T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜÇ BOYUTLU SERAMİK TABANLI MİKRODALGA DEVRELERİN TASARIMI

Tarlan MAHOUTİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Üretim Programı

Danışman

Prof. Dr. Nilgün KUŞKONMAZ

Eş Danışman

Prof. Dr. Tülay YILDIRIM

Şubat, 2022

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜÇ BOYUTLU SERAMİK TABANLI MİKRODALGA DEVRELERİN TASARIMI

Tarlan MAHOUTİ tarafından hazırlanan tez çalışması 16.02.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Üretim Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Nilgün KUŞKONMAZ Yıldız Teknik Üniversitesi Danışman	Prof. Dr. Tülay YILDIRIM Yıldız Teknik Üniversitesi Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Nilgün KUŞKONMAZ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Cem AKÇA, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Mehmet Ali BELEN, Üye
İskenderun Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Nilgün KUŞKONMAZ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Üç Boyutlu Seramik Tabanlı Mikrodalga Devrelerin Tasarımı başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Tarlan MAHOUTİ

İmza

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince bana desteklerini esirgemeyen başta danışmanım Prof. Dr. Nilgün KUŞKONMAZ'a ve eş danışmanım Prof. Dr. Tülay YILDIRIM'a çok teşekkür ederim.

Tarlan MAHOUTİ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vi

KISALTMA LİSTESİ vii

ŞEKİL LİSTESİ ix

TABLO LİSTESİ xi

ÖZET xii

ABSTRACT xiv

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti ... 1

1.2 Tezin Amacı ... 3

1.3 Hipotez ... 3

2 MİKRODALGA DEVRELER 5

2.1 Filtre ve Çalışma Prensipleri ... 5

2.2 Mikroşerit İletim Hattı ... 8

2.3 Saçılma Parametreleri ... 9

3 MİKROŞERİT İLETİM HATTINDA TABAN MALZEME KULLANIMI 11

3.1 Taban Malzeme Kullanımı ... 11

3.2 Seramiklerin Taban Malzeme Olarak Kullanılması ... 11

3.3 Elektriksel İletkenlik ve Seramik Malzemelerde Dielektrik Sabiti ... 12

3.4 Dielektrik Seramiklerin Önemli Karakteristik Özellikleri ... 13

4 YAPAY ZEKA 15

4.1 Yapay Öğrenme ... 15

4.2 Meta-Sezgisel Optimizasyon Algoritmaları ... 18

5 MİKROŞERİT İLETİM HATLARININ YAPAY ZEKA İLE MODELLENMESİ 22

5.1 Düzlemsel Olmayan Mikroşerit İletim Hatlarının Yapay Sinir Ağı ile Modellenmesi ... 22

5.2 Düzlemsel Olmayan Mikroşerit Bant Geçiren Filtrenin Yapay Zeka ile Optimizasyonu ... 27

6 3B BASKILI ÜNİFORM OLMAYAN SERAMİK MİKROŞERİT FİLTRENİN VEKİL DESTEKLİ OPTİMİZASYONU 41

6.2 Üç Boyutlu Yazıcı Kullanılarak Üretilen Seramik Malzemeler ... 43

6.3 Üç Boyutlu Yazıcı ile Üretilen Seramik Tabanlı İletim Hat Modeli ... 44

6.4 İlettim Hattı Birim Elemanı ve Veri Kümesi Tasarımı ... 44

6.5 Seramik Tabanlı İletim Hat Modeli ile Yapay Zeka Modellerinin Geliştirilmesi 46
6.6 Seramik Tabanlı Mikroşerit İletim Hattı Tasarımının Uygulama Sonuçları 47
7 SONUÇ VE ÖNERİLER **52**
KAYNAKÇA **53**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **62**

SİMGE LİSTESİ

α	Alpha
β	Beta
tanδ	Dielektrik Kaybı
εr	Dielektrik Sabiti
δ	Gama/Delta
H	Hedef değer
Q	Kalite Faktörü
ω	Omega
τf	Sıcaklık Katsayılı Rezonans Frekansı
N	Toplam Örnek Sayısı
T	Tahmin Edilen Hayali Değer
P	Tahmin Edilen Gerçek Değer

KISALTMA LİSTESİ

3B	Üç Boyutlu
AM	Katmanlı Üretim
Al_2O_3	Alumina
CaO	Kalsiyum Oksit
CST	Bilgisayar Simülasyon Teknolojisi
ANN	Yapay Sinir Ağı
GPR	Gaussian Process Regression
CNN	Evrişimli Sinirsel Ağ
ÇKA	Çok Katmanlı Algılayıcı
DEA	Diferansiyel Evrim Algoritması
DL	Derin Öğrenme
DS	Dielektrik sabiti
EA	Evrimsel algoritmalar
EM	Elektromanyetik Alan
Fe_2O_3	Demir Oksit
GHz	Giga Hrtz
GWO	Grey Wolf Optimizasyonu
Im	İmajiner
ISM	Sınai, Bilimsel ve Tıbbi Cihaz Bantı
K_2O	Potasyum Oksit
LHS	Latin-Hyper Küp Örnekleme
M2LP	Modifiye Çok Katmanlı Algılayıcı
MgO	Magnezyum Oksit
MHz	Megahertz
MSA	Meta-Sezgisel Algoritma
NTL	Doğrusal Olmayan İletim Hattı
NUNPMF	Doğrusal Olmayan Düzlemsel Olmayan Mikroşerit Filtre

Re	Gerçel
RF	Radyo frekansı
SiCN	Silikon Karbonitrit
SiO_2	Silikon Dioksit
SOMYH	Simetrik Ortalama Mutlak Yüzde Hatası
SVM	Destek Vektör Makinesi
SVR	Destek Vektör Regresyonu
TiO_2	Titanyum Dioksit
Na_2O	Sodyum Oksit
OKKH	Ortalama Karekök Hatası
OMH	Ortalama Mutlak Hata
OYH	Ortalama Yüzde Hata
YSA	Yapay Sinir Ağı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Temel Filtre Çalışma Prensibi 6
Şekil 2.2 Filtre Çeşitleri [2] 7
Şekil 2.3 Yüksek Geçiren Filtre Çalışma Prensip Örneği.....7
Şekil 2.4 Alçak Geçiren Filtre Çalışma Prensip Örneği 7
Şekil 2.5 Bant Geçiren Filtre Çalışma Prensip Örneği.....8
Şekil 2.6 Bant Durduran Filtre Çalışma Prensip Örneği 8
Şekil 2.7 Standart Mikroşerit İletim Hat Modeli.....9
Şekil 2.8 İki Portlu Devrede S Parametresi.....9
Şekil 4.1 Destek Vektör Regresyonu Genel Gösterimi 15
Şekil 4.2 Genel CNN mimarisi 16
Şekil 4.3 GWO Algoritmasında Konumun Güncellenmesi 17
Şekil 4.4 Diferansiyel Evrim Algoritmasının Genel Adımları 19
Şekil 5.1 Önerilen Düzlemsel Olmayan Mikroşerit İletim Hattının Şematik Gösterimi 21
Şekil 5.2 Önerilen Düzlemsel Olmayan Mikroşerit İletim Hattında Bazı Örneklerin CST Görselleri 21
Şekil. 5.3 Düzlemsel Olmayan Mikroşerit İletim Hattının YSA Modeli 22
Şekil 5.4 Örnek Bir Düzlemsel Olmayan Mikroşerit İletim Hattı için Benzetim Sonuçları (w=2, h2=5, L=50) 23
Şekil 5.5 Örnek Bir Düzlemsel Olmayan Mikroşerit İletim Hattı için Benzetim Sonuçları (w=1, h2=3, L=40) 24
Şekil 5.6 Önerilen çalışmanın akış şeması [65] 25
Şekil 5.7 Düzgün Olmayan İletim Hattı Birim Eleman Şeması 26
Şekil 5.8 Simetrik 7 Elemanlı NTL Mikroşerit Filtresinin Şeması 26
Şekil 5.9 Tasarım Parametrelerinin Değişimine Göre NTL'nin Saçılma Parametresi Yanıtı 27
Şekil 5.10 Önerilen M2LP Tabanlı NTL'nin Kara Kutu Modeli [65] 28
Şekil 5.11 DEA ve M2LP Tabanlı Vekil Model Kullanılarak NTL Bant Geçiren Filtre nin Tasarım Optimizasyon Sürecinin Akış Şeması [65] 34
Şekil 5.12 İki M2LP NTL'nin Kademeli Konfigürasyonu [65] 35
Şekil 5.13 En Uygun Şekilde Tasarlanmış NTL Filtresinin 3 Boyutlu Modeli.....36
Şekil 5.14 Simüle Edilmiş (a) S_{11}, (b) S_{21}, NTL Filtresinin Sonuçları.....36
Şekil 6.1 Önerilen İlettim Hattının Şeması.....42

Şekil 6.2 (a) ve (b) Seramik Taban Malzeme Baskısı, (c) Nihai Ürün 45

Şekil 6.3 (a) Üretilen Seramik Taban Malzemenin 1.Gün Olan Kurutma Sürecini, (b) 3.Gün'deki Kurutma Sürecini Burada Koyu Renkteki Taban Henüz Kurumamıştır (c) 5.Gün'deki Kurutma Sonunda Elde Edilen Nihai Ürünü Göstermektedir.....46

Şekil 6.4 Üretilen Seramik Taban Malzemenin Boyut Ölçüsü 46

Şekil 6.5 (a) Üretilen Seramik Taban Malzemenin Dielektrik Ölçüm Düzeneği, (b) Bakır ile Kaplanmış Seramik Taban 47

Şekil 6.6 Optimal Tasarımlı NUNPMF Tasarımının Ölçülmüş ve Simüle Edilmiş Sonuçları.....47

TABLO LİSTESİ

Tablo 5.1 Değişkenler ve Aralıkları (mm) 21
Tablo 5.2 Eğitim için Kullanılan Mimari Yapılar 22
Tablo 5.3 ÇKA Yapılarına Ait Performans Değerleri 23
Tablo 5.4 14 Numaralı ÇKA Yapısına Ait Performans Değerleri 23
Tablo 5.5 NTL Birim Elemanının Arama Alanı 28
Tablo 5.6 M2LP'nin Kullanıcı Tarafından Tanımlanan Parametreleri [65] 29
Tablo 5.7 Veri Kümesi 1 için M2LP Modelinin Performans Sonuçları.....30
Tablo 5.8 Veri Kümesi 2 için M2LP Modelinin Performans Sonuçları.....31
Tablo 5.9 Veri Kümesi 3 için M2LP Modelinin Performans Sonuçları.....32
Tablo 5.10 SOMYH Metrik Kullanılarak 10 Farklı Çalışmadan Sonra En İyi Seçilen M2LP Modelleri ve Muadil Yöntemlerinin Performans Karşılaştırması 33
Tablo 5.11 NTL Filtresinin Optimum Geometrik Tasarım Parametreleri 35
Tablo 6.1 Kullanılan Seramik Malzemenin Kimyasal İçeriği.....41
Tablo 6.2 Kullanilan Seramik Malzemenin Fırınlama Sıcaklığa Bağlı Değişimi ..41
Tablo 6.3 Kullanılan Seramik Malzemenin Fırınlama Sıcaklığına Bağlı Termal Genleşme Katsayısı ve Nem Genleştirmesi- (TGK * 10-7/K) 41
Tablo 6.4 İletim Hattı Birim Elemanının Arama Alanı.....42
Tablo 6.5 NUNPMF Birim Elemanı için Regresyon Algoritmalarının Performans Karşılaştırması 43
Tablo 6.5 NUNPMF'nin Optimum Olarak Belirlenmiş Geometrik Tasarım Parametreleri.....45

ÖZET

Üç Boyutlu Seramik Tabanlı Mikrodalga Devrelerin Tasarımı

Tarlan MAHOUTİ

Üretim Metalürjisi Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Nilgün KUŞKONMAZ

Eş-Danışman: Prof. Dr. Tülay YILDIRIM

Bu çalışma kapsamında yapay sinir ağı tabanlı modeller kullanılarak seramik tabanlı düzlemsel olmayan mikroşerit iletim hatlarının modellenmesi hedeflenmiştir. Öncelikle (i) düzlemsel olmayan bir mikroşerit iletim hattının tasarımında önemli parametrelerinden biri olan saçılma parametresinin tasarıma ait geometrik değişkenlere bağlı bir şekilde ilk olarak "Çok Katmanlı Algılayıcı" kullanılarak değer tahmini hedeflenmiştir. Bu amaçla 3B elektromanyetik benzetim programı, CST de önerilen düzlemsel olmayan mikroşerit iletim hattının tasarımı yapılmış olup eğitim ve test aşamaları için gerekli veri setleri elde edilmiştir. Bu çalışmada sabit bir L uzunluğunda daha uzun bir yol mesafesi ile iletim hattının çalışma frekansının boyutu artmaksızın daha düşük frekanslara çekilmesine olanak sağlanmıştır. Çalışmanın devamında (ii) tasarlanılan iletim hattının bant geçiren filtre uygulamasında kullanılabilinmesi adına birim eleman oluşturulması hedeflenmiştir. Bu amaç doğrultusunda derin öğrenme modellerinden biri olan M2LP (Modifiye Çok Katmanlı Algılayıcı) ve meta sezgisel optimizasyon yönteminden biri olan Diferansiyel Evrim Algoritması kullanılmıştır.

Çalışmanın son bölümünde (iii) 3B baskı teknolojisi kullanılarak optimum şekilde tasarlanan filtrenin prototip haline getirilmesi ve performans özelliklerinin ölçülmesi hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda önerilen tasarımın 3B EM modeli, eğitim ve doğrulama veri setleri oluşturmak için kullanılmıştır. Daha sonra Ensemble Learning, Destek Vektör Makinesi, Gaussian Process Regresyon, Yapay Sinir Ağı gibi yaygın olarak kullanılan son teknoloji regresyon algoritmaları, modelin girdileri (geometrik tasarım değişkenleri & frekans) ve birim eleman tasarımının çıktıları (saçılma parametrelerinin gerçek ve sanal kısımları) arasında bir eşleme oluşturmak adına doğru ve hızlı bir vekil model oluşturmak için kullanılmıştır. Daha sonra bir bant geçiren filtrenin tasarım optimizasyonu için bir meta sezgisel optimizasyon algoritması olan Gri Wolf Optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında simüle edilmiş ve deneysel sonuçlara göre 3B yazıcı teknolojisi; seramik malzeme ve önerilen veriye dayalı vekil model destekli optimizasyon süreci kullanılarak Düzlemsel Olmayan Mikroşerit Filtrenin tasarım optimizasyonunun hesaplamalı olarak gerçekleştirilebileceği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Seramik, mikrodalga devre tasarımı, elektronik altlık malzeme, yapay sinir ağları (YSA), 3-boyutlu yazıcı.

ABSTRACT

Design of Three-Dimensional Ceramic Based Microwave Circuits

Tarlan MAHOUTİ

Department of Extractive Metallurgy

MSc. Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Nilgün KUŞKONMAZ

Co-supervisor: Prof. Dr. Tülay YILDIRIM

In this study, it is aimed to estimate the value of the scattering parameters of the non-planar microstrip lines with ceramic base material with respect to the geometrical design parameters, by using the MLP. For this purpose, firstly the design of the non-planar microstrip transmission line in the CST has been modelled. After that, data sets have been obtained for the training and test phases using the 3D CST model. Herein, with a longer path distance of a fixed length L, it is possible to pull the transmission line to lower frequencies without increasing the size of the operating frequency. It is aimed to create a unit element so that the designed transmission line can be used in band-pass filter application. For this purpose, one of the deep learning models M2LP and one of the Meta heuristic optimization method differential evolution algorithms were used. In the last part of the study, it is aimed to prototype the filter, which is optimally designed using 3D printing technology, and to measure its performance characteristics. For this aim, 3D EM model of the proposed design had been used for generating training and validation data sets. Then commonly used state of the art regression

algorithms such as Ensemble Learning, SVM, GPR, ANN had been used for creating an accurate and fast surrogate model to create a mapping between inputs of the model (geometrical design variables & frequency) and outputs (real and imaginary parts of scattering parameters) of the unit element design. After that, GWO algorithm, a Meta heuristic optimization algorithm had been used for design optimization of a band pass filter. Herein, by using 3D printer technology, ceramic material and the proposed data driven surrogate model assisted optimization process, design optimization of Non-Uniform Non-Planar Microstrip Filter can be achieved in a computationally efficient way.

Keywords: Ceramic, microwave circuit design, electronic base material, artificial neural networks (YSA), 3-D printer.

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Modern iletişimin gelişmesiyle birlikte elektronik malzemeler, yeni malzemelerin araştırılması ve uygulanmasında önemli bir konu haline gelmiştir [1]. Seramikler sahip olduğu yalıtkan özelliklerinden dolayı pek çok alanda kullanılmaktadır. Dielektrik seramikler; maliyet, boyut, kütle, kararlılık, verimlilik, sağlamlık ve kullanım kolaylığı nedenleriyle çoğu mikrodalga uygulamasında arzu edilmektedir [2].

Haberleşme sistemlerindeki gün geçtikçe artan ihtiyaçların karşılanması için yazılımsal gelişimlere ek, bu sistemleri oluşturan devre katmanlarının da yenilikçi ve yüksek performansa sahip alt katmanlardan oluşması gerekmektedir. Mikroşerit yapılar, mikrodalga devre tasarımlarında en çok kullanılan iletim hat yapılarıdır. Yüksek verimliliğie ve performansa sahip bir devrenin tasarımı için güvenilir, hızlı ve doğruğulu yüksek bir modele ihtiyaç duyulmaktadır.

İletim hattında sinyal kaybı düşük, verimliliği yüksek ve güvenilir bir model elde etmek için en önemli parametrelerden biri kullanılacak olan taban malzemesidir. Bu doğrultuda pek çok seramik ve cam elyaf malzemeleri sahip oldukları özelliklerden dolayı kullanılmaktadır. Bu amaç doğrultusunda yapılan literatür çalışmaları aşağıda verilmiştir.

Outmane Lemtiri Chlieh ve arkadaşları çalışmalarında entegre mikroakışkan kanallı sıvı kristal polimer (LCP) üzerinde ayarlanabilir bir L-bant mikroşerit bant geçiren filtre sunulmuştur. LCP, ilgili frekans bandında (100 MHz'den 2 GHz'e) kararlı bir dielektrik sabiti $\xi r = 2.9$ ve düşük kayıp $\tan\delta = 0.002$'ye sahiptir. Ölçülen veriler, HFSS simülasyonlarıyla tam olarak eşleşir. Filtrenin merkez frekansı damıtılmış su için 1 GHz'den aseton için 1.5 GHz'e kaydırıldı, yani% 5O ayar elde edildi. 3 dB FBW için önemli bir değişiklik olmadı. Bu işlemler

sonrasında ekleme kaybı için geri dönüş kaybı etkilendi ancak yine de 15.8 dB'nin üzerindeydi [3].

Chien-Min Cheng and Cheng-Fu Yang yaptıkları araştırma da serigrafi baskı tekniğinin kullanarak dört tür temel yapı (dış çerçeve, U-şekilli rezonatör, modifiye edilmiş uca bağlı mikro şerit hattı ve hatalı zemin yapıları) içeren bir minyatür dört bantlı bant geçiren filtre geliştirmeyi hedeflemişlerdir. Bu çalışmada altlık olarak 1 mm kalınlığında ve dielektrik sabiti ξr = 27.9 olan MgTa1.5 Nb0.5O6 mikrodalga seramik kullanmışlardır [4].

Cheng-Liang Huanga ve arkadaşları B2O3 katkı maddesi kullanarak 0.8(Mg0.95Zn0.05) TiO3-0.2Ca0.61Nd0.26 TiO3 seramiklerinde hem sinterleme sıcaklığını etkili bir şekilde düşürmüştür ve aynı zamanda dielektrik özelliğinide arttırmayı başarmışlardır. 82MZCNT mükemmel mikrodalga dielektrik özellikleri ξr = 26.6 nedeniyle mikrodalga dielektrik rezonatörleri ve filtrelerindeki uygulamalar için uygundur [5].

