel olarak iki grupta incelenebilir: doğadan ilham alan ve doğadan ilham almayan algoritmalar (Yang, 2020). Doğaya dayalı yöntemler arasında genetik algoritmalar, parçacık sürü optimizasyonu ve yapay arı kolonisi algoritmaları yer almakta olup, bu yöntemler karmaşık tasarım uzaylarında küresel optimuma yakın sonuçlar elde etmeyi mümkün kılar (Karaboga ve Basturk, 2008; Kennedy, 2006).

Bu algoritmaların anten tasarımına uygulanması, yalnızca parametrelerin optimize edilmesini değil, aynı zamanda veri seti aralığı gibi giriş değişkenlerinin optimizasyon sürecine etkisinin de incelenmesini sağlamaktadır (Uluslu, 2023). Bu kapsamda, optimizasyon algoritmalarının anten performansını artırmadaki etkinliği, modern anten tasarım yaklaşımlarının temel bileşenlerinden biri hâline gelmiştir.

2.3.1. Anten Tasarımında Optimizasyonun Gerekçesi

Anten tasarım süreci doğası gereği çok değişkenli, doğrusal olmayan ve yüksek karmaşıklık seviyesine sahip bir mühendislik problemidir. Bir antenin performansını tanımlayan temel parametreler; geri dönüş kaybı (S_{11}), kazanç, bant genişliği, yönlülük, radyasyon deseni, empedans uyumu ve fiziksel boyut gibi çok sayıda bileşenden oluşmaktadır. Bu parametrelerin çoğu birbirleriyle doğrudan ilişkilidir ve birinin iyileştirilmesi, diğerinin kötüleşmesine yol açabilmektedir. Bu nedenle anten tasarım sürecinin sezgisel veya deneysel

yöntemlerle yürütülmesi çoğu zaman optimum çözüme ulaşmayı zorlaştırmakta, hatta mevcut tasarımın yalnızca kısmi bir iyileştirmeye tabi tutulmasına neden olmaktadır (Li ve diğ., 2020; Wang ve diğ., 2014).

Bu bağlamda optimizasyon algoritmaları, anten tasarımında hem performansın artırılması hem de tasarım süresinin kısaltılması açısından kritik bir rol üstlenmektedir. Özellikle modern kablosuz iletişim sistemlerinin ihtiyaç duyduğu geniş bant, çok bant, yüksek yönlülük ve kompakt yapı gereklilikleri, anten tasarımında optimizasyon algoritmalarının kullanılmasını adeta zorunlu hâle getirmiştir (Dhiman ve diğ., 2021; Hayyolalam ve Pourhaji Kazem, 2020).

2.4. OPTİMİZASYON ALGORİTMALARININ GENEL SINIFLANDIRMASI

Optimizasyon algoritmaları, bir problemin belirli kısıtlar altında en uygun çözümünü bulmak amacıyla geliştirilen matematiksel ve sezgisel yöntemlerdir. Günümüzde bu algoritmalar genel olarak iki ana grupta sınıflandırılmaktadır: doğadan ilham alan algoritmalar ve doğadan ilham almayan algoritmalar (Yang, 2020). Doğadan ilham almayan yöntemler, genellikle matematiksel modeller veya deterministik arama yaklaşımlarına dayanır. Buna karşılık doğadan ilham alan algoritmalar, biyolojik, fiziksel veya sosyal sistemlerdeki doğal süreçlerden esinlenir. Bu grup içerisinde genetik algoritmalar**,** parçacık sürü optimizasyonu (PSO)**,** yapay arı kolonisi (ABC) ve uyum araması (HS**)** gibi yöntemler yer almaktadır (Karaboga ve Basturk, 2008; Kennedy, 2006). Bu algoritmaların ortak özelliği, küresel optimum çözüme ulaşma olasılığını artırmak için nüfus tabanlı bir arama stratejisi kullanmalarıdır. Her birey, arama uzayında kendi deneyimlerine ve diğer bireylerin başarısına dayalı olarak pozisyonunu günceller (Li ve Han, 2020). Böylece sistem, tekil bir çözüm yerine popülasyonun ortak etkileşimiyle daha verimli bir arama süreci gerçekleştirir. Son yıllarda, bu algoritmaların performansını geliştirmek amacıyla yeni sezgisel ve melez modeller geliştirilmiştir. Araştırmacılar, farklı problem türleri için daha kararlı ve hızlı yakınsama sağlayan optimizasyon yaklaşımları önermektedir (Gao ve diğ., 2020; Gu ve Wang, 2020; Yi ve diğ., 2020; Zhang ve diğ., 2020). Bu çalışmalar, doğadan esinlenen yöntemlerin mühendislik problemlerinde, özellikle anten tasarımı gibi karmaşık optimizasyon süreçlerinde geniş uygulama alanına sahip olduğunu göstermektedir.

Optimizasyon algoritmaları mühendislik problemlerinde karar değişkenlerinin belirli bir amaç fonksiyonu doğrultusunda en iyi çözümü üretmesini sağlayan hesaplama teknikleridir.

Modern anten tasarımı gibi doğrusal olmayan, çok amaçlı ve geniş çözüm uzayına sahip problemlerde optimizasyon yöntemlerinin doğru sınıflandırılması, araştırmacılara hem uygun algoritmayı seçme hem de arama stratejilerini etkin şekilde yapılandırma açısından önemli bir rehber sunmaktadır. Literatürde optimizasyon yöntemleri genel olarak iki temel gruba ayrılmakla birlikte bu sınıflandırma güncel çalışmalarda daha ayrıntılı alt kategorilere bölünerek geniş bir çerçeve oluşturmuştur (Yang, 2020).

2.4.1. Doğadan İlham Almayan Klasik Optimizasyon Yaklaşımları

Doğadan ilham almayan optimizasyon yöntemleri, kökenlerini tamamen matematiksel prensiplerden ve deterministik karar mekanizmalarından alan yöntemlerdir. Bu algoritmaların temel yapısı, belirli bir amaç fonksiyonunu optimize etmek için kullanılan sistematik ve önceden tanımlı kurallara dayanır. Arama süreci, rastgelelik içermeden veya yalnızca sınırlı ölçüde rastgelelik kullanılarak, matematiksel modellere uygun biçimde adım adım ilerler. Dolayısıyla bu yöntemlerin davranışı öngörülebilir ve tekrarlanabilir niteliktedir. Deterministik ve yarı-deterministik prosedürlerin hâkim olduğu bu yaklaşım sınıfında, problem uzayının düzenli bir şekilde taranması hedeflendiğinden, çözüme giden yol büyük ölçüde algoritmanın sahip olduğu matematiksel özellikler tarafından şekillendirilir.

Bu yöntemlerin en önemli avantajlarından biri, çözümün elde edilme sürecinin büyük ölçüde kontrol altında olmasıdır. Arama mekanizmasının deterministik doğası sayesinde yakınsama davranışı, hassasiyet analizi ve hata sınırlarının matematiksel olarak açıklanabilmesi mümkündür. Ayrıca konveks yapıdaki problemlerde bu yöntemler son derece etkili ve hızlı sonuç verebilir. Matematiksel yapısı belirgin, türevlenebilir ve tek modlu amaç fonksiyonlarında klasik yöntemlerin sağladığı çözüm hızı, modern meta-sezgisel yöntemlere kıyasla çoğu zaman daha yüksektir.

Bununla birlikte, anten tasarımı gibi doğrusal olmayan, yüksek boyutlu ve çok modlu problemlerde doğadan ilham almayan deterministik yöntemlerin uygulanabilirliği sınırlı kalmaktadır. Anten geometrileri çoğunlukla karmaşık matematiksel ilişkilere sahiptir ve amaç fonksiyonları çoğu zaman keskin değişimlerin bulunduğu, türevlenebilirliğin geçerli olmadığı veya birden fazla lokal minimum barındıran yapılardan oluşur. Bu durum, türev tabanlı veya kapalı form çözümler gerektiren klasik optimizasyon yöntemlerinin bu tür problemlerde doğru bir şekilde çalışmasını zorlaştırmaktadır. Ayrıca yüksek çözünürlüklü simülasyonlar gerektiren elektromanyetik analizlerde, deterministik yöntemlerin her adımda yüksek hassasiyetli türev

bilgisine ihtiyaç duyması, hesaplama maliyetlerini artırarak pratik kullanımını daha da kısıtlamaktadır.

Dolayısıyla doğadan ilham almayan optimizasyon yöntemleri, matematiksel olarak güçlü ve teorik açıdan iyi tanımlanmış yapıları sayesinde belirli problem türlerinde üstün performans sunsalar da anten tasarımı gibi karmaşık mühendislik uygulamalarında genellikle başlangıç optimizasyonu, lokal iyileştirme ya da hibrit yöntemlerin bir bileşeni olarak kullanılmakta; küresel optimizasyonun ana yükü ise meta-sezgisel ve popülasyon tabanlı tekniklere bırakılmaktadır. Bu bağlamda deterministik yaklaşımlar modern elektromanyetik tasarım süreçlerinde tamamen ortadan kalkmamış, ancak daha stratejik ve sınırlı bir rol üstlenmiştir.

2.4.1.1. *Deterministik Yöntemler*

Bu grupta yer alan algoritmalar genellikle türev tabanlı ya da kapalı form çözümler gerektiren deterministik yöntemlerden oluşmaktadır. Gradient Descent, Newton ve Quasi-Newton yöntemleri, lineer veya doğrusal olmayan programlama teknikleri ile kuvvetli konveks optimizasyon araçları bu kapsamda değerlendirilen temel yaklaşımlardır. Bu yöntemlerin en önemli avantajı, yüksek yakınsama hızları ve matematiksel olarak ispatlanabilir çözüm garantileri sunmalarıdır. Ancak anten geometrilerinin karmaşık ve çoğu zaman doğrusal olmayan yapısı nedeniyle optimizasyon süreçlerinde kullanılan amaç fonksiyonlarının büyük bir bölümü ya türevlenebilir değildir ya da çok modlu bir karakter sergiler. Bu durum, deterministik yöntemlerin anten tasarımı gibi karmaşık problemlerde pratik uygulanabilirliğini ciddi ölçüde sınırlandırmakta ve literatürde bu yöntemlerin kullanımını oldukça nadir hâle getirmektedir (Li ve diğ., 2020).

2.4.1.2. *Arama Tabanlı Heuristikler Algoritmalar*

Bu kategoride yer alan algoritmalar, türev bilgi gerektirmeden çalışan ancak rastgelelik içermeyen arama stratejilerine dayanmaktadır. Brute-force arama, hill-climbing ve tabu search gibi yöntemler tamamen deterministik yapıda olup çözüm uzayını sistematik olarak taramayı amaçlar. Simulated Annealing ise kısmen deterministik olmayan yönler içerse de doğaya doğrudan dayanmayan klasik bir optimizasyon yaklaşımı olarak bu grupta değerlendirilmektedir. Bu yöntemler düşük boyutlu problemlerde etkili sonuçlar verebilse de anten tasarımı gibi yüksek boyutlu ve elektromanyetik hesaplama gerektiren problemlerde

çözüm uzayının büyüklüğü nedeniyle arama süresi önemli ölçüde artmakta ve pratik uygulanabilirlikleri sınırlanmaktadır.

2.4.2. Doğadan İlham Alan Optimizasyon Yöntemleri

Doğadan ilham alan meta-sezgisel yöntemler anten optimizasyonunun omurgasını oluşturmaktadır. Bu yöntemler, biyolojik, fiziksel veya sosyal sistemlerin davranışlarından esinlenerek tasarlanmıştır ve popülasyon tabanlı arama stratejileri sayesinde küresel optimuma yakınsama konusunda yüksek başarı gösterir (Karaboga ve Basturk, 2008; Kennedy, 2006).

2.4.3. Evrimsel Algoritmalar

Bu algoritmalar "doğal seçilim", "mutasyon", "çaprazlama" gibi biyolojik mekanizmaları taklit eder.

2.4.3.1. *Genetik Algoritma*

Genetik Algoritma (GA), en bilinen evrimsel yöntemlerden biri olup anten tasarımında oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Çok bantlı anten geometrilerinin optimize edilmesinde, S_{11} ve kazanç gibi kritik performans parametrelerinin eşzamanlı olarak iyileştirilmesinde ve özellikle dizi anten yapılarında faz ile genlik ağırlıklarının optimize edilmesinde etkin sonuçlar vermesi nedeniyle literatürde yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu kapsamlı kullanım, GA'nın karmaşık elektromanyetik tasarım problemlerine uyum sağlayabilen esnek yapısından kaynaklanmakta ve onu anten optimizasyon sürecinin temel araçlarından biri hâline getirmektedir.

2.4.3.2. *Diferansiyel Evrim*

DE, parametre vektörlerinin farkını kullanarak yeni çözümler üretir. Yüksek yakınsama hızı nedeniyle literatürde kompleks anten geometrilerinde sıkça tercih edilmektedir.

2.4.3.3. *Evrim Stratejileri*

Bu yöntem özellikle sürekli tasarım parametrelerine sahip anten geometrilerinde başarı göstermektedir.

2.4.4. Sürü Zekâsı Algoritmaları

Sürü zekâsı yöntemleri kolektif davranış ve popülasyon dinamiklerini temel alır. Modern anten optimizasyonunun en başarılı yöntemlerinin büyük bölümü bu kategoridedir.

2.4.4.1. *Parçacık Sürü Optimizasyonu*

Kennedy ve Eberhart tarafından önerilen PSO, anten tasarımında en yaygın kullanılan meta-sezgisel yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir (Kennedy, 2006). Algoritma, her bir parçacığın hem kendi deneyiminden hem de sürünün genelindeki en iyi deneyimden yararlanarak hareket etmesi prensibine dayanmaktadır. PSO'nun antenlerde özellikle başarılı olmasının temel nedeni, çok boyutlu tasarım problemlerinde hızlı yakınsama sağlayabilmesi, tasarım parametreleri arasındaki karmaşık ilişkileri etkin biçimde modelleyebilmesi ve çoğu zaman birden fazla performans kriterinin aynı anda değerlendirildiği anten tasarım süreçlerinde bu kriterlerin kolaylıkla algoritmaya entegre edilebilmesidir. Bu özellikler, PSO'yu anten geometrilerinin optimize edilmesinde oldukça güçlü ve esnek bir araç hâline getirmektedir.

2.4.4.2. *Yapay Arı Kolonisi*

Arı kolonisi davranışını modelleyen bu algoritma, özellikle geniş arama uzayına sahip anten geometrilerinde etkili olmuştur (Karaboga ve Basturk, 2008).

2.4.4.3. *Ateş Böceği Algoritması*

Ateş Böceği Algoritması (FA), Yang tarafından doğal ateş böceklerinin "biyolojik ışık saçma ve birbirine yönelme davranışı" temel alınarak geliştirilmiş bir meta-sezgisel optimizasyon yöntemidir (Yang, 2020). Ateş böceklerinin birbirlerini ışık yoğunluğuna göre çekmesi, algoritmanın temel matematiksel mekanizmasını oluşturur. Bu mantığa göre her ateş böceği bir potansiyel çözümü temsil eder ve parlaklığı, yani "ışık şiddeti", çözümün amaç fonksiyonuna göre ne kadar iyi olduğunu belirler.

Daha iyi çözüme sahip ateş böcekleri daha parlak kabul edildiğinden, diğer böcekler bu parlak noktalara doğru hareket eder. Böylelikle küresel optimum yönünde sürekli bir çekim kuvveti oluşur.

