İNCE FİLM KAPLAMA YÖNTEMLERİYLE RADAR SOĞURUCU TEKSTİL MALZEMELERİNİN TASARLANMASI VE ÜRETİLMESİ

Şeyma ATICI

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNCE FİLM KAPLAMA YÖNTEMLERİYLE RADAR SOĞURUCU TEKSTİL MALZEMELERİNİN TASARLANMASI VE ÜRETİLMESİ

Şeyma ATICI
0009-0009-9020-7593

Prof. Dr. Enes YİĞİT
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS
OPTİK VE FOTONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2024
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans

İNCE FİLM KAPLAMA YÖNTEMLERİYLE RADAR SOĞURUCU TEKSTİL MALZEMELERİNİN TASARLANMASI VE ÜRETİLMESİ

Şeyma ATICI

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Optik ve Fotonik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr.Enes YİĞİT

Bu çalışmada ince film kaplama yöntemlerinden Atomik Katman Biriktirme (ALD) ile pamuk, polyester ve cam kumaş olmak üzere üç farklı kumaş türü kaplanarak çok katmanlı radar soğurucu tekstil malzemeleri tasarlanmıştır. Kumaşlar ALD'de ZnO ve TiO_2 ile çeşitli kalınlıklarda kaplanmıştır. Kaplama işlemi gerçekleştirilen kumaşların elektromanyetik karakterizasyon ölçümleri "*vektor network analizor" (VNA)* kullanılarak dalga kılavuzu yöntemi ile yapılmıştır. ALD ZnO kaplı bazı kumaşlar fotodepezisyon yöntemiyle $AgNO_3$ ve $FeSO_4$ ile kaplanmış, ALD TiO_2 kaplı kumaşlar ise ayrıca 450 ℃ sıcaklıkta ısıl işleme tabi tutularak titanyum kristalleşmenin elektromanyetik geçirgenliğe olan etkileri araştırılmıştır.

Ham kumaşlar da dahil olmak üzere tüm kumaşların 2-8 GHz frekans bandında, frekansa karşılık gelen elektrik ve manyetik geçirgenlik değerleri alınarak bir veri tabanı oluşturulmuş. Oluşturulan bu veriler güncel doğadan esinlenmiş optimizasyon algoritmalarından olan Gri Kurt Optimizasyon Algoritması ile optimize edilerek minimum yansıma katsayısına ve inceliğe sahip çok katmanlı radar soğurucu (ÇRS) yapılar tasarlanmıştır. ÇRS tasarımlarından en kalını 3,1 cm iken maksimum -10 dB yansıma katsayısına sahiptir. Elde edilen tasarımlar gerçekleştirilerek test edilmiştir.

Yapılan bu çalışmada ilk kez ALD kaplı çeşitli kumaş türlerinin elektromanyetik karakterizasyonu incelenmiş ve çok katmanlı radar soğurucu tasarımları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kumaşlara uygulanan ALD döngü sayısı ile elektromanyetik geçirgenlik değerleri arasında anlamlı bir uyum gözlemlenmiş ve üzerinden bir bağıntı oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Ald (atomic layer deposition), çok katmanlı radar soğurucu, elektromanyetik girişim, elektromanyetik soğurucu, fotodepozisyon, gri kurt optimizasyon algoritması, optimizasyon, TiO_2, vna(vector network analyzer), ZnO

2024, viii + 72 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

DESIGN AND MANIFACTURE OF RADAR ABSORBER TEXTILE MATERIALS BY THIN-FILM COATING METHODS

Şeyma ATICI

Bursa Uludag University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Optical and Photonic Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Enes YİĞİT

In this study, multilayer radar absorbing textile materials were designed by coating three different fabric types, namely cotton, polyester and glass fabric, with Atomic Layer Deposition (ALD), one of the thin film coating methods. The fabrics were coated with ZnO and TiO_2 in ALD at various thicknesses. Electromagnetic characterization measurements of the coated fabrics were realized with the waveguide method using the "vector network analyzer" (VNA). Some ALD ZnO coated fabrics were coated with $AgNO_3$ and $FeSO_4$ by photodeposition method and ALD TiO_2 coated fabrics were also subjected to heat treatment at 450 °C to investigate the effects of titanium crystallization on electromagnetic permeability.

A database was created by taking the permeability and permittivity values of all fabrics, including pristine fabrics, in the 2-8 GHz frequency band, corresponding to the frequency. These data were optimized with the Gray Wolf Optimization Algorithm, one of the current nature-inspired optimization algorithms, and multilayer radar absorber (MRA) structures with minimum reflection coefficient and thinness were designed. The thickest of the MRA designs is 3.1 cm and has a maximum reflection coefficient of -10 dB. The resulting designs were implemented and tested.

In this study, the electromagnetic characterization of various ALD-coated fabric types was examined for the first time and MRA designs were realized. In addition, a significant harmony was observed between the number of ALD cycles applied to the fabrics and the permittivity/permeability values, and a correlation was established.

Key words: Ald (atomic layer deposition), Electromagnetic interference, electromagnetic absorber, gray wolf optimization algorithm, multilayer radar absorber, optimization, photodeposition, TiO_2, vna (vector network analyzer), ZnO

2024, viii + 72 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana rehber olan, bilgisi, tecrübesi ve vizyonerliği ile çalışmalarımda beni teşvik eden ve her açıdan örnek aldığım kıymetli danışman hocam Prof.Dr. Enes YİĞİT'e teşekkürlerimi sunarım.

Gerçekleştirdiğimiz tez çalışmasında tecrübe ve emeklerini esirgemeyen, ufkumuzu açan ve bizi hep motive eden sayın hocam Doç. Dr. Halil İbrahim AKYILDIZ'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca lisansüstü eğitimimin başından beri destek olan, akademik çalışmalarımızda heyecanımızı paylaştığımız hocamız Doç. Dr. Umut AYDEMİR'e teşekkür ederim.

Bu projeyi gerçekleştirmede destek olan TÜBİTAK(2210C)' a teşekkürlerimi sunarım.

Bana her zaman güvenen ve koşulsuz destekleyen en kıymetli varlığım sevgili aileme, yakınlarıma ve sevgili arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Şeyma ATICI
14/08/2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....i
ABSTRACT.....ii
TEŞEKKÜR.....iii
1.GİRİŞ…….. 1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 5
2.1.EM Dalgalar ve İnsan Sağlığına Etkileri 5
2.2.EM Soğuruculara Genel Bakış.....7
2.3.Radar Soğurucu Teorisi.....8
2.3.1.Radar Soğurucu Performansını Etkileyen Faktörler 10
2.3.2.Çok Katmanlı Radar Soğurucu Tasarımının Fiziksel Modeli ve Formülasyonu ...15
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....19
3.1.Materyal Seçimi 19
3.2.Kullanılan Yöntemler.....20
3.2.1.Kaplama Yöntemleri: ALD ve Fotodepozisyon 20
3.2.2.Ölçüm Yöntemleri.....27
3.2.3.Optimizasyon 30
3.2.4. Üretilen Numunelerin Tasnifi ve Etiketlenmesi.....37
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....39
4.1.ALD Sonuçlarına Ait Bulgular 39
4.2.Elektriksel Karakterizasyon Sonuçlarına Ait Bulgular.....43
4.3.Optimizasyon Bulguları 53
4.3.1.Dik Geliş Açısı İçin Üretilen ÇRS Tasarımları.....53
4.3.2.Eğimli Geliş Açısı İçin Üretilen ÇRS Tasarımları.....56
4.4.Gerçekleştirilen Tasarım Ölçümleri.....62
5. SONUÇ ……66
KAYNAKLAR 69
ÖZGEÇMİŞ.....72

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
ω	Açısal frekans
Ar	Argon
N_2	Azot
S_{11}	Birinci porta yansıyan dalga
Z_0	Boş alan (hava) empedansı
ZnO	Çinko oksit
$(Z_{in})_1$	ÇRS'nin eşdeğer empedans değeri
Fe SO_4	Demir(II) sülfat
ε''	Dielektrik kayıp
ε	Elektrik geçirgenlik
δ_ε	Elektrik kayıp tanjantı
f	Frekans
P_{inc}	Gelen dalganın gücü
θ^o	Geliş açısı
Z_{in}'	Giriş empedansı
$AgNO_3$	Gümüş nitrat
ε_0	Havanın dielektrik sabiti
μ_0	Havanın manyetik geçirgenlik sabiti
Z_{0i}	Her katmanın iç empedansı
P_{tr}	İletilen dalganın gücü
k_i	i. katmanın dalga numarası
σ	İletkenliğin kayıp parametresi
S_{22}	İkinci porta yansıyan dalga
μ	Manyetik geçirgenlik
μ''	Manyetik kayıp
δ_μ	Manyetik kayıp tanjantı
ρ	Özdirenç
Γ	Serbest alan arayüzünde yansıma
$R_0^{TE/TM}$	TE veya TM polarizasyonda ÇRS yapısının yansıma katsayısı
$R_i^{TE/TM}$	TE veya TM polarizasyonda i. katman için yansıma katsayısı
Ti	Titanyum
TiO_2	Titanyum dioksit
P_{ref}	Yansıyan dalganın gücü

Kısaltmalar	Açıklama
ALD	Atomik katman biriktirme
R1	ALD 1. reçete
R2	ALD 2. reçete
R3	ALD 3. reçete
R4	ALD 4. reçete
R5	ALD 5. reçete
Rx	ALD reçete-x
Ry	ALD reçete-y
CVD	Chemical vapour deposition
ÇRS	Çok katmanlı radar soğurucu
DI	Deiyonize
DEZ	Dietil çinko
EM	Elektromanyetik
EMI	Electromagnetic interference
ELF	Extremely-low-frequency
GA	Genetik algoritma
GWO	Gri kurt optimizasyonu
IEEE	Institute of electrical and electronics engineers
IR	Kızılötesi
İHA	İnsansız hava araçları
MUT	Material under test
CFO	Merkezi kuvvet optimizasyonu
UV	Morötesi
PSO	Parçacık sürü optimizasyonu
PEC	Perfect electric conductor
PD	Photodeposition
PVD	Physical vapour deposition
RF	Radyofrekans
RL	Reflection loss
SE	Shielding effectiveness
TDMAT	Tetrakis(dimetilamido)titanyum
TE	Transverse electric
TM	Transverse magnetic
VNA	Vector network analyzer
ABC	Yapay arı kolonisi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Elektromanyetik spektrum ve kullanım alanları 5
Şekil 2.2. EM dalga ile soğurucu arasındaki etkileşimin şematik gösterimi 9
Şekil 2.3 EM dalga soğurucu performansını etkileyen faktörler 11
Şekil 2.4. Dik açı ile gelen EM dalga için, ÇRS'nin fiziksel modeli 15
Şekil 2.5. Eğimli gelen EM dalga için, ÇRS'nin fiziksel modeli 16
Şekil 3.1. EM aktif materyaller, şablonlar ve kaplama yöntemleri 21
Şekil 3.2. ALD ZnO yüzey reaksiyonunun şematik gösterimi 22
Şekil 3.3. Laboratuvar fırını 24
Şekil 3.4. Üretilen numuneler 26
Şekil 3.5. Üretilen numunelere ait bazı silisyum wafer örnekleri 26
Şekil 3.6. Kumaş kalınlık ölçüm cihazı 27
Şekil 3.7. Elipsometri cihazı 27
Şekil 3.8. Anritsu VNA Master MS2026C 28
Şekil 3.9. Dalga kılavuzu ve kalibrasyon kitleri 29
Şekil 3.10. Kumaş numunelerinin ölçüme hazırlanması 29
Şekil 3.11. Gri Kurt Hiyerarşisi 33
Şekil 3.12. ÇRS tasarımı için GWO akış diagramı 36
Şekil3.13. Üretilen kumaş numuneleri için oluşturulan isim kodlama sistemi 37
Şekil 3.14. Üretilen numunelere ait blok şema 38
Şekil 4.1. Reçete-5 ALD- ZnO kaplı cam kumaş numunelerinin geçirgenlik değerleri. 42
Şekil 4.2. ALD-ZnO Reçete-5 cam kumaş için merkez frekansta(5 GHz) döngü sayısına karşılık gelen elektriksel karakterizasyon parametre değerleri. 43
Şekil 4.3. Numune 1-6, elektriksel karakterizasyon sonuçları. 44
Şekil 4.4. Numune 7-12, elektriksel karakterizasyon sonuçları. 46
Şekil 4.5. Numune 13-18, elektriksel karakterizasyon sonuçları. 47
Şekil 4.6. Numune 19-24, elektriksel karakterizasyon sonuçları. 49
Şekil 4.7. Numune 25-30, elektriksel karakterizasyon sonuçları 50
Şekil 4.8. Numune 31-36, elektriksel karakterizasyon sonuçları. 52
Şekil 4.9. Numune 37'nin elektriksel karakterizasyon sonucu 53
Şekil 4.10. Tasarım 1-10 için dik açıda hesaplanan yansıma katsayısı değerleri 55
Şekil 4.11. Tasarım 11 için şematik gösterim 56
Şekil 4.12. Tasarım 12 için şematik gösterim 57
Şekil 4.13. Tasarım 13 için şematik gösterim 58
Şekil 4.14. Tasarım 14 için şematik gösterim 59
Şekil 4.15. Tasarım 15 için şematik gösterim 60
Şekil 4.16. Açı ve polarizasyona bağlı olarak gerçekleştirilen ÇRS tasrımlarının yansıma katsayısı değerlerii 61
Şekil 4.17. Açı ve polarizasyona bağlı olarak gerçekleştirilen ÇRS tasrımlarının yansıma katsayısı değerleri 62
Şekil 4.18. Gerçekleştirilmiş ÇRS tasarımları 63
Şekil 4.19. Gerçekleştirilen tasarımın ölçümü 63
Şekil 4.20. Gerçekleştirilen tasarımlardan alınan ölçüm sonuçları……..……...62

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Kaplanan kumaş numuneleri ve ilgili üretim parametreleri 24
Çizelge 3.2. Önceden tanımlanmış malzeme veritabanı 31
Çizelge 4.1. Kumaş numuneleri ile oluşturulan veri seti 39
Çizelge 4.2. Dik geliş açısında tanımlanan ÇRS yapıları için tasarım parametreleri 54
Çizelge 4.3. Eğimli açıda tanımlanan ÇRS Tasarım-11 için tasarım parametreleri 56
Çizelge 4.4. Eğimli açıda tanımlanan ÇRS Tasarım-12 için tasarım parametreleri 57
Çizelge 4.5. Eğimli açıda tanımlanan ÇRS Tasarım-13 için tasarım parametreleri 58
Çizelge 4.6. Eğimli açıda tanımlanan ÇRS Tasarım-14 için tasarım parametreleri 59
Çizelge 4.7. Eğimli açıda tanımlanan ÇRS Tasarım-15 için tasarım parametreleri 60

1. GİRİŞ

Modern çağ, akıllı elektronik, elektrik ve telekomünikasyon sektörlerindeki hızlı büyümeyle birlikte günlük hayatın ayrılmaz bir parçası haline geldi. Akıllı saatler gibi taktığımız giyilebilir teknolojik cihazlardan, akıllı telefonlar, tablet ve bilgisayarlar gibi günlük olarak kullandığımız cihazlara, ev elektroniği ve mikrodalga fırın gibi elektrikli cihazlara kadar teknoloji, yüksek düzeyde entegre elektronik ve elektrikli cihazlardaki hızlı gelişmeler sayesinde her geçen gün hayatımızdaki yerini daha fazla sağlamlaştırarak varlığını sürdürüyor. Ancak bu araçlar farklı frekans aralıklarında elektromanyetik (EM) dalgalar yayar ve atmosferde istenmeyen EM kirliliğe neden olur. Ayrıca gök gürültüsü, güneş parlamaları ve elektrostatik boşalma gibi doğal olaylar da EM radyasyon üretir. İstenmeyen EM dalgalar farklı alanlarda olumsuz sonuçlara sebep olmaktadır. İyonize olmayan radyasyonun insan sağlığına olan etkileri özellikle aşırı düşük frekans (extremely-low-frequency; ELF) ve mikrodalga frekans aralıklarına tepkisi üzerine geniş bir literatür mevcuttur. (Anyaka vd., 2012) Genel olarak, radyofrekans (RF) radyasyonunun doku ve organ sistemleri üzerindeki rapor edilen etkileri termal etkileşimlere atfedilmektedir, ancak düşük alan yoğunluklarında termal olmayan etkilerin varlığı hala aktif bir araştırma konusudur. (National Library of Medicine)

Yıldırım, güneş patlamaları, radar ve uçak kablolarından kaynaklanan elektromanyetik girişim (electromagnetic interference; EMI), aviyonik ekipmanın performansını ortadan kaldırarak arızalara, veri bozulmasına, bilgi kaybına, hatalı kontrol sinyallerine, yanlış uçuş komutlarına ve kazalara neden olabilir. Bu nedenle, emniyetli uçuşlar için koruma amaçlı muhafazalar kullanılarak EMI'den koruma önlemleri benimsenmelidir. Bu cihazların dışında askeri teçhizat, radarlar ve uydular da diğer cihazların işlevselliğinde kesintiye neden olabilecek, performanslarını düşürebilecek, cihazlara zarar verebilecek, sistemin arızalanmasına ve veri kayıplarına neden olabilecek EM dalgalar üretmektedir. Diğer iletken cihazlar arasında elektriksel ve manyetik sinyallerin yayılması indüksiyon yoluyla girişime sebep olur ve çıkış sinyallerinde gürültü ve karışma ile sonuçlanır. Tüm bu sistemleri gereksiz sinyallerden korumak ve düzenli çalışmasını sağlamak amacıyla EMI ekranlama veya kalkanlama kavramı ile geliştirilmiş çeşitli tasarımlar uzun yıllardır kullanılmaktadır. (Devi & Ray, 2022)

Ekranlama esaslı tasarımların yanı sıra radar soğurucu özellikteki yapılar özellikle askeri mühimmat ve sistemlerin gizlenmesinde büyük önem taşımaktadır. Askeri sahada optik olarak kamufle olmak kadar mühimmat ve araçların düşman radar sistemlerinden gizlenebilmesi kritik önem taşımaktadır ve harp stratejilerinde üstünlük sağlamaktadır. (Yigit & Duysak, 2021) Son çeyrek asırda bu amaçla üretilen ekran soğurucu/ radar soğurucu malzeme(RSM) oluşturmak için mükemmel elektrik iletkeni (Perfect Electric Conductor; PEC) üzerinden tek katmanlı, çok katmanlı ve/veya dirençli levha kullanımına dayalı çeşitli yaklaşımlar kullanılmıştır ancak çok katmanlı radar soğurucu (ÇRS) yapıları üstün soğurma yetenekleri ile son yıllarda ön plana çıkmaktadır. (Toktas vd., 2018)

Ayrıca 5G teknolojisinin gelişmekte ve bu sistemin çok geniş bir frekans aralığında kullanılanılacak olması, EM dalgaların insan sağlığı üzerindeki etkilerinin uzun vadede bilinmemesinden ötürü ihtiyatlı davranılmasını tekrar gerekli kıldı ve bir dizi tedbirleri de gündeme taşıdı. Özellikle riskli alanlardaki çalışanlar; EMI'ye maruz kalma tehlikesi olan hastane, nükleer tesisler, yüksek gerilim hatlarındaki görevliler başta olmak üzere havacılık ve uzay teknolojisi, mikroelektronik bileşenler, elektrikli bileşenler, askeri teçhizat, üst düzey bilgi güvenliğinin zorunlu olduğu alanlarda yenilikçi EMI koruyucu malzemelerin kullanılması kaçınılmaz bir gereklilik haline gelmiştir.

Bu ihtiyacı karşılamak maksadı araştırmacıları EMI koruma uygulamaları için kullanılabilecek, hafif, son derece etkili ve modern talebi karşılayabilecek esnek elektronik öğelere kolayca kaplanabilen yeni malzemeleri araştırmaya teşvik etti. (Turczyn vd., 2020)

Metaller geleneksel olarak kullanılan ilk koruyucu malzemelerdir. Fakat ağır, işlenebilirliğinin zor olması ve gelen EM dalgayı yansıtma özelliğinden dolayı işlevsel olmamıştır. Daha sonra devreye karbon malzemeler ve iletken polimerler girse de elektronik endüstrisindeki teknolojik gelişmelerle birlikte radar soğurucu tasarımları daha geniş uygulama alanları, frekans aralıkları ve verimlilik sunan metal/ karbon/ polimerek kompozitler ve gelişmiş malzemelerle tasarlanmaktadır.

Yapısal soğurucu malzemelere ek olarak kaplama yapılmış mikrodalga emici malzemeler geliştirilmiştir. Örneğin iletken grafit tozu (Kuang, et al., 2019) ve karbon nanotüpleri (Fu vd., 2022) dâhil olmak üzere iletim kaybı soğuran malzemeler, dielektrik kaybı soğuran malzemeler; MXene (Guan vd., 2022), baryum titanat (Saini vd., 2013) ve manyetik kaybı soğuran ferrit (Nie vd., 2006) ile manyetik metal tozu (Qing vd., 2015) gibi malzemeler üzerinden soğurucu çalışmaları yapılmış ve etkinlikleri test edilmiştir.

Kaplama yapılacak malzemelerden kumaşın pek çok malzemeye göre farklı alanlarda üstün özellikleri vardır. Örneğin farklı şekillerdeki yapıları sarıp uyum sağlayabilen, kıvrılıp şekil alabilen, belli ölçüde esnek, hafif ve kolay taşınabilen malzemeler olmaları kumaşları portatif ve kullanışlı kılmaktadır. Ayrıca maliyetli ve tek bir alana sabitlenip kullanılmak üzere tasarlanan radar soğurucuların aksine kumaşlar anlık olarak radardan gizlenmenin gerekeceği durumlarda kullanılabilir ve farklı zamanlarda pek çok durum, cihaz ve malzemede gizlenme sağlayabilir.

Malzeme geliştirme safhasında mikroelektronik aygıt geliştirmede, elektrolüminesans ve OLED ekranlarda kullanımı yaygın olan ince film kaplama yöntemlerinden öne çıkan atomik katman biriktirme (ALD; Atomic Layer Deposition) yöntemi kullanılacaktır. ALD düşük sıcaklıklarda uygunabilmesi, büyük yüzey alanlarında dahi düzgün ve eşit kaplama yapabilmesi, iyi bariyer özelliği ve angström seviyesinde kalınlık kotrolü sağlaması sebebiyle farklı uygulamalarda tercih edilmektedir. (Knoops vd., 2014) Bu çalışmada ise farklı kumaş türlerine ALD ZnO ve TiO_2 kaplama yapılmış ayrıca ALD kaplı kumaşlar, fotodepozisyon ile çeşitli kimyasal malzemelerle kaplanmıştır. Tüm kumaş numunelerinin elektornik karakterizasyon ölçümleri vektör ağ analizör (VNA; vector network analyzer) ile yapılmıştır.

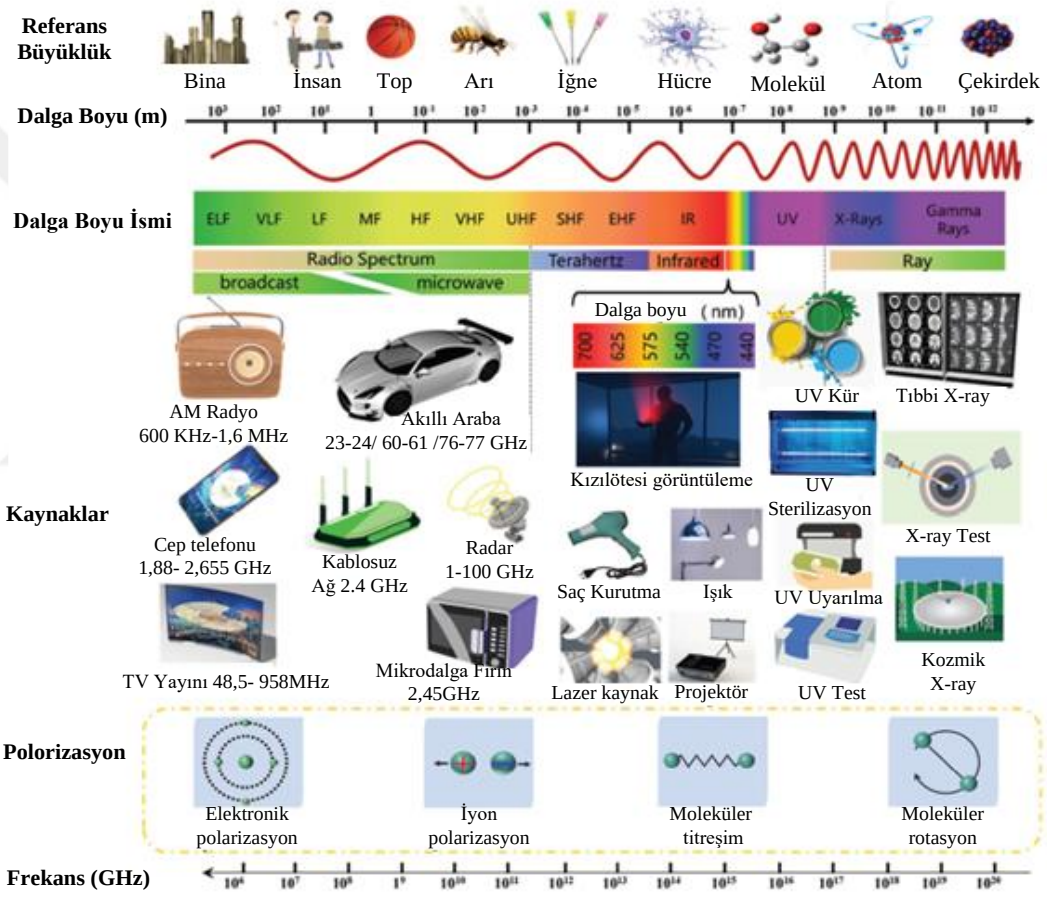
ÇRS'ler farklı elektrik ve manyetik geçirgenlik değerlerine sahip malzemerle en az iki ve daha fazla sayıda katmandan oluşması sebebiyle yapısal soğuruculardan daha iyi performans sergilemektedir. (Yigit & Duysak, 2019) Ancak ÇRS'lerin düşük radar kesit alanı sağlamasının yanında ince ve hafif olması da aranan temel niteliklerdendir. ÇRS'de azami yansıma katsayısını sağlayacak malzemelerin uygun sıra ve kalınlıklarda dik ve eğimli geliş açılarındaki durumlarda polarizasyondan bağımsız olarak biraraya getirmek aynı zamanda olabildiğince ince bir yapı tasarlamak karmaşık bir optimizasyon

problemidir. Optimum ÇRS yapısını oluşturmak için güncel doğadan esinlenmiş optimizasyon algoritmalarından Gri Kurt Optimizasyon Algoritması (GWO; Grey Wolf Optimazer) (Mirjalili vd., 2014) kullanılmıştır. Bu çalışma ile ilk defa farklı maddelerde ALD yöntemi ile kaplanmış çeşitli kumaş türlerinin elektromanyetik özellikleri incelenmiş ve GWO algoritmasıyla optimum ÇRS tasarımları oluşturulmuştur. Elde edilen tasarımlar gerçekleştirilerek ve etkinlikleri test edilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. EM Dalgalar ve İnsan Sağlığına Etkileri

Elektromanyetik radyasyon olarak da adlandırılan elektromanyetik alan dalgaları, voltajın varlığı nedeniyle elektrik yüklerinin vakum, hava veya diğer maddeler içinde hareket etmesiyle oluşur (Anyaka & Akuru, 2012). Birbirine dik elektrik ve manyetik alan bileşeni olan EM dalgaları Şekil 2.1'de gösterildiği gibi EM spektrum farklı frekans aralıklarında farklı isimlerle anılır.



