



**ELEKTRİK İLETKENLİĞİ VE ESNEKLİĞİ
ARTTIRILMIŞ POLİÜRETAN BOYA İLE
ELEKTROMANYETİK UYGULAMALAR**

Abdullah GÖZÜM

Danışman: Prof. Dr. Taner TEKİN

Yüksek Lisans Tezi

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

2025

(Her hakkı saklıdır)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**ELEKTRİK İLETKENLİĞİ VE ESNEKLİĞİ ARTTIRILMIŞ POLİÜRETAN BOYA
İLE ELEKTROMANYETİK UYGULAMALAR**

(Electromagnetic Applications of Polyurethane Coatings with Enhanced Electrical
Conductivity and Flexibility)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Abdullah GÖZÜM

Danışman: Prof. Dr. Taner TEKİN

Erzurum

Ekim, 2025

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Abdullah GÖZÜM tarafından hazırlanan “Elektrik İletkenliği ve Esnekliği Arttırılmış Poliüretan Boya ile Elektromanyetik Uygulamalar” başlıklı çalışması 15/09/2025 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Proses ve Reaktör Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Prof. Dr. Fatih DEMİR

Atatürk Üniversitesi

Aslı Islak İmzalıdır

Danışman: Prof. Dr. Taner TEKİN

Atatürk Üniversitesi

Aslı Islak İmzalıdır

Jüri Üyesi: Doç.Dr. Eda KELEŞ GÜNER

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi

Aslı Islak İmzalıdır

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Alper NUHOĞLU

Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Prof. Dr. Taner TEKİN danışmanlığında sunulan “Elektrik İletkenliği ve Esnekliği Arttırılmış Poliüretan Boya ile Elektromanyetik Uygulamalar” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	11	30
Kuramsal Temeller	14	30
Materyal ve Yöntem	14	35
Bulgular ve Tartışma	4	20
Tartışma	5	20
Tezin Geneli	4	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Abdullah GÖZÜM	Prof. Dr. Taner TEKİN
5.9.2025	5.9.2025
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren, akademik çalışma, azim ve kararlılığı veren, geniş hoşgörü ve yardımlarıyla tezimin gerek bilimsel gerekse biçimsel açıdan düzenlenmesinde katkıda bulunan saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Taner TEKİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım süresince yardım ve desteğini esirgemeyen, her zaman yanımda olan Sayın Doç. Dr. Hakan KIZILTAŞ'a, Sayın Doç. Dr. Oğuzhan AKGÖL'e, Sayın Yusuf Sezgin'e, Sayın Dr. Derya BİRHAN'na ve Sayın Ömer Ozan Kırın'a teşekkür ederim.

Eğitim ve öğrenim hayatım boyunca desteklerini hiç esirgemeyen, sonsuz özveri ve sabır gösteren aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Abdullah GÖZÜM

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK İLETKENLİĞİ VE ESNEKLİĞİ ARTTIRILMIŞ POLİÜRETAN BOYA İLE ELEKTROMANYETİK UYGULAMALAR

Abdullah GÖZÜM

Danışman: Prof. Dr. Taner TEKİN

Amaç: Gelişen teknoloji ile birlikte giyilebilir antenler, horn antenler, dalga kılavuzları, metamalzemeler (MTM) ve frekans seçici yüzeyler (FSS: Frequency Selective Surface) gibi birçok elektromanyetik uygulamada maliyet etkin, hafif ve işlevsel malzemelere olan ilgi ve bu malzemeler üzerine yapılan araştırmalar giderek artmaktadır. Bu ilgi elektromanyetik uygulamaların birçok alanında geçerli olup bu çalışmada uygulamalar sınırlı tutularak daha geniş bir çerçevede birçok elektromanyetik uygulama için kullanılabilecek bir yaklaşım da sunulmaktadır. Geleneksel üretim yöntemleri genel olarak elektromanyetik özelliklerin sağlanabilmesi açısından doğrudan metalik malzemelerin işlenmesiyle yapılmaktadır. Bu durum özellikle mekanik esnekliğin ve karmaşık geometrilerin bulunduğu yapılar için üretim zorluklarını ve maliyetleri arttırmaktadır. Bu çalışmada, özgün olarak geliştirilmiş poliüretan bazlı iletken boya kullanılmaktadır.

Yöntem: Çalışmada, 5 farklı elektromanyetik uygulama üzerine odaklanılmış olup diğer birçok elektromanyetik ürün önerilen yaklaşım ile üretilebilecektir. Odaklanılan uygulamalar sırasıyla; tekstil anten uygulaması (esnek alt taş uygulamaları için), 3-boyutlu yazıcı ile üretilebilen horn antenler ve dalga kılavuzları, tekstil alt taş üzerine uygulanan MTM ve FSS yapılarıdır.

Bulgular: Tüm uygulamalar için CST Microwave Studio ticari programı kullanılarak gerekli elektromanyetik simülasyonlar yapılmış ve önerilen boya kullanılarak elde edilen sonuçlar ile metalik yüzey kullanımıyla elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Tüm yapıların üretimi mümkün olmadığından dolayı sadece FSS yapılarının tekstil uygulamaları serigrafi yöntemi ile yapılmış olup, ölçümler ile yapılan simülasyonlar arasında benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ölçümler ve simülasyonlar yapılırken, geri dönüş kaybı, iletim ve yansıma davranışları, bant genişlikleri, rezonans frekansları gibi temel EM özellikler incelenmiştir. Önerilen yaklaşım ile yeni nesil elektromanyetik sistemlerin üretiminde maliyet etkin, kolay üretilebilir ve esnek yapılara sahip fonksiyonel çözüm sunulmaktadır.

Sonuç: Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, önerilen yaklaşımın (poliüretan bazlı iletken boya kullanımının) fonksiyonel elektromanyetik yapıların üretimini başarıyla sağladığını açıkça göstermektedir. Dalga kılavuzları ve antenler dahil olmak üzere çeşitli bileşenler üzerinde gerçekleştirilen karşılaştırmalı simülasyonlar ve ölçümler, boya kaplı 3 boyutlu yazdırılmış prototiplerin ve tekstil üzerine baskı yöntemiyle eklenen boyanın geleneksel metalik yapıların davranışına yakın elektromanyetik performans sergilediğini doğrulamaktadır. İletken kaplama, minimum bozulma ile dalga yayılımını ve radyasyonu desteklemek için yeterli yüzey iletkenliği sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Metamalzemeler, frekans seçici yüzeyler, horn antenler, dalga kılavuzu, iletken boyalar, poliüretan kaplamalar

Ekim 2025, 57 sayfa

ABSTRACT

MASTERS THESIS

ELECTROMAGNETIC APPLICATIONS WITH THE POLYURETHANE PAINT WITH INCREASED ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND FLEXIBILITY

Abdullah GÖZÜM

Supervisor: Prof. Dr. Taner TEKİN

Purpose: With the advancement of technology, interest in and research on cost-effective, lightweight, and functional materials for many electromagnetic applications, such as wearable antennas, horn antennas, waveguides, metamaterials (MTMs), and frequency-selective surfaces (FSSs), is increasing. This interest is prevalent in many areas of electromagnetic applications, and this study presents an approach that can be used for a broader range of electromagnetic applications, while limiting the scope of applications. Traditional manufacturing methods generally involve directly processing metallic materials to achieve electromagnetic properties. This increases production challenges and costs, particularly for structures requiring mechanical flexibility and complex geometries. In this study, a uniquely developed polyurethane-based conductive paint is used.

Method: The study focuses on five different electromagnetic applications, and many other electromagnetic products can be produced with the proposed approach. The applications focused on are textile antenna applications (for flexible substrate applications), horn antennas and waveguides that can be produced with 3D printers, and MTM and FSS structures applied to textile substrates, respectively.

Findings: For all applications, the necessary electromagnetic simulations were performed using the commercial program CST Microwave Studio, and results obtained using the proposed dye were compared with those obtained using a metallic surface. Because the fabrication of all structures was not feasible, only textile applications of FSS structures were made using screen printing, and similar results were obtained between the measurements and simulations. During the measurements and simulations, fundamental EM properties such as return loss, transmission and reflection behavior, bandwidths, and resonance frequencies were investigated. The proposed approach offers a cost-effective, easily fabricated, and functional solution with flexible structures for the production of next-generation electromagnetic systems.

Results: The results from this study clearly demonstrate that the proposed approach (using polyurethane-based conductive paint) successfully enables the fabrication of functional electromagnetic structures. Comparative simulations and measurements performed on various components, including waveguides and antennas, confirm that the paint-coated 3D-printed prototypes and the dye-printed textile-based coating exhibit electromagnetic performance comparable to that of traditional metallic structures. The conductive coating provides sufficient surface conductivity to support wave propagation and radiation with minimal distortion.

Keywords: Metamaterials, frequency selective surfaces, horn antennas, waveguides, conductive paints, polyurethane coatings.

October 2025, 57 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMA VE SİMGELER DİZİNİ	xi
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	4
Metamalzeme (MTM) Soğurucu Yapılar	4
Frekans Seçici Yüzeyler Yarıiletkenlerin özellikleri.....	4
Dalga Kılavuzunun 3B Üretimi ve Yüzeyin İletken Kaplanması.....	5
3B Yazıcı ile Horn Anten Tasarımı ve Yüzeylerinin Kaplama Tekniği.....	5
MATERYAL ve YÖNTEM	6
Saçılım Parametreleri.....	7
Elektromanyetik Karakterizasyon.....	8
Serbest Uzay (Free-Space) Ölçüm Yöntemi.....	10
Dalga Kılavuzu (Waveguide) Ölçüm Yöntemi	13
Dielektrik Prob Ölçüm Yöntemi.....	14
Koaksiyel Tube Ölçüm Yöntemi	15
İletkenlik ve elektriksel yüzey direncinin ölçümü	16
İletkenliği Arttırılmış Boya Üretimi	17
BULGULAR ve TARTIŞMA	20
PLA'nın Elektromanyetik Özelliklerinin Tespiti	20
Elektromanyetik Uygulamalar ve Tasarımlar	20
ANTENLER	21
Tekstil Yama Anten	21
Horn Anten	23
Dikdörtgen Dalga Kılavuzları.....	26
G-Bant Dalga Kılavuzu	28
X-Bant Dalga Kılavuzu	28
Ku-Bant Dalga Kılavuzu	30
Metamalzemeler (MTM)	32
Frekans Seçici Yüzeyler (FSS)	33

Bant Durduran (Band-Stop)	35
Bant Geçiren (Band-Pass).....	36
SONUÇLAR.....	38
KAYNAKÇA	39
ÖZGEÇMİŞ.....	44



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Çalışılan Elektromanyetik Uygulamalar	7
Tablo 2. Yaygın kullanılan EM karakterizasyon yöntemlerinin kıyaslaması.....	10
Tablo 3. İletkenlik ve yüzey direnci ölçüm yöntemleri	17
Tablo 4. İletken boyanın bileşenleri, fonksiyonları, etkileri ve oranları.....	19



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. İki portlu bir sistem için saçılım parametreleri	8
Şekil 2. Malzemelerin Elektrik ve Manyetik Geçirgenliği.....	9
Şekil 3. Serbest Uzay (Free-Space) Ölçüm Sistemi	11
Şekil 4. İterasyon yöntemi ile geçirgenlik değerlerini bulma akış şeması	12
Şekil 5. Dalga Kılavuzu Ölçüm Sistemi.....	13
Şekil 6. Dielektrik Prob Ölçüm Kurulumu.....	15
Şekil 7. Koaksiyel tüp yöntemi ile elektromanyetik karakterizasyon kurulumu	16
Şekil 8. İki (Sol) ve Dört Nokta (Sağ) problu ölçüm sistemleri.....	17
Şekil 9. PLA elektriksel geçirgenlik değerleri	20
Şekil 10. Mikroşerit Tekstil Yama Anten	22
Şekil 11. Yama anten için ön (a) ve arka (b) görünüm	22
Şekil 12. Bakır ve FR4 kullanıldığında elde edilen geri dönüşüm kaybı (S11) grafiği	22
Şekil 13. Alt taş için tekstil kullanılması durumunda elde edilen geri dönüşüm kaybı grafiği	23
Şekil 14. Üç farklı durum için oluşan geri dönüşüm kaybı grafikleri	23
Şekil 15. Piramit Horn Anten Yapısı.....	24
Şekil 16. Boya kaplamalı horn anten için ön (a), yan (b) ve arka (c) görünüm	25
Şekil 17. Boya kaplı 3B anten ile sadece PEC kullanımı durumlarının kıyaslanması (S11-Geri Dönüşüm Kaybı)	25
Şekil 18. Dikdörtgen dalga kılavuzu	27
Şekil 19. PEC ve 3B model üzeri boya kaplamalı G-bant dalga kılavuzunun iletim (transmission) davranışlarının kıyaslanması	28
Şekil 20. X-bant dalga kılavuzu simülasyon tasarımı	29
Şekil 21. X-bant dalga kılavuzu için 3B yüzey üzerine boya ile mükemmel iletken malzeme kıyaslaması (İletim – Transmission S12=S21).....	29
Şekil 22. Ku-bant dalga kılavuzu için 3B-yüzey üzerine boya ile mükemmel iletken malzeme kıyaslaması (İletim – Transmission S12=S21).....	30
Şekil 23. 3D Yazıcı ile üretilen dalga kılavuzu sistemleri	31
Şekil 24. X ve Ku bandında çalışacak şekilde üretilen dalga kılavuzu sistemleri	32
Şekil 25. Metamalzeme soğurucu yapısının önden (a) ve arkadan (b) görünümü	33
Şekil 26. Geniş bant MTM soğurucu yapısının yansıma grafiği.....	33
Şekil 27. Yaygın Frekans Seçici Yüzey (FSS) yapıları ve iletim grafikleri.....	34
Şekil 28. Bant durduran FSS yapısı için birim hücre şekli	35
Şekil 29. Bant durduran FSS yapısı için iletim ve yansıma grafikleri	35

Şekil 30. Bant geçiren FSS yapısına ait birim hücre tasarımı	36
Şekil 31. Bant geçiren FSS tasarımı için iletim ve yansıma grafiği.....	36
Şekil 32. Tasarlanan bant geçiren FSS yapısı için üretilen kalıp (a) ve Kumaş üzerine uygulanan bant geçiren FSS yapısı (b).....	37
Şekil 33. FSS üretim kılavuz hücreleri.....	37



KISALTMA VE SİMGELER DİZİNİ

dB	: desibel
c_0	: vakumda ışık hızı
f	: frekans
MHz	: megahertz
GHz	: gigahertz
$\vec{D}$	: elektrik akı yoğunluğu
$\vec{E}$	: elektrik alan vektörü
$\vec{H}$	: manyetik alan vektörü
$\vec{k}$	: dalga vektörü
S	: Poynting vektörü
$\vec{B}$	: manyetik akı yoğunluğu
S_{ij}	: i ve j sayılarına karşılık gelen kapılara ait S-parametresi
v	: dalga hızı
ω	: açısal frekans
ϵ_r	: dielektrik geçirgenlik
μ_r	: manyetik geçirgenlik
λ	: dalga boyu
Γ	: yansımaya katsayısı
T	: iletim katsayısı
A	: soğurma gücü
R	: toplam yansımaya katsayısı
μ	: mikro (10^{-6})
n	: kırılma indisi

GİRİŞ

Elektromanyetik uygulamalar kapsamında olan anten, metamateryal, frekans seçici yüzeyler, dalga kılavuzları gibi tasarım faaliyetlerinin üretim aşamasında özellikle iletkenliği sağlayabilmesi için metalik yüzeylere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu metalik yüzeylerin her alanda elde edilmesi mümkün değildir. Elektromanyetik uygulamaların farklılıklarına göre problem tanımı da değişmektedir. Tezimizde odaklandığımız hedef çalışmalar aşağıda listelenmiştir.

Tekstil antenler grubundaki odaklandığımız problem iletken yüzeylerin kumaş formunda oluşturulmasıdır. Tekstil anten üretiminde iletken ipliklerin dokuma yöntemi ile kumaşa işlenmesi en yaygın yöntemlerden biridir. Diğer bir yöntem ise, tasarımı yapılmış antenlerin tekstil yüzeyine yama yöntemiyle uygulanmasıdır. Bu iki yöntemin ortak problemleri; üretim zorlukları, hassasiyet, özellikle yüksek frekanslarda elektromanyetik tasarıma uygunluk, elastikiyet ve yüksek maliyet olarak listelenebilir. Elektromanyetik istekleri karşılayacak tekstil tabanlı bir tasarımın üretiminde göz önünde tutulması gereken birçok etken bulunmaktadır (Kim *et al.* 2016). İlk olarak kullanılan tekstil malzemenin dielektrik özellikleri bilinmeli ve tasarım aşamasında dikkate alınmalıdır. Bu özelliklerin nem, sıcaklık, mekanik gerilim gibi çevresel etkenlere ve frekansa bağlı olarak değişim gösterdiğini not etmek faydalı olacaktır. Bunlara ek olarak tasarımda esneklik (flexibility) ve deformasyon özellikleri de tasarım isteri olarak kullanılmalıdır (Kim *et al.* 2012).

Metamateryal ve frekans seçici yüzeyler (FSS) gibi periyodik rezonatörlerden oluşan yapıların uygulamalarında da temel problem kupon bazında üretim ve elektromanyetik ölçümleri yapılabilen başarılı tasarımların gerçek bir üründe kullanılamamasıdır. Bu yüzeylerin oluşturulmasında kullanılan en yaygın yöntem, PCB kazıma yöntemi ile periyodik yüzeylerin oluşturulmasıdır. Bu yöntem ile elde edilen üretimlerde iletkenliğin bakır yüzey ile sağlanması elektromanyetik ölçümlerde başarılı sonuçlar verse de kompleks geometrilere, kavisli yüzeylere uygulanması zor ve çevresel etkenlere dayanımı da çok düşüktür (Valipour *et al.* 2022).

Dalga kılavuzu ve horn anten uygulamalarında ise iletkenlik değerinin yüksek olduğu metal/metal alaşımları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yapıların üretiminde de bilinen imalat teknikleri uygulanırsa da kompleks ve hassas bir işçilik sonucu elde edilen maliyetli yapılardır. Maliyet faktörü nedeniyle de bu altyapılara olan ihtiyaç yüksek olsa da bu altyapılara sahip olan kişi/kurum sayısı da oldukça azdır. Çalışmamızda bulunan odak noktalarımızdan bir diğeri ise 3-Boyutlu yazıcılar kullanılarak üretilen anten (horn anten) ve dalga kılavuzlarının

yüzeylerini geliştirilecek olan boya ile kaplayıp, standart ürünler ile kıyaslamaktır (Kumar *et al.* 2016).

Elektromanyetik malzeme çalışmaları kapsamında iletken materyallerin kullanım alanı ve önemi oldukça fazladır. Bu tez çalışması kapsamında, yeterli iletkenliğin sağlandığı bir poliüretan boya ile tekstil anten, metamalzeme RF soğurucu yüzeyler, bant durduran ve bant geçiren frekans seçici yüzeylerin oluşturulması çalışılacaktır. Bu yapıların ortak noktası; en az iki katmandan oluşması ve katmanlardan bir tanesi dielektrik özellikte olması gerekirken bir diğer katmanın iletken olma gerekliliğidir (Tu *et al.* 2021). Tez konusu olan iletkenliği ve elastikiyeti arttırılmış poliüretan boya ile birden fazla elektromanyetik malzeme gereksiniminin sağlanabilmesi hedeflenmektedir.