İsa Ataş ve arkadaşları tarafından sunulan çalışmada iki farklı mikroşerit dizi anten tasarımı sunulmuştur. Buradaki anten modellerinin boyutu sırasıyla 1x4 ve 2x2 olup taban malzemesi için maliyet açısından ve kolay elde edilebilmesinden dolayı FR-4 altık seçilmiştir. FR-4 yalıtkan malzemesi ξr= 4.4 katsayısına sahiptir. Çalışmanın sonucunda; doğrusal 1x4 dizi antende 9.10 dB, düzlemsel 2x2 dizi antende ise 7.10 dB kazanç elde edilmiştir [6].

Mahmut Ahmet Gözel ve arkadaşları yaptıkları çalışmada farklı dielektrik ve fiziksel özelliklere sahip alt taban malzemelerinin doğrultucu devrelerde RF güç dönüştürme verimine etkisini incelemişlerdir. Burada dört farklı taban malzeme kullanılmıştır. Bu malzemeler; FR4, Rogers RO3003, Rogers RT/duroid 5870 ve Rogers TMM13i olarak sıralanmaktadır. Araştırmanın sonucunda malzemelerde maksimum verim Rogers RT/duroid5870 ile sağlanırken en düşük giriş gücü ile kesim verimi Rogers TMM13i ile sağlanmıştır [7].

Cheng-Liang Huang ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada kompakt bir bant geçiren filtre sıfır derece besleme yapısına sahip kademeli empedans halka rezonatörleri kullanılarak tasarlanmıştır. Bu kompakt bant geçiren filtreler FR4 ve yüksek geçirgenliğe sahip seramik substratlar (4.5 ve 13.46 ilgili dielektrik

sabitleri ile) kullanılarak incelenmiştir. Özetleyecek olursak; ağırlıkça %0,75 Fe2O3 seramik substrat içeren Mg4Nb2O9 kullanan kompakt filtrenin boyutu, FR4 seramik substrat kullanılana kıyasla %64,85 oranında azaltılabilir. Bu nedenle ağırlıkça %0,75 Fe2O3 seramik substrat ile Mg4Nb2O9 kullanan mikroşerit filtre, kompakt devre boyutlarını oluşturacak ve modern iletişim sistemlerinde uygulanabilecektir [8].

Mohd Khairul Mohd Salleh ve arkadaşlarının hazırladıkları makale çeyrek dalga boylu yandan bağlı çizgilerle beslenen bir çift modlu halka rezonatörü ile ilgilidir. Rezonatör sentezi, merkezi frekansı, bant genişliğini ve iletim sıfır frekanslarını ve ayrıca geçiş bandındaki ekleme kaybını sabitleyecek şekilde geliştirilmiştir. Alt tabaka olarak FR4 kullanmışlardır [9].

1.2 Tezin Amacı

Tezin amacı yapay sinir ağı modellerini kullanarak seramik temelli dielektrik bir altlık malzemenin 3-boyutlu yazıcı ile hazırlanıp ardından tasarım esasları, parametreleri ve modellenmesi ile ilgili çalışmalar yapılarak performansı yüksek, sinyal kaybı düşük, 5GHz ve üzeri frekanslarda çalışma olanağı sağlayacak bir mikrodalga devrenin tasarlanmasını sağlamaktır.

1.3 Hipotez

Bu tez kapsamında hedeflenen üç boyutlu seramik tabanlı mikrodalga devrelerin tasarımını; hızlı, doğruluğu ve işlemsel verimliliği yüksek bir şekilde gerçekleştirmek için yapay zeka tabanlı yöntemler kullanılacaktır.

Bu amaç doğrultusunda öncelikle mikrodalga devre yapıların en temel bileşeni olan iletim hatlarının saçılma parametrelerinin yapay sinir ağı tarafından modellenmesi adına örnek bir 3B düzlemsel olmayan iletim hattı 3B elektromanyetik simülatör programında incelenmeye alınmış olup yapay zeka algoritmalarının eğitimi için gerekli olan eğitim ve test verileri oluşturulmuştur. Bu çalışma örneğinde sabit bir L uzunluğunda daha uzun bir yol mesafesi ile iletim hattının çalışma frekansının boyutu artmaksızın daha düşük frekanslara çekilmesine olanak sağlanmıştır. Diğer aşamada ise, tasarlanmış bir iletim hattının bant-geçiren filtre uygulamasında kullanılabilinmesi adına birim eleman

oluşturulması hedeflenmiştir. Bu amaç doğrultusunda derin öğrenme modellerinden biri olan M2LP (Modifiye Çok Katmanlı Algılayıcı) ve meta sezgisel optimizasyon yönteminden biri olan Diferansiyel Evrim Algoritma'sı kullanılmıştır. Tezin son aşamasında ise 3B baskı teknolojisi kullanılarak optimum şekilde tasarlanan filtrenin prototip haline getirilmesi ve performans özelliklerinin ölçülmesi hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda önerilen tasarımın 3B EM modeli eğitim ve doğrulama veri setleri oluşturmak için kullanılmıştır. Daha sonra literatürde en çok kullanılan algoritmalar (Ensemble Learning, Destek Vektör Makinesi, Gaussian Process Regresyon, Yapay Sinir Ağı) kullanılarak modelin girdileri (geometrik tasarım değişkenleri & frekans) ve birim eleman tasarımının çıktıları (saçılma parametrelerinin gerçek ve sanal kısımları) arasında bir eşleme oluşturmak adına doğru ve hızlı bir vekil model oluşturarak bir bant geçiren filtrenin tasarım optimizasyonu için bir meta sezgisel optimizasyon algoritması olan Grey Wolf Optimizasyon Algoritma'sı kullanılacaktır.

Bu tez çalışmasında simüle edilmiş ve deneysel sonuçlara göre 3B yazıcı teknolojisi; seramik malzeme ve önerilen veriye dayalı vekil model destekli optimizasyon süreci kullanılarak, Düzlemsel Olmayan Mikroşerit Filtrenin tasarım optimizasyonunun hızlı, doğruluğu yüksek ve işlemsel verimli bir şekilde gerçekleştirilebileceği gözlemlenmiştir.

2
MİKRODALGA DEVRELER

2.1 Filtre ve Çalışma Prensipleri

Filtreleme işlemi; elektronik cihazın çevresindeki tüm sinyalleri alır, gürültü ve parazit gibi istenmeyen sinyalleri durdurur ve sadece gerekli olan sinyali devreden geçirerek sisteme iletir. Böylece sistem bu sinyale göre çalışmaya başlar.

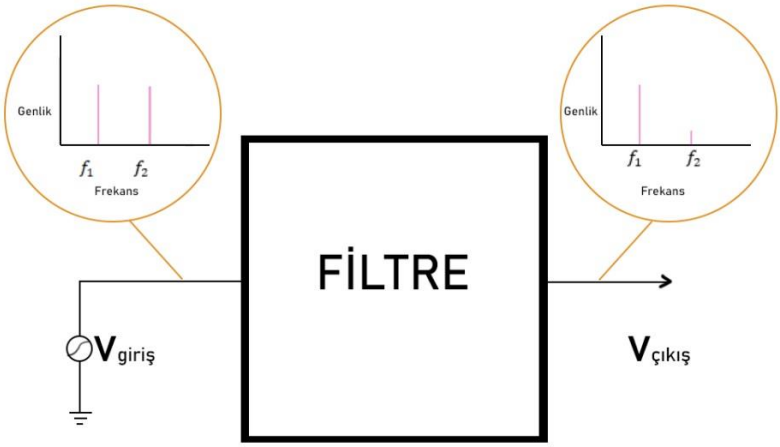
Şekil 2.1 de temel filtre çalışma prensibi gösterilmiştir. Burada filtre kullanılarak f_2 sinyali (istenmeyen sinyal) sönümlendirilmiş olup arzu edilen f_1 sinyali herhangi bir değişime uğramamıştır.

Filtreler tasarım elemanları ve çalışma prensipleri olarak iki gruba ayrılmaktadırlar. Tasarım elemanlarına göre aktif ve pasif olarak iki alt gruba ayrılırlar.

Pasif flitlere örnek vermek gerekirse RLC ile tasarlanan filtreler olarak bilinirler ve filtrelerde güç yükseltilmesini sınırlarlar diğer yandan aktif filtreler transistör ile tasarlanan filtrelerdirler ve sinyalin gücünü artırma özelliğine sahiptirler.

Çalışma prensibi kendi içerisinde dört farklı alt gruba sahiptir bunlar sırasıyla; alçak geçiren filtre, yüksek geçiren filtre, bant geçiren filtre ve son olarak bant durduran/söndüren filtre. RF ve mikrodalga devrelerinde belirli frekansları seçmek veya sönümlemek için filtreler kullanılır.

Kapasitör ve indüktör gibi toplu devre elemanlarıyla veya mikroşerit hatlar kullanılarak çeşitli filtre tasarımları mevcuttur. Bu tez kapsamında mikroşerit hat ile filtre tasarımı gerçekleştirilecektir [10-13].



Şekil 2.1 Temel Filtre Çalışma Prensibi

2.1.1 Mikrodalga

Frekans aralığı yaklaşık 300 MHz'den 300 GHz'e uzanan dalga boyu 1 metre ile 1 milimetre arasında değişim gösteren elektromanyetik dalgalar olarak bilinmektedir.

Radyo frekansı (RF), uydu ve kablo yayıncılığı, uzay haberleşme sistemleri, radar sistemleri mikrodalga alanının kapsadığı bölgeler olarak bilinirler [10,11,14]. Filtreler bu alanda önemli bir rol oynarlar.

Mikrodalga ve RF uygulamalarında belirlenmiş frekansların seçilmesi ve geçirilmesi veya durdurulması/sönümlenmesi, farklı frekansların birleştirilmesi veya ayarlanması gibi önemli uygulamalarda filtreler hayati bir rol sergilemektedir.

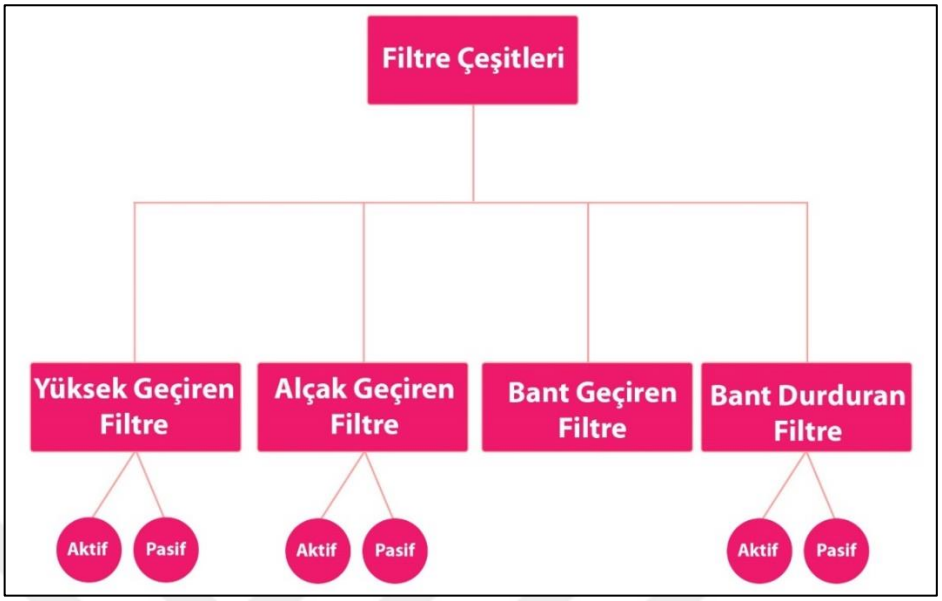
Yukarıda belirtildiği üzere filtreler geçirme bandında iletimi durdurma bandında frekansları sınırlamayı sağlayarak sistemin gerekli sinyali alıp işlemesini ve istenmeyen gürültüleri engelleyerek sistemin daha verimli çalışmasını sağlamaktadır.

İletim hattında veya haberleşme kanalında sinyalin maksimum frekans ile taşınabilmesi için bant genişliğinin ölçüsü göz önüne alınmalıdır. Aktarılması istenilen veri hacmi artması için bant genişliğinin de artması gerekmektedir [10-14].

2.1.2 Mikrodalga Filtre Çeşitleri

Yukarıda belirtildiği üzere filtreler çalışma prensiplerine göre dört farklı gruba ayrılırlar (bkz. şekil 2.2). Çalışma prensiplerine göre ideal filtrelerin frekans

cevap aralıkları şekil 2.3, şekil 2.4, şekil 2.5 ve şekil 2.6'da sırası ile gösterilmiştir [4].



Şekil 2.2 Filtre Çeşitleri [2]

Yüksek geçiren filtre: Kesim frekansından yüksek olan frekansları devreden geçirip sisteme ileten, kesim frekansından düşük olanları ise durduran filtre yapılardır.



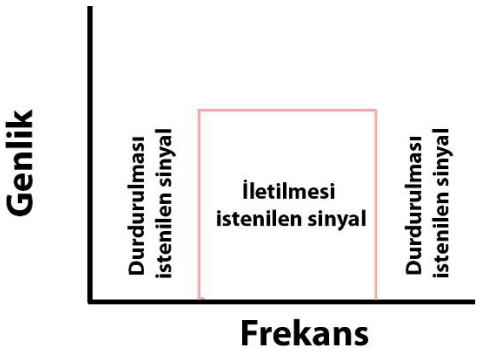
Şekil 2.3 Yüksek Geçiren Filtre Çalışma Prensip Örneği

Alçak geçiren filtre: Kesim frekansından düşük/alçak olan frekansları devreden geçirip sisteme ileten, kesim frekansından yüksek olanları ise engelleyen filtre yapılardır.



Şekil 2.4 Alçak Geçiren Filtre Çalışma Prensip Örneği

Bant geçiren filtre: Belirli ve arzu edilen bir frekans aralığındaki sinyalleri devreden geçirip sisteme ileten filtreler olarak tanımlanırlar.



Şekil 2.5 Bant Geçiren Filtre Çalışma Prensip Örneği

Bant durduran filtre: Belirli bir frekans aralığındaki sinyalleri sönümlendiren filtrelerdir [10,13].



Şekil 2.6 Bant Durduran Filtre Çalışma Prensip Örneği

2.2 Mikroşerit İletim Hattı

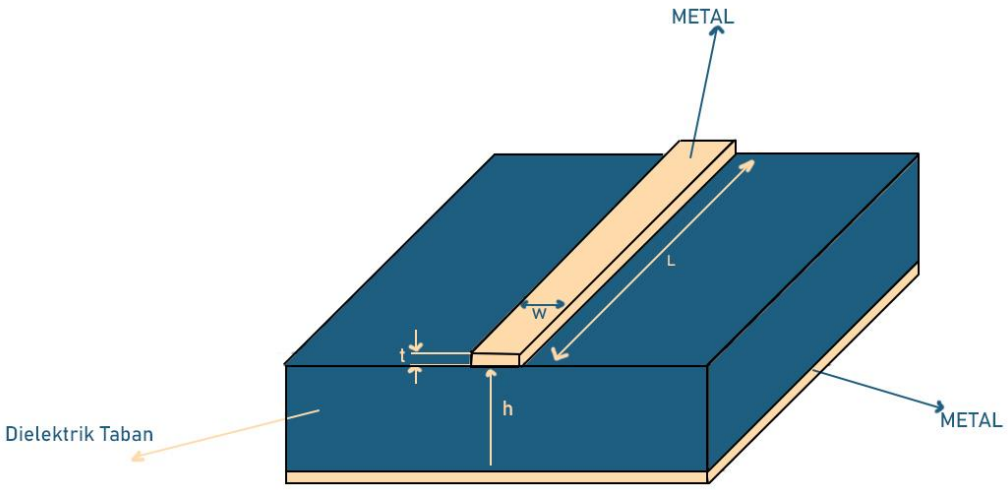
Mikroşerit; baskılı devre kartı teknolojisi (kısaca mekaniksel ve elektriksel bağlantılarda çeşitli yollarla sistemler arası iletişimi sağlayan, yalıtkan bir taban

üzerine iletken bakır yollar kazınarak oluşturulmuş yapılar) kullanılarak üretilebilen, radyo frekansı ve mikrodalga frekanslarından en yaygın olarak kullanılan düzlemsel iletim yolu çeşididir.

Şekil 2.7 de mikroşerit iletim hat modelinin standart bir gösterimi sunulmuştur. Mikroşerit iletim hatları şekilden görüleceği üzere iki iletken levha arasında (bakır veya gümüş), yer alan bir dielektrik katmanın bir araya gelmesinden oluşurlar.

Burada dielektrik sabiti 'εr', yalıtkan kalınlığı 'h', iletim hattı genişliği 'w' ve iletim hat kalınlığı 't' ile gösterilmektedir. Mikroşerit hatlar 1 GHz ve 110 GHz aralığındaki frekans uygulamaları için uygun bir iletim yoludur.

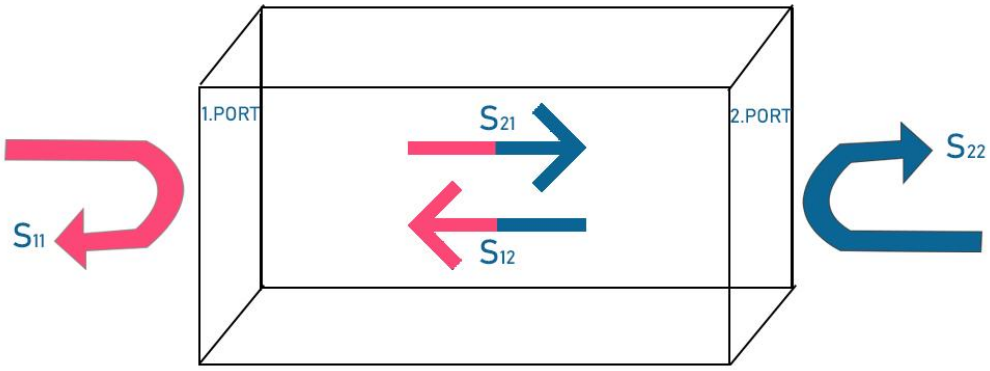
Antenler, kuplörler, filtreler, güç bölücüler vb. gibi mikrodalga bileşenleri, tüm cihazın alt tabaka üzerinde metalizasyon modeli olarak mevcut olmasıyla mikroşeritten oluşturulabilir. Mikroşerit çok daha ucuz olmasının yanı sıra çok daha hafif ve daha kompakttır [15,16].



Şekil 2.7 Standart Mikroşerit İletim Hattı Modeli

2.3 Saçılma Parametreleri

Saçılma parametreleri (S parametreleri) olarak bilinen bu önemli parametre seti yansıma ve iletim etkilerini veya herhangi bir ağ için güç iletimini vermektedir. S parametresi genel olarak Sxy şeklinde alt simgeler ile belirtilir.



Şekil 2.8 İki Portlu Devrede S Parametresi

Burada ilk alt simge "çıkış kapısı" yani enerjinin çıktığı kapı ve ikinci alt simge "giriş kapısı" yani enerjinin girdiği kapıyı belirtmektedir [17,18]. Şekil 2.8 iki portlu devrede S parametresini göstermektedir. İki portlu devrede dört S parametresi mevcuttur bunlar:

- S_{11}: Çıkış portu eşleştiği durumda giriş yansıma katsayısı
- S_{21}: Çıkış portu eşleştiği durumda ileri iletim katsayısı
- S_{12}: Giriş portu eşleştiği durumda ters iletim katsayısı
- S_{22}: Giriş portu eşleştiği durumda çıkış yansıma katsayısı

3
MİKROŞERİT İLETİM HATTINDA TABAN MALZEME KULLANIMI

3.1 Taban Malzeme Kullanımı

Mikroşerit iletim hattında taban malzemesi iki nedenden dolayı kullanılmaktadır. Birinci neden mekanik açıdan olup elemanlar için uygun montajlanma sağlanmasıdır. İkinci neden ise devredeki elektriksel özellikleri, sahip olduğu dielektrik geçirgenliği ve kalınlığı sayesinde belirlenmesine olanak sağlamaktır [10]. Kullanılan taban mazlemesinin dielektrik sabiti ve kalınlığı mikroşerit iletim hattını performansını etkilemekte olup doğru seçilmediği takdirde iletim hattının karakteristik empendansı ve hat sabiti arzu edilen sonucu elde edemeyecektir.