2.4.4.4. *Kuş Göçü Algoritmaları*

Kuş göçü tabanlı algoritmalar, kuş sürülerinin enerji verimliliği amacıyla belirli formasyonlar kullanarak uzun mesafeli göç davranışlarını taklit eden sürü zekâsı yöntemleridir.

Doğadaki kuş sürüleri, V veya λ şeklindeki formasyonlarda hareket ederek aerodinamik avantaj elde eder ve sürü içindeki bireyler sürekli olarak birbirlerinin konum, hız ve yönelim bilgilerini takip eder. Bu kolektif davranış, modern optimizasyon yöntemlerine güçlü bir ilham kaynağı oluşturmuştur (Kennedy, 2006).

2.4.4.5. *Guguk Kuşu Arama Algoritması*

Bu algoritmalar özellikle karmaşık çok modlu fonksiyonlarda başarılı çözümler sunar. Guguk Kuşu Arama (CS) algoritması, Yang ve Deb tarafından guguk kuşlarının üreme davranışlarından esinlenerek geliştirilen bir meta-sezgisel optimizasyon yöntemidir (Yang, 2020). Guguk kuşlarının, yumurtalarını başka kuşların yuvalarına bırakması ve ev sahibi kuşun bu yumurtaları zaman zaman fark ederek yuvadan atması, algoritmanın temel mekanizmasını oluşturmaktadır (Yang, 2020). CS algoritmasında her yumurta bir çözümü temsil ederken, daha kaliteli çözümler "hayatta kalan yumurtalar" olarak yorumlanır. Ev sahibi kuşun yumurtayı fark ederek atması ise popülasyondaki zayıf çözümlerin elenmesi anlamına gelir.

2.4.5. Fizik Tabanlı Optimizasyon Algoritmaları

Bu yöntemler fiziksel olayların matematiksel modellerini temel alır. Fizik tabanlı optimizasyon algoritmaları, doğrudan fiziksel veya termodinamik süreçlerin matematiksel modellerinden türetilen arama stratejilerini esas alır. Bu yöntemlerde bireylerin davranışı, belirli bir fiziksel fenomenin soyutlanmasıyla gerçekleştirilir ve bu fenomen problem çözme sürecine uyarlanır. Anten tasarımı gibi elektromanyetik problemlerde fiziksel analojiler doğal olarak anlamlı karşılıklar bulduğu için bu yöntemler modern literatürde önemli bir yer tutmaktadır.

Fizik tabanlı algoritmaların ortak özellikleri, matematiksel olarak sezgisel bir yapıya sahip olmaları ve deterministik yöntemlere kıyasla çok modlu fonksiyonlarda daha başarılı sonuçlar üretmeleridir. Ancak bu yöntemlerin yakınsama hızları, popülasyon tabanlı sürü zekâsı yöntemlerine kıyasla düşük olabildiğinden modern çalışmaların çoğunda fizik tabanlı algoritmalar hibrit optimizasyon yaklaşımlarında tamamlayıcı bir rol üstlenmektedir (Gao ve diğ., 2020; Zhang ve diğ., 2020).

2.4.5.1. *Benzetimli Tavlama Algoritması*

Metal soğutma prensibini taklit eder. Anten tasarımında yerel minimumdan kaçabilme özelliği nedeniyle kullanılır.

2.4.5.2. *Armoni Arama Algoritması*

Müzisyenlerin uyumlu ses arayışı mantığını kullanır. Mikrodalga yama anten tasarımları ve empedans uyum problemlerinde geniş kullanım alanı vardır.

2.4.5.3. *Kütleçekimsel Arama Algoritması*

Nesnelerin yerçekimi etkisiyle birbirini çekmesi prensibini temel alır. Çok amaçlı anten tasarımında performansı dikkate değerdir.

2.4.6. Hibrit Optimizasyon Yöntemleri

Hibrit optimizasyon yöntemleri, tek bir algoritmanın sınırlılıklarını gidermek amacıyla birden fazla optimizasyon yaklaşımının belirli bileşenlerinin bir araya getirilmesiyle oluşturulan yapılar olarak literatürde önemli bir yer edinmiştir. Anten tasarımı gibi çok boyutlu, çok modlu ve yüksek hassasiyet gerektiren problemlerde tek başına kullanılan meta-sezgisel yöntemler zaman zaman istenen performans düzeyine ulaşmakta yetersiz kalabilmekte ya da yakınsamada kararsız davranışlar sergileyebilmektedir. Bu nedenle araştırmacılar, hem global arama yeteneği güçlü olan popülasyon tabanlı yöntemleri hem de lokal iyileştirme yeteneği yüksek olan matematiksel veya sezgisel yöntemleri birleştirerek daha dengeli arama stratejileri geliştirmeye yönelmiştir (Gao ve diğ., 2020).

Hibrit yöntemlerin bir diğer önemli avantajı, simülasyon tabanlı anten tasarım süreçlerinin hesaplama maliyetini azaltabilmesidir. Özellikle yüksek frekanslı antenler, milimetre dalga yapıları veya çoklu rezonansa sahip mikroşerit antenlerde simülasyon süresi oldukça yüksek olabilmektedir. Bu nedenle hibrit algoritmaların iyi yapılandırılmış keşif-sömürü dengesi, çözümün daha az simülasyon gerektiren bölgelerde hızla bulunmasını kolaylaştırmaktadır. Son yıllarda hibrit yöntemlerin vekil modellerle birlikte kullanıldığı birleşik hibrit yaklaşımlar da literatürde yaygınlaşmış ve bu hibrit-varyant yöntemlerin anten performans kriterlerini optimize etmede etkili sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Bu kapsamda hibrit optimizasyon, modern anten tasarımının hesaplamalı yükünü azaltan, esnekliği artıran ve performansı yükselten önemli bir araç hâline gelmiştir.

2.4.7. Veri Tabanlı ve Vekil Model Entegrasyonlu Optimizasyon

Veri tabanlı optimizasyon yöntemleri ve vekil model (surrogate model) tabanlı yaklaşımlar, özellikle hesaplama maliyetinin yüksek olduğu elektromanyetik problemler için güncel literatürde önemli bir konuma sahiptir. Anten tasarımı sürecinde çoğunlukla CST, HFSS veya benzeri elektromanyetik simülasyon yazılımlarının kullanılması nedeniyle her optimizasyon döngüsü yüksek zaman maliyetine yol açmaktadır. Bu durum, popülasyon tabanlı algoritmaların yüzlerce hatta binlerce birey üzerinden işlem yapması gerektiğinde daha da belirgin bir problem hâline gelmektedir. Vekil modeller, bu noktada karmaşık elektromanyetik

simülasyonun yaklaşık bir temsilini oluşturarak optimizasyon sürecini önemli ölçüde hızlandırmaktadır (Rayas-sanchez ve Gutierrez-Ayala, 2006).

Vekil modeller genellikle Kriging, Gaussian Süreç Regresyon, Radyal Temel Fonksiyon ağları veya polinom tabanlı yaklaşımlar gibi matematiksel fonksiyonlarla elde edilir. Bu modeller, simülasyon ortamından elde edilen belirli sayıda örnek üzerinden eğitildikten sonra, anten performansının farklı tasarım parametrelerine vereceği tepkiyi hızlı bir şekilde tahmin edebilmektedir. Böylece optimizasyon algoritmasının, gerçek simülasyon çalıştırılmadan önce karar verebilmesi sağlanır. Bu yaklaşım yalnızca zaman tasarrufu sağlamamakta, aynı zamanda tasarım uzayının daha kapsamlı bir şekilde taranmasına imkân tanımaktadır.

Son yıllarda vekil modellerin makina öğrenmesi yöntemleriyle birleştirildiği hibrit veri-temelli optimizasyon yaklaşımları anten tasarım topluluğunda dikkat çekici başarılar elde etmiştir. Yapay sinir ağları ve derin öğrenme tabanlı modellerin, anten performans eğilimlerini yüksek doğrulukla tahmin edebilmesi sayesinde çok daha karmaşık ve geniş parametre uzayları optimize edilebilir hâle gelmiştir. Bu nedenle veri odaklı ve vekil model entegreli optimizasyon, özellikle milimetre dalga antenleri, 5G ve 6G iletişim antenleri, faz dizili sistemler gibi ileri düzey tasarımlarda günümüzde en etkili yaklaşımlardan biri olarak kabul edilmektedir.

2.4.8. IBI Mantık Algoritmasının Sınıflandırmadaki Konumu

IBI Mantık Algoritması (ILA), modern meta-sezgisel optimizasyon yaklaşımları içerisinde hibrit bir konumda bulunmaktadır. Popülasyon tabanlı arama mekanizmasına sahip olması itibarıyla sürü zekâsı yöntemlerine yakın durmakla birlikte, bireylerin parametre ağırlıklarını değerlendiren ve bu ağırlıklara göre arama yönünü dinamik biçimde güncelleyen yapısı sayesinde evrimsel strateji algoritmalarına da benzerlik göstermektedir. IBI Mantık Algoritmasının en belirgin özelliği, çözüm uzayındaki her parametrenin etkinlik düzeyini analiz ederek arama sürecini bu etkinliğe göre şekillendirmesidir. Bu yaklaşım, özellikle geniş aralıklara sahip çok boyutlu optimizasyon problemlerinde algoritmanın esnekliğini ve adaptasyon yeteneğini artırmaktadır.

Ayrıca IBI Mantık algoritması, yerel ve global arama aşamalarını sorunsuz bir şekilde dengeleyebilen yapıdadır ve değişken aralıkların problemden probleme farklılık gösterdiği tasarım süreçlerinde performansını koruyabilmektedir. Bu yönüyle IBI Mantık algoritması,

klasik meta-sezgisel yöntemlerde sıklıkla görülen parametre ayarlama zorluklarını azaltmakta, özellikle çok amaçlı anten optimizasyonlarında daha hızlı ve istikrarlı bir yakınsama davranışı ortaya koymaktadır. Literatürde yeni bir algoritma olmasına rağmen IBI Mantık Algoritmasının anten tasarımında kullanılmaya başlanması hem optimizasyon topluluğuna hem de elektromanyetik tasarım alanına özgün bir katkı sağlamaktadır (Mirrashid ve Naderpour, 2023).

2.4.9. Anten Tasarımı İçin Algoritma Seçim Kriterleri

Anten tasarımında kullanılacak optimizasyon algoritmasının doğru seçilmesi, tasarım sürecinin doğruluğunu, hesaplama maliyetini ve elde edilen performans değerlerini doğrudan etkileyen kritik bir adımdır. Bu nedenle optimizasyon yöntemlerinin genel sınıflandırılması kadar, hangi yöntemin hangi tür anten tasarım probleminde daha uygun sonuç verdiğinin belirlenmesi de modern elektromanyetik tasarım literatüründe önemli bir araştırma konusu hâline gelmiştir. Anten tasarım problemleri çoğunlukla doğrusal olmayan, çok amaçlı ve yüksek boyutlu yapılara sahip olduğundan, kullanılan algoritmanın problem yapısına uyumluluğu başarının temel koşullarından birini oluşturur.

Bir algoritmanın anten tasarım sürecine uygunluğunu belirleyen ilk parametre, tasarım problemindeki karar değişkenlerinin sayısı ve bu değişkenlerin aralıklarıdır. Özellikle Vivaldi anten, log-periodik yapılar, spiral antenler veya karmaşık slot geometrilerine sahip mikroşerit yapılar gibi geniş tasarım uzayına sahip antenlerde, parametre etkileşimleri doğrusal olmayan güçlü ilişkiler göstermektedir. Bu tür problemlerde popülasyon tabanlı meta-sezgisel yöntemlerin, değişkenler arası karmaşık ilişkiyi keşfetme yetenekleri nedeniyle daha başarılı olduğu bilinmektedir. Buna karşın düşük boyutlu ve türevlenebilir amaç fonksiyonlarına sahip anten modellerinde deterministik yöntemler daha hızlı sonuç verebilir; ancak pratikte çoğu anten yapısı bu kategoriye girmediği için deterministik yöntemler genellikle yardımcı veya ikincil iyileştirme aracı olarak kullanılmaktadır.

Anten optimizasyonu için algoritma seçiminde etkili olan bir diğer kriter ise simülasyon maliyetidir. CST Microwave Studio, HFSS veya FEKO gibi elektromanyetik benzetim yazılımlarında gerçekleştirilen her bir çözümleme yüksek hesaplama süresi gerektirir. Bu nedenle yüzlerce birey içeren popülasyon tabanlı algoritmalar simülasyon maliyetini dramatik şekilde artırabilir. Böyle durumlarda ya popülasyon sayısı düşük tutularak global arama kabiliyeti kısıtlanmakta ya da vekil model tabanlı yaklaşımlar ile algoritmanın yalnızca kritik noktalarda gerçek simülasyon yapması sağlanmaktadır. Bu nedenle yüksek frekanslı antenlerde, geniş bant tasarımlarında ve çok amaçlı problemlerde, vekil model destekli hibrit

optimizasyon yöntemleri geleneksel meta-sezgisel yöntemlere kıyasla daha verimli sonuçlar oluşturabilmektedir.

Anten tasarımında kullanılan performans kriterlerinin yapısı da algoritma seçiminde belirleyici bir role sahiptir. S_{11}, kazanç, yönlülük, bant genişliği, sidelobe seviyesi, empedans uyumu ve fiziksel boyut gibi birbirine bağlı çok sayıda kriterin aynı anda optimize edilmesi gerektiğinde çok amaçlı optimizasyon yöntemleri tercih edilmektedir. NSGA-II, MOPSO veya çok amaçlı evrimsel stratejiler gibi yöntemler, Pareto-optimal çözümler üreterek tasarımcıya birden fazla alternatif çözüm kümesi sunar. Buna karşılık tek bir performans kriterinin belirleyici olduğu tasarımlarda tek amaçlı meta-sezgisel yöntemler daha etkin ve daha düşük maliyetli olabilmektedir. Bu bağlamda algoritmanın çözüm çıktısının doğrudan tasarım hedefine ne derece uygun olduğu da seçim sürecinin ayrılmaz bir parçasıdır.

Ayrıca anten tasarım problemlerinin multimodal karakteri, yani çözüm uzayında birden fazla lokal optimum bulunması, algoritma seçimindeki en önemli hususlardan biridir. PSO, ABC, Firefly ve Cuckoo Search gibi sürü zekâsı temelli yöntemlerin lokal minimumlardan kaçabilme ve çözüm uzayında daha geniş keşif gerçekleştirebilme kapasitesi, bu algoritmaları karmaşık anten geometrileri için avantajlı hâle getirmektedir. Buna ek olarak bazı anten problemlerinde arama uzayı yalnızca geniş değil, aynı zamanda duyarlıdır; örneğin Vivaldi anten tasarımlarında flare açısı, slot uzunluğu ve dielektrik kalınlığı gibi parametrelerin küçük değişimleri bile performansta büyük sıçramalar yaratabilmektedir. Bu tür durumlarda adaptif parametre güncellemelerine sahip algoritmaların (örneğin IBI Mantık Algoritması gibi) geleneksel yöntemlere kıyasla daha istikrarlı ve güvenilir çözümler sunduğu görülmektedir.