Bu tez çalışmasında amaçlanan yansıtıcılığı arttırılmış elastik özelliği yüksek olan bir boya kullanarak dalga kılavuzları, tekstil anten, frekans seçici yüzeyler ve metamalzeme yapılarının uygulanması ve performanslarının kıyaslanmasıdır. Bu tez kapsamındaki bütün çalışmalar, konvensiyonel üretim yöntemlerine alternatif olabilecek ve birçok elektromanyetik uygulama alanında maliyet etkin bir çözüm sunabilecek nitelikte yüzeylerin oluşturulmasını hedeflemektedir. Kompozit yapılardan oluşan bu fonksiyonel yüzeylerin elektromanyetik gereksinimlerinin sağlanması yüzeyin iç katmanlarındaki havacılık kalifiye glass/quartz kumaşlar üzerine uygulanacak olan MTM/FSS desen (pattern) yapıları ile sağlanacaktır. Bu yaklaşım ile sensör çalışmaları, filtreleme fonksiyonları ve elektromanyetik işlevsellik özelliklerinin uyarlanması gibi birçok alanda yüksek performansa sahip bir ürün grubu oluşturulmuş olacaktır. Farklı teknikler ile yapılacak uygulamaların kıyaslanması ve optimizasyonu ile en uygun fizikokimyasal, çevresel ve elektromanyetik özellikleri sağlayacak parametreler ve uygulama prosesleri belirlenecektir. Malzeme özellikleri, üretim teknikleri ve pratik uygulamaların derinlemesine araştırılmasıyla, çalışmanın ön hazırlıkları tamamlanmış olup, simülasyon çalışmaları ile farklı elektromanyetik uygulama türleri denenmiştir.

Metamalzeme, frekans seçici yüzeyler ve tekstil anten uygulamaları başta savunma sanayi olmak üzere, tüketici elektroniği kapsamında da yoğun olarak kullanılan ve ihtiyaç duyulan uygulamalardır. Bu yapılar farklı amaçlarda kullanılsa da temel olarak RF sinyalleri üzerindeki etkilerine göre ayrışmaktadır.

Çalışmamızın ilk konusu olan tekstil antenler konusunda son yıllarda giderek artan bir ilgi oluşmuştur. Bunun sebepleri arasında giyilebilir cihazlara/teknolojiye olan ilgiyi gösterebiliriz. Bu tür uygulamalara örnek olarak akıllı saatleri, sağlık takip cihazlarını ve konum belirleyici tasarımlarını verebiliriz. Bu teknoloji tekstil üzerine hafif ve esnek antenlerin tasarlanmalarını ve entegre edilmelerini içermektedir. Hem sivil hem de askeri alanda kendine

kullanım yeri bulan bu tür yapılar kullanıcının konforunu ve hareket serbestliğini bozmadan istenen fonksiyonların elde edilmesini sağlamaktadır. En yaygın kullanımlardan biri de sağlık verilerinin izlenmesidir. Bilindiği üzere, bazı hastalıklarda hastaya doğru ve zamanında müdahale edilebilmesi için bazı kritik verilerin, fiziksel aktivitelerin sürekli takibi ve birçok test, analiz ve yorumlara ek olarak izlenecek tedavi yöntemlerinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, ağır ve genellikle mobil olmayan cihazlar yerine hastanın elbisesine entegre edilmiş antenler ile izleme işlemi kolaylıkla yapılabilmektedir (Özden *et al.* 2015).

Bu tür yapılara olan ihtiyacın giderek daha da artacağı öngörülmektedir. Özellikle nesnelerin interneti (IoT: Internet of Things) genişlemeye devam ettiği sürece tekstil ürünlerini de içeren gündelik nesnelerin üzerine antenlerin entegre edilebilmesi büyük kolaylık ve esneklik sağlayacaktır (Gulati *et al.* 2022).

Bu tür antenlerin en önemli özellikleri hafif ve esnek olabilmeleridir. Üretimleri yapılırken, iletken malzemelerin tekstil alt taş üzerine yerleştirilmesi/entegre edilmesi gerekmektedir. İstenen gereksinim ise bilinen bir dielektrik yüzey ve bakır kaplama ile yapılan anten eşdeğerine yakın bir performans elde edebilmektir. Burada kullanılan tekniklerden birisi iletken fiberler kullanarak tasarımı tekstil üzerine dikmektir. Genel itibariyle gümüş, bakır veya paslanmaz çelikten yapılmış iletken iplikler kumaş üzerine örülerek üretim yapılır. Örneğin Gharghan ve arkadaşları 2023 yılında yaptıkları çalışmada gümüş kaplı naylon iplikleri kullanarak giyilebilir uygulamalar için örülmüş anten tasarımı yapmıştır. Bir diğer teknik ise elektroplating tekniğidir. Bu teknikte elektrokimyasal bir işlem uygulanarak tekstil yüzey üzerine ince bir metal katmanı yerleştirme kullanılmaktadır. Buna ek olarak iletken parçacıkları bulunan bir solüsyon içine tekstil malzeme daldırılarak da kaplama yapılabilmektedir. Roh ve arkadaşları 2021 yılında elektrokaplama antenleri çalışmış ve antenin çalışma performansını belirleyen parametrelerde elektrokaplamanın belirgin bir gelişme sağladığını tespit etmişlerdir ‘One way’ ve ‘Two way’ olarak da sınıflandırılabilen bu anten yapılarının belirli frekanslara odaklanmış tasarımı ile tekstil üzerine uygulanması özellikle savunma sektöründe önemli bir ihtiyaç ve uygulama alanına sahiptir (Okoye and Hosseini 2024).

KURAMSAL TEMELLER

Metamalzeme (MTM) Soğurucu Yapılar

Metamalzemeler doğal malzemelerde bulunmayan sıra dışı özelliklere sahip yapay tasarlanmış malzemelerdir. Bu malzemelerin sunduğu en gözde özellik negatif kırılma indisidir. Bu değer doğrudan elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik katsayılarının eş zamanlı olarak negatif olmasını gerektirir. Bu tür bir yaklaşım hakkındaki ilk fikir ünlü Rus fizikçi Victor Veselago'ya aittir. Veselago negatif kırılma indisinin olması durumunu incelemiş ve 1967 yılında yayımlamıştır. Çalışmasında, sıradan malzemeler ile negatif kırılma indisine sahip malzemelerin elektromanyetik dalgaları manipüle etme özelliklerini kıyaslamış ve sol el malzemeler olarak bilinen metamalzemelerin elektromanyetik dalgaları zıt yönde yönlendireceğini göstermiştir. Veselago'nun bu çalışması 1990'lı yılların sonlarına kadar test edilmemiştir (Zhou *et al.* 2012). İlgili yıllarda oluşan mikro üretim ve malzeme bilimindeki gelişmeler ile birlikte dalga boyundan küçük rezonatörlerin üretimi üzerine çalışmalar başlamıştır. Bu konudaki ilk deneysel gösterim David R. Smith ve arkadaşları tarafından 2000 yılında gerçekleştirilmiştir. Tasarımları ayırık halka rezonatörlerden (Split Ring Resonators – SRR) oluşmakta olup hem elektriksel hem de manyetik geçirgenlik katsayıları eş zamanlı negatif yapılmış böylelikle negatif kırılma indisine sahip malzemeler üretilmiştir. Bu sayede Veselago'nun teorisi doğrulanmıştır. Metamalzemelerin birçok uygulaması yoğun bir şekilde çalışılmakta olup bunların en yaygın olanı RF soğurucu yapılarıdır. Belirli bir frekansa göre tasarlanmış MTM hücre yapıları, iletken bir katman ile dielektrik bir yüzeyde tekrar eden hücre yapıları ile yan yana yerleştirildiğinde RF sinyallerini soğurucu nitelikte bir davranış sergiler (Barreda *et al.* 2022).

Frekans Seçici Yüzeyler Yarıiletkenlerin özellikleri

FSS yapıları da metamalzeme yapılarının bir alt başlığıdır. Dielektrik ve iletken katmandan oluşan bu yapıların farklı amaca göre türleri mevcuttur. Bu çalışma kapsamında bant durduran ve bant geçiren olmak üzere iki farklı FSS hücre tasarımı üzerinde çalışma yürütülecektir. Bu yapılar, MTM yapılarında olduğu gibi belirli bir yüzeyde tekrar ettirildiğinde bant geçiren ve bant durduran olarak RF sinyallerine etki etmektedir. İletken katman olarak kullanılacak olan boyanın hücre tasarımında kullanılması ile bant durduran özellikte bir yapı oluşturulabilirken tasarımı oluşturan alanın dielektrik malzeme ile sağlanması, yüzeyin de iletken katman ile oluşturulması ile de bant geçiren özellikte bir yüzey elde edilmektedir (Qureshi *et al.* 2021).

Yukarıda tanımlanan ve elektromanyetik çalışmalarda güncel faaliyetlerin yoğun olduğu bu alandaki uygulamaların temel problemi; ürün odaklı uygulamalarda kompleks yüzeylere uyarlanması yaşanan zorluklardır. Esnekliğin artırıldığı bir boyaya ile düz olmayan yüzeylere de doğru maskeleme veya baskı yöntemleri ile boyanın uyarlanması daha kolay olacaktır. Bu geometrilere örnek olarak uçaklardaki burun radomu gibi kavisli ve daha kompleks geometriler örneklendirilebilir. Elektromanyetik gereksinimlerin sağlanabilmesi için iletkenliğin de yüksek olması bu tez konusunda çalışılacak bir diğer hedef çalışmadır (Bhati and Malik 2023).

Dalga Kılavuzunun 3B Üretimi ve Yüzeyin İletken Kaplanması

Elektromanyetik dalgaları bir noktadan diğerine kılavuzlu bir biçimde herhangi bir kayıp olmadan aktarımını sağlayan yapılardır. Radar sistemleri, uydu haberleşmesi ve mikrodalga mühendisliği gibi birçok alanda uygulanan dalga kılavuzları çeşitli türlerde yapılabilmektedir. Elektromanyetik enerjiyi etkili bir biçimde, çoğunlukla minimum kayıp ile aktarmak ve özellikle koaksiyel kablolar gibi iletim hatlarının verimsiz olduğu yüksek frekans ile çalışan sistemlerde kullanılmak üzere tasarlanmaktadır. Dalga kılavuzları dikdörtgen, dairesel ve esnek yapılabilmektedir. İçi boş boru şeklinde yapılan bu yapıların özellikle iç boyutları kesim frekansını belirlemektedir (Ejaz *et al.* 2023).

Dalga kılavuzları belirli frekans bantlarında çalışacak şekilde üretilirler ve bu bantlara karşılık gelen dalga boyuna uygun olarak boyutlandırılırlar. Dalga kılavuzları üretilirken genel itibariyle metal blokların işlenmesi şeklinde yapılır. Çok hassas işleme (machining) ile istenen dalga kılavuzu şekillerini üretmek mümkündür. Ancak, bu tür bir yaklaşımın bazı dezavantajları bulunmaktadır. Yüksek maliyet bu yaklaşımdaki en büyük dezavantaj olarak bilinmektedir. Özellikle yüksek frekanslarda yüksek hassasiyet ile üretilmesi gerektiğinden yüksek maliyetli üretim yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle, ilgili yaklaşım özellikle maliyet ve malzeme kaybına sebep olmaktadır (Çelenk *et al.* 2022).

3B Yazıcı ile Horn Anten Tasarımı ve Yüzeylerinin Kaplama Tekniği

Dalga kılavuzlarında olduğu gibi, PLA filament kullanarak 3 boyutlu yazıcı ile horn anten tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan antenin başlangıç frekansı $f=3$ GHz olarak ayarlanmıştır ve simülasyon 20 GHz'e kadar gerçekleştirilmiştir. İç yüzey kaplaması için yine daldırma yöntemi kullanılmış olup hem PLA alt taş üzerine kaplamalı hem de mükemmel iletken (PEC) durumları için simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve kıyaslamalar yapılmıştır (Shakhirul *et al.* 2016).

MATERYAL ve YÖNTEM

Elektromanyetik uygulamaların büyük bir çoğunluğu dielektrik ve iletken katmanların birlikte kullanıldığı yapıları içermektedir. Sadece metalik yapıların bulunduğu uygulamalar da ilgili mühendislik alanının yüksek bir parçasını oluşturmaktadır. Tasarlanan boyanın elektromanyetik anlamda etkinliğini incelemek ve mevcut yapılara alternatif oluşturmasını değerlendirmek amacıyla, aşağıda listelenmiş olan elektromanyetik uygulamalar göz önüne alınmıştır. Geliştirilen boyanın eklenmesi ile oluşturulan yapının geleneksel yöntemlerle üretilen yapılar ile kıyaslaması detaylandırılmıştır.

Çalışmamızın temelini oluşturan iletkenliği ve esnekliği arttırılmış fonksiyonel boya formülasyonu ile bu elektromanyetik uygulamalar çalışılmıştır.

Boya formülasyon çalışmaları aşağıdaki aşamalar ile gerçekleştirilmiştir:

- Öncelikli olarak ihtiyacımız olan iletkenliği ve elastikiyeti arttırılmış boya formülasyonu için hammadde çalışmaları yapılacaktır. Fonksiyonel özelliklerin en önemlisi olan yüzey iletkenliğine karşılık gelen en yüksek direnç değeri 0,3 ohm/kare olarak belirlenmiştir.
- Kimyasal özelliklerin güçlendirilmesi
 - Reçine uyumu
 - İletken hammaddelerin denenmesi
 - Elastikiyetin sağlanması
 - Serigrafi yöntemine uygun fizikokimyasal özelliklerin dizaynı
 - Kalıpların temizlenebilir olması için gerekli formülasyon revizyonları
- NCO:OH hesabının uygulama yöntemine göre tasarımı

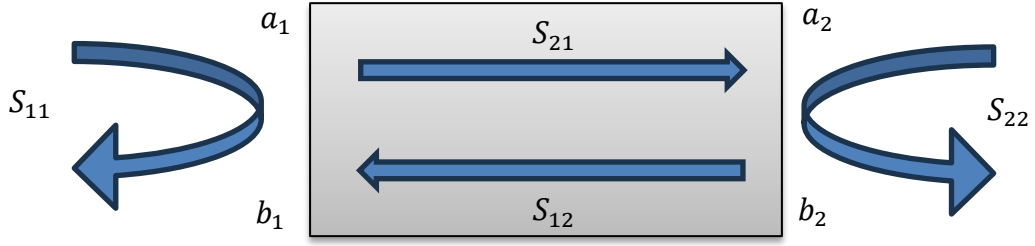
Tablo 1’de kuruma ve kürlenme sürelerinin optimizasyonu da sağlanarak istenilen elektromanyetik performansı sağlayacak kaplama boya geliştirilmiştir. Üretilen kaplama boya ile planlanan elektromanyetik uygulamalar genel olarak beş başlık altında incelenebilir (Yan *et al.* 2016).

Tablo 1. Çalışılan Elektromanyetik Uygulamalar

Uygulamalar	Frekans Kapsamı	İletken yüzeyin özellikleri	Malzeme Bilgisi
Tekstil Anten (yama anten)	S Bant (2-4 GHz)	Elektriksel yüzey direnci en yüksek 0.3 ohm/kare olmalı	Tekstil Malzeme (Glass / Quartz)
3B Horn Anten	3-20 GHz	Elektriksel yüzey direnci en yüksek 0.3 ohm/kare olmalı	3B Horn Anten (Filament)
3B Dalga Kılavuzları	G, X, Ku Bantları	Elektriksel yüzey direnci en yüksek 0.3 ohm/kare olmalı	3B Dalga Kılavuzları (Filament)
MTM Yapılar	Soğurucu X Bant (8-12 GHz)	Elektriksel yüzey direnci en yüksek 0.3 ohm/kare olmalı	Tekstil Malzeme (Glass / Quartz)
FSS Bant Geçiren / Bant Durduran	X Bant (8-12 GHz)	Elektriksel yüzey direnci en yüksek 0.3 ohm/kare olmalı	Tekstil Malzeme (Glass / Quartz)

Saçılım Parametreleri

S-parametreleri olarak da bilinen saçılım parametreleri RF ve mikrodalga bileşenlerine ek olarak herhangi bir malzemenin elektromanyetik davranışını belirlemek için kullanılan temel kavramlardır. S-parametreleri yansıyan (reflected) ve iletilen (transmitted) sinyallerin analizine imkan sağlarlar (Cui *et al.* 2009). Elektromanyetik alanına giren tüm uygulamalarda anahtar rol üstlenir ve dalga kılavuzlarından antenlere kadar tüm EM bileşenler için karakteristik davranış analizi parametreleri olarak yaygın kullanılırlar. Kolaylık olması açısından iki portlu bir sistem için bu parametrelerin nasıl olduğu incelenirse, dört tane farklı saçılım parametresi olduğu gözlenecektir. Farklı bileşenlerden oluşan bir devre veya yapı iki-portlu ağlar kullanılarak temsil edilebilir (Şekil-1). Şekilde görüldüğü üzere a_1 ve a_2 gelen dalgaları (incidence waves) temsil ederken, b_1 ve b_2 ise yansıyan (reflected wave) dalgaları temsil etmektedir (Yan *et al.* 2016).



Şekil 1. İki portlu bir sistem için saçılım parametreleri

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

Burada, S_{11} ve S_{22} sırasıyla birinci ve ikinci porttan yansıyan (reflection) sinyalleri (geri dönüşüm kaybı olarak da bilinirler) temsil etmektedir. Öte yandan S_{12} ve S_{21} parametreleri ise iki port arasında iletilen (transmission) sinyallere karşılık gelmektedirler. Bu eşitlikten kolaylıkla saçılım parametreleri bulunabilmektedir. Bu parametreler genellikle desibel olarak (dB) ifade edilmektedir (He and Jiang 2015).

$$|S_{ij}|_{dB} = 20 \log_{10} |S_{ij}|$$

S parametreleri frekans bağımlı olup karmaşık sayılardan oluşmaktadır. Bir başka deyişle, bu parametreler frekansa bağlı olarak hem genlik hem de faz bileşenlerini taşımaktadırlar. Ek olarak bu parametreler resiprokaldır. Bu nedenle, 1 ve 2 numaralı portlara sahip bir sistem için iletim (transmission) davranışı her iki yönde de aynıdır ($S_{12}=S_{21}$).

Elektromanyetik Karakterizasyon

Günümüzde, malzemelerin elektromanyetik karakterizasyonu sadece iletişim ve savunma sistemleri için değil, aynı zamanda medikal görüntüleme, enerji depolama, sensör teknolojileri gibi birçok alanda kritik bir rol oynamaktadır. Örneğin, MRI cihazlarında kullanılan malzemelerin manyetik geçirgenliklerinin ve iletkenliklerinin bilinmesi, görüntüleme kalitesini doğrudan etkiler. Bu nedenle, elektromanyetik karakterizasyon modern bilim ve teknolojinin hemen her alanında vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir (Bait-Suwailam *et al.* 2019).