Şekil 2. 0.1. Elektromanyetik spektrum ve kullanım alanları (Cheng vd., 2022)

Elektronik ve telekomünikasyon endüstrisi uygulamalarında radyo ve mikrodalgaları kullanırken, birçok bilimsel ve tıbbi aletde mikrodalga, kızılötesi (IR), morötesi (UV) ve X ışınlarını kullanır. Radar frekans bandı aynı zamanda radyo spektrumu olarak da bilinir ve 3 Hz–300 GHz frekanslarını ve $10^{5} – 10^{-4}$ m dalga boylarını kapsar. Ayrıca, Elektrik

ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE; Institute of Electrical and Electronics Engineers) bu spektrumu frekans bantları cinsinden; X bandı (radar, uydu, kablosuz bilgisayar ağlarının 8–12 GHz kullanımı) ve Ku bandı (12 –18 GHz, uydu iletişiminin kullanımı) olarak tanımlar. Havacılık uygulamaları arasında uçaklar, uzay uçakları, uzaktan kumandalı uçak sistemleri ve insansız hava araçları (İHA'lar) yer alır. Uçağı etkileyen EMI kaynakları, mikrodalga (0,3–8 GHz) ve radyo frekansları (30–300 MHz) gibi iletişim cihazlarıyla ilgili frekans bant genişliklerini ve yıldırım çarpması, yüksek yoğunluklu yayılan alanlar ve elektromanyetik titreşimlerden kaynaklanan frekansları içerir. (Devi & Ray, 2022)

EM dalgalar, diğer cihazların performansını engellemenin yanı sıra, canlı organizmalara ve biyolojik çeşitliliğe zarar verir ve insanlar için sağlık riskleri oluşturabilir. Bilinen yaygın etkileri sinirlilik, uykusuzluk, baş ağrısı, halsizlik olmakla; dokulara ve DNA yapısına zarar verebilir tümörlere, kısırlığa vb. neden olabilir. Elektro-aşırı duyarlılık kentsel ortamlarda sıklıkla rapor edilmektedir. (Devi & Ray, 2022) İyonize EM dalgaların insan sağlığı üzerine bilinen olumsuz etkileri zaten ortada olmakla beraber dokuların aşırı düşük frekans (Extremly-Low-Frequency; ELF) ve mikrodalga frekans aralıklarına tepkisi üzerine oldukça geniş bir literatür bulunmaktadır. ELF dalgaların bazı faktörlere(mesafe, güç, maruz kalma süresi vb.) bağlı olarak vücutta ısıl etkiye(ısı artışına) ve bazı uzmanlarca da ısıl olmayan biyolojik etkilere sebep olacağı ileri sürülmektedir fakat kansere sebep olacağı henüz kanıtlanmamıştır (BTHK). Kısa vadede farklı dokularda hücre kültürleri üzerinde yapılan çalışmalarda ELF alanlarının dokuda düşük indüklenen akımdan kaynaklanabilecek pineal melatonin konsantrasyonundaki değişiklikler gibi bazı fizyolojik etkilerinin insan sağlığına doğrudan bir risk teşkil ettiği gösterilmemiştir. ELF alanlarının fizyolojik etkileri üzerine yapılan çalışmalar gelen düşük frekanslı alanlara maruz kalmanın bir sağlık riski oluşturacağına dair çok az kanıt ortaya çıkarmıştır. (National Library of Medicine) Baz istasyonları gibi yoğun alanlarda çalışanlar için tehlike oldukça yüksektir fakat normal olarak herhangi bir akıllı telefon kullanımı insan sağlığı açısından bir tehdit oluşturmaz. Ancak günümüzde akıllı telefonların aşırı kullanımı kümülatif bir etki meydana getirebilir. ELF'nin uzun vadedeki etkileri ise bilinmemektedir. Nitekim uzmanların bu konu hakkında bir kısmı ELF

radyasyona maruz kalmanın etkilerinin 15-20 yıl sonra ortaya çıkacağını bildirmektedir ve bu yüzden ihtiyatlı davranılması gerekmektedir. (BTHK)

2.2. EM Soğuruculara Genel Bakış

Genel olarak EMI den korunmak üzere iki farklı sistem geliştirilmiştir: yansıtıcı bir ekran kullanmak ve emici/soğurucu bir malzeme kullanarak önlemek. Salisbury (FANTE & McCormack, 1988), Dallenbach (Li vd., 2018) ve Jaumann (Toit & Cloete, 1996) en popüler frekans seçici yüzey ekran esaslı soğuruculardandır. En basit çözüm olan ekranlama/ kalkanlama gelen radyasyonu yansıtarak engeller ancak EMI kirliliğinin önüne geçemez. Bu sebeple gelen EM dalgada tamamına yakın soğurma sağlayan radar soğurucular EMI sorununun üstesinden gelmek için uygun bir çözümdür. EM dalgayı maksimum emme kapasitesinin yanında pratik olarak kullanılabilir olması nedeniyle, mükemmel bir RSM'nin ana kriterleri yüksek yansıma kaybı (reflection loss; RL), düşük kalınlık, geniş bant aralığı ve düşük yoğunluk ya da hafifliktir. RSM tasarımı için ileri teknolojide malzemelerin geliştirilmesi esastır. Geçmişte RSM'lerin tasarımında yaygın olarak kullanılan yapay olarak tasarlanmış metamalzemelerle (Tirkey & Gupta, 2019) birlikte son zamanlarda boyutlarını, şekillerini, iç yapılarını ve bileşimlerini kontrol ederek çok sayıda nanomalzeme (manyetik malzemeler, karbon malzemeler , manyetik karbon kompozit) ortaya çıkmıştır. Geleneksel EM dalga soğurucu nanomateryallerinde (Fe, Fe_3O_4, grafen, grafit, karbonnanotüp) manyetik kayıp veya dielektrik kayıp, yüksek yoğunluk ve zayıf absorpsiyonun yanı sıra karmaşık sentez gibi diğer dezavantajlarda kaydedilen büyük ilerlemeye rağmen nanoyapıların süreçleri ve seri üretimlerindeki zorluklar, bunların gelişimini ve büyük ölçekli kullanımını ciddi şekilde engellemiştir. (Xiaojun vd., 2020) Bu zorluklar araştırmacıları iletim ve polarizasyon kaybına sahip, saçılma ve çoklu yansıma yetenekleri olan tasarımsal açıdan yeni nanoyapılara dayanan malzemeler üretmeye sevk etmiştir.

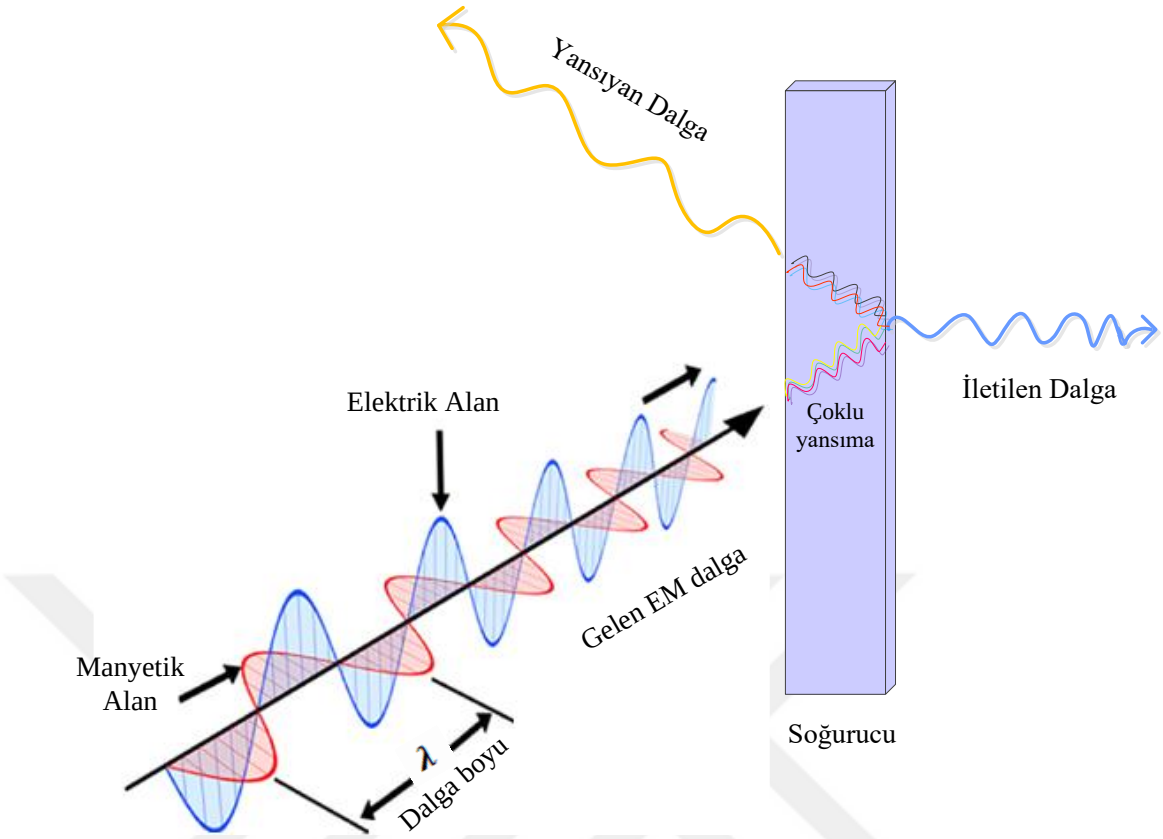
Örneğin, Huang ve arkadaşları (2015) tarafından yayınlanan "Broadband and Tunable High-Performance Microwave Absorption of an Ultralight and Highly Compressible Graphene Foam" makalesinde, genel bant genişliğinin %93,8'ini kaplayan, 60,5 GHz bant genişliğine sahip, ultra hafif ve oldukça sıkıştırılabilir bir grafen köpük formunda RSM tasarımı anlatılmıştır.

Bir başka çalışmada ise 2 boyutlu MXene ($d\text{-}Ti_3C_2T_x$) ile 1 boyutlu selüloz nanofiber kompozit kağıdının bir araya getirilmesiyle sedef benzeri katmanlı yapıda bir RSM tasarlanmıştır (Cao vd., 2018). Geliştirilen katmanlı yapı çoklu iç yansımalara, EM dalgalarının emilmesine ve enerji dağıtımına neden olur. Ayrıca çok arayüzlü nanomalzemelerin yapımı, benzersiz yapı nedeniyle potansiyel olarak yük polarizasyonuna ve ilgili gevşeme ile arayüzey polarizasyonuna yol açabileceğinden daha çarpıcı sonuçlar üretebilmektedir (Xiaojun vd., 2020). Bu sebepler ÇRS' leri tek katmanlı soğuruculardan üstün kılmıştır.

Bir diğer çalışmada ise grafen köpük içerisinde içi boş Mxene küreleri oluşturulmuş ve çekirdek kabuk yapısı tasarlanmıştır (Li vd., 2018). Bu yapıya özgü olan bol miktardaki hetero-arayüz ve sınırlar, istifleme hataları ve yüzey fonksiyonel grupları gibi kusurların, polarizasyon etkisini artırarak daha iyi EM soğurma performansına yol açtığını ortaya koymaktadır. Geliştirilen yeni nanomateryallerin, artan talepleri karşılamak için hafif, düşük yoğunluk ve kalınlıkta, geniş spesifik yüzey alanlarını örtebilecek ve benzersiz elektronik özellikleri ile EM dalgayı emme verimliliği yüksek olması bekleniyor.

2.3. Radar Soğurucu Teorisi

Ortamın maddi özelliklerine bağlı olarak, bir radar soğurucuya çarpan EM dalga; yansıtılabilir, iletilebilir ve emilebilir olmak üzere üç temel bileşene bölünür (Şekil 2.2). İdeal bir RSM sıfır yansıma (R) ve sıfır geçirgenlik (T) sunar böylece %100 soğurma (A) sağlanmış olur. Ancak şimdiye kadar %100 soğurma sağlayan bir tasarım bulunmamaktadır. (Devi & Ray, 2022)



Şekil 0.2.2. EM dalga ile soğurucu arasındaki etkileşimin şematik gösterimi

EMI ekranlama etkinliği değerlerinin hesaplanmasında optik fizikten yararlanılır. Ekranlama etkinliği (Shielding Effectiveness; SE) değerleri herhangi bir VNA cihazından alınan S parametreleri yardımıyla hesaplanır ve birimi desibel (dB) dir. EMI ekranlama etkinliği testleri, iletilen dalganın malzemeden geçtikten sonraki gücünü ve fazını ölçmek için tasarlanmıştır. Yaygın olarak kullanılan test konfigürasyonları, açık alan yöntemi, korumalı kutu yöntemi, korumalı oda yöntemi ve eş eksenli iletim hattı yöntemidir. (Devi & Ray, 2022)

Ekranlama etkinliği bir EM dalgadaki gelen gücün iletilen güce oranının logaritması ile bulunur (Denklem 2.1-2.9). Elektromanyetik radyasyonun yüzeyden yansıması, S_{11} ve S_{22} ile gösterilirken; S_{12} ve S_{21} ise malzeme tarafından EM dalga emilimini gösterir. P_{inc}, P_{ref} ve P_{tr} sırasıyla EM dalganın; gelen, yansıyan ve iletilen güç değerleri olmak üzere, S_{11} yansıyan gücün gelen güce oranı iken S_{21} iletilen gücün gelen güce oranıdır (Denklem 2.2 ve Denklem2.3).

$$SE = 10\log\left(\frac{P_i}{P_t}\right) \quad (2.1)$$

$$S_{11} = \frac{P_{ref}}{P_{inc}} \quad (2.2)$$

$$S_{21} = \frac{P_{tr}}{P_{inc}} \quad (2.3)$$

$$\text{R}= |S_{11}|^2 = |S_{22}|^2 \quad (2.4)$$

$$\text{T}= |S_{21}|^2 = |S_{12}|^2 \quad (2.5)$$

$$A = 1 - R - T \quad (2.6)$$

$$A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (2.7)$$

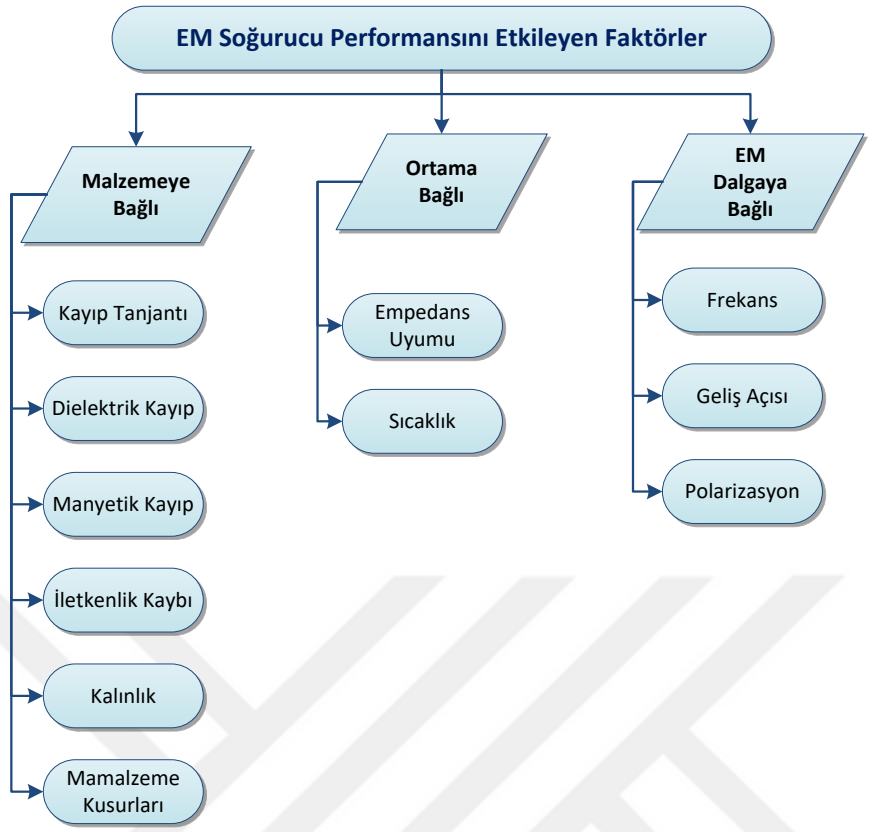
$$SE_A = -10\log(T/(1-R)) \quad (2.8)$$

$$SE_R = -10log(1-R) \quad (2.9)$$

Soğurucunun SE'si malzemenin ve varsa dolgu malzemesinin elektrik ve manyetik özelliklerine, üretim yöntemlerine, kompozit yapı ve dolgu içeriğinin şekline ve işleme yöntemlerine bağlıdır. Belirli etmenlerin sebep olduğu farklı parametrelere bağlı olarak elektromanyetik soğurucuların performansı etkilenir. Bu faktörler Şekil 2.3'te verilmiştir ve sırasıyla açıklanacaktır.

2.3.1. Radar Soğurucu Performansını Etkileyen Faktörler

EM dalgaların oluşturduğu salınımlı elektrik ve manyetik alanlar malzemeden etkilenir. Malzeme özelliklerinin elektrik ve manyetik alanlar üzerindeki etkileri karmaşık elektrik geçirgenlik ($\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$) ve manyetik geçirgenlik ($\mu = \mu' - j\mu''$) değerleri ile ölçülür (Tirkey & Gupta, 2019). Elektrik ve manyetik geçirgenliğin reel kısımları (ε', μ') EM dalga enerjisinin depolama enerjisiyle ilişkili iken elektrik ve manyetik geçirgenliğin sanal kısımları (ε'', μ'') EM dalga enerjisinin kayıp kabiliyetini temsil etmektedir (Xiaojun vd., 2020). Bir RSM'de gelen dalganın zayıflaması ve emilmesinden sorumlu olan malzemenin parametreleri; malzemenin iletkenliğinden kaynaklanan kayıp parametresi(σ), manyetik kayıp(μ'') ve dielektrik kayıptır(ε''). (Tirkey & Gupta, 2019)



Şekil 2. 0.3 EM dalga soğurucu performansını etkileyen faktörler

Bir EM dalga, boş alanda yani havada ilerler ve soğurucu malzeme- hava arayüzünden geçerek malzeme içine girer. İlk olarak hava-malzeme arayüzü arasındaki etkileşim ve buna ait formülasyon, sonrasında malzeme-EM dalga etkileşim mekanizmaları açıklanacaktır.

Öncelikle bir EM dalga boş alandan malzemeye geçerken uğrayacağı yansıma, malzeme ile boş alan arasındaki empedans uyum seviyesi tarafından kontrol edilir. Denklem 2.10'de verilen $\varepsilon_r$ve μ_r malzemenin bağıl elektrik ve bağıl manyetik geçirgenliğidir. Z_o boş alan empedansı ve değeri 377 Ω 'dir. (Zhang vd., 2021)

$$Z_{in} = \frac{\left|\sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}}\right|}{Z_o} \qquad (2.10)$$

$Z_{in} = 1$ durumu eşleşen empedans anlamına gelir. Bu prensibe dayanarak, soğurucu malzeme 377 Ω' luk boş alan empedansına tam olarak eşdeğer olmasa bile yansıma önemli ölçüde azaltılabilir. (Zhang vd., 2021)

Mükemmel bir metalik iletkenle (Perfect electric conductor; PEC) desteklenen bir ortamdaki EM dalgaların yayılma davranışı iletim hattı teorisiyle açıklanır. PEC ile soğurucu malzeme arayüzünde ikincil bir yansıma ($S_{21} = 0$) olacaktır. Bu durumda giriş empedansı($Z_{in}{}'$) denklem 2.11'de verildiği gibidir. Burada c; EM dalganın boş uzaydaki hızıdır, f; EM dalganın frekansı ve d ise malzemenin kalınlığıdır. (Cheng vd., 2022)

$$Z_{in}{}' = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \tanh\left[j \frac{2\pi f d}{c} \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}\right] \tag{2.11}$$

$$RL = 20log \frac{|Z_{in} - Z_0|}{|Z_{in} + Z_0|} \tag{2.12}$$

RSM'ler için soğurma verimliliği ayrıca, yansıma kaybıyla (RL) ölçülür. RL değerlerinin -10 dB'nin altında olduğu frekans aralıkları, etkin emilim bant genişliğini ifade eder. RL -10 dB iken soğurma verimliliği %90, -20 dB'de %99 ve -30 dB'nin altındaki RL değerlerinde %99,9 soğurma sağlar. RL değerinin düşük olması, daha güçlü EM emilimi anlamına gelir. (Zhang vd., 2021)

EM dalga bir dielektrik maddeye düştüğünde nüfuz edip yayılarak madde içinde bir iç alan oluşturur. Bu alan serbest yüklerin hareketine sebep olarak elektrik dipolü oluşturur. Oluşan dipoller elektrik alanıyla etkileşime girerek belirli bir dönme hareketiyle elektrik alan yönünde kendilerini hizalamaya çalışırlar. Ancak sürtünme, atalet ve elastik kuvvet bu harekete karşı çıkarak malzemede kayıplara sebep olur. Oluşan bu enerji kaybı hacimsel ısınma, serbest veya bağlı yüklerin hızlanması ve yavaşlamasıyla gerçekleşir. Salınımlı elektrik alanın frekansı dipolün gelen elektrik alana göre faz dışına çıkma derecesini belirleyen kontrol parametresidir. Malzemenin bu özelliğini elektriksel geçirgenliğin sanal kısmı (ε'') belirler. (Tirkey & Gupta, 2019)

Dielektrik kaybı temel olarak iletim kaybı ve polarizasyon kaybından gelir. Polarizasyon kaybı ise iyonik polarizasyon, elektrik polarizasyon, dipol oryantasyon polarizasyonu ve

ara yüz (serbest yük) polarizasyonundan oluşur. Serbest elektron teorisine göre, denklem 2.13'teki formül yazılmıştır. (Xiaojun vd., 2020)

$$\varepsilon'' \cong 1/2\pi\rho f \varepsilon_0 \tag{2.13}$$

Denklemde verilen ρ; özdirenç, f; frekans ve ε_0; havanın dielektrik sabiti olmak üzere özdirenci yüksek malzemelerin dielektrik kaybının düşük olacağı görülmektedir. Diğer bir ifade ile elektriksel iletkenliğin yüksek olması dielektrik kaybını büyük ölçüde arttıracaktır. İletkenliğe bağlı kayıplar hem dielektrik hem de manyetik malzemelerde ortaya çıkar (Tirkey & Gupta, 2019). İletim kaybı dielektrik kaybında büyük rol oynar, polarizasyon kaybı ihmal edilebilir. Özellikle iyon polarizasyon ve elektron polarizasyon genellikle daha yüksek frekans bölgelerinde ($10^3 - 10^6$ GHz) meydana geldiğinden mikrodalga soğurucu uygulamalarında kolayca gözardı edilebilir. (Xiaojun vd., 2020)

Aynı şekilde EM dalga manyetik bir malzemeye çarptığında manyetik dipoller meydana gelir ve manyetik alan yönünde hizalanırlar. Sonuç olarak manyetik geçirgenliğin sanal kısmı (μ'') ile belirlenen kayıplara sebep olur. Daha büyük ε'' ve μ'' değerleri mikrodalga enerjisinde daha büyük kayıplara neden olur ancak yüksek değerler empedans uyumsuzluğu nedeniyle soğurucu arayüzünde daha yüksek yansımaya sebep olabilir ve EM dalganın soğurucuya girmesini kısıtlar. (Tirkey & Gupta, 2019)

EM radyasyon malzeme içerisinde ilerledikçe zayıflamasını gösteren parametrelerden biri de kayıp tanjantı ve iletkenlik kaybıdır. Elektrik ve manyetik kayıp tanjantı değerleri denklem 2.14 ve 2.15'te verilmiştir. (Tirkey & Gupta, 2019)

$$\delta_\varepsilon = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \tag{2.14}$$

$$\delta_\mu = \frac{\mu''}{\mu'} \tag{2.15}$$

Malzemede meydana gelen bu kayıplar, malzemedeki EM radyasyonunun doğal dağılımını ölçer. Kayıp tanjantındaki daha büyük değerler radyasyonun malzemede daha fazla zayıflamasını sağlar.

Kayıp mekanizmaları büyük ölçüde frekansa bağlıdır ve küçük bir frekans sapması soğurmada dikkate değer sapmalar gösterebilir. Frekans mikrodalga frekansa doğru yükseldikçe dielektrik ve manyetik kayıplar iletimin kaybından baskınken, metalik malzemede iletim kaybı, dielektrik soğurucuda dielektrik kayıplar baskındır. Pratik soğurucular genelde ya iyi elektrik kayıplı malzemeden ya da manyetik kayıplı malzemeler yapılır. Bazen ikisinin kombinasyonu daha geniş bantlı uygulamalarda kullanılır. (Tirkey & Gupta, 2019)

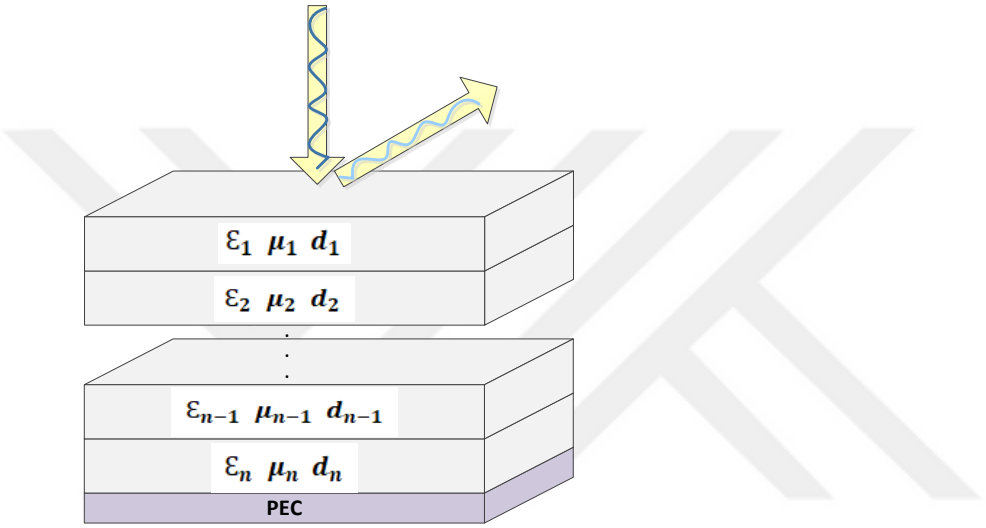
EM radyasyon emilmesi bir enerji dönüşüm sürecidir. UV rejimde, EM radyasyon elektronları uyarılmış bir duruma sürükler ve enerji ısı, radyasyon vb. olarak açığa çıkar. Mikrodalga rejimde elektron taşınması ve dipol polarizasyon EM dalgayı ısı enerjisine dönüştürür. (Zhang vd., 2021)

EM dalgalarının malzeme içimdeki çoklu yansımaları genellikle homojensizliğin saçılma etkisi olarak kabuledilir. Malzeme yapılarının (örneğin içi boş, gözenekli, çekirdek-kabuk, çok katmanlı ve hiyerarşik) ayarlanmasıyla gerçekleştirilen çoklu yansıma EM dalgalarının yayılma yolunun uzamasına ve EM dalga soğurucunun emme kapasitesinin daha da artmasına sebep olacaktır. (Xiaojun vd., 2020) Ayrıca malzemedeki kusurlar, elektrik aktarımını etkileyen elektron saçılma merkezleri olarak hizmet etmektedir ve daha da önemlisi kusur, bir dipol momentinin ortaya çıkabileceği yükün yeniden dağılımına neden olacaktır. (Zhang vd., 2021)

EM dalganın geliş açısı ve polarizayonu EMI'nin bilinmeyen parametreleridir. Etkili bir RSM 'nin pratik gereksinimleri bant genişliği, yüksek emilim ve inceliğe ek olarak gelen dalganın yönelimlerine karşı duyarsızlığı ve polarizasyonudur. EM dalganın geliş açılarındaki artış özellikle manyetik alan bileşeninin azalmasıyla manyetik bağlantı zayıflar ve bu da manyetik rezonansın verimsiz uyarılmasına neden olur. Bu durum emilim oranındaki azalmayla sonuçlanır.