Son olarak, antenin kullanım amacı ve çalışma bandı da algoritma seçiminde etkili olmaktadır. Örneğin 5G milimetre dalga antenlerinde hedeflenen yüksek kazanç ve düşük sidelobe seviyeleri, algoritmanın yüksek çözünürlüklü bir arama gerçekleştirmesini gerekli kılarken; geniş bant UWB antenlerde frekans aralığı boyunca sürekli performans gereksinimi algoritmanın bant-temelli uyarlamalar yapmasını zorunlu hâle getirir. Benzer şekilde, faz dizili antenlerdeki faz-genlik ağırlıklarının optimizasyonu gibi problemlerde PSO ve GA gibi popülasyon tabanlı yöntemler uzun yıllardır standart hâline gelmiştir.

Tüm bu değerlendirmeler doğrultusunda, anten optimizasyonunda kullanılacak algoritmanın seçiminde problem yapısı, tasarım uzayının genişliği, simülasyon maliyeti, performans kriterlerinin çoklu olması, parametre duyarlılığı ve çözüm uzayının multimodal karakteri gibi faktörler bir bütün olarak ele alınmalıdır. Dolayısıyla tek bir algoritmanın her tür anten tasarım problemi için en uygun çözümü sunduğunu söylemek mümkün değildir. Aksine,

en iyi sonuçlar genellikle problem yapısına özel olarak seçilmiş veya uyarlanmış meta-sezgisel yöntemlerden elde edilmekte; bazı durumlarda ise hibrit ve veri modellemeli yöntemlerin birleşimi anten tasarım sürecinin verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır

2.5. VERİ ODAKLI VEKİL MODELLERİN KULLANIMI

Veri odaklı vekil modeller, karmaşık mühendislik problemlerinin çözümünde hesaplama maliyetini azaltmak**,** yakınsama hızını artırmak ve optimizasyon sürecini güvenilir hâle getirmek amacıyla kullanılan etkili yöntemlerdir. Bu modeller, sistemin davranışını doğrudan simülasyon yapmak yerine, verilerden öğrenilen matematiksel veya istatistiksel bir temsil aracılığıyla tahmin eder (Wang ve diğ., 2018). Literatürde, vekil tabanlı modelleme yöntemlerinin parametre ayarlaması**,** istatistiksel analiz ve çok amaçlı tasarım optimizasyonu gibi farklı mühendislik uygulamalarında başarıyla kullanıldığı belirtilmiştir (Dong ve diğ., 2019; Ochoa ve Cangellaris, 2013; Rossi ve diğ., 2014). Bu yaklaşımlar, özellikle elektromanyetik yapıların ve mikrodalga devrelerinin optimizasyonunda hesaplama süresini önemli ölçüde azaltmaktadır.

Mikrodalga ve anten tasarımında kullanılan başlıca veri odaklı modeller arasında; polinom regresyonu, kriging enterpolasyonu, radyal baz fonksiyonları, destek vektör regresyonu, polinom kaos genişlemesi ve yapay sinir ağları (YSA) yer almaktadır (Barmuta ve diğ., 2015; Cai ve diğ., 2018; Chavez-Hurtado ve Rayas-Sanchez, 2016; Petrocchi ve diğ., 2017; Queipo ve diğ., 2005; Rayas-sanchez ve Gutierrez-Ayala, 2006). Bu yöntemler, karmaşık elektromanyetik yapıların optimizasyonunda yüksek doğrulukta tahmin yeteneği sunarak doğrudan simülasyon süresini önemli ölçüde azaltmaktadır

Bu modellerin ortak avantajı, doğrudan tam dalga elektromanyetik simülasyonlar gerektirmeden yüksek doğrulukta sonuçlar sunabilmesidir. Böylece anten optimizasyonu gibi çok parametreli problemlerde, daha kısa sürede neredeyse optimum çözümler elde edilebilir. Güncel araştırmalar, veri odaklı vekil modellerin yapay zekâ destekli optimizasyon algoritmalarıyla entegre edilmesiyle birlikte anten tasarımı süreçlerinde önemli performans artışları sağlandığını göstermektedir.

2.6. LİTERATÜRDE YAPILAN BENZER ÇALIŞMALAR

Veri odaklı modelleme ve yapay zekâ tabanlı optimizasyon yöntemlerinin anten tasarımında kullanımı son yıllarda önemli bir araştırma alanı hâline gelmiştir. Literatürde, özellikle veri odaklı vekil modellerin farklı mühendislik problemlerine uygulanabilirliği üzerine çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar, parametre ayarlaması, istatistiksel analiz ve çok amaçlı tasarım optimizasyonu gibi konularda başarılı sonuçlar elde edildiğini göstermektedir (Dong ve diğ., 2019; Ochoa ve Cangellaris, 2013; Rossi ve diğ., 2014; Wang ve diğ., 2018).

Anten tasarımı üzerine yapılan ulusal çalışmalar incelendiğinde, bu alanın Türkiye'de de güncelliğini koruduğu görülmektedir (Bayer Keskin ve Güler, 2021; Belen, 2024; Çıldır, 2024). Uluslararası araştırmalarda ise Vivaldi anteni farklı geometriler, uygulama alanları ve frekans bantlarında incelenmiştir (Jia ve diğ., 2024; Karimov ve diğ., 2024; Liu ve diğ., 2024; 2025; Niu ve diğ., 2024; Sun ve diğ., 2024; Zhang ve Zhang, 2024).

Örneğin, bir çalışmada simetrik radyasyon desenine sahip ultra geniş bant dairesel polarize yarı tip bir Vivaldi anten tasarlanmıştır (Sun ve diğ., 2024). Ayrıca karakteristik mod analizi yöntemini kullanarak düşük radar kesitli bir Vivaldi anten geliştirmiştir (Jia ve diğ., 2024). Bir çalışmada ise 15–40 GHz aralığında 5G uygulamaları için yüksek kazançlı bir Vivaldi anten tasarlanmıştır. (Karimov ve diğ., 2024).

Yine "5G iletişim optimizasyonu için 2,6 GHz'de Antipodal Vivaldi anteninin tasarımı ve simülasyonu" adlı çalışmada, 2,6 GHz'de çalışan bir anten geliştirilmiş ve IEEE standartları doğrultusunda geri dönüş kaybı ($S_{11} < -20$ dB) ve VSWR değerlerinin uygun olduğu rapor edilmiştir (Darmawidjaja ve Wibowo, 2021). Ancak araştırmacılar, MATLAB gibi yazılımlar kullanılarak farklı optimizasyon algoritmalarıyla daha başarılı sonuçların elde edilebileceğini belirtmiştir.

Benzer biçimde, bir çalışmada kırsal bölgelerde 2G–5G frekans aralığında çalışabilen çok nesil bir anten tasarlanmış; 0,8–6 GHz aralığında çalışabilen bu antenin kazanç değeri 8 dB'den büyük, geri dönüş kaybı ise −10 dB'den küçük bulunmuştur (Sujiansyah ve diğ., 2018). Ancak çalışmada antenin fiziksel boyutlarının büyük olduğu vurgulanmıştır.

Yapay zekâ tabanlı yaklaşımlara örnek olarak gerçekleştirilen çalışmada, bal arısı çiftleşme optimizasyonu ile veri odaklı vekil model birleştirilerek frekans seçici yüzey (FSY) yüklü ultra geniş bant Vivaldi anteni tasarlanmıştır (Mahouti ve diğ., 2022). Sonuçlar, FSY

yapısı sayesinde yönlülük artışı sağlandığını ve 2–12 GHz aralığında 10 GHz'de 10 dB'lik maksimum kazanç elde edildiğini göstermiştir.

Vivaldi anten tasarımı ile ilişkili bir başka çalışma daha yürütülmüştür (Uluslu ve Allaberdiyev, 2024). "GOOSE algoritması kullanılarak çift bantlı mikroşerit bağlantılı kombine bant geçiren filtre tasarımı" başlıklı bu çalışmada, sabit giriş veri seti değer aralığı seçilerek optimizasyon performansındaki değişim incelenmiştir. Çalışma sonuçları, giriş veri aralığının optimizasyon başarımında kritik bir rol oynadığını göstermiştir. Bu bulgu, değişken giriş veri aralıklarının incelendiği mevcut çalışmanın temel motivasyonunu oluşturmuştur.

Sonuç olarak, literatürdeki mevcut çalışmalar anten performansının geliştirilmesine yönelik önemli katkılar sunmakla birlikte, giriş veri seti değer aralığının optimizasyon performansına etkisini doğrudan ele alan araştırmalar oldukça sınırlıdır. Bu nedenle, bu tezde ele alınan yöntem, mevcut literatürdeki bu boşluğu doldurarak değişken giriş veri aralığı seçiminin optimizasyon üzerindeki etkisini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

3. YÖNTEM

3.1. ARAŞTIRMANIN MODELİ VE UYGULAMA AKIŞI

Bu çalışma, çok bantlı kablosuz iletişim sistemlerinde kullanılmak üzere Vivaldi anten tasarımının optimizasyonunu amaçlayan hesaplamalı bir araştırma modeline sahiptir. Çalışmada, anten performansını etkileyen geometrik parametrelerin optimize edilmesi ve bu sayede çok bantlı çalışmada geri dönüş kaybı ile yönlülük değerlerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

Bu kapsamda araştırma; anten tasarımının oluşturulması, parametre aralıklarının tanımlanması, optimizasyon algoritmasının uygulanması ve sonuçların değerlendirilmesi aşamalarından oluşmaktadır. Optimizasyon sürecinde, bilgi parçaları arasındaki ilişkileri kullanarak çözüm uzayında etkin arama yapabilen IBI Mantık tabanlı IBI Mantık algoritması tercih edilmiştir (Mirrashid ve Naderpour, 2023). Literatürdeki klasik yöntemler çoklu parametre yapısına sahip problemlerde küresel optimuma ulaşmakta zaman zaman yetersiz kalabildiğinden, bu çalışma daha verimli bir yaklaşım sunmayı amaçlamaktadır (Li ve diğ., 2020; Wang ve diğ., 2014).

Araştırma modeli, özellikle anten tasarım parametrelerinin optimizasyonda ağırlıklandırılarak giriş veri seti aralıklarının değişken seçilmesi üzerine inşa edilmiştir. Sabit aralık yöntemlerinin performans kısıtlarını gösteren çalışmalar dikkate alınarak, bu çalışmada her bir parametre için uygun aralıkların dinamik belirlenmesi sağlanmış ve anten performansına etkisi incelenmiştir (Uluslu ve Allaberdiyev, 2024).

Çalışmanın uygulama akışı şu adımlardan oluşmaktadır:

1. Çok bantlı Vivaldi anten yapısının tanımlanması (2,4 GHz, 3,5 GHz ve 5 GHz).
2. Kritik anten parametrelerinin belirlenmesi.
3. Parametre ağırlıklarına göre değişken giriş aralığı yaklaşımının uygulanması.
4. IBI Mantık tabanlı IBI Mantık Algoritmasının (ILA) optimizasyon sürecine entegrasyonu.
5. MATLAB ortamında performans değerlendirmesi (S_{11} ve yönlülük).

6. Elde edilen sonuçların literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılması.

Bu akış doğrultusunda geliştirilen yöntem, çok bantlı anten tasarımında doğruluk seviyesini artırmayı ve daha hızlı yakınsama sağlamayı hedeflemektedir. Çalışmanın sonuçları, değişken parametre aralıkları ile IBI Mantık Algoritmasının (ILA) anten performansını iyileştirmede etkili olduğunu göstermektedir.

3.2. MATEMATİKSEL MODEL VE TEORİK ALTYAPI

3.2.1. Vivaldi Anteninin Teorik Modeli

Vivaldi antenler, geniş bant çalışma aralıkları, yüksek yönlülük değerleri ve üretim kolaylıkları nedeniyle modern kablosuz iletişim sistemlerinde önemli bir yer edinmiştir. Üstel açılan bir yarıklı yapıdan oluşan bu anten tipi, ilk olarak Gibson tarafından literatüre kazandırılmıştır (Gibson, 1979). Gibson tarafından tanımlanan bu anten geometrisi, dielektrik bir altlık üzerinde üstel biçimde genişleyen konik bir slot yapısı içerir ve elektromanyetik dalganın slot boyunca ilerledikçe serbest uzaya kontrollü bir şekilde saçılmasını sağlar. (Gibson, 1979). Çalışmada kullanılan Vivaldi anteninin bu üstel slot yapısı ve parametrik geometrisi, Şekil 3.1'de ayrıntılı olarak gösterilmiştir (Uluslu ve Beyaz, 2025).

Mikroşerit antenlerin kompakt yapıları, geniş bant genişlikleri ve üretim kolaylıkları nedeniyle özellikle son yıllarda kablosuz sistemlerde yoğun ilgi gördüğü bilinmektedir (Truong ve diğ., 2015; Yang ve diğ., 2018). Vivaldi anteni bu ailenin geniş bant performans sunan önemli üyelerinden biridir. IOT, WLAN, Bluetooth, ITS, RFID ve 5G gibi sistemlerde gereken yüksek veri hızları, düşük gecikme ve geniş bant gereksinimleri Vivaldi antenlerini bu uygulamalar için uygun hâle getirmektedir (Prasad ve diğ., 2018).

Vivaldi anten yapısı, alt frekans limitini belirleyen konik açıklık uzunluğuna ve açıklığın genişleme oranına göre şekillenir. Üstel flair yapısı, anten boyunca ilerleyen elektromanyetik enerjinin yavaşça serbest uzaya taşınmasını sağlayarak kararlı bir radyasyon modeli oluşturur (Gibson, 1979). Slot çizgi genişliği antenin empedans uyumluluğunu belirlerken, açıklık genişliği ve antenin toplam boyutu antenin minimum çalışma frekansını doğrudan etkiler. Bu nedenle tasarımda kullanılan parametrelerin her biri anten performansına doğrudan etki eder.

Literatürde Vivaldi anten performansını artırmak amacıyla çeşitli modifikasyonların uygulandığı görülmektedir. Örneğin yarıklı radyasyon yaması, kusurlu toprak yapıları veya yönlülüğü artırıcı yapılar gibi farklı tasarım varyasyonları geniş bant performansını geliştirmek

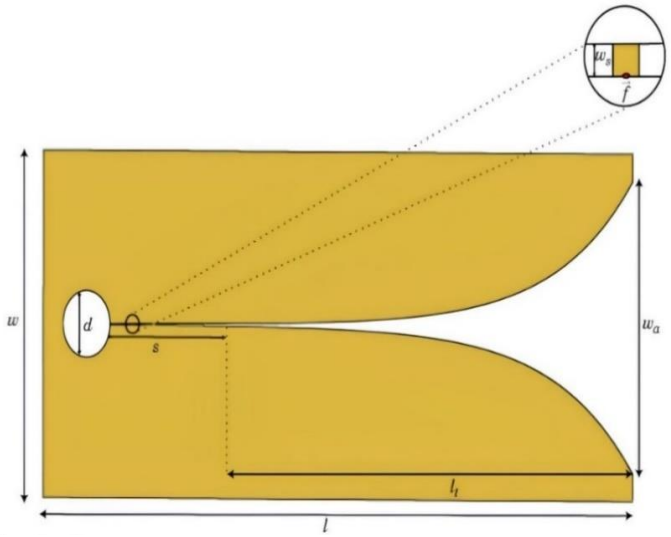
amacıyla önerilmiştir (Prasad ve diğ., 2018). Vivaldi anten ayrıca düzlemsel yapısı nedeniyle anten dizilerine uygulanmaya elverişlidir ve dizi yapılandırmalarında yüksek kazanç elde edilebilmektedir.