Elektromanyetik karakterizasyon çalışmalarında, bir malzemenin elektriksel ve manyetik özelliklerini tespit edilmesi hedeflenmektedir. Bu özelliklerin başında elektriksel geçirgenlik (permittivity- ϵ) ve manyetik geçirgenlik (permeability- μ) gelir. Bu iki parametre, malzemelerin elektromanyetik dalgalarla nasıl etkileşime girdiğini tanımlar ve bu etkileşimler

kullanılarak ilgili malzemenin bilgisayar ortamında simülasyonu yapılabilmektedir. Böylece, ilgili malzemenin elektromanyetik alanlar karşısındaki davranışı analiz edilebilmektedir (Ghosh *et al.* 2015).

Dielektrik sabiti veya elektriksel geçirgenlik olarak da bilinen ϵ kompleks bir parametre olup gerçel (real) ve sanal (imaginary) bileşenlerden oluşmaktadır. Aşağıdaki eşitliklerde alt indis olarak kullanılan “r” harfi “relative” kelimesinden gelmekte olup bağıl geçirgenlik olarak temsil edilmektedir.

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$$

$$\mu_r = \mu_r' - j\mu_r''$$

Reel olan bileşen depolanan enerjiye karşılık gelirken sanal bileşen kayıpları temsil etmektedir. Bu durum manyetik geçirgenlik katsayısı için de geçerlidir. Bu durumu daha açık gösteren aşağıdaki şekil incelendiğinde, elektriksel geçirgenlik, harici bir elektrik alan varlığında malzemenin bu alan ile etkileşimi olarak düşünülebilir. Benzer şekilde, harici bir manyetik alanın bulunmasına karşı malzemenin etkileşimi de manyetik geçirgenlik olarak karşımıza çıkmaktadır (Aksimsek *et al.* 2018). Daha açık bir şekilde göstermek gerekirse, bu parametreler, ölçülmek istenen bir malzemenin elektrik ve manyetik alan etkisi altında depolama kabiliyetlerini ve elektromanyetik kayıplarını ifade eden parametrelerdir (Şekil 2).



Şekil 2. Malzemelerin Elektrik ve Manyetik Geçirgenliği

Malzemelerin farklı frekans aralıklarındaki kompleks elektrik geçirgenliğini (ϵ) ve manyetik geçirgenliğini (μ) elde etmek için çeşitli standart teknikler kullanılır [39, 40]. Bunlara serbest uzay yöntemleri, dielektrik prob teknikleri, dalga kılavuzu, rezonans boşluğu yöntemleri ve koaksiyel tüp yaklaşımları dahildir. Bu yöntemlerin her biri belirli avantajlar ve sınırlamalara sahiptir. Uygun bir yöntemin seçimi, malzeme türü (katı, sıvı veya toz), frekans bandı, gereken doğruluk ve numune hazırlama kısıtlamaları gibi parametrelere bağlıdır. Aşağıdaki tablo, bu tekniklerin karşılaştırmalı bir özetini sunarak birincil uygulama alanlarını, avantajlarını ve dezavantajlarını vurgulamaktadır (Wang *et al.* 2015).

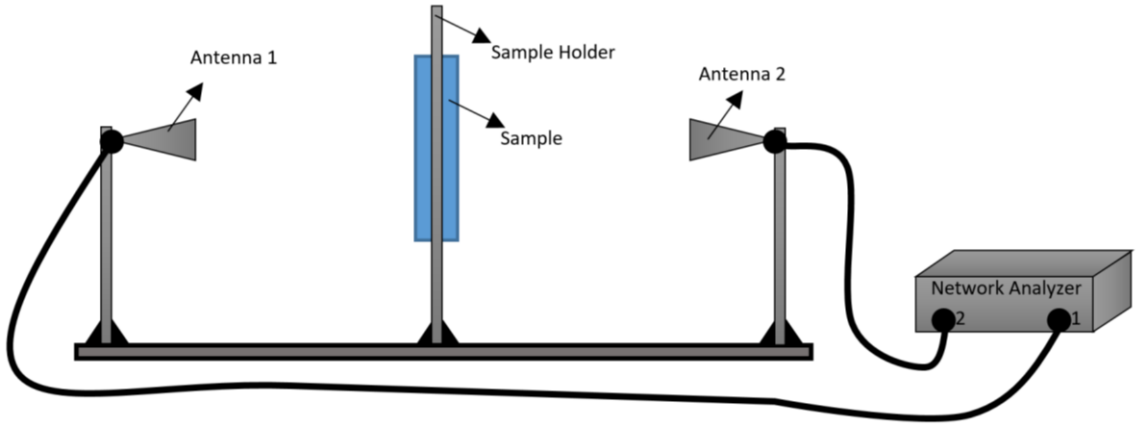
Tablo 2. Yaygın kullanılan EM karakterizasyon yöntemlerinin kıyaslaması

Yöntem	Frekans Aralığı	Uygulamalar	Avantajlar	Sınırlamalar
Serbest Uzak	~2 GHz - >100 GHz	Geniş, düz yüzeyli malzemeler, Radar soğurucu malzemeler (RAM), Tekstiller, Kaplamalar	Temassız ve değişik sıcaklıklarda ölçüm alınabilir. Geniş bantlı olup, esnek malzemeler için de kolaylıkla kullanılabilir.	Büyük numuneler gerektirir, hizalama kritiktir (anten yayılım yönünden dolayı), EM kirliliğe duyarlıdır.
Dielektrik Prob	~200 MHz - 50 GHz	Sıvı, yarı-sıvı ve biyolojik dokular için kullanılabilir.	Kolay kurulum, geniş bant ve minimum numune hazırlığı	Az kayıplı malzemeler için uygunsuzluk, kenar etkileri, katılarda sınırlı doğruluk
Dalga Kılavuzu	~2.6 GHz - 40 GHz	Katı Malzemeler (Köpük, Kompozitler de dahil) için kullanılabilir.	Yaygın kullanımdan dolayı genel kabul görmektedir. Yüksek doğruluk ve dış etkenlerden minimum etkileşim sağlamaktadır.	Numune tam olarak hazneye sığmalıdır. Farklı frekans bantları için farklı boyutlarda setler gerektirir. Dar bantlıdır.
Koaksiyel Tüp	~1 MHz - 20 GHz	Katı, toz, sıvılar için kullanılabilir.	Kayıplı malzemeler için iyidir. Küçük numune gerektirir. Geniş bantlı ölçüm yapabilmektedir.	Numune üretimi diğerlerine kıyasla daha zordur ve hassasiyet gerektirir. Özellikle yüksek frekanslarda kalibrasyon ve temas sorunları oluşabilmektedir.

Serbest Uzak (Free-Space) Ölçüm Yöntemi

Malzemelerin elektromanyetik karakterizasyonunu yaparken kullanılan en yaygın yöntemlerin başında serbest uzak ölçüm sistemi gelmektedir. Bu yöntemin kullanılarak malzemelerin dielektrik özelliklerini bulmaya yönelik literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Özellikle Ghodgaonkar ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalar elektrik ve manyetik geçirgenliği bulmak için serbest uzak ölçüm sistemi kullanımı konusundaki öncü sayılabilecek çalışmalardandır. Kompleks dielektrik sabitinin, kayıp tanjantın bulunmasında ve özellikle manyetik malzemelerin EM karakterizasyonunda yaptıkları çalışmalar mikrodalga frekansları için çalışmamızda referans olarak kullanılmıştır (Thummaluru *et al.* 2018).

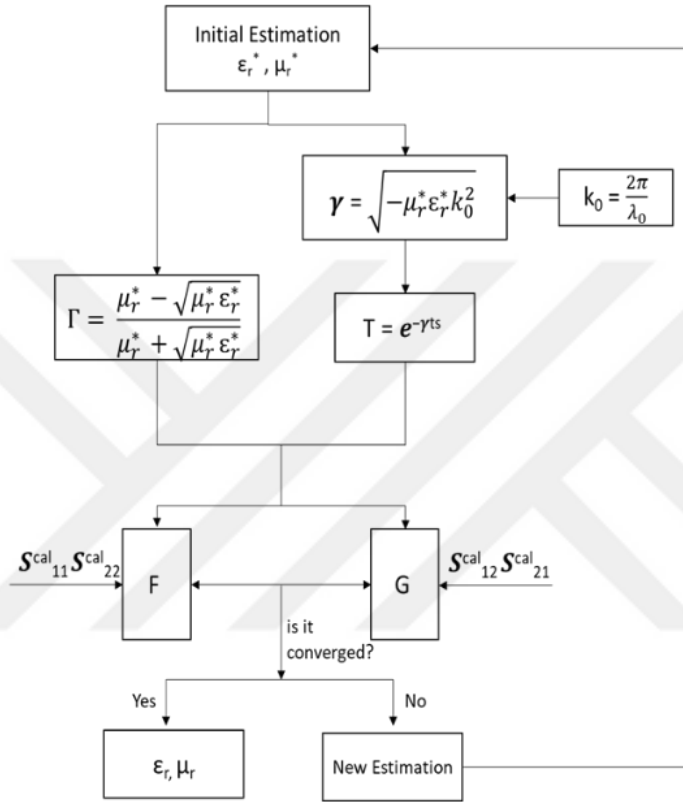
Bu ölçüm düzeneği, bir vektör ağ analizörü (VNA), iki doğrusal polarize ve geniş bantlı horn anten ve ayrıca test altındaki numuneyi sabit tutmak için numune tutucu içerir. İki anten arasındaki mesafenin ortasına yerleştirilen numunenin geri dönüş kaybı parametreleri (S11) ölçülür ve malzemenin dielektrik katsayılarını hesaplamak için kullanılır. Ayrıntılı ölçüm kurulumu aşağıdaki şekilde (Şekil 3) görülebilir. Şekilde görülen kurulumla ek olarak bazı düzeneklerde EM sinyallerinin odaklanmasını sağlamak ve daha küçük numunelerin ölçümüne imkan sağlamak amacıyla dielektrik lensler kullanılmaktadır. Bu lensler numune ile antenler arasına yerleştirilir ve antenlerden yayılan elektromanyetik dalgaların odaklanmasını sağlamaktadırlar (Chaharmir *et al.* 2015).



Şekil 3. Serbest Uzay (Free-Space) Ölçüm Sistemi

İfade edilen ölçüm yöntemlerinden herhangi biri ile istenilen frekans bant aralığında saçılım parametrelerinin ölçümü ilk olarak yapılmaktadır. Bu ölçüm sistemlerinin ortak özelliklerinden birisi de bir ağ analizörünün kullanılması olup, ölçüm öncesi mutlaka kalibrasyonunun uygun bir şekilde yapılması gerekmektedir. Bu işlem yapılırken bilinen bir malzemenin geçirgenlik özellikleri referans olarak kullanılmaktadır. Yönteme bağlı olarak bu malzeme bazen plastik bir yapı olurken, metal, hava ve saf suyun kullanıldığı kalibrasyon yöntemleri de mevcuttur (Yu *et al.* 2023). Ölçülen saçılma parametrelerinden malzemelerin karmaşık elektriksel geçirgenliğini (ϵ) ve manyetik geçirgenliğini (μ) belirlemek için birkaç hesaplama tekniği geliştirilmiştir. Bunlar arasında Nicholson-Ross-Weir (NRW) yöntemi, özellikle dalga kılavuzu ve koaksiyel tüp tekniklerinde etkili olan basit analitik formülasyonu nedeniyle en yaygın kullanılanlardan biridir. Ancak, NRW yöntemi rezonans frekansları yakınında veya düşük kayıplı örneklerde faz belirsizliği ve sayısal kararsızlıktan etkilenebilir. Alternatif olarak, bir malzemenin frekansa bağlı dielektrik davranışının modellenmesi gerektiğinde, Debye ve Lorentz dispersiyon modelleri de kullanılmaktadır. Gelişen bilgisayar teknolojisi ile daha önce mümkün olmayan iterasyon yöntemleri de bu alanda kullanılmaya başlanmış ve kompleks geçirgenlik katsayılarının tespitinde özellikle başlangıç değerlerinin

tahmini değerleri kullanılarak çok başarılı sonuçlar alınmıştır (Singh *et al.* 2021). İterasyon kullanan yaklaşımlar, hata fonksiyonlarını en aza indirerek teorik yansıma/iletim modellerinin deneysel verilere sayısal olarak uydurulmasına olanak tanır ve böylece ϵ ve μ değerlerinin daha doğru bir şekilde çıkarılmasını sağlar. Bu çalışmada, uygulanan iterasyon tabanlı yönteminin akış şeması, parametre tahmini için kullanılan adım adım hesaplama sürecini göstermek için aşağıdaki şekilde sunulmuştur (Şekil 4).



ϵ_r : Relative Permittivity μ_r : Relative Permeability

k_0 : Wavenumber in Air γ_0 : Propagation Constant in Free Space

γ : Propagation Constant in Specimen

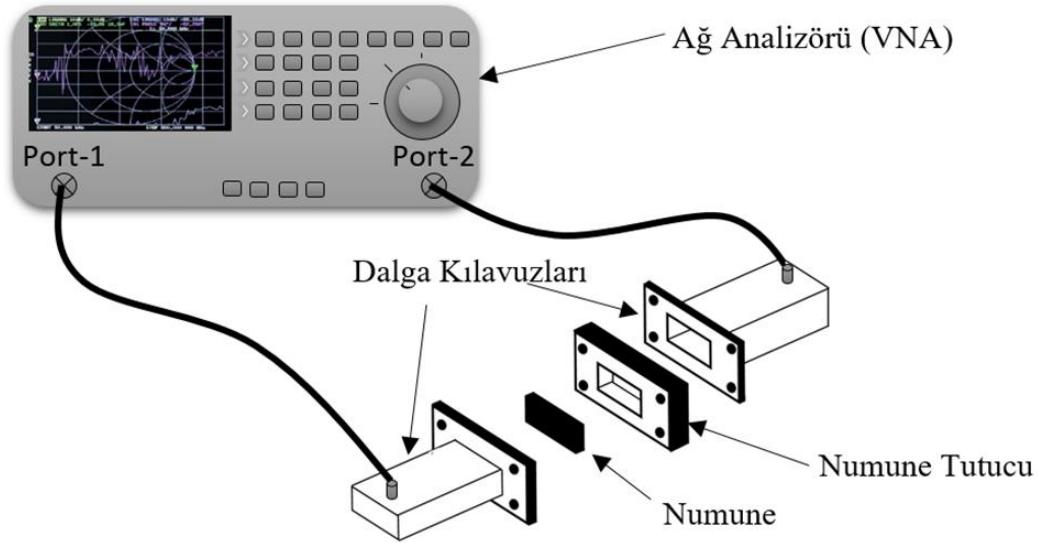
Γ : Reflection Coefficient at Air/Specimen Interface

Şekil 4. İterasyon yöntemi ile geçirgenlik değerlerini bulma akış şeması

Şekilde gösterilen akış diyagramında ϵ_r' ve μ_r' sırasıyla bağıl elektriksel geçirgenliğini ve bağıl manyetik geçirgenliğini vermektedir. k_0 boşluktaki dalga sayısını verirken γ yayılım sabitini temsil etmektedir. Ek olarak yansıma katsayısı gamma (Γ) ile gösterilmiştir. Bu yaklaşımda malzemenin geçirgenlik değerlerinin tahmini değerleri başlangıç olarak girilmek zorundadır. Bu değerler kullanılarak, sürekli hata fonksiyonu minimize edilmekte ve iterasyon sayısına bağlı olarak daha hassas değerler elde edilebilmektedir (Wei *et al.* 2020).

Dalga Kılavuzu (Waveguide) Ölçüm Yöntemi

İstenen malzemelerin elektromanyetik karakterizasyonu için, elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik değerleri hesaplanmalıdır. Bu parametreler, S-Parametreleri olarak da bilinen saçılma parametrelerinden doğrudan hesaplanabilir. Saçılma parametreleri, serbest uzay ölçüm yöntemi, dalga kılavuzu yöntemi, koaksiyel tüp, oyuk (cavity) ölçüm yöntemi vb. dahil olmak üzere çeşitli yöntemler kullanılarak elde edilebilmektedir. Dalga kılavuzu ölçüm sistemi, iki dalga kılavuzuna bağlı bir vektör ağ analizörü (VNA) ve bir numune tutucudan oluşur. Numune, Şekil 5'de gösterildiği gibi iki dalga kılavuzu arasına sıkıştırılmış numune tutucunun içine yerleştirilir (Costa *et al.* 2014). Bilindiği gibi, sistem ölçüme başlamadan önce kalibre edilmelidir. Bu amaçla, tam yansımayı ve tam iletimi normalleştirmek için özel bir kalibrasyon kiti kullanılır. VNA, her iki yönde hem yansıma hem de iletim için saçılma parametreleri sağlar. Numunelerin elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik parametreleri, başlangıçta tanınmış bilim adamları Nicholson, Ross ve Weir tarafından geliştirilen Nicolson Ross Weir (NRW) yöntemi kullanılarak hesaplanabilir (Wei *et al.* 2020).



Şekil 5. Dalga Kılavuzu Ölçüm Sistemi

Numunelerin kompleks elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik parametreleri, ölçülen saçılma parametreleri kullanılarak aşağıdaki formüller aracılığıyla NRW yöntemi kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$\mu_r^* = \frac{2\pi}{\Lambda\sqrt{k_0^2 - k_c^2}} \left(\frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \right)$$

$$\epsilon_r^* = \frac{1}{\mu_r^* k_0^2} \left(\frac{4\pi^2}{\Lambda^2} + k_c^2 \right)$$

Bu denklemlerde, denklemi basitleştirmek için üç parametre kullanılmaktadır. Bu parametreler, yansıma (reflection) ve iletim (transmission) için saçılma parametrelerine doğrudan bağlıdır (Yu *et al.* 2020).

