

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MİKRODALGA KALKANLAYICI MALZEME TASARIM VE ANALİZİ

DOKTORA TEZİ

Umut Şükrü YAŞAR

AĞUSTOS 2025

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MİKRODALGA KALKANLAYICI MALZEME TASARIM VE ANALİZİ

Umut Şükrü YAŞAR

ORCID :

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 / 06 / 2025

Tezin Savunma Tarihi : 05 / 08 / 2025

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Haydar KAYA

ORCID :

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

“Mikrodalga Kalkanlayıcı Malzeme Tasarım ve Analizi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini benden esirgemeyen, bilgi ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Haydar KAYA’ya teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan saygıdeğer hocalarım Sayın Prof. Dr. Mustafa ULUTAŞ’a ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ayhan YAZGAN’a; lisansüstü eğitimlerim boyunca bilgi ve tecrübelerinden çokca faydalandığım hocam Prof. Dr. Yunus AKALTUN’a, tüm hocalarıma ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tez sürecinde bana her daim destek olan sevgili eşim Figen YAŞAR’a; bugünlere gelmemde en büyük pay sahibi olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen çok kıymetli annem Güler YAŞAR’a ve babam Nabi YAŞAR’a; başarılarımı içtenlikle paylaşan kardeşim Ayşenur YAŞAR’a teşekkür eder, en içten minnettarlığımı sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Umut Şükrü YAŞAR

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Mikrodalga Kalkanlayıcı Malzeme Tasarım ve Analizi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Haydar KAYA’nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

05/08/2025

Umut Şükrü YAŞAR

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Elektromanyetik Dalgalar.....	3
1.2.1. Maxwell Denklemleri	4
1.2.2. Elektromanyetik Dalgaların Yayılımı	6
1.2.3. Elektromanyetik Spektrum	7
1.2.4. Mikrodalgalar ve Uygulama Alanları	9
1.2.5. Elektromanyetik Girişim.....	9
1.2.6. Elektromanyetik Uyumluluk (EMC)	11
1.3. Elektromanyetik Dalgaların Olumsuz Etkilerinden Korunma Yöntemleri.....	12
1.4. Radyasyonun Madde ile Etkileşimi.....	13
1.4.1. Fotoelektrik Olay	14
1.4.2. Compton Saçılması	15
1.4.3. Çift Oluşumu.....	16
1.4.4. İyonize Radyasyon Zayıflama Ölçüm Yöntemleri	17
1.5. Elektromanyetik Dalga Kalkanlama: Temel Kavramlar	19
1.5.1. Kalkanlayıcı Yapıların Fiziksel Özellikleri	20
1.5.2. Kalkanlayıcı Yapıların Elektriksel Özellikleri.....	20
1.5.3. Kalkanlama Etkinliği	24
1.5.4. Tek Katmanlı Arayüze Dik Geliş.....	27
1.5.5. Kalkanlama Etkinliği Ölçüm Yöntemleri	31
1.5.6. Kalkanlamada Kullanılan Malzemeler.....	34
1.6. Metalik İnce Film Üretim Teknikleri	35
1.6.1. Sputter Yöntemi ile Metalik İnce Film Üretimi.....	36

1.7. Literatür Araştırması	38
1.8. Amaç	45
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	47
2.1. Materyal.....	47
2.2. Sputter Yöntemi ile Kalkanlayıcı Numune Üretimi.....	48
2.3. Numunelerin Kalınlık Seçimi.....	50
2.4. XRD (X-Işını Difraksiyonu) ve EDAX ile Yapısal Analizler	51
2.5. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ile Morfolojik Analizler.....	52
2.6. Vektör Ağ Analizörü ile Elektromanyetik Kalkanlama Ölçümleri.....	53
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	55
3.1. Farklı Kalınlıklarda Üretilen Alüminyum İnce Filmlerin Analizleri	55
3.1.1. Alüminyum İnce Filmlerin XRD ve EDAX Analizleri	56
3.1.2. Alüminyum İnce Filmlerin SEM Analizleri	58
3.1.3. Alüminyum İnce Filmlerin Mikrodalga Kalkanlama Analizleri.....	60
3.2. Farklı Kalınlıklarda Üretilen Kobalt İnce Filmlerin Analizleri.....	62
3.2.1. Kobalt ince filmlerin XRD ve EDAX analizleri	62
3.2.2. Kobalt İnce Filmlerin SEM Analizleri.....	64
3.2.3. Kobalt İnce Filmlerinin Mikrodalga Kalkanlama Analizleri.....	66
3.3. Farklı Kalınlıklarda Üretilen Krom İnce Filmlerin Analizleri	67
3.3.1. Krom İnce Filmlerin XRD ve EDAX Analizleri	68
3.3.2. Krom İnce Filmlerinin SEM Analizleri	70
3.3.3. Krom İnce Filmlerinin Mikrodalga Kalkanlama Analizleri	71
3.4. Farklı Kalınlıklarda Üretilen Titanyum İnce Filmlerin Analizleri.....	73
3.4.1. Titanyum İnce Filmlerin XRD ve EDAX Analizleri	73
3.4.2. Titanyum İnce Filmlerinin SEM Analizleri	75
3.4.3. Titanyum İnce Filmlerinin Mikrodalga Kalkanlama Analizleri	76
3.5. Tüm Numunelerin X-band Mikrodalga Soğurma Performansları	78
3.6. Altlık Cam Malzemesinin Kalkanlanmaya Etkisi	81
3.7. Çok Katmanlı Bazı Kalkanlayıcı Yapıların Kalkanlama Etkinliği Analizi	82
4. SONUÇLAR.....	85
5. ÖNERİLER.....	87
6. KAYNAKLAR	88
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

MİKRODALGA KALKANLAYICI MALZEME TASARIM VE ANALİZİ

Umut Şükrü YAŞAR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Haydar KAYA
2025, 98 Sayfa

Bu tez çalışmasında, elektromanyetik spektrumun yoğun olarak kullanılan mikrodalga frekans bandında (8–12 GHz) elektromanyetik kalkanlama sağlayacak ultra ince metalik filmler araştırılmıştır. İnce film üretiminde önemli üstünlükleri bulunan sputter yöntemi kullanılarak, yaklaşık 80 nm ile 500 nm aralığında değişen farklı kalınlıklarda (80, 120, 170, 250, 300 ve 500 nm) saf Al, Co, Cr ve Ti ince filmleri büyütülmüştür. Büyütülen filmler, yapısal ve morfolojik özelliklerini belirlemek amacıyla XRD ve SEM analizleri ile karakterize edilmiştir. Daha sonra, üretilen filmlerin elektromanyetik kalkanlama performansları, vektör ağ analizörü ile dalga kılavuzu iletim hattı kullanılarak incelenmiş ve saçılma parametreleri üzerinden değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, ultra ince metalik filmlerin seçilen nanometre ölçeğindeki kalınlıklarda hem yansıma hem de soğurma mekanizmalarıyla gelen mikrodalga sinyallerinin %90'ından fazlasını etkin bir şekilde engellediğini ortaya koymaktadır. Özellikle alüminyum ince filmler, hafifliği ve etkin kalkanlama performansı ile öne çıkmıştır. Bu çalışma, hacimsel tasarrufun önemli olduğu mini ölçekli elektronik cihazlar için yüksek performanslı kalkanlayıcı malzeme geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektromanyetik dalga kalkanlama, Kalkanlama etkinliği, Mikrodalga, Saçılma parametreleri, İnce film

PhD. Thesis

SUMMARY

DESIGN AND ANALYSIS OF MICROWAVE SHIELDING MATERIALS

Umut Şükrü YAŞAR

Karadeniz Technical University

Institute of Science

Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Haydar KAYA

2024, 98 Pages

In this thesis, ultra-thin metallic films capable of electromagnetic shielding in the highly utilized microwave frequency band (8–12 GHz) were investigated. Using the sputter technique, which possesses significant advantages in thin film fabrication, pure Al, Co, Cr, and Ti thin films were grown at various thicknesses ranging from approximately 80 nm to 500 nm. The grown films were characterized by XRD and SEM analyses to determine their structural and morphological properties. Subsequently, the electromagnetic shielding performance of the produced films was examined using a vector network analyzer and a waveguide transmission line, and their effectiveness was evaluated based on scattering parameters. The results revealed that ultra-thin metallic films, at the selected nanometer-scale thicknesses, effectively blocked more than 90% of the incoming microwave signals through both reflection and absorption mechanisms. In particular, aluminum thin films stood out due to their lightweight nature and high shielding efficiency. This study contributes to the development of high-performance shielding materials for miniaturized electronic devices, where volumetric efficiency is crucial.

Key Words: Electromagnetic wave shielding, Shielding effectiveness, Microwave, Scattering parameters, Thin film

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Elektromanyetik dalga bileşenleri ve yayılımı	6
Şekil 2. Elektromanyetik spektrum (Motasemi & Ani, 2012)	7
Şekil 3. Işıma yolu ve iletim yolu ile elektromanyetik girişim örnekleri	10
Şekil 4. İyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon	14
Şekil 5. Fotoelektrik olay (Blinder, 2021)	15
Şekil 6. Compton saçılması olayı	15
Şekil 7. Çift oluşumu olayı	16
Şekil 8. Tek katmanlı kalkanlama malzemesinin şematik diyagramı	26
Şekil 9. Tek katmanlı arayüzeydeki iletim ve yansıma katsayıları (Balanis, 2024)	27
Şekil 10. Dalga kılavuzunda iletim ve yansıma ölçümü	32
Şekil 11. Serbest alan ölçüm yöntemi (Gonçalves vd., 2018)	32
Şekil 12. Yansımaz oda (URL-2, 2025)	33
Şekil 13. İnce film büyütme teknikleri (Abegunde vd., 2019; Aytaç & Malayoğlu, 2018; Chintada vd., 2021)	36
Şekil 14. Altlık olarak kullanılan lamel cam malzemesi	48
Şekil 15. Al, Co, Cr ve Ti kalkanlayıcı yapılar	49
Şekil 16. Nanovak marka NVTs-400 model ince film kaplama cihazı	50
Şekil 17. Panalytical Empyrean marka XRD cihazı	51
Şekil 18. FEI QUANTA FEG 450 model SEM cihazı	53
Şekil 19. HP8719D.07.48 ağ analizörü cihazı	54
Şekil 20. Alüminyum (140 nm) ince filminin XRD grafiği	57
Şekil 21. Alüminyum (260 nm) ince filminin XRD grafiği	57
Şekil 22. Alüminyum (260 nm) ince filminin enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDAX) sonucu	58
Şekil 23. 80 nm kalınlığındaki alüminyum ince filminin yüzey ve kesit SEM görüntüsü	59
Şekil 24. 140 nm kalınlığındaki alüminyum ince filminin yüzey ve kesit SEM görüntüsü	59
Şekil 25. 260 nm kalınlığındaki alüminyum ince filminin yüzey ve kesit SEM görüntüsü	60
Şekil 26. Üç farklı kalınlıktaki alüminyum ince filmlerinin S_{11} yansıma parametresi grafiği	61

Şekil 27.	Üç farklı kalınlıktaki alüminyum ince filmlerinin S_{21} iletim parametresi grafiği.....	61
Şekil 28.	Kobalt (175 nm) ince filminin XRD grafiği.....	63
Şekil 29.	Kobalt (300 nm) ince filminin XRD grafiği.....	63
Şekil 30.	Kobalt (300 nm) ince filminin enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDAX) sonucu	64
Şekil 31.	80 nm kalınlığındaki kobalt ince filminin yüzey ve kesit SEM görüntüsü	65
Şekil 32.	175 nm kalınlığındaki kobalt ince filminin yüzey ve kesit SEM görüntüsü	65
Şekil 33.	300 nm kalınlığındaki kobalt ince filminin yüzey ve kesit SEM görüntüsü	66
Şekil 34.	Üç farklı kalınlıktaki kobalt ince filmlerinin S_{11} yansıma parametresi grafiği.....	66
Şekil 35.	Üç farklı kalınlıktaki kobalt ince filmlerinin S_{21} iletim parametresi grafiği.....	67
Şekil 36.	Krom (290 nm) ince filminin XRD grafiği.....	68
Şekil 37.	Krom (500 nm) ince filminin XRD grafiği.....	68
Şekil 38.	Krom (500 nm) ince filminin enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDAX) sonucu	69
Şekil 39.	160 nm kalınlığındaki krom ince filminin yüzey ve kesit SEM görüntüsü	70
Şekil 40.	290 nm kalınlığındaki krom ince filminin yüzey ve kesit SEM görüntüsü	71
Şekil 41.	500 nm kalınlığındaki krom ince filminin yüzey ve kesit SEM görüntüsü	71
Şekil 42.	Üç farklı kalınlıktaki krom ince filmlerinin S_{11} yansıma parametresi grafiği.....	72
Şekil 43.	Üç farklı kalınlıktaki krom ince filmlerinin S_{21} iletim parametresi grafiği.....	72
Şekil 44.	Titanyum (170 nm) ince filminin XRD grafiği	73
Şekil 45.	Titanyum (250 nm) ince filminin XRD grafiği	74
Şekil 46.	Titanyum (250 nm) ince filminin enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDAX) sonucu	74
Şekil 47.	120 nm kalınlığındaki titanyum ince filminin yüzey ve kesit SEM görüntüsü	75
Şekil 48.	170 nm kalınlığındaki titanyum ince filminin yüzey ve kesit SEM görüntüsü	76
Şekil 49.	250 nm kalınlığındaki titanyum ince filminin yüzey ve kesit SEM görüntüsü	76

Şekil 50.	Üç farklı kalınlıktaki titanyum ince filmlerinin S_{11} yansıma parametresi grafiği.....	77
Şekil 51.	Üç farklı kalınlıktaki titanyum ince filmlerinin S_{21} iletim parametresi grafiği.....	77
Şekil 52.	Üç farklı kalınlıktaki alüminyum ince filmlerinin mikrodalga soğurma yüzdeleri	79
Şekil 53.	Üç farklı kalınlıktaki kobalt ince filmlerinin mikrodalga soğurma yüzdeleri	79
Şekil 54.	Üç farklı kalınlıktaki krom ince filmlerinin mikrodalga soğurma yüzdeleri	80
Şekil 55.	Üç farklı kalınlıktaki titanyum ince filmlerinin mikrodalga soğurma yüzdeleri	80
Şekil 56.	Cam altlık malzemesinin S_{11} iletim parametresi grafiği.....	81
Şekil 57.	Cam altlık malzemesinin S_{21} iletim parametresi grafiği.....	82
Şekil 58.	Çok katmanlı bazı kalkanlayıcı yapıların iletim parametresi grafiği.....	83

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Radyasyon zayıflatmada kullanılan bazı maddelerin atom numarası, yoğunluk, LAC ve MAC değerleri (URL-1,2025)	18
Tablo 2. Permittivite ve permabilite değerlerinin karşılaştırmalı özellikleri	24
Tablo 3. Desibel değerine karşılık soğurma yüzdeleri.....	25
Tablo 4. Farklı iletkenlik ve kalınlıktaki numuneler için 9 GHz frekansında teorik S_{11} ve S_{21} sonuçları.....	30
Tablo 5. Magnetron sputter ince film büyütme parametrelerinin etkisi	37
Tablo 6. Mikrodalga kalkanlama etkinliği analiz edilen Al, Co, Cr ve Ti malzemelerinin fiziksel özellikleri	47
Tablo 7. Tüm numunelerin 9 GHz frekansında yansıma, iletim ve soğurma yüzdeleri	86

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

h	: Planck sabiti
D	: Elektrik akı yoğunluğu
E	: Elektrik alan yoğunluğu
B	: Manyetik akı yoğunluğu
H	: Manyetik alan yoğunluğu
p	: Elektriksel yük yoğunluğu
J	: Akım yoğunluğu
λ	: Dalga boyu
c	: Işık hızı
eV	: Elektron volt
μ	: Doğrusal zayıflama katsayısı
μ_m	: Kütle zayıflama katsayısı
$t_{1/2}$	: Yarı değer katmanı
Γ	: Yansıma katsayısı
R	: Yansıma oranı
T	: İletim oranı
A	: Soğurma oranı
Z_0	: Ortam empedansı
Z	: Malzemenin karakteristik empedansı
δ	: Deri kalınlığı
σ	: Malzemenin elektriksel iletkenliği
ω	: Dalganın açısal frekansı
ϵ	: Malzemenin elektriksel geçirgenliği
ϵ_0	: Vakumun elektriksel geçirgenliği
ϵ_r	: Malzemenin göreceli elektriksel geçirgenliği (dielektrik sabiti)
ϵ'	: Malzemenin reel elektriksel geçirgenlik değeri
ϵ''	: Malzemenin sanal elektriksel geçirgenlik değeri
μ	: Malzemenin manyetik geçirgenliği
μ_0	: Vakumun manyetik geçirgenliği

μ_r	: Malzemenin göreceli manyetik geçirgenliği
μ'	: Malzemenin reel manyetik geçirgenlik değeri
μ''	: Malzemenin sanal manyetik geçirgenlik değeri
CE	: Avrupa uygunluk işareti
CVD	: Kimyasal buhar biriktirme yöntemi
dB	: Desibel
DC	: Doğru akım
EDAX	: Enerji Dağılımı X-Işını Spektroskopisi
EMC	: Elektromanyetik uyumluluk
EMI	: Elektromanyetik girişim
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme yöntemi
RADAR	: Radyo dalgası ile tespit ve menzil belirleme
RF	: Radyo frekansı
SE	: Kalkanlama etkinliği
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
TAEK	: Türkiye atom enerjisi kurumu
TSE	: Türk standartları enstitüsü
UV	: Ultraviyole
VNA	: Vektör ağ analizörü
XRD	: X-Işını Difraksiyonu

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Elektromanyetik dalga teorisi, 1886 yılında İskoç matematikçi James Clerk Maxwell tarafından ortaya konulmuş ve bu keşif, yapay elektromanyetik dalgaların insan yaşamına girmesini sağlamıştır. Teknolojinin hızlı gelişimiyle birlikte, elektromanyetik dalgalar geniş bir kullanım alanı bulmuş, özellikle kablosuz iletişim, görüntüleme sistemleri, konum ve hız tespiti gibi uygulamalarda önemli bir rol oynamaya başlamıştır. Elektromanyetik dalgaların birçok sektörde artan kullanımı, çevremizde farklı frekanslardaki dalgaların artmasına ve elektromanyetik kirlilik olarak adlandırılan olgunun oluşmasına neden olmuştur. Çevredeki bu bağımsız elektromanyetik dalgaların birbirleriyle etkileşimi sonucu elektromanyetik girişimler (Electromagnetic Interference, EMI) ortaya çıkmakta ve bu girişimler, dalgaların özelliklerini bozarak elektronik cihazların yanlış ya da eksik çalışmasına yol açmaktadır (Devender & Ramasamy, 1997; Kaur vd., 2011). Özellikle askeri ve sağlık gibi kritik öneme sahip sistemlerde, sinyallerde bozulmalara yol açabilecek girişimin ortadan kaldırılması ve bu sistemlerin minimum hata ile çalışmasının sağlanması büyük önem arz etmektedir.

Elektromanyetik kirliliğin neden olduğu bir diğer önemli sorun, insan sağlığı üzerindeki olası olumsuz etkileridir. Elektromanyetik dalgalar, diğer bir genel ifade ile elektromanyetik ışıma (radyasyon), iki ana kategoriye ayrılır; iyonlaştırıcı radyasyon ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon. İyonlaştırıcı radyasyon, elektromanyetik spektrumda belirli bir frekansın üzerinde olan veya enerjisi belirli bir elektron volt değerinin üstünde olan yüksek enerjili radyasyon türüdür. Bu radyasyon türü, nüfus ettiği atomlardan elektron kopararak iyonlaşmaya yol açar. İnsan vücuduna etki ettiğinde ise DNA hasarları, mutasyonlar ve kanser gibi ciddi biyolojik etkiler meydana getirebilir (Abu Bakar vd., 2019; Karmaker vd., 2021). İyonlaştırıcı olmayan radyasyon ise daha düşük frekans ve enerjiye sahip, iyonlaştırıcı özelliğe sahip olmayan radyasyon türüdür. Her ne kadar bu tür radyasyonun insan sağlığına doğrudan zararlı olmadığı düşünülse de, uzun süre ve yüksek dozda maruz kalındığında, vücutta ısınma, doku hasarları (Bortkiewicz, 2019), baş ağrısı (J. Wang vd., 2017), uyku bozukluğu (Shin vd., 2017) ve stres gibi etkilere neden olabileceği bilinmektedir. Bunun güzel örneklerinden biri, iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak kabul edilen güneş ışınlarıdır. Güneş ışınlarının içerisinde bulunan, yüksek enerjili

ancak iyonlaştırıcı sınırın altında kalan morötesi (Ultraviyole, UV) ışınlar, insan derisine uzun süre nüfuz ettiğinde ciltte yanıklara sebep olabilmektedir.

Günümüzde, elektromanyetik girişimleri ortadan kaldırmak ve elektronik cihaz ve sistemler üzerindeki olumsuz etkilerini minimize edebilmek amacıyla, elektromanyetik dalga kalkanlayıcı malzemeler geliştirilmiştir. Elektromanyetik dalgaları yüksek oranda engelleyebilen kalkanlayıcı yapılar ile ilgili pek çok bilimsel çalışma yapılmakta olup, etkili kalkanlayıcı yapının belirlenmesine yönelik araştırmalar sürekli devam etmektedir. Tasarlanan bu yapılar, belirli frekans değerinde üzerlerine nüfuz eden dalgaların tamamını veya bir kısmını engelleyerek, bu dalgaların elektronik cihaz ve sistemlere ve insan sağlığına potansiyel zararlarını ortadan kaldırmakta veya farklı dalgaların etkileşerek girişim yoluyla bozulmalarını önlemek için kullanılmaktadır.

Elektromanyetik kalkanlayıcı malzemelerin geometrik ve fiziksel özellikleri, kalkanlama etkinliğini (Shielding Effectiveness, SE) belirleyen önemli faktörlerdir. Kullanılan malzemenin elektriksel iletkenliği (Pavlik vd., 2015), manyetik-dielektrik geçirgenliği (Ersoy, 2018), atomik ağırlığı (W. C. Fan vd., 1996), empedansı (Gao vd., 2023), geometrisi (Al-Saleh & Al-Sharman, 2023) ve kalınlığı (Al-Saleh & Sundararaj, 2009, 2012) gibi özellikler, malzemenin kalkanlama kapasitesini etkileyen temel unsurlar arasında yer almaktadır. Kalkanlamadaki temel ilke, elektromanyetik dalgaların engelin arkasına geçmemesidir; bu nedenle kalkanlamanın iki ana bileşeni bulunmaktadır: yansıma ve soğurma. Bu süreçlerden biri, gelen dalganın engele nüfuz etmeden yüzeyden geri yansması, diğeri ise dalganın yansımadan engele nüfuz edip engel içerisinde soğurularak yok olmasıdır. Yansıma olayı genellikle iletken engellerde veya hava ortamına göre empedansı uyumsuz olan malzemelerde, dalganın yüzeyden geri dönmesi şeklinde gerçekleşirken; soğurma, dalganın malzeme içine nüfuz ederek yansıma veya iletim olmaksızın ısıya dönüşmesiyle gerçekleşir. Örneğin, beyaz ve siyah renkteki engellere düşen görünür ışık dalgaları ele alındığında, beyaz renkli engel üzerine düşen dalgalar büyük ölçüde yüzeyden yansırken, siyah renkli engel üzerindeki dalgalar büyük oranda soğurulup malzeme içerisinde ısıya dönüşmektedir. Gelen dalganın engelin içine nüfuz edebilmesi için yansıma olmamalı, yani malzemenin empedansı hava ortamıyla uyumlu olmalıdır (Culhaoglu vd., 2013; Khalid vd., 2017). Malzemenin karmaşık dielektrik ve manyetik geçirgenliklerinin sanal bileşenleri, engele nüfuz eden elektromanyetik dalgaların enerjisini soğurarak ısıya dönüştürür (Prokopchuk vd., 2021). Soğurma, özellikle RADAR (Radio Detection And Ranging) tespit sistemlerinden saklanma ihtiyacı olan durumlarda

istenilen bir özelliktir. RADAR cihazlarından hedefe gönderilen elektromanyetik dalgaların, hedef üzerinde soğurulup yok edilerek geri yansımalarının engellenmesi ve böylece hedefin varlığı ve konumunun gizlenmesi amaçlanmaktadır. Yansıma ise; bir kişinin, bir cihazın veya belirli bir bölgenin dış ortamdaki elektromanyetik dalgalardan izole edilmesi gerektiğinde uygulanan bir yöntemdir. Bu yöntemin en temel örneklerinden biri Faraday kafesleridir. Yüksek iletkenliğe sahip bir madde ile kaplanan bu kafeslerden içeriye elektromanyetik dalgalar girememektedir. Örneğin, zayıf akım taşıyan ve dış etkenlerden kolay etkilenebilecek koaksiyel kabloların en dış plastik izolesinin hemen altında iletken bir örgü, yani zırh, bulunmaktadır. Bu zırh, dış ortamdaki elektromanyetik dalgaların yani gürültülerin kablonun içine nüfuz etmeden yansıtılarak geri dönmesini sağlar ve böylece kablo içerisindeki zayıf akımlı bilgi sinyalinin bozulmasını önler.

Günlük hayatta, bazı durumlarda elektromanyetik dalgaların soğurulması istenirken, bazı durumlarda ise asıl amaç, dalganın engel arkasına geçmesini engelleyerek geri yansıtılmasıdır. Literatürde, elektromanyetik dalga soğurma ve elektromanyetik dalga yansıtma ile ilgili yapılan çalışmaların konusu, amacı ve kullanılan materyaller farklılık göstermektedir. Elektromanyetik dalgaların soğurulmasına yönelik çalışmalarda daha çok kompozit malzemeler kullanılırken, yansıtıcı malzeme geliştirme çalışmalarında ise büyük oranda iletken malzemeler tercih edilmektedir. Bu tez çalışmasında da elektromanyetik spektrumun yaygın olarak kullanılan 8-12 GHz X-bant mikrodalga frekans aralığında yüksek kalkanlama etkinliği gösteren nanometre kalınlığındaki metalik ince filmlerin performansı incelenmiştir.

1.2. Elektromanyetik Dalgalar

Elektromanyetik dalgalar, radyasyonun dalga formunda yayılan bir türüdür. Parçacık radyasyonu (alfa, beta, nötron) ile karşılaştırıldığında, elektromanyetik dalgaların kütlesi yoktur ve bu nedenle enerjilerini dalga hareketiyle taşırlar (Azzurli & Lechner, 2014). Taşınan enerji miktarı, dalganın sahip olduğu frekansa (Hz) bağlıdır; bu frekans değerleri düşükten yükseğe geniş bir yelpazede değişiklik gösterir. Dalga boyu ise frekans ile ters orantılıdır; dolayısıyla frekans arttıkça dalga boyu kısalır ve enerji miktarı artar. Elektromanyetik spektrum olarak adlandırılan bu geniş frekans aralığı, farklı enerji seviyelerine göre yedi ana bölüme ayrılır (Zwinkels, 2015). Spektrumun yüksek frekanslı kısmı, insan dokularında iyonlaştırıcı ve zararlı etkiler oluşturan türü "iyonlaştırıcı" olarak

adlandırılırken, doğrudan zararlı olmayan kısım ise "iyonlaştırıcı olmayan" olarak tanımlanır (Kontomaris vd., 2019; Sowa vd., 2012). Günümüzde, elektromanyetik dalgalar iletişim teknolojileri, tıbbi uygulamalar, askeri sistemler ve görüntüleme teknolojileri v.b. alanlarda çok geniş bir kullanım alanı bulmaktadır.

Elektromanyetik dalgaların temel parçacığına foton denir. Elektromanyetik dalgaların temel taşıyıcısı olan foton, hem dalga hem de parçacık özellikleri gösteren kütesiz bir enerji paketidir. Fotonun taşıdığı enerji, dalganın frekansına bağlı olarak değişir ve Planck denklemi ile ifade edilir (Chang, 2017; Franklin, 2013).

$$E = hf \quad (1)$$

Burada “ E ”, fotonun enerjisini (Joule cinsinden), h , Planck sabitini (6.626×10^{-34} J·s), “ f ” ise elektromanyetik dalganın frekansını (Hz cinsinden) temsil eder. Bu ifade, foton enerjisinin doğrudan frekans ile doğru orantılı olduğunu ve yüksek frekanslı dalgaların daha fazla enerji taşıdığını göstermektedir.