Bu çalışmada kullanılan Vivaldi anten modeli, literatürde yaygın şekilde kullanılan klasik üstel slot geometrisinin parametrik bir biçimde tanımlanmış versiyonudur. Belirtildiği üzere model toplam 10 tasarım parametresi içermekte olup bunların 7 tanesi optimizasyona dahil edilmiştir.

Tasarım parametrelerinin merkez değerleri literatürdeki standart anten boyutları dikkate alınarak belirlenmiş, değişken aralık seçimi ise optimizasyonun tasarım uzayında daha geniş bir araştırma kapasitesine sahip olmasını sağlamak amacıyla farklı yüzdelerde tanımlanmıştır.

Vivaldi antenin teorik modelinin merkezinde bulunan fiziksel prensip, antenin bir iletim hattı gibi davranan başlangıç bölgesi ile genişleyen konik bölge arasındaki süreksizliği minimuma indirerek elektromanyetik enerji aktarımını optimize etmektir. Besleme hattının slot yapısıyla uyumu, geri dönüş kaybı (S_{11}) üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Bu nedenle besleme kesitinin anten geometrisiyle uyumlu tasarlanması geniş bantlı düşük yansımaya sahip bir yapı elde edilmesi açısından kritik önemdedir.

Sonuç olarak Vivaldi anten modeli, geniş bant koşullarını sağlayan üstel konik geometrisi, parametrik olarak kontrol edilebilen yapısı ve yüksek yönlülük değerleri sayesinde çok bantlı kablosuz iletişim uygulamaları için oldukça uygun bir yapıdır. Bu araştırmada söz konusu modelin parametrik yapısı, giriş tasarım parametrelerinin ağırlıklarına göre değişen değer aralıkları kullanılarak IBI Mantık Algoritması ile optimize edilmiş ve her bir parametrenin anten performansı üzerindeki etkisi detaylı olarak incelenmiştir.



Şekil 3.1: Vivaldi antenin şematik görünümü ve tasarım parametreleri

3.2.2. Anten Tasarım Parametrelerinin Açıklanması

Vivaldi antenlerin performansı, anten geometrisini oluşturan temel tasarım parametrelerinin doğru belirlenmesine bağlıdır. Çalışmada kullanılan anten modeli toplam on adet tasarım parametresi içermektedir ve bu parametrelerin her biri antenin bant genişliği, yansıma katsayısı, yönlülüğü ve minimum çalışma frekansı gibi kritik performans ölçütleri üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Bu parametrelerin fiziksel yerleşimleri Şekil 3.1'de, sayısal merkez değerleri ise Tablo 3.1'de gösterilmiştir (Uluslu ve Beyaz, 2025).

Vivaldi antenin ilk parametre grubu, slot açıklığının başlangıç ve bitiş bölgelerini tanımlayan boyutsal değişkenlerden oluşur. Slot başlangıç genişliği ve slotun üstel olarak açıldığı bölgenin uzunluğu, antenin iletim hattı davranışını belirleyerek elektromanyetik enerjinin slot içine aktarımını kontrol eder. Slotun başlangıç kısmında dar bir açıklığın kullanılması, iletim hattı ile antenin empedans uyumluluğunu artırarak düşük frekanslarda yansımayı azaltır (Gibson, 1979). Slot genişliğinin üstel profil boyunca kademeli olarak artması ise antenin geniş bantlı çalışma karakteristiğinin temel belirleyicisidir. Bu parametrelerin merkez değerleri Tablo 3.1'de sunulan tasarım referansları dikkate alınarak belirlenmiştir.

Antenin ikinci parametre grubu, konik açıklığın genel geometrisini oluşturan genişlik ve uzunluk değerlerinden oluşur. Konik açıklığın maksimum genişliği antenin alt çalışma frekansını doğrudan belirleyen bir faktördür; literatürde düşük frekans limitinin açıklık genişliği ile sıkı bir ilişki gösterdiği bilinmektedir (Prasad ve diğ., 2018). Benzer şekilde anten uzunluğu, elektromanyetik dalganın serbest uzaya yumuşak geçiş yapabilmesi için gerekli fiziksel mesafeyi sağlayarak yönlülüğü ve kazancı belirler (Truong ve diğ., 2015). Bu

parametrelerin tamamı çalışmada Tablo 3.1'de verilen nominal değerler üzerinden optimize edilmiştir.

Üçüncü parametre grubu antenin besleme yapısı ve toprak düzlemine ilişkin boyutları içerir. Besleme hattının slot yapısıyla birleştiği geçiş bölgesi (transition section), geri dönüş kaybı (S_{11}) üzerinde kritik etkiye sahiptir. Besleme-enjeksiyon noktasında kullanılan genişlik ve uzunluk değerlerinin uygun seçilmesi, mikroşerit hattın konik açıklıkla empedans uyumunu iyileştirir. Bu nedenle bu parametreler hem literatürde önerilen değerler hem de Tablo 3.1'de verilen referans değerler doğrultusunda belirlenmiştir (Yang ve diğ., 2018).

Antenin dördüncü parametre grubu kavite yapısına ilişkin boyutları içerir. Kavitenin genişliği ve yüksekliği elektromanyetik alanların slot boyunca yönlendirilmesinde ve radyasyon veriminin artırılmasında önemli rol oynar. Özellikle çok bantlı tasarımlarda ışıma deseninin kararlılığını sağlamak için kavite parametrelerinin uygun aralıklarda seçilmesi gerekmektedir. Bu nedenle kavite ile ilgili tüm değerler de Tablo 3.1'de belirtilen merkez değerler üzerinden tanımlanmıştır.

Son parametre grubu ise antenin dielektrik yapı ile ilişkili tamamlayıcı boyutlarını içerir. Dielektrik malzemenin konumu ve boyutlandırması, dalganın anten boyunca ilerleme hızını ve etkin kırılma indisini belirler. Bu nedenle dielektrik tabanlı tüm parametreler çalışmada kullanılan substratın fiziksel özellikleriyle uyumlu olacak şekilde Tablo 3.1'de verilen temel değerler üzerinden seçilmiştir (Prasad ve diğ., 2018).

Bu on temel parametreden yedisi optimizasyona dahil edilmiştir. Parametrelerin seçiminde iki temel kriter dikkate alınmıştır: antenin hedef frekans bantlarında geri dönüş kaybının (S_{11}) azaltılması ve yönlülük performansının artırılması.

Bu amaçla her parametre için önce Tablo 3.1'de verilen merkez değerler referans olarak alınmış, ardından değişken aralık seçimi belirli oranlarda genişletilerek parametrik bir tasarım uzayı oluşturulmuştur. Böylece parametrelerin anten performansı üzerindeki göreli etkileri irdelenmiş ve giriş parametre ağırlıklarının optimizasyon sürecindeki rolü detaylı biçimde değerlendirilebilmiştir.

Tablo 3.1: Vivaldi anten tasarımı için parametrelerin tanımı ve aralıkları

Parametre Kodu	Tanımı	Merkez Değeri	Değer Aralığı
TaperLength (1)	Konik uzunluk	122 (mm)	± %50, ± %50
ApertureWidth (2)	Diyafram genişliği	52 (mm)	± %50, ± %35
SlotLineWidth (3)	Slot çizgi genişliği	0,25 (mm)	± %50, ± %40
CavityDiameter (4)	Kavite sonlandırma çapı	12 (mm)	± %50, ± %55

CavityToTaperSpacing (5)	Geçişin boşluktan sivriltmeye uzaklığı	12 (mm)	± %50, ± %65
GroundPlaneLength (6)	Toprak düzlemi uzunluğu	150 (mm)	± %50, ± %60
GroundPlaneWidth (7)	Zemin düzlemi genişliği	62 (mm)	± %50, ± %45
OpeningRate	Konik açılma oranı	25	Sabit
FeedOffset	X ekseni boyunca beslemeden uzaklık	3,00E-01	Sabit
Conductor	Metal malzemenin türü	Metal ("PEC")	Sabit

3.3. IBI MANTIK ALGORİTMASI (ILA)

Bu çalışmada Vivaldi anten tasarım parametrelerinin optimizasyonunda kullanılan IBI Mantık Algoritması (ILA), arama uzayını mantıksal ilişkiler üzerinden değerlendiren, çok aşamalı bir grup çalışma mantığına dayanan hibrit bir sezgisel yöntemdir. IBI Mantık algoritması, popülasyon tabanlı algoritmaların temel güçlü yönlerini korumakla birlikte, çözüm üretme mekanizmasını klasik stokastik yaklaşımlardan farklı olarak mantıksal çıkarım süreçleri üzerinden yapılandırır (Mirrashid ve Naderpour, 2023). Bu nedenle algoritma, anten tasarımı gibi yüksek boyutlu ve doğrusal olmayan problemlerde etkili bir çözümleme stratejisi sunmaktadır.

IBI Mantık Algoritmasının temel tasarımı üç aşamalı bir grup çalışma yapısı üzerine kuruludur: Hazırlık Fazı, ardından gelen 1., 2. ve 3. Aşama Grup Çalışmaları. Bu aşamalar, aday çözümler arasındaki benzerlik–farklılık ilişkilerini değerlendiren matematiksel modeller kullanır ve çözüm uzayında hem keşif (exploration) hem de istismar (exploitation) dinamiklerini dengeli biçimde yürütür. Grup tabanlı yaklaşım, popülasyonun farklı bölümlerinin birbirini tamamlayıcı biçimde gelişmesini sağlayarak yerel minimuma takılma riskini azaltmaktadır.

Çalışmada IBI Mantık Algoritmasının tercih edilmesinin en önemli nedeni, Vivaldi anten tasarımında kullanılan çok sayıda parametrik bileşenin birbirleriyle yüksek derecede bağlı elektromanyetik etkileşimler üretmesidir. Parametrelerin hem tekil hem de birlikte oluşturduğu etkilerin analiz edilmesi, deterministik yöntemlerle çözülmesi güç geniş bir arama uzayı ortaya çıkarmaktadır. IBI Mantık Algoritmasının mantıksal güncelleme yeteneği, bu arama uzayını daha düzenli biçimde araştırarak daha kararlı ve optimuma daha yakın sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.

Optimizasyon sürecinde anten performansı iki temel ölçüte dayalı olarak değerlendirilmiştir: hedeflenen frekanslarda geri dönüş kaybının (S_{11}) iyileştirilmesi ve antenin

yönlülüğünün artırılması. Bu amaç doğrultusunda oluşturulan maliyet fonksiyonu, IBI Mantık Algoritmasının grup çalışma aşamalarında kullanılan güncelleme mekanizmasının yönünü belirleyen temel kriter olmuştur. İlgili matematiksel ifadeler ve algoritmanın yapısal akışı sırasıyla Şekil 3.2, Tablo 3.2 ve Şekil 3.3'te sunulmaktadır (Uluslu ve Beyaz, 2025).

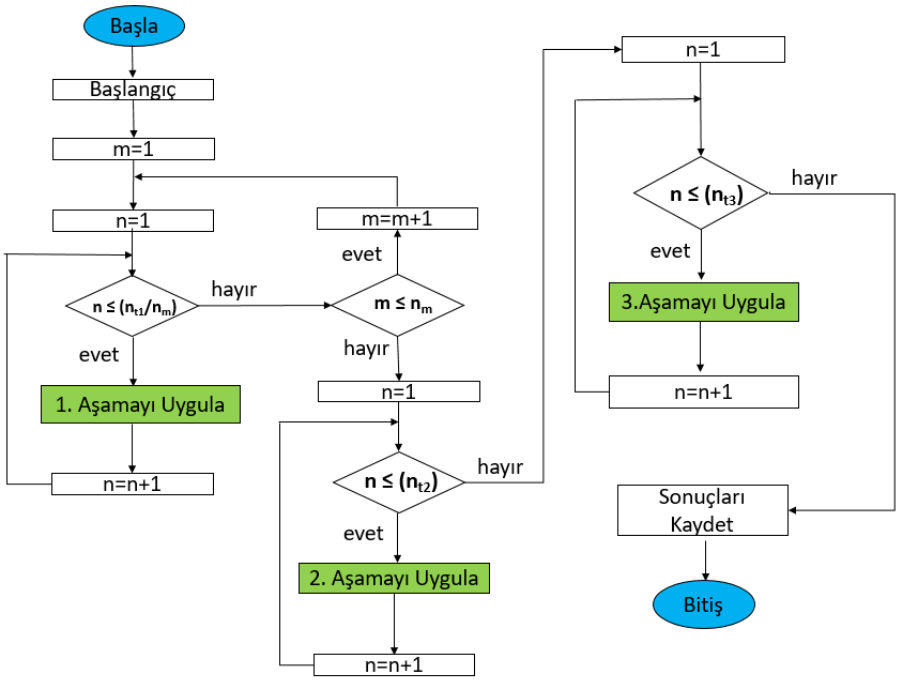
3.3.1. IBI Mantık Algoritmasının Teorik Temeli

IBI Mantık Algoritması, çözüm adayları arasındaki ilişkileri mantıksal değerlendirme süreçleriyle analiz eden ve bu analizlerden elde edilen sonuçlara göre yeni çözümler üreten bir optimizasyon yöntemidir. Algoritmanın merkezinde, bireylerin grup çalışmaları içerisinde birbirleriyle etkileşerek gelişmesini sağlayan "mantıksal güncelleme" mekanizması bulunur. Bu mekanizma, çözüm uzayında belirli bölgelerde yoğunlaşmayı veya bu bölgelerden uzaklaşmayı kontrol eden matematiksel ilişki ölçütlerine dayanır (Mirrashid ve Naderpour, 2023).

IBI Mantık Algoritmasının yapısı üç temel grup çalışması aşaması ile bu aşamalara hazırlık niteliği taşıyan bir Hazırlık Fazı olmak üzere dört ana bölümden oluşur. Hazırlık Fazı'nda çözümler rastgele dağıtılmış başlangıç popülasyonu olarak oluşturulur ve amaç fonksiyonlarına göre ilk değerlendirmeler yapılır. Sonraki üç aşama her iterasyonda çözümleri geliştirmek üzere mantıksal ilişkileri kullanır. Bu ilişkiler, bireylerin birbirlerine olan benzerliklerini, farklılıklarını ve performans seviyelerini dikkate alarak çözümlerin hangi yönde güncelleneceğini belirler.

Çalışmada kullanılan IBI Mantık Algoritmasının teorik avantajı, popülasyonu yalnızca rastlantısal dağılımlara değil, aynı zamanda mantıksal gruplandırma süreçlerine dayalı olarak güncellemesidir. Böylece hem keşif kapasitesi korunur hem de optimuma yakın bölgelerde daha hassas bir iyileştirme yapılır. Bu özellikler, anten tasarımı gibi çok boyutlu problemlerde klasik algoritmalara göre daha istikrarlı ve kararlı sonuçlar elde edilmesine katkı sağlamıştır.