2.3.2. Çok Katmanlı Radar Soğurucu Tasarımının Fiziksel Modeli ve Formülasyonu

Birbiri üzerinde n tane tabakadan oluşan ÇRS yapısında her bir katmanın indisi sırasıyla $i = 1, 2, 3, \ldots n$ olmak üzere her tabakanın kalınlığı d_i, frekansa bağlı elektrik ve manyetik geçirgenlikleri sırasıyla $\varepsilon_i(f)$ ve $\mu_i(f)$ olmak üzere en üstteki birinci katman, serbest alanla temas halindeyken en alt katman (n. katman), PEC ile birleşiktir (Şekil 2.4).



Şekil 2. 0.4. Dik açı ile gelen EM dalga için, ÇRS'nin fiziksel modeli

ÇRS malzemenin yansıma kaybı veya yansıma katsayısı için hesaplamalar, ilk olarak EM dalganın dik açıda geldiği durumlar için sonrasında açıya bağlı durumlar ve farklı polarizasyonlar için yapılacaktır. ÇRS modelindeki her katmanın iç empedansı, Z_{0i} Denklem 2.16'da verilmiştir.

$$Z_{0i} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}\sqrt{\frac{\mu_i}{\varepsilon_i}} \tag{2.16}$$

EM dalganın geliş yönünde her katmanda oluşan empedans ise şu şekilde belirlenir:

$$(Z_{in})_i = Z_{0i}\,\frac{(Z_{in})_{i+1} + Z_{0i}\tanh(\gamma_i d_i)}{Z_{0i} + (Z_{in})_{i+1}\tanh(\gamma_i d_i)} \tag{2.17}$$

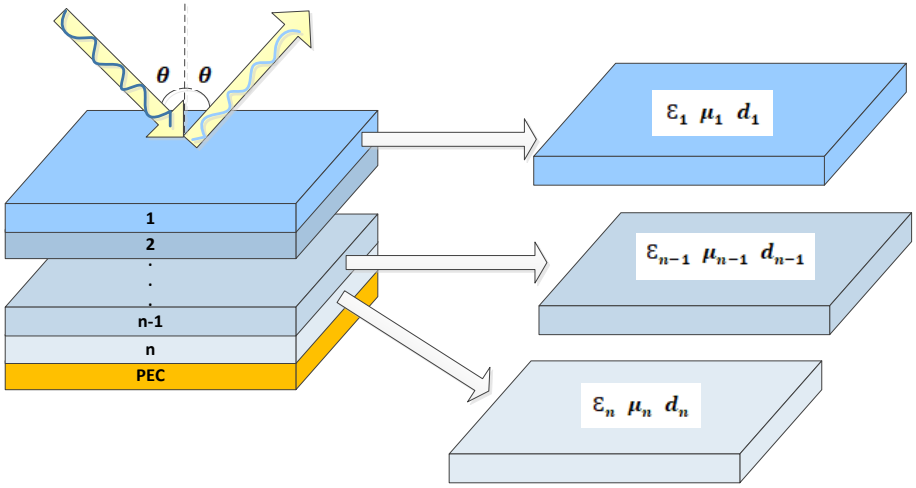
Denklem 2.17'de γ_i girişim sabitini belirtir ve şu şekilde hesaplanır:

$$\gamma_i = j\omega\sqrt{\mu_i \varepsilon_i} \tag{2.18}$$

f frekansı belirtmek üzere, denklem 2.18'de yer alan ω açısal frekansı, $\omega = 2\pi f$ olarak tanımlanır. Eşitlik 2.17'de anlaşılacağı üzere iki katman arasındaki her arayüzde giriş empedansı katmanların sıralı giriş empedansına bağlıdır. Yani son katman olan n. katmanın giriş empedansını ölçebilmek için $(n+1)$. katmanın giriş empedansının bilinmesi gerekiyor ki o da PEC'tir ve kısa devre olarak davrandığından empedansı sıfırdır. Bu şekilde sırasıyla katmanların giriş empedansı hesaplandığında son olarak $(Z_{in})_1$ elde edilir ve toplam ÇRS'nın eşdeğer empedans değeri bu formülle bulunmuş olur.

Denklem 2.19'daki yansıma eşitliğine göre (serbest alan arayüzünde) empedans uyumu serbest alanın empedansı (Z_0) ile 1. katmanın giriş empedansı $(Z_{in})_1$ arasında sağlanmalıdır. Serbest alan arayüzünde yansıma eşitliği şu şekilde verilir:

$$\Gamma = \frac{(Z_{in})_1 - Z_0}{(Z_{in})_1 + Z_0} \tag{2.19}$$



Şekil 2. 0.5. Eğimli gelen EM dalga için, ÇRS'nin fiziksel modeli

ÇRS yapısına geliş açısı θ^o olan bir EM dalganın TE (Transverse Electric) veya TM (Transverse Magnetic) polarizasyonda i. katman için yansıma katsayısı $R_i^{TE/TM}$, aşağıda verilmiştir (Asi & Dib, 2010).

$$R_i^{TE/TM} = \frac{r_i^{TE/TM} + R_{i+1}^{TE/TM} e_i^{-2jk_{i+1}d_{i+1}}}{1 + r_i^{TE/TM} R_{i+1}^{TE/TM} e_i^{-2jk_{i+1}d_{i+1}}} \quad (2.20)$$

Deklem 2.20‘ de verilen $r_i^{TE/TM}$;

$$r_i^{TE} = \begin{cases} \frac{\mu_{i+1}k_i - \mu_i k_{i+1}}{\mu_{i+1}k_i + \mu_i k_{i+1}}, i < n \\ -1 \qquad\qquad , i = n \end{cases} \quad (2.21)$$

$$r_i^{TM} = \begin{cases} \frac{\varepsilon_{i+1}k_i - \varepsilon_i k_{i+1}}{\varepsilon_{i+1}k_i + \varepsilon_i k_{i+1}}, i < n \\ 1 \qquad\qquad , i = n \end{cases} \quad (2.22)$$

Denklem 2.20, 2.21 ve 2.22 ‘de k_i ile ifade edilen i. katmanın dalga numarası, havanın elektriksel ve manyetik geçirgenliği ile frekansa bağlı elektriksel ve manyetik geçirgenlik değerleri aşağıda verilmiştir. (Yigit & Duysak, 2019)

$$k_i = 2\pi f \sqrt{\mu_i \varepsilon_i - \mu_0 \varepsilon_0 \sin^2(\theta)} \quad (2.23)$$

$$\varepsilon_0 = 8.854 \text{ x } 10^{-12}\ F/m\ ,\ \mu_0 = 4\pi \text{ x } 10^{-7} H/m \quad (2.24)$$

$$\mu_i(f) = \mu_0[\mu_i'(f) - j\mu_i''(f)] \quad (2.25)$$

$$\varepsilon_i(f) = \varepsilon_0[\varepsilon_i'(f) - j\varepsilon_i''(f)] \quad (2.26)$$

ÇRS’ ye gelen EM dalga, yapının katmanları boyunca ilerleyecektir ve son katmanın ardından PEC’e çarpacak ve sırasıyla bir üst katmana çıkarak havaya ulaşacaktır. Yapının toplam yansıma katsayısı değeri bulunurken n. katmandan geriye doğru $R_i^{TE/TM}$değerleri bulunur.

PEC’ten yansıyan dalga n. katmanı geçtiğinde, arayüzdeki (n- [n-1] arasında), yansıma katsayısı TE ve TM mod için sırasıyla -1 ve 1 alınmalıdır. Her katmanın yansıma katsayısı bir sonrakini etkiler ve bu şekilde 1. katmana ulaşılır. Amaç yapının total yansıma

katsayısını bulmak olduğundan, birinci katman ile hava arayüzündeki değere ulaşılmalıdır. Bu yüzden katmanların en üstüne elektrik ve manyetik geçirgenlik değeri 1 olan sanal bir katman eklenerek ve yapının total yansıma kaybı (RL) birinci katman ile hava arayüzüden hesaplanarak bulunabilmektedir. Böylece ÇRS yapısının yansıma katsayısı $R_0^{TE/TM}$ denklem 2.20 ile elde edilmektedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde kullanılan materyallerin seçimi, materyallerin işlevselleştirilmesinde kullanılan yöntemler, ölçüm yöntemleri ve ölçüm sonuçlarının optimize edilmesi için uygulanan optimizasyon işlemleri açıklanacaktır.

3.1. Materyal Seçimi

Metal, köpük gibi yapısal soğurucular veya bunlar üzerine kaplama yapılmış türleri yüksek soğurma kabiliyetlerine sahiptir ancak mekanik özellikleri çok tatmin edici değildir. Özellikle hızla gelişmekte olan 5G, uzay ve havacılık teknolojisine bakıldığında EMI'den korunmanın zorunlu olacağı aşikârdır ve cihazların korunmasının yanında giyilebilir teknolojiler ile canlıları korumak ön plana çıkacaktır. Geniş kullanım alanları göz önüne alındığında, EM soğurucu malzemenin sürekli bir yerde sabit kalmasındansa ihtiyaç olduğunda gerekli maddeyi koruyabilen, özellikle askeri sahada anlık olarak EMI' nin engellenmesinin istenildiği durumlarda kullanmak için portatif; hareket kabiliyeti, kırılma gerilimi ve gerilme mukavemeti yüksek; yapısal soğuruculara göre esnek ve malzemeyi sarma yeteneği olan bir yapı formunda olması istenmektedir. Bu amaçla tekstil ve polimerler gibi esnek alt tabakalar/şablonlar, EM aktif malzemeleri ile kaplanalabilir. Farklı alanlarda iyi olan iki malzemenin birleştirilmesi kapsamlı performansın iyileştirilmesi ve dengenin sağlanması açısından çok önemlidir (Zhang vd., 2021).

Malzeme seçiminde tekstil kumaşlarının kullanım itibari ile bu talepleri karşılayabileceği düşünülmüş, soğurucu özelliklerinin ise elektrik ve manyetik değerleri yüksek malzemeler ile kaplandığında geliştirilebileceği literatürdeki çalışmalara bakılarak görülmüştür (Zhang vd., 2021). Bu amaçla pamuk, polyester ve cam kumaş olmak üzere üç farklı kumaş üzerinde çalışılmıştır. Kullanılan pamuk ve cam kumaş bezayağı örgü yapısına, polyester kumaş 5/1 dimi örgü yapısına sahip boyanmamış teknik kumaşlardır. Kumaş numuneleri kaplama öncesinde herhangi bir işlem görmemiştir. Kaplama ön hazırlık olarak kumaşlar reaktör boyutlarına göre uygun ebatlarda(*13 x 23 cm*) kesilmiştir. Elipsometri ile film kalınlık karakterizasyonu için kumaş numuneleri ile birlikte reaktöre yerleştirilecek olan silisyum wafer örnekleri, *2x2* cm boyutlarında kesilmiştir. Kesimi

yapılan silisyum waferlar aseton (10 dakika), etanol (5 dakika) ve deiyonize (DI) içerisinde bekletilerek temizlenmiştir ve kullanıma hazır hale getirilmişir.

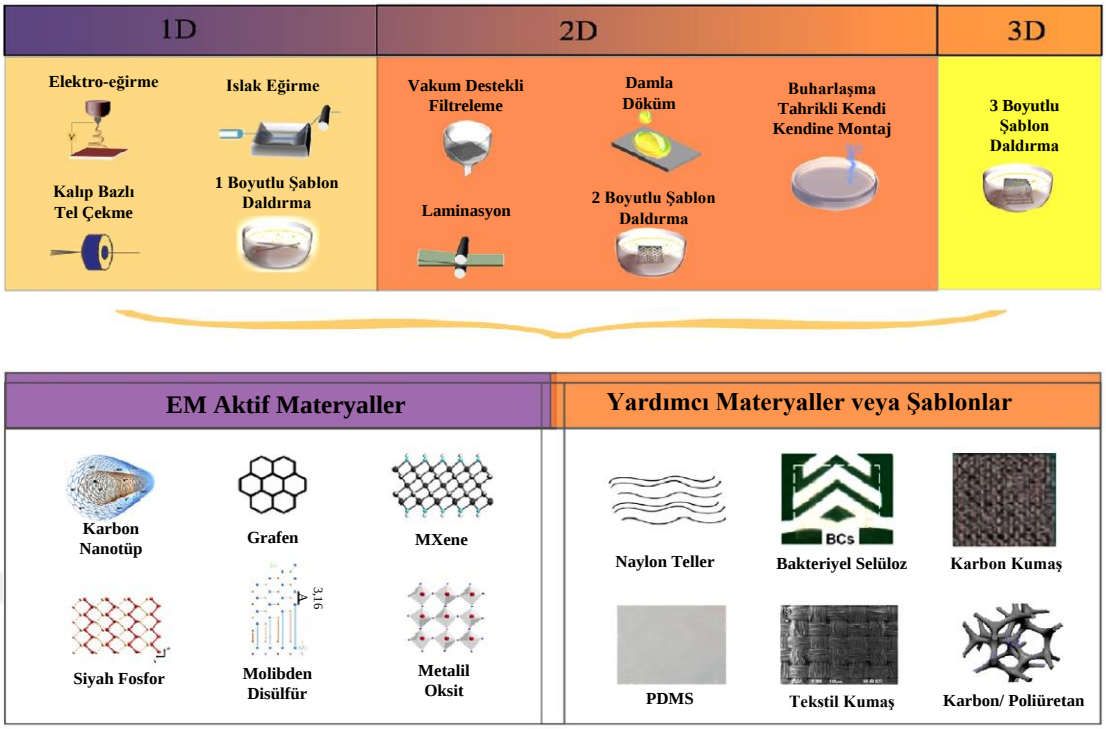
TiO_2 film eldesinde titanyum öncül maddesi olarak, Tetrakis(dimetilamido)titanyum (TDMAT) (Sigma Aldrich, CAS NO: 3275-24-9); oksijen öncül maddesi olarak saf su kullanılmıştır. ZnO film eldesinde çinko öncül maddesi olarak, Dietil Çinko (DEZ) (Sigma Aldrich, CAS NO: 557-20-0); oksijen öncül maddesi olarak yine saf su kullanılmıştır. Sistemde taşıyıcı inert gaz olarak Azot (N_2) kullanılmıştır.

3.2. Kullanılan Yöntemler

Bu bölümde RSM'nin ana malzemesi olan tekstil kumaşların kaplanmasında kullanılan yöntemler, kaplanan kumaşların kalınlık ölçümü ve elektriksel karakterizasyon ölçümlerinde kullanılan yöntemler, elde edilen verilerin tasnifinde kullanılan yöntemler ve maksimum verim ile minimum kalınlık dengesini yakalamak için kullanılan optimizasyon algoritması anlatılmaktadır.

3.2.1. Kaplama Yöntemleri: ALD ve Fotodepozisyon

Mekanik özellikleri yüksek malzemeler üzerine, EM aktif malzemelerin farklı yöntemler ile kaplaması yapılarak verimli soğurucular tasarlanmıştır (Cao vd., 2018) (Chen vd., 2023) (Devi & Ray, 2022) (Fu vd., 2022) (Guan vd., 2022) (Qing vd., 2015) (Zhang vd., 2015). Şekil 3.1'de görüldüğü üzere, yardımcı materyaller veya şablonlar üzerine tek boyutlu (1D), iki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) imalat yöntemleri ile EM aktif materyaller kaplanıp yüksek performanslı yeni malzemeler üretilebilmektedir.

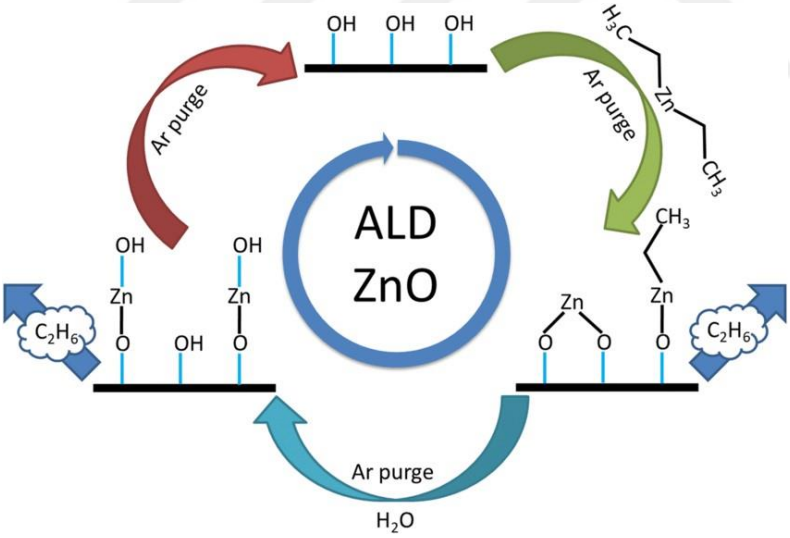


Şekil 3.1. EM aktif materyaller, şablonlar ve kaplama yöntemleri (Zhang vd., 2021)

Başlıca yöntemler elektroeğirme, ıslak eğirme, kalıp bazlı tel çekme, şablon daldırma gibi 1D, vakum destekli filtreleme, damla döküm, laminasyon, buharlaştırmayla kendi kendine montaj gibi 2D ve 3D imalat dahil olmak üzere çeşitli yöntemler gösterilmektedir. (Zhang vd., 2021)

Bu yöntemlerle birlikte yaygın kullanılan sol-jel, fiziksel buhar biriktirme (Physical vapor deposition; PVD), kimyasal buhar biriktirme (Chemical vapor deposition; CVD) ve atomik katman biriktirme (Atomic layer deposition; ALD) ince film üretim yöntemlerindendir. Bu dört yöntem de farklı metotlar ile ince film kaplama yapar ancak ALD nanometre ölçeğinde kontrollü büyütme mekanizmasına sahiptir. (Diler vd., 2021) Tekdüze olmayan, gözenekli ve düzlemsel olmayan yüzeylerde olağanüstü uyumlulukla ultra ince film kaplamalar sağlayan benzersiz bir kimyasal işlemdir (Parsons vd., 2011). Aynı zamanda diğer ince film kaplama yöntemlerine göre düşük sıcaklıklarda kaplama yapılmaktadır. Bu sayede kaplama yapılacak alt malzeme çeşitliliği artmaktadır. (Diler vd., 2021)

ALD, kaplama esnasında sıralı işlemler içermektedir. Kaplama yapılacak olan kimyasallar, düşük basınç altında reaksiyonun gerçekleştiği bölmedeki malzeme yüzeyine gönderilir. Kimyasallar gaz fazında, sırasıyla beslenir. Bu sayede kimyasalların kendi aralarında reaksiyona girmesi engellenmiş olur. Reaksiyon bölmesine beslenen kimyasal ile gerçekleşen yüzey reaksiyonları tüm yüzey reaksiyona girene kadar devam eder. Bir ALD döngüsünde ilk olarak gaz fazında gönderilen örneğin, H_2O molekülleri (öncül gaz 1) yüzeye tutunur ve burada aktif hidroksil grupları oluşturur. Reaksiyon doyuma ulaştığında reaksiyon ürünleri ve ortamda fazla bulunan H_2O molekülleri temizlenmek üzere bir süre ortama inert gaz olan azot (N_2) veya argon (Ar) verilir. Ortamda asılı kalan moleküller inert gaz yardımıyla uzaklaştırılır. Bu işlemin ardından yüzeydeki aktif gruplara bağlanmak üzere diğer kimyasal gaz (öncül gaz 2) beslemesi yapılır. Reaksiyon doyuma uğradığında tekrar inert gaz gönderilir ve temizlik işlemi gerçekleştirilerek bir ALD döngüsü tamamlanmış olur. ALD döngü sayısı belirlenerek istenilen kalınlıkta kaplama yapılabilmektedir. (Akyıldız vd., 2022) Şekil 3.2'de ALD ZnO yüzey reaksiyonunun şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.2. ALD ZnO yüzey reaksiyonunun şematik gösterimi (Cai vd., 2019)

Temel olarak "Öncül 1/ Temizlik 1/ Öncül 2/ Temizlik 2" adımlarından oluşan ALD döngüsü için doz ve temizlikte gazların reaktöre beslenme süreleri de önem arz etmektedir. Bu çalışmada kullanılan; Akyıldız ve diğerleri (2022) tarafından yayınlanan "Antibacterial Activity of Photodeposited Ag Nanoparticles on Cotton Fibers Enabled by Atomic Layer Deposition" adlı makalesinde ayrıntılı olarak anlatılan ALD cihazı ile

polyester, pamuk ve cam kumaşların ZnO ve TiO_2 kaplamaları yapılmıştır. Reaktör sıcaklığı 150 ℃ olmak üzere farklı sürelerde doz ve temizlik süreleri (s) için reçeteler oluşturulmuştur. ALD- ZnO için oluşturulan beş reçete (R1, R2, R3, R4, R5) ve ALD- TiO_2 için oluşturulan iki reçete (Rx, Ry) şu şekildedir;

- **Reçete 1: DEZ (0,5 s)/ N_2 (60 s)/ H_2O (0,3 s)/ N_2 (60 s)**
- **Reçete 2: DEZ (0,1s)/ N_2 (60 s)/ H_2O (0,1 s)/ N_2 (60 s)**
- **Reçete 3: DEZ (0,05s)/ N_2 (60 s)/ H_2O (0,05 s)/ N_2 (60 s)**
- **Reçete 4: DEZ (0,15s)/ N_2 (60 s)/ H_2O (0,15 s)/ N_2 (60 s)**
- **Reçete 5: DEZ (0,2s)/ N_2 (60 s)/ H_2O (0,2 s)/ N_2 (60 s)**
- **Reçete x: TDMAT (0,05s)/ N_2 (60 s)/ H_2O (0,03 s)/ N_2 (60 s)**
- **Reçete y: TDMAT (0,3s)/ N_2 (45 s)/ H_2O (0,2 s)/ N_2 (45 s)**

Kumaş numuneleri reaktöre uygun boyutlarda (13 cm x 23 cm) kesilmiştir. Ardından farklı ALD reçeteleri ile 50, 100, 150, 200, 250, 350 ve 500 döngü sayılarında ZnO ve TiO_2 kaplamalar yapılmıştır. Ayrıca kaplaması yapılan bazı numunelere fotodepozisyon (Photodeposition; PD) yöntemi ile demir(II) sülfat ($FeSO_4$) ve gümüş nitrat ($AgNO_3$) kaplama yapılmıştır. Çizelge 3.1'de türlerine göre kumaş numunelerine yapılan kaplama işlemi, ALD döngü sayısı ve uygulanan reçete bilgileri verilmiştir.

Ayrıca üretilen ALD- TiO_2 kaplı numunelerde, ısıl işleme maruziyeti sonucu oluşan titanyum kristallenmesinin, elektromanyetik parametrelerdeki değişime etkisini incelemek amacıyla Rx ve Ry reçeteleriyle üretilen kumaşlar 450 ℃'de 120 dakika fırınlama işlemine tabi tutulmuştur. Isıl işlemin gerçekleştirildiği Mikrotest marka kül fırını Şekil 3.3'de verilmiştir.