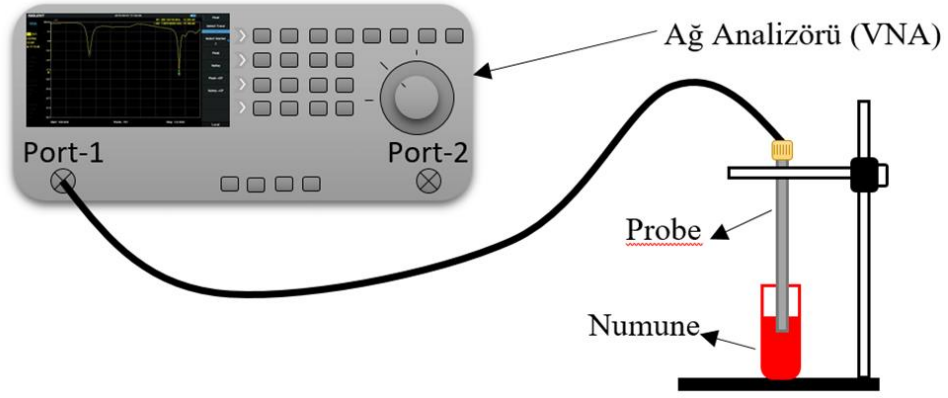
$$\Gamma = X \pm \sqrt{X^2 - 1}, = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}}$$

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} \text{ ve } \frac{1}{\Lambda^2} = - \left[\frac{1}{2\pi L} \ln(T) \right]^2$$

Dielektrik Prob Ölçüm Yöntemi

Dielektrik prob ile elektromanyetik karakterizasyon yöntemi özellikle sıvı, yarı-sıvı ve biyolojik malzemelerin ölçümünde yoğun kullanılmaya başlanan bir yaklaşımdır. Bu yaklaşımın en önemli avantajlarından biri de geniş bantta kompleks geçirgenlik değerlerini verebilmesidir. Bu yöntemde, ölçülmek istenen malzemeyle temas halinde açık uçlu bir koaksiyel prob kullanılır. Bu prob yansıma katsayılarını (S_{11}) kaydetmek için bir vektör ağ analizörüne (VNA) bağlanır. Tek prob kullanıldığı için sadece geri dönüşüm kaybının elde edildiği not edilmelidir. Bu ölçümlerden, kalibrasyon ve matematiksel modelleme yoluyla dielektrik özellikler çıkarılır. Tahribatsız yapısı, geniş frekans bandı ve basit numune hazırlama gereksinimleri nedeniyle, bu yöntem hızlı ve yaygın kullanılan bir yaklaşım olarak literatürde kabul görmektedir (Mahmood and Denidni 2016).

Aşağıda verilen şekil 6’da tipik bir dielektrik prob ölçüm kurulumunu göstermektedir. Bir dielektrik prob, ucunu tipik olarak küçük bir kap veya beherde tutulan bir sıvı numuneye daldırmak için dikey olarak konumlandırılır. Prob, bir vektör ağ analizörüne (VNA) bir koaksiyel kablo aracılığıyla bağlanır. VNA, tanımlanmış bir frekans bandı üzerinde S_{11} parametresini ölçer ve elde edilen veriler, uygun kalibrasyon ve önceki bölümlerde bahsedilen algoritmalar aracılığıyla malzemenin dielektrik özelliklerini çıkarmak için kullanılır. Bu kurulum, özellikle mikrodalga frekans aralığında (tipik olarak 200 MHz ila 50 GHz) homojen ve izotropik olan sıvı, yarı sıvı ve biyolojik numuneleri karakterize etmek için idealdir (İbili *et al.* 2018).

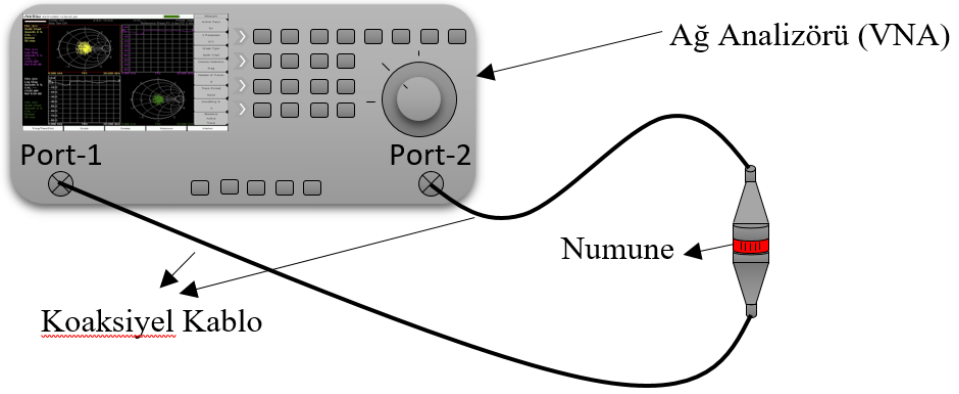


Şekil 6. Dielektrik Prob Ölçüm Kurulumu

Burada unutulmaması gereken nokta VNA'nın sadece bir portunun ölçüm için yeterli olduğudur. Ek olarak, kalibrasyon aşamasında probun açık devre, kısa devre ve saf su içine daldırıldığında elde edilen geri dönüşüm kaybı değerleri kullanılmaktadır. Her ölçüm öncesi saf su tekrar ölçülür ve elektriksel geçirgenlik değerinin yaklaşık 80 olduğu kontrol edilir (Artamonovs *et al.* 2014).

Koaksiyel Boru (Coaxial Tube) Ölçüm Yöntemi

Elektromanyetik karakterizasyon yöntemlerinden bir diğeri de son yıllarda daha çok kullanılmaya başlayan ve geniş bir frekans bandında ölçüm yapabilen koaksiyel boru (coaxial tube) ölçüm yöntemidir. Malzeme numunesinin iki tane mikrodalga adaptör ile koaksiyel tüp şeklinde oluşturulmuş boşluğa yerleştirilmesi ile kullanılır. Numunenin yerleştirilmesinden sonra saçılım parametreleri bulunur ve buna ek olarak bilinen dönüşüm yöntemleri ile kompleks geçirgenlik değerleri elde edilir. Bu yöntemde, koaksiyel kablolar bir vektör ağ analizörüne (VNA) bağlanmıştır. Sistemin kalibrasyonu yapılırken portlar açık bırakılarak ilk adım sağlanır. Bu durum tam geri dönüşüm sağladığı için S11 parametresinin sıfırlanmasında kullanılır. Her iki port birbirine bağlanarak tam iletim de sağlanarak S21=S12 parametrelerinin sıfırlanması (normalizasyonu) sağlanır ve kalibrasyon tamamlanmış olur (Echeverria-Altuna *et al.* 2022). Bu yöntem, kayıplı malzemeler için iyi derecede doğruluk sunar ve özellikle mikrodalga frekansları için uygundur. Sistemin genel hatları aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. Koaksiyel tüp yöntemi ile elektromanyetik karakterizasyon kurulumu

Şekilden görüldüğü üzere, bir vektör ağ analizörü (VNA), Port-1 ve Port-2 üzerinden koaksiyel kablolar kullanılarak koaksiyel bir numune tutucunun her iki ucuna bağlanır. Ölçülecek malzeme (numune), koaksiyel borunun merkez kısmına yerleştirilir. Yansıma ve iletim katsayılarını (S-parametreleri) ölçerek, numunenin dielektrik ve/veya manyetik özellikleri geniş bir frekans aralığında çıkarılabilir. Ara geçişler için genel olarak mikrodalga adaptörler kullanılır ve bu yapının kullanıldığı düşük frekanslarda geniş koaksiyel boşluklar kullanılarak yapısal malzemelerin de EM özellikleri çıkarılabilmektedir (Alizadeh *et al.* 2014).

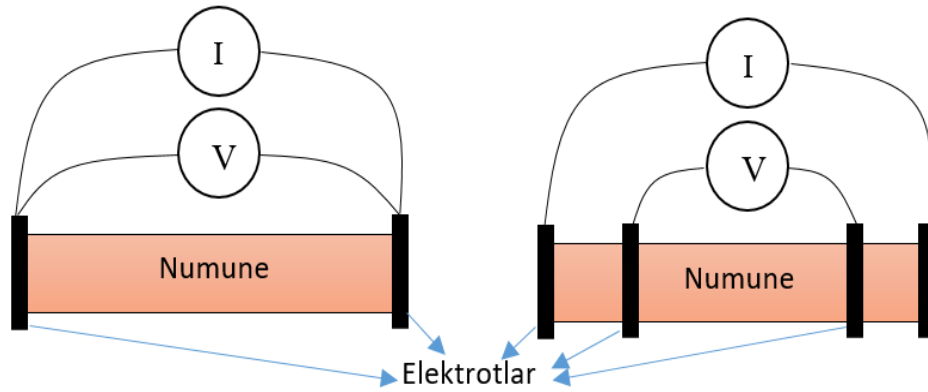
İletkenlik ve elektriksel yüzey direncinin ölçümü

Çalışmada sunulan ve istenen elektromanyetik özellikleri sağlayacak şekilde tasarlanan iletken boyanın elektriksel iletkenliğinin ve yüzey direncinin doğru bir şekilde ölçülmesi, antenler, soğurucu maddeler ve koruyucu kaplamalar gibi elektromanyetik uygulamalarda uygunluklarını değerlendirmek için esastır. Ek olarak uygulanan boyanın yüzey direnci (R_s), kaplanmış bir katmanın yüzeyi boyunca akım taşıma yeteneğini karakterize ederken, hacim iletkenliği malzemenin büyük kısmı boyunca akım iletimi ile ilişkili olarak bulunmaktadır. Uygulama olarak üretilen boyanın ince bir katman şeklinde uygulanması nedeniyle, bu katman üzerinden ölçümlerin alınması esastır (Tak *et al.* 2016). Mühendislik uygulamalarında bilinen en yaygın yöntemler aşağıdaki tabloda listelenmiştir (Tablo 3). Bu yöntemler arasında iki nokta probu (Two-point probe), Dört nokta probu (four-point probe), Temassız Eddy Akımları ve Van der Pauw Yöntemi sayılabilir.

Tablo 3. İletkenlik ve yüzey direnci ölçüm yöntemleri

Yöntem	Çalışma Prensibi	Avantajları	Dezavantajları
İki Nokta Probu (Two-Point Probe)	İki temas noktası boyunca direnç ölçümü	Basit, maliyet etkin, çoklu ölçümler için ideal	Temas direnci kaynaklı hatalar, temas hassasiyeti hataları
Dört Nokta Probu (Four-Point Probe)	İç problemler arasındaki gerilim düşümünün ölçümü	Temas hassasiyeti hataları giderilmiştir, ince filmler için uygundur	Düzgün yüzeyler gerektirir, eğik ve kompleks yüzeylere uygun değildir
Temasız Eddy Akımları	Elektromanyetik indüksiyon kullanılır	Hasarsız, hızlı ve kaplamalar için uygulanabilir	Karmaşık bir kalibrasyona sahiptir ve iletken substratlar ile kullanılabilir
Van der Pauw Yöntemi	İki veya daha fazla temas noktasında bulunan akım/gerilim ölçümü	Karmaşık şekiller ve küçük numuneler için doğru sonuçlar sağlar	Kurulumu kompleksdir ve temas noktasına bağlı yüksek hassasiyete sahiptir

Bu uygulamaların hem en basit hem de çok yaygın olarak kullanılanları iki ve dört problu yöntemlerdir (Şekil 8). İki problu yöntemde, numunede iki elektrot kullanılırken dört problu yöntemde iki iç elektrotun elektrik akımını geçirmesine ve iki dış elektrotun bu noktalar arasındaki voltajı algılamasına olanak tanıyan bir yapı kullanılır.

**Şekil 8.** İki (Sol) ve Dört Nokta (Sağ) problu ölçüm sistemleri

İletkenliği Arttırılmış Boya Üretimi

İletken poliüretan esaslı kaplamanın geliştirilmesi, nihai formülasyonun hem elektriksel iletkenliğini hem de mekanik esnekliğini optimize etmeyi amaçlayan çeşitli sistematik aşamalarda gerçekleştirilmiştir. Birincil işlevsel gereklilik, yüksek frekanslı elektromanyetik uygulamalar için maksimum 0,3 Ω/sq 'lik bir tabaka direncine ulaşmaktır. Bu değer özellikle yüksek frekanslarda tam yansımayı (full reflection) sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Tabaka direnci ve kabuk derinliği dikkate alınarak, çalışmaya dahil edilen tüm uygulamalar için kalınlık 30 mikron olacak şekilde optimize edilmiştir (Li *et al.* 2018).

İlk olarak, poliüretan matrisle uyumlu iletken ve elastomerik katkıları belirlemek ve seçmek için hammadde taraması yapılmıştır. Bu aşamada aşağıdaki kritik özellikler göz önüne alınmıştır:

- Seçilen reçineler ve iletken dolgu maddeleri arasında kimyasal uyumluluğun sağlanması,
- Çeşitli iletken katkı maddelerinin (örneğin metal tozları, karbon bazlı malzemeler) test edilmesi,
- Kavisli veya esnek yüzeylerde mekanik bütünlüğü korumak için istenen elastikiyet seviyesine ulaşılması,

Ayrıca, optimum kürlenme kinetiği ve kaplama kıvamı elde etmek için NCO:OH oranı hesaplanmış ve hedeflenen uygulamaya göre ayarlanmıştır. Son formülasyon, homojen film oluşumu, iyi yapışma ve istenen elektromanyetik performansı sağlamak için kurutma ve kürlenme süreleri optimize edilerek hassas bir şekilde ayarlanmıştır (Shrivastava *et al.* 2023).

Sunulan çalışmada kullanılan iletken boya, poliüretan bazlı bir bağlayıcı sistem üzerine formüle edilmiştir. Bağlayıcı olarak kullanılan poliüretan, yüksek elastikiyet ve çoklu yüzey uyumluluğu sağlayarak kaplamanın metal, kompozit ve polimer yüzeyler gibi çeşitli yüzeylerde çatlamaya karşı direnç göstermesini sağlar. İletkenlik sağlamak için faz olarak alüminyum ve bakır bazlı metalik pigmentler kullanılmış ve bu pigmentlerin homojen dağılımını sağlamak için non-iyonik ajanlar kullanılmıştır. Ayrıca, kaplamanın uygulama reolojisini kontrol etmek için poliüretanla uyumlu reoloji ajanları (modifiye poliüre, bentonit türevleri) eklenmiştir. Bu şekilde tortulaşma, yüzeyde akış ve düzensiz kalınlık oluşumu önlenmiştir (SRPSKE *et al.* 2009). İletken boyanın geliştirilmesinde kullanılan bileşenler, oranları ve işlevleriyle birlikte aşağıdaki tabloda (Tablo 4) yer almaktadır.

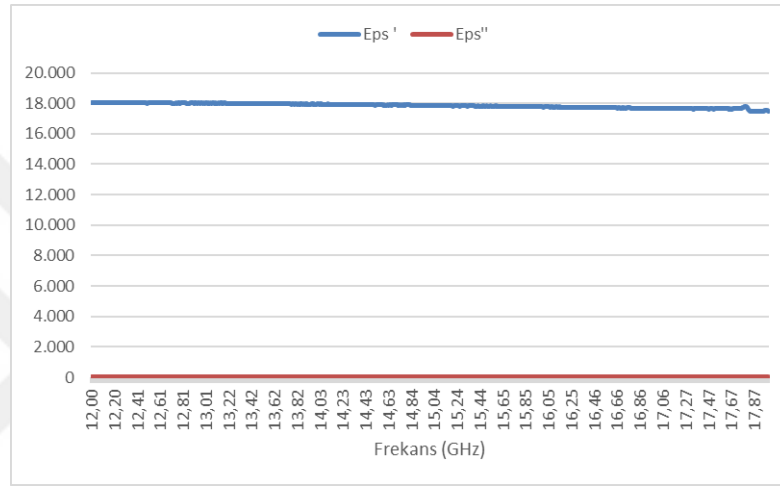
Tablo 4. İletken boyanın bileşenleri, fonksiyonları, etkileri ve oranları

Bileşen	Fonksiyon	Etki	Katkı Oranı (%)
Poliüretan Reçine	Bağlayıcı, esneklik ve yapışma	Esneklik, çatlamaya karşı direnç, çoklu yüzey uyumluluğu	30-40
Metalik Pigmentler	Elektriksel iletkenlik	Elektromanyetik dalgaların emilimi ve yansıması	40-55
Ajanlar	Pigmentlerin homojen dağılımı	Sürekli iletken yapı, performans kararlılığı	0,5-2
Reoloji Düzenleyiciler	Akış ve uygulama reolojisi kontrolü	Çökelme ve akışı önler, homojen film oluşumu sağlar	1-3
Katkı Maddeleri	Film bütünlüğü ve çevresel direnç	Uzun ömürlü ve kararlı kaplama	2-5

BULGULAR ve TARTIŞMA

PLA'nın Elektromanyetik Özelliklerinin Tespiti

Elektromanyetik uygulamalara geçmeden önce, substrat olarak kullanılacak olan PLA malzemesinin elektromanyetik karakteristiğinin çıkarılması gerekmektedir. Bu amaçla, önceki bölümlerde anlatılan dalga kılavuzu yöntemi kullanılmış olup, aşağıdaki elektriksel geçirgenlik (electrical permittivity) değerleri elde edilmiştir. Bu değer ile PLA'nın elektrik alan karşısında nasıl davranacağı simüle edilebilmektedir. Sonuçlar aşağıdaki grafikte frekansa bağlı olarak verilmiştir.



Şekil 9. PLA elektriksel geçirgenlik değerleri

Şekil 9'dan görüldüğü üzere elektriksel geçirgenlik değerinin gerçel (Real) kısmı yaklaşık olarak 18 değerinde sabit kalmaktadır. Yapılan ölçüm Ku bandında gerçekleştirilmiş olup 12-18 GHz aralığını kapsamaktadır. Öte yandan sanal kısım (imaginary) sıfıra çok yakın bir değer almakta ve bu durum kaybın az olduğunu ifade etmektedir (Tamyis *et al.* 2002).

Elektromanyetik Uygulamalar ve Tasarımlar

Bu kısımda yapılan uygulamalar 4 ana başlık altında incelenecektir.

1. Anten

- Tekstil Yama Anten
- 3B Horn Anten

2. MTM - Tekstil MTM absorban

3. Tekstil FSS

- Bant geçiren
- Bant durduran

4. Dalga Kılavuzu

- G-bant dalga kılavuzu
- X-bant dalga kılavuzu
- Ku-bant dalga kılavuzu

Çalışmada sunulan ve istenen elektromanyetik özellikleri sağlayacak şekilde tasarlanan iletken boyanın elektriksel iletkenliğinin ve yüzey direncinin doğru bir şekilde ölçülmesi, sunulan uygulamalar için büyük önem arz etmektedir.

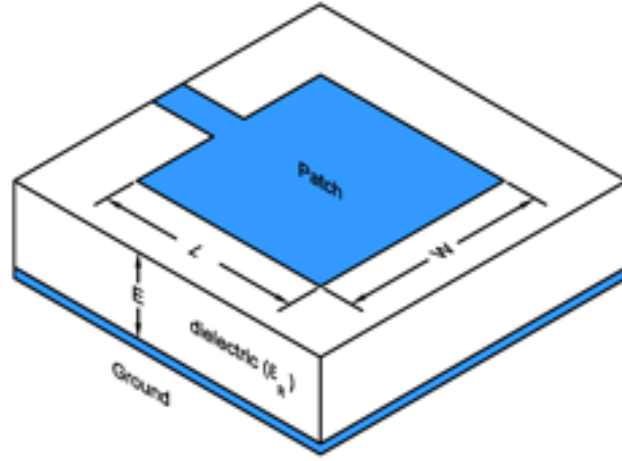
ANTENLER

Tekstil Yama Anten

Çalışmada, dikdörtgen yama anten tasarlanmış olup çalışma frekansına bağlı olarak yama boyutlarını bulmak için aşağıdaki formüller kullanılmıştır.