Genellikle iyi ısıl iletimi; mekanik açıdan yüksek dayanım, yüksek dielektrik sabiti (εr) ve maliyet açısından ucuz olan malzemeler taban olarak tercih edilir. Bu doğrultuda alüminyum, bakır, cam elyaf (FR4), FR-2 (fenolik pamuklu kâğıt), FR-3 (pamuk kâğıt ve epoksi), FR-5 (dokuma cam ve epoksi) ve G-10 (dokuma cam ve epoksi) sıralanabilir [10,15].

Mikrodalga uygulamalarında kullanılan taban malzemesi, mikrodalga devrelerinin sıcaklık kararlılığı dikkate alındığında düşük sıcaklık katsayılı rezonans frekansına (τf) sahip olmalıdır. Mikrodalga altlık malzemeleri arasında dielektrik sabiti düşük ve Qf değeri yüksek mikrodalga dielektrik seramikler en önemlileridir [19].

3.2 Seramiklerin Taban Malzeme Olarak Kullanılması

Seramikler çoğunlukla metal ve metal dışı elementler arasındaki kimyasal bileşikler olup inorganik malzemelerdir. Atomik bağları tamamen iyonik veya iyonik kovalent kombinasyonu şeklindedir.

Kalıcı şekil değişim mekanizmaları olmadığından çok sert ve gevrektirler. Genellikle elektrik ve ısıyı iletmezler. Seramikler en genel anlamda iki temel sınıfa

ayrılırlar; Porselen, tuğla, fayans ve camın dâhil olduğu geleneksel seramikler ve yeni nesil (ileri) seramikler. Bu tez kapsamında geleneksel seramik malzemesi olan kaolin kili ele alınacaktır [20].

Son yıllarda; düşük dielektrik sabitli malzemeler mikrodalga cihazlarda, ultra büyük ölçekli entegre devrelerde ve diğer uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Al_2O_3, SiCN, SiO_2 ve vs. gibi malzemeler yalıtım özelliğine sahip olmasına rağmen, pahalı ve sınırlıdırlar. Bu nedenle daha fazla araştırmacı daha düşük maliyetli ve daha fazla kullanılabilirliğe sahip materyalleri araştırmaktadır.

Hidratlı alüminyum silikatlardan ($[Al_4(Si_4O_{10})\ (OH)_2]$) oluşan (bir mineral olan) kaolin kili, doğal olarak bol miktarda bulunur ve dünya çapında kil seramikleri, nikotin adsorpsiyonu için zeolitler, asfalten adsorpsiyonu ve dielektrik-taban malzemesi gibi çeşitli uygulamalar için kullanılmaktadırlar.

Kaolinin ana bileşenleri düşük dielektrik sabitli malzemeler olarak kullanım için önemli potansiyele sahip olan SiO_2 ve Al_2O_3'ten oluşmaktadır.

Bu tez çalışmasında; düşük maliyet, kolay bulunabilirliği ve sahip olduğu dielektrik özelliğinden dolayı taban malzemesi olarak kaolin kili kullanılmıştır [21].

3.3 Elektriksel İletkenlik ve Seramik Malzemelerde Dielektrik Sabiti

Elektriksel alanın oluşturduğu coulomb kuvvetleri etkisindeki elektronların malzeme içinde uzak mesafeli hareketleri elektriksel iletkenliği sağlar. Bu özelliğe sahip malzemelere iletken malzemeler denir. Özellikle çok sayıda serbest elektron içeren arı metallerin iletkenlikleri çok yüksektir [22].

İyonik ve kovalent bağlı malzemelerde serbest elektron bulunmadığından normal olarak yalıtkan sayılır. Bir maddenin iletkenliğini belirleyen en önemli faktör, atomlarının son yörüngesindeki elektron sayısıdır. Bu son yörüngeye "Valans Yörünge" üzerinde bulunan elektronlara da "Valans Elektron" denir.

Valans elektronlar atom çekirdeğine zayıf olarak bağlıdır. Valans yörüngesindeki elektron sayısı 4'ten büyük olan maddeler yalıtkan, 4'ten küçük olan maddeler de iletkendir.

Seramik malzemeler tüm malzemeler arasında en farklı özgül iletkenlik özelliğini sergilerler. En iyi yalıtkanlar seramiklerdir. Uygun koşullarda en iyi iletkenler de yine seramiklerdir.

Diğer yandan birçok seramik yarıiletkendir ve bazıları da oda sıcaklığında metaller kadar yüksek özgül iletkenliğe sahiptir. Bu nedenle seramikler endüstride çok çeşitli elektrik ve elektronik uygulamalarda kullanılmaktadırlar [22].

Akıma karşı direnç gösteren ve akımı iletme yeteneği az olan maddelere dielektrik veya yalıtkan malzemeler denilmektedir. Bu malzemeler elektronlarının sıkı atomik bağlantıları sayesinde yalıtkan özelliğine sahiptirler.

Dielektrik özelliği pek çok endüstriyel alanda kullanılmakta olup bir elektrik sisteminde yalıtımın sağlanması, kaçak akım gibi oluşumların engellenmesi ve kondansatör gibi uygulamalarda kullanılmaktadır [15].

Dielektrik sabiti (εr), malzemenin polarizasyon kapasitesini yansıtan malzemeye bağlı bir geçirgenliktir. Herhangi bir malzemenin dielektrik sabiti hem frekansa hem de sıcaklığa göre değişir [23].

Bir seramik malzemenin dielektrik özellikleri işlevselliğini belirler. Bu özellikler arasında göreceli geçirgenlik veya dielektrik sabiti (εr), dielektrik kaybının (tanδ) tersi olan Q kalite faktörü ve rezonans frekansının (τf) sıcaklık katsayısı bulunur [24].

3.4 Dielektrik Seramiklerin Önemli Karakteristik Özellikleri

DS (Dielektrik sabiti), seramiğin hangi alanlarda kullanılması gerektiğini belirten önemli bir parametredir. 4-12 aralığındaki düşük bağıl geçirgenliğe sahip malzemeler milimetre dalga iletişimi için ve mikrodalga devreler için alt tabakalar olarak kullanılmaktadır [25].

Minimum zayıflama ile yüksek hızlı sinyal yayılımı bağıl geçirgenliğin doğrudan bir fonksiyonu olan önemli bir husustur. Bu nedenle sinyalin hızını artırmak için düşük bağıl geçirgenliğe sahip malzemeler gerekir.

Bir dielektrik malzeme için gerekli olan önemli özelliklerden biri dielektrik kaybının (tanδ) tersi olan yüksek kalite faktörüdür Q (> 1.000 GHz).

Seramiklerin dielektrik özelliklerinin sıcaklıkla değişimi pratik uygulamalar için çok önemlidir. Rezonans frekansının sıcaklık katsayısı (τf) sıcaklığa göre rezonans frekansındaki sapmanın bir ölçüsüdür.

Büyük bir tf değerine sahip bir malzemenin, çalışma sıcaklığındaki değişikliklere bağlı olarak rezonans frekansını koruyamadığı için bir mikrodalga devresinde kullanışlı olmadığı bilinmektedir [25].

4
YAPAY ZEKA

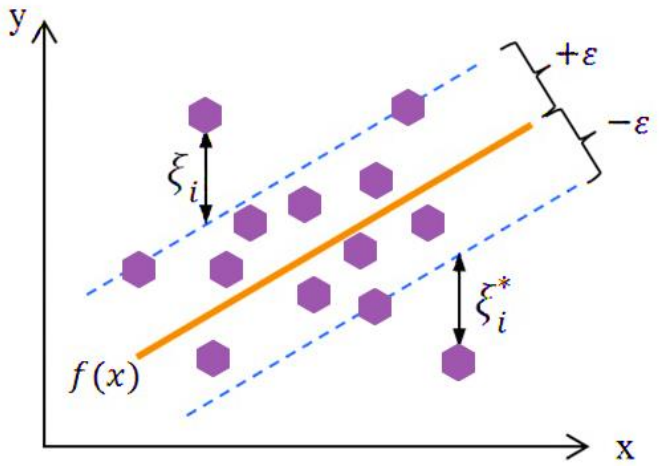
4.1 Yapay Öğrenme

4.1.1 Destek Vektör Regresyonu (SVR)

Orijinal Destek Vektör Makinesi (SVM) Algoritma'sı, 1963'te Vapnik ve Chervonenkis tarafından geliştirilmiştir [26,27]. Regresyon problemi modelin sonlu bir kümeden çıktı yerine sürekli bir çıktı döndürdüğü sınıflandırma probleminin bir genellemesidir. Başka bir deyişle bir regresyon modeli, sürekli çok değişkenli bir işlevi tahmin eder.

Destek vektör makineleri (SVM'ler), ikili sınıflandırma problemlerini dışbükey optimizasyon problemleri olarak formüle ederek çözer. Optimizasyon problemi mümkün olduğu kadar çok eğitim noktasını doğru bir şekilde sınıflandıran ve aynı zamanda hiper düzlemi ayıran maksimum marjinin de bulunmasına ihtiyaç duyar. SVM'ler bu optimal hiper düzlemi destek vektörleriyle temsil eder. SVM'nin seyrek çözümü ve iyi genellemesi sayesinde regresyon problemleri için oldukça kullanışlı olmasını sağlamıştır. SVR'ye SVM genellemesi, ξ-tüp adı verilen işlevin etrafına ξ - duyarsız bir bölge getirilerek gerçekleştirilir. Bu tüp, model karmaşıklığı ve tahmin hatasını dengelerken süreklilik fonksiyona en iyi yaklaşan tüpü bulmak için optimizasyon problemini yeniden formüle eder. Daha spesifik olarak, SVR, önce en aza indirilecek bir dışbükey e-duyarsız kayıp fonksiyonu tanımlayarak ve eğitim örneklerinin çoğunu içeren en düz tüpü bularak bir optimizasyon problemi olarak formüle edilir. Bu nedenle, kayıp fonksiyonundan ve tüpün geometrik özelliklerinden çok amaçlı bir fonksiyon oluşturulur. Daha sonra özgün bir çözümü olan dışbükey optimizasyona uygun sayısal optimizasyon algoritmaları kullanılarak çözülür. Hiper düzlem, tüpün sınırlarının dışında kalan eğitim örnekleri olan destek vektörleri cinsinden temsil edilir. SVM'de olduğu gibi, SVR'deki destek vektörleri, tüpün şeklini etkileyen en etkili örneklerdir ve eğitim ve test verilerinin, denetimli bir sistemde aynı sabit fakat bilinmeyen olasılık

dağılım fonksiyonundan çizilen, bağımsız ve özdeş olarak dağıtıldığı varsayılır [28].



Şekil 4.1 Destek Vektör Regresyonu Genel Gösterimi

Veri vektörlerini düşük boyutlu bir uzaydan yüksek boyutlu bir alana eşlemek, destek vektör modellerinin doğrusal olmayan bir problemi daha doğru tahminlere yol açan çok yüksek boyutlu doğrusal bir probleme dönüştürmesine olanak tanır. SVM yönteminin diğer istatistiksel yöntemlere göre spesifik özellikleri, yansıtıcı dizi anten, mikroşerit iletim hatlarının tasarımı, mikrodalga devre tasarımı gibi birçok alanda giderek artan kapsamlı uygulamasının nedeni olmuştur [27,29].

4.1.1.1 Modifiye Çok Katmanlı Algılayıcı (M2LP)

Derin öğrenme algoritmalarının ilk uygulaması, bu algoritmaların muadil yöntemlere göre olağanüstü sonuçlar elde ettiği görüntü işleme uygulamalarıyla başlatıldı. Günümüzde derin öğrenme algoritmaları; segmentasyon [30,31], çoklu nesne izleme [32, 33], biyomedikal uygulamalar [34, 35], dudak okuma [36], İnsanların mobil sensörler aracılığıyla aktivite tanıma [37], sensör verileri yoluyla alt sistemlerin kalan ömür tahmini [38], mali verilerin zaman serilerinin tahmini [39], rüzgarın güç ve hız tahmini [40, 41], elektriksel empedans tomografisi (EIT) görüntüleme [42], tam dalgalı doğrusal olmayan ters saçılma problemleri [43], büyük ölçekli çevrimdışı imza tanıma [44] ve yüksek hızlı alıcı adaptasyonu [45], pasif mikrodalga bileşenlerinin parametrik modellemesi ve çıkarılması [46]

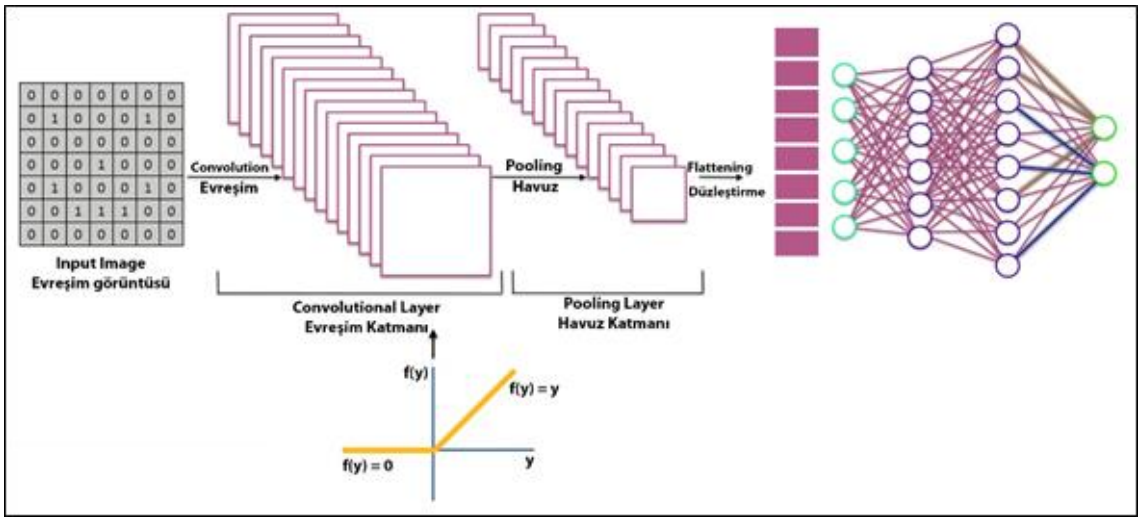
gibi birçok alanda zorlu problemleri çözmek için yeni bir trend çözüm yöntemi haline geldi.

Modifiye Çok Katmanlı Algılayıcı (M2LP) tasarım optimizasyon problemlerinde kullanılmak üzere kapasitif beslemeli bir anten modelinin saçılma parametrelerinin modellenmesi için hızlı ve doğru bir regresyon yöntemi olarak Çalık ve arkadaşları [47] tarafından önerilmiştir.

M2LP standart bir Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) tabanlıdır. Burada etkinleştirme işlevleri için geleneksel olarak MLP parametrelerini 'sigmoid','tanh', Levenberq Marquardt, Bayes regresyonu vb. kullanmak yerine modellerin eğitimi için özel olarak geliştirilmiş toplu norm katmanı kullanılmaktadır. Ek olarak sızdıran ReLU, parametrik ReLU ve Adam Eğitim Algoritması gibi derin öğrenme algoritmalarının daha gelişmiş tasarım parametreleri kullanılmıştır.

4.1.1.2 Evrişimli Sinirsel Ağ (CNN)

Evrişimsel Sinir Ağı (CNN), ilk olarak LeCun [48] tarafından önerilen bir görüntü işleme yöntemidir. CNN görüntüleri ve diğer veri biçimlerini işlemede önemli bir başarı göstermiştir. Bir CNN'nin evrişim katmanı (convolutional layer), çok sayıda filtre içerir ve bu filtreler aracılığıyla giriş verilerinin özelliklerini çıkarır. Bu aşamada en çok kullanılan aktivasyon fonksiyonlarından ReLu fonksiyonu doğrusallığı gidermek ve Non-Linearity (doğrusal olmayan) arttırmak amaçlı yaygınca kullanılır. Daha sonra yerel özellikler bir havuzlama katmanı (pooling layer) tarafından çıkarılır. Pooling katmanı görüntünün boyutunu önemli ölçüde azaltmaya yardımcı olan bir katmandır. Flattening (düzleştirme) katmanı verileri tek boyutlu diziler haline sokar. Bu sayede son aşama olan Fully Connected Layer giriş verilerini kullanabilir (bknz. Şekil 4.2).



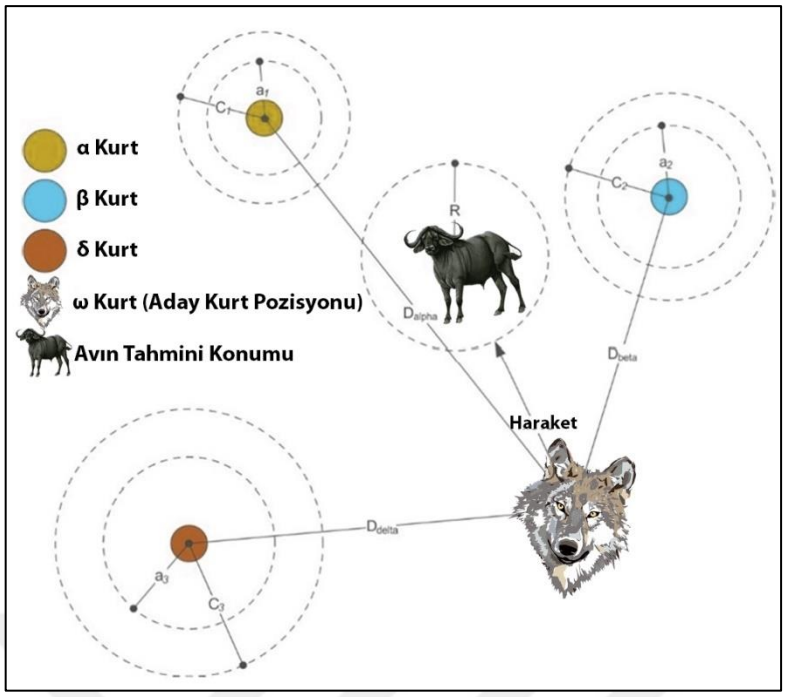
Şekil 4.2 Genel CNN Mimarisi

4.2 Meta-Sezgisel Optimizasyon Algoritmaları

4.2.1.1 Grey Wolf Optimizasyonu (GWO)

Gri kurtlar 5-12 üyeli paketler halinde yaşamayı tercih eden bir sürüdür. Her kurt sürü liderinin belirttiği belirli sorumluluklara sahiptir. Buna göre dört sıraya ayrılırlar:

- Alpha (α): Liderler alfa denilen bir erkek ve bir dişiden oluşur. Alfa çoğunlukla avlanma, uyuma yeri, uyanma zamanı vb. konularda karar vermekten sorumludur.
- Beta (β): Gri kurtların hiyerarşisindeki ikinci seviye betadır. Betalar karar vermede veya diğer sürü faaliyetlerinde alfaya yardımcı olan bağımlı kurtlardır. Beta kurt alfa kurtlardan birinin ölmesi veya liderlik için çok yaşlanması durumunda alfa olmaya en iyi adaydır.
- Omega (ω): En düşük dereceli gri kurt Omega'dır. Omega günah keçisi rolünü oynar. Omega kurtları her zaman diğer tüm baskın kurtlara boyun eğmek zorundadır. Yemelerine izin verilen son kurtlardır.
- Gama/Delta (δ): Dördüncü sınıf, alt sınıf (veya bazı referanslarda delta) olarak adlandırılır. Delta kurtları alfalara ve betalara boyun eğmek zorundadır ancak Omega'ya hükmederler. İzciler, nöbetçiler, Yaşlılar; avcılar ve bakıcılar ise Delta kategorisine aittir ve her birinin kendi tanımlanmış sorumlulukları vardır.



Şekil 4.3 GWO Algoritmasında Konumun Güncellenmesi

GWO algoritması bu hiyerarşik yapıya dayanmaktadır [49,50].