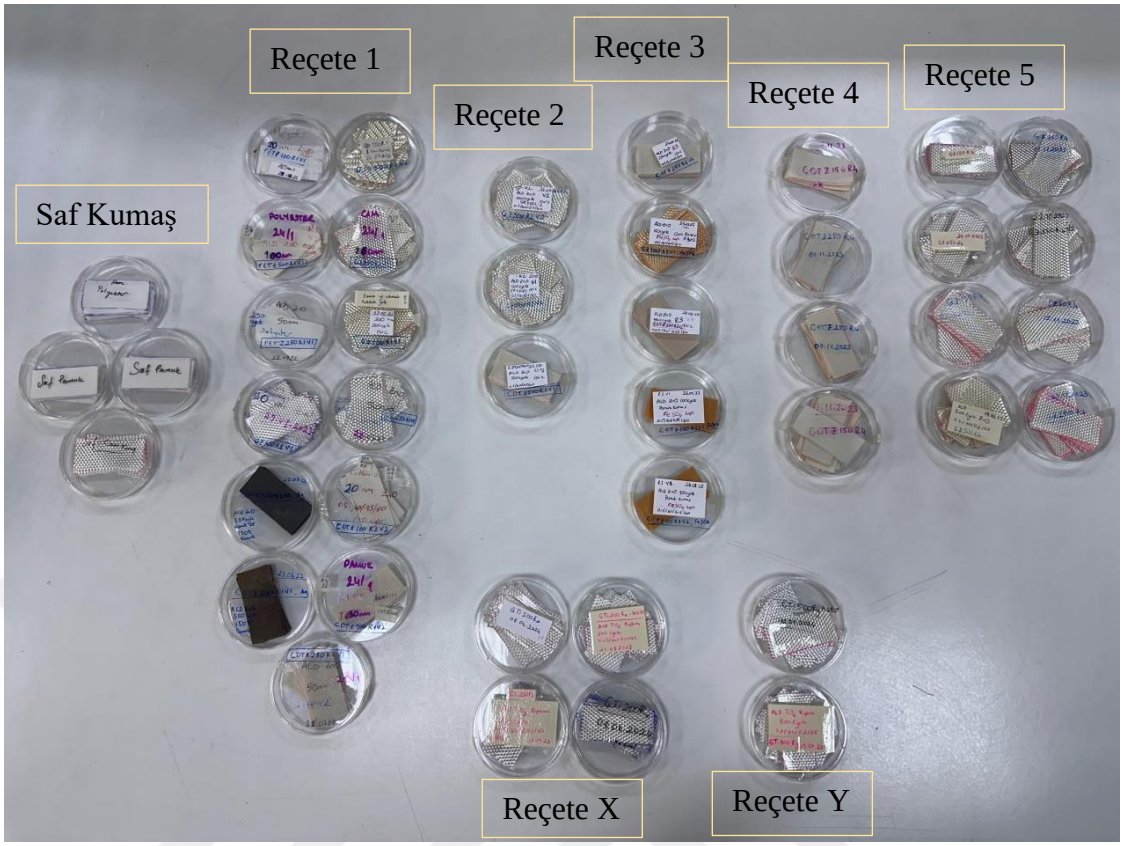
Şekil 3.3. Laboratuvar fırını

Çizelge 3.1. Kaplanan kumaş numuneleri ve ilgili üretim parametreleri

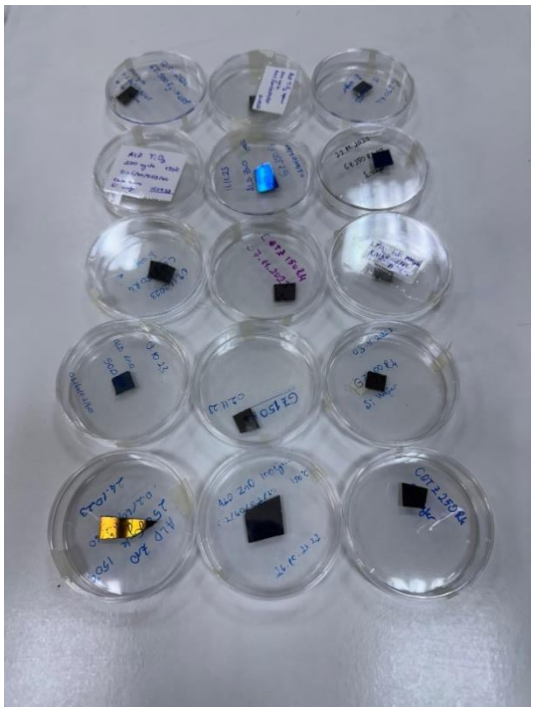
Numune No	Kumaş Türü	Kaplama Malzemesi	Döngü Sayısı	Reçete
1	Pamuk	ALD- ZnO	100	R1
2	Pamuk	ALD ZnO + PD $FeSO_4$	100	R4
3	Pamuk	ALD ZnO + PD $FeSO_4$	100	R4
4	Pamuk	ALD- ZnO	250	R1
5	Pamuk	ALD ZnO + PD $AgNO_3$	250	R1
6	Pamuk	ALD- ZnO	250	R3
7	Pamuk	ALD- ZnO	500	R1
8	Pamuk	ALD ZnO + PD $AgNO_3$	500	R1
9	Pamuk	ALD- ZnO	500	R2
10	Pamuk	ALD- ZnO	500	R3
11	Polyester	ALD- ZnO	100	R1
12	Polyester	ALD- ZnO	250	R1
13	Polyester	ALD- ZnO	500	R1
14	Cam Kumaş	ALD- ZnO	100	R1
15	Cam Kumaş	ALD ZnO + PD $FeSO_4$	100	R4
16	Cam Kumaş	ALD- ZnO	250	R1

Çizelge 3.2. Kaplanan kumaş numuneleri ve ilgili üretim parametreleri(devam)

Numune No	Kumaş Türü	Kaplama Malzemesi	Döngü Sayısı	Reçete
17	Cam Kumaş	ALD- ZnO	500	R1
18	Cam Kumaş	ALD- ZnO	500	R2
19	Cam Kumaş	ALD- ZnO	500	R2
20	Cam Kumaş	ALD- ZnO	500	R1
21	Cam Kumaş	ALD- TiO_2	200	Rx
22	Cam Kumaş	ALD- TiO_2	500	Ry
23	Cam Kumaş	ALD TiO_2+ ısıl işlem	200	Rx
24	Cam Kumaş	ALD- ZnO	500	R5
25	Cam Kumaş	ALD- ZnO	250	R5
26	Cam Kumaş	ALD- ZnO	100	R5
27	Cam Kumaş	ALD- ZnO	150	R5
28	Cam Kumaş	ALD- ZnO	200	R5
29	Pamuk	ALD- ZnO	250	R5
30	Pamuk	ALD- ZnO	150	R5
31	Cam Kumaş	ALD- ZnO	150	R5
32	Cam Kumaş	ALD- ZnO	50	R5
33	Cam Kumaş	ALD- ZnO	350	R5
34	Cam Kumaş	ALD TiO_2+ ısıl işlem	500	Ry



Şekil 3.4. Üretilen numuneler



Şekil 3.5. Üretilen numunelere ait bazı silisyum wafer örnekleri

3.2.2. Ölçüm Yöntemleri

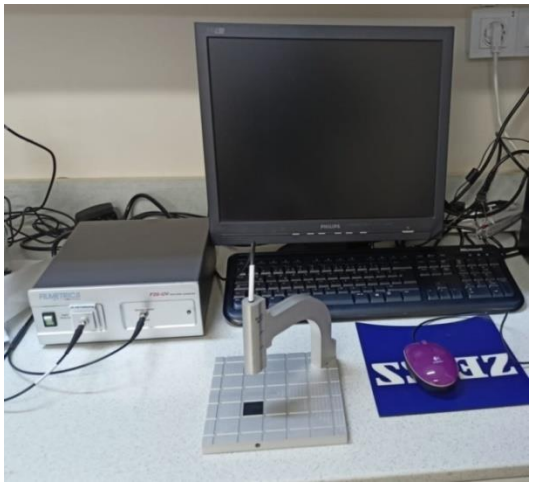
Bu bölümde ham kumaş numelerinin kalınlık ölçümleri, ALD ile üretilen numunelerde oluşturulan kaplamanın kalınlık ölçümü ve kaplanan numunelere yapılan elektriksel karakterizasyon ölçümleri anlatılacaktır.

İlk olarak ham kumaşların kalınlıkları Şekil 3.6'de verilen kumaş kalınlık ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Kullanılan numunelerden alınan sonuçlar şu şekildedir; polyester: 0,3 mm, pamuk: 0,34 mm, cam kumaş: 0,05 mm.



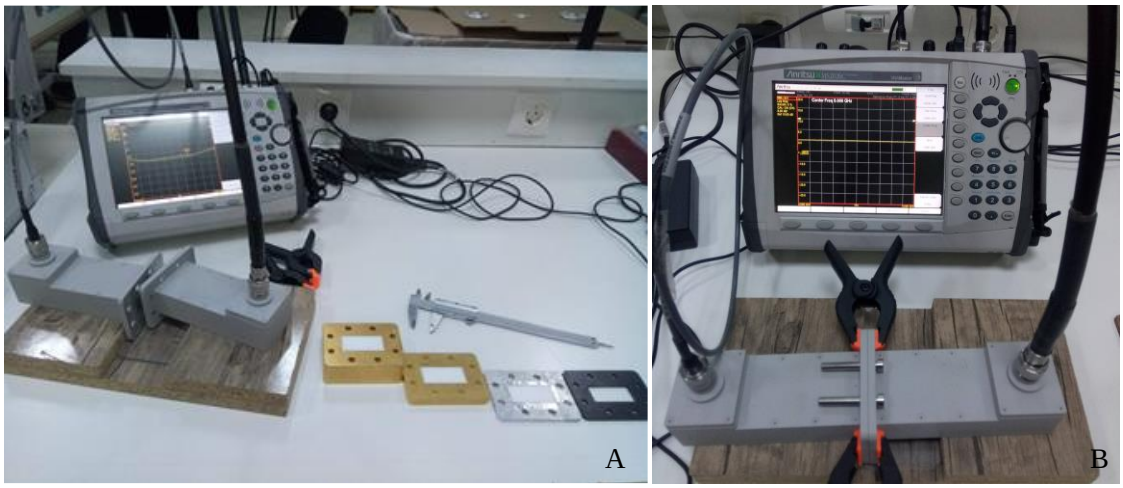
Şekil 3.6. Kumaş kalınlık ölçüm cihazı

ALD ile kaplaması yapılan kumaşların kaplama kalınlıkları, ilgili kumaşa ait silisyum wafer numunesi üzerinden, Şekil 3.7'de gösterilen Filmetrics elipsometri cihazı ile ölçülmüştür.

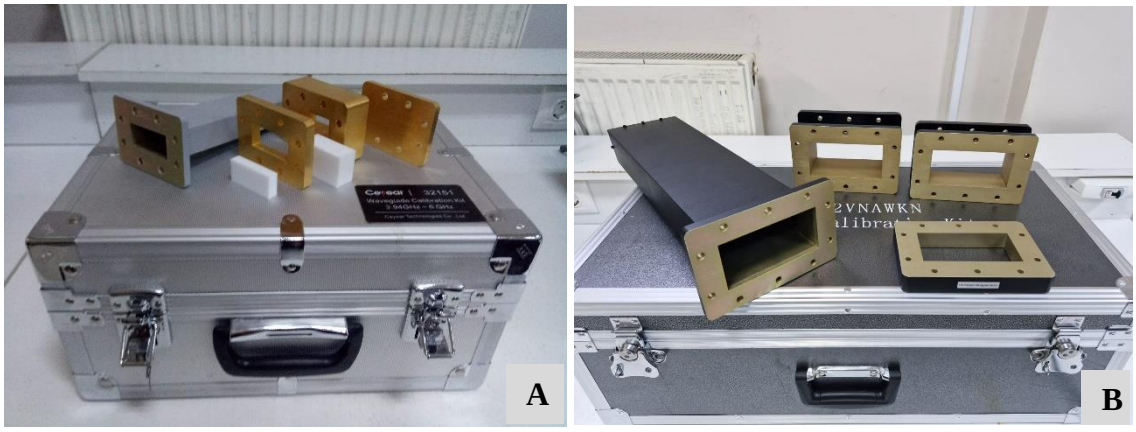


Şekil 3.7. Elipsometri cihazı

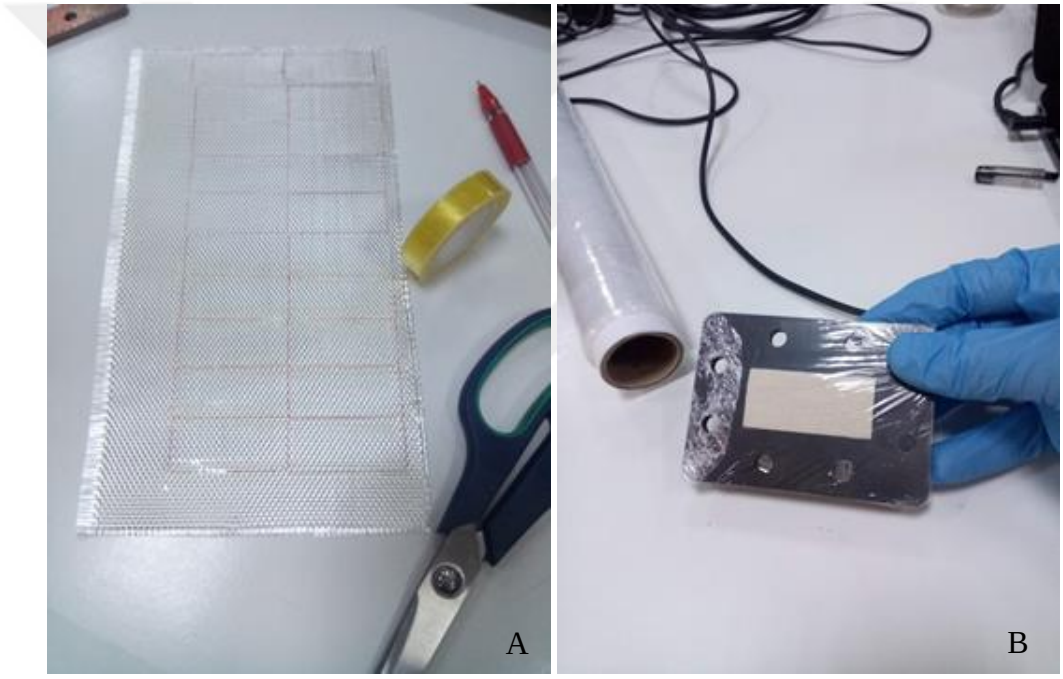
Kaplaması yapılan kumaş numunelerin saçılma (S) parametreleri ölçümleri, dalga kılavuzu yöntemiyle VNA kullanılarak yapılmıştır. S parametrelerinden elektrik ve manyetik geçirgenlik değerlerinin hesaplanmasında Nicolson-Ross-Weir tekniği kullanılmıştır (Rothwell vd., 2016). Şekil 3.8'da verilen Anritsu VNA Master MS2026C cihazı, 2-8 GHz frekans bandındaki dalga kılavuzlarına ait kalibrasyon kitleri (Şekil 3.9) ile kalible edilmiştir ve standart ayarlaması yapılmıştır. Sonrasında kaplanmış kumaş numuneleri, cihazdaki malzemenin (material under test; MUT) yerleştirileceği kitin ebatlarına uygun olarak kesilmiştir (Şekil 3.10). Cihazdaki ölçüm yapılan kitin eni 2,2 cm ve boyu 4,7 cm'dir. Bu ebatlarda kesilen kumaşların aynı zamanda kitin derinliğinde (0,51 cm) kalınlığa ulaşması gerektiğinden 0,51 cm kalınlığa ulaşacak katman sayısında- polyester 9 kat, pamuk 10 kat, cam kumaş 18 kat- numuneler kesilerek cihaza yerleştirmiştir. Çok katmanlı malzemenin cihazda hareketsiz ve düzgün durması ve ölçüm sonuçlarının tekrarlanabilir olması amacıyla ölçüm kiti tek kat streç film ile sarılmıştır (Şekil 3.8). Ayrıca yapısı itibariyle cam kumaş liflerinin kolayca gevşeme ve sıyrılarak kumaştan dağılma görüldüğü için kesinlen numunelerin çevresi, eni 0,5 cm olan şeffaf selobant ile bantlanarak sabitleştirilmiştir (Şekil 3.10).



Şekil 3.8. Anritsu VNA Master MS2026C **A)** Kalibrasyon aşaması **B)** Kalibrasyonu tamamlanmış



Şekil 3.9. Dalga kılavuzu ve kalibrasyon kitleri **A)** 3,95- 5,85 GHz **B)** 1,72- 2,61 GHz



Şekil 3.10. Kumaş numunelerinin ölçüme hazırlanması **A)** Boyutları belirleme ve kesme **B)** Ölçüm kitine yerleştirme

Kumaşlar ölçüme hazırlandıktan sonra VNA ve bilgisayar bağlantısı, Labview yazılımıyla sağlanmıştır. VNA'dan alınan verileri işlemek üzere MATLAB R2021B (MathWorks) programı kullanılmış ve gerekli yazılımlar yapıldıktan sonra numunelerin elektriksel karakterizasyon öçümleri, belirlenen frekans aralığı 2- 8 GHz'de; $S_{11}, S_{21}, \varepsilon', \varepsilon'', \mu'$ ve μ'' değerleri alınarak yapılmıştır. ÇRS' de yansıma kaybını bulmak için kullanılan denklemler (bkz. Denklem 10- Denklem26) MATLAB üzerinden

oluşturulmuştur. Hem normal gelen açı ile hem de eğik açılı gelen EM dalga durumları TE ve TM polarizasyon için hesaplanmış ve her bir numuneye ait veriler kaydedilmiştir.

3.2.3. Optimizasyon

Üç farklı kumaş türünden otuz yedi farklı numuneden minimum yansıma kaybına ve minimum inceliğe sahip, farklı geliş açılarında, polarizasyondan bağımsız maksimum soğurma performansı gösteren ÇRS malzeme tasarlamak için malzeme seçimi, sırası ve kalınlık ataması yapmak oldukça karmaşık bir optimizasyon problemidir. Bu problemin çözümünde güncel ve optimum çözüm sağlamaya en yakın optimizasyon algoritması araştırılmıştır. Bu bölümde ÇRS tasarımında kullanılmış olan optimizasyon algoritmalarına değinilmiş ve yenilikçi bir yaklaşımla güncel bir optimizasyonun literatürdeki örneklerle rekabet edebilirliği ortaya konulmuştur. Seçilen Gri Kurt Optimizasyon Algoritması'nın çalışma mantığı ve ÇRS tasarımındaki probleme entegre edilmesi anlatılmıştır.

Michielssen, Sajer, Ranjithan, ve Mittra (1993) tarafından tanımlanmış 16 sanal malzeme ile 0.2-2 GHz ve 2-8 GHz frekans aralıklarında Genetik Algoritma (GA) kullanarak ÇRS gerçekleştirilmiştir. 16 sanal malzemenin frekensa bağlı elektriksel ve manyetik geçirgenliklerini tanımlayan bir veri seti oluşturulmuştur (Michielssen vd., 1993). Bu veri seti (Çizelge 3.2), mevcut optimizasyon algoritmalarının devam eden ÇRS tasarımlarında nesnel değerlendirmeler ve adil kıyaslamalar yapmak için referans olarak kullanılmıştır (Weile vd., 1996) (Yao vd., 2023) (Asi & Dib, 2010) (Dib vd., 2010) (Chamaani vd., 2008). Yapay arı kolonisi (ABC) (Toktas vd., 2018), merkezi kuvvet optimizasyonu (CFO) (Asi & Dib, 2010), parçacık sürü optimizasyonu (PSO) (Chamaani vd., 2008) ve genetik algoritma (GA) (Yao vd., 2023) (Weile vd., 1996) gibi doğadan esinlenmiş optimizasyon algoritmaları farklı frekans aralıklarında çalışan ÇRS tasarımları üretmek için kullanılmış ve başarı sağlamıştır.

Çizelge 3.3. Önceden tanımlanmış malzeme veritabanı (Michielssen vd., 1993)

Kayıpsız Dielektrik Materyal $(\boldsymbol{\mu' = 1, \mu'' = 0})$				
Materyal	ε'			
1	10			
2	50			
Kayıplı Manyetik Materyal $(\boldsymbol{\varepsilon' = 15,\ \varepsilon'' = 0})$				
$\boldsymbol{\mu = \mu' - j\mu''}$ $\boldsymbol{\ldots \mu'(f) = \frac{\mu'(1\ GHz)}{f^{a}}}$ $\boldsymbol{\mu''(f) = \frac{\mu''(1\ GHz)}{f^{\beta}}}$				
Materyal	$\mu'(1\ GHz) = 1$	a	$\mu''(1\ GHz) = 1$	β
3	5	0.974	10	0.961
4	3	1.000	15	0.957
5	3	1.000	12	1.000
Kayıplı Dielectrik Materyal $(\boldsymbol{\mu' = 1, \mu'' = 0})$ $\boldsymbol{\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''}$ $\boldsymbol{\ldots . \varepsilon'(f) = \frac{\varepsilon'(1\ GHz)}{f^{a}}}$ $\boldsymbol{\ldots . \varepsilon''(f) = \frac{\varepsilon''(1\ GHz)}{f^{\beta}}}$				
Materyal	$\varepsilon'\ (1\ GHz)$	α	$\varepsilon''\ (1\ GHz)$	β
6	5	0.861	8	0.569
7	8	0.778	10	0.682
8	10	0.778	6	0.861

Çizelge 3.2. Önceden tanımlanmış malzeme veritabanı (devamı) (Michielssen vd., 1993)

Gevşeme Tipi Manyetik Malzemeler $(\boldsymbol{\varepsilon' = 15, \varepsilon'' = 0})$

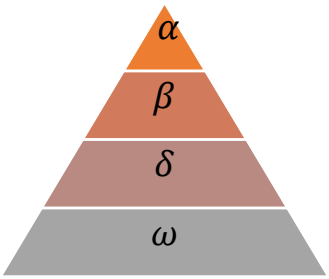
$\boldsymbol{\mu = \mu' - j\mu''}$ $\boldsymbol{....\mu'(f) = \frac{\mu_m f_m^2}{f^2+f_m^2}}$ $\boldsymbol{....\mu''(f) = \frac{\mu_m f_m f}{f^2+f_m^2}}$ $\boldsymbol{f}$ **ve** $\boldsymbol{f_m}$ $\boldsymbol{(GHz)}$

Materyal	μ_m	f_m
9	35	0.8
10	35	0.5
11	30	1.0
12	18	0.5
13	20	1.5
14	30	2.5
15	30	2.0
16	25	3.5

16 sanal malzeme ile ÇRS tasarımı optimizasyon algoritmalarının adil bir şekilde karşılaştırılmasında sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Ancak literatüre bakıldığında GWO bu yöntemle test edildiği görülmemektedir. GWO ile 16 sanal malzeme kullanılarak ÇRS tasarımı gerçekleştirilmiş ve literatürdeki örnekleri ile kıyaslanmıştır. Bu sayede ileride gerçekleştirilecek olan radar soğurucu optimizasyonlarına da bir alternatif sunulmaktadır.

GWO, gri kurtların sosyal davranışını ve avlanma mekanizmasını taklit eden, yakın zamanda geliştirilmiş, doğadan ilham alan bir optimizasyon yöntemidir (Salgotra vd., 2020). 5-12 bireyden oluşan sürüde sosyal baskın bir hiyerarşi vardır (Şekil 3.11). Hiyerarşide en üstte olan α kurtlar avlanma, uyuma yeri, uyanma zamanı gibi temel faaliyetlerde karar alır ve α'nın kararları sürüye dikte edilir. β ast kurttur, karar vermede ve diğer sürü faaliyetlerinde α 'ya yardımcı olur. β, α' dan emir alırken, diğer kurtlara

emir verir. ω en düşük dereceli kurttur, sürüdeki diğer üs kurtlara boyun eğmek zorundadır. Eğer bir kurt α, β veya ω değilse δ kurttur. δ 'lar α ve β'ya itaat eder, ω'ya hükmeder (Mirjalili vd., 2014).



Şekil 3.11. Gri Kurt Hiyerarşisi

GWO'da gri kurtlardaki sosyal hiyerarşi ve avlanma taktiği matematiksel olarak olarak modellenmiştir. Rastgele oluşturulan popülasyonda amaç fonksiyonuna göre uygunluk değerleri sıralandığında en uygun çözüm α, sonra β ve daha sonra δ'ya atanır. Geri kalan kurtlar (ω) yani algoritmadaki aday çözümler, optimum çözüme ulaşmada diğer kurtları bu sıraya göre referans alır. Diğer adayların konumları bu üç en iyiye göre güncellenir. Kurtların avlanmada avı çevreleme davranışı Denklem 3.1 ve Denklem 3.2'de modellenmiştir.

$$D = \left| C . X_p(t) - X(t) \right| \tag{3.1}$$

$$X(t+1) = X_p(t) - A . D \tag{3.2}$$

Burada t mevcut iterasyonu gösterirken A ve C katsayı vektörleridir. X bir kurdun pozisyonu ve X_p avın pozisyon vektörünü belirtir.

$$A = 2 . a . r_1 - a \tag{3.3}$$

$$C = 2 . r_2 \tag{3.4}$$

a 'nın değeri iterasyon boyunca 2'den 0'a doğrusal olarak azalır. r_1 ve r_2 0-1 rastgele değerlerdir.

$$D_\alpha = |C_1 . X_\alpha - X|, \quad D_\beta = |C_2 . X_\beta - X| \quad D_\delta = |C_3 . X_\delta - X| \tag{3.5}$$

$$X_1 = X_\alpha - A_1 . (D_\alpha), X_2 = X_\beta - A_2 . (D_\beta), X_3 = X_\delta - A_3 . (D_\delta) \tag{3.6}$$

$$X(t+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \tag{3.7}$$

Ava yaklaşmayı matematiksel olarak modellemek için Denklem 3.3'teki a 'nın değeri her döngüde 2'den 0'a doğrusal olarak azaltılır. $|A|$< 1 olması kurdu ava saldırmaya zorlar. Bunun yerine a 'ya rastgele bir değer atansaydı ava yaklaşmak yerine herhangi bir konumda olabilirdi.

Gri kurtlar av aramak için birbirlerinden uzaklaşır, avı bulduklarında saldırmak için birleşirler. Bu yaklaşma ve uzaklaşma davranışını modellemek için rastgele A değerleri kullanılır. A yaklaşma davranışı için $|A|$<1, uzaklaşma davranışı için $|A|$>1 rastgele değerlerle üretilir. $|A|$>1 kurdu yeni avı aramak için keşfe zorlar. GWO algoritmasınnın keşfi destekleyen bir diğer bileşeni de C'dir (Denklem 3.4). C, 0-2 arasında rastgele değerlerde üretilir. Optimizasyon boyunca daha rastgele davranış sergilemesine yardımcı olarak keşfi sağlar, yerel minimumlara takılmayı önler. Bu bileşen, özellikle son iterasyonlarda, yerel optimum durgunluk durumunda çok faydalıdır. (Mirjalili vd., 2014)

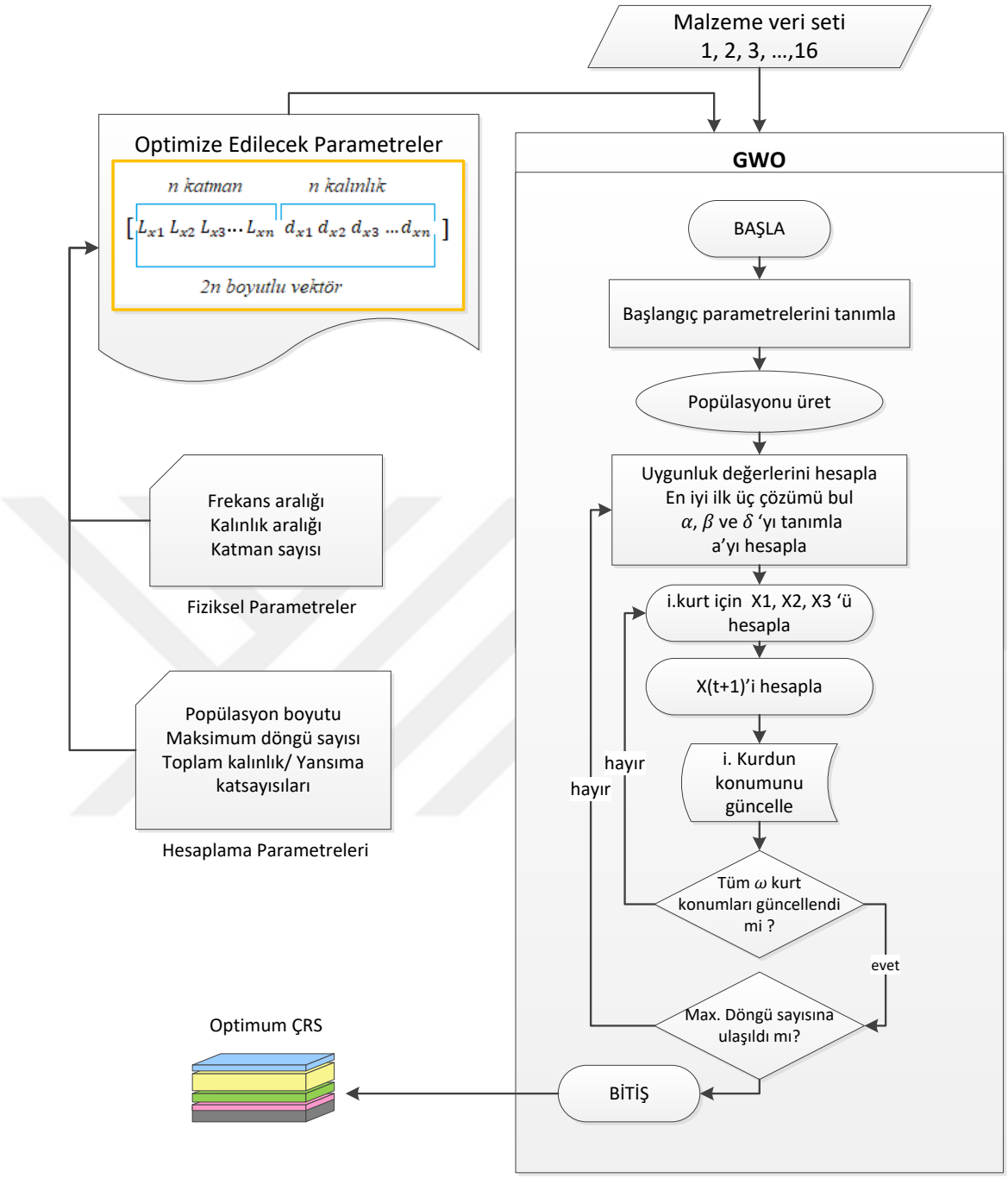
GWO ile ÇRS tasarlanmasında algoritma için hesaplama parametreleri ve fiziksel parametreler malzemelerin elektriksel bilgileri veri setinden (Michielssen vd., 1993) alınmıştır. Tasarımlar 2-8, 8-12 ve 1-20 GHz frekans bandında ve dik geliş açılı durumlar için gerçekleştirilmiştir. Optimize edilecek parametreler, n katman sayısı olmak üzere, 2n boyutunda bir matris olarak tanımlanmıştır. Maksimum katman sayısı 6 olacak şekilde katmanların kalınlık sınırları 0-10 mm arasında tanımlanılmıştır. (Atıcı vd., 2023) Gerçekleştirilen algoritmaya ait akış diagramı Şekil 3.12'dedir.