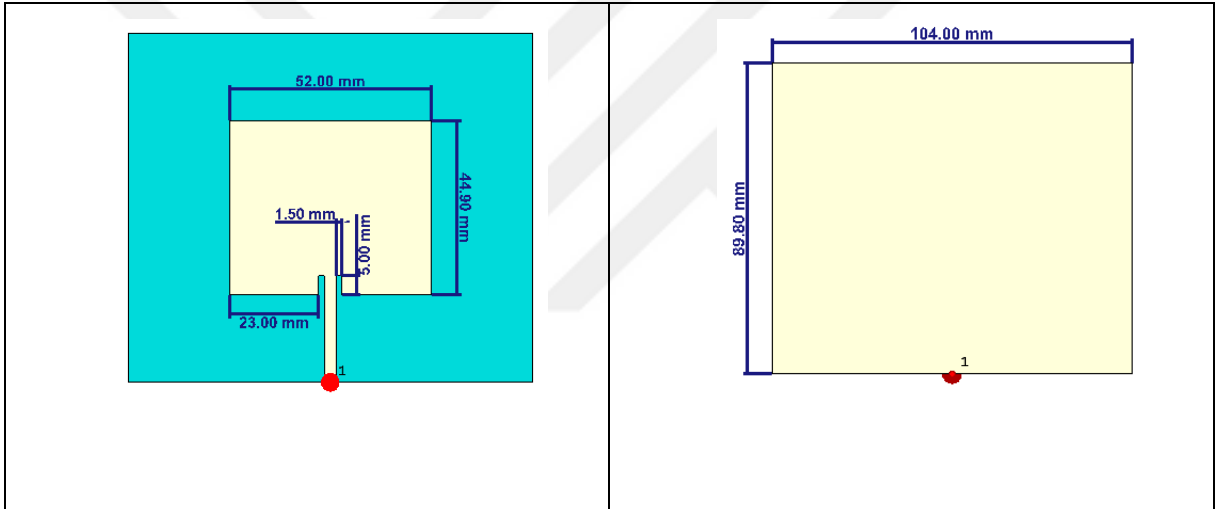
$$Width = \frac{c}{2f_0\sqrt{\frac{\epsilon_R+1}{2}}}; \quad \epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_R+1}{2} + \frac{\epsilon_R-1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1+12\left(\frac{h}{W}\right)}} \right]$$
$$Length = \frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_{eff}}} - 0.824h \left(\frac{(\epsilon_{eff}+0.3)\left(\frac{W}{h}+0.264\right)}{(\epsilon_{eff}-0.258)\left(\frac{W}{h}+0.8\right)} \right)$$

Burada c ışık hızı, h dielektrik alt taşın kalınlığı, W yama antenin genişliği, L yamanın uzunluğu, f_0 çalışma frekansı, ϵ_{psr} ise dielektrik malzemenin dielektrik sabitidir. Çalışma frekansını 2,5 GHz olarak alınca, L ve W değerleri sırasıyla 29,58 mm ve 37,92 mm bulunmuştur. Dielektrik al taşın kalınlığı h ise yaygın kullanılan plakalara uygun şekilde $h=1,6$ mm seçilmiştir (Hossain and Hossain 2020).



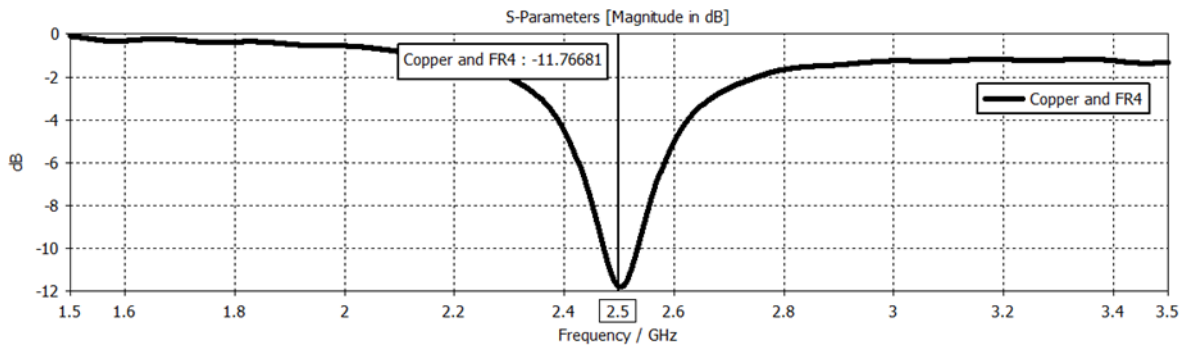
Şekil 10. Mikroşerit Tekstil Yama Anten

Simüle edilen yama antenin elektromanyetik simülasyon programındaki görüntüsü aşağıdaki şekilde boyutları ile verilmiştir.



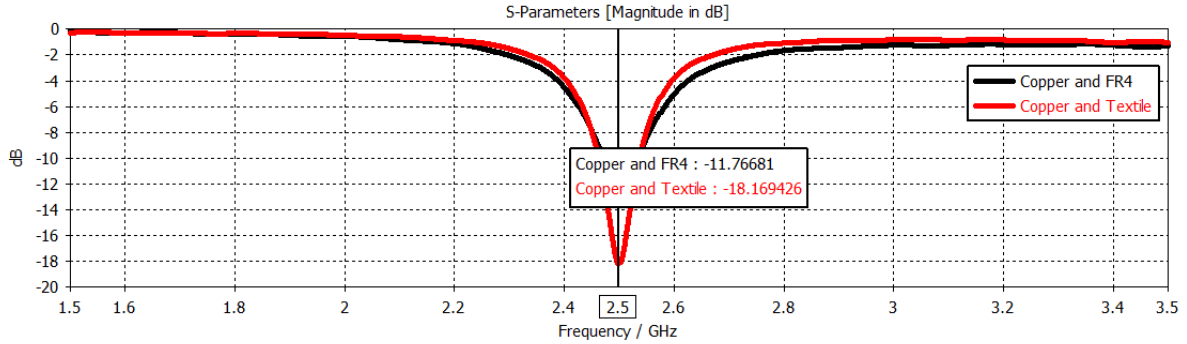
Şekil 11. Yama anten için ön (a) ve arka (b) görünüm

Alt taş olarak FR-4 ve iletken kısımlar için bakır kullanıldığında, yukarıda elde edilen W ve H değerleri optimize edilerek aşağıdaki geri dönüşüm davranışı elde edilmiştir. FR-4'ün dielektrik katsayısının yaklaşık olarak 4,7 olduğunu göz önünde bulundurursak, ilgili kalınlıkta hesaplanan değerler ile 2,5 GHz'e çok yakın bir rezonans elde edilmiştir.



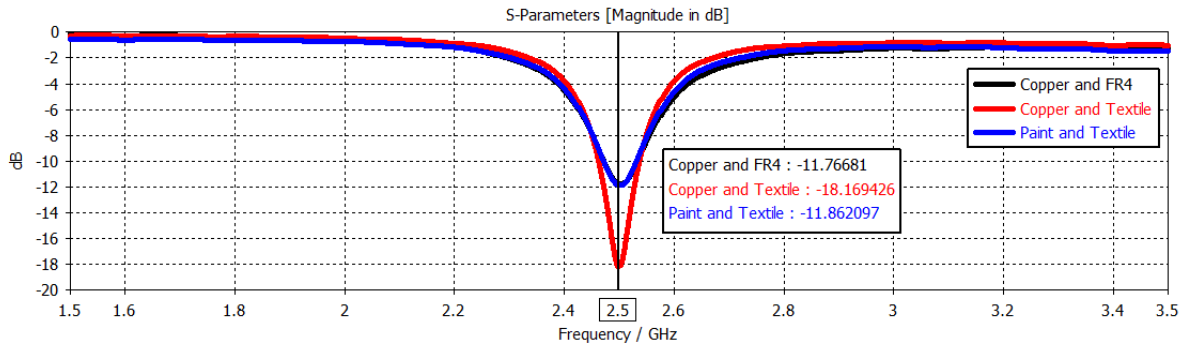
Şekil 12. Bakır ve FR4 kullanıldığında elde edilen geri dönüşüm kaybı (S11) grafiği

Alt taş olarak FR4 yerine tekstil malzemesi kullanıldığı zaman, verilen eşitliklerden de anlaşılacağı üzere yamanın boyutları yükselmiştir. Ancak geri dönüşüm kaybı belirgin bir şekilde azalmış ve anten performansı iyileşmiştir.



Şekil 13. Alt taş için tekstil kullanılması durumunda elde edilen geri dönüşüm kaybı grafiği

Daha düşük dielektrik katsayısına sahip bir alt taş kullanımı daha iyi bir genlik değişimi sağlarken, çalışma bandını küçük bir oranda azaltmıştır. Bu durumdaki boyutlar ise formülden $W=52,59$ mm ve $L=46,20$ mm bulunmuş ancak çalışma frekansını $f=2,5$ GHz'e çekmek için $W=52$ mm ve $L=44,9$ mm olarak optimize edilmiştir. Boyutları değiştirmeden, bakır yerine üretilen boyanın kullanımı durumunda oluşan geri dönüşüm kaybı grafiği aşağıda verilmiştir.



Şekil 14. Üç farklı durum için oluşan geri dönüşüm kaybı grafikleri

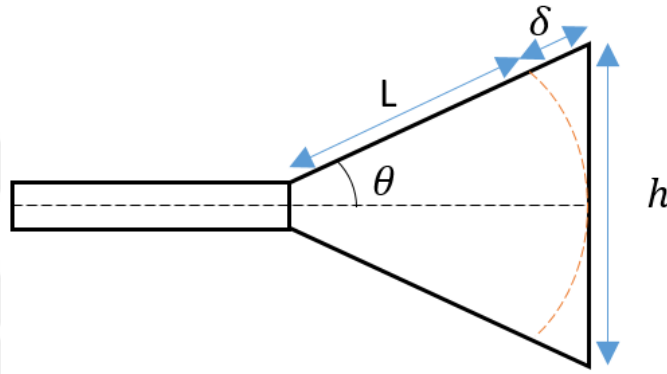
Horn Anten

Horn antenler, yüksek kazançları, yönlü elektromanyetik yayılım örüntüleri ve nispeten basit yapıları nedeniyle mikrodalga ve milimetre dalga uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. Geleneksel olarak metal veya döküm kullanılarak üretilen horn antenler, genellikle maliyetli, ağır ve esnek olmayan yapıya sahiptirler.

Özellikle 3B baskı olmak üzere eklemeli üretim teknolojilerinin ilerlemesiyle, PLA veya ABS gibi düşük maliyetli dielektrik malzemeler kullanılarak horn anten gövdeleri üretmek mümkün hale gelmiştir. Ancak, bu malzemeler doğası gereği iletken değildir ve yüksek frekanslarda etkili bir şekilde işlev görmek için yüzey metalizasyonu gerektirir. Bu çalışmada, 3B yazdırılmış horn antenlerin iç yüzeylerini kaplamak için özel olarak geliştirilmiş iletken

poliüretan bazlı bir boyanın kullanılması hedeflenmektedir. Bu yaklaşım, konvensiyonel yöntemlerle üretilen antenlere oranla kabul edilebilir elektromanyetik performansı korurken hafif, uygun maliyetli ve özelleştirilebilir anten yapılarının gerçekleştirilmesini sağlar. Önerilen boya, baskı sonrası uygulanarak, metal gövdenin sağladığı tam yansımayı sağlayacak şekilde yapı optimize edilmiştir. Bu aşamada yüzey pürüzlülüğünün önemi büyüktür. Bu nedenle, yüzey kaplaması yapılırken yüzeyin deri kalınlığı (skin effect) ve yüzey pürüzlülüğü en uygun seviyeye getirilecek şekilde uygulama yapılmıştır.

Tasarım için piramit horn anten seçilmiştir. Bu yapı çok yaygın kullanılan bir tür olup hem mühendislik hem de akademik çalışmalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.



Şekil 15. Piramit Horn Anten Yapısı

Şekil 15’de verilen geometri kullanılarak, kesim frekansı ile anten boyutları arasındaki bağlantı aşağıdaki adımlar izlenerek bulunabilir. Öncelikle θ açısı ile kenar uzunlukları arasındaki bağlantı bulunmak istenirse basit trigonometrik eşitlikler kullanılabilir.

$$\cos\theta = \frac{L}{L + \delta}$$

$$\tan\theta = \frac{h/2}{L} = \frac{h}{2L}$$

Yukarıda elde edilen eşitliklerin yardımı ile istenen açığı aşağıdaki gibi elde edebiliriz.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{h}{2L}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{L}{L + \delta}\right)$$

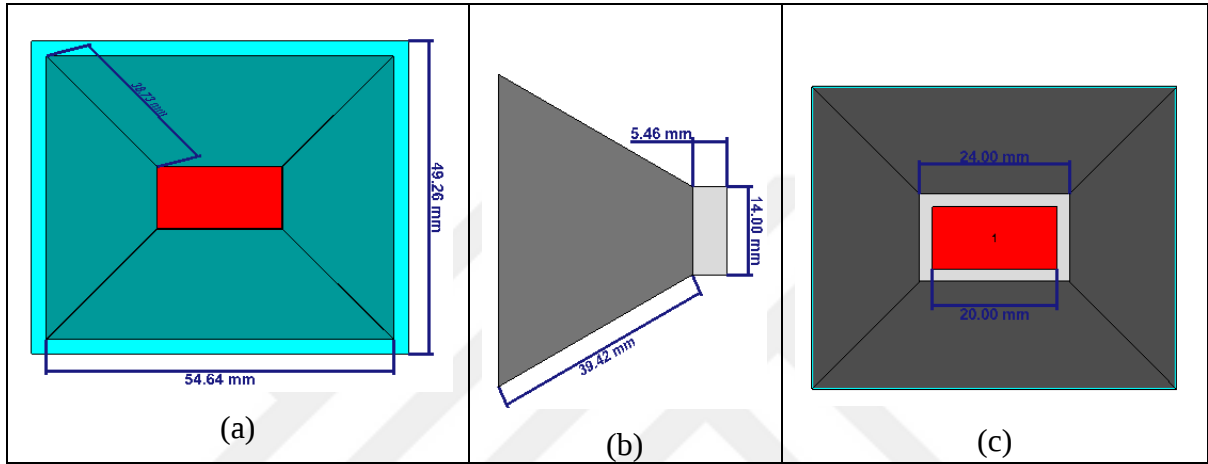
Buradan, $(L + \delta)^2 = L^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2$ eşitliği bulunabilir. Daha sade bir şekilde yazmak gerekirse aşağıdaki eşitlik bulunabilir.

$$L^2 + 2L\delta + \delta^2 = L^2 + \frac{h^2}{4}$$

δ çok küçük olduğundan dolayı, bu uzunluğun karesi ihmal edilebilir. Bu nedenle, L uzunluğunun h ve δ 'ya bağlı değeri aşağıdaki formül ile hesaplanabilir.

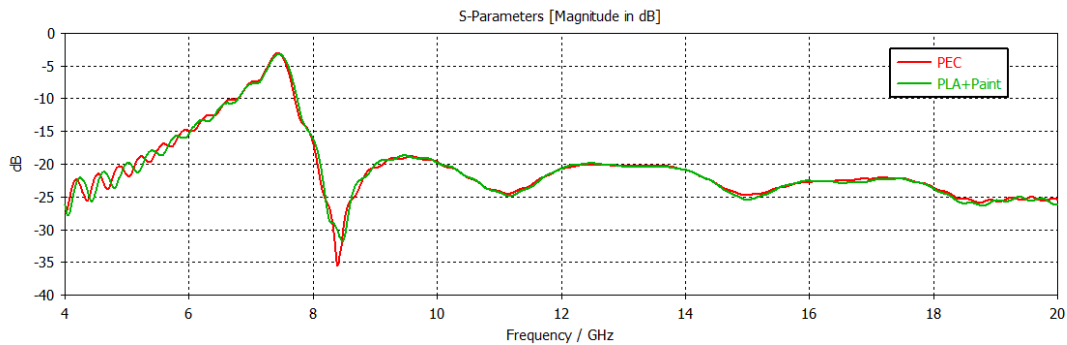
$$L = \frac{h^2}{8\delta}$$

Bulunan eşitlikler kullanarak f=8 GHz başlangıç frekansından başlayıp 20 GHz ve üst frekanslarda çalışabilen bir anten tasarımı yapılmıştır. Bu hesaplama sonucunda oluşan boyutlar CST Microwave Studio elektromanyetik simülasyon programında çizilmiş ve çözümleme yapılarak değerler optimize edilmiştir (Nicolson *et al.* 2007).



Şekil 16. Boya kaplamalı horn anten için ön (a), yan (b) ve arka (c) görünüm

Anten alt tabanı hem metal hem de PLA olacak şekilde iki türlü denenmiştir. PLA alt katmanı kullanılan durumda iç katman üretilen metalik boya ile kaplanmış ve anten performansı mükemmel iletken durumu ile kıyaslanmıştır. Anten performansını değerlendirmek amacıyla, geri dönüşüm kaybı (S11) incelenmiş ve ilgili grafik aşağıdaki şekilde verilmiştir (Şekil 17).



Şekil 17. Boya kaplı 3B anten ile sadece PEC kullanımı durumlarının kıyaslanması (S11-Geri Dönüşüm Kaybı)

Şekilden görüldüğü üzere, anten performansı birbirine çok yakın olup, avantajları göz önüne alındığında önerilen modelin kullanılması önemli kazanımlar sağlayacaktır (Weir 2005).

Dikdörtgen Dalga Kılavuzları

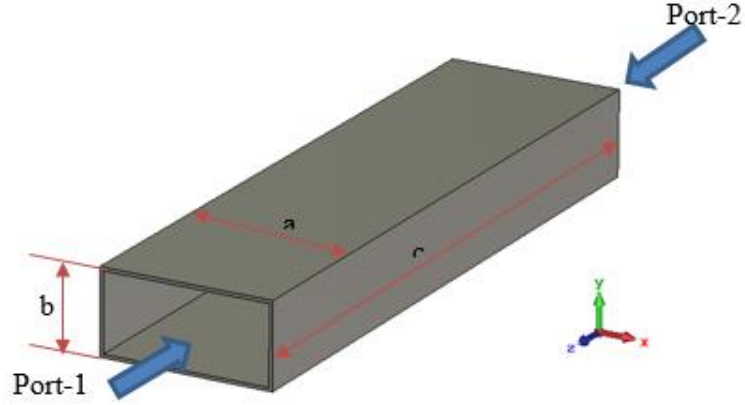
Dalga kılavuzları, elektromanyetik enerjiyi bir noktadan diğerine verimli ve kayıpsız bir şekilde taşımak için kullanılan yapısal aktarım ortamlarıdır. Bu iletim genellikle metalik borular veya dielektrik malzemeler tarafından belirlenen sınırlar içinde gerçekleştirilir. Dalga kılavuzları, uygun dalga boyuyla istenen frekans bandında çalışan elektromanyetik dalgaları taşımak için tasarlanmıştır. Bu şekilde, elektromanyetik dalgaların iletimi sırasında oluşabilecek kayıplar en aza indirilecektir. Temel olarak, dalga kılavuzları, enerji dalgalarının dalga kılavuzlarının metalik iç duvarlarından yayıldığı kapalı bir sistem oluşturur. Metalik yüzeylerinden dolayı tam yansıma (total internal reflection) oluşturur ve minimum kayıp ile iletim sağlanır. Bu yapılar mikrodalga ve radyo frekanslarında daha verimli çalışır ve çokça tercih edilirler (Zhang *et al.* 2021).