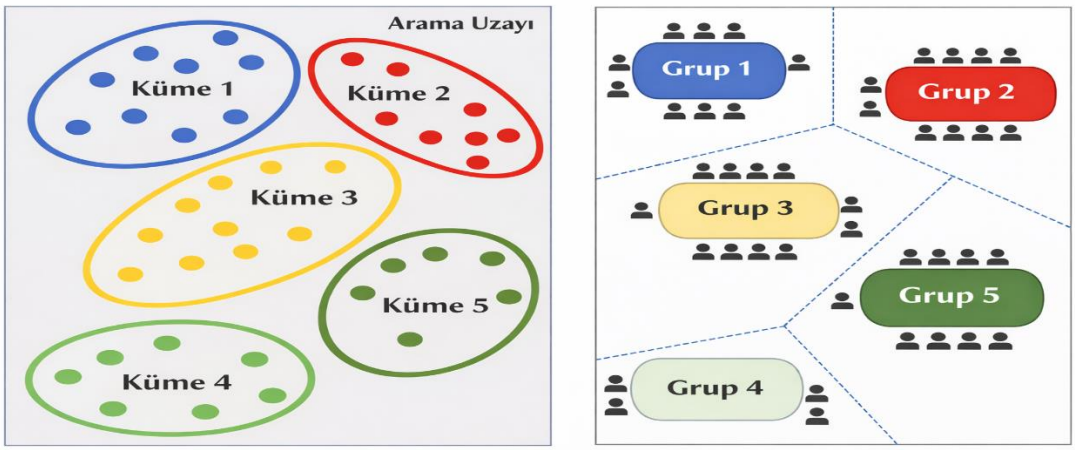
Bu teorik temelin ardından, algoritmanın uygulama sürecini görsel olarak açıklayan Şekil 3.2, matematiksel yapı taşlarını içeren Tablo 3.2 ve algoritmanın güncelleme akışını ayrıntılı biçimde gösteren Şekil 3.3 sunulmaktadır (Uluslu ve Beyaz, 2025).



Şekil 3.2: IBI mantık algoritmasının genel akış diyagramı

Tablo 3.2: IBI mantık algoritmasının parametreleri

Parametreler	**Tanım**	**Rastgele Değer**
N_T	Tekrarlama sayısı	Kullanıcı tarafından belirlenir
n_{NL}	Uzman sayısı (her uzman bir mantık dışını temsil eder)	Kullanıcı tarafından belirlenir
n_m	Model sayısı	5
$n_{g,max}$	Her modeldeki maksimum grup sayısı	(nNL)/2
B_{min}	IBL parametreleri için minimum sınır	0,4
B_{max}	IBL parametreleri için maksimum sınır	0,6
p_{s1}	Aşama 1 de ki maksimum tekrarlama yüzdesi	%33
P_{s2}	Aşama 2 de ki maksimum tekrarlama yüzdesi	%33
n_{rep}	Kümeleme için çoğaltma sayısı	10
t_{clus}	n_{rep} çoğaltmalarında sınıflandırmayı birleştirme girişimlerinin sayısı	100



(a) (b)

Şekil 3.3: Uzmanların gruplandırılması: (a) Arama alanında kümeleme yaklaşımı, (b) Uzmanları her gruba atama

3.3.1.1. *Hazırlık Fazı (Preparation Phase)*

Önerilen IBI Mantık Algoritmasının ilk adımı olan Hazırlık Fazı, optimizasyon sürecinin başlangıç koşullarının belirlendiği ve algoritmanın çalışma yapısının oluşturulduğu aşamadır. Bu fazda ilk olarak Tablo 3.2'de verilen IBI Mantık Algoritması parametrelerinin başlangıç değerleri tanımlanmakta ve ardından her bir model için uygulanacak yineleme sayısı belirlenmektedir. Belirtildiği üzere, $\mathbf{t_m}$ olarak ifade edilen toplam yineleme sayısı Denklem (3.1) kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$t_m = \frac{nt1}{nm} \tag{3.1}$$

Burada $\mathbf{n_{t_1}}$, algoritmanın birinci aşaması için kullanılan yineleme miktarını ifade etmektedir ve bu değer Denklem (3.2) yardımıyla hesaplanmaktadır:

$$n_{t1} = p_{s1} N_T \tag{3.2}$$

Bu yapı doğrultusunda n_m adet modelin her biri, kendi yineleme sayısı kadar bağımsız biçimde optimize edilir. Her model, elde ettiği nihai çözümü bir sonraki modele aktarır ve bu işlem son modele kadar yinelenir. Böylece tüm modeller tamamlandığında, 1. aşamaya ilişkin yineleme fazı bitmiş olur ve ortaya çıkan sonuçlar 2. aşamaya devredilir.

Her bir modelin optimizasyon sürecine başlamadan önce, bütün popülasyon "uzmanlar" olarak ele alınır ve bu uzmanlar üzerinde tanımlanan k-ortalama kümeleme yöntemi uygulanır (Likas ve diğ., 2003; Xu ve WunschII, 2005). Bu işlem algoritmanın genel akışında Şekil 3.3'te

gösterilen ilk adımdır (Uluslu ve Beyaz, 2025). Buradaki amaç, uzmanların arama uzayı üzerindeki mevcut bilgisel konumlarını değerlendirerek onları benzerlik düzeylerine göre kümelere ayırmaktır.

Bu aşamada, her bireyin hangi kümeye atanacağını belirleyen $\mathbf{n_g}$ (grup sayısı) parametresi Denklem (3.3) kullanılarak rastgele seçilmektedir:

$$n_{g,m}=randi(n_{g,max)} \qquad m=1,\ldots\ldots,n_m \tag{3.3}$$

Ancak bazı modellerde ihtiyaç duyulan grup sayısının $\mathbf{n_{g,m}}$ değerinden küçük olması mümkündür. Böyle bir durumda Denklem (3.3) geçersiz sayılır ve önceki model için belirlenmiş grup sayısı bu modelde kullanılır. Bu yaklaşım, gruplar arası tutarlılığı korur ve algoritmanın yapısal bütünlüğünü sürdürür.

Kümeleme işlemi, k-ortalama yönteminin kareli Öklid mesafe metriğini temel alarak gerçekleştirilir. Bu nedenle her grubun üye sayısı birbirinden farklı olabilir ve algoritma bu esnek yapıyı destekler. Literatürde k-ortalama için alternatif metrik türleri önerilmiş olsa da, bu çalışmada kareli Öklid mesafesi tercih edilmiştir (Likas ve diğ., 2003; Xu ve WunschII, 2005).

Kümeleme tamamlandığında, her uzman belirli bir kümeye atanmış olur. Sonraki aşamada, bu kümeler IBI Mantık Algoritmasının 1. Aşama Grup Çalışması bölümünde kullanılmak üzere algoritmanın grup çalışma yapısına aktarılır. Böylece Hazırlık Fazı hem başlangıç popülasyonunu hem de mantıksal gruplandırmayı oluşturarak algoritmanın ilk aşamasını başlatmak için gerekli tüm bilgileri sağlamış olur.

3.3.1.2. *1. Aşama Grup Çalışması*

Hazırlık Fazı'nda oluşturulan kümeler, IBI Mantık Algoritmasının ilk mantıksal güncelleme sürecini oluşturan 1. Aşama Grup Çalışmasına doğrudan aktarılır. Bu aşamada temel amaç, uzmanların (yani popülasyondaki bireylerin) kendi grupları içinde etkileşime girerek karar verme ve geliştirme sürecini başlatmaktır. Bu aşama, algoritmanın mantıksal yapısının ilk uygulanabilir çıktısını üretmesi bakımından kritik öneme sahiptir.

1.Aşamada, her grup kendi içinde değerlendirilir ve bireylerin performansını belirleyen temel ölçüt olan maliyet değeri, verilen güncelleme modeli kullanılarak hesaplanır. Bu aşamada kullanılan güncelleme fonksiyonlarının matematiksel yapısı aşağıda belirtilen temel ifade üzerine kuruludur:

$$C_{i=}\sqrt{\sum_{i=1}^{n_{NL}}(E_i - L)^2} \tag{3.4}$$

Bu denklem, her bireyin kendi grubundaki diğer bireylerle olan ilişkisine göre nasıl bir güncelleme alacağını belirlemektedir. İlgili güncelleme işlemi, bireyin performans değerine (maliyet fonksiyonuna) bağlı olarak yönlendirilir. Daha düşük maliyetli bireyler, grubun mantıksal merkezini temsil eder ve diğer bireyler için referans görevi görür.

Aşama 1'de bireylerin konum güncellemeleri, grupların içsel benzerlik analizine dayanır. Bu kapsamda her birey için "mantıksal ağırlık" hesaplanır ve bu ağırlık aşağıdaki model üzerinden tanımlanır:

$$D_{i=}\sqrt{\sum_{i=1}^{n_{NL}}\left(E_i - E_{i,p}\right)^2} \tag{3.5}$$

Bu ağırlık, bireyin grubun genel eğilimi içindeki konumunu belirler. Ağırlığın yüksek olması bireyin grubun mantığını daha iyi temsil ettiğini, düşük ağırlık ise bireyin grubun mevcut mantıksal çizgisinden uzak olduğunu gösterir.

1.aşamanın temel mekanizması, gruplar içinde yapılan güncellemelerin bireylerin performansını iyileştirmeye yönelik olmasıdır. Bu iyileştirme adımı, bireylerin yeni çözüm değerlerini belirleyen aşağıdaki temel güncelleme formülü ile tanımlanır:

$$P_{i=}\sqrt{\sum_{i=1}^{n_{NL}}\left(E_i - E_{I,p}\right)^2} \qquad g=1\ldots\ldots,n_{g,m} \tag{3.6}$$

Bu güncelleme formülü, bir bireyin mevcut çözümünün bir sonraki iterasyonda nasıl yeniden şekilleneceğini belirler. Formül, bireyin hem mevcut performansını hem de grubu içindeki konumunu (mantıksal ağırlığını) dikkate alır. Böylece bireyler kademeli olarak daha iyi çözümlere yönlendirilir.

Aşama 1'de gerçekleştirilen güncelleme süreci hem popülasyon içi düzenlemeyi sağlar hem de çözüm uzayının belirli bölgelerine doğru kontrollü bir yakınsama başlatır. Bu aşama sayesinde algoritmanın ilk mantıksal iyileştirme döngüsü tamamlanır ve tüm bireylerin güncellenmiş çözümleri, ikinci aşama grup çalışmasına aktarılır.

Bu yapısıyla 1. Aşama Grup Çalışması, IBI Mantık Algoritmasının temel omurgasını oluşturur; popülasyonu yapılandırır, bireyleri mantıksal bir düzene sokar ve algoritmanın sonraki aşamalarında gerçekleştirilecek daha derin güncellemeler için uygun başlangıç zeminini oluşturur.

3.3.1.3. *2. Aşama Grup Çalışması*

Birinci aşamada gerçekleştirilen grup içi düzenleme ve ilk güncellemelerin ardından, IBI Mantık Algoritmasının ikinci aşaması olan 2. Aşama Grup Çalışması uygulanır. Bu aşama, algoritmanın keşif yeteneğini artıran ve uzmanlar arasındaki farklılıkların daha belirgin şekilde analiz edilmesini sağlayan kritik bir adımdır. Birinci aşama daha çok benzerlik temelli bir düzenleme yaparken, ikinci aşama bireyler arasındaki farklılıkları, yakınlıkları ve ölçülebilir ilişkileri ortaya koyarak optimizasyon sürecini genişletir.

3.3.1.4. *3. Aşama Grup Çalışması*

IBI Mantık Algoritmasının üçüncü aşaması olan 3. Aşama Grup Çalışması, optimizasyon sürecinin en güçlü istismar (exploitation) adımını temsil eder. Bu aşamada amaç, önceki iki aşamadan elde edilen mantıksal çıktıları kullanarak popülasyonun optimum çözüme daha hassas ve kontrollü bir biçimde yönlendirilmesini sağlamaktır. Birinci aşama daha çok benzerlik temelli bir düzenleme yapmış, ikinci aşama uzmanların farklılık ve yakınlık düzeylerini ortaya çıkarmış, üçüncü aşama ise bu iki aşamanın çıktılarından yararlanarak nihai iyileştirme sürecini yürütmektedir. Bu güncelleme modeli, bireyin önceki aşamalarda elde ettiği C_i, D_i ve P_i parametrelerini; mevcut maliyet değeri ile ilişkilendirerek daha rafine bir karar mekanizması üretir. Bu nedenle 3. aşama, C_i–D_i–P_i değerlerinin artık "ham bilgi" olmanın ötesine geçtiği ve bireyin nihai çözüm yönelimini belirleyen ana etmenler hâline geldiği aşamadır.

3.aşamanın en temel özelliği, popülasyonun en iyi bireyler tarafından yönlendirilmesidir. Bu nedenle yüksek performansa sahip bireylerin değerleri, diğer bireyler için referans niteliği taşır. Bu referans değerler, aşağıdaki genel mantıksal yapıya uygun olarak bireyler arasında bilgi akışı sağlar:

Bu yapı, algoritmanın optimum çözüm çevresine yüksek doğrulukla yakınsamasını sağlar. Güncellemeler birinci ve ikinci aşamalara kıyasla daha düşük büyüklükte yapılır; çünkü bu aşamada amaç keşif yapmak değil, mevcut en iyi çözümleri daha da iyileştirmek ve kararlılığa ulaştırmaktır.

Bu aşamanın sonunda popülasyonun büyük kısmı optimum çözüm bölgesine yakınsar. Özellikle anten tasarımı gibi çok değişkenli problemlerde 3. aşama, sonuçları belirleyen en kritik aşamadır; çünkü yüksek doğruluk gerektiren parametrelerde ince ayar yapılmasını sağlar. Bu sayede anten performansını belirleyen S_{11} ve yönlülük değerleri hedeflenen düzeye çekilir.

3.3.1.5. *Amaç Fonksiyonları ve Maliyet Fonksiyonu*

IBI Mantık Algoritmasının yönlendirilmesinde kullanılan temel değerlendirme ölçütleri, optimizasyon sürecinin amacına uygun şekilde oluşturulan amaç fonksiyonlarıdır. Amaç fonksiyonları, her bir bireyin çözüm performansını niceliksel olarak belirleyen ve algoritmanın tüm aşamalarında kullanılan mantıksal güncelleme mekanizmasının temel girdisini oluşturan yapılardır. Bu nedenle algoritmanın çözüm kalitesini doğrudan belirleyen ana unsur, amaç fonksiyonlarının doğru biçimde tanımlanması ve maliyet fonksiyonu ile ilişkilendirilmesidir.

Bu çalışmada anten tasarımının değerlendirilmesinde iki temel performans kriteri dikkate alınmaktadır: hedeflenen frekans aralıklarında elde edilen geri dönüş kaybı (S_{11}) ve antenin yönlülük (directivity) performansı.

S_{11} değeri, antenin besleme noktasına geri yansıyan gücü temsil ettiği için düşük değerler tercih edilir. Yönlülük ise antenin belirli bir doğrultuda ne kadar güçlü ışıma yaptığını gösterir ve genellikle yüksek değerler hedeflenir. Bu iki ölçüt, anten tasarımının başarımını en gerçekçi şekilde yansıtan tamamlayıcı kriterlerdir.

Amaç fonksiyonunun matematiksel tanımı, optimizasyona katılan bireyin ilgili frekanslar için ürettiği performans değerleri üzerinden hesaplanmakta ve aşağıdaki biçimde ifade edilmektedir:

$$AF_1 = \frac{1}{\text{Yönlülük}} \tag{3.7}$$

$$AF_2 = \frac{1}{-S_{11}dB} \tag{3.8}$$

Bu amaç fonksiyonu, antenin tüm çalışma bantlarındaki performansını birlikte değerlendiren bir yapıya sahiptir. Böylece yalnızca tek bir bantta iyi sonuç veren ancak diğer bantlarda istenen performansı göstermeyen çözümler elenir. Bu durum, özellikle çok bantlı anten tasarımlarında optimizasyonun kararlılığını artırır.