1.2.1. Maxwell Denklemleri

Matematikçi ünlü bilim insanı James Clerk Maxwell, kendisinden önceki bilim insanlarının keşiflerini derleyerek elektromanyetik alan teorisini ortaya koymuştur. Gauss, elektrik yüklerinin elektrik alanı oluşturduğunu ve manyetik alanın döngüsel doğasını açıklamıştır. Ampère, elektrik akımının elektrik alanı oluşturduğunu ve bu değişken elektrik alanının manyetik alanlar meydana getirdiğini ortaya koymuştur. Faraday ise değişken bir manyetik alanın, elektrik alanı ürettiğini göstermiştir. Maxwell, bu bağımsız yasaları bir araya getirerek, elektromanyetik dalgaların varlığını ve bu dalgaların hareketini açıklayan Maxwell denklemlerini geliştirmiştir. Bu denklemler, birbirleriyle ilişkili olan fiziksel yasaların birleşimini temsil eder ve modern elektromanyetizmanın temelini oluşturur (Balanis, 2016; Lax & Nelson, 1976).

Gauss’un elektrik alan yasası; kapalı bir yüzeyden geçen elektrik alan çizgilerinin toplamının, bu yüzeyin içerisinde bulunan yük miktarı ile ilişkili olduğunu ifade etmektedir. Matematiksel olarak bu yasa, elektrik akı yoğunluğunun diverjansı ($\nabla \cdot \mathbf{D}$) ile yük yoğunluğu (ρ) arasındaki ilişkiyi gösterir. Bu denklem, bir kapalı yüzeyin içerisindeki

net elektrik yükü ile o yüzeyden geçen elektrik alan akısı arasındaki bağıntıyı açıklamaktadır. Gauss yasası şu şekilde ifade edilir:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2)$$

Gauss'un manyetik alan yasası; manyetik kutuplar ile manyetik alan arasındaki ilişkiyi açıklar. Yasa, "Kapalı bir yüzeyden geçen toplam manyetik akının her zaman sıfıra eşit olduğunu" belirtir; bu da manyetik alan çizgilerinin bir kaynaktan çıkıp tekrar o kaynağa döndüğünü ifade eder. Bu denklem, doğada izole edilmiş bir manyetik kutbun var olmadığını ve manyetik alan çizgilerinin kapalı döngüler oluşturduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, manyetik akı yoğunluğunun diverjansı ($\nabla \cdot \mathbf{B}$) her zaman sıfırdır, bu durum matematiksel olarak şu şekilde ifade edilir:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

Faraday'ın indüksiyon yasası; değişken manyetik alanların elektriksel gerilim üretimi üzerindeki etkisini açıklayan temel bir fizik ilkesidir. Bu yasa, özellikle transformatör ve alternatör gibi elektriksel cihazların çalışma ilkelerinde de önemli bir rol oynamaktadır. Faraday'ın yasası, bir devredeki manyetik alanın zamanla değişiminin, devrede indüklenen elektriksel gerilim ile doğrudan ilişkili olduğunu ifade eder. Elektromanyetik dalgalar açısından ise, aynı şekilde değişen manyetik alanların, daima kendisine dik yönde değişken bir elektrik alanı oluşturduğunu ortaya koyar.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (4)$$

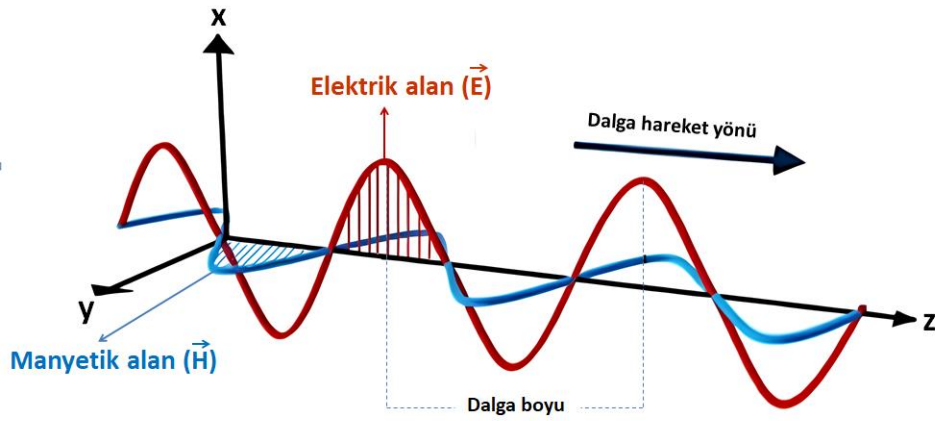
Ampere yasası; elektrik akımlarının ($\mathbf{J}$) çevresinde manyetik alanlar oluşturduğunu ifade eden temel bir ilkedir. Maxwell, bu yasaya bir ekleme yaparak, zamanla değişen bir elektrik akımının, bu akımın geçtiği iletken etrafında zamanla değişen bir manyetik alan oluşturacağını ortaya koymuştur. Maxwell'in bu katkısı, yalnızca sabit akımların değil, zamana bağlı değişen akımların da manyetik alan ürettiğini göstererek, elektromanyetik alan teorisinin gelişimine önemli bir katkıda bulunmuştur.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (5)$$

Ampere ve Faraday yasalarının analizi ile, elektrik ve manyetik alanların karşılıklı olarak birbirini desteklediği ve dalga formunda elektromanyetik yani elektrik ve manyetik alan olarak ilerlediği ispatlanmıştır.

1.2.2. Elektromanyetik Dalgaların Yayılımı

Elektromanyetik dalgalar, elektrik alan ve manyetik alan bileşenlerinden oluşur ve bu iki bileşen, birbirine dik ve aynı fazlı olarak salınırlar (Geetha vd., 2009). Maxwell denklemlerinde bahsedildiği gibi bu bileşenlerden birinin oluşumu diğerini de tetikler ve bu şekilde elektromanyetik dalgalar, boşlukta veya madde ortamında enerjilerini taşımaya devam ederler. Örneğin, cep telefonlarında ses işaretleri elektrikselsel işaretlere dönüştürülür ve kimi işlemlerden sonra bir anten vasıtasıyla hava ortamına ısıtılan elektromanyetik dalgalar ışık hızında ($c = 3 \times 10^8$ m/s) yayılırlar. Elektromanyetik dalgalar, ses ya da su dalgalarının aksine enine dalgalar olup, elektrik ve manyetik bileşenlerine dik olarak hareket ederler (Şekil 1).



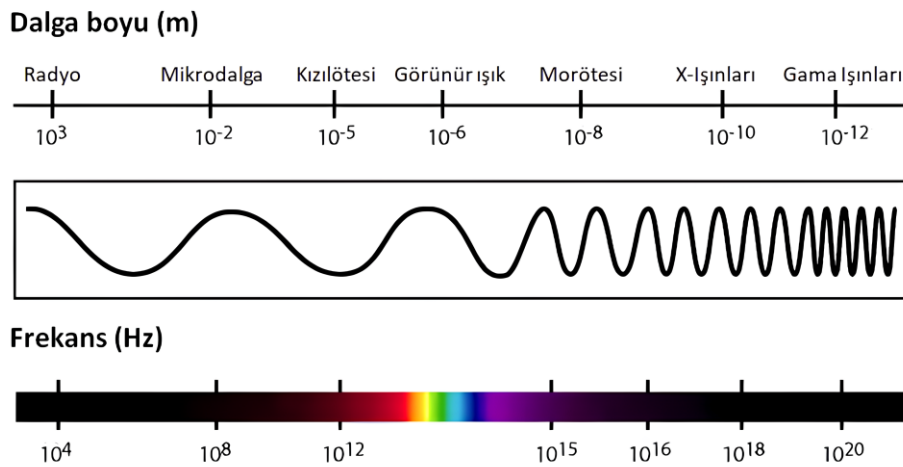
Şekil 1. Elektromanyetik dalga bileşenleri ve yayılımı

Elektromanyetik dalgalar, tüm zamanla değişen işaretlerde olduğu gibi belirli bir frekans (f), periyot (T), dalga boyu (λ) ve ortamda ilerleme hızına (v) sahiptir. Dalgaların ilerleme hızı sahip oldukları frekans veya periyottan bağımsızdır. Dalgaların yayılma hızı ortamın kayıpsız olup olmamasına göre değişiklik göstermektedir (Morgenthaler, 1958).

Yüksek frekanslı işaretler, daha kısa dalga boylarına sahip olduğundan, yayılım sırasında daha fazla zayıflar ve bu nedenle uzun mesafelere ulaşma kapasiteleri daha düşüktür. Ancak, yüksek frekanslı sinyallerin bant genişliği daha fazladır, bu da onların daha fazla enerji ve bilgi taşıma kapasitesine sahip olmasını sağlar (J. Yu vd., 2018). Elektromanyetik dalgalar hava, su, boşluk, dalga kılavuzu, fiber optik kablo gibi ortamlarda yol alırlar. İlerlerken farklı ortama geldikleri zaman yansıma, kırılma, kırınım, iletilme veya soğrulma gibi olayları gerçekleştirebilirler.

1.2.3. Elektromanyetik Spektrum

Elektromanyetik dalgalar, birkaç hertz (Hz) frekanstan başlayarak, kozmik olaylar sonucunda oluşan ve frekans değeri 10^{26} Hz'e kadar ulaşabilen geniş bir frekans yelpazesine sahiptir. Bu dalgalar, frekans veya periyotlarına bağlı olarak farklı fiziksel özellikler gösterirler ve muhtelif alanlarda kullanılabilirler. Örneğin, elektromanyetik spektrumun görünür ışık aralığındaki dalgalar insan gözüyle algılanabilen fiziksel özelliğe sahipken, diğer frekans aralıklarındaki dalgalar gözle görülemezler. Yüksek frekansa sahip X ışınları insan vücuduna nüfuz edip görüntüleme sağlayabilirken, radyo dalgaları insan bedeninde görüntü elde etmede kullanılamazlar. Bu ve buna benzer geniş kullanım yelpazesi ve fiziksel farklılıklar nedeniyle, elektromanyetik dalgalar frekanslarına göre 7 farklı sınıfa ayrılmıştır. Bu sınıflandırma "elektromanyetik spektrum" olarak adlandırılır (David K. Cheng, 1993; Zwinkels, 2015).



Şekil 2. Elektromanyetik spektrum (Motasemi & Ani, 2012)

Elektromanyetik dalgaların her bir sınıfı çeşitli uygulama alanlarında önemli üstünlükler sunmaktadır. Radyo dalgaları, özellikle iletişim teknolojilerinde geniş bir kullanım alanına sahiptir; televizyon, radyo yayıncılığı ve mobil iletişim gibi sistemler, bu dalgaların verimli bir şekilde iletilmesi ve alınmasına dayanır (Aragón-Zavala vd., 2021). Mikrodalgalar radar sistemlerinde, uzay araştırmalarında ve telekomünikasyonda kritik bir rol oynar. RADAR (Radyo Tespiti ve Mesafe Ölçümü) sistemleri, özellikle hava trafik kontrolü, karayolu trafik kontrolü ve denizcilik alanlarında, nesnelerin konumunu veya hızını belirlemek için mikrodalga teknolojisinden faydalanır (C. Li vd., 2017). Kızılötesi ışınlar, tıbbi görüntüleme ve termal görüntüleme uygulamalarında yaygın olarak kullanılır, bu sayede iç organların sıcaklık farkları gözlemlenerek sağlık sorunları daha doğru tespit edilebilir (Sousa vd., 2017). Görünür ışık ise, günlük yaşamda temel bir rol oynar ve optik teknolojilerde, mikroskoplar ve kameralar gibi araçlarda ışığın özellikleri kullanılarak ayrıntılı incelemeler yapılır. Morötesi ışınlar, özellikle sterilizasyon süreçlerinde ve tıbbi uygulamalarda, mikroorganizmaların yok edilmesi için kullanılır (Gupta vd., 2013). X-ışınları, tıp alanında radyografi ve tomografi gibi önemli teşhis yöntemlerinde (Laal, 2013), endüstriyel uygulamalarda ise malzeme analizleri için kullanılır (Mino vd., 2018). Ayrıca, bilimsel araştırmalarda, özellikle atom altı düzeydeki yapıları incelemek için büyük öneme sahiptir. Gama ışınları, nükleer enerji üretimi ve tıbbi tedavi yöntemlerinde (özellikle kanser tedavisinde) yaygın olarak kullanılırken (Asri vd., 2019.), kozmik araştırmalarda da evrenin derinliklerini anlamaya yönelik gözlemler için faydalıdır.

Elektromanyetik spektrumda, sağlığa doğrudan zararlı olarak kabul edilen iyonlaştırıcı türleri, yüksek frekanslı ultraviyole ışınlarından başlayarak X-ışınları ve gama ışınları olarak sıralanabilir. Bu iyonlaştırıcı elektromanyetik dalgalar, yüksek enerji taşıdıkları için atomlardan elektron koparabilme kapasitesine sahiptir ve bu durum, canlı organizmalarda biyolojik etkiler yaratabilir. İyonlaştırıcı radyasyon kaynaklarını kullanarak faaliyet göstermek isteyen tesisler, ülkemizde Türkiye Atom Enerjisi Kurumu'na (TAEK) başvurarak lisans almak zorundadır. Lisans başvurusunun ardından, tesisler gerekli eğitimleri tamamladıktan sonra düzenli denetimlere tabi tutulur. Bu denetimler, belirlenen güvenlik limitlerine uyulup uyulmadığını, çalışanların gözetiminin sağlanıp sağlanmadığını ve güvenlik önlemlerinin etkin bir şekilde alınıp alınmadığını kontrol etmek amacıyla gerçekleştirilir (Şimşekçi, 2018).

1.2.4. Mikrodalgalar ve Uygulama Alanları

Mikrodalgalar, elektromanyetik spektrumda radyo dalgaları ile kızılötesi dalgalar arasında yer alan ve dalga boyu 1 metre ile 1 milimetre arasında değişen, frekansı ise 300 MHz ile 300 GHz arasında olan elektromanyetik dalga türleridir (Villanueva vd., 2018). Mikrodalgalar, radar tespit sistemleri, mikrodalga fırınları, kablosuz iletişim teknolojileri, radyo ve televizyon yayıncılığı, uydu sistemleri, tıbbi görüntüleme ve tedavi uygulamaları ile ileri seviye iletişim sistemleri (5G, 6G) gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. İletişim teknolojilerindeki hızlı gelişmelerle birlikte, daha yüksek frekanslı mikrodalgalar kullanılmakta ve daha geniş frekans bantları tercih edilmektedir. Bu durum, gün geçtikçe insanların ve cihazların maruz kaldığı mikrodalga işaretlerinin miktarının artmasına yol açmaktadır (Shafi vd., 2018).

Mikrodalgalar, iyonlaştırıcı özellik taşımayan elektromanyetik dalgalardır ve bu nedenle doğrudan biyolojik dokularda iyonlaşma veya genetik hasar oluşturmazlar. Ancak, yüksek frekanslı mikrodalga ışımasının bazı durumlarda sağlığa ve çevreye etkileri olabilir. Özellikle yoğun mikrodalga işaretlerine maruz kalma, elektromanyetik girişim veya ısınma gibi fiziksel etkiler yaratabilir. Bu nedenle, elektromanyetik girişimlerin minimize edilmesi ve mikrodalga ışımasının insan sağlığına etkisi açısından kontrollü bir şekilde kullanılması için belirli durumlarda mikrodalga sistemlerinin kalkanlanması gerekebilir. Bu tür önlemler, hem sağlık hem de cihazların performansının korunması açısından önemlidir (Kumar vd., 2021).

1.2.5. Elektromanyetik Girişim

Elektrik ve elektronik sistemler, işlevleri gereği yapay elektromanyetik dalgalar üretir veya kullanırlar; bunun yanı sıra sistemde istenmeyen ve gereksiz elektromanyetik ışımalara da yol açabilirler. Bu bağımsız elektromanyetik dalgalar iletim ortamlarında (hava, su, iletken) birbirleriyle etkileşime girerek elektromanyetik girişimler oluşturabilmektedirler. Girişimler sonucunda, cihazlar ya da sistemler beklenenden saparak eksik veya hatalı çalışabilirler (Kaur vd., 2011). Girişim olayında üç temel unsur bulunur: Bozucu elektromanyetik dalgayı üreten kaynak, kaynağın ürettiği yüksek enerjili dalgadan etkilenen ve korunması gereken kurban sistem, ve girişimin gerçekleştiği iletim ortamı, yani kuplaj unsurlarıdır. Elektromanyetik girişim, hava yoluyla ışıma ya da iletken bir hat

üzerinden iletkenlik yoluyla meydana gelebilir. Bu iki farklı girişim türünü engelleme yöntemleri de birbirinden farklıdır. İletim yoluyla oluşan girişimlerin engellenmesi için filtreleme, topraklama ve gürültü azaltma teknikleri uygulanırken, ışıma yoluyla oluşan girişimlerin engellenmesi için kalkanlama yapılması gerekmektedir. Yapılan bu tez çalışmasında mikrodalga frekanslarda kalkanlayıcılık sağlayan yapılar ile de ışıma yolu ile gerçekleşen girişimler engellenebilmektedir (Zhou vd., 2022).

Elektromanyetik girişim kaynakları iki ana kategoriye ayrılmaktadır: Doğal ve yapay girişim kaynakları. Doğal girişim kaynaklarına örnek olarak yıldırım düşmesi veya güneş patlamaları gibi olaylar verilebilir. Bu olaylarda yüksek akım değişimlerine bağlı olarak yüksek enerjili elektromanyetik ışıma meydana gelir ve bu istenmeyen ışımlar, etkileşimde bulundukları cihazlarda girişime bağlı sorunlara yol açabilir. Yapay girişimler ise insan yapımı elektromanyetik dalgaların iletim hatları veya ışıma yoluyla meydana getirdiği girişimlerdir (Bianchi & Meloni, 2007). Geçmişte girişim önlemlerinin yetersiz olduğu dönemlerde girişimin olumsuz etkileri daha sık yaşanmaktaydı. Örneğin, cep telefonlarına gelen işaretlerin tüplü televizyonlarda yayın bozulmalarına yol açması gibi durumlarla karşılaşılabiliniyordu. Ancak günümüzde, hem girişim kaynaklarının hem de girişime maruz kalabilecek cihazların girişime karşı korunmasıyla ve elektromanyetik uyumluluk standartlarını sağlaması ile bu tür olumsuz etkiler büyük ölçüde azaltılmaktadır.



Şekil 3. Işıma yolu ve iletim yolu ile elektromanyetik girişim örnekleri

Elektromanyetik girişim kontrolü, bir cihaz üzerinde temelde iki açıdan ele alınmaktadır: birincisi, alt sistemler ile cihazın kendisi arasında meydana gelen girişim; ikincisi ise dış etkilere kaynaklanan girişimlerdir. Sistem içi girişim, cihazın kendi alt sistemleri arasında oluşurken sistemler arası girişim ise farklı cihazların birbirine etki etmesiyle ortaya çıkar. Elektromanyetik uyumluluk standartlarının sağlanabilmesi için bu iki ihtimal için de önlemler alınması gerekmektedir (Sabath, 2017).

1.2.6. Elektromanyetik Uyumluluk (EMC)

Bir elektronik cihazın veya sistemin, diğer sistemleri veya kendi bileşenlerini olumsuz yönde etkileyebilecek elektromanyetik gürültü oluşturmaması ve aynı şekilde, dış kaynaklı gürültülerden etkilenmeksizin işlevini sürdürebilmesi, elektromanyetik uyumluluğun (EMC) sağlanması ile mümkün olmaktadır. Teknolojinin hızla gelişmesi ile birlikte elektromanyetik girişim önemli bir sorun haline gelmiş ve meydana gelebilecek girişimlerin olumsuz etkisini ortadan kaldırmak için cihazların elektromanyetik uyumluluklarını sağlamak zorunlu hale gelmiştir. Cihazların uyumluluğunu sağlamak için ekranlama (kalkanlama), topraklama, filtreleme, uyumlu devre tasarımı veya parazit izolasyonu gibi yöntemler kullanılabilmektedir. Bu yöntemler ile elektromanyetik uyumluluğu sağlandığı düşünülen cihaz veya sistemler akredite edilmiş kamu veya özel kurumların laboratuvarlarında ekranlı oda (shielded room), yansısız oda (anechoic chamber) veya açık alan (open area) gibi ortamlarda testlere tabi tutularak elektromanyetik uyumluluklarının olup olmaması ispat edilmektedir (Weston, 2016). Emisyon ve bağışıklık testlerinden başarı ile geçen cihaz veya sistemlerin CE veya TSE işareti alması için gerekli şartlardan birisi sağlanmış olmaktadır.

Bu tez kapsamında, cihazların elektromanyetik uyumluluğunu sağlamak amacıyla, elektromanyetik kalkanlama özelliğine sahip ince yapılar geliştirilmiş ve bu yapıların kalkanlama etkinliği değerlendirilmeye tabi tutulmuştur. Üretilen nanometre ölçeğindeki ince filmlerin yüzeyine X-band frekans aralığında yönlendirilen elektromanyetik dalgaların büyük ölçüde engellendiği tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, bu ince yapılar sayesinde X-band frekansında çalışan sistemlerin elektromanyetik uyumluluğunun etkin bir şekilde sağlanabileceğini ortaya koymaktadır.

1.3. Elektromanyetik Dalgaların Olumsuz Etkilerinden Korunma Yöntemleri

Elektromanyetik dalgalar, günlük yaşamımızda sayısız fayda sunarken, kontrolsüz maruziyet durumunda insan sağlığı ve elektronik cihazlar üzerinde olumsuz etkiler oluşturabileceği bilinmektedir. Gelişen teknolojilerle birlikte elektromanyetik dalgaların hayatımızdaki rolü giderek artmakta ve bu durum, bu dalgalarla güvenli bir şekilde nasıl bir arada yaşanması gerektiği konusunu önemli bir tartışma konusu haline getirmektedir. Elektromanyetik dalgalardan korunma yöntemleri, dalgaların tamamen ortadan kaldırılmasını değil, mevcut dalgalarla kontrollü bir şekilde etkileşim içinde bulunmayı hedeflemektedir.

Bu bağlamda, elektromanyetik dalgalardan korunmada temel alınması gereken üç ana yaklaşım öne çıkmaktadır: mesafe, kalkanlama ve maruz kalma süresi. Bu yöntemler, hem bireylerin hem de teknolojik sistemlerin elektromanyetik dalgaların olumsuz etkilerinden korunmasında kritik bir rol oynamaktadır.

Elektromanyetik dalgalardan korunmanın en temel yöntemlerinden biri, mesafeyi artırmaktır. Elektromanyetik radyasyon kaynağına olan uzaklık arttıkça, elektromanyetik güç yoğunluğu mesafenin karesiyle ters orantılı olarak azalır. Örneğin, mesafe üç katına çıktığında, güç yoğunluğu dokuz kat azalır. Bu özellik, elektromanyetik dalgaların zararlı etkilerinden korunmada mesafenin etkili bir araç olduğunu göstermektedir.

Bir diğer korunma yöntemi, elektromanyetik dalga kaynağı ile korunması hedeflenen varlık arasına, dalgaların iletimini engelleyecek bir kalkan yerleştirilmesidir. Elektromanyetik kalkanlar, dalgaların büyük bir kısmının engelin arkasına geçmesini engeller ve böylece korunmak istenen varlık güvence altına alınır.

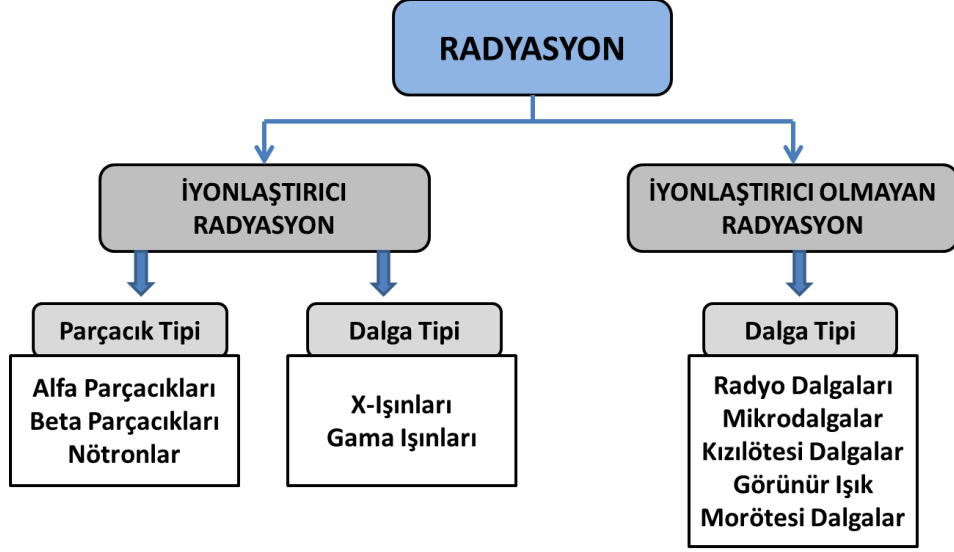
Ancak, bazı durumlarda mesafe artırmak veya kalkan kullanmak mümkün olmayabilir. Örneğin, cep telefonu ile görüşme yapan bir kişi, telefonu başına oldukça yakın tutmak zorundadır. Bu tür durumlarda, elektromanyetik kalkanların kullanımı da uygun olmayabilir. Bu gibi durumlarda, elektromanyetik dalgaya maruz kalma süresini minimumda tutmak, zararlı etkilerden korunmak için etkili bir yöntemdir. İnsan vücudu gibi elektromanyetik dalgayı soğuran yapılar, uzun süreli maruz kalma sonucunda aşırı ısınma ve yapısal bozulmalara yol açabilir. Bu sebeple, elektromanyetik dalgalardan korunmanın en etkili yolu, ya kalkan kullanmak, ya kaynağa olan mesafeyi mümkün olan en yüksek seviyeye çıkarmak ya da maruz kalma süresini en aza indirmektir (J. H. Kim, 2018; Ryu vd., 2013).

1.4. Radyasyonun Madde ile Etkileşimi

Radyasyon, enerjinin elektromanyetik dalgalar veya parçacıklar hâlinde yayılmasıdır. Radyasyon, madde ile etkileşimine bağlı olarak daha önce de bahsedildiği gibi iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan olmak üzere iki ana gruba ayrılır. İyonlaştırıcı radyasyon, yeterli enerjiye sahip olduğunda atomlardan elektron kopararak iyonlaşmaya neden olabilir. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon ise madde ile etkileştiğinde iyonlaşma oluşturmaz, genellikle ısı veya titreşim gibi etkiler meydana getirir (Kontomaris vd., 2019; Sowa vd., 2012).

İyonlaştırıcı radyasyon, parçacık radyasyonu ve yüksek enerjili elektromanyetik radyasyon olarak ikiye ayrılır. Parçacık radyasyonu, radyoaktif bozunma sırasında çekirdekten yayılan alfa, beta ve nötron gibi yüklü veya yüksüz parçacıklardan oluşur. Doğada var olan radyoaktif maddeler veya insan müdahalesiyle kararsız hâle gelen yapay radyoaktif maddeler, daha kararlı bir hâle geçerken bu parçacıkları yayarak enerji kaybeder. Bunun yanı sıra, elektromanyetik spektrumun yüksek enerji sınıfında yer alan X ışınları ve Gama ışınları yüksek enerjili elektromanyetik dalgalardır ve bunlar da iyonlaştırıcı etkiye sahiptir (Karmaker vd., 2021).

Öte yandan, radyo dalgaları, mikrodalgalar, kızılötesi, görünür ışık ve düşük enerjili ultraviyole ışınları gibi elektromanyetik dalgalar iyonlaştırıcı olmayan radyasyon türüne girer (Schmid & Wakelam, 2013). Bu radyasyon türleri ve sınıflandırmaları aşağıdaki şemada gösterilmektedir.