Çok değişik şekillerde üretilen dalga kılavuzlarının en yaygın hali dikdörtgen dalga kılavuzlarıdır. Bu yapı, elektromanyetik dalgaların belirli modlarda yayılmasına izin verir ve bu modlar elektrik ve manyetik alanların dağılımına bağlı olarak tanımlanır. En yaygın modlar TE (Transverse Electric) ve TM (Transverse Magnetic) modlarıdır. Bu modların arasındaki fark, TE modunda elektrik alanının, TM modunda ise manyetik alanın dalga kılavuzuna dik yönelmesidir. Dalga kılavuzları aracılığıyla iletilebilen minimum frekans noktası "kesim frekansı" (f_0) olarak tanımlanır. Daha düşük frekanslara sahip sinyaller durdurulurken bu frekans değerinin üzerindeki sinyaller geçirilir (Gonçalves *et al.* 2018).

Dalga kılavuzları çoğunlukla radar sistemleri, antenler ve havacılık teknolojileri gibi yüksek frekansların kullanıldığı uygulamalarda tercih edilir. Bunun en önemli nedenlerinden birisi koaksiyel kablo veya diğer iletim hatlarına kıyasla minimum kayıp sağlamalarıdır. Öte yandan, özellikle düşük frekanslarda üretim zorlukları, yüksek maliyet ve fiziksel boyutlar gibi bazı dezavantajları vardır. Ayrıca, bir dalga kılavuzunun iç duvarları/yüzeyi mümkün olduğunca pürüzsüz olmalıdır, bu da üretim sürecinde yüksek toleranslarla hassas çalışmalar gerektirir (Ghodgaonkar *et al.* 2002).

Dikdörtgen dalga kılavuzlarını kullanarak çalışmamızda geliştirdiğimiz boyanın elektromanyetik davranışını araştıran tezimizde, 3 farklı frekans bandında çalışan dalga kılavuzları için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Alt katman olarak kullanılan PLA numunelerinin laboratuvarımızda bulunan dalga kılavuzu seti ile elektrik ve manyetik geçirgenlik değerleri bulunup bilgisayar ortamına aktarılmış ve simülasyonlar ticari bir manyetik simülasyon programı olan CST Microwave Studio üzerinden gerçekleştirilmiştir. Temel olarak dikdörtgen bir dalga kılavuzu aşağıdaki şekilde gösterildiği gibidir (Tamyis *et al.*

2002). Simülasyon yapılırken adaptörler kullanılmamış ve dalga kılavuzlarının her iki açıklığından dalga kılavuzu portu atanmıştır (Şekil 18).



Şekil 18. Dikdörtgen dalga kılavuzu

Tezimde, sadece dikdörtgen dalga kılavuzlarına odaklandım. Bu tür dalga kılavuzları için TE_{mn} modu için kesim frekansı şu şekilde hesaplanabilir:

$$f_{c_{mn}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}$$

Burada, $f_{c_{mn}}$ kesim frekansıdır (Hz), μ malzemenin manyetik geçirgenliğine karşılık gelirken, ϵ elektriksel geçirgenliktir, m ve n dalga kılavuzunun modlarıdır, a ve b dalga kılavuzunun geometrik boyutlarıdır (sırasıyla yatay ve dikey). TE_{10} olacak temel modla ilgileneceğiz. TE_{10} modu için $m = 1$ ve $n = 0$ 'dır ve formül aşağıdaki gibi basitleştirilebilir:

$$f_{c_{10}} = \frac{c}{2a}$$

Burada, $f_{c_{10}}$ kesim frekansı, c ışık hızıdır ve 3×10^8 m/s değerine sahiptir. a ise dikdörtgen dalga kılavuzunun uzun kenarıdır (genişlik). Bu formülden, kesim frekansının dalga kılavuzunun uzun kenarının değeri ile ters orantılı olduğu görülmektedir. Bu aşamada, eğer kesim frekansı belirlenirse, dalga kılavuzunun boyutları kolayca hesaplanabilir.

$$a = \frac{c}{2f_c}$$

Genel bir yaklaşım olarak dikdörtgen dalga kılavuzlarında, yükseklik genellikle genişliğin yarısı olarak seçilir [46].

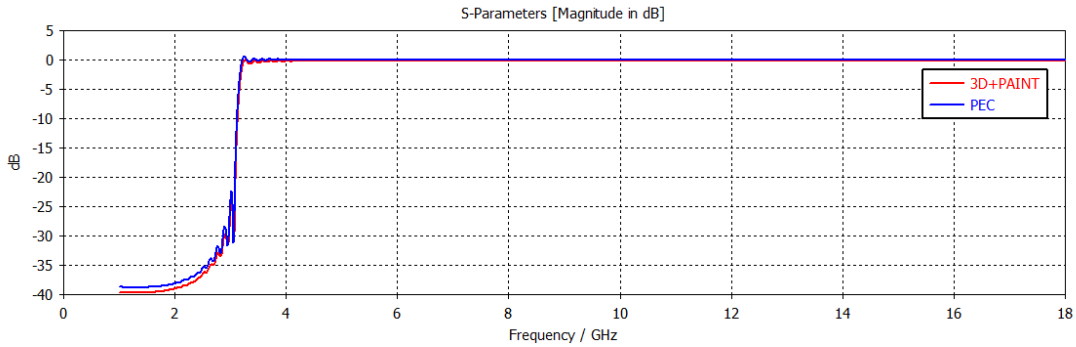
$$b \approx \frac{a}{2}$$

Şimdi, çeşitli frekans bantlarında çalışan dalga kılavuzlarına odaklanalım.

G-Bant Dalga Kılavuzu

WR-187 dalga kılavuzu 3.95 ile 5.85 GHz frekans bandında çalışan dikdörtgen bir dalga kılavuzudur. Dalga kılavuzunun boyutları $a=47,549$ mm, $b=22,149$ mm, $c=200$ mm ve kesim frekansı $f_c=3,153$ GHz şeklinde alınmış olup simülasyon sonuçları 1-18 GHz frekans bandında alınmıştır (Kaatze and Data 1989).

Mükemmel iletken (PEC- Perfect Electric Conductor) ve PLA üzeri boya kaplı G-bant dikdörtgen dalga kılavuzları için ayrı ayrı simülasyon gerçekleştirilmiş ve S-parametre sonuçları ($|S_{21}|$ dB cinsinden) aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Şekil 19). Şekilde mavi ile gösterilen eğri tamamen ideal mükemmel elektrik iletkeninden (PEC) üretilen dalga kılavuzuna aittir, diğeri ise (Kırmızı eğri) geliştirilen iletken boya ile içten kaplanmış 3 boyutlu yazdırılmış bir PLA yapısından oluşmaktadır. Simülasyon, 1–18 GHz frekans aralığını kapsamaktadır ve her iki tasarım da yaklaşık 3,15 GHz'de net bir geçiş göstermektedir; bu, G-bant dalga kılavuzu boyutları için TE_{10} modunun kesim frekansına karşılık gelmektedir. Bu frekans değerinin üzerinde, her iki konfigürasyon da neredeyse aynı iletim davranışını sergileyerek, verimli sinyal yayılımı ve minimum kayıp göstermektedir (Xie *et al.* 2024).

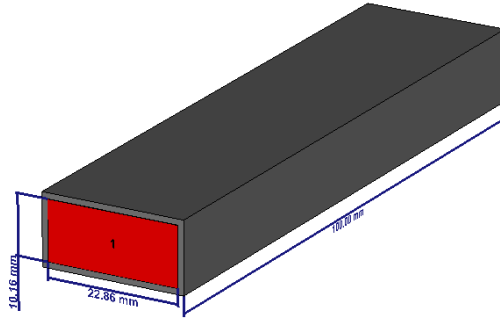


Şekil 19. PEC ve 3B model üzeri boya kaplamalı G-bant dalga kılavuzunun iletim (transmission) davranışlarının kıyaslanması

X-Bant Dalga Kılavuzu

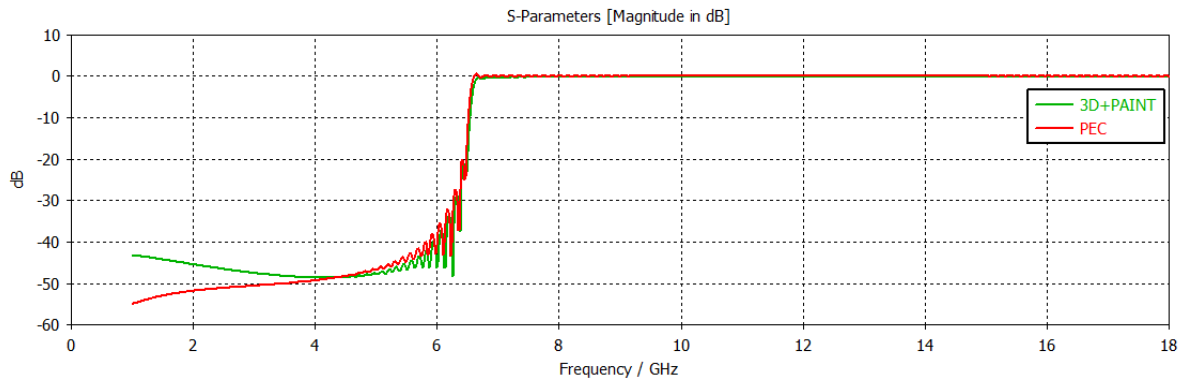
WR-90 dikdörtgen dalga kılavuzu olarak kodlanan bu yapı X-bandında (8-12 GHz) çalışan standart bir yapıdır. Simülasyon yapılırken dalga kılavuzu boyutları $a=22,86$ mm ve $b=10,16$ mm olarak alınmış olup uzunluğu $c=100$ mm olarak tutulmuştur. Hesaplanan kesim frekansı TE_{10} modu için 6,557 GHz'dir. Tasarlanan yapının ekran görüntüsü ile detaylı boyutları aşağıdaki şekilde verilmiştir. Simülasyon yapılırken hem önerilen boya kaplaması ile hem de mükemmel iletken (PEC-Perfect Electric Conductor) kullanılmıştır. Kaplamanın sadece iç yüzeye yapıldığı not edilmelidir (Han *et al.* 2015). Bu durum EM yansımanın gerekli olduğu iç kısım için yeterli olmaktadır. Kaplanan yüzey olarak 3-B yazıcılarda yaygın olarak kullanılan

PLA malzemesi kullanılmıştır. Bilgisayar ortamında tasarlanan yapının boyutları ve şekli aşağıdaki şekilde (Şekil 20) detaylı gösterilmiştir.



Şekil 20. X-bant dalga kılavuzu simülasyon tasarımı

Şekilde görüldüğü gibi, WR-90 X-bant dikdörtgen dalga kılavuzunun yapısı uygun genişlik ve yükseklik değerlerine sahip bir şekilde simüle edilmiştir. Simülasyon hem bant içi hem de bant dışı davranışı incelemek için 1–18 GHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. Beklendiği gibi, her iki yapı da yaklaşık 6,56 GHz'de kesim frekansı civarında keskin bir geçiş sergilemektedir (Long *et al.* 2021). Bu frekans noktasından daha yüksek değerlerde, iletme karşılık gelen $S_{12}=S_{21}$ değerleri 0 dB değerine karşılık gelmektedir ve bu değer tam iletimin olduğunu göstermektedir (Şekil 21).

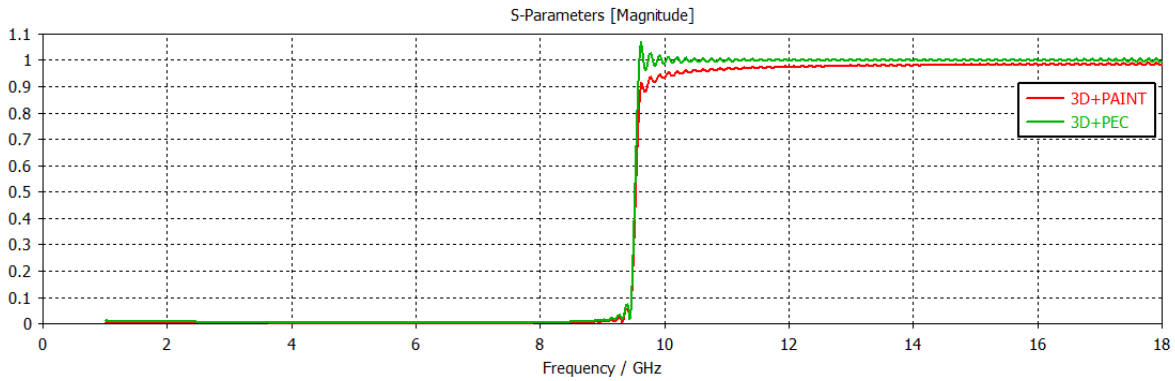


Şekil 21. X-bant dalga kılavuzu için 3B yüzey üzerine boya ile mükemmel iletken malzeme kıyaslaması (İletim – Transmission $S_{12}=S_{21}$)

Her iki yapının da kesim frekansından sonra tam iletimi sağladığı şekilden açıkça görülmektedir. Bu davranış maksimum frekansa kadar neredeyse tam bir değerde devam etmektedir (0 dB). Kesim frekansının öncesinde ise sinyal geçişi önlenmiş olup istenen X-bant frekans aralığında arzu edilen çalışma davranışı sergilenmektedir. Önerilen kaplama sisteminin istenen dalga kılavuzu karakteristiğini tamamen karşıladığı açıkça görülmektedir. Bir başka deyişle, PLA alt katmanına kaplanan boya ile oluşturulan yapının kesim frekansı sonrası performansı, PEC modelinin performansına oldukça yaklaşmaktadır ve önerilen kaplamanın, esneklik, maliyet veya uyumluluğun gerekli olduğu pratik dalga kılavuzu uygulamaları için uygun olduğunu doğrulamaktadır (Pozar 2021).

Ku-Bant Dalga Kılavuzu

WR-62 olarak da bilinen ve üretilen dikdörtgen dalga kılavuzu, 12,4 ila 18 GHz frekans aralığında etkili bir şekilde çalışan Ku-bant uygulamaları için kullanılan standart bir yapıdır. Çalışmamda, dalga kılavuzu boyutları $a = 15,8$ mm, $b = 7,9$ mm ve uzunluk $c = 100$ mm olarak seçilmiş ve TE_{10} modu için yaklaşık 9,5 GHz'lik bir kesim frekansı elde edilmiştir. İletim (Transmission) özelliklerini değerlendirmek ve iki konfigürasyonun performansını karşılaştırmak için yine 1 ila 18 GHz arasında geniş bir frekans bandı boyunca elektromanyetik simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Aynı senaryo tekrarlanıp, biri metal (PEC) yüzeye sahip, diğeri ise geliştirilen iletken poliüretan bazlı boya ile kaplanmış 3 boyutlu yazıcı ile yazdırılmış bir yapı kullanılmıştır (Veselago 1968). Bu karşılaştırma, özellikle ağırlık azaltma, konformal entegrasyon veya maliyet verimliliğinin kritik olduğu Ku-bant sistemlerinde işlevsel kaplamaların kullanılmasının pratikliğini değerlendirmeye olanak tanır. Ek olarak iletim grafiği logaritmik yerine lineer olarak verilmiş olup, sinyal aktarımının yüzde olarak ne kadar geçişinin sağlandığının görülmesi açısından bu şekilde verilmiştir (Ling *et al.* 2015).



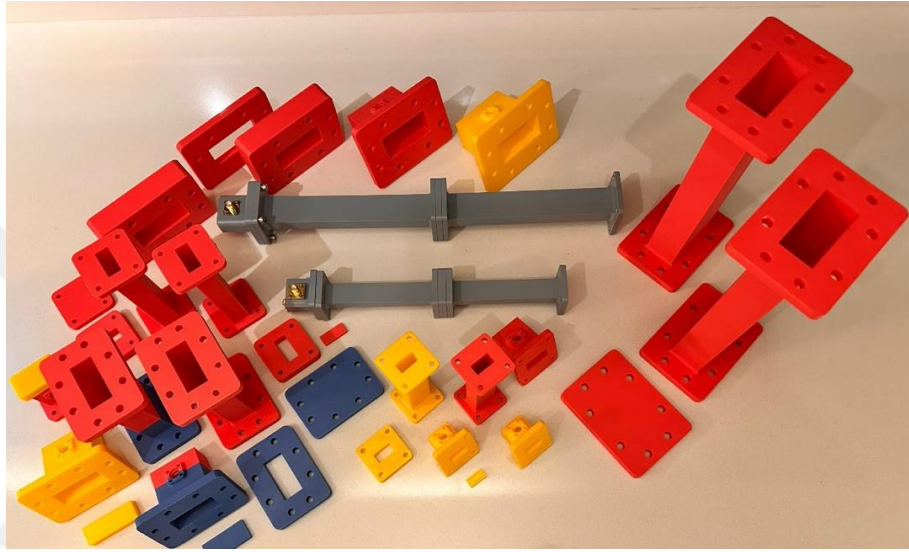
Şekil 22. Ku-bant dalga kılavuzu için 3B-yüzey üzerine boya ile mükemmel iletken malzeme kıyaslaması (İletim – Transmission $S_{12}=S_{21}$)

Benzer şekilde, kesim frekansından yüksek değerlerde, her iki yapı da yüksek oranda sinyal yayılımına izin vermektedir. Şekil incelendiğinde kaplama yapılmış yapının Ku-bant aralığında (12,4–18 GHz) pratik kullanım için yeterli elektriksel performansa ulaştığı kolayca görülmektedir. Kesim frekansı sonrası her iki yapının neredeyse tam iletim sağladığı, bu nedenle, önerilen yöntemin ilgili frekans bandında rahatça metal dalga kılavuzlarının yerine kullanılabileceği görülmektedir.

Genel olarak, elde edilen sonuçlar geliştirilen iletken boyanın yüksek frekanslı uygulamalar için 3-boyutlu yazıcılar ile yazdırılmış alt tabakalarda kullanılmasının uygulanabilirliğini doğrulamaktadır. PEC ile karşılaştırıldığında boya kaplı dalga kılavuzlarının elektromanyetik iletim için kabul edilebilir performans değerlerini karşıladıkları açıkça görülmektedir. Daha düşük maliyet, ağırlık ve karmaşık şekilleri oluşturabilme

kabiliyeti nedeniyle önerilen yaklaşımın arzu edilen performansların elde edilmesinde rahatça kullanılabileceği sonucu çıkmaktadır.