Üç, dört, beş ve altı olmak üzere farklı katman sayılarındaki tasarımlardan en kalını 4.8124 mm iken en incesi 3.1316 mm'dir. Oluşturulan tasarımların maksimum yansıma katsayılarına bakıldığında ise -17,3 dB ve mevcut optimizasyon algoritmalarıyla yapılan ÇRS'lere kıyasla bazı tasarımlarda incelik bazılarında daha yüksek soğurma performansı ile üstünlük sağladığı görülmektedir. (Atıcı vd., 2023) (Dib vd., 2010) (Asi & Dib, 2010) (Chamaani vd., 2008) (Toktas vd., 2018) (Roy vd., 2015) (Jiang vd., 2009)

Sanal malzemeler ile etkinliği ispatlanan GWO algoritması, $0^o - 40^o$ geliş açısında TE ve TM polarizasyonda, üretilen otuz dört malzemeye üç ham kumaşın da dahil edildiği malzeme veri seti kullanılarak ÇRS optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu optimizasyon için oluşturulan amaç fonksiyonu (AF) Denklem 3.8'dedir.

$$\text{minimum AF} = \gamma_1 \sum_{t=T_s}^{T_e} 20 \log_{10} \left(\max \left(\sqrt{\delta_1 |R_0^{TE}|^2 + \delta_2 |R_0^{TM}|^2} \right) \right) + \gamma_2 \sum_{i=1}^{M} d_i \quad (3.8)$$

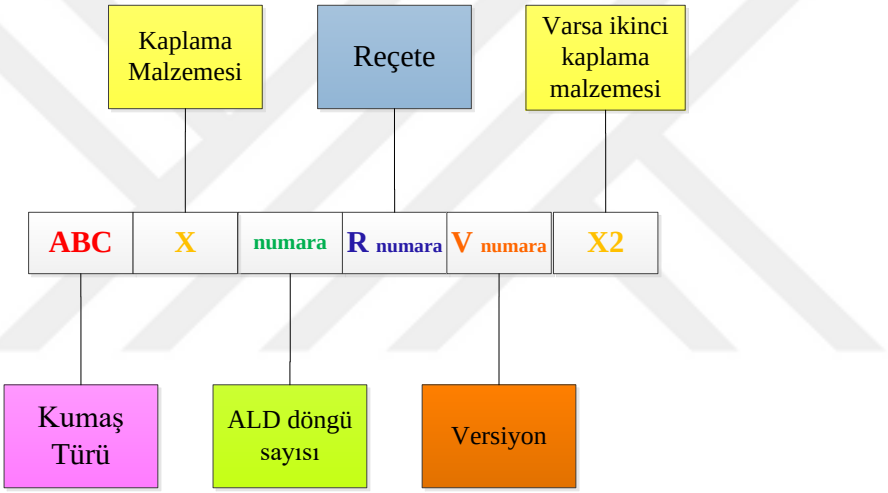
Burada γ_1 ve γ_2 yansıma katsayısı ve kalınlığına ait katsayılar, t geliş açılarını belirtmek üzere T_s ilk ve T_e son geliş açısıdır. M katman sayısı, d_i sırasıyla katmanların kalınlıklarını ifade eder. Optimizasyondaki hesaplama (kontrol) parametrelerinden popülasyon sayısı 50 ve maksimum döngü sayısı 2000'dir. Ayrıca polarizasyon tipine göre amaç fonksiyonu tanımlanırken δ_1 ve δ_2 katsayıları sırasıyla sıfır ve bir olarak belirlenebilir.



Şekil 3.12. ÇRS tasarımı için GWO akış diagramı

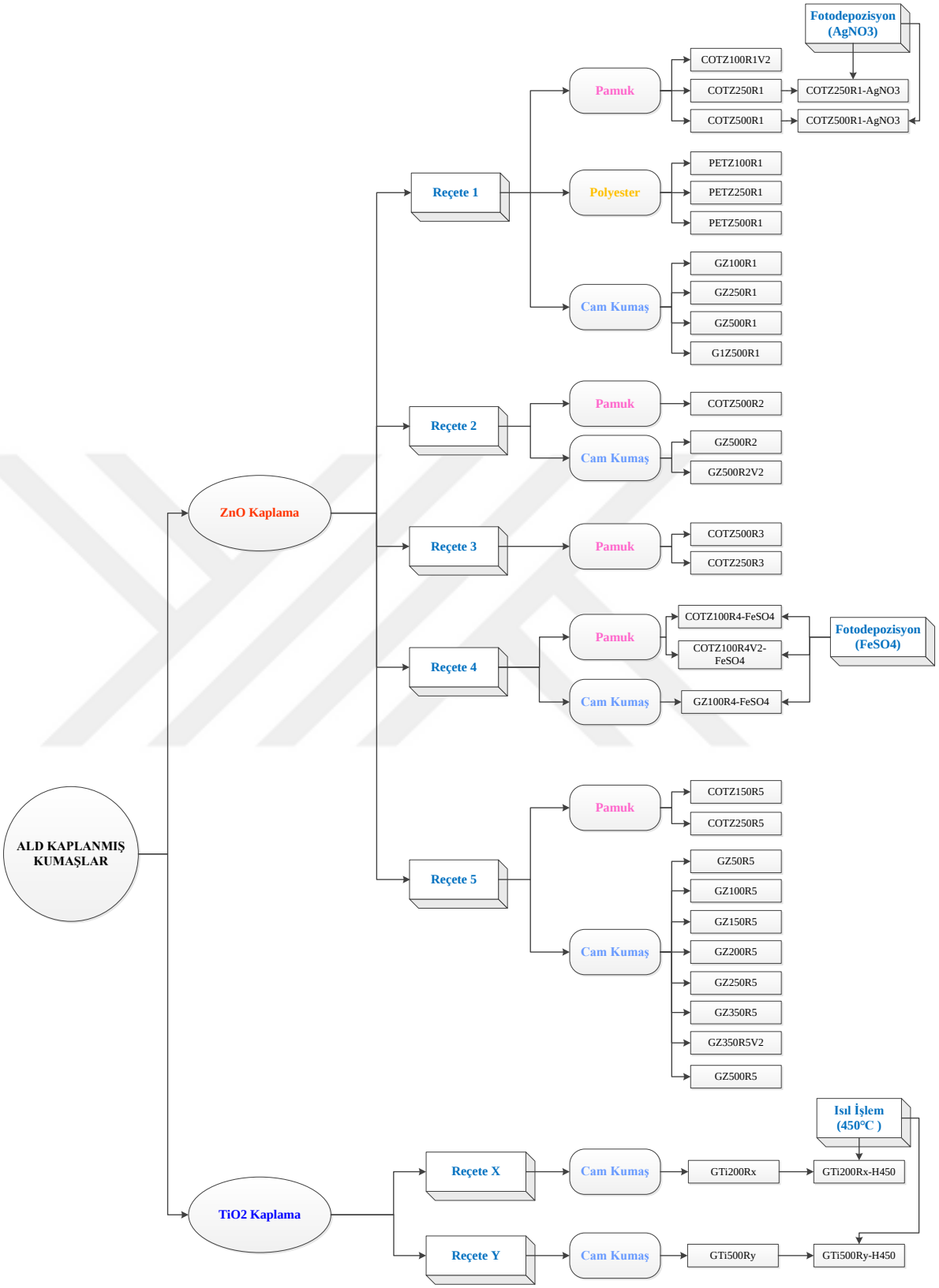
3.2.4. Üretilen Numunelerin Tasnifi ve Etiketlenmesi

Kaplamada farklı türde kumaşlar kullanılmış ve kaplama sonrasında artan sayıda elde edilen numune türleri için, üretim yöntemlerinin ve kaplama malzemelerinin çeşitliliği, ALD ile üretimde kullanılan farklı döngü sayıları ve öncül gaz dozları gibi pek çok parametrenin olması veri havuzunda üretilen çok sayıda numunenin karışmasına yol açmaktadır. Bu karışıklığın önlenmesi ve kalınlık, elektriksel ve yapısal karakterizasyon ölçüm sonuçlarının düzenli olarak kaydedilmesinin gerekliliği bir isim kodlama sistemini zorunlu kılmıştır. Numuneler için oluşturulan etiket kodu Şekil 3.13'de verilmiştir.



Şekil 3.13. Üretilen kumaş numuneleri için oluşturulan isim kodlama sistemi

Yukarıdaki isim kodlama sistemine göre oluşturulan etiketlerde kumaş türüne göre malzemeler; pamuk, cam kumaş, polyester sırasıyla "COT", "G", PET" olmak üzere kaplama malzemeleri; çinko oksit, titanyum dioksit; "Z" ve "Ti"; uygulanan reçeteler "R1- R5", "Rx" ve "Ry" ısıl işlem ise "H450" ile ifade edilmektedir. Üretilen tüm kumaş numuneleri isim kodlaması yapılarak etiketlenmiştir. ALD kaplama malzemelerine göre oluşturulan reçetelerde üretilen numuneler ve ikinci kaplama işlemleri ile ısıl işlem uygulamasının gösterildiği blok diagram Şekil 3.14'de verilmiştir.



Şekil 3.14. Üretilen numunelere ait blok şema

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde kumaş numunelerin ALD yöntemiyle çeşitli malzemelerle muamelelerine ait bulgular, kaplama sonrası kumaşların elektriksel karakterizasyonuna ait bulgular, optimizasyon sonucu belirlenen ÇRS'lerin tasarım parametreleri ve nihai tasarımlardan belirlenen üç tasarımın gerçekleştirilmesi ve S parametrelerine ilişkin sonuçlar paylaşılmıştır.

4.1. ALD Sonuçlarına Ait Bulgular

Oluşturulan etiket kodu ile üretilen tüm kumaş numuneleri (bkz. Çizelge 3.1) yeniden isimlendirilmiş ve ham kumaşlar da dahil edilerek Çizelge 4.1'deki veri seti oluşturulmuştur. Çizelgede ilgili numunelerin silisyum wafer örneklerinden ölçülen kaplama kalınlıkları nanometre cinsinden verilmiştir. Kaplamasız kumaşlardan saf kumaş 1, pamuk; saf kumaş 2, cam kumaş ve saf kumaş 3; polyester kumaştır.

Çizelge 4.1. Kumaş numuneleri ile oluşturulan veri seti

Veri No	Etiket	Döngü Sayısı	Kalınlık (nm)
1	COTZ100R1V2	100	29,2
2	COTZ100R4-FeSO4	100	12
3	COTZ100R4V2-FeSO4	100	11,8
4	COTZ250R1	250	56,62
5	COTZ250R1-AgNO3	250	45,5
6	COTZ250R3	250	18,2
7	COTZ500R1	500	83,25
8	COTZ500R1-AgNO3	500	83,25
9	COTZ500R2	500	78,5
10	COTZ500R3	500	73,8

Çizelge 4.1. Kumaş numuneleri ile oluşturulan veri seti (devam)

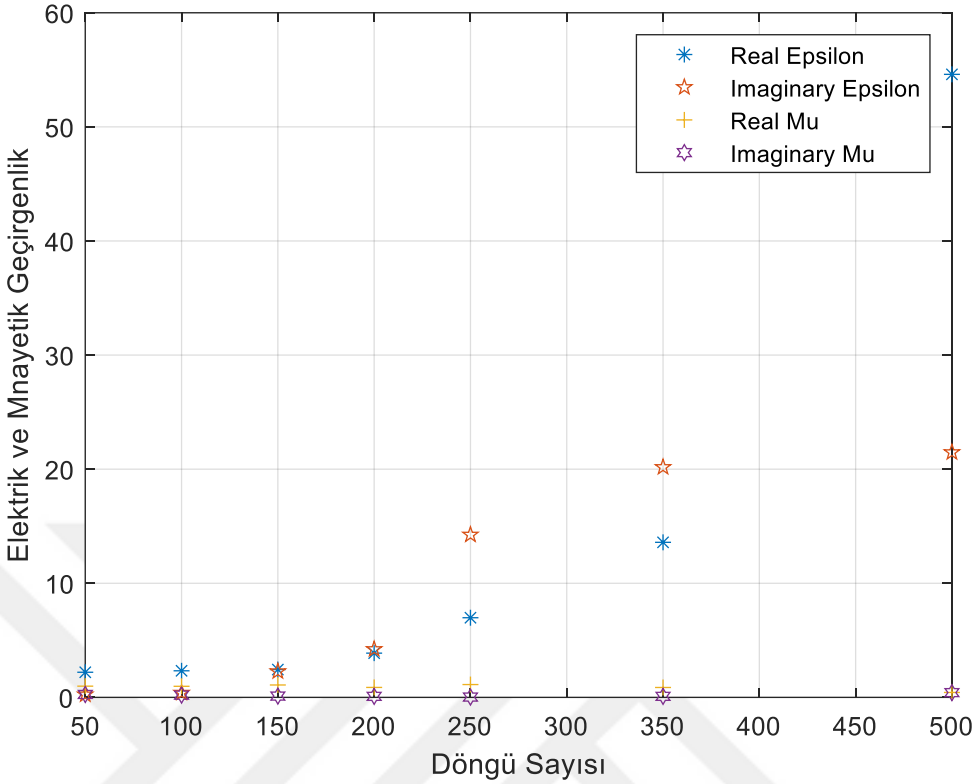
Veri No	Etiket	Döngü Sayısı	Kalınlık (nm)
11	PETZ100R1	100	18,7
12	PETZ250R1	250	45,5
13	PETZ500R1	500	83,25
14	GZ100R1	100	18,7
15	GZ100R4-FeSO4	100	12
16	GZ250R1	250	45,5
17	GZ500R1	500	120
18	GZ500R2	500	78,5
19	GZ500R2V2	500	88,9
20	G1Z500R1	500	83,25
21	Saf kumaş 1	-	-
22	Saf kumaş 2	-	-
23	Saf kumaş 3	-	-
24	GTi200Rx	200	9,75
25	GTi500Ry	500	31,5
26	GTi200Rx-H450	200	11,5
27	GZ500R5	500	113.3
28	GZ250R5	250	54,11
29	GZ100R5	100	22,4
30	GZ150R5	150	29,86
31	GZ200R5	200	43,7
32	COTZ250R5	250	58

Çizelge 4.1. Kumaş numuneleri ile oluşturulan veri seti (devam)

Veri No	Etiket	Döngü Sayısı	Kalınlık (nm)
33	COTZ150R5	150	36
34	GZ350R5	150	90
35	GZ50R5	50	8
36	GZ350R5V2	350	87,5
37	GTi500Ry-H450	500	31,5

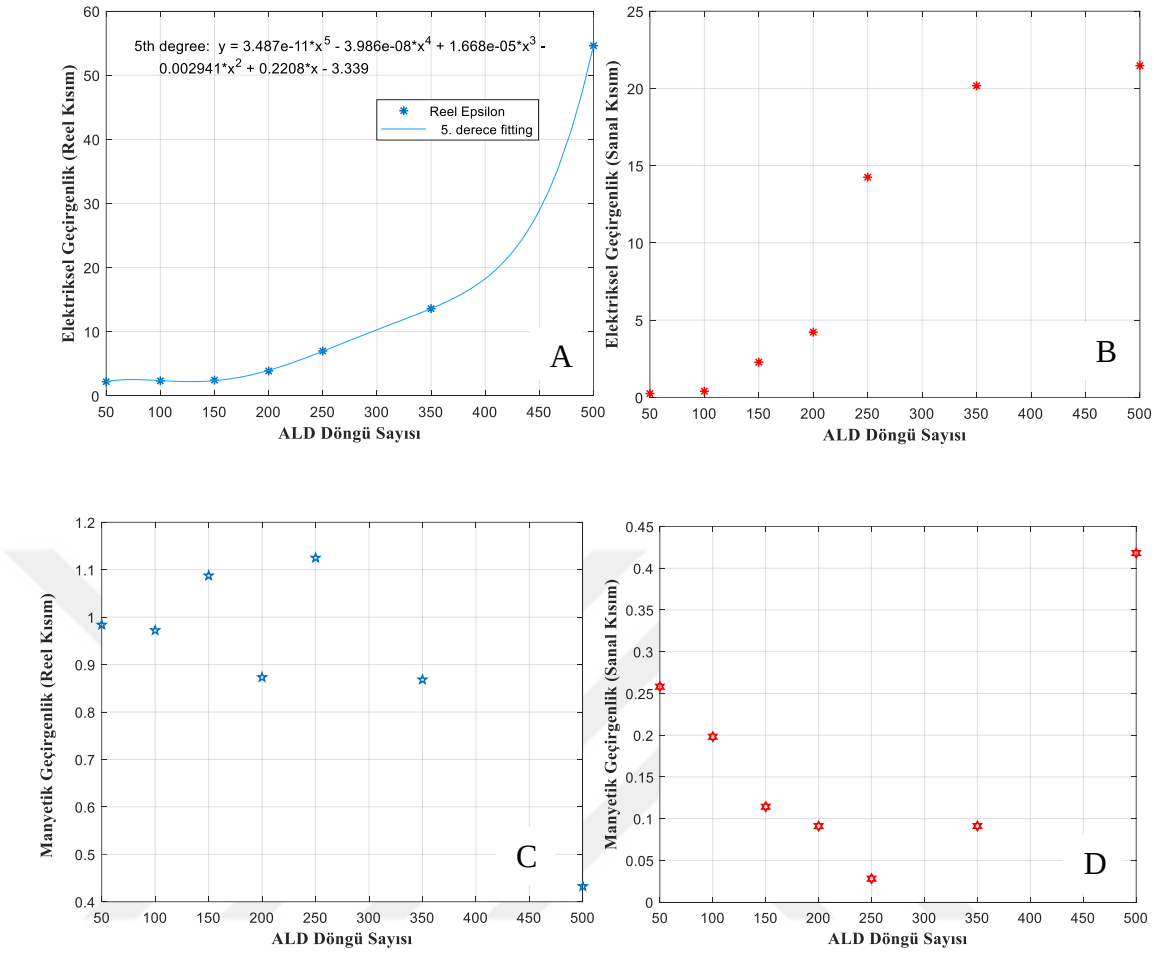
ALD ile kaplanan kumaşların ilgili döngü sayıları ve öncül gaz dozları incelendiğinde biriktirilen malzeme kalınlıklarının beklenen değerler ile uyum sağladığı görülmekedir. Genel olarak uygulanan doz miktarlarının ortalama değerinde yapılan ALD'de 100 döngü için 20 nm, 250 döngü için 50 nm ve 500 döngü için 100 nm kalınlıklarında birikme gözlemlenmiştir.

Ayrıca cam kumaş numunelerine ALD-ZnO ve Reçete-5 ile yapılan kaplamalarda uygulanan döngü sayısının numunenin elektriksel karakterizasyon parameterleri, elektriksel geçirgenliğin reel ve sanal kısımları (ε' ve ε'') ile manyetik geçirgenliğin reel ve sanal kısımları (μ' ve μ''), arasındaki ilişki incelenmiştir. İlgili kaplamalar için döngü sayıları 50, 100, 150, 200, 250, 350 ve 500 olan numunelerin döngü sayısına karşılık, VNA ölçüm sonucunda merkez frekans olan 5 GHz'den alınan parametrelerinin değerleri Şekil 4.1'deki grafikte sunulmuştur.



Şekil 4.1. Reçete-5 ALD- $\boldsymbol{ZnO}$ kaplı cam kumaş numunelerin geçirgenlik değerleri

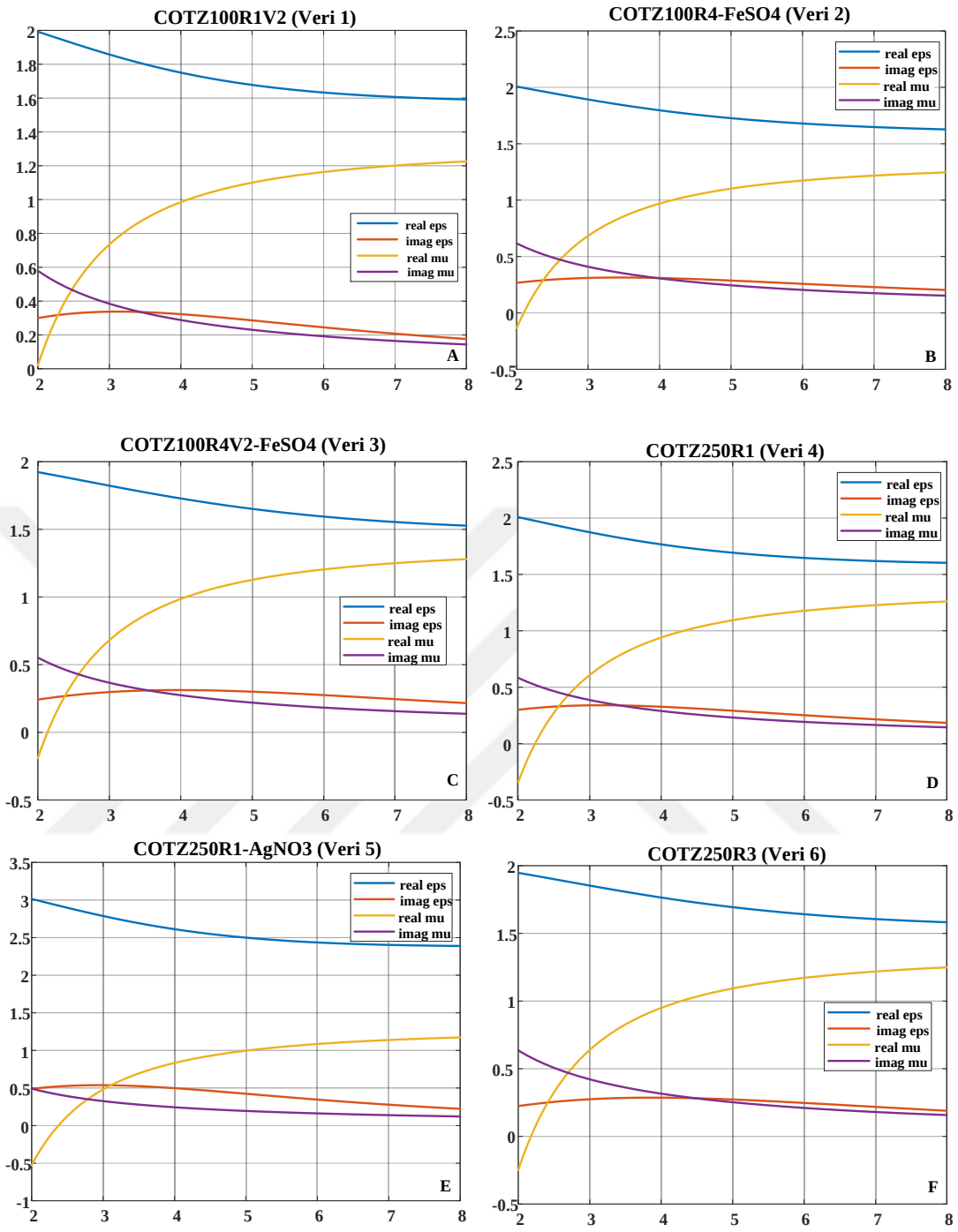
Şekil 4.1'deki grafik incelendiğinde özdeş cam kumaşlara aynı madde ile aynı dozlarda yapılan kaplamalarda, numunelerin artan döngü sayılarına karşılık gelen elektrik ve manyetik geçirgenlik değerlerinde bir artış görülmektedir. Epsilon ve mü değerlerinin reel ve sanal kısımları ayrı ayrı çekilerek fit edilmiş ve 50-500 arasındaki döngü sayılarında kaplanan numunelerin geçirgenlik değerleri üzerinden bağıntı oluşturulmuştur. İlgili grafikler ve oluşturulan denklemler Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. ALD-***ZnO*** Reçete-5 cam kumaş için merkez frekansta(5 GHz) döngü sayısına karşılık gelen elektriksel karakterizasyon parametre değerleri. **A)** Elektriksel geçirgenliğin reel değerleri, **B)** Elektriksel geçirgenliğin sanal değerleri, **C)** Manyetik geçirgenliğin reel değerleri, **D)** Manyetik geçirgenliğin sanal değerleri

4.2. Elektriksel Karakterizasyon Sonuçlarına Ait Bulgular

Üretilen numunelerin elektriksel karakterizasyon sonuçlarına ait veriler grafik olarak Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.3. Numune 1-6, elektriksel karakterizasyon sonuçları**. A)** Numune 1 **B)** Numune 2 **C)** Numune 3 **D)** Numune 4 **E)** Numune 5 **F)** Numune 6

İlk olarak ALD ZnO kaplı numunelerden sırasıyla pamuk, polyester ve cam kumaş sonuçları, sonrasında ALD TiO_2 kaplı numunelerin sonuçları değerlendirilecektir. Şekil 4.3A, Şekil 4.3B, Şekil 4.3C' ye bakıldığında pamuk kumaşlara 100 döngü ile Reçete-1 ve Reçete-4'ün $FeSO_4$ ile yapılan kaplamalar olduğu görülmektedir. Reçete-1' in DEZ

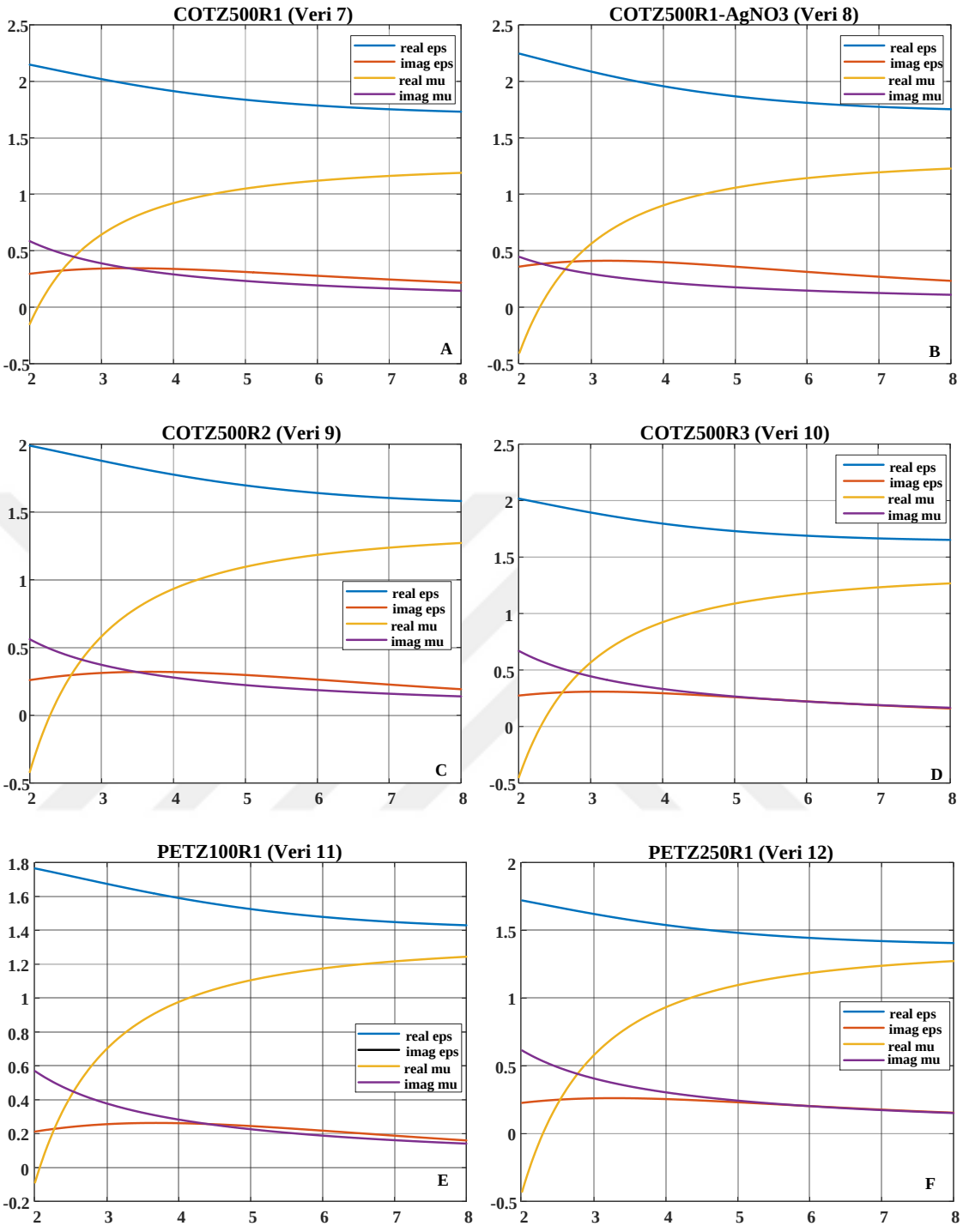
süresi Reçete-4'ten 0.35 saniye fazladır. Ancak ALD Reçete-1 ile ALD Reçete-4 ve ardından yapılan $FeSO_4$ kaplamanın yapıldığı numunelerin elektromanyetik sonuçları arasında bariz bir fark gözlemlenmemiştir. Yalnızca Numune 3' ün reel epsilon değerinin Numune 1 ve 2'den yaklaşık 0,15 daha düşük başladığı ve seyrettiği görülmektedir.