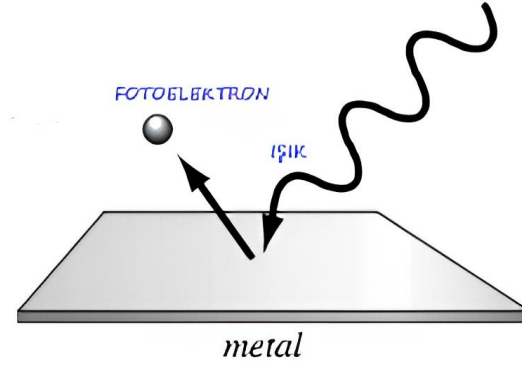


Şekil 4. İyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon

Yüksek enerjili elektromanyetik dalgalar, özellikle gama ve X-ışınları gibi fotonlar, madde içinden geçerken çeşitli etkileşim mekanizmalarını tetikler. Bu etkileşimler sırasında, fotonlar enerjilerini maddeye aktararak fotoelektrik etki, Compton saçılması ve çift oluşumu gibi olaylara neden olur. Bu süreçler, madde içindeki atom ve moleküllerin iyonizasyonuna veya uyarılmasına yol açarak çeşitli soğurma ve saçılma olaylarıyla enerji transferi gerçekleştirir (Fornalski, 2018). Her bir etkileşim türü, belirli koşullar altında meydana gelir ve farklı enerji seviyelerine sahip fotonlarla ilişkili olarak değişiklik gösterir. Bu olayların detaylı açıklamaları, alt başlıklarda ele alınmaktadır.

1.4.1. Fotoelektrik Olay

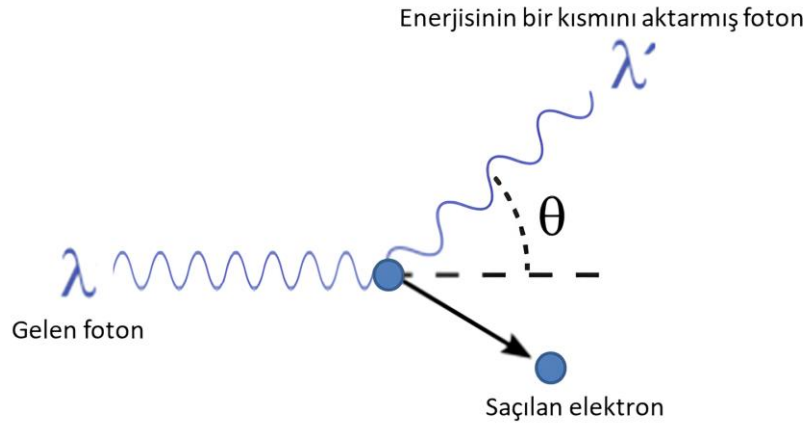
Fotoelektrik olay, genellikle 100 keV'dan daha düşük enerjili X-ışını veya gama ışınının bir atomun iç kabuklarında bulunan bir elektronu yerinden çıkararak atomun iyonlaşmasına neden olduğu bir etkileşim mekanizmasıdır. Gelen fotonun enerjisi, atomun K veya L kabuğundaki bir elektronun bağlanma enerjisinden büyük olduğunda, fotonun enerjisi doğrudan elektrona aktarılır ve elektron atomdan koparılır. Bu süreç sonucunda atom iyonize olur ve serbest hale geçen elektrona fotoelektron denir. Atomun iç yörüngesinden bir elektronun uzaklaştırılmasıyla oluşan boşluk, daha yüksek enerji seviyesindeki bir elektron tarafından doldurulur. Bu elektron, daha düşük enerji seviyesine geçiş yaparken karakteristik X-ışını yayar.



Şekil 5. Fotoelektrik olay (Blinder, 2021)

1.4.2. Compton Saçılması

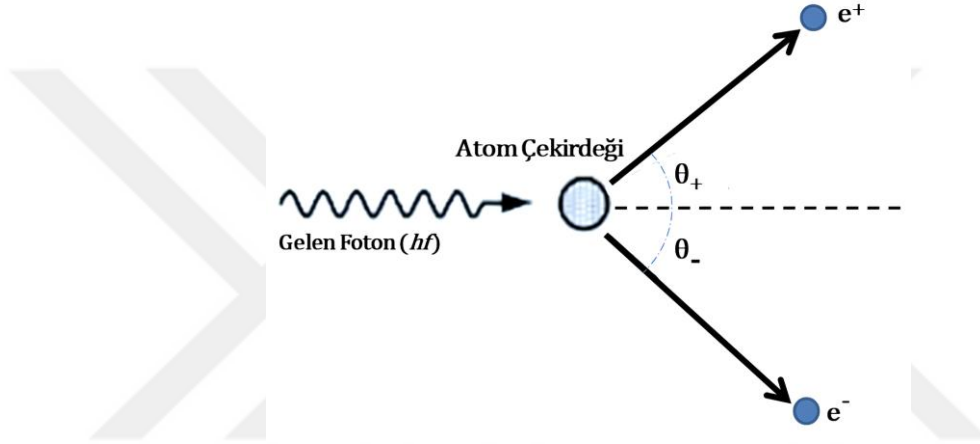
Compton saçılması, 100 keV – 10 MeV enerji aralığında bulunan orta enerjili X-ışınları ve gama ışınlarının, atomdaki dış yörüngede zayıf bağlı bir elektron ile etkileşime girerek saçılması sonucu meydana gelen bir olaydır. Bu etkileşim sırasında, gelen fotonun enerjisinin bir bölümü yörüngedeki elektrona aktarılır ve elektron yörüngesinden koparak serbest hale gelir. Elektrona aktarılan enerji, onun belirli bir kinetik enerji ile dışarı fırlamasına neden olurken, enerjisinin bir kısmını kaybeden foton ise yön değiştirerek daha uzun dalga boyuna sahip şekilde ortamda ilerlemeye devam eder. Bu süreç sonucunda atom, dış yörüngesinden bir elektron kaybettiği için iyonize olmuş duruma geçer. Compton saçılması, özellikle orta enerjili fotonların madde ile etkileşiminin baskın mekanizmalarından birisidir.



Şekil 6. Compton saçılması olayı

1.4.3. Çift Oluşumu

Çift oluşumu, yüksek enerjili gama fotonlarının (>1.022 MeV), bir atom çekirdeğinin elektrik alanı ile etkileşime girerek bir elektron-pozitron çifti oluşturmasıyla meydana gelen bir süreçtir. Bu olayda, gelen fotonun enerjisi tamamen yok olur ve $E=mc^2$ bağıntısı gereğince maddeye dönüşerek bir elektron ve bir pozitron oluşturur. Çift oluşumunun gerçekleşebilmesi için foton enerjisinin en az 1.022 MeV olması gerekmektedir, çünkü bu değer, bir elektron ve bir pozitronun toplam kütle enerjisine karşılık gelmektedir.



Şekil 7. Çift oluşumu olayı

Oluşan elektron ortamda ilerleyerek iyonlaşmaya neden olurken, pozitron ise ortamda bir elektron ile birleşerek yok olur. Ani yük kaybolması ile sonuçlanan bu birleşme, birbirine zıt yönlerde hareket eden ve enerjileri 0.511 MeV olan iki gama fotonu açığa çıkarır. Yayınlanan bu gama fotonları, ortamda ilerleyerek fotoelektrik olay ile soğurulabilir. Çift oluşumunun gerçekleşme olasılığı, ortamın atom numarası arttıkça artış göstermektedir. Bu süreç, özellikle yüksek enerjili gama ışınlarının madde ile etkileşimi açısından önemli bir mekanizma olup, radyasyon zayıflatma çalışmaları, dedektör sistemleri ve nükleer tıp uygulamalarında dikkate alınması gereken temel etkileşimlerden biridir.

1.4.4. İyonize Radyasyon Zayıflama Ölçüm Yöntemleri

Belirli bir kaynaktan yayılan yüksek enerjili radyasyon, bir engel üzerine uygulandıktan sonra engelin arkasına geçebilen radyasyon miktarı, detektörler aracılığıyla ölçülür. Bu ölçüm, radyasyonun engel ile etkileşim sonucu ne kadar zayıfladığını belirlemeye olanak tanır. Bu tür zayıflama ölçümleri, engelin maddesel özellikleri ve kalınlığına bağlı olarak değişen bir zayıflama oranı ortaya koyar. Detektör tarafından kaydedilen veriler, radyasyonun enerji kaybı ile ilişkilendirilir ve engelin zırhlama kapasitesi hakkında bilgi sağlar (Bashter, 1997; Obaid vd., 2018). Bu yöntem, radyasyon zayıflama katsayısının belirlenmesi için yaygın olarak kullanılır, özellikle iyonlaştırıcı radyasyon türünün maddelerle etkileşimi üzerine yapılan çalışmalarda önemli bir yer tutar.

Radyasyonun maruz kaldığı zayıflama miktarını belirleyen üç temel parametre bulunmaktadır. Bunlardan ilki, Doğrusal Zayıflama Katsayısı (μ) değeridir. Bu katsayı, bir malzemenin birim kalınlığı başına foton ışınlamını ne kadar zayıflattığını gösteren bir parametredir. Matematiksel olarak şu şekilde ifade edilir (Alenezi vd., 2018; Halliwell vd., 2021):

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (6)$$

Burada,

- I_0 giriş ışınlamı şiddetini,
- I malzemedan geçen ışınlamın şiddetini,
- μ doğrusal zayıflama katsayısını,
- x ise malzemenin kalınlığını ifade etmektedir.

Doğrusal (lineer) zayıflama katsayısı, malzemenin yoğunluğu ve bileşimine bağlı olarak değişiklik gösterir ve farklı enerji seviyelerindeki fotonlar için farklı değerlere sahip olabilir. Aşağıdaki tablo, bazı yaygın malzemeler için 1 MeV enerjili foton ışınlamına karşı doğrusal zayıflama (Linear Attenuation Coefficient, LAC) ve kütle zayıflama katsayılarını (Mass Attenuation Coefficient, MAC) göstermektedir.

Tablo 1. Radyasyon zayıflatmada kullanılan bazı maddelerin atom numarası, yoğunluk, LAC ve MAC değerleri (URL-1,2025)

Malzeme	Atom Numarası	Yoğunluk (g/cm ³)	Lineer Zayıflama Katsayısı (LAC) (cm ⁻¹ , 1 MeV foton için)	Kütle Zayıflama Katsayısı (MAC) (cm ² /g, 1 MeV foton için)
Kurşun (Pb)	82	11,34	0,8054	0,0710
Standart Beton	-	2,40	0,1523	0,0635
Demir (Fe)	26	7,87	0,4718	0,0600
Kobalt (Co)	27	8,90	0,5256	0,0591
Krom (Cr)	24	7,19	0,4264	0,0593
Titanyum (Ti)	22	4,51	0,2657	0,0589
Alüminyum (Al)	13	2,70	0,1659	0,0615
Bakır (Cu)	29	8,96	0,5287	0,0590
Nikel (Ni)	28	8,90	0,5482	0,0616
Tungsten (W)	74	19,25	1,2740	0,0662

Kütle zayıflama katsayısı, bir malzemenin birim kütlesinin foton ışınlamını ne kadar zayıflattığını ifade eden bir büyüklüktür. Malzemenin yoğunluğundan bağımsız olarak, zayıflama yeteneğini değerlendirmeye olanak tanır. Fotonların malzeme ile etkileşimi sonucunda meydana gelen zayıflama miktarı, büyük ölçüde malzemenin yoğunluğuna bağlıdır. Kütle zayıflama katsayısı (μ_m), doğrusal zayıflama katsayısının (μ) malzemenin yoğunluğuna (ρ) oranlanmasıyla elde edilir ve şu şekilde ifade edilir (Eren Belgin, 2022; Medhat, 2009):

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (7)$$

Burada,

- μ_m kütle zayıflama katsayısını (cm²/g)
- μ doğrusal zayıflama katsayısını,
- ρ malzemenin yoğunluğunu (g/cm³) göstermektedir.

Yarı kalınlık ise bir radyasyon ışınlamının yoğunluğunun yarıya inmesi için malzemede geçmesi gereken kalınlık miktarıdır. Yani, radyasyonun malzeme içerisinde ne kadar ilerleyebileceği hakkında bilgi vermektedir. Deri kalınlığı ifadesine çok benzerlik

göstermektedir. Bu ifade de aşağıda görüldüğü gibi hesaplanmaktadır (Gürel Özdemir vd., 2023).

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (8)$$

Burada,

- $t_{1/2}$ yarı değer katmanı (Half Value Layer, HVL)
- μ doğrusal zayıflama katsayısını ifade etmektedir.

Radyasyon zayıflama ölçüm yöntemlerinde, genellikle belirli bir ışın kaynağı kullanılarak, malzeme içerisinden geçen foton enerjisinin ne ölçüde zayıfladığı dedektörler aracılığıyla tespit edilir. Bu ölçümler sayesinde, malzemelerin birim kalınlık başına doğrusal zayıflama kapasiteleri veya yoğunluktan bağımsız olarak kütle zayıflatma özellikleri belirlenebilir. Literatürde yaygın olarak kullanılan birçok malzemenin doğrusal zayıflama ve kütle zayıflama katsayıları mevcut olup, bu değerler deneysel çalışmaların yanı sıra XCOM gibi simülasyon yazılımları kullanılarak da elde edilebilmektedir (Eren Belgin, 2022; Seltzer, 1987, s. 8).

1.5. Elektromanyetik Dalga Kalkanlama: Temel Kavramlar

Elektromanyetik dalgalar, uzayda serbestçe yayılırken çevrelerindeki nesnelerle etkileşime girerek bozucu etkiler oluşturabilir. Bu tür etkilerin önlenmesi amacıyla, korunması hedeflenen cisimlerin, cihazların, canlıların ya da belirli alanların çevresi elektromanyetik kalkanlayıcı yapılar ile kaplanmaktadır. Elektromanyetik kalkanlama, dışarıdan gelen bozucu elektromanyetik dalgaların belirli bir alana girişini engellemeyi amaçladığı gibi, bazı durumlarda bir alan içerisindeki elektromanyetik dalgaların dışarı çıkışını sınırlamak için de kullanılabilir. Kalkanlama mekanizmasında yansıma ve soğurma olmak üzere iki temel etki baskın rol oynamaktadır (Geetha vd., 2009). Bu etkilerin büyüklüğü, kalkanlama malzemesinin fiziksel ve elektriksel özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (González vd., 2018).

1.5.1. Kalkanlayıcı Yapıların Fiziksel Özellikleri

Elektromanyetik dalgaların bir malzeme ile etkileşiminde yansıma ve soğurulma olaylarının gerçekleşme düzeyini etkileyen pek çok fiziksel özellik bulunmaktadır. Bu özellikler arasında malzemenin kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü, geometrisi, yoğunluğu, gözeneklilik oranı, homojenliği ve sıcaklığı gibi özellikler öne çıkmaktadır.

Yüzey pürüzlülüğü, yansıma mekanizmasında belirleyici bir role sahiptir. Pürüzsüz bir yüzey, yansıyan elektromanyetik dalgaların düzenli bir şekilde tek bir yönde hareket etmesini sağlayarak geri yansıyan enerjinin yoğunluğunu artırabilir. Bu durum, dalgaların birbiriyle bozucu etkileşime girmesini önler ve yansıma etkinliğini maksimize eder. Diğer yandan, soğurma mekanizmasının baskın olduğu malzemelerde, yüzeyin pürüzlü olması önemli avantajlar sunar. Pürüzlü yüzeyler, daha geniş bir yüzey alanı sunarak elektromanyetik dalgaların malzeme ile temasını artırır ve böylece soğurulan enerji miktarını yükseltir. Bu prensip, yansız odaların yüzeylerinin koni veya piramit şeklindeki soğurucu yapılarla kaplanmasının temel nedenlerinden biridir (Khalid vd., 2017; X. Liu vd., 2022).

Malzemenin kalınlığı da soğurma performansını etkileyen kritik bir parametredir. Daha kalın malzemeler, malzemenin içerisinde nüfuz edebilen elektromanyetik dalgaların malzeme içinde daha uzun bir yol kat etmesine olanak tanır ve bu da dalgaın enerjisinin daha büyük bir kısmının soğurulmasını sağlar. Bu nedenle, soğurma özelliği ön planda olan kalkanlama malzemelerinin yeterli kalınlığa sahip olması gereklidir (More vd., 2021).

Malzemenin yoğunluğu ve atomik ağırlığı da kalkanlama etkinliğinde doğrudan etkili olmaktadır. Yüksek yoğunluk ve atomik ağırlık, elektromanyetik dalgaların enerjisini etkili bir şekilde soğurarak kalkanlama kapasitesini artırır (S.-C. Kim & Cho, 2019).

Son olarak, malzemenin sıcaklığı da önemli bir faktördür. Sıcaklık değişimleri, malzemenin elektriksel özelliklerini etkileyerek kalkanlama performansında değişimlere yol açabilir. Bu nedenle, kalkanlama performansı incelenirken malzemenin sıcaklık koşulları dikkate alınmalıdır.

1.5.2. Kalkanlayıcı Yapıların Elektriksel Özellikleri

Malzemenin elektriksel özellikleri, elektriği iletme kapasitesini ve bir elektrik ya da manyetik alan altındaki davranışını tanımlayan temel parametrelerdir. Bu özellikler,

malzemenin elektromanyetik dalgalara karşı iletim, yansıma veya soğurma gibi tepkilerini de belirlemektedir. Elektriksel iletkenliğin yanı sıra, elektriksel ve manyetik geçirgenlik değerleri de, elektromanyetik dalga kalkanlama performansını etkileyen kritik faktörler arasında yer alır (González vd., 2018; Håkansson vd., 2007).

Kalkanlayıcı malzemelerin iletkenlik özellikleri, elektromanyetik dalgaların yansıma, soğurulma ve iletilme süreçleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Malzemenin yüzeyinden geri yansıyan dalga miktarı, yansıma katsayısı ile hesaplanabilir ve bu katsayının değeri, malzemenin iletkenliğine ve ortamın empedansına bağlı olarak değişir (Pavlik vd., 2024). Yüksek iletkenliğe sahip malzemeler, elektriksel empedansı düşürerek elektromanyetik dalgaların büyük bir kısmının yansımasına neden olur ve böylece yüksek yansıma katsayıları ortaya çıkar. Örneğin, süper iletken bir malzemenin empedansının 0 olduğu düşünülürse, 0 empedans değerini aşağıdaki yansıma katsayısı hesaplama formülüne koyduğumuz zaman, yansıma katsayısı değeri 1 çıkacak yani dalganın tamamının geri yansıdığı sonucuna ulaşılabacaktır.

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \quad (9)$$

- Z_0 : Serbest uzay veya hava ortamının öz empedansı (yaklaşık 377 Ω)
- Z : Malzemenin karakteristik empedansı

Ayrıca, iletkenlik değeri, malzemenin deri kalınlığını etkileyen bir diğer önemli parametredir. Deri kalınlığı, elektromanyetik dalganın malzeme içerisinde ne kadar derinliğe nüfuz edebileceğini belirleyen bir faktördür. Deri kalınlığı formülünde iletkenlik değerinin paydada yer alması, yüksek iletkenliğe sahip malzemelerin deri kalınlığının küçük olduğunu ve dolayısıyla dalganın daha kısa mesafede zayıflamasına neden olduğunu gösterir. Bu bağlamda, iletkenlik değeri, dalganın yüzeyden yansıma oranını artırırken, aynı zamanda malzemenin içerisine nüfuz edebilen dalganın soğurulma miktarını da etkileyen önemli bir parametre olarak karşımıza çıkar (Chung & Ozturk, 2022; González vd., 2018).

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}} \quad (10)$$

- δ : Deri kalınlığı (m)
- μ : Malzemenin manyetik geçirgenliği (H/m)
- σ : Malzemenin elektriksel öz iletkenliği (S/m)
- ω : Dalganın açısal frekansı ($\omega=2\pi f$, f frekans)

Elektriksel geçirgenlik (veya permitivite), bir malzemenin elektrik alanına karşı gösterdiği tepkiyi tanımlar. Elektrik alanına maruz kalan bir malzemede, serbest yüklerin hareketiyle dipol momentleri oluşur ve bu dipol momentleri, malzemenin elektriksel geçirgenliğini belirler. Bir malzemenin elektriksel geçirgenliği, boş uzayın elektriksel geçirgenliği (ϵ_0) ile malzemenin bağıl elektriksel geçirgenliği (dielektrik sabiti) çarpımı olarak ifade edilir. Maddelerin elektriksel geçirgenliği, genellikle boş uzayın elektriksel geçirgenliği referans alınarak belirlenir. Her maddenin kendine özgü bir dielektrik sabiti vardır ve bu değer, malzemenin elektriksel geçirgenliğini tanımlar.

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (11)$$

- ϵ = Malzemenin elektriksel geçirgenliği (F/m)
- ϵ_0 = Serbest uzayın elektriksel geçirgenliği (yaklaşık 8.854×10^{-12} F/m)
- ϵ_r = Malzemenin bağıl elektriksel geçirgenliği (dielektrik sabiti), malzemenin boşlukla karşılaştırıldığında elektriksel alanı ne kadar iyi iletmediğini gösterir.

Malzemenin empedansı hesaplanırken, ortamın elektriksel veya manyetik geçirgenliklerindeki değişimlere bağlı olarak malzemenin empedansı ve dolayısıyla yansıma katsayısı değişiklik gösterebilir. Elektriksel geçirgenlik için yapılan açıklamalar, genel olarak manyetik geçirgenlik için de geçerlidir. Manyetik geçirgenlik, malzemenin empedansını, deri kalınlığını ve kompleks manyetik geçirgenlik özelliklerini etkileyerek, dalganın soğurulma miktarını belirleyen bir parametre olarak karşımıza çıkar.

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (12)$$

- μ = Malzemenin manyetik geçirgenliği (H/m).

- μ_0 = Serbest uzayın manyetik geçirgenliği (yaklaşık $4\pi \times 10^{-7}$ H/m).
- μ_r = Malzemenin bağıl manyetik geçirgenliği, malzemenin boşlukla karşılaştırıldığında manyetik alanı ne kadar iyi ilettiğini gösterir.

Malzemeler yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalarla etkileşime girdiklerinde, kompleks elektriksel ve manyetik geçirgenlik gösterirler. Kompleks geçirgenlik değerlerinin reel kısmı, elektrik veya manyetik alanının ne kadarının malzeme içinde depolandığını gösterirken; sanal kısmı, dalganın elektrik veya manyetik alan bileşenlerinin ne kadarının soğurulduğunu belirtir.

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j \varepsilon''(\omega) \quad (13)$$

- $\varepsilon(\omega)$: Kompleks elektriksel geçirgenlik.
- $\varepsilon'(\omega)$: Gerçek kısmı, ortamın enerji depolama kapasitesini gösterir.
- $\varepsilon''(\omega)$: Sanal kısmı, ortamın enerji kayıplarını (örneğin ısıya dönüşüm) ifade eder.

$$\mu(\omega) = \mu'(\omega) - j \mu''(\omega) \quad (14)$$

- $\mu(\omega)$: Kompleks manyetik geçirgenlik.
- $\mu'(\omega)$: Gerçek kısmı, ortamın manyetik depolama kapasitesini gösterir.
- $\mu''(\omega)$: Sanal kısmı, ortamın manyetik kayıplarını (örneğin ısıya dönüşüm) ifade eder (González vd., 2018; Kondawar & Modak, 2020).

Tablo 2. Permitivite ve permabilite değerlerinin karşılaştırmalı özellikleri

Karşılaştırma Parametresi	Permitivite	Permabilite
Tanım	Bir malzemenin elektrik alanı depolama kapasitesini belirleyen özelliktir.	Bir malzemenin manyetik alanı destekleme veya manyetize olma kapasitesini belirleyen özelliktir.
Sembol	ϵ	μ
SI Birim	Farad/metre (F/m)	Henry/metre (H/m)
Boşluktaki Değer	$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m
İlişkili Alan	Elektrik alan (E)	Manyetik alan (H)
Örnek Kullanım Alanı	Kapasitörler	Transformatör çekirdeği

1.5.3. Kalkanlama Etkinliği

Kalkanlama etkinliği (Shielding Effectiveness, SE), elektromanyetik bir dalganın bir engelle karşılaştığında sergilediği yansıma, soğurma ve iletim davranışlarına ilişkin önemli bilgiler sunar. SE değeri, bir bariyerin elektromanyetik dalgaları ne ölçüde engellediğini nicel olarak ifade eder. Kalkanlama etkinliğinin yeterince yüksek olduğu durumlarda, dalganın bariyerin arka tarafına geçişi büyük ölçüde engellenir ve elektromanyetik dalgaların iç ortama girişine neredeyse hiç izin verilmez (Al-Saleh & Sundararaj, 2009; Geetha vd., 2009; González vd., 2018; Håkansson vd., 2007; Kondawar & Modak, 2020).

SE değerleri ölçümlerde genellikle desibel (dB) cinsinden ifade edilir, çünkü bu birim büyük değer farklılıklarını etkili bir şekilde temsil eder. Gelen dalganın zayıflaması ile iletilen dalga miktarı arasındaki ilişkiyi ortaya koyduğu için, SE değerleri sıklıkla negatif bir ifade ile gösterilir. Etkili bir kalkanın en az -10 dB, yani %90'lık bir kalkanlama etkinliğine sahip olması gerektiği kabul edilmektedir. SE değeri -20 dB ve üzeri olan kalkanlar, %99 ve daha yüksek bir kalkanlama sağladığından yüksek verimli olarak değerlendirilir (Afilipoaei & Teodorescu-Draghicescu, 2020). Aşağıdaki tabloda desibel türünden değişken zayıflama miktarlarına karşın dalganın yüzde kaçının engellendiği gösterilmektedir.

Tablo 3. Desibel değerine karşılık soğurma yüzdeleri

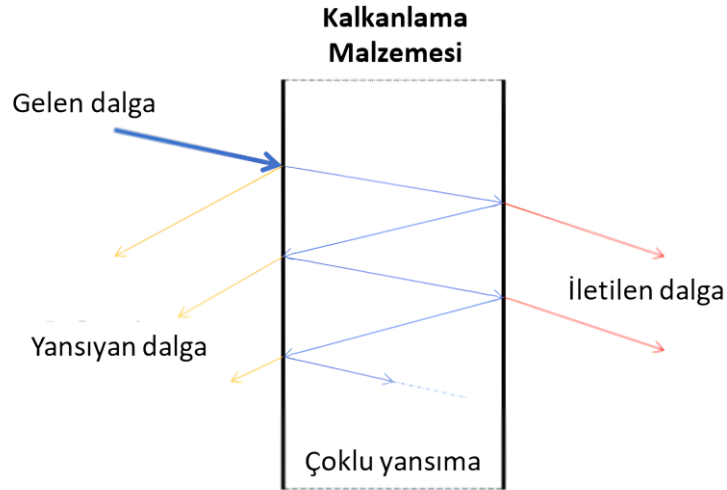
Zayıflama (dB)	Kalkanlama (%)
10	90
20	99
30	99.9
40	99.99
...	...

Bir materyalin kalkanlama etkinliğini belirlemenin temel yöntemi, gelen dalga gücü (P_{in}) ile iletilen dalga gücü (P_{out}) arasındaki oranı hesaplamaktır (Bora vd., 2017; Y.-T. Li & Sun, 2022). Bu oran desibel cinsinden ifade edilmek istendiğinde, SE değeri aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$SE_{(dB)} = -10 \log_{10} \frac{P_{in}}{P_{out}} = -20 \log_{10} \frac{E_{in}}{E_{out}} = SE_R + SE_A + SE_M \quad (15)$$

P_{out} (E_{out}), iletilen gücü (elektrik alanını) temsil ederken P_{in} (E_{in}), gelen gücü (elektrik alanını) temsil eder.

Elde edilen bu SE değeri yansıma (SE_R), soğurma (SE_A) ve çoklu yansıma (SE_M) bileşenlerinin toplamını ifade etmektedir (Geetha vd., 2009; D.-H. Liu & Lai, 2021; Shukla, 2019). Yansıma farklı ortamların empedans uyumsuzluğundan kaynaklanmaktadır. Ortamların empedansı ise iletkenlik veya ϵ_r , μ_r değerlerine göre değişmektedir. İletken malzemelerde serbestçe hareket edebilen elektronlar bulunur. Elektromanyetik dalga, iletken malzemenin yüzeyine ulaştığında, dalga'nın elektrik alan bileşeni bu serbest elektronları titreştirir. Elektronların bu titreşimli hareketi, karşı yönde bir alan üretir. Bu karşı alan, gelen elektromanyetik dalga'nın ilerlemesini zorlaştırarak dalga'nın geri yansımaya yol açar. Bu nedenle, iletken malzemelerin düşük empedans değerleri ve serbest elektronların varlığı, yansıma olayının gerçekleşmesine neden olur. Soğurma ise kalkanlayıcı ortam içerisine yansımadan nüfuz edebilen dalga'nın engel içerisinde ısıya dönüştürülerek yok olması olayıdır. Son bileşen olan çoklu yansıma aşağıdaki şekil 8'de görüldüğü üzere kalkanlayıcı ortam içerisinde yaşanan yansılardan oluşmaktadır. Eğer soğurma kaybı 10 dB'den büyükse, çoklu yansıma ihmal edilebilmektedir (Tong, 2016).