GWO en uygun çözüm alfa (α) olarak adlandırılırken, ikinci ve üçüncü en iyi çözümler sırasıyla beta (β) ve delta (δ) olarak adlandırılır. Aday çözümlerin geri kalanının omega (ω) olduğu varsayılır. Avlanma α, β ve δ tarafından yönlendirilir ve ω bu üç adayı takip eder. Sürünün bir avı avlayabilmesi için önce avın etrafını sararlar. Şekil 4.3 de GWO algoritmasında kurtların avlanırken konum güncellenmesi gösterilmiştir. Çevreleme davranışını matematiksel olarak modellemek için aşağıdaki denklemler:

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \tag{4.1}$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_a - \vec{A}_1 \times (\vec{D}_a), \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \times (\vec{D}_\beta), \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \overrightarrow{A_1} \times (\overrightarrow{D_\delta}), \overrightarrow{A} = 2 \times \vec{a} \times \overrightarrow{r_1} - \vec{a} \tag{4.2}$$

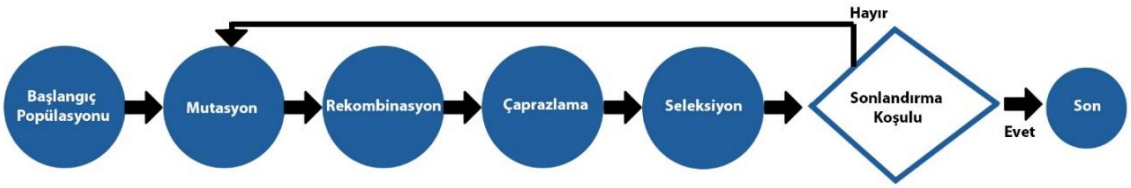
$$\vec{D}_a = |\vec{C}_1 \times \vec{X}_a - \vec{X}|, \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \times \vec{X}_\beta - \vec{X}|, \vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \times \vec{X}_\delta - \vec{X}|, \vec{C} = 2 \times \overrightarrow{r_2} \tag{4.3}$$

Burada X ve t, sırasıyla kurt konumunu ve yineleme sayısını gösterir. $\vec{X}$ Ve $\overrightarrow{A}$, her yinelemede 0 ile 2 arasında doğrusal olarak azaltılan $\vec{C}$'nin katsayı vektörleri ve bileşenleridir ve r1 ve r2, [0,1] aralığı için üretilen rastgele vektörlerdir. Bir saldırı gerçekleştiğinde $\vec{A}$, -1 ile 1 arasındaki değerleri aldığında avlanma süreci tamamlanır [51].

4.2.1.2 Diferansiyel Evrim Algoritması (DEA)

Optimizasyonu hedefleyen geniş algoritmalar listesinden biri olan Evrimsel algoritmalar (EA), biyolojik evrimden ilham alan mekanizmayı kullanmaktadır. EA'nın arkasındaki fikir, otomatik problem çözme için "En Uygunun Hayatta Kalması" Drawinian İlkelerini kullanmaktır. EA'lar deterministik muadillerinden matematiksel olarak daha az karmaşıktır. Ancak EA'lar nispeten daha fazla fonksiyon değerlendirmesi gerektirir ve deterministik olmayan yapıları nedeniyle sonuçları klonlanamaz.

Bu gerçeğe rağmen EA'lar daha geniş optimizasyon problemleri sınıfına uygulanabildikleri ve daha az kısıtlama getirdikleri için pratikte çok daha fazla tercih edilmektedir. EA'lar temel adımlardan oluşan popülasyon tabanlı stokastik algoritmalardır. Bu algoritmalara örnek olarak; üreme, mutasyon, rekombinasyon ve seçim verilebilir. Bu dört adımdan üreme, mutasyon ve rekombinasyon birlikte mevcut popülasyondan rastgele seçilmiş bireylerden karışık özelliklere sahip yeni bireylerin üretilmesinden sorumludur. Seçim aşamasında yenileri daha iyi sonuçlar üretmeyi başardıysa eski bireylerin yerini yenileri alır. Bu süreç, en uygun olanın hayatta kalması, olarak adlandırılan biyolojik fenomeni taklit eder.



Şekil 4.4 Diferansiyel Evrim Algoritmasının Genel Adımları

- Başlangıç Popülasyonu: DEA birinci nesil vektörleri amaç fonksiyonunun verilen kısıtlamasına tabi olarak rastgele değerlerle doldurmak için bir başlatma adımı gerektirir. Bu noktadan itibaren DEA kendine referanslı bir popülasyon yeniden üretim şeması kullanır. Aynı boyutta yeni (ve gelişmiş) bir popülasyon üretmek için popülasyon içindeki vektörleri mutasyona uğratır ve yeniden birleştirir.
- Mutasyon: Mutasyon adımında mevcut popülasyondaki üçüncü bir vektöre fark vektörü adı verilen geçici bir vektör üreterek iki rastgele vektörün

ağırlıklı farkının eklenmesiyle oluşturulan mutant vektör adı verilen yeni bir vektör üretir.

- Çaprazlama: Üçüncü adımında DEA ayrık rekombinasyon olarak da adlandırılan tek tip çaprazlama kullanır. Çaprazlama stratejisine göre yeni bir birey oluşturmak için kodun eski ve yeni bireyi değiş tokuş eder.
- Seleksiyon: Son olarak seçim adımı kimin hayatta kalacağına karar verir. Yeni deneme vektörü veya mevcut nesildeki mevcut hedef vektördür. Deneme vektörü daha sonra hedef vektör tarafından üretilen eski mevcut maliyetle karşılaştırılan yeni "test maliyeti" elde etmek için değerlendirilir.

Bu mutasyon, rekombinasyon ve seçim süreci, istenen hedef değere ulaşılana veya belirtilen sayıda değerlendirme tamamlanana kadar devam eder [52,53].

5
MİKROŞERİT İLETİM HATLARININ YAPAY ZEKA İLE MODELLENMESİ

5.1 Düzlemsel Olmayan Mikroşerit İletim Hatlarının Yapay Sinir Ağı ile Modellenmesi

Tezin bu bölümünde, düzlemsel olmayan bir mikroşerit iletim hattının yapay sinir ağları kullanılarak modellenmesi ele alınmıştır. CST microwave studio program kullanılarak önerilen düzlemsel olmayan mikroşerit iletim hattı modellenmiştir.

Oluşturulan model kullanılarak önerilen düzlemsel olmayan iletim hattının saçılma parametrelerinin tasarımın değişkenlerine bağlı verileri elde edilmiştir. Elde edilen bu veriler daha sonra yapay sinir ağı temelli bir modelin oluşturulması için eğitim ve test verisi olarak kullanılmıştır.

YSA tabanlı modellin geliştirilmesinde en yaygın kullanılan yapılardan biri olan Çok katmanlı Algılayıcı (ÇKA) yapısı kullanılmıştır.

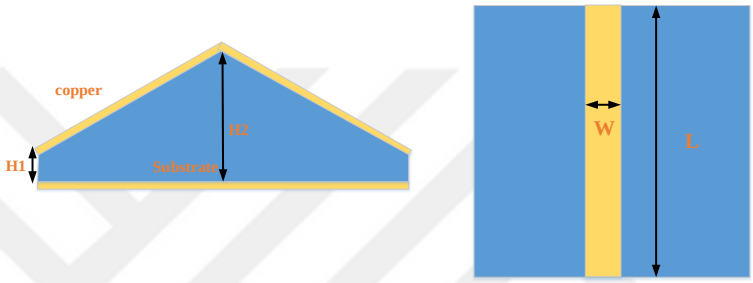
5.1.2 Düzlemsel Olmayan Mikroşerit İletim Hat Modeli

Son yıllarda 3B yazıcı teknolojilerinin gelişmesi ile bu cihazların birçok farklı alanlarda kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu alanlardan biri mikrodalga devre tasarımlarıdır [54-64].

Bu çalışmalarda 3B yazıcı teknolojisi kullanılarak horn anten yansıtıcı dizi anten dalga kılavuzları frekans seçici yüzeyler ve di-elektrik lens yapıları gibi birçok mikrodalga yapısının üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada [54] çalışmasındaki 3B yazıcı teknolojisi ile uyumlu seramik malzeme (di-elektrik katsayı değeri 10.5) ele alınarak 3B yazıcı teknolojisi ile üretimi mümkün düzlemsel olmayan mikroşerit iletim hat modeli oluşturulacaktır.

Bu bölümde şekil 5.1 de verilen 3B düzlemsel olmayan iletim hattı tasarımının saçılma parametrelerinin tasarımın geometrik değişkenlerine bağlı YSA modellenmesi için veri seti oluşturulmuştur.

Bu tasarımda h2 parametresinin artması ile düzlemsel olmayan yapının yüksekliği değişmekte olup bu değerin artması etkin di-elektrik katsayısının değişimine neden olmakla birlikte sinyalin toplam yol kat ettiği mesafenin artmasını sağlar. Bir başka değiş ile sabit bir L uzunluğunda daha uzun bir yol mesafesi ile iletim hattının çalışma frekansının boyutu artmaksızın daha düşük frekanslara çekilmesine neden olacaktır. Tablo 5.1 de sunulan veri set rastgele 2 eşit parçaya bölünerek ilerideki verilen ağ modellerinin eğitim ve test işlemleri için kullanılmışlardır. Şekil 5.2 de önerilen düzlemsel olmayan mikroşerit iletim hattına ait bazı örnek görseller sunulmuştur.



Şekil 5.1 Önerilen Düzlemsel Olmayan Mikroşerit İletim Hattının Şematik Gösterimi

Tablo 5.1 Değişkenler ve Aralıkları (mm)

Parametre	Aralık	Adım genişliği
w	0.4-2	0.2
h2	1-6	0.5
L	20-50	5
f: frekans (GHz)	1-10	0.1
Toplam örnek	55450	

*H1:1 mm, εr=10.5 olarak alınmıştır.



Şekil 5.2 Önerilen Düzlemsel Olmayan Mikroşerit İletim Hattında Bazı Örneklerin CST Görselleri

5.1.3 Çok Katmanlı Algılayıcı Modeli

Bu bölümde, en iyi performans sonucunu elde etmek adına birçok farklı mimaride ÇKA modelli (Tablo5.2) incelemeye alınmıştır.

Ele alınan her bir mimariye ait performans değerlendirmesi denklem 5.1 de verilen Ortalama Mutlak Hata (OMH) ile değerlendirilmiştir.

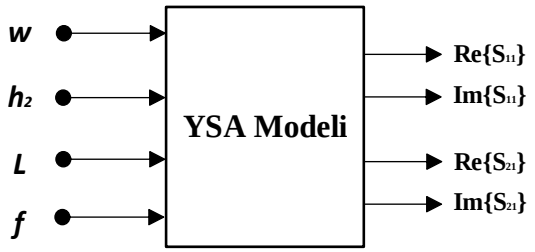
Burada amaç, tüm operasyon bandı boyunca, düzlemsel olmayan mikroşerit iletim hattın tasarım değişkenlerine karşılık gelen saçılma parametrelerini karmaşık bileşenlerinin tahmin edecek ÇKA tabanlı kara kutu modelini oluşturmaktır, önerilen kara kutu modeli şekil 5.3 de sunulmuştur.

Tablo 5.2 Eğitim için Kullanılan Mimari Yapılar

ID	Gizli Katmandaki		Eğitim Algoritması
	Katman	Nöron	
1-5	1	5, 10, 15, 20, 30	Trainbr
6-10			Trainlm
11-14	2	5-10, 10-15	Trainbr
15-18		15-20, 20-30	Trainlm

$$OMH = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|H_i - T_i\right| \tag{5.1}$$

N: toplam örnek sayısı, H: Hedef değer, T: Tahmin edilen değer.



Şekil. 5.3 Düzlemsel Olmayan Mikroşerit İletim Hattının YSA Modeli

Tablo 5.3de her bir ÇKA yapısına ait 10 defa için koşturulmuş en kötü, en iyi ve ortalama OMH değerleri verilmiştir. Buradan görüleceği üzere düşük sayıdaki nöron ve katman sayılarında OMH değeri yüksek değerlerin yanı sıra geniş bir standart sapmaya sahiptir. Tablodan da görüleceği üzere değişkenler arasındaki karmaşık bağlantıların ilişkilendirmek için daha yüksek nöron ve katmana ihtiyaç duyulmaktadır.

Tablo 5.3 ÇKA Yapılarına Ait Performans Değerleri

ID	Maksimum	Minimum	Ortalama
1	0.185	0.141	0.162
2	0.087	0.073	0.078
3	0.060	0.052	0.057
4	0.048	0.043	0.046
5	0.033	0.031	0.032
6	0.203	0.141	0.162
7	0.087	0.075	0.081
8	0.060	0.055	0.058
9	0.048	0.042	0.045
10	0.035	0.030	0.032
11	0.047	0.030	0.036
12	0.021	0.016	0.017
13	0.013	0.011	0.012
14*	**0.009**	**0.007**	**0.008**
15	0.040	0.031	0.035
16	0.022	0.016	0.019
17	0.013	0.011	0.012
18	0.0094	0.0081	0.0087

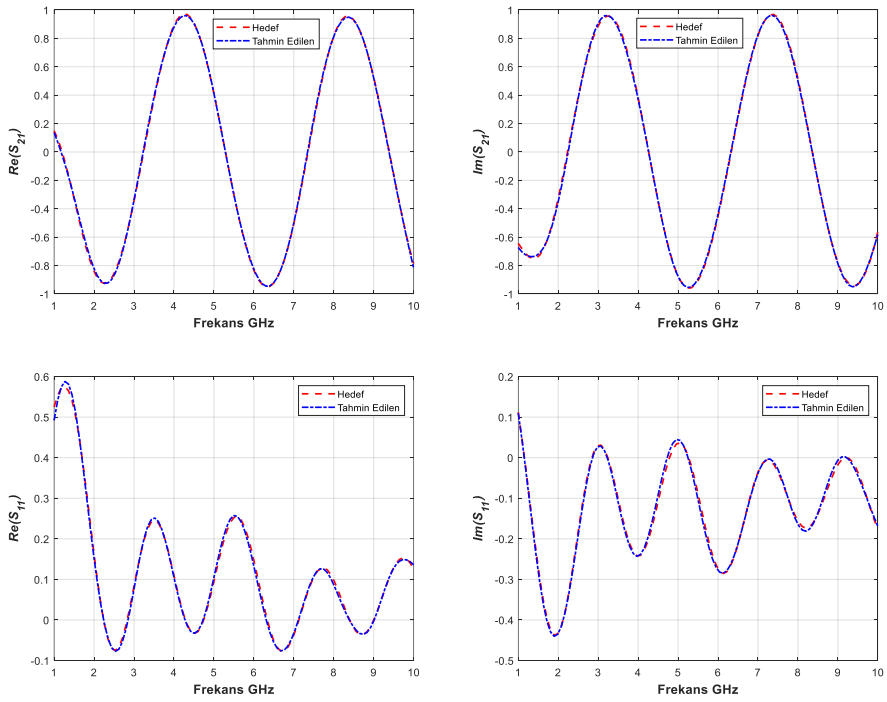
* Bu model ortalama performans, toplam eğitim süresi gibi değerler göz önüne alındığında bu problem için optimal model olarak kabul edilmiştir.

Şekil 5.4-5.5 ve Tablo 5.14 de, seçilen en iyi ÇKA yapısına ait detaylı performans sonuçları her bir çıkış saçılma parametresine göre verilmiştir. Buradan da görüleceği üzere önerilen YSA tabanlı modelleme yüksek bir doğruluğa sahiptir. Denklem 5.1'e ek olarak Ortalama Karekök hatası da incelemeye dâhil edilmiştir (OKKH Denklem 5.2).

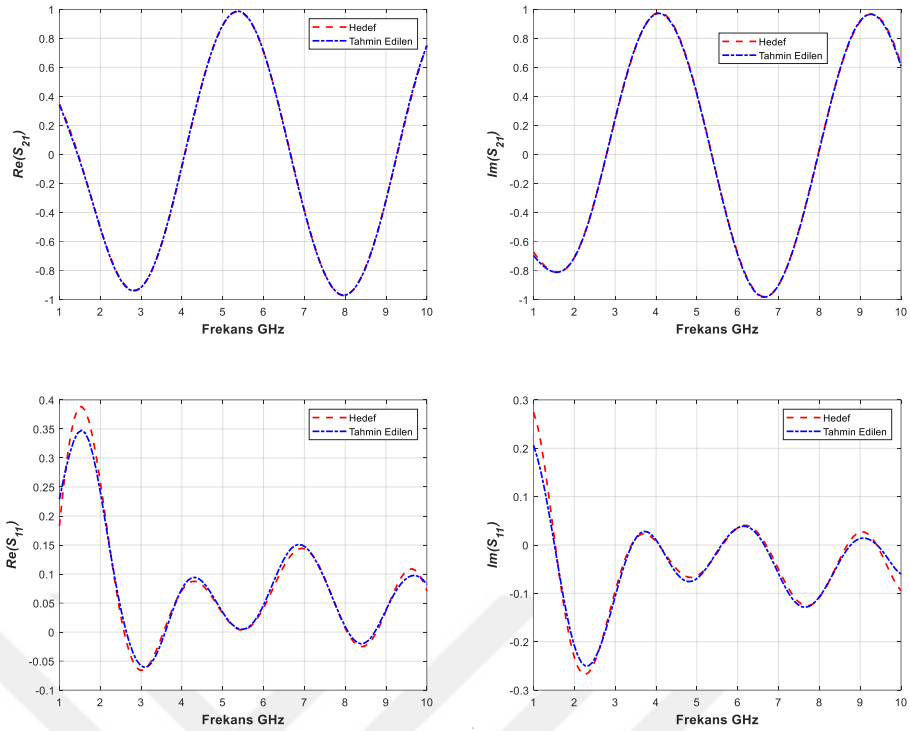
$$OKKH = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\sqrt{(H_i^2 - T_i^2)} \tag{5.2}$$

Tablo 5.4. 14 Numaralı ÇKA Yapısına Ait Performans Değerleri

Parametre	Bileşen	OKKH	OMH
S_{11}	Gerçel	1.68	0.0071
	İmajiner	1.81	0.0072
S_{21}	Gerçel	1.81	0.0080
	İmajiner	1.76	0.0074



Şekil 5.4 Örnek Bir Düzlemsel Olmayan Mikroşerit İletim Hattı için Benzetim Sonuçları (w=2, h2=5, L=50)



Şekil 5.5 Örnek Bir Düzlemsel Olmayan Mikroşerit İletim Hattı için Benzetim Sonuçları (w=1, h2=3, L=40)

Elde edilen sonuçlardan da görüleceği üzere, önerilen ÇKA yapısı kullanılarak yeni nesil doğruluğu yüksek, hızlı ve güvenilir bir düzlemsel olmayan mikroşerit iletim hattının modellenmesi gerçekleştirilmiştir.

İlerleyen çalışmalarda elde edilen bu iletim hat modelli mikrodalga filtre, empedans uydurma katmanları ve güç bölücü devre gibi birçok farklı mikrodalga devrenin tasarım optimizasyonunda kullanılarak performansı yüksek mikrodalga devrelerin gerçekleştirilmesinde öncülük edecektir.

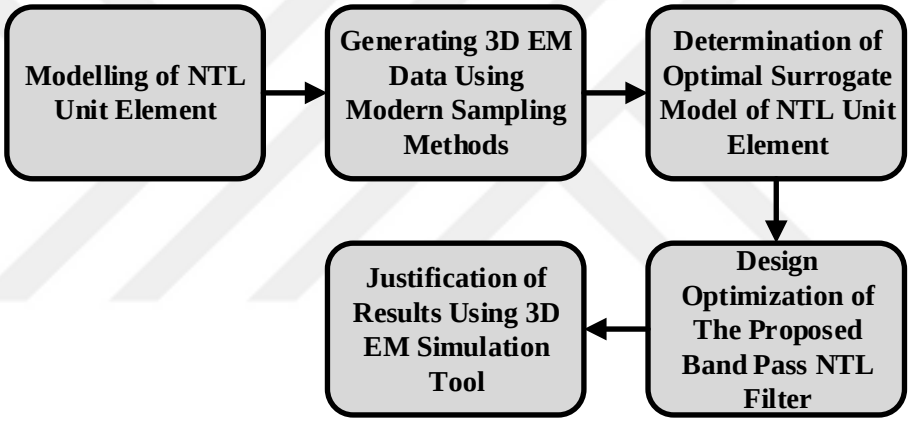
5.2 Düzlemsel Olmayan Mikroşerit Bant Geçiren Filtrenin Yapay Zeka ile Optimizasyonu

Bu çalışmada, Şekil 5.6'de gösterildiği gibi, derin öğrenme (DL) ve meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanarak ISM band uygulaması için bir bant geçiren filtrenin tasarım optimizasyonunun tipik bir uygulamasıyla üniform olmayan bir mikroşerit iletim hattının bir vekil modelinin önerilmesi amaçlanmıştır.