Amaç fonksiyonunun hesaplanmasının ardından bireyin toplam performansını temsil eden maliyet fonksiyonu elde edilir. Maliyet fonksiyonu, amaca ne kadar yakın olunduğunu gösteren bir performans ölçütüdür ve algoritmanın mantıksal güncellemelerinde yönlendirici bir role sahiptir. Maliyet fonksiyonunun genel formu aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\text{Maliyet} = \sum_{f=i} AF_1 + AF_2 \quad (i = 2{,}4;\ 3{,}5;\ 5\ ) \tag{3.9}$$

Bu fonksiyon düşük değer aldığında birey optimum çözüm bölgesine yakın demektir. Bu nedenle algoritma boyunca yapılan tüm güncellemeler, maliyeti düşürmeye yönelik olarak gerçekleştirilir. Böylece popülasyonun genel eğilimi optimum çözüme doğru yönlendirilmiş olur.

Amaç ve maliyet fonksiyonları, algoritmanın üç grup çalışma aşamasında hesaplanan C_i, D_i ve P_i parametreleriyle birlikte değerlendirilerek bireylerin yeni konumları için temel mantıksal referansı oluşturur. Bu nedenle hem optimizasyon sürecinin başlangıcında hem de her iterasyon sonunda hesaplanarak algoritmanın doğrusal olmayan arama uzayını etkili biçimde taramasını sağlar.

Bu yapısıyla amaç fonksiyonları ve maliyet fonksiyonu, IBI Mantık Algoritmasının genel performansını belirleyen ana değerlendirme mekanizması olup, optimizasyon sürecinin hem doğruluğunu hem de kararlılığını doğrudan etkileyen kritik bir bileşen olarak görev yapmaktadır.

4. BULGULAR

4.1. IBI MANTIK ALGORİTMASI İÇİN OPTİMAL GİRİŞ PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE KLASİK ALGORİTMALARLA KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde, çok bantlı Vivaldi anten tasarımı için uygulanan optimizasyon sürecinde IBI Mantık Algoritması (ILA**)** ile elde edilen performans çıktıları ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Optimizasyonun temel amaçlarından biri, antenin hedeflenen üç çalışma bandında (2,4 GHz, 3,5 GHz ve 5 GHz) daha düşük maliyet değerlerine ulaşmasını sağlamak ve böylece hem S_{11} performansını hem de yönlülük değerlerini iyileştirmektir. Bu bağlamda algoritmanın davranışını anlamak için popülasyon tabanı, yineleme davranışları ve klasik optimizasyon yöntemleriyle karşılaştırma yapılmıştır.

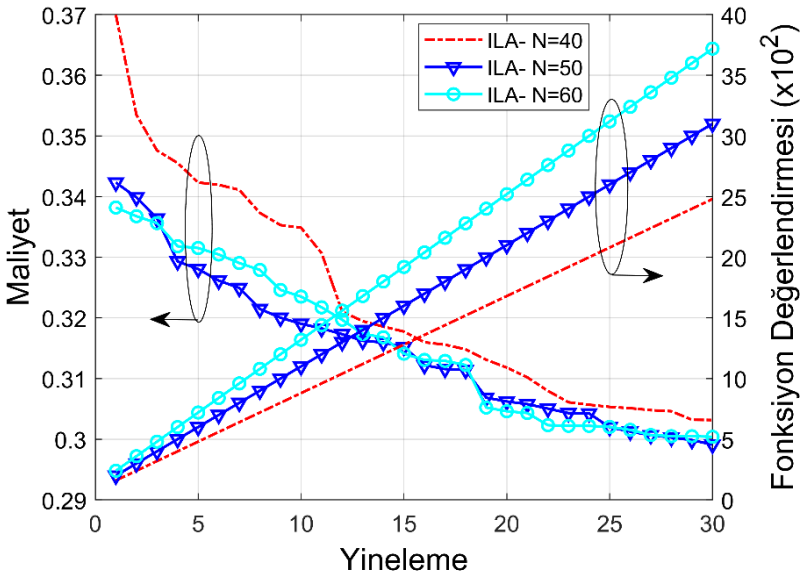
Öncelikle, algoritmanın performansı üzerindeki popülasyon tabanı seçiminin etkisini inceleyebilmek amacıyla üç farklı popülasyon değeri (40, 50 ve 60) için optimizasyon süreci gerçekleştirilmiştir. Her popülasyon değeri için algoritma on koşu boyunca tekrarlanmış ve en iyi maliyet–fonksiyon değerlendirme numarası eğrileri Şekil 4.1'de verilmiştir. Bu grafik, IBI Mantık Algoritmasının yinelemeler boyunca maliyet fonksiyonunu nasıl azalttığını ve popülasyon değişimi karşısında algoritmanın davranışını açık biçimde göstermektedir

Şekil 4.1'deki eğrilerin sayısal karşılıkları ise Tablo 4.1'de detaylandırılmıştır. Tablo 4.1 incelendiğinde, popülasyon boyutunun 50 seçildiği durumda hem minimum hem de ortalama maliyet değerlerinin diğer popülasyon seçeneklerine göre daha düşük olduğu görülmektedir. Dolayısıyla çalışma kapsamında en uygun popülasyon büyüklüğü N = 50 olarak belirlenmiş ve algoritmanın geri kalan aşamaları bu popülasyon değeri kullanılarak yürütülmüştür

IBI Mantık algoritmasının optimizasyon performansının daha iyi anlaşılabilmesi için algoritma, literatürde sıklıkla kullanılan DEA ve PSO gibi klasik optimizasyon yöntemleriyle de karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda elde edilen maliyet–FDN (Fonksiyon Değerlendirme Numarası) eğrileri Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Grafikler, özellikle yinelemelerin ilerleyen aşamalarında IBI Mantık Algoritmasının daha hızlı yakınsadığını ve daha düşük maliyet değerlerine ulaştığını ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, IBI Mantık

Algoritmasının çok bantlı anten tasarımı gibi çok boyutlu ve yüksek karmaşıklığa sahip problemlerde geleneksel yöntemlere kıyasla daha etkin olduğunu göstermektedir

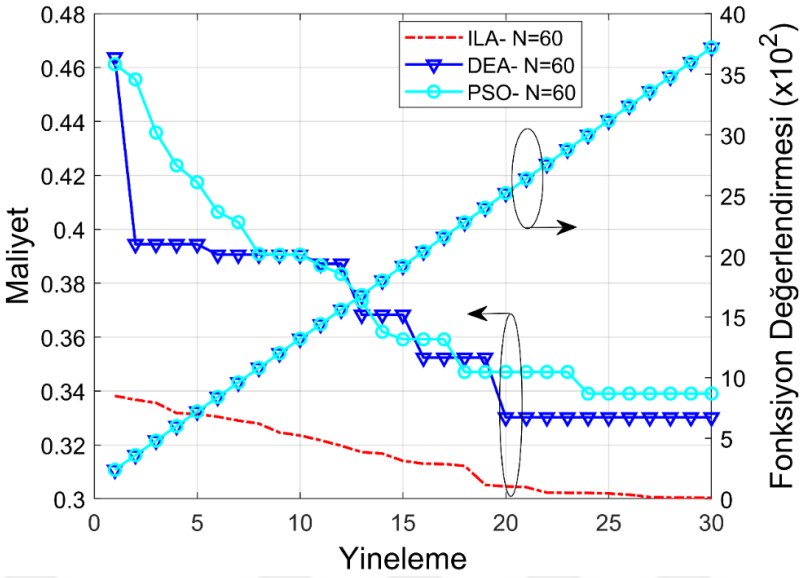
Bu kapsamlı analiz sonucunda, IBI Mantık Algoritmasının popülasyon tabanı doğru seçildiğinde stabil, düşük maliyetli ve yüksek doğrulukla çözümler ürettiği görülmüştür. Çalışmanın devamında IBI Mantık Algoritmasının ile belirlenen bu en uygun parametrelere dayalı olarak giriş parametre ağırlıkları ve veri seti aralığı seçiminin performansa etkileri incelenmiş ve tasarımın bütün optimizasyon süreci aşamalı şekilde değerlendirilmiştir.



Şekil 4.1: Çok bantlı Vivaldi anten tasarımında IBI mantık algoritması ile popülasyon tabanlı 10 koşu içerisinden seçilen optimizasyonun en iyi performansının yinelemeli tipik maliyet ve FD varyasyonları

Tablo 4.1: Çok bantlı Vivaldi anten tasarımında IBI mantık algoritması ile popülasyon tabanlı optimizasyonun performans sonuçları

Popülasyon		Minimum	Ortalama	Maksimum
40	Maliyet	0,3032	0,3228	0,3700
	FDN	2480	2480	160
50	Maliyet	0,2991	0,3147	0,3423
	FDN	3100	3100	200
60	Maliyet	0,3004	0,3155	0,3382
	FDN	3600	3720	240



Şekil 4.2: Çok bantlı Vivaldi anten tasarımında IBI mantık algoritması ile diğer algoritmalar ile 10 koşu içerisinden seçilen optimizasyonun en iyi performansının yinelemeli tipik maliyet ve FD varyasyonları

4.2. GİRİŞ PARAMETRE AĞIRLIKLARININ BELİRLENMESİ

Optimizasyon sürecinin en kritik adımlarından biri, anten geometrisini oluşturan giriş parametrelerinin performans üzerindeki göreli etkilerinin belirlenmesidir. Vivaldi anten tasarımı çok sayıda geometrik bileşenden oluştuğu için her bir tasarım parametresinin optimizasyondaki önem düzeyinin anlaşılması hem algoritmanın daha etkili yönlendirilmesi hem de tasarım sürecinin daha kontrollü ilerlemesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle bu bölümde her bir parametrenin optimizasyon çıktıları üzerindeki katkısı sistematik olarak değerlendirilmiştir.

Bu amaç doğrultusunda giriş parametre ağırlıkları, her bir parametrenin tek tek sabit tutulduğu ve diğer altı parametrenin optimizasyona dahil edildiği yedi ayrı test koşusu üzerinden belirlenmiştir. Bu yaklaşım sayesinde herhangi bir giriş parametresi sabitlendiğinde algoritmanın performansında meydana gelen değişim gözlemlenmiş ve bu değişim ilgili parametrenin optimizasyondaki göreli önemini ortaya koymuştur. Eğer bir parametre sabitlendiğinde maliyet fonksiyonunda belirgin bir yükselme oluyorsa, söz konusu parametrenin sistem üzerinde yüksek ağırlığa sahip olduğu kabul edilmiştir. Tersi durumda ise ilgili parametrenin optimizasyondaki ağırlığının daha düşük olduğu değerlendirilmiştir.

Her bir test koşusundan elde edilen sonuçlar Tablo 4.2'de sunulmuştur. Tablo 4.2 incelendiğinde, parametreler arasında belirgin bir ağırlık farkı olduğu görülmektedir. Bazı

parametreler sabitlenmesine rağmen maliyet fonksiyonunda kayda değer bir değişim oluşturmazken, bazıları antenin performansını belirgin şekilde etkilemiştir. Bu da parametrelerin optimizasyondaki etkilerinin homojen olmadığını açıkça göstermektedir.

Tablo 4.2'ye göre optimizasyon sürecinde en düşük ağırlığa sahip giriş parametresi Diyafram genişliği (ApertureWidth) olurken, en yüksek ağırlığa sahip olan parametrenin Geçişin boşluktan sivriltmeye uzaklığı (CavityToTaperSpacing) olduğu tespit edilmiştir. Parametre ağırlıklarının düşükten yükseğe doğru sıralanışı şu şekildedir:

- Diyafram genişliği (ApertureWidth)
- Slot çizgi genişliği (SlotLineWidth)
- Zemin düzlemi genişliği (GroundPlaneWidth)
- Konik uzunluk (TaperLength)
- Kavite sonlandırma çapı (CavityDiameter)
- Toprak düzlemi uzunluğu (GroundPlaneLength)
- Geçişin boşluktan sivriltmeye uzaklığı (CavityToTaperSpacing)

Bu sıralama, anten tasarımının optimize edilmesinde en kritik parametrenin kavite ile taper bölgesi arasındaki mesafe olduğunu göstermektedir. Kavite geometrisi antenin elektriksel davranışını ve radyasyon karakteristiğini doğrudan etkilediğinden, bu parametrenin optimizasyonda daha baskın bir rol oynadığı anlaşılmaktadır. Buna karşın diyafram genişliği (ApertureWidth) daha düşük ağırlık gösterdiğinden, anten performansına diğer parametreler kadar güçlü bir etkide bulunmadığı görülmektedir.

Bu bölüm kapsamında elde edilen bulgular, takip eden aşamada uygulanacak değişken giriş veri aralığı belirleme stratejisinin temelini oluşturmakta ve algoritmanın daha etkili yönlendirilmesine katkı sağlamaktadır. Böylece optimizasyon sürecinin sonraki adımlarında her bir parametre, kendi ağırlığına uygun bir aralık içerisinde optimize edilerek daha dengeli ve performans odaklı bir tasarım elde edilmiştir.

Tablo 4.2: Çok bantlı Vivaldi anten tasarımında IBI mantık algoritması ile azaltılmış sabit giriş parametre yöntemi ile optimizasyonun performans sonuçları

Eksik Olan Parametre	Minimum	Ortalama	Maksimum
Diyafram genişliği (2)	0,3040	0,3296	0,3646
Slot çizgi genişliği (3)	0,3042	0,3205	0,3521
Zemin düzlemi genişliği(7)	0,3046	0,3245	0,3699
Konik uzunluk (1)	0,3074	0,3153	0,3413
Kavite sonlandırma çapı (4)	0,3076	0,3247	0,3421
Toprak düzlemi uzunluğu (6)	0,3190	0,3279	0,3443
Geçişin boşluktan sivriltmeye uzaklığı (5)	0,3212	0,3329	0,3553

4.3. SABİT VE DEĞİŞKEN GİRİŞ VERİ SETİ ARALIĞININ OPTİMİZASYON PERFORMANSINA ETKİSİ

Optimizasyon problemlerinin başarısını etkileyen en önemli unsurlardan biri, giriş veri seti aralığının doğru biçimde belirlenmesidir. Vivaldi anten gibi çok boyutlu ve yüksek parametre duyarlılığına sahip bir yapıda, giriş parametrelerinin hangi aralıklarda değiştirileceği, algoritmanın arama uzayını doğrudan şekillendirmekte ve elde edilecek optimum çözümün kalitesini belirlemektedir. Bu nedenle bu bölümde, sabit aralık kullanımı ile parametre ağırlıklarına göre belirlenen değişken aralık kullanımının optimizasyon performansına etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir.