Şekil 8. Tek katmanlı kalkanlama malzemesinin şematik diyagramı

VNA cihazında iletim yansıma hat yöntemi kullanılarak 2 portlu yapılan ölçümlerde S_{11} , S_{21} , S_{12} , S_{22} saçılma parametreleri elde edilmektedir. S_{11} ve S_{22} değerleri yansımayı (R), S_{21} ve S_{12} değerleri ise iletimi (T) ifade etmektedir. Eğer test edilen materyal tamamen simetrikse S_{11} S_{22} ye ve S_{21} de S_{12} ye eşittir (Santhosi vd., 2020).

$$R = |S_{11}|^2 = |S_{22}|^2, \quad T = |S_{21}|^2 = |S_{12}|^2 \quad (16)$$

İletim, yansıma ve soğurma ifadelerinin lineer ölçek değerlerinin toplamı 1'e eşit olmalıdır. Bu sayede yansıma ve iletim parametrelerini kullanarak materyalin içerisinde soğurulan miktarın oranı da bulunabilmektedir (C. Fan vd., 2019; Kulkarni vd., 2019).

$$A = 1 - T - R \quad (17)$$

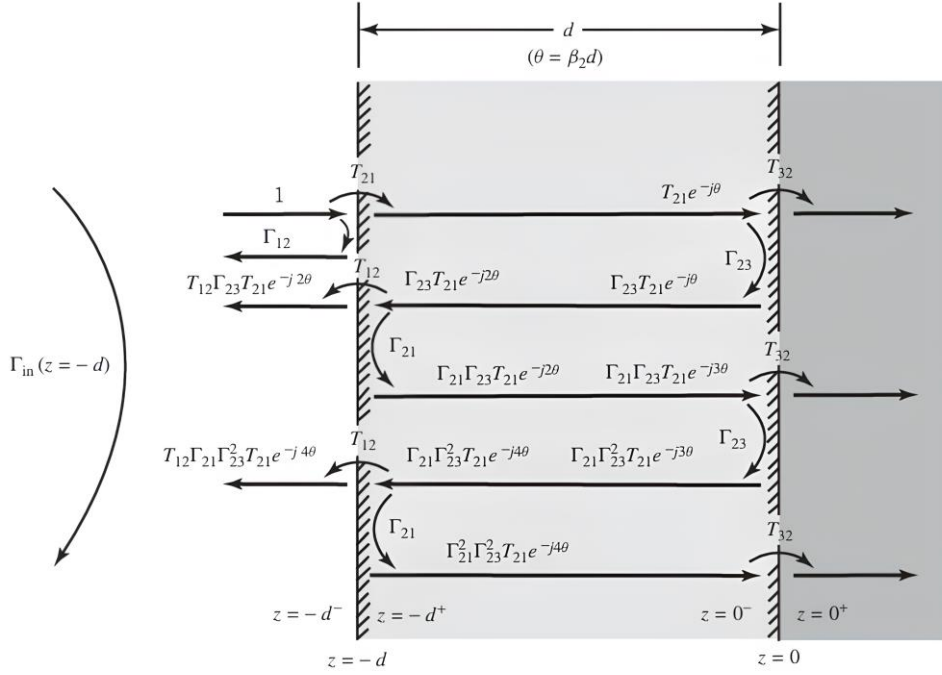
Toplam kalkanlama etkinliği (SE_T) S parametrelerini kullanarak kolayca belirlenebilmektedir. Eğer S parametreleri lineer ölçekte ise formül a, desibel cinsinden ise formül b ile toplam SE değeri elde edilmektedir (Hashemi vd., 2022; Kondawar & Modak, 2020; D.-H. Liu & Lai, 2021).

$$a) SE_T = 20\log|S_{21(\text{linear})}| \quad b) SE_T = S_{21(\text{dB})} \quad (18)$$

1.5.4. Tek Katmanlı Arayüze Dik Geliş

Bir önceki bölümde, dalga kılavuzu içerisinde konumlandırılan kalkanlayıcı yapının vektör ağ analizörü (VNA) aracılığıyla elde edilen saçılma parametreleri (S-parametreleri) incelenmiş ve bu parametreler üzerinden yapının elektromanyetik sinyali hangi oranda yansıttığı, ilettiği veya soğurduğu deneysel olarak analiz edilmiştir. Bu bölümde ise, aynı fiziksel durum için teorik hesaplama yöntemleri ele alınacak ve belirli bir kalınlığa sahip malzemenin elektromanyetik dalgalar karşısındaki yansıtıcılık ve geçirgenlik özelliklerinin nasıl hesaplandığı açıklanacaktır.

Teorik modellemede, Şekil 9’da gösterildiği üzere sistem üç farklı ortamdan oluşmaktadır: ortam 1, ortam 2 ve ortam 3. Ortam 2, sonlu bir kalınlığa sahip olup, elektromanyetik dalgaların yansıma ve iletim karakteristiklerinin analiz edilmek istendiği kalkanlayıcı malzemeyi temsil etmektedir. Ortam 1 ve ortam 3 ise genellikle yarı sonsuz kabul edilen ve çoğu durumda hava olan ortamlardır. Elektromanyetik dalgalar bir ortamdan diğerine geçerken, ortamların elektromanyetik özelliklerinin (empedans, geçirgenlik, vb.) farklı olması nedeniyle dalgaların bir kısmı ara yüzeyde yansırken, bir kısmı iletilir.



Şekil 9 Tek katmanlı arayüzdeki iletim ve yansıma katsayıları (Balanis, 2024)

Bu geçiş sırasında, özellikle sonlu kalınlığa sahip ortam 2 içerisinde, dalgalar ara yüzeylerden defalarca yansiyıp iletilerek çoklu yansıma (multiple reflection) etkisi oluşturur. Bu oklu yansımalar sonucunda girişteki (ortam 1'deki) yansıma katsayısı yalnızca ilk ara yüzeydeki yansımaya değil, aynı zamanda malzeme içindeki ardışık yansımaların interferometrik katkılarına da bağlı hale gelir. Bu nedenle, giriş yansıma katsayısının doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için çoklu yansıma etkilerinin de hesaba katılması gerekmektedir.

Bu bağlamda, şekil 9'da da gösterildiği üzere, üç ortamlı bir yapıda sonlu kalınlığa sahip bir ara tabakanın giriş yansıma katsayısı aşağıdaki formülasyonla hesaplanabilir:

$$\Gamma_{in}(z = -d^-) = \frac{\Gamma_{12} + \Gamma_{23}e^{-j2\beta_2 d}}{1 + \Gamma_{12}\Gamma_{23}e^{-j2\beta_2 d}} \quad (19)$$

Burada,

- Γ_{12} : Ortam 1 ile ortam 2 arasındaki yansıma katsayısını,
- Γ_{23} : Ortam 2 ile ortam 3 arasındaki yansıma katsayısını,
- β_2 : Ortam 2 içindeki faz sabitini,
- d : Ortam 2'nin fiziksel kalınlığını,
- $e^{-2j\beta_2 d}$: Ortam 2 içinde oluşan gidiş-geliş yoluna bağlı faz değişimini temsil etmektedir.

Gelen elektromanyetik dalga, çok katmanlı bir yapıya çarptığında, ilk ara yüzeyde (rneğin birinci ortam ile ikinci ortam arasındaki sınırdaki) bir kısmı doğrudan yansır. Bu ilk yansıma, sistemin içsel yansıma katsayısı olan “ Γ_{12} ” ile temsil edilir. Diğer yandan, dalganın ikinci ortama iletilen kısmı, ikinci ara yüze (rneğin ikinci ortam ile üçüncü ortam arasındaki sınır) ulaştığında burada tekrar yansımaya uğrar ve bu geri dönen dalga, birinci ara yüze yönelir. Birinci arayüze geri dönen dalganın bir kısmı iletilerek toplam yansıma katsayısına katkıda bulunur ve “ $\Gamma_{12} \Gamma_{23} \Gamma_{21}$ ” şeklinde ifade edilir. Böylece, tüm yansımalar sonucu birinci ortama geri dönen bütün bileşenlerin toplamı, toplam yansıma katsayısını (Γ_{in}) verir ve bu durum matematiksel olarak geometrik bir seri ile temsil edilebilir. Bu seri, yansıma ve iletim katsayıları ile ortam içindeki faz farklarını içerecek şekilde aşağıdaki biçimde ifade edilebilir. Kayıpsız ortamda yansıma katsayısını ifade etmenin alternatif formülasyonudur.

$$\begin{aligned}\Gamma_{in}(z = -d^-) &= \Gamma_{12} + T_{12}\Gamma_{23}T_{21}e^{-j2\theta} + T_{12}\Gamma_{21}\Gamma_{23}^2T_{21}e^{-j4\theta} + \dots \\ \Gamma_{in}(z = -d^-) &= \Gamma_{12} + T_{12}\Gamma_{23}T_{21}e^{-j2\theta}[1 + \Gamma_{21}\Gamma_{23}e^{-j2\theta} + (\Gamma_{21}\Gamma_{23}e^{-j2\theta})^2 + \dots] \\ &\text{ve } \theta = \beta_2 d\end{aligned}$$

$$\Gamma_{in}(z = -d^-) = \Gamma_{12} + \frac{T_{12}T_{21}\Gamma_{23}e^{-j2\beta_2 d}}{1 - \Gamma_{21}\Gamma_{23}e^{-j2\beta_2 d}} \quad (20)$$

Kayıpsız ortamlar için kullanılan yansıma ve iletim katsayıları, yukarıdaki verilen denklemlerle ifade edilmekte olup, bu denklemler ortamların yalnızca empedans değerlerine bağlıdır ve sönüm etkilerini içermez. Ancak, eğer ortamlar kayıplı ise bu basitleştirilmiş ifadeler geçerliliğini yitirir. Kayıplı ortamlar için yansıma ve iletim katsayıları hesaplanırken, ortamın iletkenlik (σ), dielektrik geçirgenlik (ϵ) ve manyetik geçirgenlik (μ) gibi elektromanyetik özellikleri doğrudan hesaba katılır. Bu durumda kullanılan yeni teorik modellerde, yayılma sabiti (γ) karmaşık bir nicelik hâline gelir ve hem genlik zayıflamasını hem de faz değişimini birlikte temsil eder. Dolayısıyla, kayıplı ortamlar için yansıma (Γ_{in}) ve iletim (T) katsayıları, ortam parametrelerinin tamamını içeren daha genel ifadelerle tanımlanır. Bu ifadeler, sadece kayıplı ortamlar için değil, aynı zamanda kayıpsız ve karma (kayıplı-kayıpsız) ortam yapılarına da uygulanabilir genel bir çözüm sunar.

$$\Gamma_{in} = \frac{E^r}{E^i} = \frac{(1 - Z_{12})(1 + Z_{23}) + (1 + Z_{12})(1 - Z_{23})e^{-j2\gamma_2 d}}{(1 + Z_{12})(1 + Z_{23}) + (1 - Z_{12})(1 - Z_{23})e^{-j2\gamma_2 d}} \quad (21)$$

$$T = \frac{E^t}{E^i} = \frac{4}{(1 - Z_{12})(1 - Z_{23})e^{-j\gamma_2 d} + (1 + Z_{12})(1 + Z_{23})e^{j\gamma_2 d}} \quad (22)$$

Burada;

$$Z_{ij} = \frac{\mu_i \gamma_j}{\mu_j \gamma_i} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad \text{ve} \quad \gamma_k = \pm \sqrt{j\omega\mu_k(\sigma_k + j\omega\epsilon_k)}$$

olarak verilmektedir.

Teorik formülasyonların geçerliliğini göstermek amacıyla, MATLAB ortamında hazırlanan program kullanılarak farklı iletkenlik ve kalınlıklara sahip numuneler için giriş

yansıma katsayısı (Γ_{in}) ve iletim katsayısı (T) hesaplanmıştır. Bu kapsamda, iletkenlik değerleri $\sigma = 3,5 \times 10^7$ S/m, $3,5 \times 10^6$ S/m ve $3,5 \times 10^5$ S/m olarak seçilmiş; her bir iletkenlik için film kalınlığı $d = 50$ nm, 100 nm ve 200 nm olacak şekilde toplam dokuz farklı senaryo oluşturulmuştur. Yapıda altlık malzeme olarak kalınlığı $0,15$ mm olan cam tabaka kullanılmıştır. Camın bağıl dielektrik geçirgenliği ($\epsilon_r = 4,8$), manyetik geçirgenliği ise $\mu_r = 1$ olarak alınmıştır. Cam üzerine büyütülen ince metalik filmlerin bağıl dielektrik sabiti (ϵ_r) ve manyetik geçirgenliği (μ_r) ise 1 olarak kabul edilmiştir. Hesaplamalar, 9 GHz çalışma frekansında gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu analizler sonucunda, farklı iletkenlik ve kalınlıklardaki toplam dokuz numune için elde edilen yansıma ve iletim değerleri Tablo 4'te özetlenmiştir.

Tablo 4. Farklı iletkenlik ve kalınlıktaki numuneler için 9 GHz frekansında teorik S_{11} ve S_{21} sonuçları

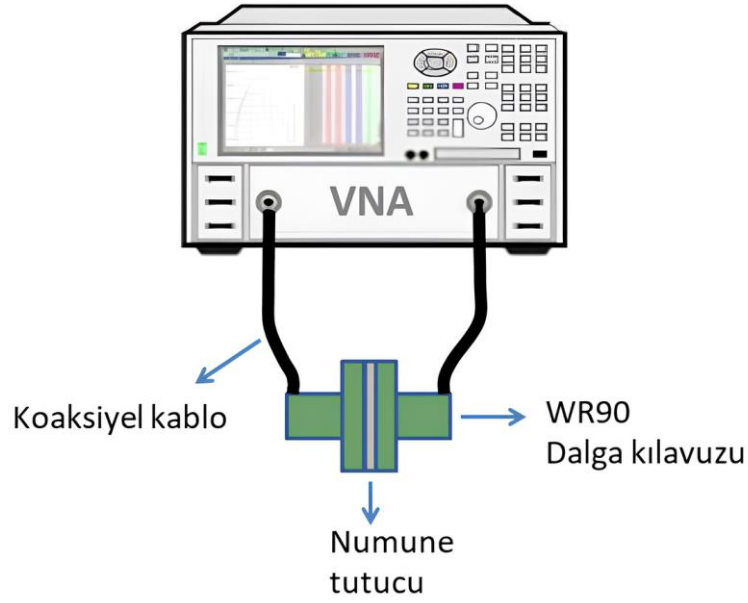
Numune Türü		Yansıma		İletim	
		S_{11} dB	Yüzde (%)	S_{21} dB	Yüzde (%)
$\sigma = 3,5 \times 10^5$ S/m	50 nm	-2.2985	58,9047	-12.6572	5,4235
	100 nm	-1.2255	75,4136	-17.6020	1,7370
	200 nm	-0.6345	86,4072	-23.0303	0,4977
$\sigma = 3,5 \times 10^6$ S/m	50 nm	-0.2594	94,2019	-30.6134	0,0868
	100 nm	-0.1307	97,0353	-36.5051	0,0223
	200 nm	-0.0656	98,5008	-42.4605	0,0056
$\sigma = 3,5 \times 10^7$ S/m	50 nm	-0.0263	99,3962	-50.3799	0,000916
	100 nm	-0.0132	99,6965	-56.3874	0,000229
	200 nm	-0.0066	99,8481	-62.4018	0,000057

1.5.5. Kalkanlama Etkinliği Ölçüm Yöntemleri

Yukarıda belirtilen radyasyon zayıflama ölçüm yöntemlerinden farklı olarak günümüzde, özellikle iyonlaştırıcı olmayan elektromanyetik dalgaların kalkanlama etkinliğini belirlemek amacıyla, kalkanlayıcı malzemelerin performansını değerlendiren ve farklı test koşullarında çeşitli avantajlar sunan ölçüm yöntemleri geliştirilmiştir (Geetha vd., 2009). Bu teknikler, test edilecek malzemenin fiziksel özelliklerine, boyutlarına, uygulama alanına ve çalışılan frekans aralığına bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir. Elektromanyetik kalkanlama etkinliğinin ölçümünde yaygın olarak kullanılan dört temel yöntem şunlardır:

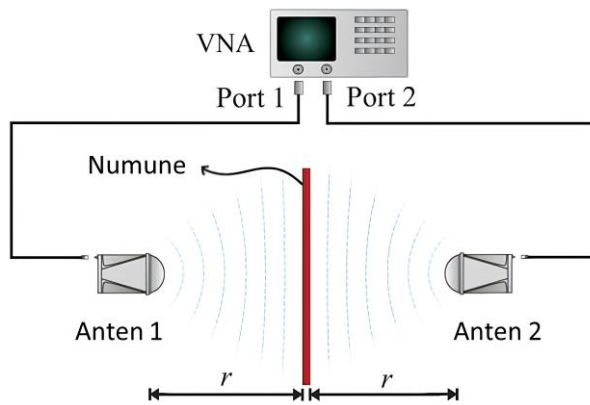
1. İletim-Yansıma Hat Yöntemi (Transmission-Reflection Line Method)
2. Açık Alan Yöntemi (Open Space Method)
3. Kalkanlanmış Oda Yöntemi (Shielded Room Method)
4. Yansımasız Oda Yöntemi (Anechoic Chamber Method)

İletim-Yansıma Hat Yöntemi: Bu yöntem, kapalı bir iletim hattı üzerinden ilerleyen elektromanyetik dalgaların, bir engelle karşılaştığında sergilediği davranışları incelemektedir. Genellikle dalga kılavuzu veya koaksiyel kablolar gibi iletim hatları kullanılmaktadır. Vektör ağ analizörü ile yapılan 2 kapılı ölçümler aracılığıyla, iletim hattındaki kalkanlayıcı malzemenin neden olduğu saçılma parametreleri elde edilir. Bu saçılma parametreleri, gelen dalganın ne kadarının geri yansıdığı, iletildiği ve soğurulduğu hakkında bilgi verir. Bu yöntemin avantajı, yansımasız bir oda veya ortam gerektirmeden, küçük bir iletim hattı içerisinde dış gürültülerden etkilenmeden ölçüm yapabilme imkanı sunmasıdır. Ancak, kalkanlama etkinliği ölçülecek malzemenin, iletim hattına sığacak kadar küçük olması gerektiği ve ölçümlerin iletim hatlarının verimli çalışabileceği frekans aralığında olmak zorunda olması da göz önünde bulundurulmalıdır. Boyutu büyük olan veya üç boyutlu malzemelerin kalkanlama etkinliği, farklı bir ölçüm yöntemi ile değerlendirilmelidir.



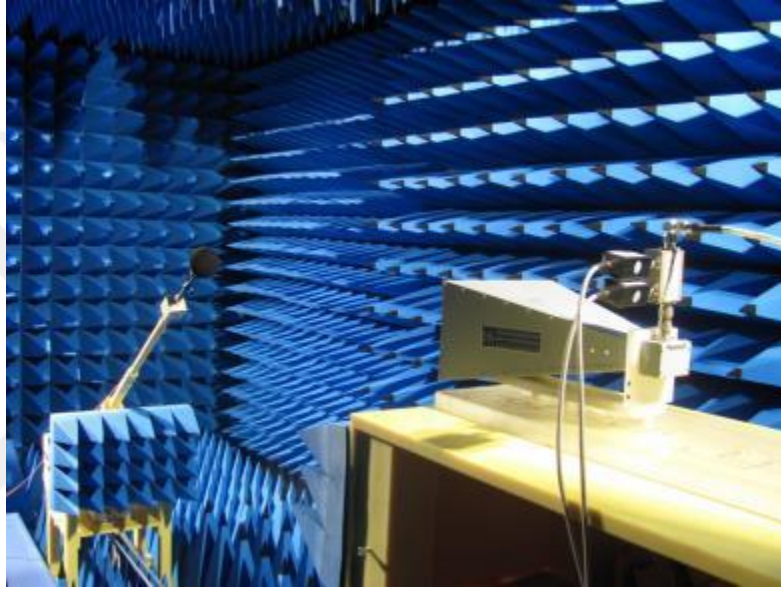
Şekil 10. Dalga kılavuzunda iletim ve yansıma ölçümü

Serbest Alan Yöntemi: Bu yöntemde, kalkanlayıcı malzeme serbest bir alanda konumlandırılır ve belirli bir mesafede yerleştirilen verici anten aracılığıyla üzerine elektromanyetik dalgalar yönlendirilir. Malzemenin arka tarafında belirlenen mesafede konumlandırılan alıcı anten, malzemeyi geçen elektromanyetik dalgaları tespit eder. Yansımaların en aza indirildiği bu açık alan ölçümleri, gerçek dünya koşullarına yakın bir ortamda gerçekleştirildiğinden, kalkanlama performansının daha doğru bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanır. Ancak, bu yöntemin sağlıklı sonuçlar verebilmesi için, elektromanyetik yansımaların ve gürültülerin düşük olduğu geniş bir alanın seçilmesi ve ölçüm sırasında dış ortam koşullarının uygun olması gerekmektedir.



Şekil 11. Serbest alan ölçüm yöntemi (Gonçalves vd., 2018)

Kalkanlanmış Oda Yöntemi: Bu yöntem, genellikle cihazların elektromanyetik uyumluluğunu değerlendirmek veya malzemelerin elektromanyetik kalkanlama verimliliğini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Ölçümlerin doğruluğunu artırmak için dış ortamdan tamamen izole edilmiş, elektromanyetik olarak kalkanlanmış odalar tercih edilmektedir. Bu tür ortamlar, dış ortamdan gelen elektromanyetik dalgaların içeri sızmasını ve içeride üretilen dalgaların dışarı yayılmasını engelleyerek, ölçümlerin dış etkenlerden bağımsız ve güvenilir bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır.



Şekil 12. Yansımaz oda (URL-2,2025)

Yansımaz Oda Yöntemi: Yansımaz oda, dış elektromanyetik girişimleri engelleyen ve iç ortamda elektromanyetik dalgaların yansımalarını en aza indiren özel bir test ortamıdır. Bu yöntemde, odanın iç yüzeyleri yüksek soğuruculuğa sahip piramit veya koni biçimindeki malzemelerle kaplanarak ikincil yansımalar minimize edilir. Böylece yalnızca test edilen numune üzerindeki yansımalar ölçülebilir. Ancak, yeterli genişlikte ve doğru özelliklere sahip bir yansımaz odanın kurulumu, belirli bir süre ve maliyet gerektirmektedir. Şekil 12’de tüm yüzeyi piramit şeklindeki soğurucularla kaplanmış yansımaz oda görülmektedir.

1.5.6. Kalkanlamada Kullanılan Malzemeler

Elektromanyetik kalkanlayıcıların tasarımında istenen özelliklere bağlı olarak kullanılacak malzemeler farklılık gösterebilmektedir. Bu özellikler, malzemenin yüksek yansıtma kapasitesi, güçlü elektromanyetik enerji soğurumu, düşük üretim maliyeti, minimal kalınlık, mekanik esneklik ve yüksek termal dayanıklılık gibi kritik performans kriterlerini kapsamaktadır. Beklenen bu özelliklerdeki farklılıklar, kalkanlayıcı malzeme seçiminde çeşitliliğe yol açmaktadır. Metalik malzemeler, kompozitler, polimerler, dielektrik ve seramik malzemeler gibi farklı türler, kalkanlayıcı yapılar için tercih edilebilmektedir (Chung, 2020; Geetha vd., 2009). Ancak literatürde yer alan araştırmalar ve uygulamalarda kullanılan malzemeler dikkate alındığında, kalkanlama amaçlı kullanılan malzemeler genellikle iki ana kategoriye ayrılabilir. Bunlar: metalik malzemeler ve kompozit malzemelerdir.

Metalik malzemeler, elektromanyetik dalga kalkanlamasında yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Bu malzemeler, yüksek elektriksel iletkenlikleri sayesinde dalgaların büyük bir kısmını yüzeyden yansıtarak etkili bir kalkanlama sağlarlar. Yansıma mekanizması, iletkenliğin yüksek olmasıyla doğru orantılıdır, çünkü iletken yüzeyler, serbest elektronların hareketiyle gelen elektromanyetik dalgayı yansıtarak kalkanlama sağlar. Metalik malzemelerin en belirgin avantajı, yüksek yansıma kapasitesidir, düşük empedans değerleri nedeniyle belirli frekanslarda etkili olabilirler. Alüminyum, bakır, gümüş ve çelik gibi metaller, bu tür uygulamalarda sıklıkla tercih edilen malzemelerdir (Pandey vd., 2020). Metal malzemeler, mikrodalga bölgesinde iyi sonuçlar verir, ancak malzemenin kalınlığı ve yüzey yapısı, kalkanlama performansını önemli ölçüde etkileyebilir. Metalik malzemelerin düşük maliyetli ve kolay işlenebilir olmaları da, geniş bir uygulama alanına sahip olmalarını sağlamaktadır.

Kompozit malzemeler, elektromanyetik dalga kalkanlamasında, metalik malzemelere kıyasla daha geniş bir özellik yelpazesi sunar. Bu malzemeler, birden fazla bileşenin bir araya gelmesiyle oluşur ve her bir bileşenin özelliklerinden faydalanarak daha üstün performans sergileyebilirler. Genellikle, metalik ve dielektrik bileşenlerin birleşimiyle üretilen kompozit malzemeler, hem yüksek yansıtıcılık hem de güçlü soğuruculuk özellikleri sunarak daha verimli kalkanlama sağlarlar (More vd., 2021). Bu malzemeler, daha düşük yoğunlukları, esneklikleri ve şekillendirilebilirlikleri sayesinde, özellikle uyumlu ve hafif kalkanlayıcı çözümler gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir.

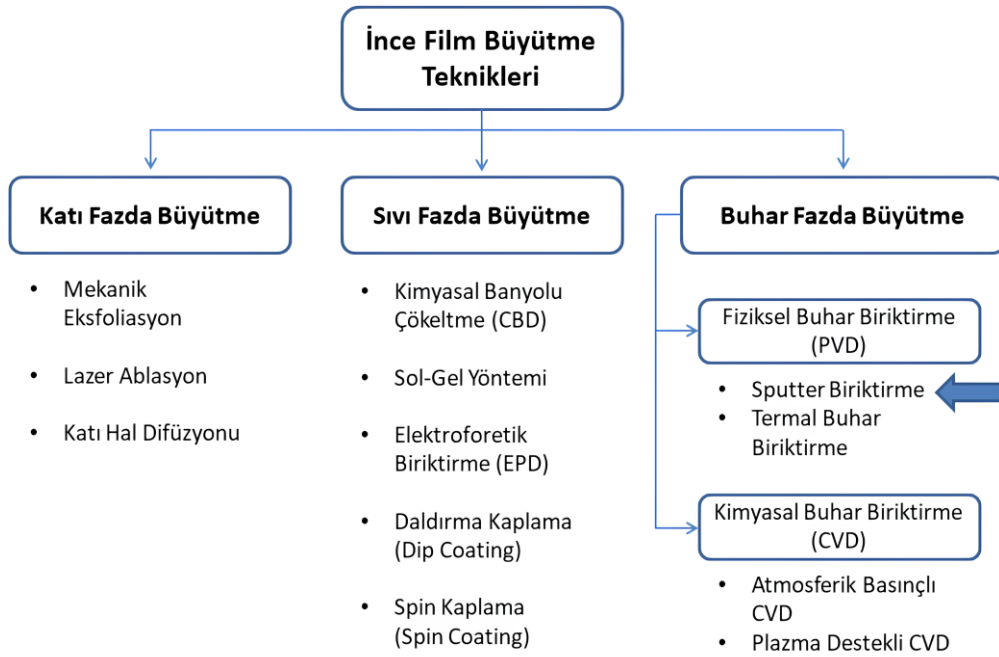
Kompozit malzemelerin soğuruculuk özellikleri, içerdikleri dielektrik malzemeler sayesinde iyileştirilebilir, bu da onları geniş frekans aralıklarında yüksek soğuruculuk elde etmede etkili kılar (Guo vd., 2023). Ayrıca, kompozit malzemeler, ısıya dayanıklı özellikleri sayesinde termal kalkanlama da sağlarlar. Karbon katkılı kompozitler, polimer bazlı kompozitler, seramik kompozitler ve benzeri materyaller, bu tür uygulamalarda öne çıkan malzemelerdir.