İlk aşamada verimli ve doğru bir optimizasyon sürecine sahip olmak için iletim hattının 3-boyutlu EM birim eleman modeli tasarlanmıştır. Elde edilen eğitim ve test veri setleri farklı örnekleme yöntemleri kullanılarak oluşturulmuştur.

Üniform olmayan mikro şerit iletim hattının saçılma [S] parametrelerinin tahmin edilmesi için modifiye edilmiş çok katmanlı regresyon (M2LP) [47] algılayıcı kullanılmıştır.

Filtre tasarımında kullanılan her hattın optimum tasarım parametreleri, hızlı ve güçlü bir meta-sezgisel optimizasyon algoritması ve diferansiyel evrimsel optimizasyon algoritması kullanılarak belirlenmiştir. Son olarak, önerilen M2LP tabanlı tasarım optimizasyon yönteminden elde edilen sayısal sonuçlar, 3D EM simülasyon aracı CST ile doğrulanmıştır.



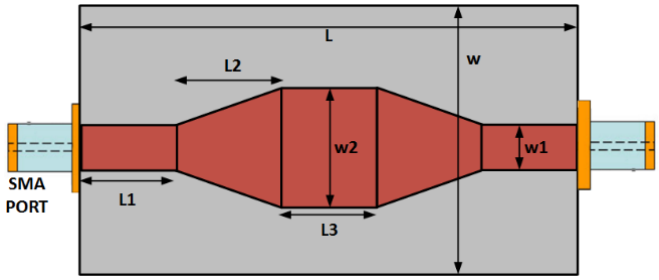
Şekil 5.6 Önerilen Çalışmanın Akış Şeması [65]

5.2.2 Tasarım Prosesi

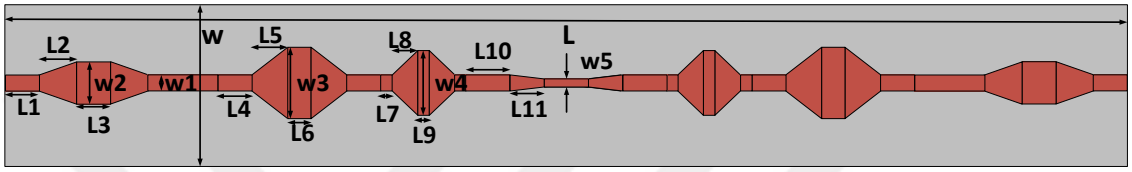
5.2.2.1 Birim Eleman Modeli

Şekil 5.7'de, üniform olmayan iletim hattının (Non-Uniform Transmission Line/NTL) şematiği sunulmuştur. Burada, genişlikler ve uzunluklar gibi geometrik parametrelerin değişimine göre bu iki kapılı pasif devre elemanının S parametrelerini tahmin etmek için önerilen NTL'nin kara kutu modelinin oluşturulması amaçlanmaktadır. Önerilen birim NTL öğesi, bir vaka çalışması olarak bir mikro şerit bant geçiren filtre oluşturmak için Şekil 5.8'te verildiği gibi kademeli formda kullanılacaktır. Şekil 5.8, simetrik bir 7 elemanlı mikroşerit filtresinin şemasını göstermektedir. Burada birim elemanlar arasındaki bağlantı etkisinden kaçınmak için iletim hatları giriş ve çıkış bölümleri genişliği (w1) tüm

elemanlar için 1 mm olarak alınmıştır. Böylelikle eşdeğer S parametrelerinin hesaplanması sırasında birim elemanlarda kuplaj etkisi minimuma indirilmiştir.



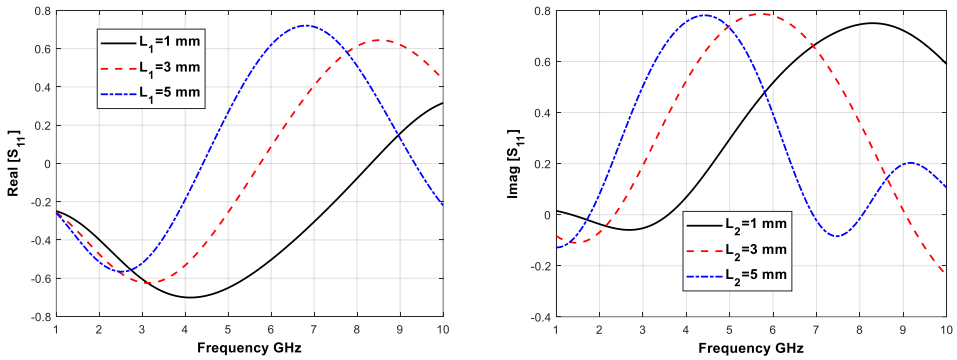
Şekil 5.7 Düzgün Olmayan İletim Hattı Birim Elemanının Şeması



Şekil 5.8 Simetrik 7 Elemanlı NTL Mikroşerit Filtresinin Şeması

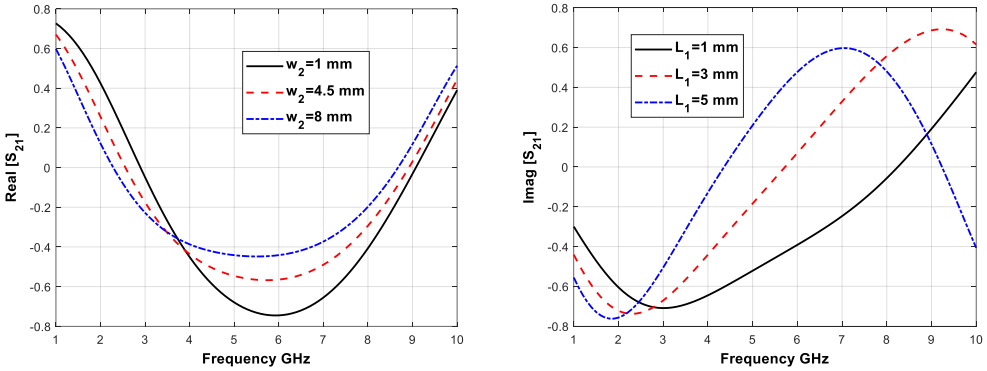
5.2.2.2 Eğitim ve Test Verilerinin Oluşumu

NTL birim elemanının saçılma [S] parametrelerinin simülasyon sonuçlarını oluşturmak için 3B EM simülasyon aracı CST kullanılmıştır. Daha önce bahsedildiği gibi, kademeli olarak birim elemanların birleşme yerleri arasındaki bağlantı etkisinden kaçınmak için, konfigürasyon (w1) sabit bir değer olarak alınır. Böylece, diğer tasarım parametreleri optimizasyon değişkenleri olarak alınabilir. Şekil 5.9'da, NTL birim elemanının seçilen tasarım değişkenlerinin NTL'nin saçılma parametreleri karakteristiği üzerindeki etkisi sunulmuştur.



(a) (b)

Şekil 5.9 Tasarım Parametrelerinin Değişimine Göre NTL'nin Saçılma Parametresi Yanıtı (Devamı)



(c) (d)

Şekil 5.9 Tasarım Parametrelerinin Değişimine Göre NTL'nin Saçılma Parametresi Yanıtı

Şekil 5.9'dan görülebileceği gibi, tasarım değişkenlerinin her biri, diğer tüm değişkenlerin sabit olmasına rağmen birim elemanın saçılma parametresi yanıtını etkileyebilmektedir.

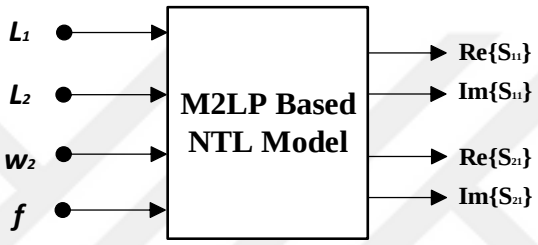
Bu nedenle, her bir geometrik tasarım parametresinin değişimi ile birim elemanın karakteristik tepkisini kesin olarak tahmin etmek için sayısal bir modele diğer bir değişle bir veri setine ihtiyaç vardır. Hesaplama açısından verimli bir optimizasyon prosedürüne sahip olabilmek için eğitim ve test verileri farklı örnekleme yöntemleri kullanılarak oluşturulmuştur (bknz. Tablo 5.5) Önerilen M2LP tabanlı NTL'yi (Şekil 5.10) oluşturmak için her bir örnekleme yönteminin etkinliği, bir çapraz doğrulama yöntemine (k = 5) ve bir hold-out veri setine (veri seti 4) dayalı olarak test edilecektir.

Tablo 5.5 NTL Birim Elemanının Arama Alanı

Parametre	Aralık	Örnekleme Yöntemi	Örnekleme Sayısı (Frekans Noktaları Hariç)
L_1 (mm)	1-5	Veri seti 1: Latin hypercube	216
L_2 (mm)	1-5	Veri seti 2: Linear (6 point)	216

Tablo 5.5 NTL Birim Elemanının Arama Alanı (Devamı)

Parametre	Aralık	Örnekleme Yöntemi	Örnekleme Sayısı (Frekans Noktaları Hariç)
w_2 (mm)	1-15	Veri seti 3: Logarithmic (6 point)	216
Frekans (GHz)	1-10	Veri seti 4: Random	300



Şekil 5.10 Önerilen M2LP Tabanlı NTL'nin Kara Kutu Modeli [65]

Bu çalışmada, W1'in 1 mm sabit, L3'ün L2'nin yarısı kadar, altlık olarak kullanılan malzemenin ise FR4 (1,6 mm dielektrik sabiti 4.6, kayıp tanjant 0.035) olarak alındığı belirtilmelidir. Her eğitim örneği, 1-10 GHz frekans aralığında 91 frekans örneğiyle birlikte gelir.

Önerilen NTL tasarımı karşılıklı bir devre olduğundan (Sij = Sji, i ve j = 1, 2), sadece S11 ve S21 karakteristikleri hesaplanarak, diğer saçılma parametreleri elde edilebilir. Böylelikle kara kutu modelinde (Şekil 5.10), S11 ve S21'in yalnızca gerçek ve sanal kısımları çıktı olarak alınmıştır.

5.2.3 Vaka Analizi

5.2.3.1 M2LP Modeli

Burada, T, S11'in hedeflenen gerçek / hayali değeridir ve P, S_{11}'in tahmin edilen gerçek / sanal değeridir. Burada, model performans sonuçlarının sunumu sırasında, verilen OMH ve SOMYH değerlerinin gerçek ve sanal S11'in ortalama değerleri olduğu, N'nin toplam örnek sayısı olduğu unutulmamalıdır; Burada

dikkat edilmesi gereken bir husus olarak, Tablo 5.5'teki veri setlerinin her biri için N'nin, 91 ile çarpılması (frekans örnekleri için) gerektiği unutulmamalıdır.

Örneğin, veri seti 4'teki toplam örnek sayısı 27300'e eşittir (N = 300 x 91 = 27300). Denklem (5.3) ve (5.4) 'de, ortalama mutlak hata (OMH) ve simetrik ortalama mutlak yüzde hatanın (SOMYH) hata ölçütleri, önerilen modelin saçılma parametrelerinin gerçek ve sanal kısımları için tahmin performansının belirlenmesinde kullanılır.

Çalışmada kullanılan parametreler tablo 5.6'da verilmiştir. Tablo 5.7'den tablo 5.9'a kadar, her bir veri setinin minimum, maksimum ve ortalama performans sonuçları, 10 farklı çalıştırma için farklı M2LP mimarileri için sunulmuştur.

$$OMH = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|T_i - P_i| \tag{5.3}$$

$$SOMYH = \frac{100}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{|T_i - P_i|}{(|T_i| + |P_i|)/2} \tag{5.4}$$

Tablo 5.6 M2LP'nin Kullanıcı Tarafından Tanımlanan Parametreleri [65]

Learning Rate	[10^{-2}, 10^{-5}] exp decay
Batch Size	500
Weight Init.	Xavier Improved
Optimizer	Adam
Weight Decay	10^{-5}
Loss Function	MAE
Epoch	250

Tablo 5.7 Veri Kümesi 1 için M2LP Modelinin Performans Sonuçları

Eğitim Veri Seti	Mimari parametreler	Hata Metriği	Eğitim			Test		
			Max	Min	Ort	Max	Min	Ort
Veri seti 1	2-16	OMH x 10^{-3}	14.51	13.318	13.85	26.57	24.89	25.62
		SOMYH	2.86	2.72	2.81	5.27	5.06	5.16
	2-32	OMH x 10^{-3}	11.41	10.92	11.13	22.13	21.14	21.46
		SOMYH	2.41	2.33	2.36	4.518	4.40	4.44
	2-64	**OMH x 10^{-3}**	**11.58**	**9.84**	**10.45**	**20.44**	**18.85**	**19.38**
		SOMYH	**2.46**	**2.12**	**2.24**	**4.34**	**4.02**	**4.14**
	3-16	OMH x 10^{-3}	12.46	11.61	12.04	23.66	22.37	22.87
		SOMYH	2.56	2.41	2.47	4.76	4.53	4.61
	3-32	OMH x 10^{-3}	11.19	10.54	10.87	20.23	19.66	19.90
		SOMYH	2.36	2.21	2.28	4.24	4.13	4.18
	3-64	OMH x 10^{-3}	11.06	10.27	10.69	20.19	19.58	19.87
		SOMYH	2.46	2.21	2.30	4.38	4.17	4.25

Tablo 5.8 Veri Kümesi 2 için M2LP Modelinin Performans Sonuçları

Eğitim Veri Seti	Mimari parametreler	Hata Metriği	Eğitim			Test		
			Max	Min	Ort	Max	Min	Ort
Veri seti 2	2-16	OMH x 10^{-3}	12.98	12.52	12.80	20.41	19.72	20.02
		SOMYH	3.08	2.94	3.00	4.01	3.92	3.97
	2-32	OMH x 10^{-3}	9.66	9.07	9.36	15.41	14.43	15.12
		SOMYH	2.39	2.26	2.32	3.20	3.06	3.17

Tablo 5.8 Veri Kümesi 2 için M2LP Modelinin Performans Sonuçları (Devam)

Eğitim Veri Seti	Mimari parametreler	Hata Metriği	Eğitim			Test		
			Max	Min	Ort	Max	Min	Ort
Veri seti 2	**2-64**	OMH **x 10^{-3}**	**9.081**	**8.50**	**8.80**	**14.36**	**13.00**	**13.78**
		SOMYH	**2.24**	**2.18**	**2.20**	**3.09**	**2.90**	**2.98**
	3-16	OMH x 10^{-3}	10.56	10.29	10.40	16.59	15.84	16.11
		SOMYH	2.56	2.50	2.53	3.42	3.34	3.36
	3-32	OMH x 10^{-3}	10.31	9.01	9.59	14.68	14.04	14.32
		SOMYH	2.49	2.26	2.36	3.180	3.01	3.09
	3-64	OMH x 10^{-3}	9.88	8.96	9.41	14.53	13.31	13.76
		SOMYH	2.48	2.26	2.36	3.165	2.97	3.02

Tablo 5.9 Veri Kümesi 3 için M2LP Modelinin Performans Sonuçları

Eğitim Veri Seti	Mimari parametreler	Hata Metriği	Eğitim			Test		
			Max	Min	Ort	Max	Min	Ort
Veri seti 3	2-16	OMH x 10^{-3}	13.48	12.72	13.18	15.29	14.57	14.99
		SOMYH	2.94	2.77	2.87	3.28	3.11	3.21
	2-32	OMH x 10^{-3}	10.11	9.26	9.71	11.94	11.32	11.66
		SOMYH	2.32	2.19	2.26	2.65	2.52	2.60
	2-64	OMH **x 10^{-3}**	**9.41**	**8.76**	**9.12**	**11.39**	**11.02**	**11.17**
		SOMYH	**2.20**	**2.08**	**2.17**	**2.56**	**2.46**	**2.51**
	3-16	OMH x 10^{-3}	11.59	10.71	11.07	13.53	12.69	13.05
		SOMYH	2.58	2.43	2.50	2.91	2.77	2.83

Tablo 5.9 Veri Kümesi 3 için M2LP Modelinin Performans Sonuçları (Devamı)

Eğitim Veri Seti	Mimari parametreler	Hata Metriği	Eğitim			Test		
			Max	Min	Ort	Max	Min	Ort
Veri seti 3	3-32	OMH x 10^{-3}	9.51	9.25	9.37	11.87	11.06	11.55
		SOMYH	2.32	2.17	2.22	2.63	2.51	2.57
	3-64	OMH x 10^{-3}	9.92	9.12	9.50	12.34	11.62	11.93
		SOMYH	2.34	2.18	2.25	2.75	2.60	2.64

* Vurgulanan model, seçilen veri seti için en iyi performans sonucuna sahip modeldir.

"M-N" mimari parametrelerine sahip bir model, şu şekilde açıklanılabilir, modelin ilk katmanında M derinliğine sahip N nörona mevcuttur. Burada, her çapraz doğrulama çalışmasının sonuçlarından standart sapma elde edilir (K = 5). Ayrıca modellerin aşırı-öğrenme değerlendirilmesi için Veri Kümesi 4, veri seti olarak kullanılmıştır.

Tablo 5.7'de görülebileceği gibi, 2 derinliğe ve 64'lük birinci katman nöron boyutuna sahip M2LP modeli, hold-out veri seti için en iyi OMH ve SOMYH genel performansı elde etmiştir.

Ayrıca Tablo 5.10'de, seçilen M2LP modelinin muadil regresyon yöntemleriyle performans karşılaştırması sunulmuştur. Modellerin her biri, k = 5 çapraz doğrulama prosesi ile veri seti 3 kullanılarak eğitilmiştir; ayrıca performansları, SOMYH hata ölçüsü kullanılarak Test (hold-out) veri kümesiyle daha detaylı bilgi için araştırılmıştır.

Tablo 5.9'da elde edilen sonuçlara göre, Veri Seti 3 ile eğitilmiş 2 derinliğinde ve 64 birinci katman nöron boyutunda önerilen M2LP modelinin aşırı-öğrenme hatasına düşmeden büyük bir performans gösterdiği söylenebilir. Bu nedenle, bu çalışmada, önerilen M2LP tabanlı NTL bant geçiren filtrenin tasarım optimizasyon süreci için bu model kullanılacaktır.

Tablo 5.10 SOMYH Metrik Kullanılarak 10 Farklı Çalışmadan Sonra En İyi Seçilen M2LP Modelleri ve Muadil Yöntemlerinin Performans Karşılaştırması

Yöntem	Veri seti:3	Test
Auto-tuned K-Nearest Neighbors Regressor (Euclidean Distance)	10.59	10.63
Gradient Boosted Trees Regressor with Early Stopping (Least-Squares Loss)	8.38	7.96
Nystroem Kernel SVM Regressor	9.48	6.47
M2LP 2-64	**2.08**	**2.46**

5.2.3.2 M2LP Tabanlı Bant Geçiren NTL Filtresinin Tasarım Optimizasyonu

Burada M2LP tabanlı birim NTL elemanı ISM bant uygulamaları için simetrik bir 7 elemanlı mikroşerit filtresi oluşturmak için kullanılacaktır.

Önerilen 7 elemanlı NTL filtresi, M2LP tabanlı NTL elemanlarının kademeli konfigürasyonu ile oluşturulur. Bu simetrik modelde, toplam dört farklı NTL öğesi olacaktır.