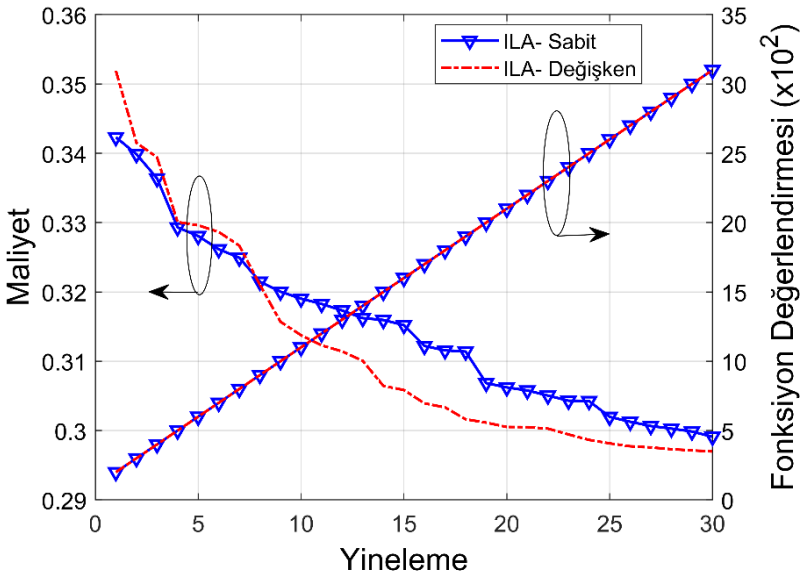
Çalışmanın ilk aşamasında, tüm giriş parametreleri için sabit bir aralık belirlenmiş ve IBI Mantık Algoritması bu aralık içerisinde çalıştırılmıştır. Sabit aralık yaklaşımı, parametrelerin etkilerinin eşit kabul edildiği klasik yöntemi temsil etmektedir. Ancak önceki bölümde yapılan analizlerde, her bir giriş parametresinin anten performansı üzerindeki etkisinin farklı olduğu görülmüştür. Bu nedenle sabit aralıkların bazı parametreler için gereğinden geniş veya dar kalabileceği ve algoritmanın optimum çözüme ulaşmasını zorlaştırabileceği öngörülmektedir.

Bu tespitin ardından optimizasyonda ikinci aşamaya geçilmiş ve giriş parametreleri için ağırlık temelli değişken veri aralığı belirlenmiştir. Parametre ağırlıkları, önceki bölümde açıklanan yedi ayrı test koşusunun sonuçlarına göre belirlenmiştir. Ağırlığı yüksek parametreler için daha dar fakat daha hassas aralıklar tanımlanırken, ağırlığı düşük parametreler için daha geniş aralıklar kullanılmıştır. Böylece her parametre, optimizasyona kendi önem düzeyi kadar etki edecek şekilde değerlendirilmiştir.

Sabit ve değişken veri seti ile yürütülen optimizasyon sonuçlarına ilişkin performans eğrileri Şekil 4.3'de gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde, değişken aralık yaklaşımının özellikle iterasyonların orta ve ileri bölümlerinde daha kararlı ve hızlı bir yakınsama sağladığı görülmektedir. Sabit aralıkta algoritma çözüm uzayında gereğinden geniş bir bölgede arama yaptığı için yakınsama davranışı düzensiz iken, değişken aralık yaklaşımı arama uzayını mantıklı biçimde daraltarak daha verimli bir güncelleme süreci oluşturmuştur.

Bu iki yaklaşım arasındaki performans farkları sayısal olarak Tablo 4.3'te sunulmuştur. Tablo incelendiğinde, değişken giriş aralıkları ile yapılan optimizasyonda maliyet değerlerinin belirgin biçimde daha düşük olduğu ve çözümün daha hızlı kararlı hâle geldiği anlaşılmaktadır. Ayrıca minimum maliyet değerlerinin değişken aralık modelinde daha başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu bulgular, değişken veri aralığı yaklaşımının algoritmanın arama yeteneğini güçlendirdiğini ve daha doğru sonuçlara ulaşmayı kolaylaştırdığını göstermektedir.

Sonuç olarak, parametre ağırlıklarına göre belirlenen değişken aralık yaklaşımı, sabit aralık kullanımına kıyasla optimizasyonda daha iyi performans sağlamıştır. Bu yaklaşım hem algoritmanın arama uzayını etkili şekilde daraltmış hem de yüksek ağırlığa sahip parametrelerin daha hassas biçimde optimize edilmesine imkân tanımıştır. Elde edilen bu bulgular doğrultusunda çalışmanın devam eden aşamasında tüm optimizasyon süreçleri değişken giriş veri seti aralığı kullanılarak yürütülmüştür.



Şekil 4.3: Çok bantlı Vivaldi anten tasarımında IBI mantık algoritması ile sabit/değişken giriş veri seti değer aralığı seçim tabanlı 10 koşu içerisinden seçilen optimizasyonun en iyi performansının yinelemeli tipik maliyet ve FD varyasyonları

Tablo 4.3: Çok bantlı Vivaldi anten tasarımında IBI mantık algoritması ile sabit/değişken giriş veri seti değer aralığı seçim tabanlı optimizasyonun performans sonuçları

Tür		Minimum	Ortalama	Maksimum
Sabit Giriş Veri Seti Aralığı	Maliyet	0,2991	0,3147	0,3423
	FDN	3100	3100	200
Değişken Giriş Veri Seti Aralığı	Maliyet	0,2970	0,3113	0,3519
	FDN	3100	3100	200

4.4. EN BAŞARILI ANTEN TASARIMININ SİMÜLASYON SONUÇLARI

Bu bölümde, önceki alt bölümlerde yürütülen optimizasyon süreçleri sonucunda elde edilen en başarılı Vivaldi anten tasarımının elektromanyetik performansı ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Optimizasyon işlemleri boyunca hedeflenen temel amaç, antenin üç çalışma bandında (2,4 GHz, 3,5 GHz ve 5 GHz) geri dönüş kaybı, yönlülük ve bant genişliği açısından ideal değerlere ulaşmasını sağlamaktır. Değişken giriş aralığı yaklaşımı ve IBI Mantık Algoritmasının sağladığı iyileştirmeler sonucunda, tasarım süreci boyunca elde edilen en iyi geometrik konfigürasyon seçilmiş ve bu yapı üzerinden kapsamlı simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen nihai anten geometrisi, hem açıklık bölgesi hem de kavite-taper etkileşimi açısından optimize edilmiş bir yapıya sahiptir. Parametre ağırlıkları dikkate alınarak oluşturulan tasarım, özellikle Geçişin boşluktan sivriltmeye uzaklığı (CavityToTaperSpacing), Zemin düzlemi genişliği (GroundPlaneLength) ve Kavite sonlandırma çapı (CavityDiameter) bileşenlerinde öne çıkan kritik değerleri içermektedir. Bu da antenin hem düşük frekanslarda hem de yüksek frekanslarda daha kararlı bir radyasyon davranışı sergilemesine imkân tanımıştır.

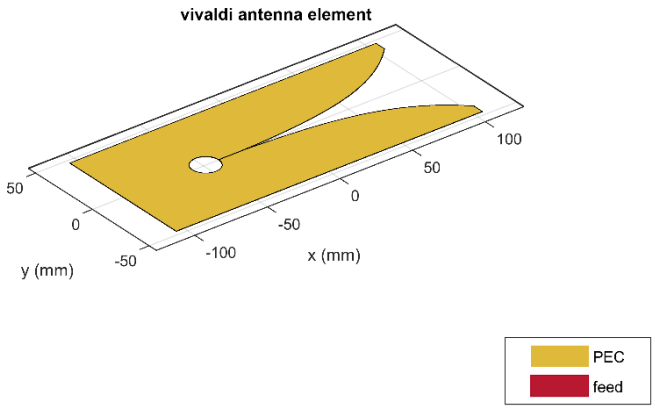
Tasarımın elde ettiği geri dönüş kaybı performansı Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, antenin üç çalışma bandında da -10 dB'nin altında kalan S_{11} değerleri ile oldukça geniş bantlı ve kararlı bir yapı ortaya koyduğu görülmektedir. Özellikle 3,5 GHz bandında geri dönüş kaybının belirgin şekilde iyileştiği, tasarımın orta bant performansında güçlü bir rezonans karakteristiği sergilediği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, optimizasyon sürecinin antenin giriş empedans uyumunu başarılı şekilde geliştirdiğini göstermektedir.

Antenin yönlülük performansı ise Şekil 4.5'de sunulmuştur. Şekil 4.5 incelendiğinde, antenin her üç bantta da yüksek yönlülük değerlerine ulaştığı ve özellikle yüksek frekans bölgesinde daha belirgin bir yönlü radyasyon örüntüsü oluşturduğu görülmektedir. Bu durum, taper geometrisinin optimize edilmesinin antenin ileriye dönük radyasyon kabiliyetini

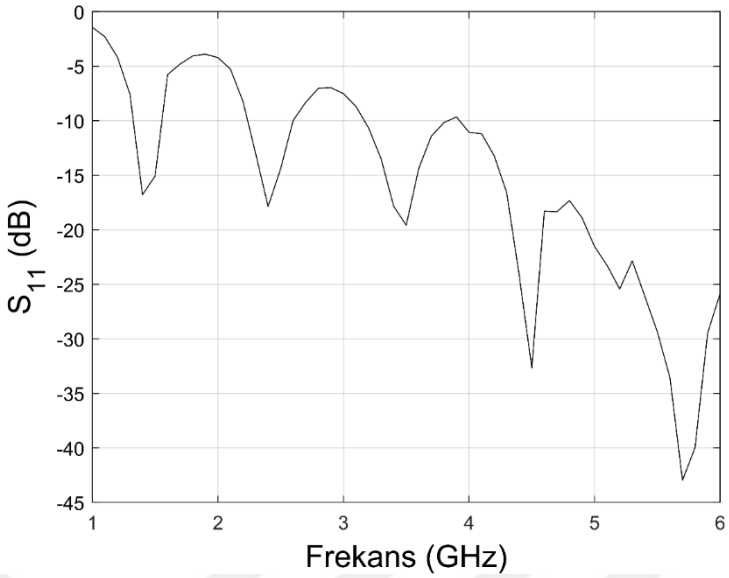
artırdığını göstermektedir. Ayrıca yan lob seviyelerinin kontrol altında tutulması, tasarımın hem verici hem de alıcı uygulamalar için uygun bir yönlendiricilik sağladığını ortaya koymaktadır.

Antenin üç boyutlu radyasyon örüntüsü ise Şekil 4.6'da verilmiştir. Bu şekil, antenin uzaysal radyasyon karakteristiğini bütüncül biçimde değerlendirmek açısından önemlidir. Radyasyon örüntüsü incelendiğinde, antenin geniş bant yapısını destekler nitelikte homojen bir dağılım sergilediği, ana lobun belirgin ve odaklı olduğu, yan lobların ise istenen seviyelerde tutulduğu görülmektedir. Bu sonuçlar anten tasarımının sadece frekans alanında değil, uzaysal dağılım açısından da başarılı bir performans ortaya koyduğunu göstermektedir.

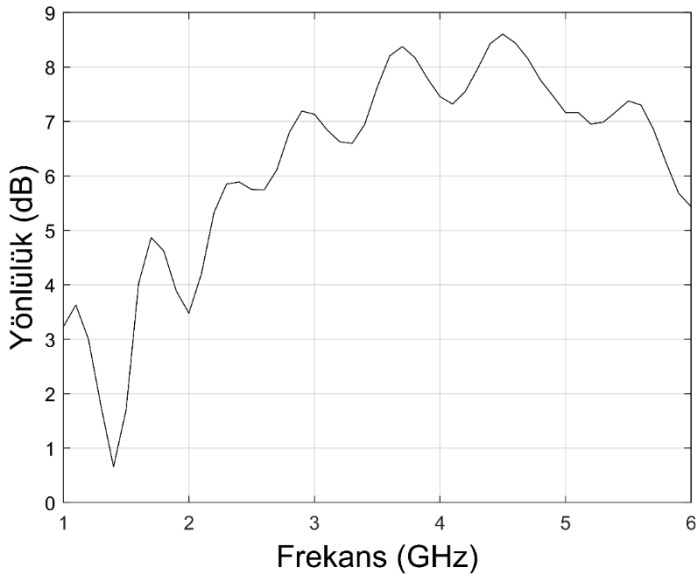
Genel olarak değerlendirildiğinde, optimizasyon sürecinde belirlenen giriş parametre aralıkları, IBI Mantık Algoritmasının yönlendirme kabiliyeti ve geometrik duyarlılık analizleri antenin performansına doğrudan olumlu katkı sağlamıştır. Elde edilen nihai tasarım hem geniş bant S_{11} performansı hem de yönlülük ve radyasyon örüntüsü açısından literatürde yer alan pek çok klasik tasarımdan daha iyi sonuçlar ortaya koymaktadır. Bu nedenle optimize edilmiş anten geometrisinin çok bantlı kablosuz iletişim uygulamalarında kullanılabilir nitelikte olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.4: Çok bantlı Vivaldi anten tasarımında IBI mantık algoritması ile elde edilen en başarılı antenin şematik görünümü



Şekil 4.5: Çok bantlı Vivaldi anten tasarımında IBI mantık algoritması ile elde edilen en başarılı antenin S_{11} (dB) parametresi simülasyonu



Şekil 4.6: Çok bantlı Vivaldi anten tasarımında IBI mantık algoritması ile elde edilen en başarılı antenin yönlülük parametresi simülasyonu

5. TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında, çok bantlı Vivaldi anten tasarımının optimizasyonunda IBI Mantık Algoritmasının (ILA) etkinliği araştırılmış ve elde edilen sonuçlar literatürde yaygın olarak kullanılan PSO ve DEA gibi yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Tartışma bölümünde, elde edilen bulguların anlamı, teorik çerçeveyle ilişkisi ve çalışmanın genel katkısı ele alınmıştır.

İlk olarak, popülasyon tabanı analizinde IBI Mantık Algoritmasının 50 kişilik popülasyon değeri ile en kararlı ve en düşük maliyetli sonuçları üretmesi, algoritmanın belirli bir popülasyon yoğunluğunda daha etkili çalıştığını göstermektedir. Bu durum, literatürde topluluk tabanlı optimizasyon tekniklerinde sıkça vurgulanan "uygun popülasyon ölçeği" kavramıyla uyumludur. Popülasyonun aşırı küçük olması arama çeşitliliğini azaltırken, gereğinden büyük olması hesaplama yükünü artırmaktadır. Bu çalışma, doğru popülasyon değerinin IBI Mantık Algoritmasının yakınsama verimliliğine doğrudan etki ettiğini ortaya koymuştur.

Giriş parametre ağırlıklarının belirlenmesine ilişkin bölümde, anten performansına en fazla etki eden parametrelerin kavite ve taper bölgesini ilgilendiren geometrik bileşenler olduğu görülmüştür. Literatürde Vivaldi antenlerin performansının özellikle açıklık genişliği, taper uzunluğu ve kavite geometrisi ile ilişkilendirildiği bilinmektedir. Bu çalışma, benzer biçimde ancak daha detaylı bir değerlendirme ile parametrelerin göreli etkilerini sayısal olarak ortaya koymuş ve anten tasarımında hangi parametrelerin daha hassas optimize edilmesi gerektiğini göstermiştir. Ağırlık temelli yaklaşım, klasik eşit aralık yöntemine kıyasla daha doğru sonuçlar vermiş ve optimizasyon stratejisinin etkinliğini artırmıştır.

Sabit ve değişken veri seti aralığı karşılaştırmasında, değişken aralık yaklaşımının daha hızlı ve stabil yakınsama sağlaması önemli bir bulgudur. Bu durum, optimizasyon algoritmalarının erken duraklamasını engelleyen ve algoritmayı daha doğru çözüm alanına yönlendiren bir strateji olarak değerlendirilebilir. Değişken aralık kullanımı, özellikle çok boyutlu, doğrusal olmayan anten geometrilerinde algoritmayı daha etkin hâle getirmiştir. Böylece tasarım sürecinde parametre duyarlılığı dikkate alınarak arama uzayı daha kontrollü biçimde yönetilmiştir.