Bu çalışmada, ultra ince kalınlıkta ve yüksek kalkanlama performansına sahip bir yapı oluşturulması hedeflendiğinden, metalik ince filmler tercih edilmiştir. Üretilen ince filmler, farklı metalik malzemeler kullanılarak farklı kalınlık ve iletkenlik değerlerine sahip olarak tasarlanmış, bu sayede kalınlık ve iletkenlik değişkenlerinin elektromanyetik kalkanlama üzerindeki etkileri de incelenmiştir.

1.6. Metalik İnce Film Üretim Teknikleri

İnce film üretim teknolojisi, metalik ince filmlerin çeşitli bilimsel ve endüstriyel alanlarda yaygın bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. Bu filmlerin kalınlıkları birkaç nanometreden birkaç mikrometreye kadar değişiklik gösterebilir (Giurlani vd., 2018; Pandey vd., 2020). Metalik ince filmler, optik, elektronik, enerji depolama, yarı iletken üretimi ve elektromanyetik kalkanlama gibi alanlarda sıkça tercih edilmektedir. İhtiyaca göre tek katmanlı veya çok katmanlı yapılar halinde üretilebilirler. Üretim işlemleri, uygun tekniklerin kullanıldığı kontrollü ortamlar ve temiz odalar altında gerçekleştirilmektedir. Metalik ince filmler, alt tabaka üzerine atomların düzenli bir şekilde toplanmasıyla elde edilen son derece ince malzemelerdir.

Günümüzde, dijital ekranlar, dokunmatik yüzeyler, güneş panelleri, optik ve elektronik cihazlar, sensörler, elektromanyetik kalkanlayıcı malzemeler gibi çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. İnce film üretiminde, sıvı, katı ve buhar fazları altında büyütme teknikleri üç ana başlık altında sınıflandırılmaktadır. Aşağıdaki şekilde, literatürdeki ince film büyütme tekniklerinin çeşitliliği görsel olarak sunulmaktadır. Yapılan bu çalışmada, elektromanyetik dalga kalkanlayıcı üretiminde buhar fazda ince film üretim metodlarından olan magnetron sputter ile ince film büyütme yöntemi tercih edilmiştir.



Şekil 13. İnce film büyütme teknikleri (Abegunde vd., 2019; Aytaç & Malayoğlu, 2018; Chintada vd., 2021)

1.6.1. Sputter Yöntemi ile Metalik İnce Film Üretimi

Magnetron sputter yöntemi, iyonize bir plazma ortamında yüksek enerjili gaz atomlarının bir hedef yüzeye yönlendirilmesi yoluyla, hedef malzemeden atomların koparılması ve bir altlık yüzeye kaplanması esasına dayanan bir fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemidir. Yüksek iyonlaşma verimliliğine sahip bir plazma ortamı oluşturmak için genellikle doğru akım (DC) veya radyo frekansı (RF) güç kaynakları kullanılmaktadır (Shi, 2018).

Bu yöntemin çalışma süreci belirli aşamalardan oluşmaktadır. Öncelikle, iyonlaştırıcı gazın verimli bir şekilde iyonlaşabilmesi için sistemin basıncı 10^{-6} Torr seviyesinin altına düşürülerek vakumlama işlemi gerçekleştirilir. Daha sonra ortama iyonlaştırıcı gaz olarak genellikle argon (Ar) gazı salınır. Düşük basınç koşullarında uygulanan elektriksel alan, argon atomlarının iyonlaşmasını sağlayarak Ar^{+} iyonlarını oluşturur. Oluşan bu iyonlar, elektriksel alanın etkisiyle hedef malzemeye doğru hızlandırılır ve çarpma sonucu hedef yüzeyinden atomlar koparılır. Kopan atomlar, altlık yüzeye yönlenererek burada yoğunlaşır ve ince film tabakası oluşturur (Jung vd., 2003).

Magnetron sputter yöntemi, metalik ince filmler, yarı iletken tabakalar, oksit ve nitrür kaplamalar ile kompozit film türlerinin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde film kalitesi; plazma yoğunluğu, hedef malzemenin yapısı, gaz basıncı, uygulanan güç, sıcaklık ve depozisyon süresi gibi çeşitli parametrelere bağlı olarak değişiklik gösterebilir (Strijckmans vd., 2018). Bu parametrelerin optimizasyonu, elde edilecek filmin morfolojik ve yapısal özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Yöntem gerçekleştirilirken uygulanabilecek değişken parametrelerin oluşacak film üzerindeki etkisi aşağıdaki tabloda görülebilmektedir.

Tablo 5. Magnetron sputter ince film büyütme parametrelerinin etkisi

Parametre	Etki
Gaz Basıncı (Torr)	Düşük basınç, daha düzgün kaplama sağlar. Yüksek basınçta iyon çarpışmaları artar, film yoğunluğu azalabilir.
Güç (Watt)	Yüksek güç, daha fazla hedef atomunun kopmasını sağlar ancak aşırı güç hedef aşınmasını hızlandırabilir.
Magnetron Manyetik Alanı	Manyetik alan yoğunluğu arttıkça plazma yoğunluğu artar ve daha homojen kaplama elde edilir.
Kaplama Süresi	Daha uzun süre, daha kalın kaplama sağlar.
Gaz Türü (Argon, Oksijen, Azot)	Argon nötr gazdır, saf metal kaplamaları için idealdir. Oksijen veya azot kullanılırsa oksit veya nitrür kaplamalar yapılabilir.
Substrate Sıcaklığı	Yüksek sıcaklıkta film kristalleşmesi artar, yoğunluk iyileşir.

Sputter yöntemi, ince film kaplamada diğer kaplama yöntemlerine kıyasla birçok avantaja sahiptir. Yüksek homojenliğe sahip film üretimi, yüksek sıcaklık gerektirmemesi, çeşitli malzeme kaplaması yapılabilmesi, film kalınlığının hassas bir şekilde kontrol edilebilmesi ve kaplama sürecinin kapalı temiz bir ortamda gerçekleştirilmesi gibi üstünlükleri, bu yöntemi öne çıkarmaktadır (Shi, 2018). Ayrıca, üniversitelerin merkezi araştırma laboratuvarlarında bu yöntemin cüzi bir hizmet bedeli karşılığında uygulanabilmesi, bilimsel araştırmalar açısından erişilebilirliğini artırmaktadır. Tüm bu nedenlerden dolayı, bu çalışmada elektromanyetik kalkanlayıcı malzeme üretimi için magnetron sputter yöntemi tercih edilmiştir.

1.7. Literatür Araştırması

Gelişen teknolojiyle birlikte boyutları giderek küçülen elektronik cihazların kablosuz iletişim kullanımının artması, bu cihazlarda meydana gelebilecek elektromanyetik girişim sorunlarını ortadan kaldırmak için kullanılan kalkanlayıcı malzemelerin minimum ağırlık ve hacme sahip olmasını gerektirmektedir. Bu nedenle, düşük ağırlığa ve az hacme sahip kalkanlayıcı yapıların geliştirilmesine yönelik çalışmalar giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Ayrıca, kalkanlayıcı malzeme seçimi ve tasarımı, maruz kalınan radyasyonun iyonlaştırıcı olup olmamasına bağlı olarak da farklılık göstermektedir. İyonlaştırıcı olmayan düşük frekanslı elektromanyetik dalgaların kalkanlanması için kurşun veya beton gibi yüksek yoğunluklu malzemeler tercih edilmemekte, bunun yerine iletken veya manyetik özelliklere sahip alternatif malzemeler kullanılmaktadır. Literatürde gerçekleştirilen araştırmalar incelendiğinde, iyonlaştırıcı özellik göstermeyen elektromanyetik dalgaları kalkanlama amacıyla en çok üzerinde durulan iki temel yapı bulunmaktadır: kompozit malzemeler ve yüksek iletkenliğe sahip metalik filmler. Kompozit yapıdaki radyasyon kalkanları üzerine yapılan bazı çalışmalara ilişkin örnekler aşağıda sunulmaktadır.

Guo-hui ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, geleneksel olarak radyasyon kalkanlama amacıyla yaygın şekilde kullanılan kurşunun çevresel toksisitesi ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle, kurşun içermeyen, çevre dostu, hafif ve alev geciktirici özelliklere sahip alternatif bir kompozit malzemenin geliştirilmesi incelenmiştir. Bu doğrultuda, etilen-vinil asetat (EVA) matrisi içerisine magnezyum hidroksit ($Mg(OH)_2$), çinko borat (ZB) ve bizmut oksit (Bi_2O_3) dolgu malzemeleri eklenerek kompozit numuneler üretilmiştir. Yoğunlukları $1.15 - 1.69 \text{ g/cm}^3$ arasında değişen ve boyutları $160 \text{ mm} \times 160 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ olan bu numunelerin, gama ve nötron ışınlarına karşı etkin bir kalkanlama sağladığı tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda, geliştirilen kompozit malzemenin nükleer santrallerin reaktör odalarında, hastanelerde radyoterapi cihazlarının kalkanlanmasında ve elektronik ile uzay sanayisinde hafif ancak yüksek performanslı bir radyasyon kalkanlama malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılabilecek potansiyele sahip olduğu belirtilmektedir (Guo-hui vd., 2019).

8.2–12.4 GHz frekans aralığındaki elektromanyetik dalgaların kalkanlanmasına yönelik yapılan bir çalışmada, havacılık uygulamalarında kullanılmak üzere karbon fiber takviyeli polimer matrisli kompozitlerin elektromanyetik soğurma performansını artırmak

amacıyla düşük hacim oranlarında metalik nanoparçacıklar (Fe, Co, Ni ve Fe_3O_4) dolgu malzemesi olarak kullanılmıştır. Çalışmada farklı boyutlardaki nanoparçacıklar karşılaştırılmış, özellikle 25 nm'lik demir nanoparçacıkların en yüksek soğurma kapasitesini sunduğu fakat beraberinde yüksek yansıtıcılığa da neden olduğu gözlemlenmiştir. 50 nm boyutundaki demir nanoparçacıkların ise, karbon fiber kompozit sistemin toplam elektromanyetik kalkanlama etkinliğini yaklaşık 15 dB artırarak 30 dB'den 45 dB'ye yükselttiği belirlenmiştir. 50 nm boyutundaki demir nanoparçacıkların, benzer soğurma kapasitesi ile birlikte daha düşük yansıma değerleri sunduğu tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular, geliştirilen nanokompozit yapıların absorptif kalkanlama davranışının baskın olduğunu ve dış kaynaklı (örneğin, radar, iletişim sistemleri) veya iç kaynaklı elektromanyetik girişimlere karşı da etkili bir koruma sağladığını ortaya koymaktadır (Jalali vd., 2011).

Cheng ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada, elektromanyetik girişimden korunma amacıyla, bakır ve cam elyaf takviyeli örme kumaşların polipropilen (PP) matrisi ile birleştirilmesiyle 3mm kalınlığında iletken kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Üretimde, bakır tel (0.08 ve 0.12 mm çaplarında) ve cam elyafı, polipropilen lifleri ile birlikte “uncommingled yarn” tekniğiyle iplik haline getirilmiş ve bu iplikler çeşitli örgü yapılarında örülerek kumaş elde edilmiştir. Elektromanyetik kalkanlama etkinliği (EMSE) ölçümleri, ASTM ES 7-83 standardına uygun olarak 300 kHz – 3 GHz frekans aralığında, koaksiyel iletim hattı yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Çalışmada elde edilen en yüksek EMSE değeri, dört inlay ipliği içeren ve %26.7 hacim oranında bakır içeren lamine kompozitte 0.3 MHz'de yaklaşık 101.6 dB olarak ölçülmüştür. Genel olarak, frekans arttıkça EMSE değerlerinde düşüş gözlenmiş; ancak yüksek bakır içeriği ve örgü yapısının etkin tasarımı sayesinde 2.45 GHz gibi yüksek frekanslarda bile 35 dB civarında koruma sağlanabilmiştir. EMSE performansının, esas olarak soğurma değil, yansıtma bileşeni baskın olacak şekilde geliştiği, bakır miktarının ise kalkanlama etkinliği üzerinde belirleyici bir faktör olduğu vurgulanmıştır (K. B. Cheng vd., 2000).

Yapılan diğer bir kalkanlayıcı kompozit çalışmasında, yüksek elektriksel iletkenlikli, iyonlaştırıcı radyasyona karşı üstün kalkanlama kapasitesine sahip yeni bir nanokompozit malzeme geliştirilmiştir. Bu doğrultuda, iletken bir polimer olan poli(N-karbazol) (PCz) matrisi, yüksek atom numarasına sahip baryum oksit (BaO) nanoparçacıkları ile güçlendirilerek nanokompozit üretilmiştir. BaO nanoparçacıkları, PCz matrisine ağırlıkça %5, %10, %15, %20 ve %30 oranlarında eklenmiş olup, SEM ve TEM görüntüleme

teknikleri ile matris içerisindeki homojen dağılımı doğrulanmıştır. Radyasyon zayıflatma performansı açısından değerlendirildiğinde, 81 keV foton enerjisinde en yüksek zayıflatma oranı %30 BaO içeren kompozitte elde edilmiş, bu durumda kütle zayıflatma katsayısı (MAC) $0,934 \text{ cm}^2/\text{g}$ olarak belirlenmiştir. Bu bulgular, geliştirilen nanokompozitin iyonlaştırıcı radyasyona karşı etkin bir koruma sağlayarak çeşitli teknolojik ve endüstriyel uygulamalar için güçlü bir aday olduğunu göstermektedir (Beyazay vd., 2023).

Kim ve arkadaşlarının yaptığı bu çalışmada, polyanilin (PANI) kaplamalı şeffaf ince filmlerin elektromanyetik dalga iletim, yansıma ve absorpsiyon özellikleri incelenmiştir. PANI kaplamalı şeffaf ince filmlerin elektromanyetik radyasyon koruma/absorpsiyon özelliklerini araştırmak amacıyla, filmlerin optik ışık iletkenliği, şerit direnci ve elektromanyetik girişim (EMI) kalkanlama etkinliği (SE) sistematik bir şekilde değerlendirilmiştir. Ayrıca, SE formülünün uygulanabilirliği, deneysel olarak ölçülen SE değerlerinin hesaplanan SE değerleriyle karşılaştırılması yoluyla kontrol edilmiştir. Sonuçlar, PANI kaplamalı şeffaf ince filmlerin, binalardaki pencere veya kapı gibi şeffaf yüzeyler için hem optik iletim hem de EMI SE gereksinimlerini karşılayan potansiyel bir EMI koruma/absorpsiyon malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermektedir. EMI SE ölçümleri, 30 MHz ila 1.5 GHz arasındaki frekans aralığında yapılmış ve PANI kaplamalı şeffaf ince filmlerin SE değerlerinin, PANI kaplama kalınlığının artmasıyla arttığı gözlemlenmiştir. Filmlerin EMI SE değerleri %14.28 ile %52.67 arasında değişmiştir. Özellikle, emilim kaybının yansıma kaybından daha belirgin olduğu ve PANI kaplamalı şeffaf ince filmlerin metal veya metal kaplama malzemelerden farklı olarak baskın elektromanyetik dalga emme özelliği gösterdiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar, PANI kaplamalı şeffaf ince filmlerin, şeffaf malzemelerin elektromanyetik koruma gereksinimlerini karşılayacak şekilde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır (B. R. Kim vd., 2010).

Kompozit malzemelerin kalkanlayıcılığı ile alakalı gösterilecek son makalede, CdS katkılı polyester matrisli kompozitlerin gama ve nötron zırhlama özellikleri incelenmiştir. Farklı ağırlık oranlarında CdS katkı malzemesi kullanılan kompozitler, SEM ve XRD analiz yöntemleriyle karakterize edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, %20 CdS içeren kompozitlerin, diğer örneklerle kıyasla daha yüksek kütle zayıflama katsayısına sahip olduğu ve bu sayede CdS doplu polyester kompozitlerinin gama ve nötron zırhlama açısından önemli bir potansiyele sahip olduğu kanıtlanmıştır (Dilsiz vd., 2021).

Son yıllarda elektromanyetik dalga kalkanlamada yaygın olarak kullanılan yapılar arasında metalik ince filmler de öne çıkmaktadır. Bu malzemeler, geleneksel kalkanlayıcı yapılarla karşılaştırıldığında bir dizi üstün özellik sunabilmektedir. Metalik ince filmler, düşük yoğunluk, ince yapı, mekanik dayanım ve üretim kolaylığı gibi avantajlarla dikkat çekmektedir. Günümüzde geliştirilen teknolojik cihazların küçülme ve hafiflik gereksinimleri, bu cihazlar için kullanılan kalkanlayıcı malzemelerin de ince, hafif ve yüksek verimli olmasını zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle, metalik ince filmler üzerinde yapılan araştırmalar, kalkanlama etkinliğini artırmak adına büyük bir önem taşımaktadır. Literatürde, bu konuda yapılan birçok çalışma örneğinden bazıları aşağıda sunulmaktadır.

Yang ve çalışma arkadaşları, plastik alt tabaka üzerine çok katmanlı metalik ince filmler üretmiş ve bu yapıların elektromanyetik kalkanlama etkinliğini (EMI Shielding Effectiveness, SE) deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, polikarbonat (PC) ve polipropilen (PP) alt tabakalar üzerine fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemi ile alüminyum (Al), bakır (Cu) ve nikel (Ni) ince filmleri, her biri 100 nm kalınlığında olacak şekilde tek katmanlı ve çok katmanlı olarak biriktirilmiştir. Elektromanyetik kalkanlama performansını değerlendirmek amacıyla, Al, Cu ve Ni metallerinin tek, iki ve üç katmanlı tüm kombinasyonları üretilmiş ve bu yapıların SE değerleri 900 MHz, 1.8 GHz ve 2.45 GHz frekanslarında ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar, film kalınlığının ve katman sayısının artmasının kalkanlama etkinliği üzerinde doğrudan olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. En yüksek kalkanlama etkinliği, 67,3 dB değer ile Substrate/Cu/Al/Ni üç katmanlı yapısında elde edilmiştir. Bu bulgu, katman diziliminin de kalkanlama performansında etkili olabileceğini ortaya koymaktadır (Yang vd., 2008).

Eskalen ve arkadaşları, spray pyrolysis yöntemiyle bor katkılı çinko oksit (ZnO:B) ince filmler üretmiş ve bu filmlerin radyasyon kalkanlama özelliklerini incelemişlerdir. Üretilen filmler, %5, %10 ve %20 oranında bor içermekte olup, yaklaşık 400 nm kalınlığa sahiptir. Yapısal, morfolojik ve optik analizler XRD, SEM ve UV-vis spektroskopi teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Radyasyon kalkanlama performansı, 6 MeV enerjiye sahip kaynakla yapılan deneylerde değerlendirilmiştir. Ölçümler sonucunda, lineer ve kütesel zayıflatma katsayılarının bor oranıyla birlikte arttığı, yarı değer katmanı (HVL), ondalık değer katmanı (TVL) ve serbest yol uzunluğu (MFP) gibi parametrelerin ise azaldığı görülmüştür. Özellikle %20 bor katkılı filmlerin lineer zayıflatma katsayısı 0.0125 cm^{-1} olarak ölçülmüş, bu da en yüksek radyasyon zayıflatma performansını göstermiştir (Eskalen vd., 2020).

Li ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada, elektromanyetik girişim (EMI) kalkanlama amacıyla çok katmanlı ince film yapıları üretilmiştir. Bu doğrultuda, PA12 (naylon) altlık malzemesi üzerine fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemi olan sputter kaplama tekniği kullanılarak gümüş (Ag), nikel (Ni), titanyum (Ti) ve grafit tabakaları ardışık olarak kaplanmıştır. 1.5 mm kalınlığında ve 50×50 mm boyutlarında hazırlanan altlık malzemesi, tek taraflı ve çift taraflı kaplama seçenekleriyle üretilmiş ve bu yapıların elektromanyetik kalkanlama etkinlikleri incelenmiştir. Elektromanyetik kalkanlama etkinliği ölçümleri, 0.9 GHz - 6.2 GHz frekans aralığında, spektrum analizörü ve dalga kılavuzu iletim hattı yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, üretilen çok katmanlı ince film yapıların 35 dB ile 58 dB arasında değişen kalkanlama etkinliği sağladığını göstermiştir. Elde ettikleri bu bulgular neticesinde, geliştirdikleri malzemenin EMI kalkanlama açısından etkili bir performans sunduğunu ortaya koymuşlardır (Y.-T. Li & Sun, 2022).

Park ve çalışma arkadaşları, DC magnetron sputter yöntemi kullanarak yaklaşık 4 μ m kalınlığında tek katmanlı NiFe (%80 Ni, %20 Fe) ve Cu ince filmleri ile çok katmanlı NiFe/Cu yapılarını üretmişlerdir. Elektromanyetik kalkanlama etkinlikleri, vektör ağ analizörü (VNA) kullanılarak 0.7 GHz - 10 GHz frekans aralığında ölçülmüştür. Gerçekleştirilen analizlerde, 4 μ m kalınlığındaki tek katmanlı Cu filminin yüksek iletkenliği nedeniyle elektromanyetik dalgaları büyük oranda yansıttığı, buna karşın tek katmanlı NiFe filminin Cu'ya kıyasla daha düşük iletkenliği sayesinde yansıtıcılığının azaldığı ve elektromanyetik dalgaların film içerisine daha fazla nüfuz ederek absorpsiyonu artırdığı gözlemlenmiştir. Öte yandan, oluşturulan NiFe₈/Cu çok katmanlı yapılar incelendiğinde, katmanlar arası çoklu yansımalarla bağlı olarak elektromanyetik kalkanlama etkinliğinin önemli ölçüde arttığı tespit edilmiştir. 4 μ m kalınlığındaki tek katmanlı filmler 60 - 80 dB aralığında bir kalkanlama etkinliği sağlarken, aynı kalınlığa sahip çok katmanlı yapılar 80 - 100 dB aralığında kalkanlama etkinliği göstermiştir (J. Park vd., 2019).

Zhang ve çalışma arkadaşları, 0.4 mm kalınlığındaki PET (polietilen tereftalat) altlık malzemesi üzerine spin kaplama yöntemi ile ultra ince gümüş filmler üretmişlerdir. Film kalınlıkları, spin kaplama işleminin tekrar sayısına bağlı olarak 200 nm ile birkaç mikrometre arasında değişkenlik göstermektedir. Üretilen yüksek iletkenliğe sahip gümüş filmlerin elektromanyetik girişim (EMI) kalkanlama etkinliği, 8.2 – 12 GHz (X bandı) frekans aralığında vektör ağ analizörü (VNA) kullanılarak ölçülmüştür. Ayrıca, film

yüzeylerinin morfolojik özellikleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Elde edilen veriler, yalnızca 200 nm kalınlığa sahip ultra ince gümüş filmlerinin dahi 51.1 dB gibi yüksek bir EMI kalkanlama performansı sunduğunu göstermektedir. Bu sonuç, gümüş bazlı ultra ince kaplamaların, elektromanyetik kalkanlama uygulamaları için oldukça etkili bir çözüm sunabileceğini ortaya koymaktadır (Zhang vd., 2022).

Wang ve arkadaşları, Cu katkılı ultra ince gümüş (Ag) filmleri kullanarak şeffaf ve geniş bant elektromanyetik girişim (EMI) kalkanlama performansını incelemiştir. Dielektrik-metal-dielektrik (DMD) yapısında tasarlanan bu filmler, roll-to-roll magnetron sputter yöntemiyle büyük alanlarda ve oda sıcaklığında üretilmiştir. 8 nm kalınlığındaki Cu katkılı Ag katmanı, yüksek iletkenlik ve düşük yüzey pürüzlülüğü (<1 nm) sergilemiştir. Ölçümler, 8–40 GHz frekans aralığını kapsayan X, Ku, K ve Ka bantlarında gerçekleştirilmiş ve tek katmanın ortalama 26 dB kalkanlama sağladığını, çift katmanlı bir yapı ile bu değerin 30 dB'nin üzerine çıktığını göstermiştir (H. Wang vd., 2019).

Bu çalışmada, püskürtme piroliz yöntemi kullanılarak saf indiyum oksit (In_2O_3) ile farklı oranlarda samaryum (Sm) katkılanmış In_2O_3 ince filmler, ince cam altlıklar üzerine başarıyla sentezlenmiştir. Üretilen numuneler, X-ışını difraktometresi (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve UV-Vis spektroskopisi ile karakterize edilmiştir. %0, %5, %10 ve %20 oranlarında Sm katkısı içeren In_2O_3 ince filmlerin deneysel doğrusal zayıflama katsayıları (μ), 6 MeV enerjili X-ışınları altında VARIAN® ve PTW® iyon odaları kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen μ değerleri doğrultusunda radyasyon kalkanlamada önemli bazı parametreler hesaplanmıştır. Samaryum katkı oranının artmasıyla birlikte, doğrusal zayıflama katsayısında belirgin bir artış gözlemlenmiştir. En yüksek μ değeri, %20 Sm katkılı film için $0,00558 \pm 0,000398 \text{ cm}^{-1}$ olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar neticesinde samaryum katkılı indiyum oksit ince filminin radyasyon soğurulması üzerinde güçlü ve olumlu bir etkisi olduğu ortaya koyulmuştur (Kavun vd., 2022).

Huang ve arkadaşları, düşük sıcaklıkta reaktif magnetron sputter yöntemiyle akrilik substratlar üzerine indiyum kalay oksit (ITO) ince filmleri üretmiş ve bu filmlerin elektromanyetik kalkanlama etkinliklerini değerlendirmiştir. 30 kHz ile 1 GHz frekans aralığında gerçekleştirdikleri ölçümlerde, film kalınlığının artmasıyla filmlerin iletkenliklerinin arttığını ve dolayısıyla kalkanlama performansının arttığını ancak optik geçirgenliğin azaldığını tespit etmişlerdir. En iyi sonuçlarda, ITO filmleri 40 dB'nin üzerinde kalkanlama sağlamıştır. Çalışma, ITO filmlerinin hem şeffaf hem de iletken özellikleri koruyarak EMI kalkanlama 8 potansiyelini ortaya koymuştur (Huang vd., 2001).

Testov ve arkadaşlarının yaptığı çalışma, 4 ile 250 nm arasındaki kalınlıklarda, cam ve silikon alt tabakalar üzerine DC magnetron püskürtme yöntemiyle üretilen nikel ince filmlerin elektromanyetik kalkanlama etkinliğini (SE) incelemektedir. Filmlerin elektriksel özellikleri, dört prob yöntemi ile değerlendirilmiş, yüzey morfolojisi ise atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile incelenmiştir. Filmlerin kalkanlama etkinliğini ölçmek için, boynuz antenlere dayalı taşınabilir kapalı bir ölçüm standı kullanılmıştır. Farklı kalınlıklardaki nikel filmler için, 2–18 GHz frekans aralığındaki elektromanyetik radyasyona karşı kalkanlama etkinliğinin teorik değerlendirmesi yapılmıştır. Sonuçlar, nikel ince filmlerin 35 dB'ye kadar kalkanlama etkinliği gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu bulgular neticesinde, nikel filmlerin, özellikle belirli frekans aralıklarında elektromanyetik uyumluluk gereksinimlerini karşılamak için etkili bir şekilde kullanılabileceği belirtilmiştir. (Testov vd., 2021).

Yu ve arkadaşlarının yaptığı bu çalışmada, elektromanyetik girişim (EMI) kalkanlaması için uygun bir malzeme üretmek amacıyla genişletilmiş polistiren (EPS) parçacıkları bakırla kaplanmıştır. Kaplama işleminin başarılı olduğu, alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını analizi (EDS) ile doğrulanmıştır. Bakır kaplamalı EPS parçacıklarının EMI kalkanlama etkinliği (SE), 80–110 GHz frekans aralığında 14–39 dB olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar neticesinde, bakır kaplamalı EPS parçacıklarının hafif ve etkili bir millimetre dalga EMI kalkanlama malzemesi olarak kullanılabileceği ortaya koymuşlardır (X. Yu vd., 2009).

Yapılan bir diğer çalışmada, polikarbonat yüzey üzerine ITO/Au/ITO çok katmanlı ince filmler, kasıtlı ısıtma uygulanmaksızın magnetron sputtering yöntemiyle kaplanmıştır. Filmdeki optik geçirgenlik ve elektriksel iletkenliği optimize edebilmek amacıyla hem ITO hem de Au katmanlarının kaplama süreleri incelenmiştir. Üretilen ince filmler; X-ışını difraksiyonu, ikincil iyon kütle spektroskopisi, taramalı ve geçirimli elektron mikroskopisi, atomik kuvvet mikroskobu ve fiziksel özellik ölçüm sistemleri ile karakterize edilmiştir. Optik ölçüm sonuçlarına göre, altın (Au) tabakasının kaplama süresi 15 saniyeye kadar artırıldığında ışık geçirgenliği iyileşmiş, bu sürenin aşılmasıyla ise geçirgenlik azalmaya başlamıştır. Au katmanı için en uygun kaplama süresi belirlendikten sonra, elektromanyetik girişim (EMI) kalkanlama etkinliğini artırmak amacıyla ITO katmanlarının kaplama süresi optimize edilmiştir. Bu optimizasyon sonucunda, en yüksek EMI SE değeri 26.8 dB olarak elde edilmiş ve bu değer %99.8 oranında güç zayıflaması

sağlamıştır. Deneysel bulgular, yapılan simülasyonlarla da doğrulanmıştır (Erdogan vd., 2020).