Bu nedenle, NTL filtresinin tasarımı her biri Şekil 5.10'da verilen NTL'nin kara kutu modeline dayalı olarak filtrenin S özelliklerini (S21, S11) doğrudan etkileyecek 12 değişkenden oluşacaktır. Bu nedenle önerilen tasarım optimizasyon problemi her kademeli NTL'nin değerlerini optimal olarak belirlemek için bir objektif fonksiyon (Denklemler (5.5)- (5.8) gerektiren çok amaçlı çok boyutlu bir problemdir. Şekil 5.11'de optimizasyon sürecinin akış şeması verilmiştir.

Burada yapılacak olan optimizasyon işlemi için kullanılacak olan maliyet fonksiyonları denklem 5.5-5.8 de verilmiştir.

$$\text{Objective}=\text{Cost}_1+\text{Cost}_2+\text{Cost}_3 \tag{5.5}$$

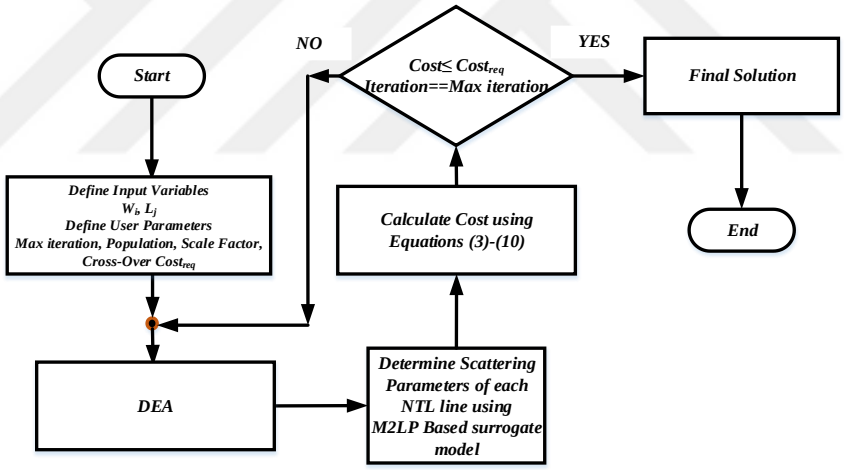
$$\text{Cost}_1=\sum_{f=f_a}^{f_{c1}}[S_{21}(f)+(\frac{1}{S_{11}(f)}-1)] \tag{5.6}$$

$$\text{Cost}_2 = \sum_{f=f_{c_1}}^{f_{c_2}} [S_{11}(f) + (\frac{1}{S_{21}(f)} - 1)] \tag{5.7}$$

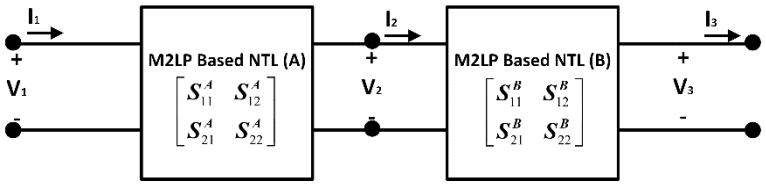
$$\text{Cost}_3 = \sum_{f=f_{c_2}}^{f_b} [S_{21}(f) + (\frac{1}{S_{11}(f)} - 1)] \tag{5.8}$$

Burada; fa ve fb analiz edilen bandın minimum ve maksimum frekans değerleridir ve fc, NTL filtresinin kesme frekansını temsil eder. Bu çalışmada, fa=1GHz, fb=5GHz, ve fc1, fc2 sırasıyla 2.2 GHz and 2.7 GHz olarak belirlenmiştir.

Maliyet fonksiyonları 1 ve 3'ün amacı, belirtilen frekanslar arasında gelen EM sinyallerini reddetmek iken, maliyet fonksiyonu 2, bir bant geçiren filtre oluşturmak için verilen banttaki tüm gelen EM sinyallerini aktarmayı amaçlamaktadır. NTL elemanının her bir S parametresi, Denklemler (5.9)-(5.12) kullanılarak 7 elemanlı NTL filtresinin (Şekil 5.12) eşdeğer S parametresinin hesaplanmasında kullanılacak M2LP tarafından tahmin edilecektir.



Şekil 5.11 DEA ve M2LP Tabanlı Vekil Model Kullanılarak NTL Bant Geçiren Filtrenin Tasarım Optimizasyon Sürecinin Akış Şeması [65]



Şekil 5.12 İki M2LP NTL'nin Kademeli Konfigürasyonu [65]

$$S_{11} = S_{11}{}^{A} + \frac{S^{A}{}_{12} S_{11}{}^{B} S_{21}{}^{A}}{1 - S_{22}{}^{A} S_{11}{}^{B}} \tag{5.9}$$

$$S_{12} = \frac{S^{A}{}_{12} S_{12}{}^{B}}{1 - S_{11}{}^{B} S_{22}{}^{A}} \tag{5.10}$$

$$S_{21} = \frac{S_{21}{}^{B} S_{21}{}^{A}}{1 - S_{22}{}^{A} S_{11}{}^{B}} \tag{5.11}$$

$$S_{22} = S_{22}{}^{B} + \frac{S_{21}{}^{B} S_{22}{}^{A} S_{12}{}^{B}}{1 - S_{11}{}^{B} S_{22}{}^{A}} \tag{5.12}$$

Bu noktada M2LP tabanlı NTL filtre tasarımı optimizasyon problemini çözmek için verimli bir optimizasyon aracı olan diferansiyel evrim algoritması (DEA) kullanılmıştır.

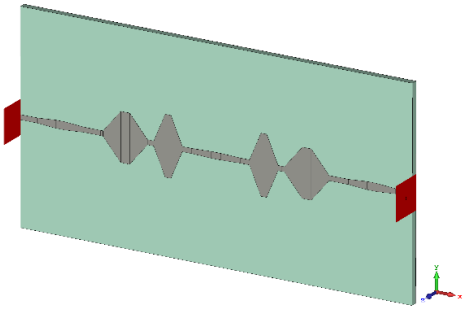
Optimizasyon değişkenlerinin sınırlaması Tablo 5.5'teki sınırlamaya eşit olarak alınmıştır. DEA araması için aşağıdaki kullanıcı tanımlı parametreler kullanılmıştır: Maksimum iterasyon = 30, popülasyon = 50, ölçek faktörü = 0.25, çapraz-geçiş = 0.5 ve maliyetReq = 0. Tablo 5.11'da ,7 elementli NTL filtresinin optimal tasarım değerleri sunulmuştur; burada DEA'dan elde edilen değerler PCB frezeleme teknolojisi ile "50 μm" prototipleme hata toleransına göre yuvarlanmıştır.

Tablo 5.11 7 Elemanlı NTL Filtresinin Optimum Geometrik Tasarım Parametreleri (mm)

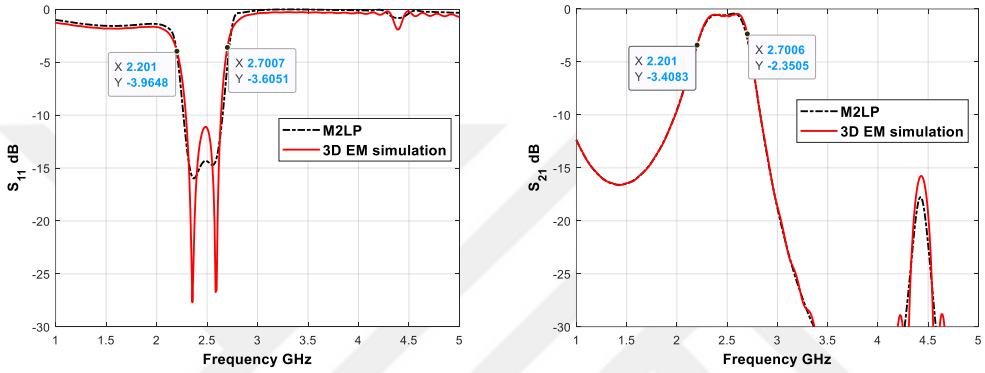
L_1	4.15	L_{10}	1.3
L_2	4.6	L_{11}	4.75
L_4	0.55	w_2	1.85
L_5	4.35	w_3	11.56
L_7	0.95	w_4	14.2
L_8	2.8	w_5	1.5

Elde edilen M2LP sonuçlarının doğrulanabilmesi için, CST ortamında önerilen NTL filtresinin 3 boyutlu modelini modellemek için elde edilen optimal parametreler kullanılır. CST tabanlı model, Şekil 5.14'teki simülasyon sonuçlarının yanı sıra Şekil 5.13'te sunulmuştur.

Görüldüğü gibi önerilen tasarım optimizasyon süreci 3B EM simülasyon aracı ile çok benzer sonuçlar elde etmiştir.



Şekil 5.13 En Uygun Şekilde Tasarlanmış 7 Elemanlı NTL Filtresinin 3 Boyutlu Modeli



(a) (b)

Şekil 5.14 Simüle Edilmiş (a) S_{11}, (b) S_{21}, CST ve M2LP Tabanlı 7 Elemanlı NTL Filtresinin Sonuçları

Burada, M2LP modeli kullanılarak üniform olmayan bir mikroşerit iletim hattının (NTL) hızlı, doğru bir vekil modeli elde edilmiştir. Eğitim ve test veri setlerinin oluşturulması için farklı örnekleme yöntemleri kullanılmıştır. Ardından önerilen M2LP NTL modeli ISM bant uygulamaları için bir bant geçiren filtrenin tasarım optimizasyonu için bir birim öğesi olarak kullanılmıştır.

Bu çalışmada M2LP modeli performans açısından muadil regresyon modeli ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, önerilen yöntem çapraz doğrulama ve hold-out performansları açısından daha hassas ve doğru olduğu gözlemlenmiştir.

Optimum sonuç elde dilmesi amacı ile diferansiyel evrim algoritması (DEA) kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, CST ortamında önerilen NTL filtresinin bir 3D EM simülasyon modeli ile doğrulanmıştır.

Sonuçlardan görülebileceği gibi önerilen M2LP NTL modeli sadece üniform olmayan mikrodalga filtrelerin tasarımı için değil, aynı zamanda tasarım

optimizasyon hedefini değiştirerek diğer mikrodalga devre aşamalarının tasarımı için de kullanılabilir.

6

3B BASKILI ÜNİFORM OLMAYAN SERAMİK MİKROŞERİT FİLTRENİN VEKİL DESTEKLİ OPTİMİZASYONU

Vekil destekli optimizasyonu; hızlı yanıt, yüksek verimlilik ve yüksek doğruluk ile bir çözüm yöntemine ihtiyaç duyan çok ölçekli sorunlara sahip mikrodalga bileşenlerinin tasarım optimizasyonu için etkili yöntemlerden biridir [65]. Boyut küçültme, geniş çalışma bandı, düşük maliyet gibi sürekli artan performans kriterlerine göre bileşenlerin tasarım ve optimizasyon süreci daha zor ve karmaşık hale gelmekte ve bu da tasarımcıları zorlu bir problemle karşı karşıya bırakmaktadır. Ya tasarımcı, tasarım optimizasyon sürecinde düşük doğrulukta hesaplama verimliliği elde etmek için kaba bir model kullanmak zorundadır ya da çok düşük veya hatta mümkün olmayan hesaplama verimliliğinde yüksek doğrulukta ince bir model kullanmak zorundadır [66].

Bu zorlu problem için geçerli çözümlerden biri veriye dayalı vekil modelin kullanılmasıdır [67-70]. Veriye dayalı vekil modeller seçilen problemin uzman bilgisine ihtiyaç duymadan, benzer problemler arasında yüksek adaptasyon oranına ve yüksek hesaplama verimliliğine ihtiyaç duymadan, modelin verilen girdileri kullanarak hedeflenen çıktı özelliklerini tahmin etmesine izin veren yaklaşık örneklenmiş verilere dayanmaktadır [70,71]. Veriye dayalı modellerin modellenmesi ve geliştirilmesi birçok araştırmacı tarafından üzerinde çalışılan bir konudur. Literatür araştırması sonucunda mikrodalga uygulamaları için yaygın olarak kullanılan modelleme yöntemlerinin bazı örnekleri kriging [72], sinir ağları [73-76], destek vektör regresyonu [77-79] ve Derin Öğrenme [70-71], [47,49,73, 80-86] olarak adlandırılabilir.

Veri güdümlü vekil modellerin kullanılması mikrodalga bileşenlerinin tasarımı ve optimizasyonu için uygun bir teknik olmasına rağmen, bu yöntemlerin ayrıca dikkatle ele alınması gereken zorlu tasarım sorunları vardır. (I) Model için 3B EM simülasyonu veya deneysel veriler kullanılarak uygun şekilde veri seti oluşturmak

en önemli adımlardan biridir. Buradaki zorlayıcı problem, vekil modellerin problemin boyutsallığının etkisine karşı zayıf olma eğiliminde olmalarıdır, burada değişken sayısı ve değişken kısıtlama aralığındaki artışla modellerin performansı yüksek miktarda eğitim verisine ihtiyaç duyacağından dolayı önemli ölçüde düşebilir [84-85]. (II) Bir diğer zorlu problem ise vekil modelin eğitimi için yeterli miktarda örnek toplamaktır. Hesaplama verimliliğindeki önemli düşüşü önlemek için veri kümesinin miktarı büyük olmamalı ve aynı zamanda vekil modelin frekans gibi girdiler arasında bir eşleme oluşturabilmesi için yeterince bilgilendirici olmalıdır, uzunluk gibi geometrik tasarım parametreleri, genişlik, yükseklik ve yarıçap vb., tasarım öğeleri arasındaki boşluk veya ekleme boşluğu ve yansıma aşaması, saçılma parametreleri veya radyasyon özellikleri olabilecek problemin çıktısı. Veri güdümlü vekil modelin eğitimi bir kez elde edildikten sonra eğitim örneğinin toplanması zaman alıcı bir prosedür olsa da, tekrarlanan tasarım analizi veya tasarım optimizasyon süreci durumlarında harcanan toplam süre ihmal edilebilir [66,85].

Burada, bir seramik malzemeye dayalı üniform olmayan düzlemsel olmayan Mikroşerit bant geçiren filtre tasarımının tasarım optimizasyonu, veriye dayalı vekil modelleme kullanılarak hesaplama açısından verimli bir şekilde elde edilmiştir. Mikrodalga filtrenin tasarım optimizasyon probleminin bahsedilen zorluklarını çözmek için, önerilen filtrenin Saçılma [S] parametrelerini tahmin etmek için veri güdümlü bir vekil model dikkate alınır; burada hem boyutsallık hem de verimli örnek toplama problemlerinden kaçınmak için bir birim eleman önerilen filtre tasarımı için tasarım 3B EM simülasyon ortamında modellenmiştir. Daha sonra, temel devre teorisi kullanılarak, veriye dayalı model tarafından tahmin edilen saçılma parametreleri ve bir meta-sezgisel optimizasyon algoritması Gray Wolf (GW) [49-86] kullanılarak, istenen filtre özelliklerini oluşturmak için optimal değişken değer setlerini belirlemek için kademeli birim elemanlarının eşdeğer saçılma yanıtı elde edilebilir [65]. Ayrıca, düşük maliyetli bir üretim sürecine sahip olmak için tasarımın seramik malzeme alt tabakasını oluşturmak için 3B baskı teknolojisi kullanılmıştır.

6.2 Üç Boyutlu Yazıcı Kullanılarak Üretilen Seramik Malzemeler

Seramikler, çeşitli mükemmel özellikleri sayesinde kimya endüstrisi, makine, elektronik, havacılık ve biyomedikal mühendisliği dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Onları bu kadar çok yönlü malzemeler yapan özellikler yüksek mekanik mukavemet ve sertlik, iyi termal ve kimyasal stabilite ve uygulanabilir termal, optik, elektrik ve manyetik performans gibi özellikler sayılabilir.

Seramik bileşenler genellikle bağlayıcılar ve diğer katkı maddeleri içeren veya içermeyen bir toz karışımından başlayarak, enjeksiyonla kalıplama, kalıpla presleme, bant döküm, jel döküm vb. gibi aşamalardan geçerek istenilen şekillerde oluşturulurlar.

Seramik bileşenlerin işlenmesi, sahip oldukları aşırı sertlikleri ve kırılganlıkları nedeniyle son derece zor bir işlemdir. Aynı zamanda çatlama gibi kusurların oluşumu yüksek oranda olup, boyutsal hassasiyet ve iyi yüzey kalitesinin elde edilmesi oldukça zordur [87, 88].

Katmanlı üretim (AM) olarak da adlandırılan üç boyutlu (3B) baskı teknolojilerinin [86,88] ortaya çıkışı, bir üretim devrimi olarak kabul edilmektedir. 3B baskı tekniği, sağladığı sınırsız esneklik nedeniyle seramik imalatında kullanımı yaygınlaşan bir alandır.

Bu alanda sağladığı pek çok avantaj mevcuttur bunlar; mikro özelliklere sahip seramik bileşenlerin aynı altyapı içeriğini kullanarak karmaşık şekillerde ve geometrilerdeki tasarımına olanak sağlamakla birlikte işlem süresini ve maliyetini düşürerek önemli ölçüde tasarruf sağlaması olarak sıralatılabilir [88,90-93].

3B baskı, metal, polimer, seramik ve kompozit malzemelerin fiziksel parçalarını dijital olarak 2B kesitlere bölünmüş 3B CAD modellerinden ayrı nokta-nokta, satır-satır veya katman-katman eklemeli şekilde imal etmek için kullanılan bir dizi gelişmiş üretim teknolojisidir [87,89,92,94].

6.3 Üç Boyutlu Yazıcı ile Üretilen Seramik Tabanlı İletim Hat Modeli

Bu tez kapsamında üretilen seramik malzeme “GOERG & SCHNEIDER” firmasının “Plastic body No.254, individually wrapped” ürünü olup 0-0.2 mm arasında %25 şamot kullanılmıştır.

Kullanılan seramik malzemenin kimyasal içeriği, seramik malzemenin fırınlama sıcaklığa bağlı değişimi, fırınlama sıcaklığına bağlı termal genleşme katsayısı ve nem genleştirmesi, sırasıyla tablo 6.1, tablo 6.2 ve tablo 6.3’ de verilmiştir:

Tablo 6.1 Kullanılan Seramik Malzemenin Kimyasal İçeriği

Malzeme İçeriği	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O
%Wt	71.5	22.4	1.7	1.2	0.0	0.4	2.8	0.0

Tablo 6.2 Kullanilan Seramik Malzemenin Fırınlama Sıcaklığa Bağlı Değişimi

Fırınlama Sıcaklığı	1070 °C	1140 °C	1240 °C
Fırınlama rengi	Beyaz	Açık-krem	Krem
Fırınlama çekintisi	%3	%5	%7
Su absorpsiyonu	%9	%6	%0,4

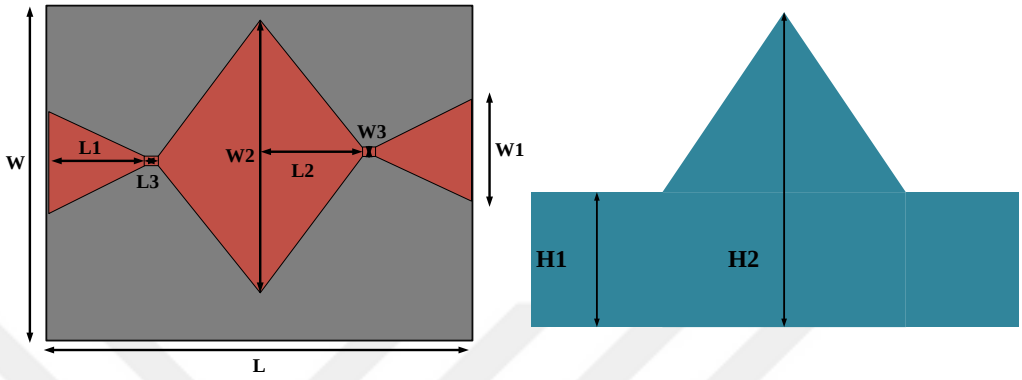
Tablo 6.3 Kullanılan Seramik Malzemenin Fırınlama Sıcaklığına Bağlı Termal Genleşme Katsayısı ve Nem Genleştirmesi- (TGK * 10-7/K)

Fırınlama Sıcaklığı	1070 °C	1140 °C	1240 °C
20°C- 400°C	65	66	62
20°C- 500°C	67	69	64
20°C- 600°C	79	80	72
Nem genleştirmesi	%0.14	%0.07	-

6.4 İlettim Hattı Birim Elemanı ve Veri Kümesi Tasarımı

Önerilen tasarım seramik bir taban malzemesi üzerinde modellenmiştir. Seramikler, dielektrik özelliklerinden dolayı birçok alanda kullanılmaktadır. Dielektrik seramikler, maliyet, boyut, kütle, kararlılık, verimlilik, sağlamlık ve

kullanım kolaylığı nedenleriyle çoğu mikrodalga uygulamasında arzu edilir. 3-B yazıcı, [61,95-102] gibi karmaşık mikrodalga tasarımlarının üretimi için uygun maliyetli bir çözümdür. Burada daha kısa uzunlukta bir tasarıma sahip olmak için, 3B baskı teknolojisinin benzersiz özelliği sayesinde alt tabakalar düzlemsel olmayan bir şekilde alınır. Önerilen tasarımın şeması Şekil 6.1'de sunulmuştur.