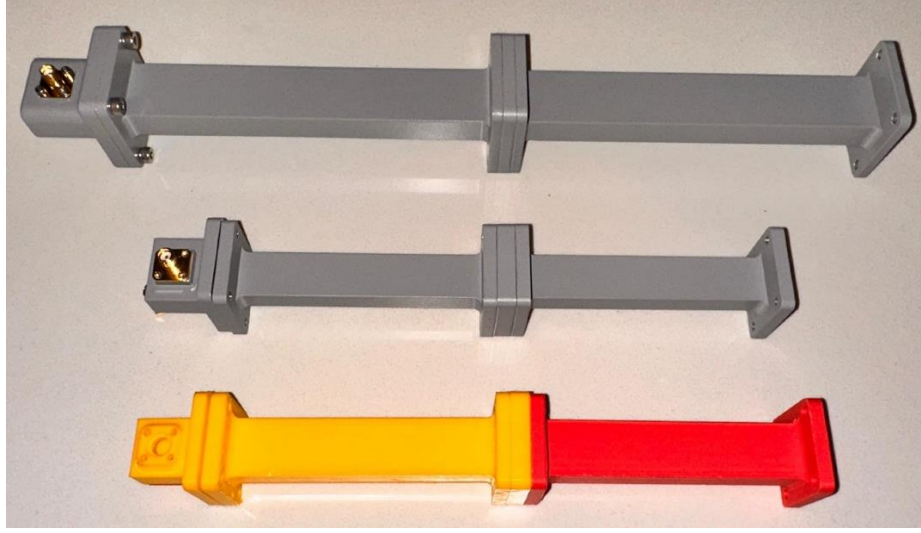
3-boyutlu yazıcılar kullanılarak, tüm ilgili bantlarda çalışabilecek dalga kılavuzları üretilmiştir. Üretilen numuneler aşağıdaki şekilde görülmektedir. Koaksiyel kablolar ile bağlantıları sağlayabilmek için gerekli adaptörler de üretilmiştir. Dalga kılavuzları ile adaptörlerin yapısı PLA ile üretilmiş olup sadece elektromanyetik dönüşüm için kullanılan anten metal olarak üretilmiştir (Kong *et al.* 2017). Şekilde görüldüğü üzere, numune tutucular da ilgili dalga kılavuzuna uygun olarak üretilmiştir.



Şekil 23. 3D Yazıcı ile üretilen dalga kılavuzu sistemleri

Şekilde görüldüğü üzere, numune tutucular (sample holders) da ilgili dalga kılavuzuna uygun olarak üretilmiştir. Bu parçalar dikdörtgen dalga kılavuzlarının iç boyutları ile aynı uzunluklara sahip olup, ölçülmek istenen numunenin yerleştirildiği yardımcı yapılardır. Ayrıca sistemin kalibrasyonunda kullanılması için yüzeyi tamamen kaplı olan tam yansıma aparatları da üretime eklenmiştir (Naskar *et al.* 2017). Bu parçalar numune tutuculara benzer boyutlarda olup tek farkı dikdörtgen boşluğun yapı üzerinde olmamasıdır. Sistem kalibre edilirken, hava durumu herhangi bir aparat bağlanmadan sağlanmaktadır. Tam yansımanın olması için dalga kılavuzunun uç kısmının tamamen yansıtıcı bir yüzey ile kapatılabilmesi gerekmektedir. Bahsi geçen parçalar bu amaçla kullanılmaktadır. Şekilde görüldüğü gibi, montaj delikleri dışında tüm yüzeyi kapalı olarak tasarlanması ve üretilmesi gerekmektedir (Pendry *et al.* 1999).

Metalik yüzeyin oluşturulması ile oluşan dalga kılavuzu yapısı aşağıdaki şekilde (Şekil 25) görülmektedir. Önerilen yaklaşımın tüm frekans bantlarına uygulanabileceği öngörülerek sadece X ve Ku bandı için üretimler tamamlanmış ve denemeler bu yapılar üzerinden gerçekleştirilmiştir. Burada koaksiyel bağlantı kabloları ile dalga kılavuzu arasındaki geçişi sağlayan adaptörlerin metalik yapılması zorunlu görülmüştür.



Şekil 24. X ve Ku bandında çalışacak şekilde üretilen dalga kılavuzu sistemleri

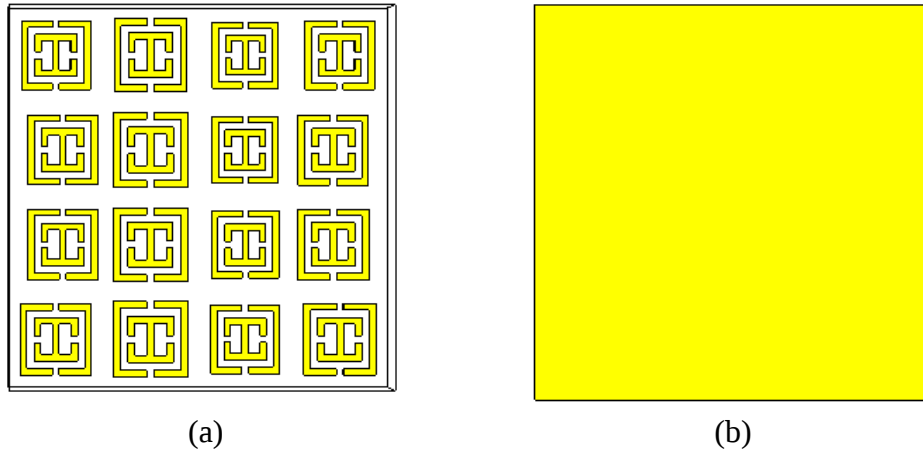
Metamalzemeler (MTM)

Hem elektriksel geçirgenlik hem de manyetik geçirgenlik değerlerinin aynı anda negatif olabileceği fikrinin Rus fizikçi Victor Veselago tarafından ortaya atılmasından yaklaşık 50 yıl sonra, Sir Pendry ve Smith, bu özelliklere sahip malzemelerin laboratuvar ortamında geliştirilebileceğini kanıtladılar. Doğal malzemelerden farklı olarak negatif kırılma indisine sahip olma gibi olağanüstü bir özelliğe sahip olan bu malzemelere olan ilgi bu yüzyılın başlarında hızla arttı ve birçok endüstriyel ve akademik alanda yoğun olarak incelenen en etkili konulardan biri haline geldiler (Smith *et al.* 2000).

Doğada bulunan malzemelerden farklı elektromanyetik özellikler gösteren yapay olarak tasarlanmış yapılar olan metamalzemeler, çok çeşitli bilimsel ve teknolojik alanlarda kullanılmaktadır. Elektromanyetik sinyalleri manipüle etme kabiliyetleri nedeniyle metamalzemeler, elektromanyetik soğurucularda, antenlerde, sensör yapılarında, elektromanyetik harmanlama uygulamalarında, negatif indeksli malzemelerde ve mükemmel lenslerde kullanılmaktadır. Anten mühendisliği alanında metamalzemeler, kompakt, yüksek kazançlı ve EM sinyalleri yönlendirilebilir antenler tasarlamak için kullanılır. Çok yönlülükleri, elektromanyetik dalga yayılımı üzerinde benzersiz bir kontrol sağlayarak, bunları 5G/6G iletişimleri, giyilebilir elektronikler, biyomedikal görüntüleme ve enerji harmanlama sistemleri gibi yeni ortaya çıkan alanlar için uygun hale getirmektedir (Omar *et al.* 2017).

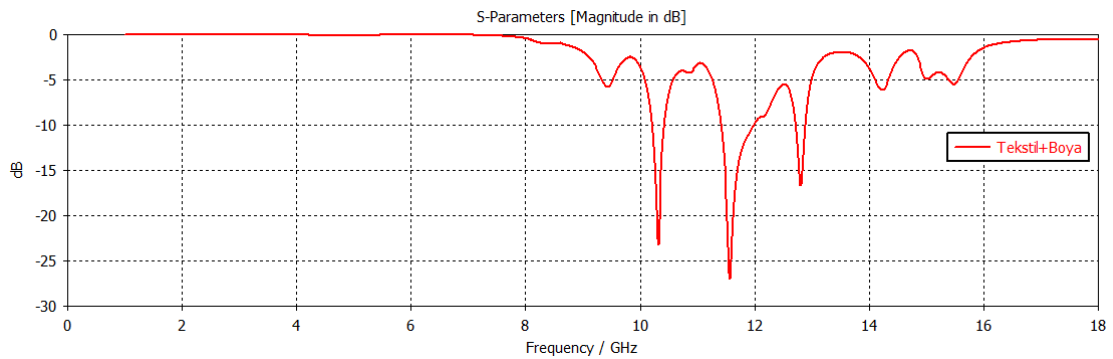
Çalışmamızda, metamalzemelerin RF soğurucu uygulaması göz önüne alınmıştır. Bu çalışmada, farklı boyutlara sahip MTM rezonatörler kullanılmış olup alt katman olarak tekstil seçilmiş ve arka kısmı (background) tamamen tasarlanan boya ile kaplanmıştır. Oluşturulan yapı aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Şekil 25). Şekilde görülen yapı tek bir MTM hücresini temsil etmekte olup 28 mm x 28 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Bu hücrelerden 100 tanesi

kullanılarak serbest uzay ölçüm yönteminde ölçülebilecek 28 cm x 28 cm boyutlarında elastik tekstil numune hazırlanmış ve test edilmiştir.



Şekil 25. Metamalzeme soğurucu yapısının önden (a) ve arkadan (b) görünümü

Şekilden de görüldüğü üzere farklı frekans değerlerinde soğurma performansı elde etmek için rezonatör hücreleri farklı boyutlarda tasarlanmıştır. Soğurma performansı ($A(w)$) elde edilirken yansıma ($R(w)$) ve iletim ($T(w)$) davranışları da göz önüne alınmaktadır. Frekansa bağlı olarak $A(w) = 1 - R(w) - T(w)$ şeklinde soğurma bulunabilir. Soğurmayı maksimum değerine çıkarmak için yansıma $R(w) = |S_{11}|^2$ ve iletim $T(w) = |S_{12}|^2$ değerleri minimum değerlere çekilmelidir. Yapımızın arka kısmı tamamen metal boya kaplandığı için $T(w) = 0$ olmaktadır. Bir başka deyişle soğurma performansı doğrudan yansıma davranışı ile tespit edilebilir. Soğurma davranışı aşağıdaki şekilde yansıma grafiği olarak verilmiştir .

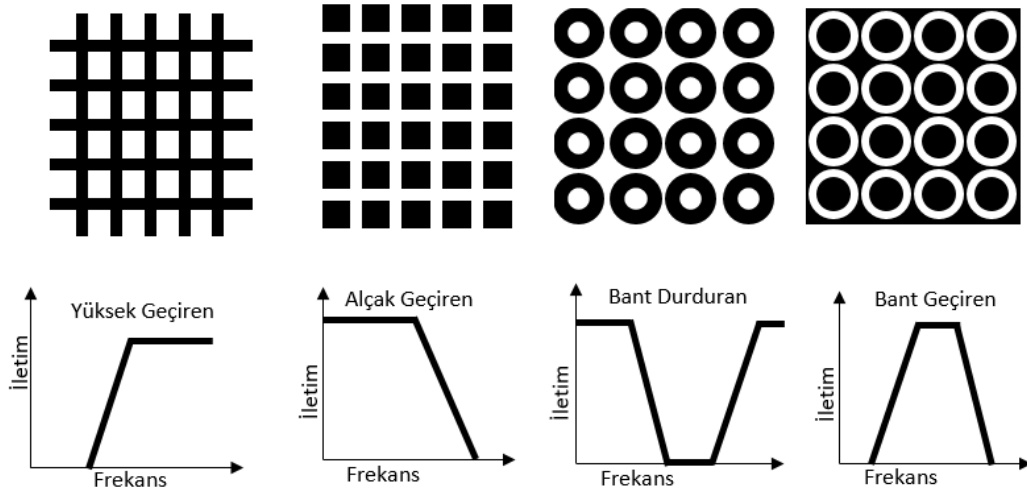


Şekil 26. Geniş bant MTM soğurucu yapısının yansıma grafiği

Frekans Seçici Yüzeyler (FSS)

Frekans seçici yüzeyler frekansa bağlı olarak elektromanyetik alanı yansıtan, geçiren veya sönümleyen periyodik yapılardan oluşmaktadır. İsminden de anlaşılacağı üzere belli bir frekansa sahip sinyalin filtrelenmesini sağlayacak şekilde tasarlanırlar. Çalışma mekanizması kırınım ilkesiyle açıklanmaktadır. Mikrodalga fırınlardan anten radomlarına kadar

elektromanyetik filtrelemenin gerekli olduğu birçok mühendislik alanında sıkça kullanılmaktadır. Bazı yaygın frekans seçici yüzey yapıları aşağıda gösterilmektedir (Şekil 27).

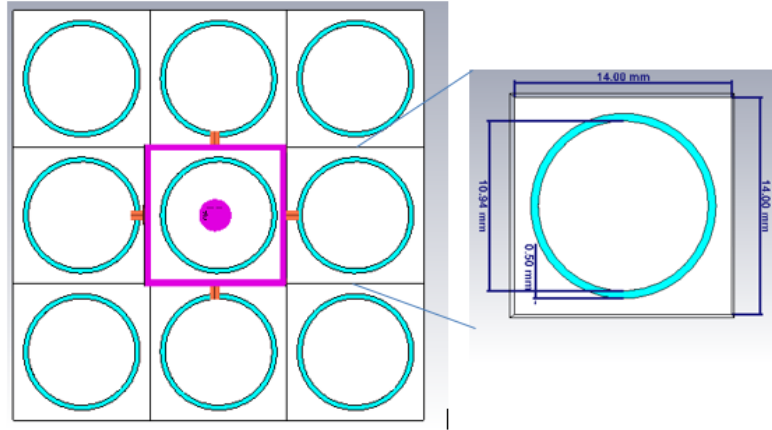


Şekil 27. Yaygın Frekans Seçici Yüzey (FSS) yapıları ve iletim grafikleri

Mikrodalga ve optik frekans aralıklarında, neredeyse tüm sinyal işleme sistemlerine yapılan en üst düzey çalışmalarda filtreleme işlemi özel bir ilgi görmektedir. Frekans seçici yüzeyler (FSS) gelen EM dalgayı düzenleme ve isteğe uygun şekilde yönlendirme ve/veya yansıtma kabiliyetlerine sahiptirler (Zhao *et al.* 2011). FSS yapıları genel itibariyle dielektrik bir alt katman üzerine belirli şekillere sahip iletken rezonatörlerin periyodik olarak dizilimiyle oluşturulurlar. Yüzeye gelen elektromanyetik sinyalin hem genliği hem de fazı üzerinde etki oluşturup, iletilen sinyali etkilemekte olan bu yapılar çok çeşitli filtre yapılarında kullanılmaktadırlar. Gelişen ve giderek daha da karmaşılaşan günümüz teknolojisinde, FSS yapıları giderek daha fazla kendilerine uygulama alanı bulmaktadırlar (Nasr *et al.* 2017).

Farklı filtreleme türlerinin gerçekleştirilebileceği FSS yapılarının boyutları ve şekillerine göre filtreleme özelliği ve çalıştıkları frekans bantları değişmektedir. Aşağıdaki çalışmalarda hem bant durduran hem de bant geçiren filtre özellikleri birbirinin tümleyeni olan halka şekilli yapılar kullanılarak analiz edilmiştir. Buna ek olarak, tercih edilen yapının şekli nedeniyle gelen sinyalin polarizasyonundan bağımsız olarak filtreleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Çalışmamızın içeriğinde frekans seçici yüzeylerden bant geçiren ve bant durduran yapılar tekstil malzeme alt katmanını kullanılarak incelenmiştir. Bu iki tür filtrenin incelenmesi diğer yapılar için de yapının çalışması hakkında yeterli bilgiyi vermektedir.

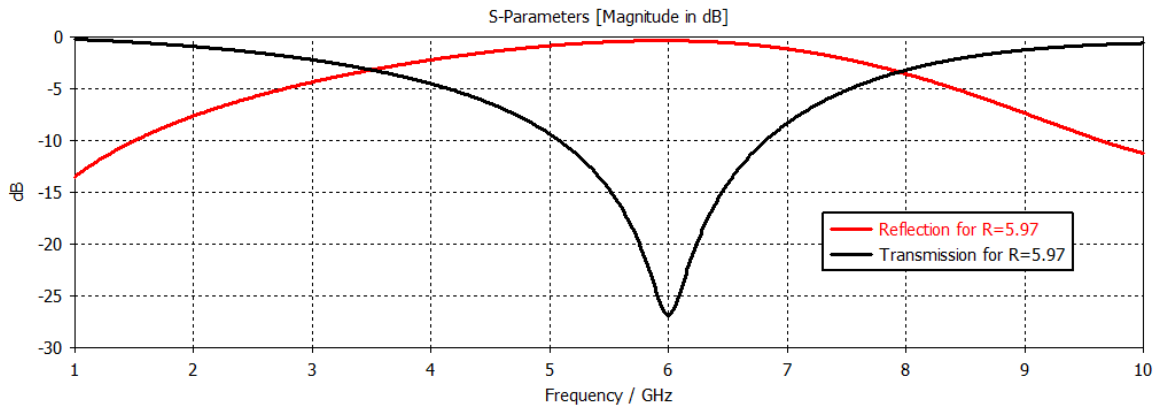
Bant Durduran (Band-Stop)



Şekil 28. Bant durduran FSS yapısı için birim hücre şekli

Aşağıdaki şekilde kırmızı grafik yansımayı temsil etmekte olup $f=6$ GHz frekanslarında neredeyse 0 dB değerlerini vermektedir. Bunun manası gönderilen sinyalin neredeyse tamamı geri yansımaktadır. Ek olarak siyah grafik iletimi (transmission) temsil etmekte olup yine aynı frekansta yaklaşık -27 dB civarındadır. Bu değer sinyalin neredeyse hücrelerin arka tarafına hiç geçmediğini göstermektedir (Ghebrebrhan *et al.* 2017).

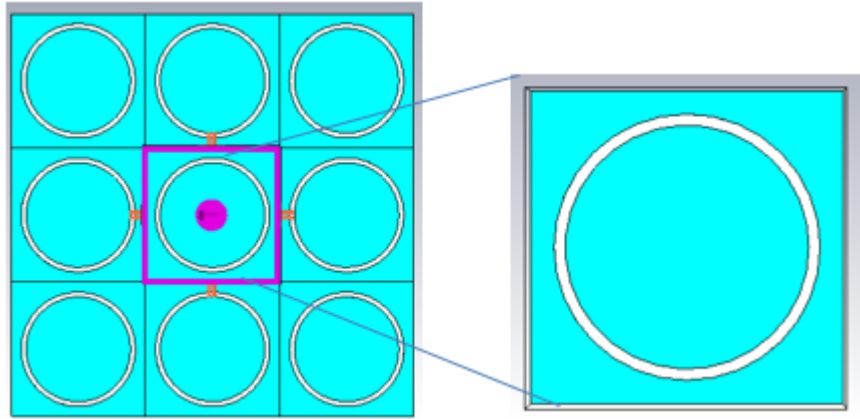
Aşağıdaki şekilde frekans seçici yüzeyler (FSS) için birim hücrenin yapısını göstermektedir. Şekilde basit bir şekilde halka rezonatör kullanılmıştır ve iletken katmanı oluşturmak için RF yansıtıcı özelliği artırılmış bir boya tasarlanmış ve kullanılmıştır. Boyanın yüzey rezistansı yaklaşık olarak 0,3 ohmkare alınmıştır.