Son olarak, bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen ve makale olarak yayımlanan araştırmada; magnetron sputter yöntemi kullanılarak yaklaşık 200 nm kalınlığında Al ve Co ince filmleri ile yaklaşık 400 nm kalınlığında Al/Co çok katmanlı ince filmleri üretilmiştir. Oluşturulan filmlerin yapısal ve morfolojik karakterizasyonu, XRD (X-ışını kırınımı), EDAX (enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi) ve SEM (taramalı elektron mikroskobu) analizleri ile gerçekleştirilmiştir. XRD ve EDAX sonuçları, Al ve Co filmlerinin herhangi bir bileşik oluşturmada saf halde üretildiğini doğrulamıştır. SEM analizi, filmlerdeki nano ölçekli parçacıkların homojen ve düzenli bir şekilde dağıldığını göstermiştir. Ayrıca, SEM kesit görüntüleri incelendiğinde, film kalınlıklarının yaklaşık 200 nm olduğu doğrulanmıştır. %99,99 saflığa sahip metalik Al ve Co ince filmlerinin elektromanyetik kalkanlama etkinlikleri, 8 – 12 GHz (X bandı) frekans aralığında, vektör ağ analizörü (VNA) kullanılarak dalga kılavuzu iletim hattı içerisinde ölçülmüştür. Elde edilen veriler, tek katmanlı Al ve Co filmlerinin sırasıyla 46 dB ve 28 dB, çok katmanlı Al/Co filminin ise 48 dB kalkanlama etkinliği sağladığını göstermektedir. Elde edilen sonuçlar neticesinde 200 nm gibi çok ince kalınlığa sahip Al filminin 46 dB kalkanlama etkinliği değeri göstererek neredeyse gelen dalganın tamamını engellediği ortaya koyulmuştur (Yaşar & Kaya, 2024).

1.8. Amaç

Gelişen teknoloji ve artan elektromanyetik girişim (EMI) kaynakları, farklı frekans aralıklarında etkin koruma sağlayabilecek yeni kalkanlama malzemelerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Tarihsel süreçte, kurşun ve beton gibi malzemeler radyasyon ve elektromanyetik dalga kalkanlama amacıyla yaygın olarak kullanılmıştır. Kurşunun yüksek atom numarası ve yoğunluğu sayesinde iyonlaştırıcı radyasyon karşısında oldukça etkili bir zırhlama sağladığı bilinmektedir. Ancak kurşunun toksik yapısı, çevresel olumsuz etkileri ve yüksek maliyet gibi dezavantajları, alternatif malzeme arayışlarını hızlandırmıştır. Benzer şekilde, beton da düşük maliyetli ve kolay şekillendirilebilir bir kalkanlama malzemesi olarak yaygın kullanılsa da, yalnızca geniş alanların, odaların veya binaların kalkanlanmasında etkili olabilmektedir. Küçük boyutlu elektronik cihazların kalkanlanmasında ise hacmi ve ağırlığı nedeniyle kullanımı mümkün değildir.

Bu bağlamda, özellikle son yıllarda kompozit malzemeler ve metalik ince filmler üzerine yapılan araştırmalar artış göstermiştir. Kompozit yapılar, farklı katkı malzemeleri ile optimize edilerek radyasyon zayıflatma performansı artırılabilen çok yönlü malzemeler olarak öne çıkmaktadır. Ancak, metalik ince filmler, son derece düşük kalınlıklarda yüksek kalkanlama etkinliği sunarak geleneksel kalkanlama yöntemlerine göre önemli avantajlar sağlamaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar, ince film yapılarının, nanometre kalınlıklarında bile yüksek elektromanyetik kalkanlama sağlayabildiğini göstermektedir.

Metalik ince film çalışmalarının çeşitliliği ve sayısındaki artışın temel nedenleri arasında, incelenen frekans aralıklarının genişliği, kalkanlama gereksinimlerindeki farklılıklar, kullanılabilecek metalik malzeme türlerinin çokluğu, farklı geometri ve katman kombinasyonlarının denenebilmesi gibi faktörler yer almaktadır. İnce film çalışmaları, tek katmanlı veya çok katmanlı yapıların karşılaştırılması, farklı malzeme kombinasyonlarının etkilerinin belirlenmesi, değişen kalınlıkların kalkanlama performansına etkisinin analiz edilmesi gibi konular üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu çeşitlilik, halen aktif bir araştırma alanı olarak metalik ince film teknolojilerinin gelişimini sürdürmesini sağlamaktadır.

Bu çalışmada, farklı iletkenlik değerlerine sahip dört farklı metal (Al, Co, Cr ve Ti) üç farklı kalınlık seviyesinde (temsili 50 nm, 100 nm ve 200 nm) üretilerek, toplamda on iki farklı kombinasyon oluşturulmuştur. Bu kombinasyonlar için elektromanyetik kalkanlama etkinliği (SE) değerleri ölçülerek, farklı iletkenlik değerine sahip farklı malzemelerin farklı kalınlıklardaki kalkanlama etkinliği performansları detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Böylelikle, farklı iletkenlik seviyelerine sahip yapıların kalkanlama performansındaki farklılıkları ortaya koymak, ince film kalınlığının SE üzerindeki etkisini belirlemek ve ultra ince film yapıların yüksek kalkanlama etkinliği sağlama potansiyelini değerlendirmek amaçlanmaktadır.

Bu bağlamda, yapılan çalışma, hem literatürdeki mevcut bilgileri genişletmek hem de farklı iletkenlik değerlerine sahip metalik ince filmlerin kalkanlama performanslarını detaylı bir şekilde karşılaştırarak yeni malzeme seçimlerinde yol gösterici olmak açısından önemli katkılar sunmayı hedeflemektedir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Materyal

Deneysel çalışmalarda, magnetron sputter yöntemi ile alüminyum (Al), kobalt (Co), krom (Cr) ve Titanyum (Ti) ince filmlerinin büyütülmesi sürecinde, Kurt J. Lesker firması tarafından üretilen, 2 inç çapında, 0,125 inç kalınlığında ve %99,99 saflıkta targetlar (hedef malzemeler) kullanılmıştır. Tablo 6'da kullanılan dört farklı metalin temel fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmiştir. (URL-3,2025)

Tablo 6. Mikrodalga kalkanlama etkinliği analiz edilen Al, Co, Cr ve Ti malzemelerinin fiziksel özellikleri

Özellik	Alüminyum (Al)	Kobalt (Co)	Krom (Cr)	Titanyum (Ti)
Atomik Ağırlık (g/mol)	26,9815	58,9332	51,9961	47,8670
Atom Numarası	13	27	24	22
Yoğunluk (g/cm ³)	2,7	8,9	7,2	4,5
Renk/Görünüm	Gümüşi, Metalik	Parlak, Metalik, Gri Tonlu	Gümüşi, Metalik	Gümüşi, Metalik
Elektriksel İletkenlik (S/m)	$3,77 \times 10^7$	$1,67 \times 10^7$	$7,90 \times 10^6$	$2,38 \times 10^6$
Erime Noktası °C	660	1495	1857	1660
Termal İletkenlik (W/m.K)	235	100	94	21,9

Deneysel çalışmalarda, ince filmlerin kaplanması için altlık malzemesi olarak, Şekil 14'de gösterilen 0,13 - 0,15 mm kalınlığında lamel cam kullanılmıştır. Camın altlık malzemesi olarak tercih edilme nedenlerinden biri, elektromanyetik dalgalara karşı oldukça düşük kalkanlayıcılık özelliğine sahip olmasıdır. Bu özellik, metalik ince filmlerin elektromanyetik kalkanlama performansına yönelik yapılan ölçümlerde camın etkisini ihmal edilebilir seviyeye indirmekte, böylece elde edilen verilerin doğruluğunu artırmaktadır.



Şekil 14. Altlık olarak kullanılan lamel cam malzemesi

Bunun yanı sıra, cam malzemenin yüksek erime sıcaklığına sahip olması, deneysel süreç açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Yaklaşık olarak alüminyumun erime sıcaklığına eşdeğer bir sıcaklıkta bozunmaya uğraması, sputter kaplama işlemi sırasında ya da sonrasında uygulanabilecek olası tavlama işlemlerine karşı dayanıklı bir yapı sunmaktadır.

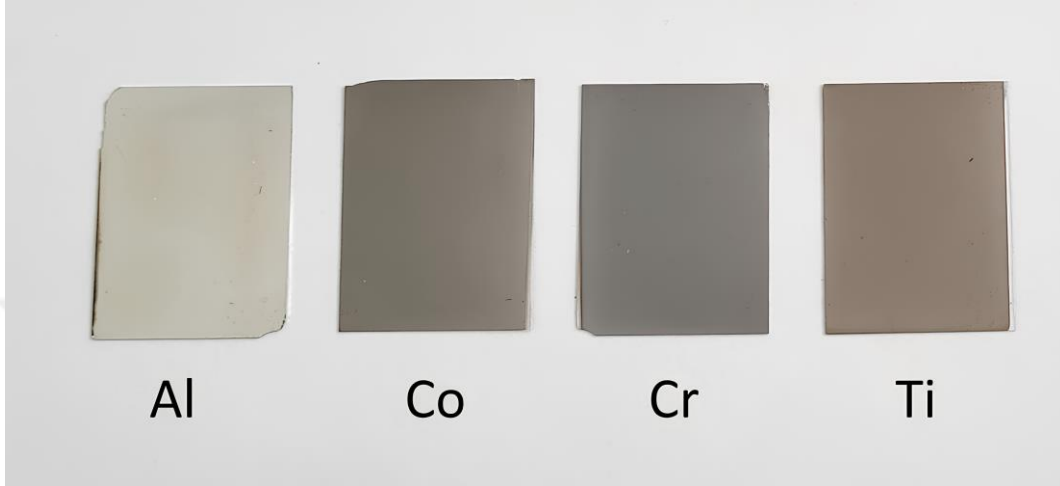
2.2. Sputter Yöntemi ile Kalkanlayıcı Numune Üretimi

Bir kalkanlayıcı olarak özellikleri analiz edilecek olan metalik ince filmler, ticari lamel cam altlık malzemesi üzerine magnetron sputter cihazı kullanılarak büyütülmüştür. Büyütme işlemi öncesinde, cam altlık malzeme deiyonize su ve etanol ile temizlenmiş ve ardından azot gazı ile kurutulmuştur. Temizlenen cam altlık, daha sonra dikkatlice sputter cihazının numune tutucu haznesine yerleştirilmiştir.

Kaplama işlemi sırasında sırasıyla alüminyum, kobalt, krom ve titanyum ince filmleri altlık üzerine biriktirilmiştir. Yukarıdaki tablo 6'da özellikleri gösterilen %99,99 saflığındaki metaller, sputter cihazının katot alanına sırasıyla yerleştirilmiş ve cihazın ağzı kapatılarak vakumlama işlemi başlatılmıştır. Her kaplama öncesinde hazne, 8×10^{-6} Torr'a kadar vakumlanmış ve çalışma basıncı 5×10^{-3} Torr'da sabitlenmiştir. Cihaz, 300 Watt gücünde çalıştırılmıştır.

Daha sonra, cihaz içerisine argon gazı verilerek yüksek enerjili iyonlar oluşturulmuş ve bu iyonlar, hedef malzemenin atomlarını sıyırarak hedef yüzeyde ince bir film tabakası oluşturmuştur. 50, 100 ve 200 nm kalınlıklarında ince filmler kaplanması hedeflenmiştir. Toplamda, 4 farklı malzeme için 3 farklı kalınlık kullanılarak, 12 adet farklı yapıda

kalkanlayıcı yapı elde edilmiştir. Cihazın, hedeflenen kalınlığa ulaşınca durdurulması sağlanmış olsa da, cihazın kalınlık ölçüm kapasitesi sınırlı olduğundan, filmlerin gerçek kalınlıkları, SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntülemesi ile elde edilen kesit görüntülerinden ölçülmüştür.



Şekil 15. Al, Co, Cr ve Ti kalkanlayıcı yapılar

Şekil 15’de, dört farklı metal ile kaplanmış kalkanlayıcı numuneler görülmektedir. İncelemeler sonucunda, elde edilen ince filmlerde gözle görülür herhangi bir kusur bulunmadığı ve kaplamanın altlık yüzeyine boşluksuz ve homojen bir şekilde gerçekleştiği tespit edilmiştir.

İnce film oluşturma işlemi için kullanılan sputter yöntemi kapsamında, Nanovak marka NVTs-400 model ince film kaplama cihazı tercih edilmiştir. Bu cihaz, silindirik bir vakum haznesine ve termal buharlaştırma ile DC sputter kaynağına sahip olup, kaplama sürecinde yüksek iyonizasyon sağlamak amacıyla Ar, N₂ ve O₂ atmosferlerinde işlem yapabilme kapasitesine sahiptir. Yükleme sisteminde, 1 saatte 10⁻⁸ Torr ana basınç seviyesine ve 10⁻⁷ Torr vakum seviyesine ulaşılabilir.



Şekil 16. Nanovak marka NVTS-400 model ince film kaplama cihazı

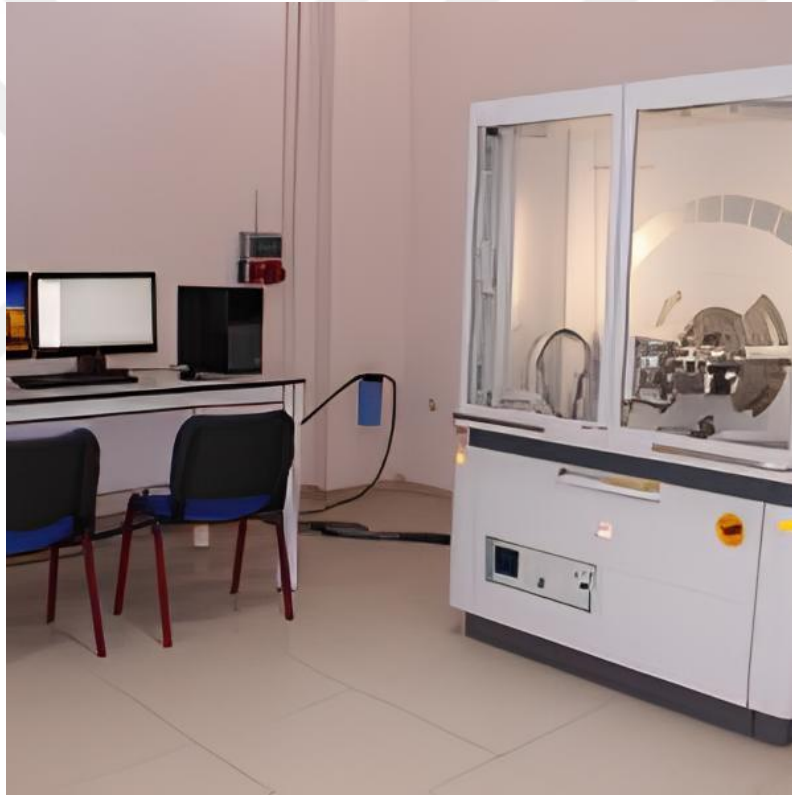
2.3. Numunelerin Kalınlık Seçimi

İnce film numunelerinin kalınlıkları, yapılan deneylerin amaçlarına ve kalkanlayıcı özelliklerin incelenmesindeki gereksinimlere uygun olarak seçilmiştir. Kaplama işlemi için 50, 100 ve 200 nm kalınlıkları belirlenmiş olup, sputter cihazında gösterilen kalınlık bilgisi bu kalınlıkları elde ettiğinde işlem durdurulmuştur. Ancak, filmlerin kesin kalınlıkları daha sonra SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) kesit görüntülerinden doğrulanmıştır. Bu kalınlıklar, farklı elektromanyetik dalga etkileşimleri ve zırhlama performanslarını karşılaştırabilmek adına anlamlı sonuçlar sunmaktadır. Kalınlık seçimindeki temel amaç, farklı kalınlıklardaki film tabakalarının elektromanyetik dalgalara karşı farklı tepkilerini gözlemlemek ve bu özelliklerin kalkanlama performansını nasıl etkilediğini analiz etmektir.

Kalınlık seçimi, deneyde kontrol edilen değişkenlerin çeşitliliğini artırarak, elde edilen sonuçların genellenebilirliğini sağlamak açısından büyük önem taşımaktadır. Bu sayede, farklı kalınlıklarda büyütülen filmlerin kalkanlayıcı performansları arasındaki ilişkiler daha açık bir şekilde ortaya konulmuş olacaktır.

2.4. XRD (X-Işını Difraksiyonu) ve EDAX ile Yapısal Analizler

X-Işını Difraksiyon (XRD) analizleri, numunelerin yapısal durumlarını ve bileşen içeriklerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. PANALYTICAL EMPYREAN marka XRD cihazı kullanılarak yapılan yapısal analizlerde, 20-80 derece aralığında 0,02 derece adımlarla ölçümler yapılmıştır. XRD ölçümleri dört farklı ince film malzemesi için de gerçekleştirilmiş fakat en ince kesitli filmlerde pikler gözlemlenemediği için bulgulara eklenmemiştir. XRD analizi kalkanlayıcı numunelerin yapısal durumlarını doğrulamak için kullanılmış ve elde edilen veriler, numunelerin içerdiği ince film tabakalarının kristal yapısını belirlemeye olanak tanımıştır.



Şekil 17. Panalytical Empyrean marka XRD cihazı

PANALYTICAL EMPYREAN XRD cihazının teknik özellikleri aşağıda sıralanmıştır:

- X-ray tüp gücü: 4 kW
- Tüp voltajı: 15-60 kV
- Tüp akımı: 5-60 mA

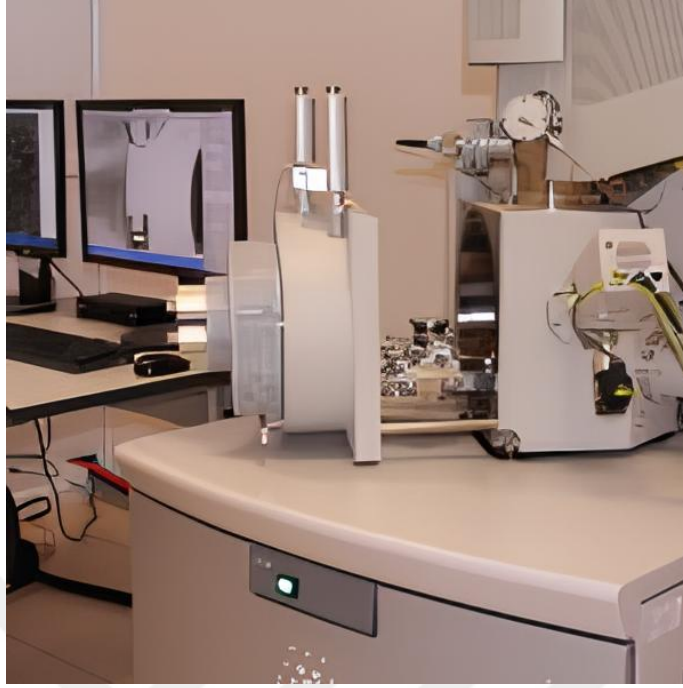
- Anot malzeme seçeneği: Cu
- Dedektör boyutu: 256 x 256 piksel
- Konfigürasyonlar: Toz ve ince film numuneleri için dikey gonyometre
- En küçük gonyometre uzunluğu: 0.0001 derece
- Maksimum açısal hız: 15 derece/sn
- Sıcaklığa bağlı ölçüm: 25-1200 °C

2.5. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ile Morfolojik Analizler

X-Işını Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizleri, ince film numunelerinin morfolojik yapılarının ve yüzey özelliklerinin detaylı bir şekilde incelenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. FEI QUANTA FEG 450 model SEM cihazı kullanılarak yapılan bu analizlerde, numunelerin yüzey yapıları ve kalınlıkları gözlemlenmiştir. SEM cihazı, numunelerin kesit görüntülerini sağlayarak, filmlerin kesin kalınlıkları hakkında doğru bilgiler edinilmesine olanak tanımıştır. Ayrıca, cihazın sahip olduğu yüksek çözünürlük, filmin pürüzlülüğü, homojenliği, yüzey kusurlarını, mikro yapıları ve morfolojik özellikleri net bir şekilde ortaya koymuştur.

FEI QUANTA FEG 450 model SEM cihazının teknik özellikleri şu şekildedir:

- Büyütme: 6x - 1.000.000x
- Elektron kaynağı: Alan emisyonlu kaynak (FEG)
- Elektron dedektörü: ETD, DBS, LFD, STEM, GSED ve X-ray
- Numune tabla hareketleri: En az X = 100 mm, Y = 100 mm, Z = 50 mm
- Tilt açısı: -3° ve +70°
- EDAXS (Enerji Dağılım X-ışını Spektrometre) sistemi mevcut
- Çalışma modları: Yüksek vakum, Düşük vakum ve ESEM modlarında çalışma özelliği

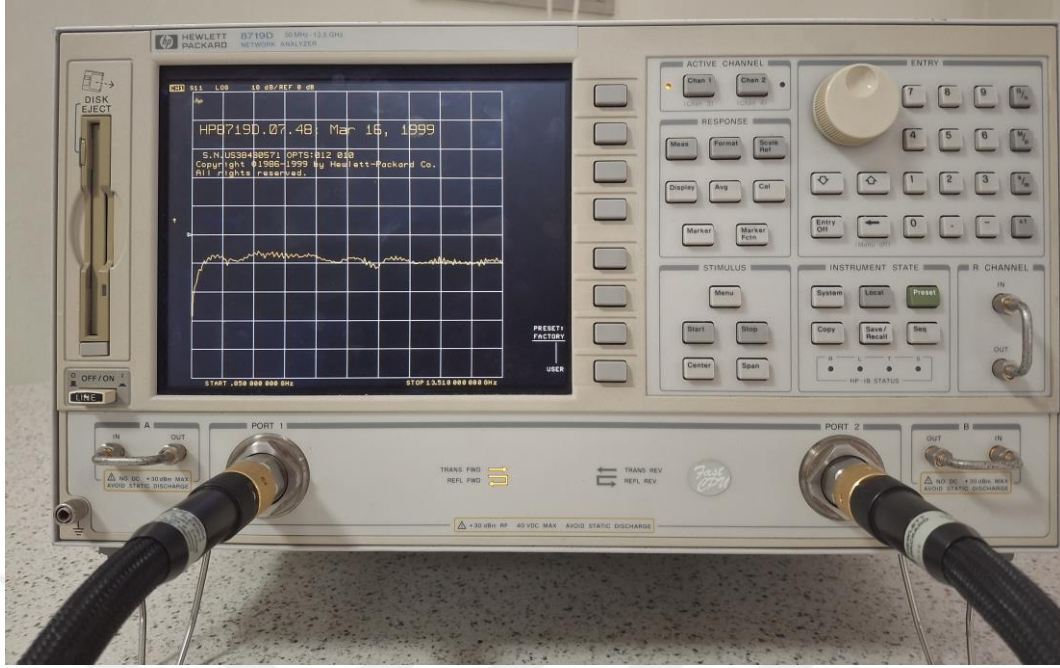


Şekil 18. FEI QUANTA FEG 450 model SEM cihazı

SEM cihazı, farklı vakum modlarında çalışabilme yeteneği sayesinde, her bir numunenin morfolojik analizini çeşitli koşullarda gerçekleştirebilmiştir. Ayrıca, EDAXS sistemi ile numunelerin elementel analizleri de yapılmış ve ince film tabakalarının bileşen içerikleri tespit edilmiştir. Bu sayede, numunelerin yüzey yapısı ve bileşenleri hakkında kapsamlı bilgi edinilmiştir.

2.6. Vektör Ağ Analizörü ile Elektromanyetik Kalkanlama Ölçümleri

Yapılan bu çalışmada iletim ve yansıma parametre ölçümleri, Şekil 19’da gösterilen HP8719D.07.48 ağ analizörü cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kalkanlayıcı numunelerin ölçümleri gerçekleştirilmeden önce analizör cihazı 8-12 GHz frekans bant aralığında kalibre edilmiştir. İletim ortamı olarak kullanılacak X bant dalga kılavuzları arasına ilk olarak referans olması için kaplama yapılmamış boş cam altlık malzemesi koyulmuş, daha sonra radyasyon kalkanlayıcılık değerleri test edilecek numuneler sırasıyla yerleştirilerek ölçümler gerçekleştirilmiştir. 1.5. bölüm de kalkanlama etkinliği altbaşlığında bahsedildiği gibi, 2 kapılı cihazla yapılan ölçümlerde S_{11} , S_{21} , S_{12} ve S_{22} parametreleri desibel cinsinden elde edilmiştir.



Şekil 19. HP8719D.07.48 ağ analizörü cihazı

Hazırlanan kalkanlayıcı numunelerin sadece tek tarafı iletken madde ile kaplandığı için kalkanlayıcı yapılar simetrik değildir. Fakat cam altlık malzeme elektromanyetik dalga ile çok az etkileşime girdiği için $S_{11} - S_{22}$ ve $S_{21} - S_{12}$ parametre değerleri birbirine çok yakın sonuçlar vermektedir. Cam altlık malzemesinin yansıma S parametre değeri $S_{11} = -15$ dB, iletim S parametre değeri ise $S_{21} = -0.3$ dB'dir. Bu değerler, yansıtıcılık parametresi düşük iletim parametresi ise yüksek olan ince cam altlık malzemesinin kalkanlama ölçümlerine etkisinin düşük olacağını göstermektedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular detaylı bir şekilde ele alınacaktır. İnce film kaplamaları, belirlenen yöntemler doğrultusunda cam altlıklar üzerine büyütülmüş ve ardından yapısal, morfolojik ve elektromanyetik kalkanlama ölçümleri gerçekleştirilmiştir. İnce filmlerin yapısal analizi, kaplanan malzemenin kristal fazlarını ve içeriğini doğrulamak amacıyla XRD ve EDAX analizleri ile yapılmıştır. XRD analizleri ile malzemenin kristal yapısı belirlenirken, EDAX ile ince filmin kimyasal bileşimi incelenmiş, herhangi bir safsızlık veya istenmeyen elementin varlığı araştırılmıştır.

Ayrıca, kaplamanın yüzey morfolojisinin incelenmesi ve kaplama kalitesinin değerlendirilmesi amacıyla SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. SEM görüntüleri, ince filmlerin yüzey topografyasını ortaya koyarak homojen dağılımın sağlanıp sağlanmadığını ve herhangi bir topaklanma, çatlak veya düzensiz yüzey yapısı olup olmadığını belirlemek için kullanılmıştır. Böylece üretilen filmlerin kalite kontrolü yapılmış ve istenen özellikleri taşıyıp taşımadığı değerlendirilmiştir.

Yapısal ve morfolojik analizler sonucunda doğru bir şekilde üretildiği doğrulanan numuneler, elektromanyetik kalkanlama performanslarının belirlenmesi amacıyla Vektör Ağ Analizörü (VNA) kullanılarak 8-12 GHz frekans aralığında test edilmiştir. Numuneler, dalga kılavuzu içerisine yerleştirilerek, S-parametreleri (S_{11} , S_{21} , S_{12} , S_{22}) ölçülmüştür. VNA tarafından belirlenen çözünürlük doğrultusunda elde edilen veriler, desibel (dB) cinsinden kaydedilmiş ve grafiksel olarak sunulmuştur.

Bu bölümde, her bir numune çeşidi ayrı ayrı ele alınarak yapısal, morfolojik ve elektromanyetik kalkanlama performansları incelenmiş, sonuçlar detaylı olarak değerlendirilmiştir.

3.1. Farklı Kalınlıklarda Üretilen Alüminyum İnce Filmlerin Analizleri

Bu bölümde, farklı kalınlıklarda üretilen alüminyum (Al) ince filmlerin yapısal, morfolojik ve elektromanyetik kalkanlama performanslarına ilişkin analizler sunulacaktır. İnce film üretimi, magnetron sputter kaplama yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, lamel cam altlıklar, kaplama öncesinde altlık haznesine yerleştirilmiştir. Kaplama işlemi,

belirlenen 50 nm, 100 nm ve 200 nm hedef kalınlıklarda olacak şekilde ayarlanmış ve her kalınlık için üç ayrı kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir.