(a) (b)

Şekil 6.1 Önerilen İlettim Hattın Şeması

Tasarım optimizasyon sürecini hesaplamalı olarak verimli bir yöntemde gerçekleştirmek adına, eğitim ve test için toplam 900 örnek üretmek için Latin-Hyper küp Örnekleme (LHS) yöntemi kullanılmış olup, örneğin 800'ü eğitim için kullanılmış ve 100'ü vekil modellerin aşırı uydurma performansının değerlendirilmesi için "hold-out" verileri olarak alınmıştır. Örnekleme yöntemi için LHS yöntemi kullanılmıştır. Frekans aralığı 0,5-6 GHz'dir ve adım boyutu 0,1 GHz'dir. Değişkenlerin aralığı Tablo 6.4'te sunulmuştur.

Tablo 6.4 İletim Hattı Birim Elemaninin Arama Alanı

Parameter	Aralık [mm]	Parameter	Aralık [mm]
L1	2-8	W1	0.5-5
L2	1-6	W2	10-30
L3	1-5	W3	0.5-5
H1	1-5	H2	1-10

6.5 Seramik Tabanlı İletim Hat Modeli ile Yapay Zeka Modellerinin Geliştirilmesi

Bu bölümde, önceki bölümde oluşturulan veri setleri kullanılarak NUNPMF tasarımının birim elemanının veriye dayalı bir vekil modeli elde edilecektir. Vekil modelin amacı, tasarımın geometrik değişkenleri (Tablo 6.4) ile NUNPMF'nin saçılma parametrelerinin (S11 & S21) gerçek hayali kısımları arasında bir eşleme oluşturmaktır. Bu amaçla, mikrodalga tasarımlarının modellenmesinde umut verici sonuçlar gösteren farklı tipteki regresyon algoritmaları dikkate alınarak optimizasyon işlemi için kullanılacak optimal vekil model oluşturulmuştur. Tablo 6.5'te, seçilen regresyon algoritmalarının Ortalama Yüzde Hata (OYH) performans sonuçları sunulmaktadır. Her modelin optimal hiper parametrelerinin belirlenmesi için k=3 olan bir çapraz kat doğrulama yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca, modellerin aşırı öğrenmesini engellemek ve aynı zamanda modelin performansını ölçmek için ek bir holdout veri seti kullanılmıştır.

Tablo 6.5 NUNPMF Birim Elemanı için Regresyon Algoritmalarının Performans Karşılaştırması

Metot	Çaprazlama	Holdout
Ensemble Learning	4.8%	5.6%
Support Vector Regression Machine	4.3%	4.9%
Gaussian Process Regression	4.6%	5.2%
Multilayer Perceptron	5.1%	5.9%

Görüldüğü üzere Destek Vektör Regresyon Makinesi (SVRM) modeli, diğer muadil algoritmalara kıyasla en iyi genel performansı sergilemektedir. Bu performans göz önüne alınarak veriye dayalı vekil model olarak optimizasyon sürecine SVRM modeli kullanılacaktır. Burada temel devre teorisi [65], [15] kullanılarak, N elemanı NUNPMF'nin S matrisi, S parametrelerinin vekil model tarafından tahmin edildiği M birim hücrelerinin basamaklı T matrisleri aracılığıyla elde edilen iletim matrisinden elde edilir. Her birim elemanın optimizasyon işlemi için maliyet

fonksiyonu olarak aşağıdaki denklemler kullanılmıştır. Tasarım problemi şu şekilde formüle edilmiştir:

$$x^{*}=\arg\min_{x}[C_1(x)+C_2(x)] \tag{6.1}$$

$$C_1(x)=\max\{f\in[f_{c1},f_{c2}]:|S_{11}(x,f)|\} \tag{6.2}$$

$$C_2(x)=\min\{f\in[f_{c1},f_{c2}]:|S_{21}(x,f)|\} \tag{6.3}$$

C'nin maliyet fonksiyonu olduğu yerde, f_{c1} ve f_{c2}, filtre tasarımlarının hedef çalışma bandını belirleyen alt ve üst frekansını ifade etmektedir. Bu maliyet fonksiyonunda amaç, frekans aralığı [f_{c1} f_{c2}] içinde maksimum bant içi eşleşmeyi ve diğer frekanslarda bunun tersini en aza indirmektir. Tasarımın saçılma özellikleri vekil model aracılığıyla elde edilecektir. Bir sonraki bölümde, önerilen NUNPMF'nin tasarım optimizasyonu, SVRM vekil model tarafından desteklenen Gri kurt optimizasyonu kullanılarak incelenecektir. Performans ölçümleri, 3D baskılı tasarımın deneysel sonuçlarıyla doğrulanacaktır.

6.6 Seramik Tabanlı Mikroşerit İletim Hattı Tasarımının Uygulama Sonuçları

Bu bölümde, gri kurt optimizasyon algoritması kullanılarak NUNPMF'nin tasarım optimizasyonu sunulmaktadır. Gri wolf optimizasyonu (GWO), doğadaki gri kurtlardan esinlenilmiş bir Meta-Sezgisel Algoritmadır (MSA). Bu algoritma, av stratejisi grubundaki ünlü yöntemlerden biridir. M=5 birim eleman tasarımının tasarım değişkenlerinin sınırları Tablo 6.4'e göre alınmıştır. Tasarım optimizasyonunun boyutsallık problemini önlemek için aşağıdaki kısıtlamalar dikkate alınır, (i) birim elemanlar simetrik olarak alınır (1. eleman 5. elemana, 2. ila 4. elemana eşittir), (ii) H1, W1 ve W3 tüm birim elemanları için sabittir dolayısıyla toplam tasarım değişkeni sayısı 18'dir. Tablo 6.5'te sunulan geometrik tasarım parametreleri, 50 popülasyon büyüklüğü ile 50 GWO yinelemesinden sonra elde edilir.

Daha sonra bu değerlerin prototipi 3B yazıcı ile seramik esaslı altlık malzemesini oluşturmak için kullanılmıştır. Bu tezde hazırlanan seramik malzemesi 3-Boyutlu yazıcı ile şekillendirilmiş ardından (Şekil 6.2), dökülen her parça oda sıcaklığında

5 gün boyunca kurutma işlemine tabii tutulup (Şekil 6.3) 1000 °C de 8 saat sinterlenmiştir. Üretilen seramik tabanlı malzemenin boyutu şekil 6.4'te gösterilmiştir.

Ayrıca nihai ürüne ait dielektrik sabit değeri Hatay İskenderun Teknik Üniversitesi laboratuvarlarında ölçülmüş olup 1-6 GHz frekans bandında yaklaşık olarak 3.05 değeri olarak elde edilmiştir. En son aşamada üzerine bakır şeritler ilave edilmiştir (Şekil 6.5).

Yöntemin doğruluğunun ve kararlılığının daha iyi değerlendirilmesi için Yıldız Teknik Üniversitesi Mikrodalga Laboratuvarlarında bulunan 9 KHz-13.5GHz ölçüm bant genişliğine sahip Network Analyzer 3B baskılı NUNPMF saçılma performansını değerlendirmek için kullanılmıştır. NUNPMF'nin ölçülen performansı şekil 6.6'da sunulmuştur. Şekilden de görülebileceği gibi, önerilen yöntem, ölçüm performans sonuçları ile iyi bir uyum sağlamaktadır.

Tablo 6.5 NUNPMF'nin Optimum Olarak Belirlenmiş Geometrik Tasarım Parametreleri

Variable Of 1st Unit	Value [mm]	Variable Of 2nd Unit	Value [mm]	Variable Of 3rd Unit	Value [mm]
L1	5	L1	4	L1	3.7
L2	5	L2	3.2	L2	2.1
L3	2.5	L3	2.5	L3	3
W2	28	W2	14	W2	21
H2	2.3	H2	4.9	H2	1.8
H1			2.5 [mm]		
W1			1.1 [mm]		
W3			1.1 [mm]		

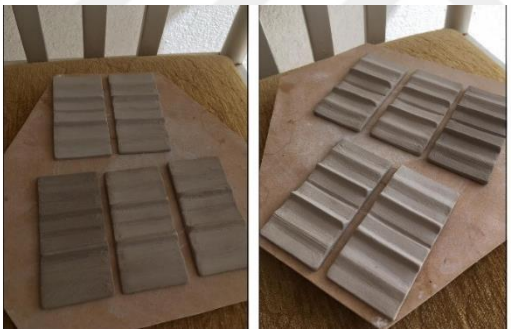


(a) (b)



(c)

Şekil 6.2 (a) ve (b) 3-Boyutlu Yazıcı ile Seramik Taban Malzeme Baskısı, (c) Nihai Ürün

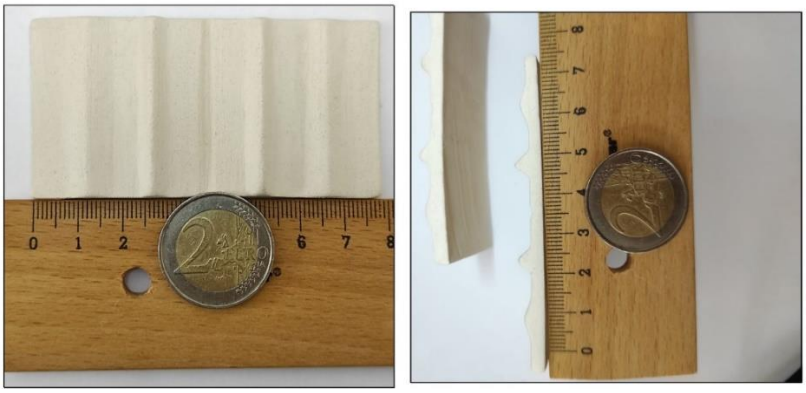


(a) (b)



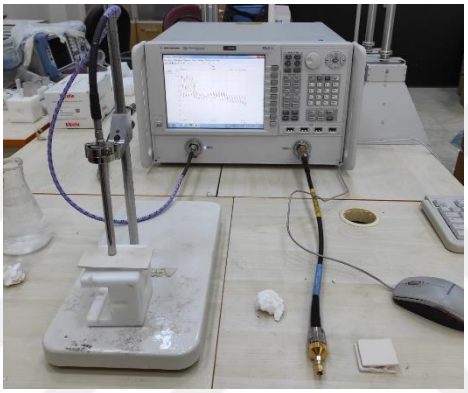
(c)

Şekil 6.3 (a) Üretilen Seramik Taban Malzemenin 1.Gün Olan Kurutma Sürecini, (b) 3.Gün deki Kurutma Sürecini Burada Koyu Renkteki Taban Henüz Kurumamıştır (c) 5.Gün'deki Kurutma Sonunda Elde Edilen Nihai Ürünü Göstermektedir

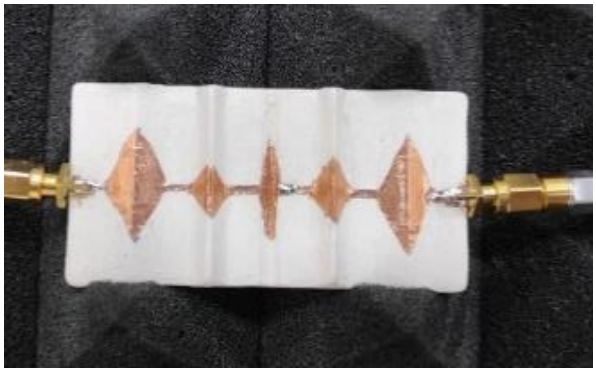


(a) (b)

Şekil 6.4 Üretilen Seramik Taban Malzemenin Boyut Ölçüsü

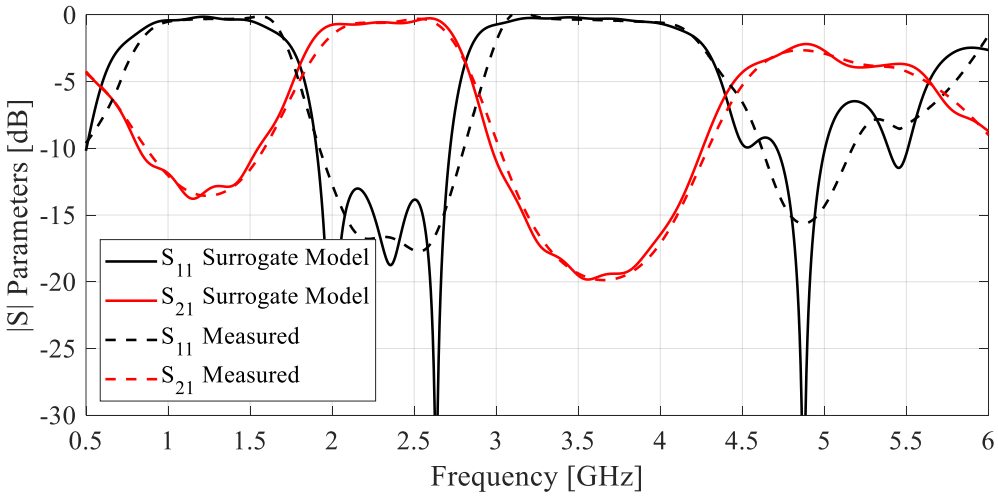


(a)



(b)

Şekil 6.5 (a) Üretilen Seramik Taban Malzemenin Dielektrik Ölçüm Düzeneği, (b) Bakır ile Kaplanmış Seramik Taban



Şekil 6.6 Optimal Tasarımlı NUNPMF Tasarımının Ölçülmüş ve Simüle Edilmiş Sonuçları

7
SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Seramik tabanlı 3B yazdırılabilir bir malzeme ile birlikte hesaplama açısından verimli veri güdümlü vekil model destekli optimizasyon süreci kullanılarak Düzlemsel Olmayan Mikroşerit Filtrenin tasarımı ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla öncelikle seramik malzemenin karakterizasyonu incelenmiştir. Daha sonra malzeme spesifikasyonu ile ilgili olarak, bir Veriye dayalı vekil model oluşturmak adına kullanılacak eğitim ve doğrulama veri setini oluşturmak için önerilen NUNPMF tasarımının bir 3B EM modeli oluşturulmuştur. Bir sonraki adımda, literatürde yaygın olarak kullanılan bazı son teknoloji regresyon algoritmaları (Ensemble Learning, Support Vector Regression Machine, Gaussian Process Regression, Çok Katmanlı Algılayıcı) kullanılmış ve Çapraz doğrulama ve Holdout performansları karşılaştırılmıştır. Çalışılan problemin sonucunda, tüm regresyon algoritmaları kabul edilebilir bir performans sergilese de (∼%5 RME), SVRM regresyon modeli emsallerinden biraz daha iyi bulunmuştur. Böylece bu model, N=5 elemanlı bant geçiren filtrenin tasarım optimizasyonu için veri güdümlü destekli optimizasyon işlemi için kullanılmak üzere seçilmiştir. Doğadaki kurt sürülerinin davranışından ilham alan bir meta sezgisel optimizasyon algoritması Gray Wolf optimizasyonu, NUNPMF'nin optimal geometrik tasarım değişkenlerini belirlemek için global bir arama algoritması olarak kullanılmıştır. Daha sonra elde edilen değerler ve 3 boyutlu yazıcı kullanılarak tasarımın prototipi yapılmıştır. Simüle edilmiş ve deneysel sonuçlara göre, 3B yazıcı teknolojisi kullanılarak yüksek performanslı, hesaplama açısından verimli Seramik malzemeler ve önerilen veriye dayalı vekil model destekli optimizasyon proses tasarımı ile yüksek performanslı düzlemsel olmayan Mikroşerit Filtrenin optimizasyonunun sağlanabileceği söylenebilir.

KAYNAKÇA

[1] J. Lv, Z. Cao, Y. Wang, F. Shi, and J. Wang, "Crystal structures and Microwave dielectric properties of Sr2MgWO6 ceramics at different sintering temperatures," *Journal of Materiomics*, 2021.

[2] A.J. Moulson, and J.M. Herbert, "Electroceramics," *Champman and Hall*, London, 1990.

[3] O. L. Chlieh, W. T. Khan, and J. Papapolymerou, "L-Band Tunable Microstrip Bandpass Filter on Multilayer Organic Substrate With Integrated Microfluidic Channel," *2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014)*, 2014.

[4] C. M. Cheng, and C. F. Yang, "Develop Quad-Band (1.57/2.45/3.5/5.2 GHz) Bandpass Filters on the Ceramic Substrate," *IEEE Microwave And Wireless Components Letters*, Cilt. 20, No. 5, May 2010.

[5] C. L. Huang, Y. B. Chen, and C. F. Tasi, "Influence of B2O3 additions to 0.8(Mg0.95Zn0.05)TiO3-0.2Ca0.61Nd0.26TiO3 ceramics on sintering behavior and microwave dielectric properties," *Journal of Alloys and Compounds*, Cilt. 460, ss. 675–679, 2008.

[6] İ. Ataş, T. Abbasov, and M. B. Kurt, "Doğrusal ve düzlemsel mikroşerit dizi antenlerin tasarımı ve kazanç yönünden karşılaştırılması," *DÜMF Mühendislik Dergisi* Cilt. 9, No. 2, ss. 617-624, 2018.

[7] M. A. Gözel, Ö. Kasar, and M. kahriman, "farkli dielektrik ve fiziksel özelliklere sahip alt taş malzemelerin kullanildiği baski devre kartlarinin rf doğrultma devrelerinde güç dönüştürme verimine etkisi," i*ii. uluslararasi mesleki ve teknik bilimler kongresi*, Gaziantep, 2018.

[8] C. L. Huang, W. R. Yang, and S. H. Huang, "miniaturization of ring resonator bandpass filters using dielectric ceramic substrates," *microwave and optical technology letters*, Cilt. 55, No. 3, 2013.

[9] M. K. M. Salleh, G. Prigent, O. Pigaglio, and R. Crampagne, "Quarter-Wavelength Side-Coupled Ring Resonator for Bandpass Filters," *IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques*, Cilt. 56, No. 1, Jan. 2008.

[10] İ. Dağlı, "Geniş Bantlı Mikroşerit Filtre Tasarımı İçin Süper-Formül ile Oluşturulan Taban İletkeni Kusurlu Yapıların Etkilerinin İncelenmesi," Master Thesis, Dept. Elc. Elctron. Manisa Celal Bayar University, 2020.

[11] R. Tüzün, "Alçak Geçiren Mikroşerit Filtre Tasarımı Ve İnce Film Teknolojisi İle Üretimi," Master Thesis, Dept. Elc. Elctron. Gazi University, 2018.

[12] A. K. Görür, “Modern Haberleşme Sistemleri İçin Çok Bandlı Ayarlanabilir Mikrodalga Filtre Tasarımı Ve İki/Üç/Dört Bandlı Band Geçiren Filtre Uygulamaları,” Phd. Thesis, Dept. Elc. Elctron., Pamukkale University, 2016.

[13] E. Arslan, “Mikroşerit Alçak Geçiren Filtre Tasarımı Ve Analizi,” Master Thesis, Dept. Phys. Eng., Ankara University, 2020.