Simülasyon sonuçları değerlendirildiğinde, elde edilen nihai anten tasarımının üç çalışma bandında da -10 dB'nin altında geri dönüş kaybı sağlaması, geniş bant karakteristiğinin başarılı şekilde optimize edildiğini göstermektedir. Ayrıca yönlülük ve radyasyon örüntüsü sonuçları, tasarımın özellikle yüksek frekanslarda güçlü bir yönelme karakteristiğine sahip

olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, literatürde sunulan klasik Vivaldi tasarımlarıyla karşılaştırıldığında daha iyi performans değerleri elde edildiğini göstermektedir. Dolayısıyla IBI Mantık Algoritması tabanlı optimizasyon yaklaşımının, tasarım verimliliğini artırdığı ve antenin kullanım potansiyelini genişlettiği söylenebilir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, çalışma hem optimizasyon algoritması hem de anten tasarım yaklaşımı açısından alana katkı sunmaktadır. IBI Mantık Algoritmasının klasik yöntemlere göre daha hızlı yakınsaması ve daha düşük maliyetli sonuçlar üretmesi, gelecekte bu algoritmanın farklı anten türleri ya da daha karmaşık elektromanyetik problemler üzerinde de etkili biçimde kullanılabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte çalışma, hesaplama maliyetlerinin popülasyon boyutu ve değişken aralık stratejisine bağlı olarak arttığı için bazı senaryolarda daha yüksek işlem gücü gerektirebileceğini ortaya koymaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, kablosuz iletişim sistemlerinde yaygın olarak kullanılan çok bantlı Vivaldi anteninin performansının artırılmasına yönelik bir optimizasyon yaklaşımı sunulmuştur. Çalışmada, anten tasarımında kritik öneme sahip geometrik parametrelerin seçimi için IBI Mantık tabanlı IBI Mantık Algoritması (ILA) algoritması kullanılmış ve giriş veri seti aralıklarının ağırlığa göre değişken seçilmesinin optimizasyon performansına etkisi araştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlar, değişken giriş aralığı yaklaşımının**,** sabit aralık seçimlerine kıyasla daha verimli bir arama yeteneği sunduğunu ve optimizasyon sürecine pozitif katkı sağladığını göstermiştir. Çalışma boyunca farklı frekans bantları için (2,4 GHz, 3,5 GHz ve 5 GHz) tasarlanan anten modellerinin performansı, geri dönüş kaybı (S_{11}) ve yönlülük gibi temel anten parametreleri üzerinden değerlendirilmiştir. MATLAB ortamında gerçekleştirilen simülasyonlar, önerilen yaklaşımın özellikle S_{11} değerlerinde iyileşme sağladığını ortaya koymuştur.

Literatürde, anten tasarımı için doğadan ilham alan algoritmalar ve yapay zekâ tabanlı optimizasyon yöntemleri yaygın şekilde kullanılmış olsa da giriş veri aralıklarının ağırlığa göre dinamik olarak belirlenmesinin anten performansı üzerindeki etkisi sınırlı sayıda incelenmiştir (Karaboga ve Basturk, 2008; Kennedy, 2006; Mahouti ve diğ., 2022). Bu bağlamda çalışma, giriş parametre aralığı seçiminin optimizasyon çıktıları üzerinde belirleyici bir etken olduğunu göstermesi bakımından literatüre katkı sunmaktadır. Ayrıca, daha önceki sabit veri aralığı temelli çalışmaların bir adım ötesine geçerek parametre seçiminde esneklik sağlayan bir yaklaşım ortaya koymuştur (Uluslu ve Allaberdiyev, 2024).

Sonuç olarak, IBI Mantık Algoritması ile değişken veri seti yaklaşımının çok bantlı Vivaldi anten tasarımında başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Çalışma, hem hesaplama verimliliği hem de performans artışı sağlayan yöntemin, çok bantlı anten tasarımında etkili bir araç olabileceğini göstermektedir.

6.1. ÖNERİLER

Bu araştırmanın bulgularına dayanarak aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

- Gelecek çalışmalarda farklı optimizasyon algoritmaları (örneğin PSO, GA, ABC vb.) ile IBI Mantık Algoritmasının performans karşılaştırması yapılabilir.
- Değişken veri aralığı yöntemi, sadece anten tasarımında değil, farklı mikrodalga devre ve RF bileşenlerinde de uygulanabilir.
- Anten tasarımı CST Studio Suite gibi tam dalga elektromanyetik simülasyon yazılımları ile doğrulanarak fiziksel prototip üretimi yapılabilir.
- Veri odaklı yaklaşımlara ek olarak hibrit optimizasyon yöntemleri (örneğin ANN + IBI Mantık algoritması veya Fuzzy + IBI Mantık Algoritması) araştırılabilir.

Çalışmanın sonuçları, yüksek frekanslı kablosuz sistemlerde verimli anten tasarımı için yeni bir optimizasyon perspektifi sunmakta olup, gelecekte IOT, radar sistemleri, 5G/6G iletişimi ve geniş bantlı RF uygulamalarında kullanılabilecek yöntemsel katkılar sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

Abderazek, H. ve diğ., 2020, Comparison of recent optimization algorithms for design optimization of a cam-follower mechanism, *Knowledge-Based Systems*.

Barmuta, P. ve diğ., 2015, Compact Behavioral Models of Nonlinear Active Devices Using Response Surface Methodology, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*.

Bayer Keskin, S.E., GÜLER, C., 2021, Design of Circular Slotted Rectangular Microstrip Patch Antenna with Dual-Resonance for WLAN/WIMAX Applications, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*.

Belen, M.A., 2024, Çok Bandlı Uygulamalar İçin Yüksek Performanslı Mikroşerit Anten Tasarımı, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*.

Cai, J. ve diğ., 2018, Support Vector Regression-Based Behavioral Modeling Technique for RF Power Transistors, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*.

Chavez-Hurtado, J.L., Rayas-Sanchez, J.E., 2016, Polynomial-Based Surrogate Modeling of RF and Microwave Circuits in Frequency Domain Exploiting the Multinomial Theorem, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*.

Çıldır, A., 2024, The Microstrip Array Antenna with Reflector at 1.4 And 2.4 Ghz for Radars Applications, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*.

Darmawidjaja, A.R., Wibowo, E.P., 2021, *Design and Simulation of Antipodal Vivaldi Antenna (AVA) AT 2.6 GHz For 5G Communication Optimation*, 2021 Sixth International Conference on Informatics and Computing (ICIC), IEEE. ISBN: 978-1-6654-2155-3.

Dhiman, G. ve diğ., 2021, MOSOA: A new multi-objective seagull optimization algorithm, *Expert Systems with Applications*.

Dong, J. ve diğ., 2019, Fast Multi-Objective Optimization of Multi-Parameter Antenna Structures Based on Improved BPNN Surrogate Model, *IEEE Access*.

Faramarzi, A. ve diğ., 2020, Equilibrium optimizer: A novel optimization algorithm, *Knowledge-Based Systems*.

Gao, D. ve diğ., 2020, Solving Fuzzy Job-Shop Scheduling Problem Using DE Algorithm Improved by a Selection Mechanism, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*.

Gibson, P.J., 1979, *The Vivaldi Aerial*, 1979 9th European Microwave Conference, IEEE.

Gu, Z.-M., Wang, G.-G., 2020, Improving NSGA-III algorithms with information feedback models for large-scale many-objective optimization, *Future Generation Computer Systems*.

Hang, D., Li, X., 2018, *Application of Improved Particle Swarm Optimization Algorithm Based on GSO in Optimization Design of FIR Digital Filter*, 2018 IEEE International Conference of Safety Produce Informatization (IICSPI), IEEE. ISBN: 978-1-5386-5514-6.

Hayyolalam, V., Pourhaji Kazem, A.A., 2020, Black Widow Optimization Algorithm: A novel meta-heuristic approach for solving engineering optimization problems, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*.

Jain, M. ve diğ., 2019, A novel nature-inspired algorithm for optimization: Squirrel search algorithm, *Swarm and Evolutionary Computation*.

Jia, Y. ve diğ., 2024, Design of Low-RCS Vivaldi Antenna Based on Characteristic Mode Analysis, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*.

Karaboga, D., Basturk, B., 2008, On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm, *Applied Soft Computing*.

Karimov, A. ve diğ., 2024, *Ultra-Wide Band Antipodal Vivaldi Antenna with a Metamaterial Structure for 5G Applications*, 2024 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and INC/USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/INC-USNC-URSI), IEEE. ISBN: 979-8-3503-6990-8.

Kennedy, J., 2006, *Swarm Intelligence*, Handbook of Nature-Inspired and Innovative Computing, Kluwer Academic Publishers, Boston.

Li, J., Han, Y., 2020, A hybrid multi-objective artificial bee colony algorithm for flexible task scheduling problems in cloud computing system, *Cluster Computing*.

Li, S. ve diğ., 2020, Slime mould algorithm: A new method for stochastic optimization, *Future Generation Computer Systems*.

Likas, A. ve diğ., 2003, The global k-means clustering algorithm, *Pattern Recognition*.

Liu, S. ve diğ., 2024, *Wideband Vivaldi Antenna and 2 X 8 Antenna Array Design*, 2024 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), IEEE. ISBN: 979-8-3503-8996-8.

Liu, S.-B. ve diğ., 2025, Miniaturization of Ultrawideband Horizontally Polarized Omnidirectional Vivaldi Antenna Arrays Using Nonuniform Elements, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*.

Mahouti, P. ve diğ., 2022, Design Optimization of Ultra-Wideband Vivaldi Antenna using Artificial Intelligence, *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*.

Mirrashid, M., Naderpour, H., 2021, Recent Trends in Prediction of Concrete Elements Behavior Using Soft Computing (2010–2020), *Archives of Computational Methods in Engineering*.

Mirrashid, M., Naderpour, H., 2023, Incomprehensible but Intelligible-in-time logics: Theory and optimization algorithm, *Knowledge-Based Systems*.

Naderpour, H. ve diğ., 2021, Failure mode prediction of reinforced concrete columns using machine learning methods, *Engineering Structures*.

Naderpour, H., Mirrashid, M., 2020a, Proposed soft computing models for moment capacity prediction of reinforced concrete columns, *Soft Computing*.

Naderpour, H., Mirrashid, M., 2020b, Estimating the compressive strength of eco-friendly concrete incorporating recycled coarse aggregate using neuro-fuzzy approach, *Journal of Cleaner Production*.

Naderpour, H., Mirrashid, M., 2020c, Bio-inspired predictive models for shear strength of reinforced concrete beams having steel stirrups, *Soft Computing*.

Niu, L. ve diğ., 2024, *An Ultra-wideband Circularly-polarized Vivaldi Antenna with Wide Beam Angel*, 2024 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES-China), IEEE. ISBN: 979-8-3503-5558-1.

Ochoa, J.S., Cangellaris, A.C., 2013, Random-Space Dimensionality Reduction for Expedient Yield Estimation of Passive Microwave Structures, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*.

Petrocchi, A. ve diğ., 2017, Measurement Uncertainty Propagation in Transistor Model Parameters via Polynomial Chaos Expansion, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*.

Pierezan, J. ve diğ., 2021, Chaotic coyote algorithm applied to truss optimization problems, *Computers & Structures*.

Prasad, R.V.H. ve diğ., 2018, *A Novel Fractal Slot DGS Microstrip Antenna for Wi-Fi Application*, 2018 IEEE Indian Conference on Antennas and Propogation (InCAP), IEEE. ISBN: 978-1-5386-7060-6.

Queipo, N. V. ve diğ., 2005, Surrogate-based analysis and optimization, *Progress in Aerospace Sciences*.

Rayas-sanchez, J., Gutierrez-Ayala, V., 2006, *EM-Based Statistical Analysis and Yield Estimation Using Linear-Input and Neural-Output Space Mapping*, 2006 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, IEEE. ISBN: 0-7803-9541-7.

Rossi, M. ve diğ., 2014, A Stochastic Framework for the Variability Analysis of Textile Antennas, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*.

Sujiansyah, D.A. ve diğ., 2018, *Antenna Design for Multi-generation 2G-5G for Rural Area Wireless Communications*, 2018 International Conference on ICT for Rural Development (IC-ICTRuDev), IEEE. ISBN: 978-1-5386-7781-0.

Sun, X.-Y. ve diğ., 2024, Ultrawideband Circularly Polarized Halved-Type Vivaldi Antenna With Symmetrical Radiation Pattern, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*.

Truong, L.X. ve diğ., 2015, *Design a microstrip antenna with defected ground structure*, 2015 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC), IEEE. ISBN: 978-1-4673-8372-1.

Uluslu, A., 2023, Fitting nonlinear mathematical models to the cost function of the quadrafilar helix antenna optimization problem, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*.

Uluslu, A., Allaberdiyev, K., 2024, Goose Algoritması Kullanılarak Çift Bantlı Mikroşerit Bağlantılı Kombine Bant Geçiren Filtre Tasarım Probleminde Dizi Aralık Seçiminin Sonuç Üzerindeki Etkisi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*.

Uluslu, A., & Beyaz, E. (2025). Giriş Parametrelerinin Ağırlıklarına Göre Değişken Dizi Aralık Seçiminin Ibı Mantık Algoritması ile Optimizasyon Performansına Etkisinin Çok Bantlı Vivaldi Anten Tasarımında Uygulanması. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(3), 728-744.

Wang, G.-G. ve diğ., 2014, Chaotic Krill Herd algorithm, *Information Sciences*.

Wang, J. ve diğ., 2018, Efficient gradient-based optimisation of pixel antenna with large-scale connections, *IET Microwaves, Antennas & Propagation*.

Xu, R., WunschII, D., 2005, Survey of Clustering Algorithms, *IEEE Transactions on Neural Networks*.

Yang, D. ve diğ., 2018, A Low Profile UWB Antenna for WBAN Applications, *IEEE Access*.

Yang, X.-S., 2020, Nature-inspired optimization algorithms: Challenges and open problems, *Journal of Computational Science*.

Yi, J.-H. ve diğ., 2020, Behavior of crossover operators in NSGA-III for large-scale optimization problems, *Information Sciences*.

Zhang, H., Zhang, F., 2024, A Novel Ultrawideband Miniature Vivaldi Antenna With Sawtooth Outer Edges and Inclined Elliptical Slots, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*.

Zhang, Y. ve diğ., 2020, Enhancing MOEA/D with information feedback models for large-scale many-objective optimization, *Information Sciences*.

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

EnesBEYAZ_Tez_V3

ORİJİNALLİK RAPORU

%4	%3	%2	%2
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Öğrenci Ödevi	%2
2	www.freepatentsonline.com İnternet Kaynağı	<%1
3	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	<%1
4	dergipark.org.tr İnternet Kaynağı	<%1
5	9lib.net İnternet Kaynağı	<%1
6	Ercan, Serap. "Bir Süpermarket Zincirinde Rotalama Probleminin Metasezgisel Algoritmalar Ile Çözülmesi", Sakarya Universitesi (Turkey), 2022 Yayın	<%1
7	acikerisim.atlas.edu.tr İnternet Kaynağı	<%1
8	earsiv.odu.edu.tr:8080 İnternet Kaynağı	<%1
9	scholars.lib.ntu.edu.tw İnternet Kaynağı	<%1
10	dspace.ankara.edu.tr İnternet Kaynağı	<%1