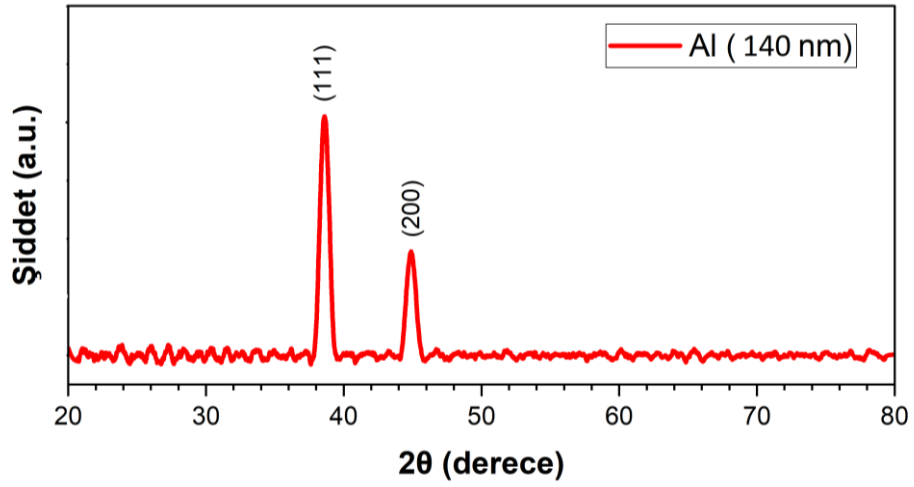
Sputter kaplama yöntemiyle elde edilen film kalınlıkları, cihazın doğası gereği yaklaşık değerler olmakta ve kesin kalınlık değerleri üretim sonrası belirlenmektedir. Bu nedenle, kaplanan filmlerin gerçek kalınlık değerleri, SEM cihazı ile alınan kesit görüntüleri üzerinden hesaplanmıştır. Ayrıca, kaplanan Al ince filmlerinin yapısal analizi, malzemenin bileşimini belirlemek amacıyla XRD ve EDAX yöntemleriyle gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerin detayları, ilgili alt başlıklarda ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

Son olarak, Al ince filmlerinin X-band (8-12 GHz) elektromanyetik dalga kalkanlama performansı, vektör ağ analizörü ile ölçülmüş ve elde edilen S-parametreleri (S_{11} , S_{21} , S_{12} , S_{22}) kullanılarak kalkanlama etkinliği değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, ilgili alt başlıklarda ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

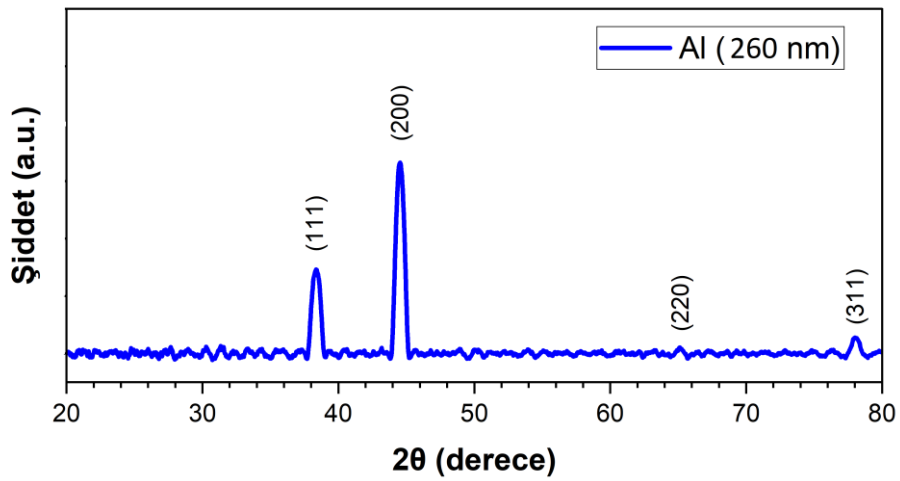
3.1.1. Alüminyum İnce Filmlerin XRD ve EDAX Analizleri

Farklı metallerden, farklı kalınlıklarda üretilen kalkanlayıcı malzemelerin doğrulanması ve karakterizasyonu amacıyla XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Üç farklı kalınlıkta oluşturulan filmlerden, en düşük kalınlığa sahip olanlar, dört farklı metal için de aşırı ince olmaları nedeniyle amorf karakter sergilemiş ve XRD analizlerinde belirgin pikler göstermemiştir. Bu nedenle, tüm metaller için yalnızca orta ve yüksek kalınlığa sahip kalkanlayıcı numuneler için XRD grafikleri sunulmuştur.

Şekil 20 ve 21 de gösterilen alüminyum ince filmlerinin X-ışını difraksiyonu (XRD) grafikleri incelendiğinde, her iki numunenin de literatürde saf alüminyum için rapor edilen $38,5^\circ$ 'deki (111) ve $44,7^\circ$ 'deki (200) kristalografik düzlemlerine karşılık gelen karakteristik pikleri sergilediği ve polikristal yapıda olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, film kalınlığının artmasıyla birlikte (200) pikinin göreceli yoğunluğunun arttığı ve bunun yanı sıra 65° ve 78° civarında (220) ve (311) düzlemlerine ait yeni piklerin ortaya çıkmaya başladığı gözlemlenmiştir (Alizadeh & Samiei, 2014; Król vd., 2016; J. Wang vd., 2014). Bu durum, kristal yapının kalınlık artışına bağlı olarak belirli yönlerde büyüme eğilimi gösterdiğini ve tane yapısında kısmi değişimler meydana geldiğini göstermektedir.



Şekil 20. Alüminyum (140 nm) ince filminin XRD grafiği

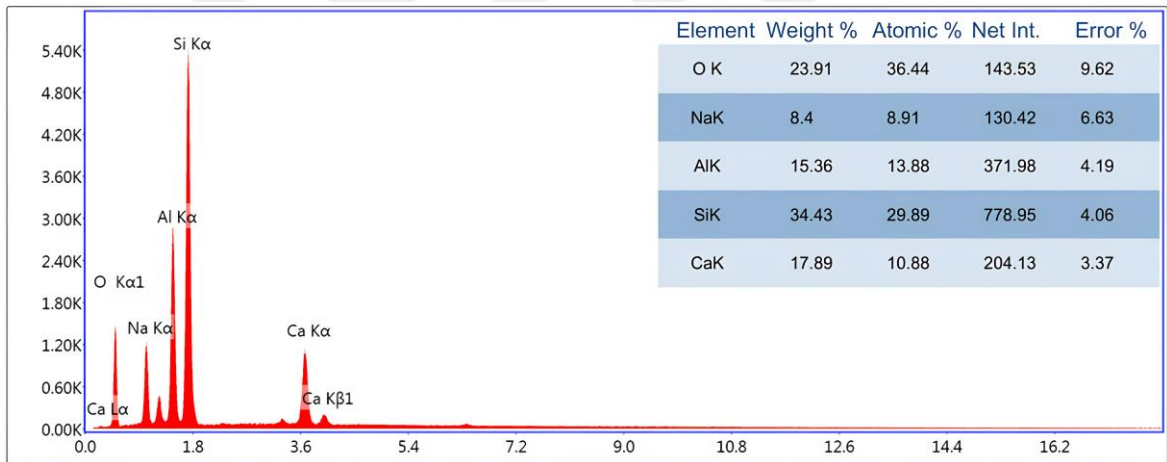


Şekil 21. Alüminyum (260 nm) ince filminin XRD grafiği

Alüminyum ince filmlerinin tüm kalınlıklarındaki elemental bileşim analizleri de gerçekleştirilmiştir. EDAX analizi ile, her bir numunede bulunan elementlerin türleri ve miktarları belirlenmiştir. Bu analiz, taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazı ile yapılan yüksek enerjili elektron bombardımanına dayanmaktadır. Elektronların numunedeki atomlarla etkileşimi sonucunda, her bir atom, kendine özgü X-ışınları yaymaktadır. Bu X-ışınları, numunede bulunan elementlerin kimliğini ve miktarını belirlememize olanak tanımaktadır.

Gerçekleştirilen EDAX analizleri sonucunda, cam altlık malzemesine ait silisyum (Si), soydum (Na), oksijen (O), kalsiyum (Ca) bileşenlerinin yanı sıra, kaplama malzemesi olarak kullanılan alüminyum (Al) bileşeni de tespit edilmiştir. Kalkanlayıcı numunenin büyük kısmını oluşturan cam altlık malzemesinin bileşenlerinin miktarı, üç farklı kalınlıktaki numuneler arasında sabit kalırken, yalnızca alüminyum bileşeninin miktarının, alüminyum filmin kalınlıkları ile doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, numunelerde yalnızca cam bileşenleri ve alüminyum bileşeninin var olduğu, yabancı bir bileşenin bulunmadığı tespit edilmiştir.

Üç farklı numunenin tüm EDAX görüntüleri benzer olmakla birlikte, yalnızca alüminyum bileşeninin miktarında kalınlıkla doğru orantılı bir artış gözlemlenmiştir. Bu nedenle, aşağıda yalnızca en yüksek kalınlıktaki alüminyum kalkanlayıcı yapıya ait EDAX görüntüsü sunulmuştur.



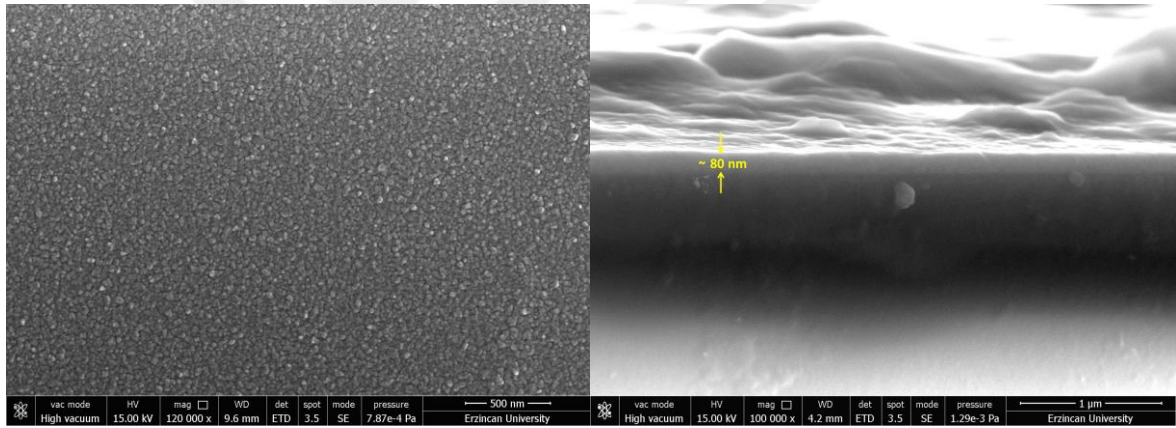
Şekil 22. Alüminyum (260 nm) ince filminin enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDAX) sonucu

3.1.2. Alüminyum İnce Filmlerin SEM Analizleri

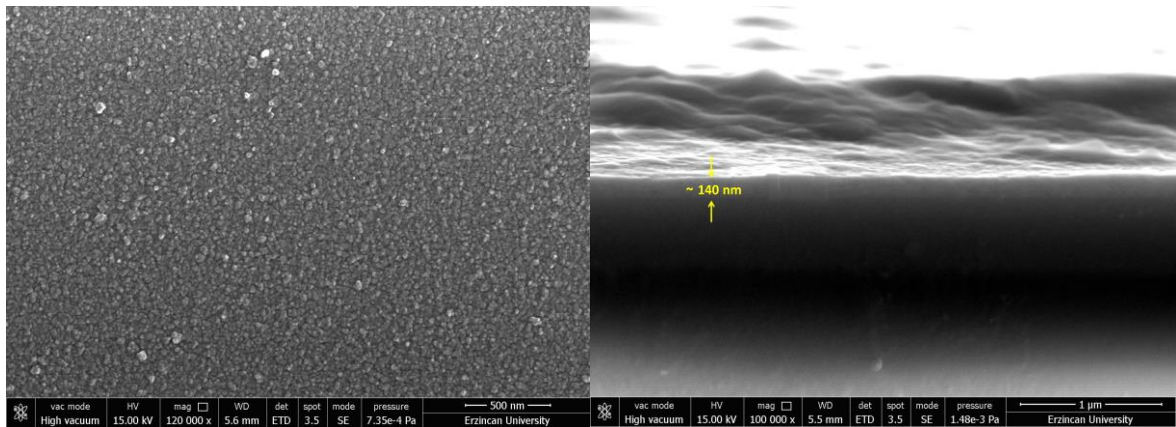
Alüminyum ince filmlerin SEM görüntüleri incelendiğinde, yüzeyin düzenli ve homojen bir dağılıma sahip olduğu görülmektedir. Farklı kalınlıklarda büyütülen alüminyum filmleri benzer morfolojik özellikler sergilemektedir. Yüzey morfolojisi, sıkı paketlenmiş granüler yapılardan oluşmakta olup, bu yapı bulgur tanelerinin düzenli bir şekilde serilmesine benzetilebilir. İnce film boyunca belirgin bir çatlak, boşluk veya toplanma (aglomerasyon) gözlenmemiştir. Alüminyum filmler, keskin hatlara sahip

kompakt bir yapı göstermektedir. Tane boyutları nanometre mertebesinde olup, homojen dağılım gösterdiği görülmektedir. Aşağıdaki görüntülerde, farklı kalınlıklarda üretilen alüminyum ince filmlerinin yüzey ve kesit görüntüleri yan yana verilmiştir. İnce filmler, sputter yöntemi kullanılarak kaplanmış olup, her bir numunenin bir öncekinin yaklaşık iki katı kalınlığa sahip olması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, cihaz sırasıyla 50 nm, 100 nm ve 200 nm kalınlıklara ayarlanarak kaplama işlemleri gerçekleştirilmiştir.

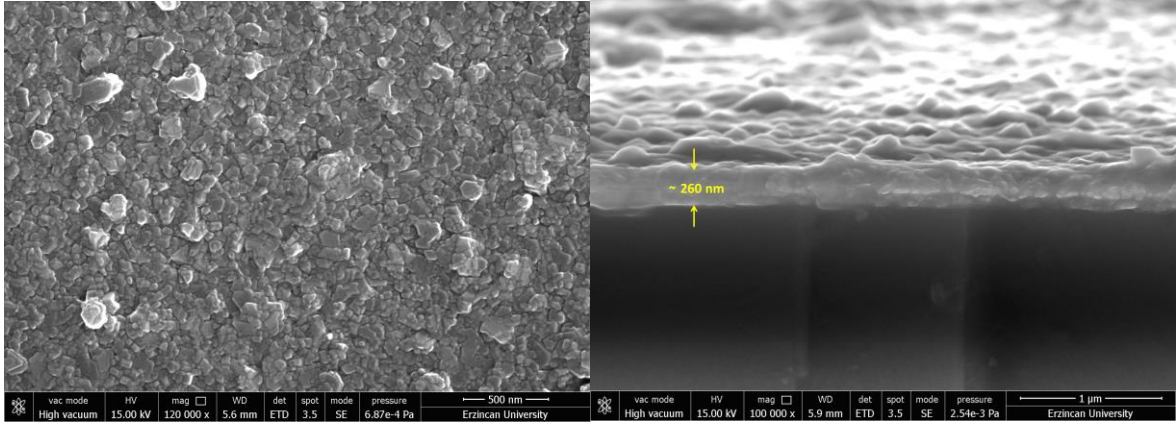
Ancak, cihazın kalınlık tayini yüksek hassasiyete sahip olmadığından, üretilen filmlerin gerçek kalınlıklarında belirli sapmalar meydana gelmiştir. Numunelerin kesin kalınlık değerleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM) kesit görüntülerinden belirlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, hedeflenen kalınlıklardan sapmalar olduğu görülmüş ve Al ince filmlerinin sırasıyla 80 nm, 140 nm ve 260 nm kalınlığa sahip olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 23. 80 nm kalınlığındaki alüminyum ince filminin yüzey ve kesit SEM görüntüsü



Şekil 24. 140 nm kalınlığındaki alüminyum ince filminin yüzey ve kesit SEM görüntüsü

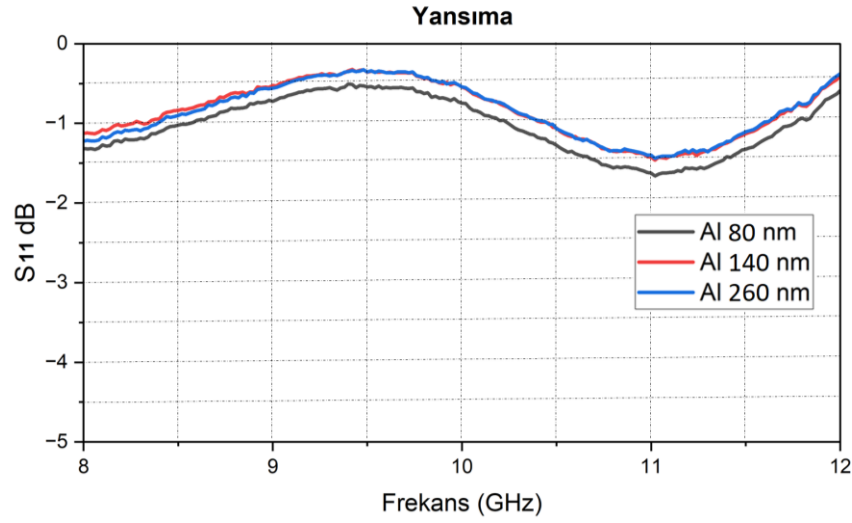


Şekil 25. 260 nm kalınlığındaki alüminyum ince filminin yüzey ve kesit SEM görüntüsü

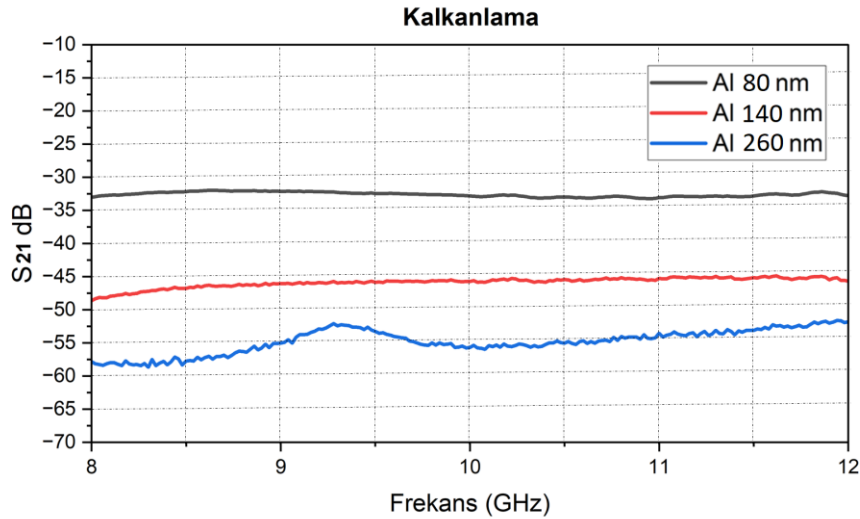
3.1.3. Alüminyum İnce Filmlerin Mikrodalga Kalkanlama Analizleri

Bu bölümde, magnetron sputter cihazı ile farklı kalınlıklarda üretilen alüminyum (Al) ince filmlerinin elektromanyetik kalkanlama performansları incelenmiştir. Elektromanyetik kalkanlama ölçümleri, Vektör Ağ Analizörü (VNA) kullanılarak iletim yansıma hat yöntemiyle dalga kılavuzu iletim hattı içerisinde gerçekleştirilmiştir. Ölçüm öncesinde sistem, 8–12 GHz frekans aralığında hassas kalibrasyon işlemine tabi tutulmuştur. Ardından, WR90 dalga kılavuzları arasına, kalkanlama etkinliği belirlenmek üzere farklı kalınlıklarda Al kaplı numuneler sırasıyla yerleştirilerek ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sırasında, cihazın iki portu kullanılmış olup S_{11} , S_{21} , S_{12} ve S_{22} saçılma parametreleri dB cinsinden elde edilmiştir. Numunelerin simetriye yakın olması nedeniyle, S_{11} - S_{22} ve S_{21} - S_{12} parametrelerinin benzer değerler sergilediği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, analizlerde yalnızca S_{11} ve S_{21} parametrelerine ait grafiklerin sunulmasının yeterli olacağı değerlendirilmiştir.

Aşağıda sunulan alüminyum filmlerinin 8 -12 GHz frekans bandında elde edilen S parametresi grafikleri incelendiğinde, Al kaplı numunelerin tüm kalınlıklarda yüksek düzeyde yansıtma özelliği gösterdiği tespit edilmiştir. Özellikle 80 nm gibi oldukça düşük kalınlıklarda dahi, numunelerin %99,9'un üzerinde elektromanyetik kalkanlama sağladığı belirlenmiştir. Artan film kalınlıklarının kalkanlama performansı üzerindeki etkisi incelendiğinde, kalkanlama performansının kalınlık ile doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 26. Üç farklı kalınlıktaki alüminyum ince filmlerinin S_{11} yansımaya parametresi grafiği



Şekil 27. Üç farklı kalınlıktaki alüminyum ince filmlerinin S_{21} iletim parametresi grafiği

Tablo 6’da sunulan karşılaştırmalı sonuçlara göre, ölçümü gerçekleştirilen dört farklı metal arasında en yüksek iletkenliğe sahip olan Al ince filmleri, tüm kalınlıklarda diğer numunelere kıyasla daha yüksek elektromanyetik kalkanlama performansı sergilemiştir. Özellikle ultra ince kalınlıklarda dahi etkili kalkanlama özelliği göstermesi nedeniyle, Al ince filmlerinin mikro elektronik cihazların elektromanyetik uyumluluklarının sağlanmasında potansiyel bir kalkanlayıcı malzeme olarak öne çıktığı değerlendirilmektedir. Al ince filmlerinin kalkanlama performansına ilişkin literatürde yapılan bazı çalışmalar şu şekildedir;

Yukarıda literatür araştırması başlığında bahsedilen bir çalışmada, %99,99 saflıktaki alüminyum kullanılarak fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemiyle 100 nm ve 300 nm kalınlığında alüminyum ince filmler üretilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, bu filmlerin 2,45 GHz frekansında sırasıyla 46,96 dB ve 48,74 dB elektromanyetik kalkanlama etkinliği sağladığı rapor edilmiştir (Yang vd., 2008). Yapılan bir diğer çalışmada, kalkanlama etkinliği ölçümleri kapsamında alüminyum malzemesi de kullanılmıştır. İletken metalik alüminyum ince filmlerinin polimer substratlar üzerine biriktirilmesi için termal vakum buharlaşması yöntemi uygulanmıştır. Çalışma sonucunda, 100 nm kalınlığındaki saf alüminyum ince filminin 1,3 GHz frekansında yaklaşık 25 dB kalkanlama etkinliği sağladığı rapor edilmiştir (Mihut vd., 2012). Yapılan bir diğer çalışmada, plastik substratlar üzerine elektron demeti buharlaştırma yöntemi kullanılarak 5 µm kalınlığında alüminyum tabakası biriktirilmiştir. Ölçümler sonucunda, bu kaplamaların 3 GHz frekansında 44 dB zayıflatma sağladığı rapor edilmiştir (Heinß & Fietzke, 2020).

3.2. Farklı Kalınlıklarda Üretilen Kobalt İnce Filmlerin Analizleri

Bu bölümde de yine aynı şekilde, farklı kalınlıklarda üretilen Kobalt (Co) ince filmlerin yapısal, morfolojik ve elektromanyetik kalkanlama performanslarına ilişkin analizler sunulacaktır. Sputter cihazı ile gerçekleştirilmiş Kobalt ince film kaplamalarında yine cihaz 50 nm, 100 nm ve 200 nm hedef kalınlıklarda duracak şekilde ayarlanmış ve her kalınlık için üç ayrı kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir.

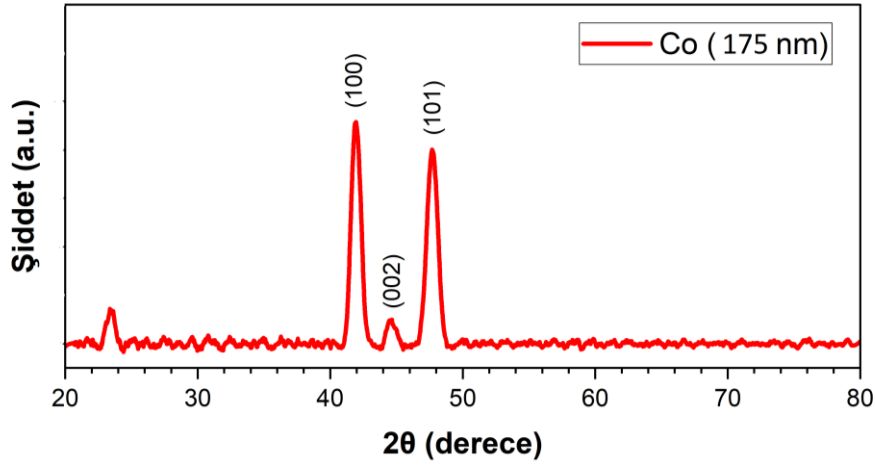
Gerçek kalınlık değerleri, SEM cihazı ile alınan kesit görüntüleri üzerinden gözlemlenmiştir. Ayrıca, kaplanan Co ince filmlerinin yapısal analizi, kristal fazlarını ve bileşimini belirlemek amacıyla XRD ve EDAX yöntemleriyle gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerin detayları, ilgili alt başlıklarda ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

Son olarak, Co ince filmlerinin X-band (8-12 GHz) elektromanyetik dalga kalkanlama performansı, vektör ağ analizörü ile ölçülmüştür ve elde edilen sonuçlar, ilgili alt başlıklarda detaylı olarak gösterilmiştir.

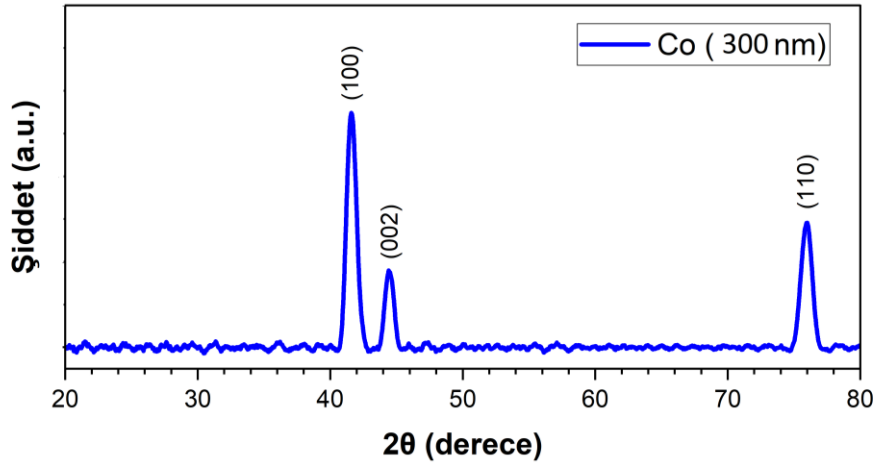
3.2.1. Kobalt İnce Filmlerin XRD ve EDAX Analizleri

Kobalt ince filmlerinin X-ışını difraksiyonu (XRD) analizleri incelendiğinde, bu filmlerin HCP (Hexagonal Close-Packed) yani sıkı paketlenmiş hekzagonal kristal yapısına

sahip olduğu ve HCP yapısının karakteristik (100), (002), (101) ve (110) yönelimlerini belirli açılarda gösterdiği tespit edilmiştir. Düşük sıcaklıkta ve yüksek hızda sputter yöntemiyle yapılan büyütme işlemi, atomların daha az difüze olmasına ve dolayısıyla HCP yapısının daha fazla tercih edilmesine neden olmuştur. Bu süreç, özellikle film yüzeyindeki atomların sıkı paketlenmesiyle sonuçlanarak HCP fazının stabil hale gelmesini sağlamıştır.