Şekil 29. Bant durduran FSS yapısı için iletim ve yansıma grafikleri

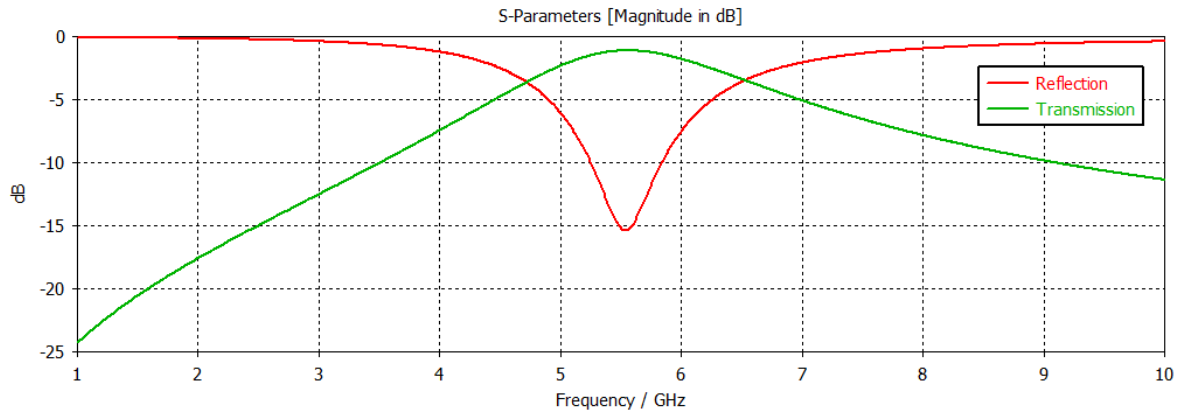
Tasarlanan yapı, boyutlarına göre belirli bir frekans bandında bant durduran filtre şeklinde davranmaktadır. Bu yapının tümleyeni şeklinde bir hücre tasarlanırsa (aşağıdaki şekil gibi) filtreleme davranışı tam tersine dönecek bu kez bant geçiren filtre özelliği elde edilecektir. Bir sonraki kısım tam olarak bant durduran yapının tümleyeni olan bir tasarımı incelemektedir. Bu yapı tahmin edileceği üzere bant geçiren filtre özelliği göstermektedir.

Bant Geçiren (Band-Pass)



Şekil 30. Bant geçiren FSS yapısına ait birim hücre tasarımı

Burada ise diğerinin aksine yansıma yaklaşık 5,5 GHz seviyelerinde yok denecek kadar az iken (yaklaşık -15 dB), iletim 0dB değerlerine yaklaşmıştır. Özet olarak $f=5,5$ GHz frekans merkezinde bant geçiren bir filtre olarak davranmaktadır.



Şekil 31. Bant geçiren FSS tasarımı için iletim ve yansıma grafiği

Tasarlanan bant geçiren FSS yapısı serigrafi yöntemi ve yansıtıcılığı yükseltilmiş boya kullanılarak tekstil üzerine basılmıştır. Bunun için gerekli kalıp üretimi şekildeki gibi yapılmıştır. İlgili kalıp kullanılarak pamuk kumaş üzerine uygulanan MTM yapısı aşağıdaki şekilde görülmektedir. Üretilen FSS yapısının ölçümü için serbest uzay ölçüm yöntemi (Free-Space Measurement) kullanılmıştır. Bu yöntemde bir vektörel ağ analizörü (Vector Network Analyzer-VNA) cihazına iki tane doğrusal kutuplu ve geniş bantlı iki tane horn anten bağlanmıştır. Önceki bölümlerde bahsedildiği üzere, boşluk ve metal plaka kullanılarak sistem kalibrasyonu yapılmış ve tasarlanan FSS yapısı test edilmiştir (Nasr *et al.* 2017).



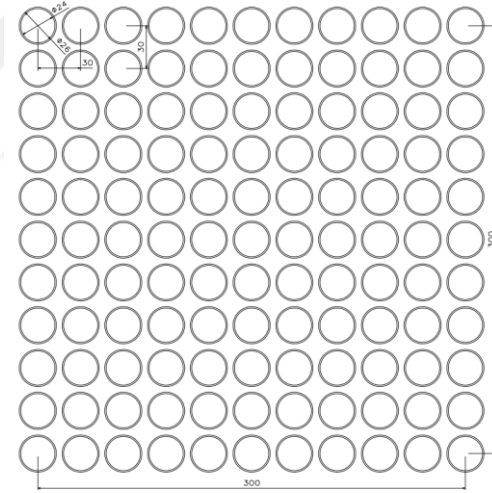
(a)



(b)

Şekil 32. Tasarlanan bant geçiren FSS yapısı için üretilen kalıp (a) ve Kumaş üzerine uygulanan bant geçiren FSS yapısı (b)

Her iki üretim için aşağıdaki kalıp şekli kullanılmıştır.



Şekil 33. FSS üretim kılavuz hücreleri

SONUÇLAR

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, önerilen yaklaşımın (poliüretan bazlı iletken boya kullanımının) fonksiyonel elektromanyetik yapıların üretimini başarıyla sağladığını açıkça göstermektedir. Dalga kılavuzları ve antenler dahil olmak üzere çeşitli bileşenler üzerinde gerçekleştirilen karşılaştırmalı simülasyonlar ve ölçümler, boya kaplı 3 boyutlu yazdırılmış prototiplerin ve tekstil üzerine baskı yöntemiyle eklenen boyanın geleneksel metalik yapıların davranışına yakın elektromanyetik performans sergilediğini doğrulamaktadır. İletken kaplama, minimum bozulma ile dalga yayılımını ve radyasyonu desteklemek için yeterli yüzey iletkenliği sağlamaktadır. Bu bulgular, geliştirilen iletken boyanın, özellikle geleneksel metal üretim yöntemlerinin pratik olmadığı veya maliyet açısından engelleyici olduğu durumlarda, düşük maliyetli, hafif ve özelleştirilebilir elektromanyetik uygulamalar için güvenilir bir şekilde kullanılabileceğini doğrulamaktadır. Bu yaklaşım, antenler, soğurucular ve diğer RF/mikrodalga bileşenleri gibi birçok elektromanyetik alanda üretim kolaylığı ve yüksek performans sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Aksimsek, S., Ozek, E.A. and Pas, B., 2018. Polarization insensitive metamaterial absorber using sunflower shaped unit cell. In 2018 18th Mediterranean Microwave Symposium (MMS). IEEE: pp: 143-145.
- Alizadeh, F., Ghobadi, C., Nourinia, J. and Zayer, R., 2014. Bandwidth enhancement of patch antennas loaded with complementary split-ring resonators. In 7th International Symposium on Telecommunications (IST'2014). IEEE: pp: 224-229.
- Artamonovs, O., Balodis, G. and Blums, J., 2014. Electrical properties of the conductive pigments for flexible antennas. In 2014 14th Biennial Baltic Electronic Conference (BEC). IEEE: pp: 145-148.
- Bait-Suwailam, M.M., Almoneef, T.S. and Alomainy, A., 2019. A wearable reconfigurable electromagnetic metamaterial absorber using artificial magnetic inclusions. In 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting. IEEE: pp: 1623-1624.
- Barreda, Á., Vitale, F., Minovich, A.E., Ronning, C. and Staude, I.J.A.P.R., 2022. Applications of hybrid metal-dielectric nanostructures: State of the art. 3(4), 2100286.
- Bhati, R. and Malik, A.K.J.S.R., 2023. Multiband terahertz metamaterial perfect absorber for microorganisms detection. 13(1), 19685.
- Chaharmir, M.R., Shaker, J.J.I.T.o.A. and Propagation, 2015. Design of a multilayer x-/ka-band frequency-selective surface-backed reflectarray for satellite applications. 63(4), 1255-1262.
- Costa, F., Monorchio, A. and Manara, G.J.A.C.E.S.J., 2014. An overview of equivalent circuit modeling techniques of frequency selective surfaces and metasurfaces. 960-976.
- Cui, T.J., Liu, R. and Smith, D.R., 2009. Introduction to metamaterials. Metamaterials: Theory, design, and applications. Springer: pp: 1-19.
- Çelenk, E., Tokan, N.T.J.I.A. and Letters, W.P., 2022. All-textile on-body antenna for military applications. 21(5), 1065-1069.
- Echeverria-Altuna, O., Ollo, O., Larraza, I., Elizetxea, C., Harismendy, I. and Eceiza, A.J.P., 2022. Development of a novel biobased polyurethane resin system for structural composites. 14(21), 4553.
- Ejaz, A., Jabeen, I., Khan, Z.U., Alomainy, A., Aljaloud, K., Alqahtani, A.H., Hussain, N., Hussain, R. and Amin, Y.J.M., 2023. A high performance all-textile wearable antenna for wristband application. 14(6), 1169.
- Ghebrebrhan, M., Aranda, F., Walsh, G., Ziegler, D., Giardini, S., Carlson, J., Kimball, B., Steeves, D., Xia, Z., Yu, S.J.I.M. and Letters, W.C., 2017. Textile frequency selective surface. 27(11), 989-991.
- Ghodgaonkar, D.K., Varadan, V.V., Varadan, V.K.J.I.T.o.I. and measurement, 2002. A free-space method for measurement of dielectric constants and loss tangents at microwave frequencies. 38(3), 789-793.

- Ghosh, S., Bhattacharyya, S., Chaurasiya, D., Srivastava, K.V.J.I.a. and letters, w.p., 2015. An ultrawideband ultrathin metamaterial absorber based on circular split rings. 14, 1172-1175.
- Gonçalves, F.J.F., Pinto, A.G., Mesquita, R.C., Silva, E.J. and Brancaccio, A.J.E., 2018. Free-space materials characterization by reflection and transmission measurements using frequency-by-frequency and multi-frequency algorithms. 7(10), 260.
- Gulati, K., Boddu, R.S.K., Kapila, D., Bangare, S.L., Chandnani, N. and Saravanan, G.J.M.T.P., 2022. A review paper on wireless sensor network techniques in internet of things (iot). 51, 161-165.
- Han, B., Ding, S. and Yu, X.J.M., 2015. Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review. 59, 110-128.
- He, Y. and Jiang, J., 2015. An ultra-wideband metamaterial absorber with active frequency selective surface. In 2015 9th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (METAMATERIALS). IEEE: pp: 100-102.
- Hossain, M.B. and Hossain, M.F., 2020. Design of a triple band rectangular slot microstrip patch antenna for wireless applications. In 2020 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP). IEEE: pp: 1832-1835.
- Ibili, H., Karaosmanoğlu, B., Ergül, Ö.J.M. and Letters, O.T., 2018. Demonstration of negative refractive index with low-cost inkjet-printed microwave metamaterials. 60(1), 187-191.
- Kaatze, U.J.J.o.C. and Data, E., 1989. Complex permittivity of water as a function of frequency and temperature. 34(4), 371-374.
- Kim, I.K., Wang, H., Weiss, S.J. and Varadan, V.V.J.I.t.o.v.t., 2012. Embedded wideband metaresonator antenna on a high-impedance ground plane for vehicular applications. 61(4), 1665-1672.
- Kim, J.-H., Hokmabadi, M.P., Balci, S., Rivera, E., Wilbert, D., Kung, P. and Kim, S.M.J.A.P.A., 2016. Investigation of robust flexible conformal thz perfect metamaterial absorber. 122(4), 362.
- Kong, X., Xu, J., Mo, J.-j. and Liu, S.J.F.o.O., 2017. Broadband and conformal metamaterial absorber. 10(2), 124-131.
- Kumar, A., Saini, G. and Singh, S., 2016. Design and simulation of metamaterial loaded substrate integrated waveguide fed patch antenna for x-band military application. In 2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET). IEEE: pp: 550-554.
- Li, H.-L., Wu, B., Zhao, Y.-T., Chen, L. and Wu, N., 2018. Design of flexible bandpass frequency selective surface with high out-of-band suppression. In 2018 IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP). IEEE: pp: 281-282.
- Ling, K., Kim, K. and Lim, S.J.O.e., 2015. Flexible liquid metal-filled metamaterial absorber on polydimethylsiloxane (pdms). 23(16), 21375-21383.

- Long, L.V., Khiem, N.S., Tung, B.S., Tung, N.T., Giang, T.T., Son, P.T., Khuyen, B.X., Lam, V.D., Chen, L. and Zheng, H., 2021. Flexible broadband metamaterial perfect absorber based on graphene-conductive inks. In *Photonics*. MDPI: pp: 440.
- Mahmood, S.M. and Denidni, T.A., 2016. Design and implementation of substrate-free frequency selective surfaces. In *2016 17th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM)*. IEEE: pp: 1-2.
- Naskar, M.A., Tamrakar, M. and Thiripurasundari, D., 2017. Compact 'v'-shaped metamaterial based resonator for wide band rejection. In *2017 International Conference on Nextgen Electronic Technologies: Silicon to Software (ICNETS2)*. IEEE: pp: 88-91.
- Nasr, M., Richard, J.T., Skirlo, S.A., Heimbeck, M.S., Joannopoulos, J.D., Soljacic, M., Everitt, H.O., Domash, L.J.J.o.I., Millimeter, and Waves, T., 2017. Narrowband metamaterial absorber for terahertz secure labeling. *38*(9), 1120-1129.
- Nicolson, A., Ross, G.J.I.T.o.i. and measurement, 2007. Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques. *19*(4), 377-382.
- Okoye, K. and Hosseini, S., 2024. Analysis of variance (anova) in r: One-way and two-way anova. *R programming: Statistical data analysis in research*. Springer: pp: 187-209.
- Omar, A.A., Shen, Z., Huang, H.J.I.T.o.A. and Propagation, 2017. Absorptive frequency-selective reflection and transmission structures. *65*(11), 6173-6178.
- Özden, K., Yücedağ, O.M. and Koçer, H., 2015. Geometrical parameter investigation of metamaterial absorber for space based remote sensing applications. In *2015 7th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*. IEEE: pp: 229-232.
- Pendry, J.B., Holden, A.J., Robbins, D.J., Stewart, W.J.J.I.t.o.m.t. and techniques, 1999. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *47*(11), 2075-2084.
- Pozar, D.M., 2021. *Microwave engineering: Theory and techniques*. John wiley & sons, pp.
- Qureshi, S., Stojanović, G.M., Simić, M., Jeoti, V., Lashari, N. and Sher, F.J.M., 2021. Silver conductive threads-based embroidered electrodes on textiles as moisture sensors for fluid detection in biomedical applications. *14*(24), 7813.
- Shakirul, M., Jusoh, M., Ismail, A., Kamarudin, M., Rahim, H.A. and Sabapathy, T., 2016. Reconfigurable frequency with circular polarization for on-body wearable textile antenna. In *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. IEEE: pp: 1-4.
- Shrivastava, S., Bansal, A. and Malhotra, S., 2023. Compact wearable textile antenna design for biomedical applications. In *2023 First International Conference on Microwave, Antenna and Communication (MAC)*. IEEE: pp: 1-5.
- Singh, G., Sharma, B., Bhardwaj, A., Srivastava, K.V., Ramkumar, J., Ramakrishna, S.A.J.I.A. and Letters, W.P., 2021. Wrapping of curved surfaces with conformal broadband metamaterial microwave absorber. *20*(10), 1938-1942.

- Smith, D.R., Padilla, W.J., Vier, D.C., Nemat-Nasser, S.C. and Schultz, S.J.P.r.l., 2000. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. 84(18), 4184.
- SRPSKE, R., LUKA, B. and HERCEGOVINA, B.I., 2009. Hemičara, tehnologa i ekologija.
- Tak, J., Choi, J.J.I.A. and Letters, W.P., 2016. A wearable metamaterial microwave absorber. 16, 784-787.
- Tamyis, N., Ramli, A. and Ghodgaonkar, D., 2002. Free space measurement of complex permittivity and complex permeability of magnetic materials using open circuit and short circuit method at microwave frequencies. In Student Conference on Research and Development. IEEE: pp: 394-398.
- Thummaluru, S.R., Kumar, R., Chaudhary, R.K.J.I.T.o.A. and Propagation, 2018. Isolation enhancement and radar cross section reduction of mimo antenna with frequency selective surface. 66(3), 1595-1600.
- Tu, H., Zhang, Y., Hong, H., Hu, J. and Ding, X.J.T.R.J., 2021. Design and characterization of novel fabric-based multi-resonators for wearable chipless rfid applications. 91(15-16), 1830-1840.
- Valipour, A., Kargozarfard, M.H., Rakhshi, M., Yaghootian, A., Sedighi, H.M.J.P.o.t.I.o.M.E., Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2022. Metamaterials and their applications: An overview. 236(11), 2171-2210.
- Veselago, V.G.J.P.-U., 1968. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . 10(4), 509-514.
- Wang, N., Tong, J., Zhou, W., Jiang, W., Li, J., Dong, X. and Hu, S.J.I.P.J., 2015. Novel quadruple-band microwave metamaterial absorber. 7(1), 1-6.
- Wei, P.-S., Chiu, C.-N., Chou, C.-C., Wu, T.-L.J.I.A. and Letters, W.P., 2020. Miniaturized dual-band fss suitable for curved surface application. 19(12), 2265-2269.
- Weir, W.B.J.P.o.t.I., 2005. Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies. 62(1), 33-36.
- Xie, Z., Ventura, H. and Ardanuy, M.J.T., 2024. A review of the electrical conductivity test methods for conductive fabrics. 4(3), 284-308.
- Yan, S., Poffelie, L.A.Y., Soh, P.J., Zheng, X. and Vandenbosch, G.A., 2016. On-body performance of wearable uwb textile antenna with full ground plane. In 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). IEEE: pp: 1-4.
- Yu, D., Dong, Y., Zhang, Z., Lin, M., Han, L.J.I.T.o.A. and Propagation, 2023. High-selectivity frequency-selective rasorber with tunable absorptivity. 71(4), 3620-3630.
- Yu, Z., Cao, B., Lu, J. and Wang, J., 2020. Flexible resistive film broadband fss absorber suitable for a variety of curved surfaces. In 2020 IEEE 3rd International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT). IEEE: pp: 500-503.

- Zhang, Y., Zhang, J., Zhou, Y., Gao, C., Gao, Y., Li, E.J.I.T.o.A. and Propagation, 2021. Correction of complex permittivity inversion in free-space gaussian beam reflection model. 69(10), 6712-6722.
- Zhao, R., Zhang, L., Zhou, J., Koschny, T., Soukoulis, C.J.P.R.B.C.M. and Physics, M., 2011. Conjugated gammadion chiral metamaterial with uniaxial optical activity and negative refractive index. 83(3), 035105.
- Zhou, H., Qu, S., Lin, B., Wang, J., Ma, H., Xu, Z., Peng, W., Bai, P.J.I.T.o.A. and Propagation, 2012. Filter-antenna consisting of conical fss radome and monopole antenna. 60(6), 3040-3045.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Abdullah GÖZÜM
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Ankara Cumhuriyet Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
Gozum, A., Tekin, T., Akgol, O. (2025). Application of Polyurethane Paint with Increased Electrical Conductivity and Flexibility on 3D Printed Waveguides	