Pamuk kumaş kaplamalarında değerlendirmeye Reçete-1 özelinde bakıldığında Şekil 4.3A ve Şekil 4.3D 'de yapılan ALD 100 ve 250 döngü kaplamalardan kayda değer bir fark görülmemiştir. Ancak ALD Reçete-1 250 döngüde yapılan kaplama ile bunun üzerine yapılan $AgNO_3$ numunesi arasında elektrik geçirgenliğin reel değerleri arasında bir birimlik fark görülmektedir. Elektrik geçirgenliğin sanal değerlerine bakıldığında da yine $AgNO_3$ kaplı kumaşın nispeten daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu numunelerin manyetik geçirgenlik değerleri arasında herhangi bir fark görülmemektedir.

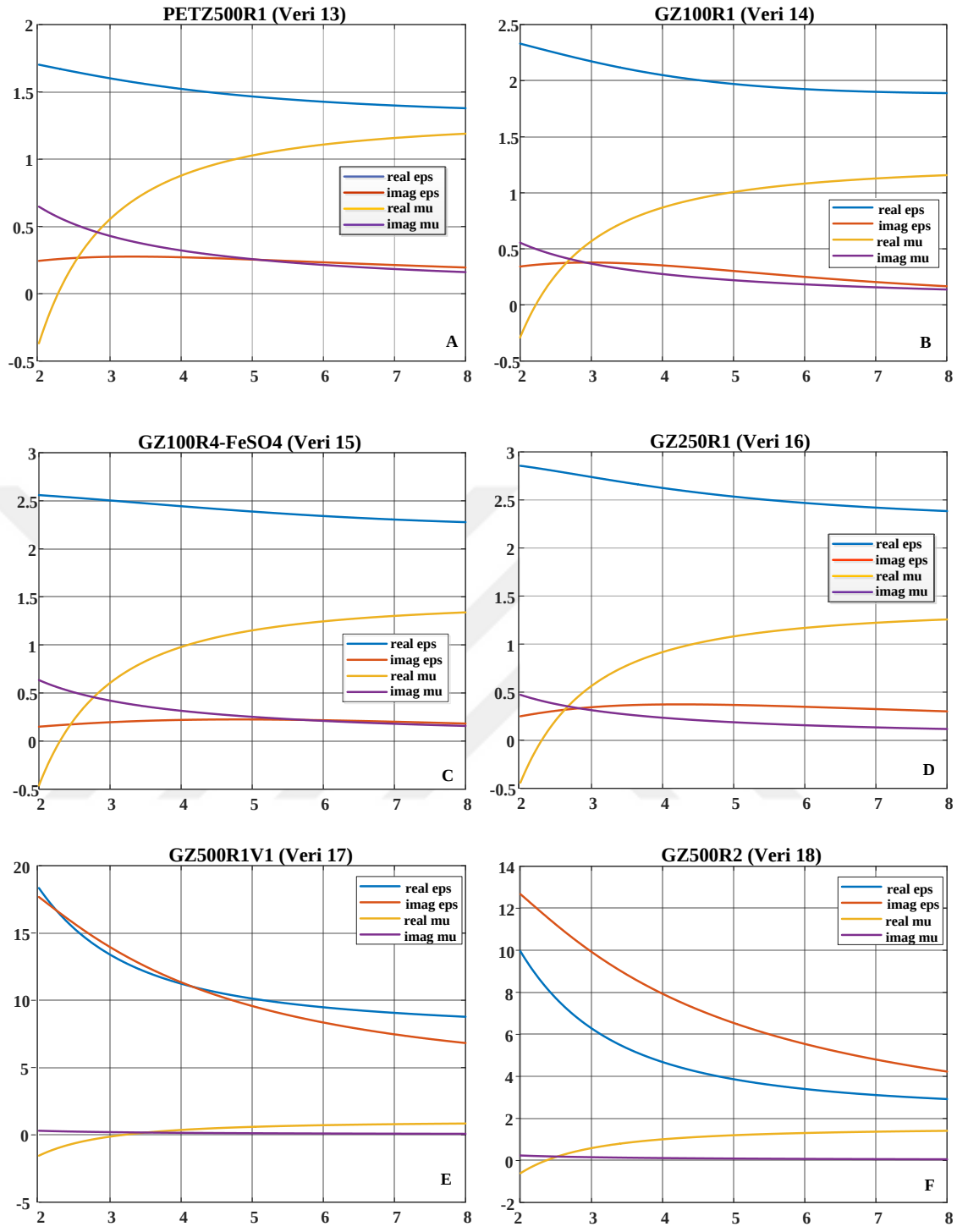
Şekil 4.4A ve B' de verilen Reçete-1 ALD 500 döngüde yapılan kaplamalara bakıldığında yalnızca başlangıç frekanslarında elektrik ve manyetik geçirgenliğin reel kısmı 0,3-0,4 civarında $AgNO_3$ (Numune 8) kaplamada daha düşük görülmekte ilerleyen frekanslarda benzer değerler vermektedir.

Şekil 4.3F' de ALD Reçete-3 250 döngü ve Şekil 4.4 C ve D'de Reçete-2 ve Reçete-3 500 döngü kaplamalar verilmekte bunlar arasında belirgin farklılık görülmemektedir.

Şekil 4.4E,F ve Şekil 4.5A' da verildiği üzere polyester kumaşlar üzerine ALD 100, 250 ve 500 döngüde Reçete-1 ile kaplama yapılmıştır. Elektromanyetik geçirgenlik değerleri incelendiğinde artan döngü sayısına karşın değerlerde bir değişim görülmemektedir. Bu sebeple polyester kumaş kaplama çalışmalarına devam edilmemiş, cam kumaşlardan çeşitli kaplamalar yapılmıştır.



Şekil 4.4. Numune 7-12, elektriksel karakterizasyon sonuçları. **A)** Numune 7 **B)** Numune 8 **C)** Numune 9 **D)** Numune 10 **E)** Numune 11 **F)** Numune 12



Şekil 4.5. Numune 13-18, elektriksel karakterizasyon sonuçları. **A)** Numune 13 **B)** Numune 14 **C)** Numune 15 **D)** Numune 16 **E)** Numune 17 **F)** Numune 18

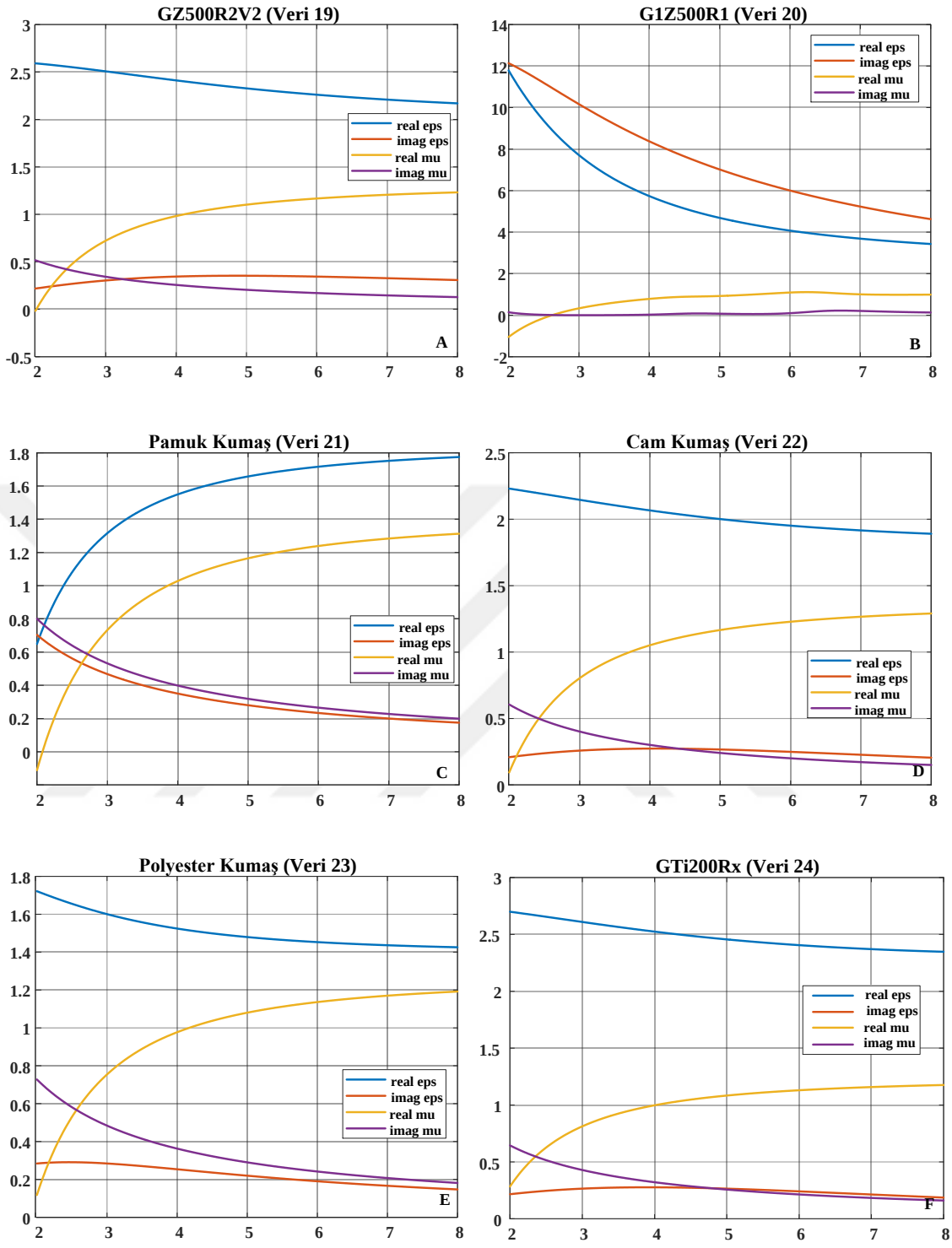
Cam kumaşlara ait Reçete-1 ile kaplanan numuneler için Şekil 4.5 B, D, E' de verilen grafiklere bakıldığında 100 döngüde yapılan kaplama 250 döngüye çıkarıldığında reel

epsilon 0,5'lik bir artış göstermiştir ve diğer parametreler değişmemiştir. 250 döngüde yapılan kaplama(Şekil 4.5D), 500 döngü(Şekil 4.5E) ile kıyaslandığında elektrik geçirgenlik değerinde bir sıçrama görülmekte 2 GHz' de 2,8' den başlayan reel epsilon değeri 18 dolaylarına çıkmakta, aynı oranda büyük değişim elektrik geçirgenliğin sanal kısmında da görülmektedir. Bununla beraber manyetik geçirgenlik değerlerinde herhangi bir değişim olmamıştır. Şekil 4.6B'de farklı bir örgüde cam kumaş üzerinde ALD Reçete-1 500 döngüde kaplama yapılmıştır. Bu numune aynı reçete düşük döngü sayılarında (100 ve 250) kaplamalarla karşılaştırıldığında epsilon değerlerinde artış olduğu görülmektedir ancak Şekil 4.5E'deki sıçramanın yaklaşık yarısı kadar bir değişim olmuştur.

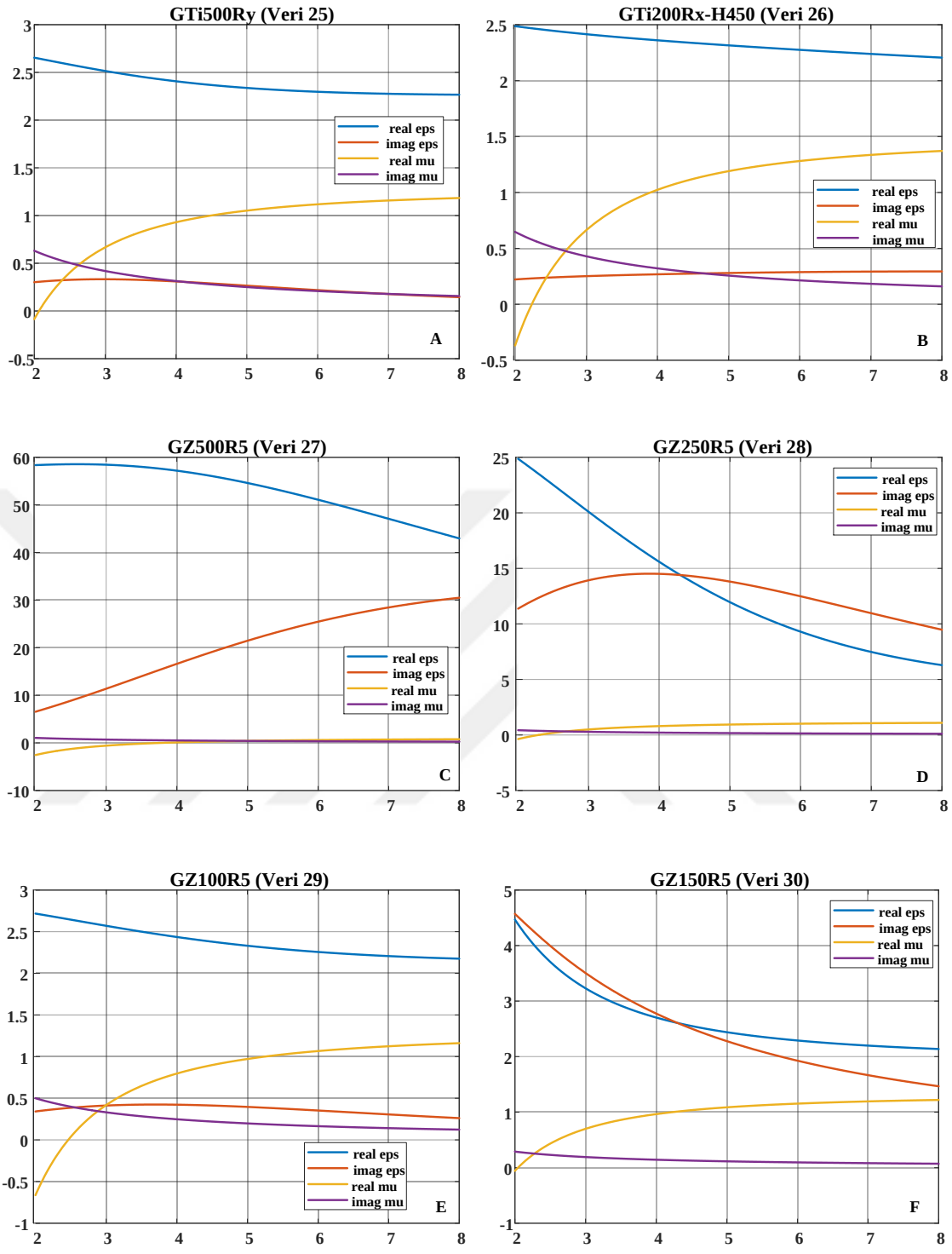
Şekil 4.5F ve Şekil 4.6A incelendiğinde aynı reçeteli ve ALD döngü sayılı numunelerde ilki düşük frekans bölgelerinde epsilon 10-12 civarlarında iken ikinci versiyonda bu değerler paralellik göstermemiştir. Ayrıca aynı döngüde Reçete-1 ve 2 ile kaplanan kumaşların karakterizasyonuna bakıldığında Reçete-1'in DEZ süresinin daha fazla olması numunenin epsilon değerlerine yükseliş olarak yansımış, manyetik geçirgenlik değerinin reel kısmında nispeten bir artış olmakla birlikte sanal kısım değişmemiştir.

Reçete-3 yalnızca pamuk kumaşa uygulanmış (Şekil 4.4D), aynı döngü sayısında üretilen Reçete-1 pamuk kumaşla (Şekil 4.4A) aralarında bir farklılık görülmemiştir.
Reçete-4 ile yapılan her biri ALD 100 döngü ve $FeSO_4$ kaplama olmak üzere üç numune vardır; Şekil 4.3B ve C pamuk kumaş, Şekil 4.5C' de cam kumaş ölçüm sonuçları verilmiştir. Pamuk kumaşlarda yapılan kaplamalar aynı sonuçları vermiş, cam kumaş da yine kendi türünde kumaşlara yapılan aynı döngü sayılı kaplamalarla benzer sonuçlara sahiptir.

Reçete-1, 2, 3, 4 ile yapılan kaplamaların ve ayrıca saf kumaşlardan alınan numunelerin elektromanyetik geçirgenlik değerlerine bakıldığında en yüksek sonuçları cam kumaş vermiştir. Reçete-5 cam kumaş üzerinde uygulanmıştır. Sırasıyla 50, 100, 150, 200, 250, 350 ve 500 döngü sayısında yapılan kaplamalara ait sonuçlar sırasıyla değerlendirilmiştir.



Şekil 4.6. Numune 19-24, elektriksel karakterizasyon sonuçları. **A)** Numune 19 **B)** Numune 20 **C)** Numune 21 **D)** Numune 22 E) Numune 23 **F)** Numune 24



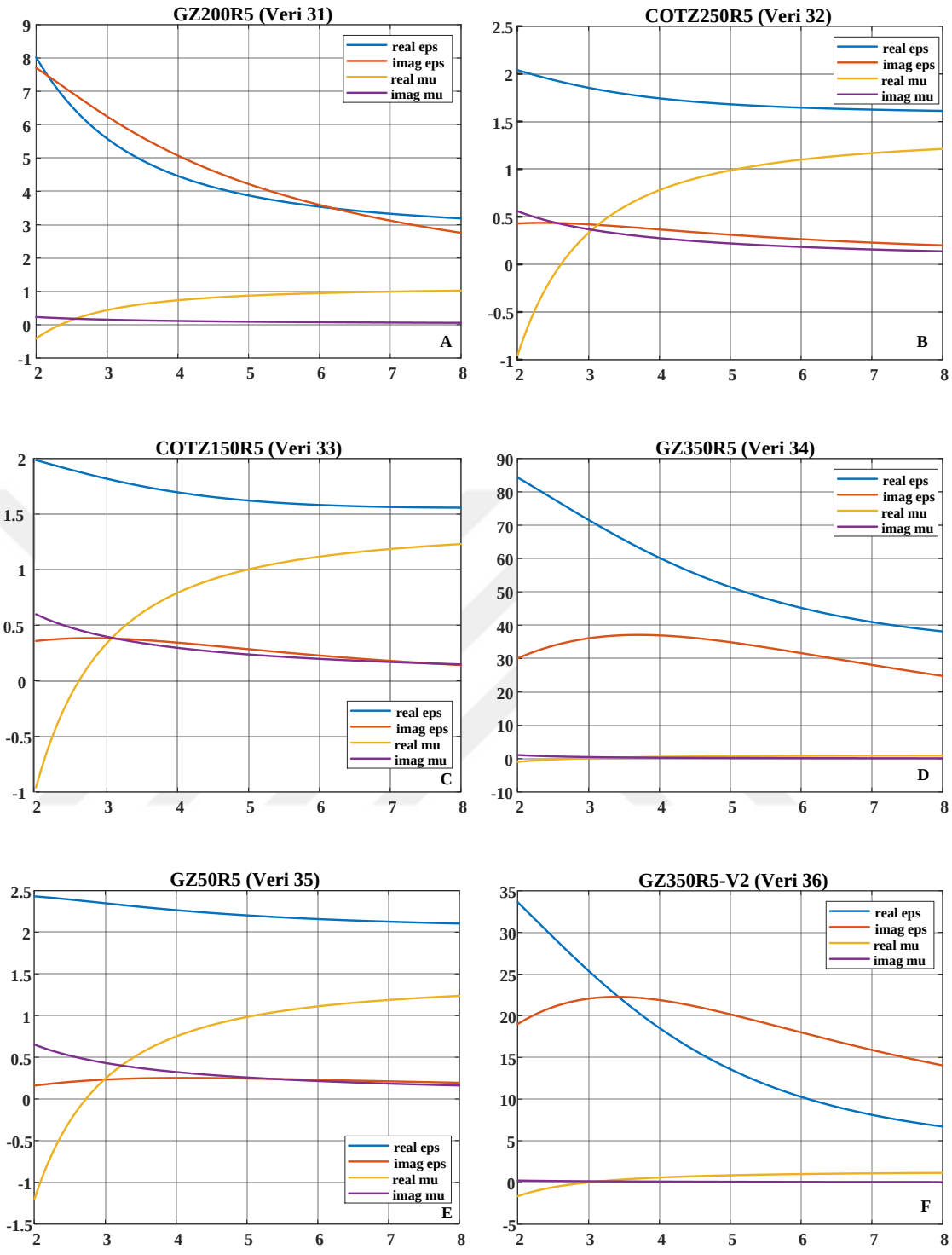
Şekil 4.7. Numune 25-30, elektriksel karakterizasyon sonuçları **A)** Numune 25 **B)** Numune 26 **C)** Numune 27 **D)** Numune 28 **E)** Numune 29 **F)** Numune 30

Şekil 4.8E' de cam kumaşın ALD Reçete-5 ve 50 döngü, Şekil 4.7E ' de 100 döngü ve Şekil 4.7F'de 150 döngüde yapılan kaplamasına ait sonuçlar verilmiştir. 50 döngüden 100

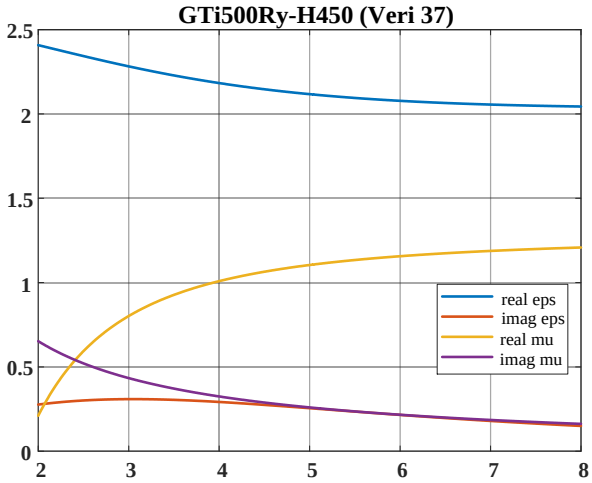
döngüye geçişte 2.45 ile başlayan epsilonun reel değeri 2.75 civarına çıkmıştır ve diğer tüm parametrelerde bundan daha az gözlemlenen bir artış olmuştur. 100'den 150'ye geçişte elektriksel geçirgenlikte artış daha bariz olmakla birlikte manyetik geçirgenliğin sanal kısmında bir değişim olmamıştır. Reçete-5'in 200, 250, 350 ve 500 döngüde yapılan kaplamalarına sırasıyla bakıldığında artan döngü sayısı ile birlikte elektrik geçirgenliğin reel ve sanal kısmının da arttığı görülmektedir. Döngü sayısı arttıkça elektrik geçirgenlik 35, 60, 80 değerlerine dek çıkmıştır. Ancak manyetik geçirgenlik bu aşamada bir değişim göstermemiştir.

TiO_2 Reçete-x ile yapılan kaplamalardan Şekil 4.6F'ye bakıldığında saf cam kumaşın elektriksel geçirgenlik değerlerine(Şekil 4.6D) göre farklılıklar görülmektedir. TiO_2 kaplanmış numunede elektriksel geçirgenliğin reel kısmında yaklaşık 0,5 artış olmuş, sanal kısmı ise 4 GHz 'den sonra 0,1 azalmıştır. Dielektrik kayıp tanjantı değerlendirildiğinde saf cam kumaşa göre elde edilen numunenin dielektrik kayıp tanjantının daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca yüksek sıcaklığın TiO_2 moleküllerinde kristallenme etkisini gözlemlemek amacıyla numune 450℃ fırınlanmıştır. Fırınlama sonucu elde edilen veriler (Şekil 4.7B) incelendiğinde Şekil 4.6F'ye göre elektriksel geçirgenliğin reel kısmında 0,2'lik bir düşüş görülmüştür. Diğer parametrelerde belirgin fark yoktur.

TiO_2 Reçete-y uygulanan cam kumaşa ait sonuç Şekil 4.7A' da, sonrasında ısıl işlem uygulanan numuneye ait sonuç Şekil 4.9'da verilmiştir. Şekil 4.7A'ya bakıldığında uygulanan 500 döngü ALD TiO_2' nin daha düşük doz miktarlı Reçete-x ile 200 döngüde yapılan kaplamasına(Şekil 4.6F) bakıldığında hemen hemen benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. 500 döngü Reçete-y kaplaması saf cam kumaş ile karşılaştırıldığında epsilon değerleri artmış manyetik geçirgenliğin reel kısmı bir miktar düşmüş sanal kısmı çok az da olsa yükselmiştir. Bu durum manyetik ve dielektrik kayıp tanjantının artmasını sağlamaktadır. Aynı şekilde yapılan kaplamanın ısıl işlem sonrası sonuçlarında reel epsilonda bir düşüş görülmekte diğer parametrelerde bir değişim görülmemektedir.



Şekil 4.8. Numune 31-36, elektriksel karakterizasyon sonuçları. **A)** Numune 31 **B)** Numune 32 **C)** Numune 33 **D)** Numune 34 **E)** Numune 35 **F)** Numune 36



Şekil 4.9. Numune 37'nin elektriksel karakterizasyon sonucu

4.3. Optimizasyon Bulguları

VNA ölçümleri sonucu elde edilen veri seti, çok katmanlı radar soğurucu yapı oluşturulmak üzere GWO kullanılarak optimize edilmiştir. Optimizasyon hesaplamaları dik geliş açısında ve açıya bağımlı olarak iki ayrı şekilde gerçekleştirilmiştir.