[14] J. T. Kuo, and H. S. Cheng “Design of Quasi-Elliptic Function Filters With a Dual-Passband Response,” *IEE microwave and wireless components letters*, Cilt. 14, No. 10, 2004.

[15] M. Pozar, "Microwave and RF Design of Wireless Systems", *John Wiley & Sons, Hoboken N.J*, 2001.

[16] T. C. Edwards, and M. B. Steer, “Foundations for Microstrip Circuit Design,” *John Wiley & Sons, Ltd.*, 2016.

[17] E. H. Fooks, R. A. Zakarevicius, “Microwave Engineering Using Microstrip Circuits.,” *Prentice Hall of Australia*, 333, Australia, 1990.

[18] A. F. Uslu, “5G Frekansı Mikroşerit Filtre Tasarımı,” Master Thesis, Dept. Elc. Eng., Haliç university, 2020.

[19] L. Li, Y. Fang, Q. Xiao, Y. J. Wu, N. Wang, and X. M. Chen, “Microwave Dielectric Properties of Fused Silica Prepared by Different Approaches,” *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2014.

[20] E. D. Bulucu, MBM 301, “Seramikler Ders Notları.” Master thesis, Dept. Mat. Eng., Erciyes university, 2016.

[21] X. Yang, W. Yang, and J. Hu, “Preparation of Low-Dielectric-Constant Kaolin Clay Ceramics by Chemical Cleaning Method,” *Front. Mater*, 8:692759, 2021.

[22] N. Canikoğlu, “Teknolojik Seramikler-1,” Sakarya Üniversitesi, Oct. 19, 2015. Available: https://slideplayer.biz.tr/slide/10228354/. [Accessed Dec. 04, 2021]

[23] U. Arifoğlu, Elektrik-Elektronik Mühendisliğinin Temelleri Alternatif Akım Devreleri Cilt-2, Alfa Basım Yayım Dağıtım Ltd. Şti, 367, İstanbul, 2000.

[24] H. Du, Y. Li, and C. Cao, “Effect of temperature on dielectric properties of Si3N4/SiO2 composite and silica ceramic,” *Journal of Alloys and Compounds*, Cilt. 503, No. 1, ss. L9–L13, 2010.

[25] N. Sukhleen, and B. Shalini, “Low loss dielectric ceramics for microwave applications,” *Journal of Ceramic Processing Research*, Cilt. 11, No. 3, ss.316-321, 2010.

[26] S. Abdollahpour, A. Kosari-Moghaddam, and M. Bannayan, “Prediction of wheat moisture content at harvest time through ANN and SVR modeling techniques,” *Information Processing In Agriculture*, Cilt. 7, ss. 500-510, 2020.

[27] D. del-Pozo-Bueno, F. Peir´o, and S. Estrad´e, “Support vector machine for EELS oxidation state determination,” *Ultramicroscopy*, Cilt.221, 2021.

[28] V. N. Vapnik, “The Nature of Statistical Learning Theory,” *Springer*, New York, 1995.

[29] A. L. Balogun, F. Rezaie, Q. B. Pham, L. Gigović, S. Drobnjak, Y.A. Aina, M. Panahi, S. T. Yekeen, and S. Lee, “Spatial prediction of landslide susceptibility in western Serbia using hybrid support vector regression (SVR) with GWO, BAT and COA algorithms,” *Geoscience Frontiers*, Cilt.12, 2021.

[30] F. Liu, Z. Zhou, H. Jang, A. Samsonov, G. Zhao, and R. Kijowski, “Deep convolutional neural network and 3D deformable approach for tissue segmentation in musculoskeletal magnetic resonance imaging,” *Magnetic resonance in medicine*, Cilt. 79(4), ss.2379–2391, 2017.

[31] B. Zhang, S. Li, Z. Huang, B. H. Rahi, Q. Wang, and M. Li, “Transfer learning-based online multiperson tracking with Gaussian process regression,” *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, Cilt. 30, No. 23, 2018.

[32] J. Son, M. Baek, M. Cho, and B. Han, “Multi-object tracking with quadruplet convolutional neural networks,” *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, ss. 3786-3795, 2017.

[33] Y. Moazzen, A. Çapar, A. Albayrak, N. Çalık, and B. U. Töreyin, “Metaphase finding with deep convolutional neural networks*,” Biomedical Signal Processing and Control*, Cilt. 52, ss. 353–361, 2019.

[34] A. Albayrak, A. Unlu, and N. Calik, et al. “A Whole Slide Image Grading Benchmark and Tissue Classification for Cervical Cancer Precursor Lesions with Inter-Observer Variability,” *arXiv preprint* arXiv:1812.10256, 2018.

[35] J. S. Chung, and A. Zisserman, “Lip reading in the wild,” *Asian Conference on Computer Vision*, ss. 87–103, 2016.

[36] M. Zeng, L. T. Nguyen, and B. Yu, et al. “Convolutional neural networks for human activity recognition using mobile sensors,” *Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Computing, Applications and Services*, ss. 197–205. 2014.

[37] G.S. Babu, P. Zhao, and X. L. Li, “Deep convolutional neural network based regression approach for estimation of remaining useful life,” Database Systems for Advanced Applications. DASFAA 2016, *Lecture Notes in Computer Science*, Cilt. 9642. Springer, Cham.

[38] W. Bao, J. Yue, and Y. Rao, “A deep learning framework for financial time series using tacked autoencoders and long-short term memory,” *PloS one*, Cilt.12, No. 7, 2017.

[39] A. S. Qureshi, A. Khan, A. Zameer, and A. Usman, “Wind power prediction using deep neural network based meta regression and transfer learning,” *Applied Soft Computing*, Cilt. 58, ss.742–755, 2017.

[40] Y. Li, H. Shi, F. Han, Z. Duan, and H. Liu, “Smart wind speed forecasting approach using various boosting algorithms, big multi-step forecasting strategy,” *Renewable Energy*, Cilt.135, ss. 540–553, 2019.

[41] Z. Wei, D. Liu, and X. Chen, “Dominant-Current Deep Learning Scheme for Electrical Impedance Tomography,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, ss.1-1, 2019.

[42] Z. Wei, and X. Chen, “Deep-Learning Schemes for Full-Wave Nonlinear Inverse Scattering Problems,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, ss.1-12, 2019.

[43] N. Calik, O. C. Kurban, A. R. Yilmaz, T. Yildirim, and L. D. Ata. "Large-scale offline signature recognition via deep neural networks and feature embedding," *Neurocomputing*, Cilt. 359, ss. 1-14, 2019.

[44] B. Li, B. Jiao, C. H. Chou, R. Mayder, and P. Franzon, “Self-Evolution Cascade Deep Learning Model for High-speed Receiver Adaptation,” *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, Cilt. 10, ss. 1043-1053, 2020.

[45] J. Jin, F. Feng, J. Zhang, S. Yan, W. Na, and Q. Zhang, "A Novel Deep Neural Network Topology for Parametric Modeling of Passive Microwave Components." *IEEE Access*, Cilt. 8, ss. 82273-82285, 2020.

[46] J. Jin, C. Zhang, F. Feng, W. Na, J. Ma, and Q. J. Zhang, “Deep neural network technique for high-dimensional microwave modeling and applications to parameter extraction of microwave filters,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Cilt. 67, No. 10, ss.4140-4155, 2019.

[47] N. Calik, M. A. Belen, and P. Mahouti, “Deep learning base modified MLP model for precise scattering parameter prediction of capacitive feed antenna,” *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 2019.

[48] Y. Lecun, L. Bottou, Y. Bengio, and P. Haffner, “Gradient-based learning applied to document recognition,” *Proceedings of the IEEE*, Cilt. 86, No. 11, ss. 2278–2324. 1998.

[49] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, “Grey wolf optimizer,” *Advances in Engineering Software*, Cilt. 69, ss.46-61, 2014.

[50] E. Emary, W. Yamany, A. E. Hassanien, and V. Snasel, “Multi-Objective Gray-Wolf Optimization for Attribute Reduction,” *Procedia Computer Science*, Cilt. 65, ss.623–632, 2015.

[51] A. L. Balogun, F. Rezaie, Q. B. Pham, et al., “Spatial prediction of landslide susceptibility in western Serbia using hybrid support vector regression (SVR) with GWO, BAT and COA algorithms,” *Geoscience Frontiers*, Cilt. 12, No. 3, 2021.

[52] Susan J. Lolle and Diarmuid P. O’Donoghue, “The RNA cache hypothesis: Mechanistic considerations and evolutionary implications,” *Frontiers in Plant Science*, 2015.

[53] Z. Huang, and Y. Chen, “An Improved Differential Evolution Algorithm Based on Adaptive Parameter,” *Journal of Control Science and Engineering*, ss. 1–5, 2013.

[54] M. I. M. Ghazali, S. Karuppuswami, A. Kaur, et al. “3-D printed air substrates for the design and fabrication of RF components,” *IEEE Transactions On Components, Packaging And Manufacturing Technology*, Cilt. 7, No. 6, ss. 982–989, 2017.

[55] S. Wang, L. Zhu, and W. Wu, “3-D printed inhomogeneous substrate and superstrate for application in dual-band and dual-CP stacked patch antenna,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Cilt. 66, No. 5, ss. 2236-224, 2018.

[56] J. Wu, A. Kodi, S. Kaya, et al. “Monopoles loaded with 3-Dprinted dielectrics for future wireless IntraChip communications,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Cilt. 65, No. 12, ss. 6838–6846, 2017.

[57] M. A. Belen, and P. Mahouti, “Design and realization of quasi-Yagi antenna for indoor application with 3D printing technology,” *Microwave And Optical Technology Letters,* Cilt. 60, ss. 2177–2181, 2018.

[58] Y. C. Toy, P. Mahouti, F. Güneş and M. A. Belen, "Design and manufactering of an X-band horn antenna using 3-D printing technology," *8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST),* Istanbul, ss. 195-198, 2017.

[59] P. Mahouti, F. Güneş, M. A. Belen, A. Çalışkan, “A Novel Design of Non-Uniform Reflectarrays with Symbolic Regression and its Realization using 3-D Printer,” *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, Cilt. 34 No. 2, 2019.

[60] G.P. Le Sage, “3D printed waveguide slot array antennas,” *IEEE Access*, Cilt. 4, ss. 1258–1265, 2016.

[61] P. Mahouti, M. A. Belen, F. Güneş, and R. Yurt, “Design And Realization of Multilayered Cylindrical Dielectric Lens Antenna Using 3D Printing Technology,” *Microwave and Optical Technology Letters*, Cilt. 61, No. 5, ss. 1400-1403, 2019.

[62] S. Moscato, R. Bahr, T. Le, M. Pasian, M. Bozzi, L. Perregrini, and M.M. Tentzeris, “Additive manufacturing of 3D substrate integrated waveguide components,” *IET Electronics Letters*, Cilt. 51, ss. 1426–1428, 2015.

[63] M. A. Belen, and P. Mahouti, “Realization of Dielectric Sheets for Gain Improvement of Ultra-Wideband Horn Antennas Using 3D Printer Technology,” *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, Cilt.34, No. 5, 2019.

[64] M. Mahouti, “Designing of reflectarray antenna using ceramic substrate,” Master thesis, Dept. Mat. Eng., Yildiz Univ., 2017.

[65] T. Mahouti, T. Yıldırım, and N. Kuşkonmaz. "Artificial intelligence–based design optimization of nonuniform microstrip line band pass filter." *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 2020.

[66] P. Mahouti, "Design optimization of a pattern reconfigurable microstrip antenna using differential evolution and 3D EM simulation-based neural network model," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, Cilt. 29, No. 8, 2019.

[67] B. Liu, H. Yang, and M. J. Lancaster. "Global optimization of microwave filters based on a surrogate model-assisted evolutionary algorithm." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Cilt. 65, No. 6, ss. 1976-1985, 2017.

[68] B. Liu, M. O. Akinsolu, N. Ali, and R. Abd-Alhameed. "Efficient global optimisation of microwave antennas based on a parallel surrogate model-assisted evolutionary algorithm." *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, Cilt.13, No. 2, ss. 149-155, 2019.

[69] M. H. Bakr, J. W. Bandler, K. Madsen, J. E. Rayas-Sanchez, and J. Sondergaard. "Space-mapping optimization of microwave circuits exploiting surrogate models." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Cilt. 48, No. 12, ss. 2297-2306, 2000.

[70] S. Koziel, N. Çalık, P. Mahouti and M. A. Belen, "Accurate Modeling of Antenna Structures by Means of Domain Confinement and Pyramidal Deep Neural Networks," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, ss. 1-1, 2021.

[71] S. Koziel, P. Mahouti N. Çalık,M. A. Belen and S. Szczepanski. "Improved Modeling of Microwave Structures Using Performance-Driven Fully-Connected Regression Surrogate." *IEEE Access*, Cilt. 9, ss. 71470-71481, 2021.

[72] A. Pietrenko-Dabrowska, and S. Koziel. "Accelerated multiobjective design of miniaturized microwave components by means of nested kriging surrogates." *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, Cilt. 30, No. 4, 2020.

[73] W. Zhang, F. Feng, J. Jin, and Q. J. Zhang, “Parallel Multiphysics Optimization for Microwave Devices Exploiting Neural Network Surrogate,” *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Cilt. 31, No. 4, ss. 341–344, 2021.

[74] J. Jin, F. Feng, W. Na, S. Yan, W. Liu, L. Zhu, and Q. J. Zhang. "Recent advances in neural network-based inverse modeling techniques for microwave

applications." *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, Cilt. 33, No. 6, 2020.

[75] Z. Zhang, Q. S. Cheng, H. Chen, and F. Jiang, "An efficient hybrid sampling method for neural network-based microwave component modeling and optimization," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Cilt. 30, No. 7, ss. 625-628, 2020.

[76] M. Mahouti, N. Kuskonmaz, P. Mahouti, M. A. Belen, and M. Palandoken. "Artificial neural network application for novel 3D printed nonuniform ceramic reflectarray antenna," *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, Cilt. 33, No. 6, 2020.

[77] A. Khusro, M. S. Hashmi, and A. Q. Ansari, "Enabling the development of accurate intrinsic parameter extraction model for GaN HEMT using support vector regression (SVR)." *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, Cilt. 13, No. 9, ss. 1457-1466, 2019.

[78] J. Cai, J. King, C. Yu, J. Liu, and L. Sun. "Support vector regression-based behavioral modeling technique for RF power transistors." *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Cilt. 28, No. 5, ss. 428-430, 2018.

[79] F. Güneş, M. A. Belen, P. Mahouti, and S. Demirel. "Signal and noise modeling of microwave transistors using characteristic support vector-based sparse regression." *Radioengineering*, Cilt. 25, No. 3, ss. 490-499, 2016.

[80] J. Nan, H. Xie, M. Gao, Y. Song, and W. Yang, "Design of UWB Antenna Based on Improved Deep Belief Network and Extreme Learning Machine Surrogate Models." *IEEE Access*, Cilt. 9, ss. 126541-126549, 2021.

[81] T. Lin, and Y. Zhu. "Beamforming design for large-scale antenna arrays using deep learning." *IEEE Wireless Communications Letters*, Cilt. 9, No. 1, ss.103-107, 2019.

[82] N. Calik, M. A. Belen, P. Mahouti, and S. Koziel. "Accurate modeling of frequency selective surfaces using fully-connected regression model with automated architecture determination and parameter selection based on Bayesian optimization." *IEEE Access*, Cilt. 9, ss. 38396-38410, 2021.

[83] P. Mahouti, "Application of artificial intelligence algorithms on modeling of reflection phase characteristics of a nonuniform reflectarray element." *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, Cilt. 33, No. 2, 2020.

[84] S. Koziel, and A. Pietrenko Dabrowska, "Design-oriented computationally-efficient feature-based surrogate modelling of multi-band antennas with nested kriging." *AEU Int. J. Electronics Comm*, 2020.

[85] X. Wu, X. Peng, W. Chen, and W. Zhang, "A developed surrogate-based optimization framework combining HDMR-based modeling technique and TLBO

algorithm for high dimensional engineering problems," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Cilt. 60, No. 2, ss. 663-680, 2019.

[86] F. Kiani, A. Seyyedabbasi, and P. Mahouti. "Optimal characterization of a microwave transistor using grey wolf algorithms." *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, Cilt. 109, No. 3, ss.599-609, 2021.

[87] Z. Chen et al., "3D printing of ceramics: A review," *Journal of the European Ceramic Society*, Cilt. 39, No. 4, ss. 661–687, 2019.

[88] J. Schlacher et al., "Additive manufacturing of high-strength alumina through a multi-material approach," *Open Ceramics*, Cilt. 5, 2021.

[89] S. Bose, D. Ke, H. Sahasrabudhe, and A. Bandyopadhyay, "Additive manufacturing of biomaterials". *Progress in Materials Science*, Cilt. 93, ss. 45–111, 2018.

[90] S. Mamatha, P. Biswas, P. Ramavath, D. Das, and R. Johnson, "3D printing of complex shaped alumina parts," *Ceramics International*, Cilt. 44, No. 16, ss. 19278–19281, 2018.

[91] A. K. Hofer, I. Kraleva, and R. Bermejo, "Additive manufacturing of highly textured alumina ceramics," *Open Ceramics*, Cilt. 5, 2021.

[92] D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, C. Emmelmann, "Additive manufacturing of metals," *ActaMaterialia*, Cilt.117, ss.371–392, 2016.

[93] M. M. Kirka, P. Nandwana, Y. Lee, and R. R. Dehoff, "Solidification and solid-state transformation sciences in metals additive manufacturing," *Scripta Materialia*, Cilt. 135, ss. 130–134, 2017.

[94] C. Emmelmann, J. Kranz, D. Herzog, and E. Wycisk, "Laser Additive Manufacturing of Metals," *Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering*, ss. 143-162, 2013.

[95] H. Garcia-Martinez, E. Avila-Navarro, A. Rodriguez-Martinez, et al. "Analysis of microwave passive circuits designed using 3D printing techniques," *Elektronika ir Elektrotechnika*, Cilt. 25, No. 2, ss. 36-39, 2019.

[96] M. Cuevas, F. Pizarro, A. Leiva, G. Hermosilla, and D. Yunge. "Parametric Study of a Fully 3D-Printed Dielectric Resonator Antenna Loaded With a Metallic Cap," *IEEE Access*, Cilt.9, ss. 73771-73779, 2019.

[97] J. Tak, D. G. Kang, and J. Choi. "A lightweight waveguide horn antenna made via 3D printing and conductive spray coating," *Microwave and Optical Technology Letters*, Cilt. 59, No. 3, ss. 727-729, 2017.

[98] U. Hasni, R. Green, A. V. Filippas, and E. Topsakal. "One-step 3D-printing process for microwave patch antenna via conductive and dielectric filaments," *Microwave and Optical Technology Letters*, Cilt. 61, No. 3, ss.734-740, 2019.

[99] M. A. Belen, "Stacked microstrip patch antenna design for ISM band applications with 3D-printing technology." *Microwave and Optical Technology Letters*, Cilt.61, No. 3, ss.709-712, 2019.

[100] A. Belen, F. Güneş, P. Mahouti, and M. Palandöken. "A novel design of high performance multilayered cylindrical dielectric lens antenna using 3D printing technology," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering,* Cilt. 30, No. 1, 2020.

[101] M. A. Belen, P. Mahouti, and M. Palandöken. "Design and realization of novel frequency selective surface loaded dielectric resonator antenna via 3D printing technology," *Microwave and Optical Technology Letters*, Cilt. 62, No. 5, ss.2004-2013, 2020.

[102] M. A. Belen, and P. Mahouti. "Design of nonuniform substrate dielectric lens antennas using 3D printing technology," *Microwave and Optical Technology Letters*, Cilt. 62, No. 2, ss.756-762, 2020.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. T. Mahouti, N. Kuşkonmaz, and T. Yıldırım, “Modelling of non-planar microstrip lines via artificial neural networks,” in Proceeding of the 2019 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU), pp. 1-5, 2019.

Makaleler

1. T. Mahouti, T. Yıldırım, and N. Kuşkonmaz, “Artificial intelligence–based design optimization of nonuniform microstrip line band pass filter” Int. journal of numerical modelling electronic network, devices and fields, vol.34, no. 6, pp.1-13, 2021.