4.3.1. Dik Geliş Açısı İçin Üretilen ÇRS Tasarımları

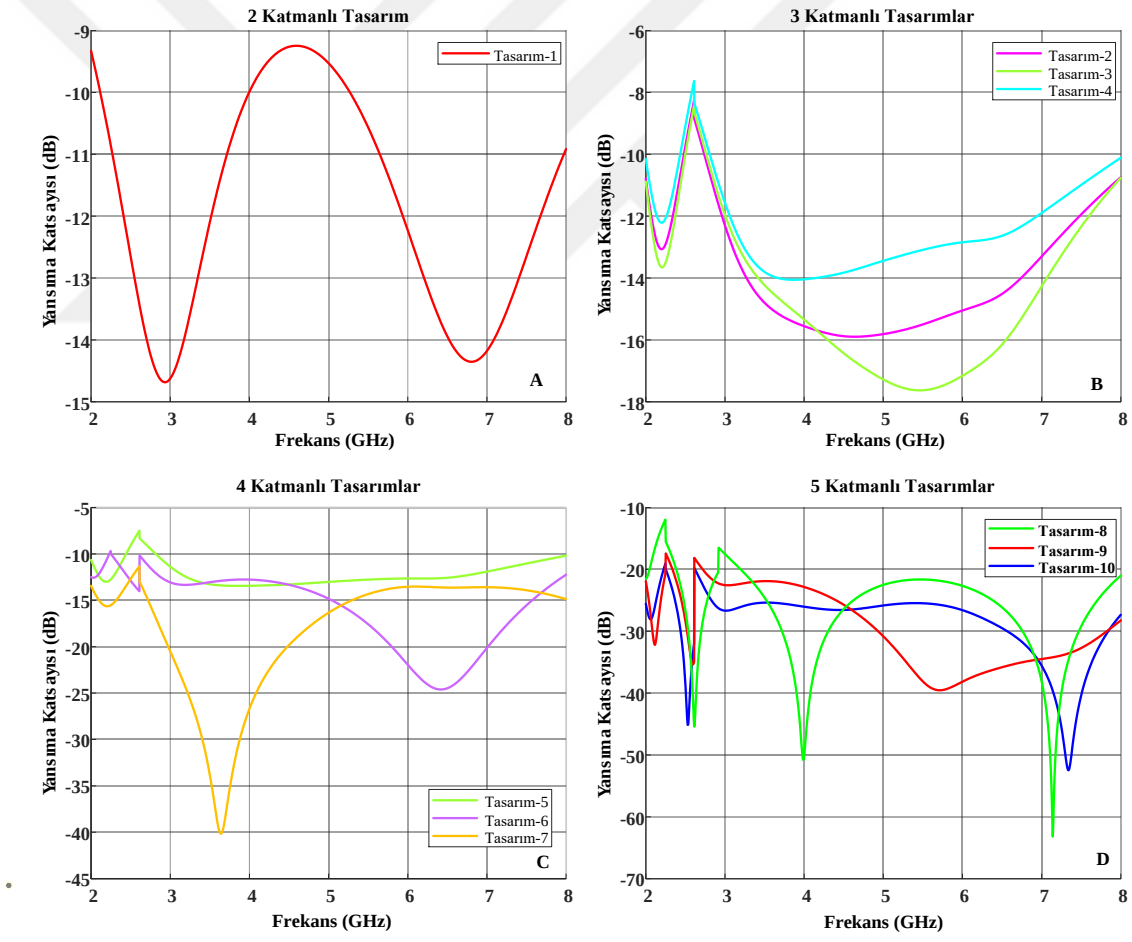
Dik açı ile gelen dalgaları soğurmak üzere optimize edilen ÇRS yapılarına ait tasarım parametreleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Tasarımların katman sayıları 2, 3, 4 ve 5 olmak üzere on farklı ÇRS tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımların kalınlıkları 19-28 mm arasında değişmekte olup neredeyse tüm tasarımlar frekans bandı 2-8 GHz arasında tüm noktalarda -10 dB ve altında yansıma sağlayarak %90 ve üzeri soğurma performansı göstermektedir. Dik geliş açısında gerçekleştirilen on adet ÇRS tasarımı için 2-8 GHz frekansa karşılık yansıma katsayısı değerlerinin grafiksel gösterimi Şekil 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.2. Dik geliş açısında tanımlanan ÇRS yapıları için tasarım parametreleri

Katman Sayısı	Tasarım No	Sırasıyla Katmanlar (1,2,..n)	Katman Kalınlıkları (mm)	Toplam Kalınlık (mm)	Yansıma Katsayısı (dB)		
					Maks.	**Min.**	**Ort.**
2	**1**	21 19	10 10	20	-9.2451	-14.6845	-11.8445
3	**2**	2 20 13	8.3838 2.7394 9.9022	21.0254	-8.2608	-15.898	-13.8483
	3	7 20 13	8.784 2.9252 10	21.7092	-8.416	-17.6314	-14.546
	4	6 20 13	6.9665 2.4131 10.5035	19.8831	-7.6261	-14.0567	-12.3687
4	**5**	2 20 10 13	7.0265 2.4711 0.79386 10	20.2915	-7.4981	-13.4459	-12.1807
	6	18 11 20 2	0.62929 9.1561 1.6511 10	21.4365	-9.6784	-24.61	-15.7662
	7	1 19 20 6	8.7833 5.6834 4.0943 7.4196	25.9806	-11.3271	-40.1569	-18.014
5	**8**	1 18 1 17 13	10 1.1179 7.308 3.0323 6.9149	28.3731	-11.9513	-63.1922	-26.6039
	9	23 18 23 20 21	8.2352 0.66931 8.3968 1.9853 6.8163	26.1029	-17.4224	-39.5369	-29.3606

Çizelge 4.2. Dik geliş açısında tanımlanan ÇRS yapıları için tasarım parametreleri (devam)

Katman Sayısı	Tasarım No	Sırasıyla Katmanlar (1,2,..n)	Katman Kalınlıkları (mm)	Toplam Kalınlık (mm)	Yansıma Katsayısı (dB)		
					Maks.	**Min.**	**Ort.**
		23	10				
		18	0.69421				
5	**10**	23	7.9121	27.1978	-19.0751	-52.4778	-28.606
		20	2.9466				
		21	5.6449				



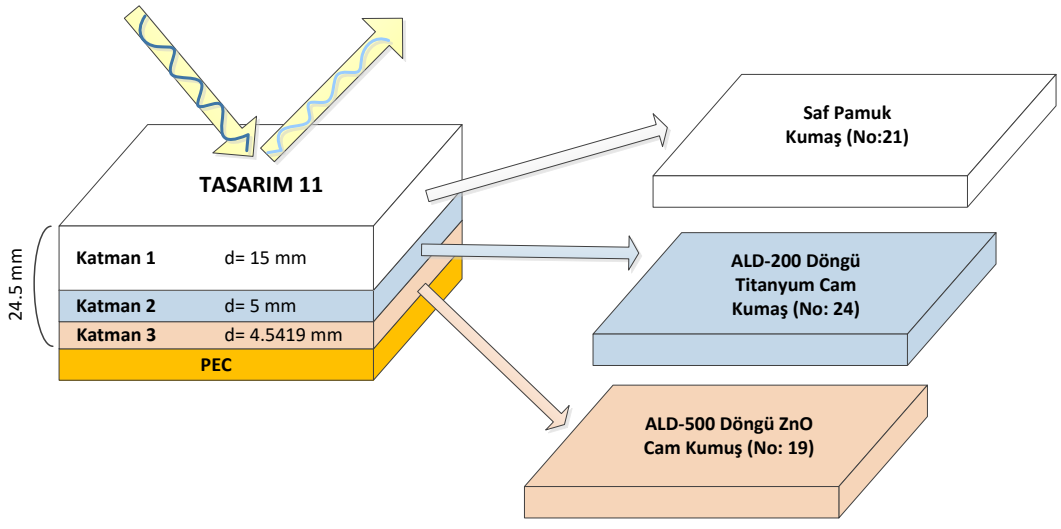
Şekil 4.10. Tasarım 1-10 için dik açıda hesaplanan yansıma katsayısı değerleri **A)** İki katmanlı tasarım **B)** Üç katmanlı tasarımlar **C)** Dört katmanlı tasarımlar **D)** Beş katmanlı tasarımlar

4.3.2. Eğimli Geliş Açısı İçin Üretilen ÇRS Tasarımları

Açıya bağlı gerçekleştirilen tasarımların 10, 20, 30 ve 40 geliş açılarında yansıma katsayıları TE ve TM polarizasyon için hesaplanmıştır. Optimizasyon sonucunda açı ve polarizasyondan bağımsız olarak etkin soğurma sağlayan beş özgün ÇRS tasarımı sunulmuştur. Eğimli açılar için oluşturulan ÇRS malzemelere ait tasarım parametreleri ile TE ve TM modlarındaki yansıma katsayıları Çizelge 4.3- 4.7'de ve ilgili tasarımların şematik gösterimleri Şekil 4.11-4.15'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Eğimli açıda tanımlanan ÇRS Tasarım-11 için tasarım parametreleri

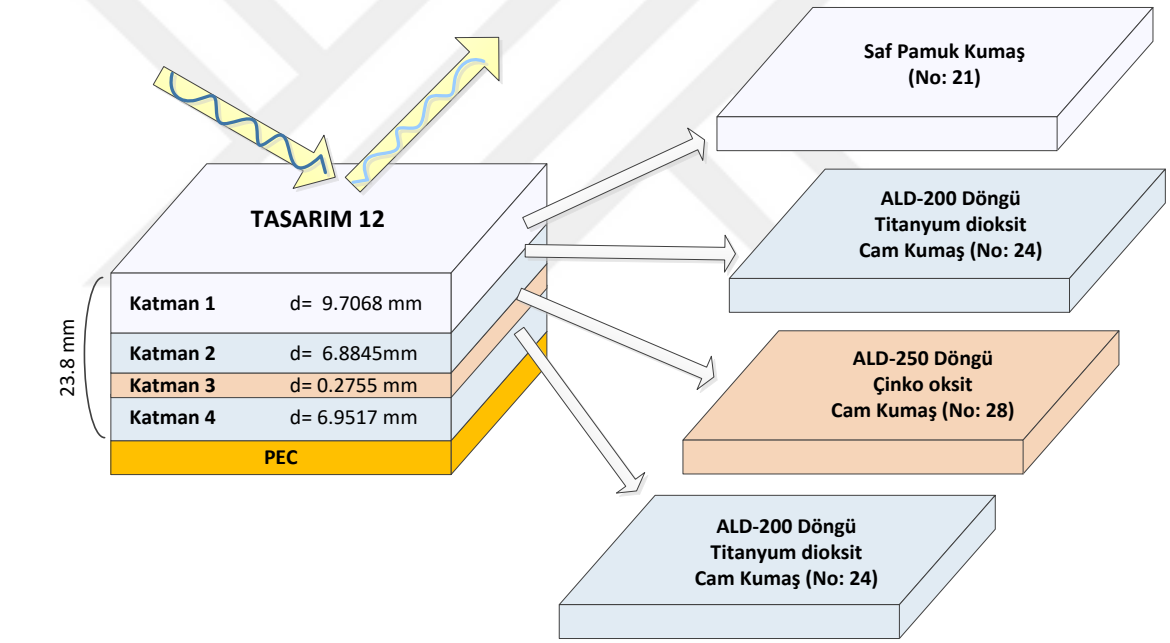
TASARIM 11						
Malzeme Özellikleri			**Maksimum Yansıma Katsayısı (dB)**			
Katman	**Malzeme**	**Kalınlık (mm)**	**Geliş Açısı**		**TE Polarizasyon**	**TM Polarizasyon**
			0°	-10.451	-10.451	
1.	21	15	10°	-10.3936	-10.6355	
2.	24	5	20°	- 10.1969	- 11.0081	
3.	19	4.5419	30°	-9.80376	-11.3695	
Toplam Kalınlık	24.5419 mm		40°	-8.18659	-11.2458	



Şekil 4.11. Tasarım 11 için şematik gösterim

Çizelge 4.4. Eğimli açıda tanımlanan ÇRS Tasarım-12 için tasarım parametreleri

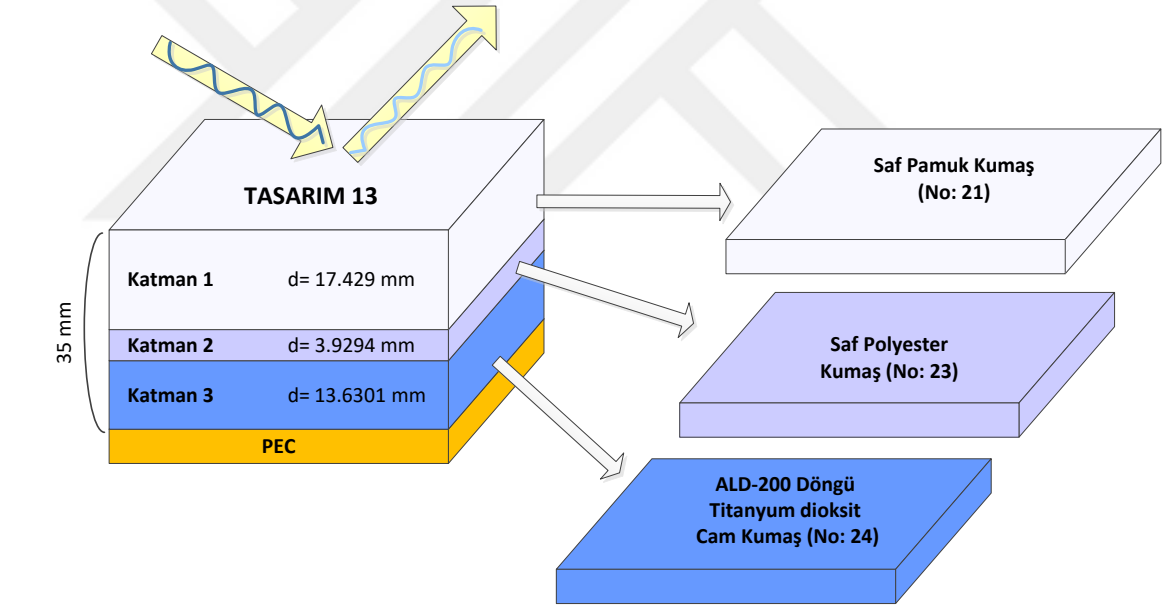
TASARIM 12							
Malzeme Özellikleri			**Maksimum Yansıma Katsayısı (dB)**				
Katman	**Malzeme**	**Kalınlık (mm)**	**Geliş Açısı**		**TE Polarizasyon**		**TM Polarizasyon**
			0°	-13.2819		-13.2819	
1.	21	9.7068	10°	-12.9794		-13.4655	
2.	24	6.8845	20°	-11.8439		-14.0385	
3.	28	0.2755	30°	-10.2618		-14.5437	
4.	24	6.9517	40°	-8.48939		-13.9674	
Toplam Kalınlık	23.8185 mm						



Şekil 4.12. Tasarım 12 için şematik gösterim

Çizelge 4.5. Eğimli açıda tanımlanan ÇRS Tasarım-13 için tasarım parametreleri

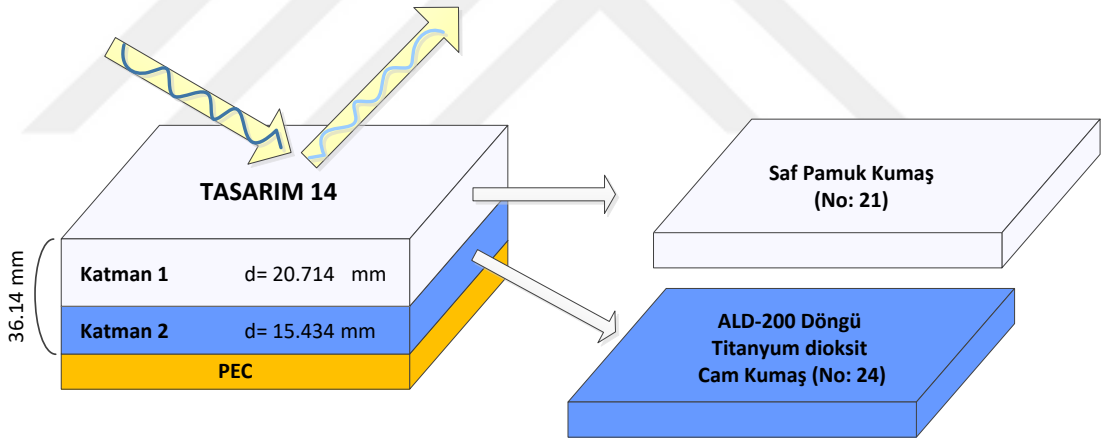
TASARIM 13							
Malzeme Özellikleri			Maksimum Yansıma Katsayısı (dB)				
Katman	**Malzeme**	**Kalınlık (mm)**	**Geliş Açısı**		**TE Polarizasyon**		**TM Polarizasyon**
				0°	-13.5339	-13.5339	
1.	21	17.4429		10°	-13.5482	-13.6304	
2.	23	3.9294		20°	-13.2472	-13.8486	
3.	24	13.6302		30°	-12.4269	-13.8583	
Toplam Kalınlık	35.0025 mm			40°	-10.0694	-12.269	



Şekil 4.13. Tasarım 13 için şematik gösterim

Çizelge 4.6. Eğimli açıda tanımlanan ÇRS Tasarım-14 için tasarım parametreleri

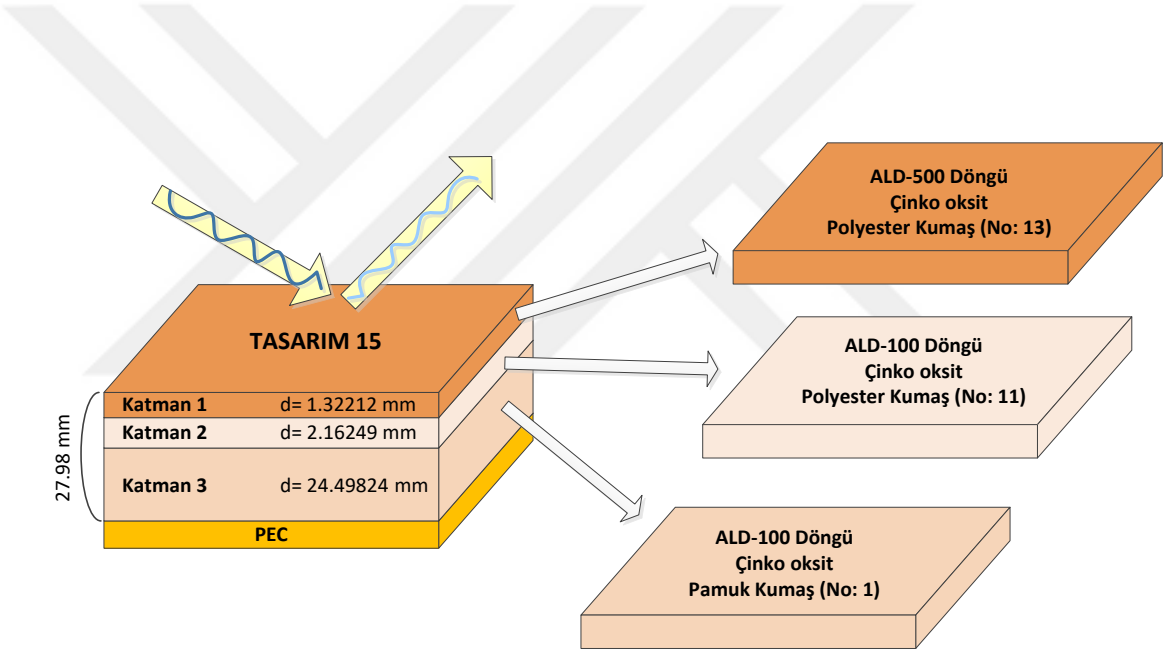
TASARIM 14							
Malzeme Özellikleri			Maksimum Yansıma Katsayısı (dB)				
Katman	**Malzeme**	**Kalınlık (mm)**	**Geliş Açısı**		**TE Polarizasyon**		**TM Polarizasyon**
				0°	-13.5955		-13.5955
1.	21	20.714		10°	-13.5176		-13.8356
2.	24	15.434		20°	-13.2345		-14.2582
				30°	-12.4313		-14.1287
Toplam Kalınlık	36.148 mm			40°	-10.0853		-11.9388



Şekil 4.14. Tasarım 14 için şematik gösterim

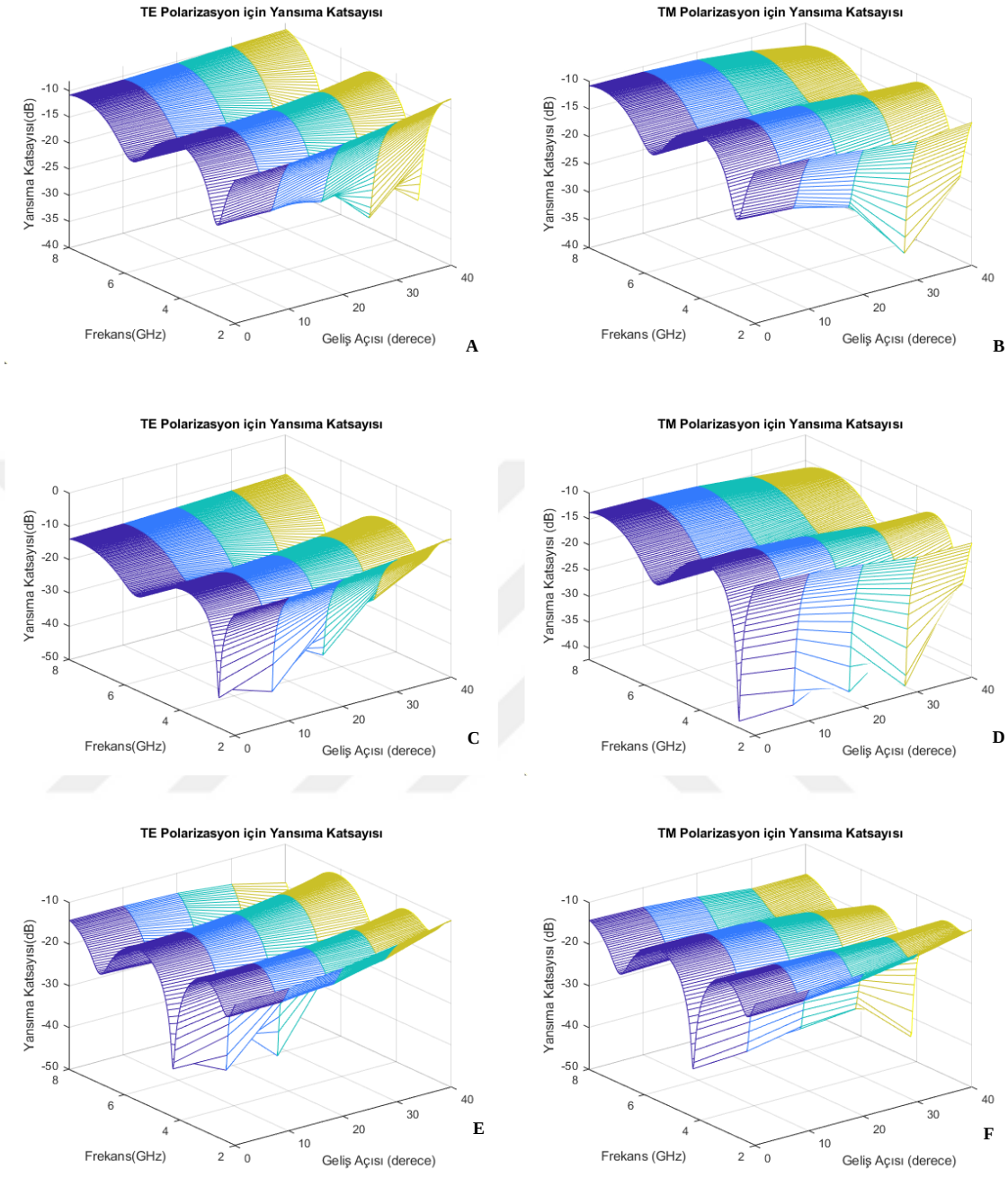
Çizelge 4.7. Eğimli açıda tanımlanan ÇRS Tasarım-15 için tasarım parametreleri

TASARIM 15							
Malzeme Özellikleri			Maksimum Yansıma Katsayısı (dB)				
Katman	**Malzeme**	**Kalınlık (mm)**	**Geliş Açısı**		**TE Polarizasyon**		**TM Polarizasyon**
				0°	-8.8615		-8.9028
1.	13	1.32212		10°	-8.93		-9.0456
2.	11	2.16249		20°	-8.4684		-8.945
3.	1	24.49824		30°	-7.5979		-8.6877
Toplam Kalınlık	27.9828 mm			40°	-6.4757		-8.3343

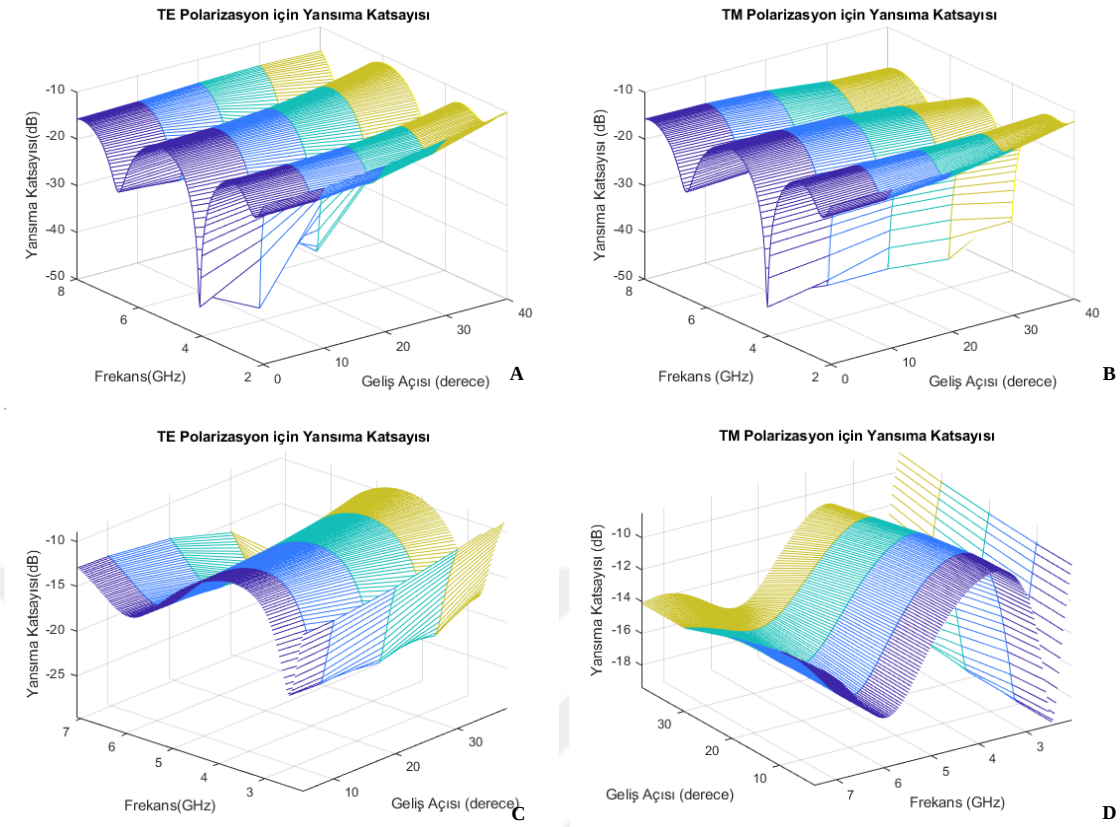


Şekil 4.15. Tasarım 15 için şematik gösterim

Açıya bağlı oluşturulan beş tasarımın, TE ve TM modlarında 0-40° arasında 2-8 GHz frekans bandında yansıma katsayısını veren grafikler Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Açı ve polarizasyona bağlı olarak gerçekleştirilen ÇRS tasarımlarının yansıma katsayısı değerleri **A)** Tasarım-11 TE polarizasyon değerleri **B)** Tasarım-11 TM polarizasyon değerleri **C)** Tasarım-12 TE polarizasyon değerleri **D)** Tasarım-12 TM polarizasyon değerleri **E)** Tasarım-13 TE polarizasyon değerleri **F)** Tasarım-13 TM polarizasyon değerleri



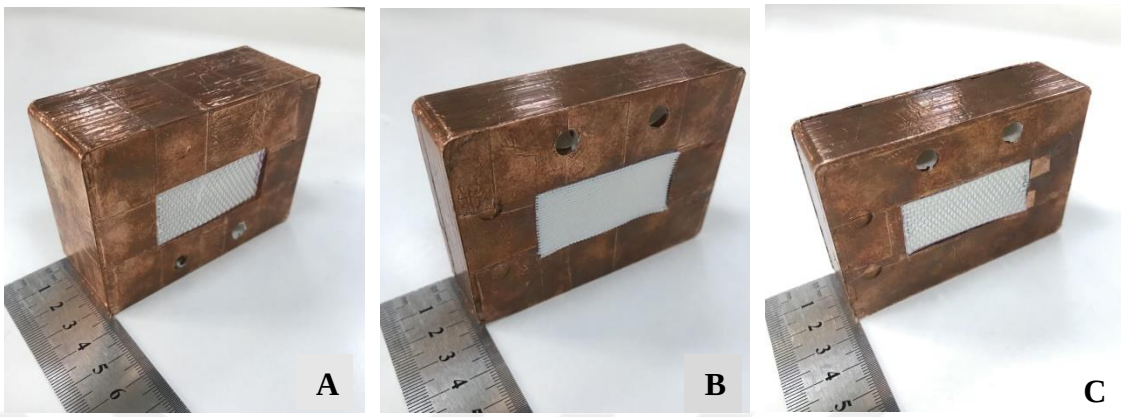
Şekil 4.17. Açı ve polarizasyona bağlı olarak gerçekleştirilen ÇRS tasarımlarının yansıma katsayısı değerleri **A)** Tasarım-14 TE polarizasyon değerleri **B)** Tasarım-14 TM polarizasyon değerleri **C)** Tasarım-15 TE polarizasyon değerleri **D)** Tasarım-15 TM polarizasyon değerleri

Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de görüldüğü üzere tasarımlar 0°-40° arasında neredeyse tüm noktalarda %90 oranında radardan soğurucu özellik göstermektedir. Daha önceki tablolarda da verildiği üzere (bkz. Çizelge 4.3, Çizelge 4.4, Çizelge 4.5, Çizelge 4.6) Tasarım 11 ve 12 40°'de -8 dB civarında yansıma kaybı göstermiş, Tasarım 13 ve 14 tüm noktalarda -10 dB' nin altında kalarak daha başarılı sonuç vermiştir. Ancak Tasarım 13 ve 14'te diğer tasarımlara kıyasla incelikten bir nebze ödün verilmiştir.

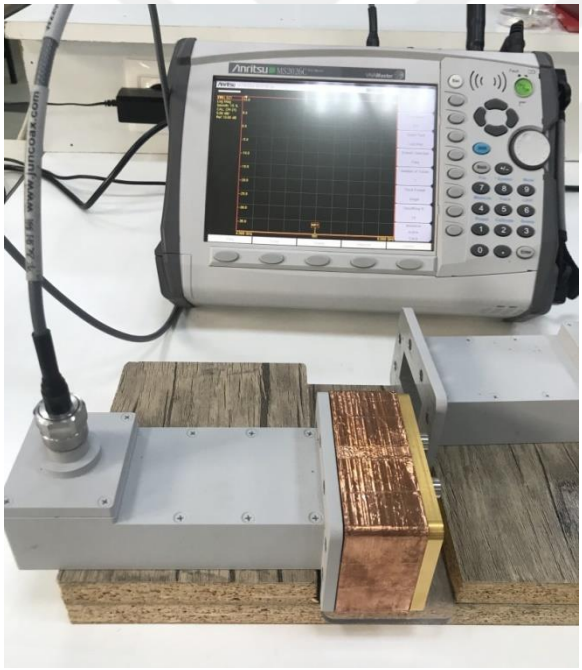
4.4. Gerçekleştirilen Tasarım Ölçümleri

Açıya bağlı olarak optimize edilen etkin üç ÇRS tasarımı (Tasarım-11, Tasarım-12 ve Tasarıım-13) seçilmiş ve belirlenen kumaş kalınlıkları ayarlanarak katmanlı yapı oluşturulmuştur. Katman kalınlıklarını belirlemede ölçüm kitinin kalınlığı olan 0,51 cm referans alınmıştır ve kumaş türlerine göre bu kalınlığa ulaşan kumaş sayıları (Pamuk

kumaş 10 kat, polyester 9 kat ve cam kumaş için 18 kat) istenilen kalınlıklar için oranlanarak katman sayıları oluşturuluştur. Gerçekleştirilen tasarımlar Şekil 4.18'de verilmiştir.



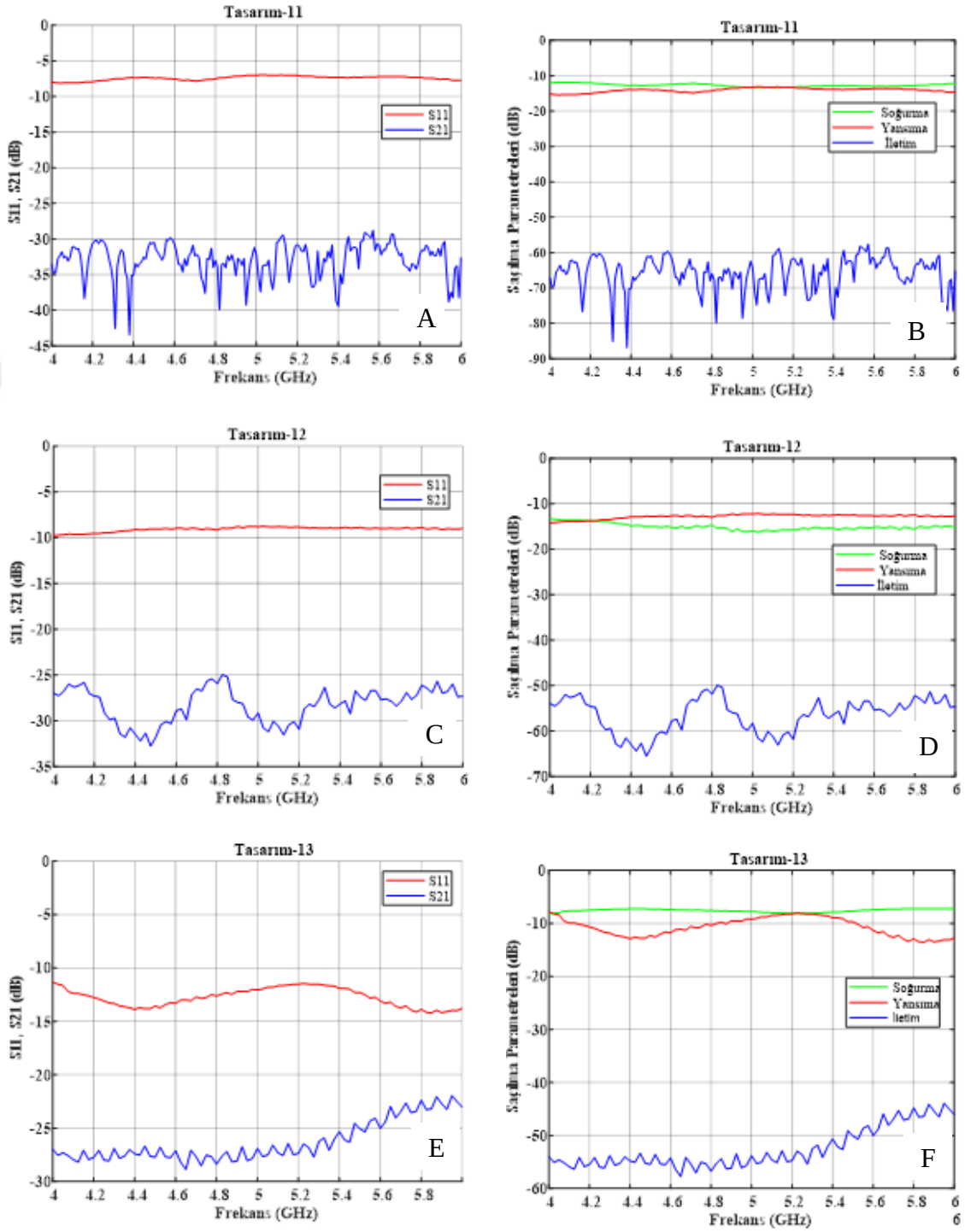
Şekil 4.18. Gerçekleştirilmiş ÇRS tasarımları **A)** Tasarım-13 **B)** Tasarım-12 **C)** Tasarım-11



Şekil 4.19. Gerçekleştirilen tasarımın ölçümü

Oluşturulan ve Şekil 4.18'de görüldüğü üzere ölçüm kitine yerleştirilen tasarım kumaşları Şekil 4.19'daki gibi VNA' da ölçülmüş ve S parametreleri alınmıştır. Tek port kullanılarak ve ÇRS yapı arkasına PEC konularak yapılan ölçümde 4-6 GHz frekansta S_{11} ve S_{21} değerleri alınmış; soğurma, yansıma ve iletim parametreleri (bkz. Denklem

2.4-2.7) on tabanında logaritmalarının on katı alınarak hesaplanmıştır (Santhosi vd., 2020) (Şekil 4.20).



Şekil 4.20. Gerçekleştirilen tasarımlardan alınan ölçüm sonuçları **A)** Tasarım-11 S parametreleri **B)** Tasarım-11 saçılma parametreleri **C)** Tasarım-12 S parametreleri **D)** Tasarım-12 saçılma parametreleri **E)** Tasarım-13 S parametreleri **F)** Tasarım-13 saçılma parametreleri

Şekil 4.20’de gerçekleştirilen tasarımlardan alının sonuçlara bakıldığında Tasarım 11’in hedefteki istenilen kıstasların altında kaldığı, Tasarım 12’nin sınırda olduğu ve Tasarım 13’ün ideal radar soğurucu kriterlerini sağladığı görülmektedir.
S11 parametresi, 1.porttan verilen sinyalin yine 1.porta iletilen miktarıdır ve ÇRS yapıya iletilen sinyal arkasında bulunan PEC tarafından maksimum miktarda yansıtılarak yapı tarafından soğurulup iletilmiştir. S21’in çok düşük yansıma katsayısında olması sebebi PEC’in varlığıdır.

Yapılan bu çalışman başarım oranı literatürdeki örnekleriyle karşılaştırıldığında etkin çalışma yansıma kaybı sınırı olan -10 dB yansıma katsayısının altında çalıştığı görülmekte ve ideal bir ÇRS’den istenilen kriterleri sağlamaktadır.

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında ilk olarak EM dalga teorisi ve EM dalgalardan korunmanın önemi anlatılmış, bu kapsamda radar soğurucu gereksinimleri, formülasyonu, yaygın ve gelişmekte olan radar soğurucular üzerinde durulmuştur. ALD'nin diğer ince film kaplama tekniklerine kıyasla üstün özelliklere sahip olması ve bu yöntemle kaplama yapılmış herhangi bir radar soğurucu yapı çalışmasının bulunmaması ALD ile radar soğurucu tasarlamaya teşvik etmiştir. Gelişmekte olan 5G teknolojisi ve uzay teknolojileri, giyilebilir radar soğurucu malzemedeki eksikliği hatırlatmış ve ALD ile çok katmanlı radar soğurucu tekstil malzemesi üretmeye yönlendirmiştir.

ÇRS'lerin diğer tek katmanlı radar soğuruculara göre düşük yansıma kaybına sahip olması tasarım problemini de beraberinde getirmektedir. Düşük yansıma kaybı ile incelik ve hafiflik arasındaki ödünleşim Gri Kurt Optimizasyonu'yla çözüme kavuşturulmuştur. ÇRS tasarımı için kullanılan optimizasyon algoritmaları, adil bir kıyaslama yöntemi olan 16 sanal malzeme kullanarak ÇRS oluşturmaktadır. Fakat GWO'nun bu yöntemle etkinliğinin daha önce test edilmediği görülmektedir. Yapılan çalışmada GWO, 16 sanal malzeme ile ÇRS tasarımında test edilerek var olan pek çok optimizasyon algoritmasından üstün performans gösterdiği ispatlanmıştır.

ALD ve farklı yöntemler ile çeşitli malzemelerle kaplanan cam, pamuk ve polyester kumaşların elektromanyetik karakteristikleri VNA' da ölçülerek incelenmiştir. Elde edilen veriler kaydedilerek GWO algoritması ile dik ve eğimli açılar (0°-40°) için TE ve TM polarizasyonda ÇRS tasarımları oluşturulmuştur. İlgili tasarım parametreleri ile çok katmanlı yapı oluşturulmuş ve test edilmek üzere VNA' da arkasına PEC yerleştirilerek S parametreleri ölçülmüştür. Neredeyse tüm tasarımlar için yansıma kaybı -10 dB ve altında sonuç vermiştir. Kumaş kalınlıklarının soğurma performansını etkilediği; kalın tasarımlar daha düşük yansıma katsayısına sahipken, daha ince tasarımların yansıma katsayısındaki belirli düzeyde artıştan görülmektedir. Ayrıca optimizasyon sonucu belirlenen katmanların sırasına bakıldığında ilk katmanda pamuk ve polyester kumaş seçilirken cam kumaş hep sonraki katmanlarda seçilmiştir. Bunun nedeni pamuk kumaşın liflerinin cam kumaşa göre daha kalın olması ve örgüsünün yüzeyde girinti çıkıntılar oluşturmasıdır. Cam kumaş ise çok daha düz bir yüzeye sahiptir. Göreceli olarak daha

pürüzlü yüzey ilk sıraya alındığında gelen dalga kumaş yüzeyindeki girinti çıkıntılardan etkilenerek eğimli açılarda yansıyıp zayıflayarak malzemeye giriş yapacak ve soğurma etkisi artmış olacaktır. Elektriksel geçirgenliği daha yüksek olan cam kumaşa karşın pamuk kumaşın seçilimini vazgeçilmez kılan sebebin bu saçılma etkisi olduğu düşünülmektedir.

Alınan sonuçlar ve elde edilen veriler değerlendirildiğinde özdeş kumaş numunelerine aynı ALD reçeteleri ile yapılan kaplamalarda döngü sayısı ile kumaşa biriktirilen malzeme kalınlıklarının yakın oranlarda olduğu görülmüştür.

Ayrıca kumaş numunelerine ALD Reçete-5 ile yapılan kaplamalarda döngü sayısına karşı kaplanan numunelerin elektrik ve manyetik geçirgenliği incelenmiştir. Kumaş numunelerde döngü sayısı ile artan malzeme biriktirmesine karşın iyileşen elektromanyetik özellikler gözlemlenmiştir. Kumaşlarda artan ZnO miktarı elektriksel geçirgenliğin reel ve sanal değerlerinde artışa sebep olmuştur. Döngü sayısıyla artan elektriksel geçirgenliği ifade eden bağıntı elde edilmiştir. Oluşturulan bağıntı sayesinde ALD ile yapılacak farklı kalınlıkta kumaş kaplamaları için elde edilecek malzemede elektriksel geçirgenliğin yaklaşık değerleri hakkında fikir sahibi olunabilecektir.

Kalınlık ve malzeme sırası optimize edilen tasarımlar, belirtilen parametrelerde gerçekleştirilerek test edilmiştir. Optimizasyon sonuçları ile gerçekleştirilen tasarımlardan alınan ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında gerçekte bulunan yansıma katsayısı değerlerin hesaplanandan daha yüksek çıktığı görülmektedir. Hesaplanan optimizasyon için yapılan malzeme ölçümleri 0.51 cm kalınlıktaki kitlerden alınmakta ve bulunan değerler ifade edilen formüllerde doğru orantı kurularak herhangi bir kalınlık için hesaplanmaktadır. Fakat ölçülen kumaş katmanları arası boşluklar ölçüm sonucunu etkilemektedir ve bu hesaba katılmamıştır. Örneğin her bir cam kumaş için elektromanyetik karakterizasyon yapılırken ölçüm kitinde bulunan kumaş katman sayısı 18 ve bu kumaşlar arasında 17 boşluk olduğu göz önüne alındığında; katman/ boşluk oranı daha ince bir kalınlığa ulaşmak istendiğindeki oranla aynı olmayacaktır. Yani altı kat kumaş kullanıldığında kumaşlar arası arayüz boşluğu beş olacak ve bu oran artacaktır. Ayrıca katmanlar arası boşlukların ve tek bir katmandaki lifler arası boşlukların elektromanyetik geçirgenliği etkilemedeki farklılıkları incelenmemiştir ve önceki

çalışmalarda da rastlanmamıştır. Malzeme içinde heterojen dağılımlı boşlukların elektromanyetik saçılma sağlayarak iç yansımalar sonucu soğurulduğu aşikârdır ancak literatüre bakıldığında bu parametre üzerinden henüz bir normalizasyon işlemi oluşturulmamış ve bizim de hesaplamalarımıza dâhil edilmemiştir.

Ayrıca her defasında kat kat ölçüm kitine yerleştirilen kumaşların yerlerinin ve üst üste gelen örgü desenlerindeki farklılıklar da ölçüm sonuçlarında değişimlere sebep olabilmektedir. Örgü yapısının elektromanyetik geçirgenliği ve yansıma kaybını etkilediğini gösterir çalışmalar bu sonucu desteklemektedir. Tüm bu sebepler göz önüne alındığında test edilen ÇRS tasarımlarının makul düzeyde hesaplamalardan sapma gösterdiği söylenebilir. Gerçekleştirilen üç tasarım da 2-8 GHz frekansta radar soğurucu özellik göstermekte ve mikrodalga soğurucular için ALD ile ÇRS tasarımına yeni bir alternatif oluşturmaktadır.

KAYNAKLAR

Akyıldız, H. İ., Aydemir Yılmaz, B., & Diler, S. (2022). Antibacterial Activity of Photodeposited Ag Nanoparticles on Cotton Fibers Enabled by Atomic Layer Deposition. *Fibers and Polymers*, 2769-2779.

Anyaka, B. O., & Akuru, U. B. (2012). Electromagnetic Wave Effect on Human Health: Challenges for Developing Countries. *International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery, CyberC* (s. 447-452). Sanya, China: IEEE. doi:10.1109/CyberC.2012.81.

Anyaka, B. O., & Akuru, U. B. (2012). Electromagnetic Wave Effect on Human Health: Challenges for Developing Countries. *2012 International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discover* (s. 447-452). Sanya, China: IEEE. doi:10.1109/CyberC.2012.81

Asi, M. J., & Dib, N. (2010). Design of multilayer microwave broadband absorbers using central force optimization. *Progress In Electromagnetics Research B*, Vol. 26, 101–113.

Atıcı, Ş., Yiğit, E., & Özkaya, U. (2023). Chapter 4: Design of Multilayer Radar Absorber Using Grey Wolf Optimization Algorithm. *Pioneer and Contemporary Studies in Engineering* (s. 59-74). içinde Konya: Duvar Publishing.

BTHK. (tarih yok). *Bilgi Teknolojileri ve Haberleşme Kurumu*. BTHK.com: https://www.bthk.org/tr/tuketici/elektromanyetik-dalgalar-ve-saglik adresinden alınmıştır

Cai, J., Ma, Z., Wejinya, U., Zou, M., Liu, Y., Zhou , H., & Meng , X. (2019). A revisit to atomic layer deposition of zinc oxide using diethylzinc and water as precursors. *Journal of Materials Science* , 5236–5248.

Cao, W.-T., Chen, F.-F., Zhu, Y.-J., Zhang, Y.-G., Jiang, Y.-Y., Ma, M.-G., & Chen, F. (2018). Binary Strengthening and Toughening of MXene/Cellulose Nanofiber Composite Paper with Nacre-Inspired Structure and Superior Electromagnetic Interference Shielding Properties. *ACS-Nano*, 4583-4593.

Chamaani, S., Mirtaheri, S. A., & Shooredeli, M. A. (2008). Design of very thin wide band absorbers using modified local best particle swarm optimization. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 549-556.

Chen, Z., Zhang, Y., Wang, Z., Wu, Y., Zhao, Y., Liu, L., & Ji, G. (2023). Bioinspired moth-eye multi-mechanism composite ultra-wideband. *Carbon*, 542-548.

Cheng, J., Zhang, H., Ning, M., Raza, H., Zhang, D., Zheng, G., . . . Che, R. (2022). Emerging Materials and Designs for Low- and Multi-Band Electromagnetic Wave Absorbers: The Search for Dielectric and Magnetic Synergy? *Advenced Functional Materials*.

Devi, N., & Ray, S. S. (2022). Electromagnetic interference cognizance and potential ofadvanced polymer composites toward electromagneticinterference shielding: A review. *Polymer Engineering and Science*, 591-621. doi:https://doi.org/10.1002/pen.25876

Dib, N., Asi, M., & Sabbah, A. (2010). On the optimal design of multilayer microwave absorbers. *Progress In Electromagnetics Research C, Vol. 13,*, 171-185.

Diler, S. (2021, February 5). ALD FİLM KAPLI POLİAMİD KUMAŞLARIN ANTİBAKTERİYEL ETKİNLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI. Bursa, Turkiye.

FANTE, R. L., & McCormack, M. T. (1988). Reflection properties of the Salisbury screen. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* , Volume: 36, Issue: 10.

Fu, X.-Y., Zheng, Q., Li, L., & Cao, M.-S. (2022). Vertically implanting MoSe2 nanosheets on the RGO sheets towards excellent multi-band microwave absorption. *Carbon*, 197.

Guan, X., Yang, Z., Zhou, M., Yang, L., Peymanfar, R., Aslibeiki, B., & Ji, G. (2022). Two-dimensional (2D) MXene Nanomaterials: Synthesis, Mechanism, and Multifunctional Applications in Microwave Absorption. *Small Structures*. doi:10.1002/sstr.202200102

Jiang, L., Cui, J., Shi, L., & Li, X. (2009). Pareto optimal design of multilayer microwave absorbers for wide-angle incidence using genetic algorithms. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, Vol. 3, Iss. 4, pp. 572– 579.

Knoops, H., Potts, S., Bol, A., & Kessels, W. (2014). *Atomic LayerDeposition: Handbook of Crystal Growth.* (T. Nishinga, & T. F. Kuech, Dü) U.S.A: Elsevier.

Kuang, B., Ning, M., Wang , L., Li , J., Wang, C., Hou, Z., . . . Jin, H. (2019). Biopolymer nanofiber/reduced graphene oxide aerogels for tunable and broadband high-performance microwave absorption. *Composites Part B: Engineering*, 1-9.

Li, F., Chen, P., Poo, Y., & Wu, R.-X. (2018). Achieving Perfect Absorption by the Combination of Dallenbach Layer and Salisbury Screen. *Proceedings of 2018 Asia-Pacific Microwave Conference*, 1507-1509.

Li, X., Yin, X., Song, C., Han, M., Xu, H., Duan, W., . . . Zhang, L. (2018). Self-Assembly Core–Shell Graphene-Bridged Hollow MXenes Spheres 3D Foam with Ultrahigh Specific EM Absorption Performance. *Advanced Functional Materials*.

MathWorks. (tarih yok). Matlab: https://www.mathworks.com/products/matlab.html adresinden alınmıştır

Michielssen, E., Sajer, J. -M., Ranjithan, S., & Mittra, R. (1993). Design of lightweight, broad-band microwave absorbers using genetic algorithms. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1024-1031. doi:10.1109/22.238519

Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*, 46-61.

National Library of Medicine. (tarih yok). National Center for Biotechnology Information: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK208983/#rrr00116 adresinden alınmıştır

Parsons, G. N., George, S., & Knez, M. (2011). Progress and future directions for atomic layer deposition and ALD-based chemistry. *Cambridge Core* , 865 - 871.

Qing, Y., Dandan Min, Yingying Zhou, Fa Luo, & Wancheng Zhou. (2015). Graphene nanosheet- and flake carbonyl iron particle-filled epoxy–silicone composites as thin–thickness and wide-bandwidth microwave absorber. *Carbon*, 98-107.

Rothwell, E. J., Jonathan L. , F., Sean M. , E., Premjeet , C., & Raoul O. , O. (2016). Analysis of the Nicolson-Ross-Weir Method for Characterizing the Electromagnetic Properties of Engineered Materials. *Progress In Electromagnetics Research*, 31-47.

Roy, S., Roy, S. D., Tewary, J., Mahanti, A., & Mahanti, G. K. (2015). Particle Swarm Optimization for Optimal Design of Broadband Multilayer Microwave Absorber for Wide Angle of Incidence. *Progress In Electromagnetics Research B*, Vol. 62, 121–135.

Saini, P., Arora, M., Gupta, G., Gupta, B. K., Singh, V. N., & Choudhary, V. (2013, 5). High permittivity polyaniline–barium titanate nanocomposites with excellent electromagnetic interference shielding response. *Nanoscale*, 4330–4336.

Salgotra, R., Singh, U., & Sharma, S. (2020). On the improvement in grey wolf optimization. *Neural Computing and Applications*, 3709–3748.

Santhosi, B., Ramji, K., & Rao, N. M. (2020). Design and development of polymeric nanocomposite reinforced with graphene for effective EMI shielding in X-band. *Physica B: Physics of Condensed Matter*, 0921-4526. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.physb.2020.412144

Tirkey, M. M., & Gupta, N. (2019). Electromagnetic absorber design challenges. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 59-65.

Toit, L. D., & Cloete, J. (1996). Electric screen Jauman absorber design algorithms. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2238-2245.

Toktas, A., Ustun, D., Yigit, E., Sabanci, K., & Tekbas, M. (2018). Optimally Synthesizing Multilayer Radar Absorbing Material (RAM) Using Artificial Bee Colony Algorithm. *2018 XXIIIrd International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED)*, 237-241. doi:10.1109/DIPED.2018.8543261.

Turczyn, R., Krukiewicz, K., Katunin, A., Sroka, J., & Sul, P. (2020). Fabrication and application of electrically conducting composites for electromagnetic interference shielding of remotely piloted aircraft systems. *Composite Structures*, 232.

Weile, D., Michielssen, E., & Goldberg, D. E. (1996). Genetic algorithm design of Pareto optimal broadband microwave absorbers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 518-525. doi:10.1109/15.536085

Xiaojun, Z., Xiaoyu, C., Ronghai, Y., & D., S. G. (2020). Electromagnetic microwave absorption theory and recent achievements in microwave absorbers. *Carbon*, 606-623.

Y.Nie, H.H. He, Z.K. Feng, X.C. Zhang, & X.M. Cheng. (2006). Microwave characterization of (Co,Zn)2W barium hexagonal ferrite particles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, e423-e427. doi:doi.org/10.1016/j.jmmm.2006.01.059

Yigit, E., & Duysak, H. (2019). Determination of Optimal Layer Sequence and Thickness for Broadband Multilayer Absorber Design Using Double-Stage Artificial Bee Colony Algorithm. *IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES*, 67.

Yigit, E., & Duysak, H. (2021). Fully optimized multilayer radar absorber design using multi-objective abc algorithm. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 136-145.

Zhang, M., Cao, M.-S., Shu , J.-C., Cao, W.-Q., Li, L., & Yuan , J. (2021). Electromagnetic absorber converting radiation for multifunction. *Materials Science and Engineering: R: Reports*.

Zhang, Y., Huang, Y., Zhang, T., Chang, H., Xiao, P., Chen, H., . . . Chen, Y. (2015). Broadband and Tunable High-Performance Microwave Absorption of an Ultralight and Highly Compressible Graphene Foam. *Advanced Materials*, 2049-2053.