Şekil 28. Kobalt (175 nm) ince filminin XRD grafiği

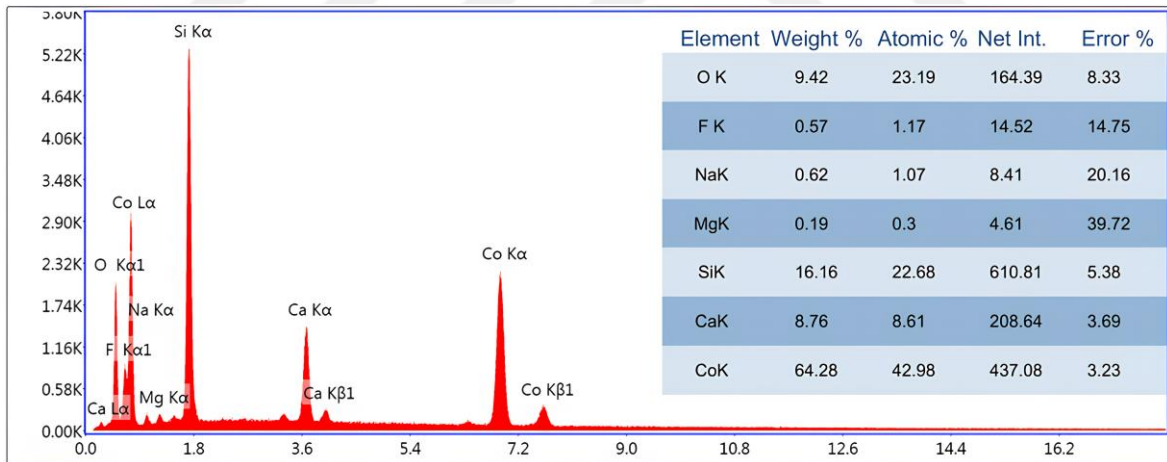


Şekil 29. Kobalt (300 nm) ince filminin XRD grafiği

Film kalınlığı arttıkça, kristal yapının ve yönelimlerin kalınlık artışına bağlı olarak değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu değişim, filmin tane yapısında kısmi değişikliklere yol açmış ve (101) yöneliminin kaybolmasına neden olmuştur. Kalınlık arttıkça, altıgen atomik düzenlemeye sahip kobaltın gösterdiği (110) yönelimi belirginleşmiştir. Bu

yönelim, HCP yapısının karakteristik özelliği olarak, atomların altıgen bir düzende daha yoğun bir şekilde paketlenildiği bölgelere işaret etmektedir (Balela vd., 2009; Manjunatha vd., 2019; Meng vd., 2013).

Kobalt ince filmlerinin tüm kalınlıkları için gerçekleştirilen EDAX analizleri, numunelerdeki elementel bileşimi ve miktarlarını ortaya koymuştur. Analiz sonuçlarına göre, kaplama yapılan cam altlık malzemesine ait silisyum (Si), oksijen (O) ve kalsiyum (Ca) elementlerinin yanı sıra, kaplama malzemesi olarak kullanılan kobalt (Co) bileşeni de tespit edilmiştir. Cam altlık malzemesinin baskın bileşenlerinin yanı sıra, cam üretiminde kullanılan katkı maddelerinden kaynaklanan eser miktarda flor (F), sodyum (Na) ve magnezyum (Mg) elementlerinin de varlığı tespit edilmiştir. Cam altlık bileşenlerinin miktarı tüm numunelerde sabit kalırken, yalnızca kobalt miktarının film kalınlığına bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, numunelerde cam ve kobalt dışında yabancı bir elementin bulunmadığı belirlenmiştir. Tüm numunelerin EDAX sonuçları benzer eğilim göstermekte olup, burada 300 nm kalınlığındaki kobalt ince filmine ait EDAX görüntüsü sunulmuştur.

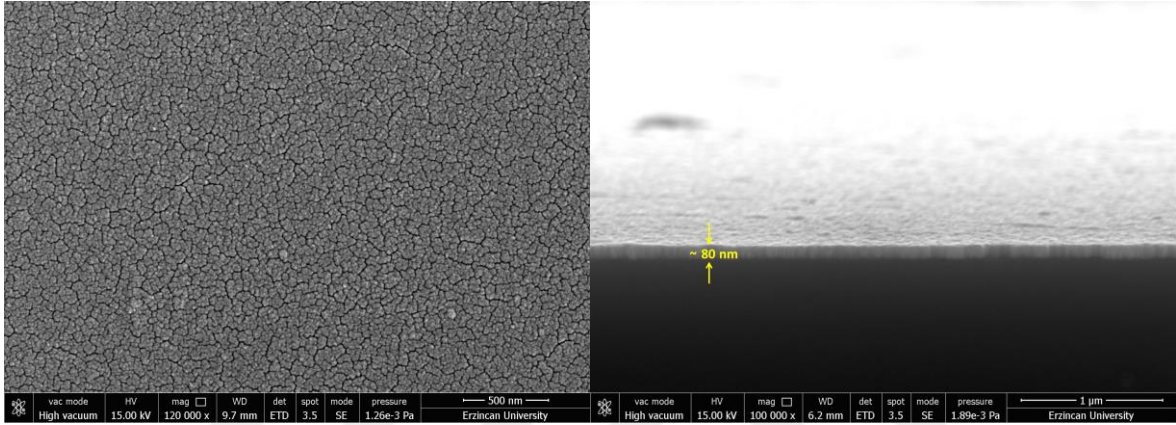


Şekil 30. Kobalt (300 nm) ince filminin enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDAX) sonucu

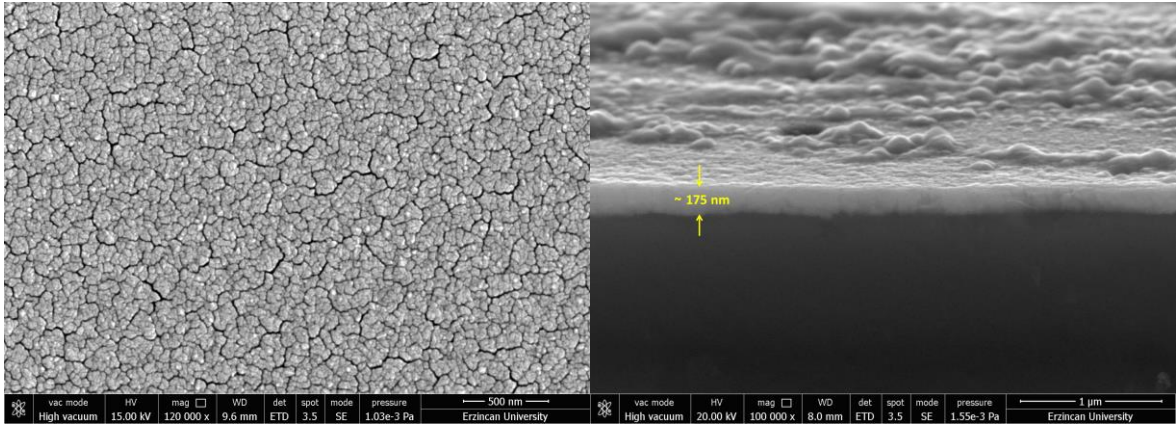
3.2.2. Kobalt İnce Filmlerin SEM Analizleri

Kobalt ince filmlerinin SEM görüntülerinde, Al filmlerinden farklı olarak beyin kıvrımlarına benzer bir morfoloji gözlenmiştir. Yüzeyde çok ince kılcal çatlak benzeri yapılar bulunmakta olup, bu durum kobalt ince filmlerinin üç farklı kalınlığı içinde gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, çatlaklar derin ve belirgin olmayıp, yüzeyin genel

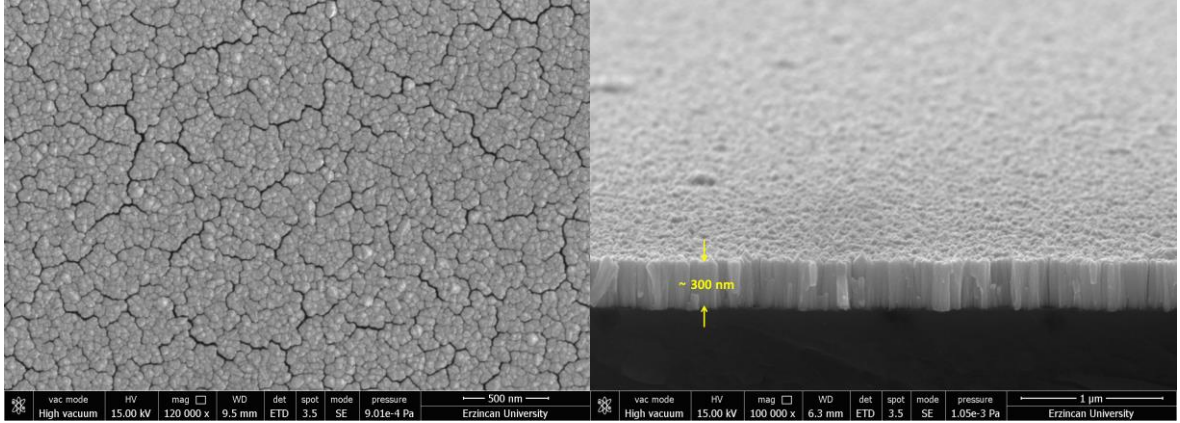
homojenliği korunmuştur. Farklı kalınlıklardaki Co filmleri benzer yüzey morfolojisi göstermektedir, bu da kaplama sürecinin tekrarlanabilir ve kontrollü olduğunu göstermektedir. Film boyunca belirgin bir yığılma, boşluk veya düzensizlik gözlenmemiştir. Taneler nanometre ölçeğinde olup, kıvrımlı ve yuvarlak hatlara sahip bir morfoloji sergilemektedir. SEM yüzey görüntülerinin yanında tüm kalınlıklar için elde edilmiş kesit görüntüleride görülmektedir. Bu görüntülerden kobalt ince filmlerinin kalınlıkları sırasıyla 80 nm, 175 nm ve 300 nm olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 31. 80 nm kalınlığındaki kobalt ince filminin yüzey ve kesit SEM görüntüsü



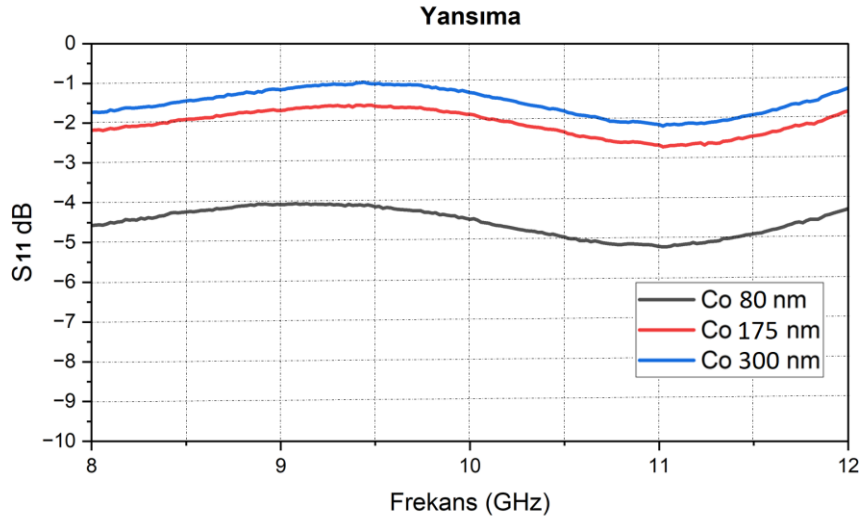
Şekil 32. 175 nm kalınlığındaki kobalt ince filminin yüzey ve kesit SEM görüntüsü



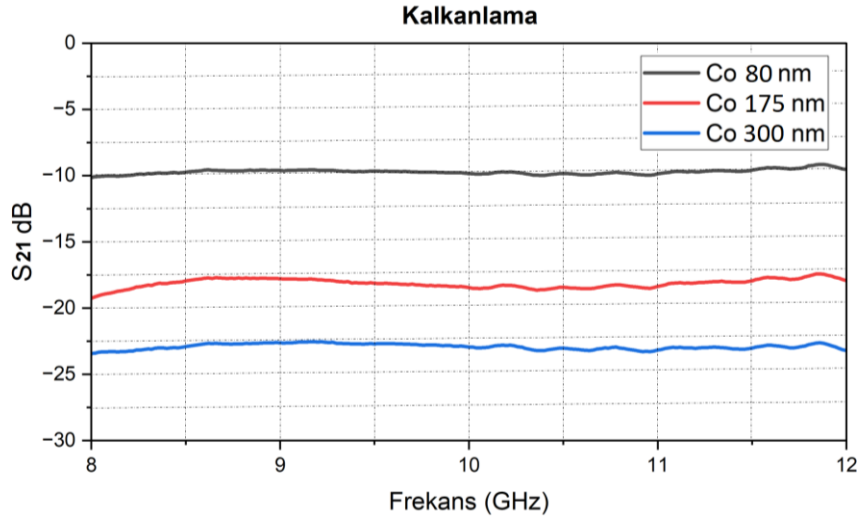
Şekil 33. 300 nm kalınlığındaki kobalt ince filminin yüzey ve kesit SEM görüntüsü

3.2.3. Kobalt İnce Filmlerinin Mikrodalga Kalkanlama Analizleri

Üç farklı kalınlıktaki saf kobalt (Co) ince film kaplı numunelerin elektromanyetik kalkanlama etkinliği, VNA cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Ölçümler sırasında, S_{21} ve S_{12} parametreleri ile S_{11} ve S_{22} parametrelerinin birbirine yakın sonuçlar verdiği gözlemlendiğinden, yalnızca S_{11} ve S_{21} grafiklerinin paylaşılması yeterli görülmüştür.



Şekil 34. Üç farklı kalınlıktaki kobalt ince filmlerinin S_{11} yansıma parametresi grafiği



Şekil 35. Üç farklı kalınlıktaki kobalt ince filmlerinin S_{21} iletim parametresi grafiği

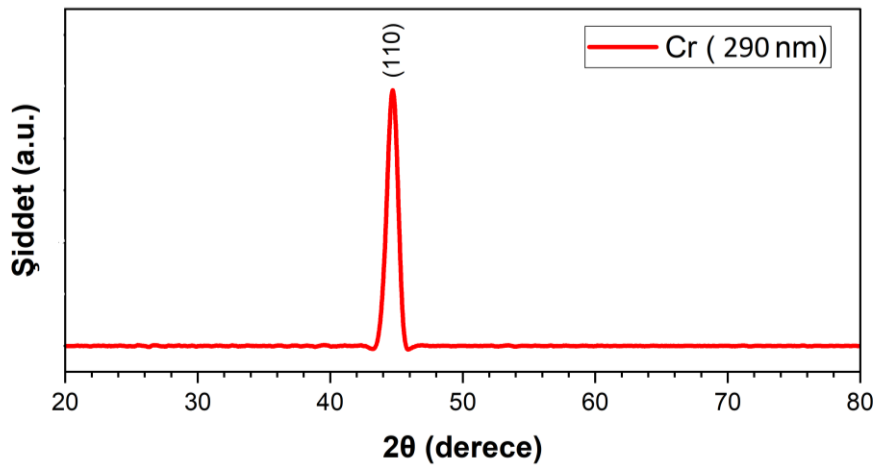
Elde edilen grafikler incelendiğinde, kobalt ince filmlerinin de yüksek yansıtıcılık özelliğine sahip olduğu, ancak alüminyum filmlere kıyasla daha düşük bir yansıtma performansı sergilediği belirlenmiştir. En düşük kalınlığa sahip (80 nm) kobalt filminin, 8–12 GHz frekans aralığında yaklaşık 10 dB'lik (yaklaşık %90) elektromanyetik kalkanlama sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca, kobalt kaplı numunelerde de film kalınlığı ile kalkanlama etkinliği arasında doğru orantılı bir artış gözlemlenmiş olup, en yüksek kalınlığa sahip Co numunesinin %99'un üzerinde kalkanlama sağladığı belirlenmiştir. Literatürde elektromanyetik kalkanlama uygulamalarında kobalt malzemesinin kullanımı incelendiğinde, saf kobaltın doğrudan kalkanlama amaçlı kullanıldığı bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Ancak, kobalt katkılı kompozit malzemelerin elektromanyetik geçirgenlik özelliklerini araştıran çok sayıda çalışmanın mevcut olduğu görülmektedir.

3.3. Farklı Kalınlıklarda Üretilen Krom İnce Filmlerin Analizleri

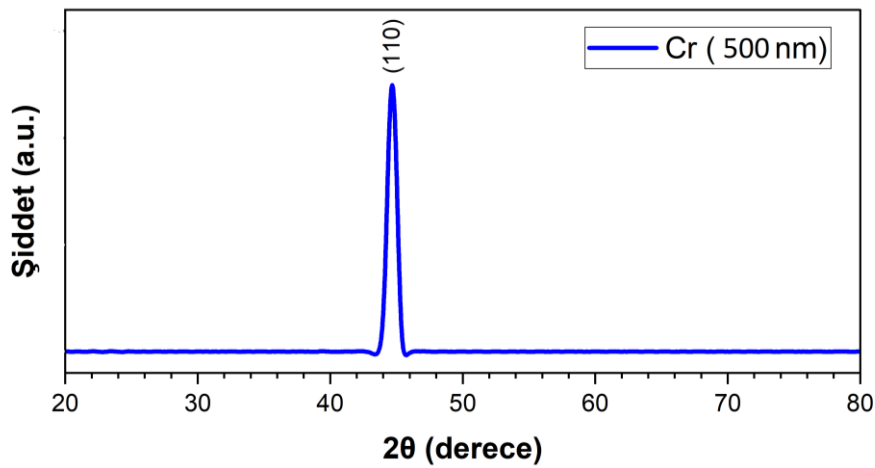
Bu bölümde, Krom (Cr) ince filmlerinin yapısal, morfolojik ve elektromanyetik kalkanlama performanslarına ilişkin analizler sunulacaktır. Sputter yöntemiyle cam altlıklar üzerine belirlenen hedef kalınlıklarda kaplama yapılmıştır. Gerçek kalınlık değerleri, SEM kesit görüntüleri ile belirlenmiş, yapısal analizler XRD ve EDAX ile gerçekleştirilmiştir. Cr ince filmlerinin X-band (8-12 GHz) elektromanyetik kalkanlama performansı, vektör ağ analizörü kullanılarak ölçülmüş ve elde edilen sonuçlar ilgili alt başlıklarda detaylandırılmıştır.

3.3.1. Krom İnce Filmlerin XRD ve EDAX Analizleri

Sputter yöntemiyle cam substrat üzerine büyütülen yaklaşık 290 ve 500 nm kalınlığındaki saf krom (Cr) ince filminin XRD analizi gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki şekil 36'da gösterilen XRD deseni incelendiğinde, iki kalınlık için de $2\theta \approx 44.4^\circ$ konumunda belirgin ve tek bir kırınım pikinin mevcut olduğu gözlemlenmiştir. Bu pik, Cr'nin hacim merkezli kübik (BCC) kristal yapısına sahip olduğunu ve (110) düzlemi boyunca baskın bir yönetime sahip olduğunu göstermektedir.

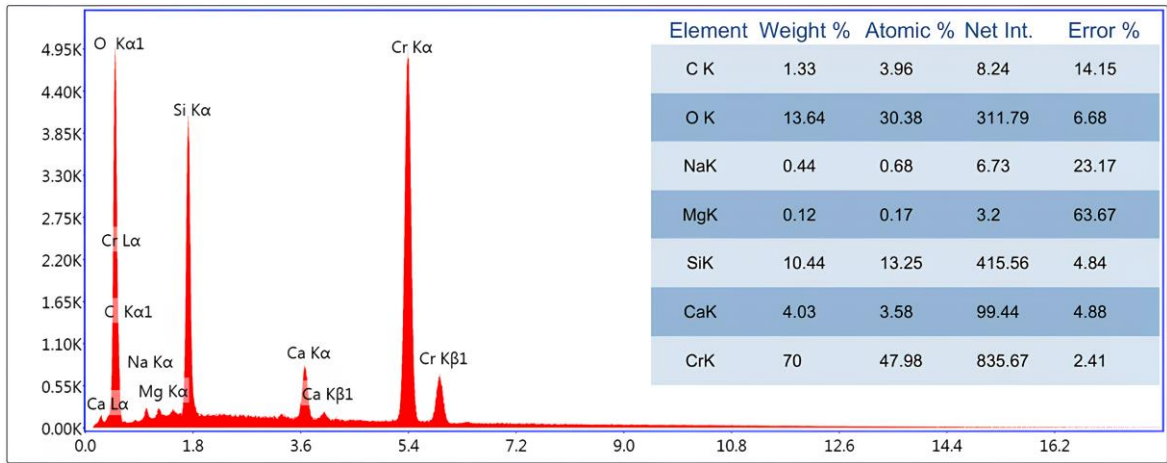


Şekil 36. Krom (290 nm) ince filminin XRD grafiği



Şekil 37. Krom (500 nm) ince filminin XRD grafiği

Tek ve güçlü (110) pikinin gözlemlenmesi, numunenin tek kristal bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Normalde BCC yapıya sahip metallerde (110), (200), (211) gibi birden fazla kırınım piki gözlemlenmesi beklenirken, ince film olarak büyütülen numunelerde belirli bir yönelimde kristal büyümesi baskın hale gelebilmektedir. Bu durumda, Cr atomlarının yüzeye paralel olacak şekilde (110) düzlemi boyunca hizalanarak büyüdüğü anlaşılmaktadır (Boisselier vd., 2011; Elsukov vd., 2014).

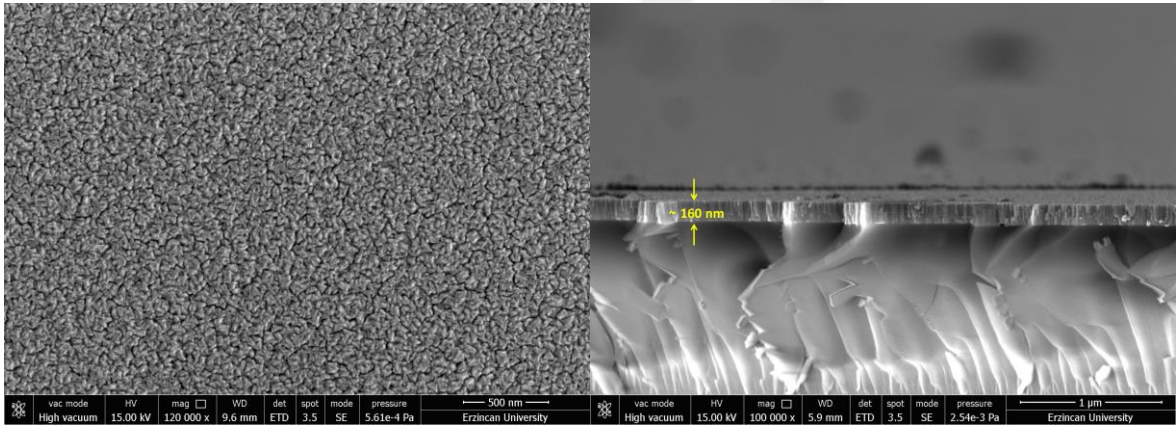


Şekil 38. Krom (500 nm) ince filminin enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDAX) sonucu

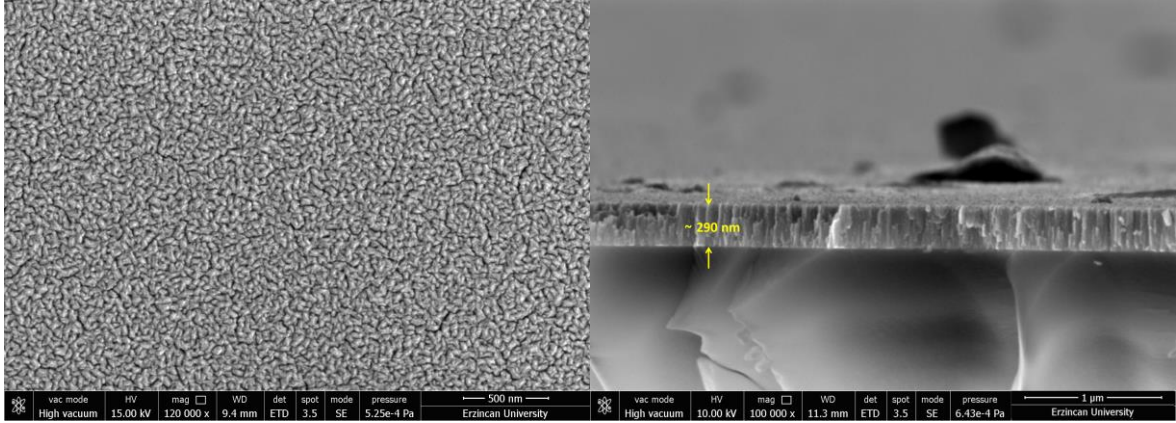
Krom ince filmlerinin tüm kalınlıklarındaki elemental bileşim analizleri gerçekleştirilmiştir. EDAX analizi ile her bir numunede bulunan elementlerin türleri ve miktarları belirlenmiştir. Yukarıda grafiği görülen EDAX analizleri sonucunda, cam altlık malzemesine ait silisyum (Si), oksijen (O) ve kalsiyum (Ca) bileşenlerinin yanı sıra, kaplama malzemesi olarak kullanılan krom (Cr) bileşeni de tespit edilmiştir. Cam altlık malzemesinin baskın bileşenlerinin yanı sıra, cam üretiminde kullanılan katkı maddelerinden kaynaklanan eser miktarda karbon (C), sodyum (Na) ve magnezyum (Mg) elementlerinin de varlığı tespit edilmiştir. Tüm numunelerin EDAX sonuçları benzer olup, yalnızca krom bileşeninin miktarında kalınlığa bağlı olarak bir artış gözlemlenmiştir. Bu nedenle, yukarıda yalnızca 500 nm kalınlığındaki krom kalkanlayıcı yapıya ait EDAX görüntüsü sunulmuştur.

3.3.2. Krom İnce Filmlerinin SEM Analizleri

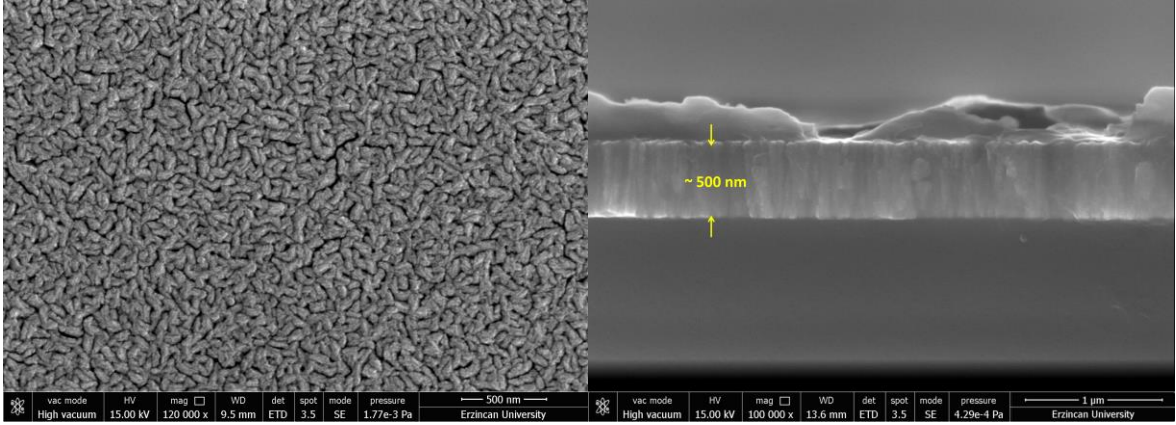
Krom ince filmleri, Co ile benzer bir yapıya sahiptir. Kümelenmiş tanecikleri çevreleyen kılcal kıvrımlı ince boşluklar mevcuttur. Yüzey boyunca yer yer gözlenen bu ince kılcal çatlaklar, film bütünlüğünü bozan büyük düzensizlikler oluşturmamaktadır. Krom filmlerinin farklı kalınlıklarda benzer morfolojik özellikler sergilediği tespit edilmiştir. Filmde belirgin bir boşluk, yığılma veya yüzey düzensizliği gözlenmemiştir. Tane boyutları nanometre mertebesinde olup, Al ve Ti filmlerine benzer büyüklüktedir. Krom ince filmlerinin elde edilen kesit görüntülerinde 160 nm, 290 nm ve 500 nm kalınlığa sahip olduğu görülmektedir. Kullanılan sputter cihazında ayarlanan kalınlıkla SEM kesit görüntülerinde gözlemlenen kalınlıklar arasında büyük fark olduğu farkedilmiştir.



Şekil 39. 160 nm kalınlığındaki krom ince filminin yüzey ve kesit SEM görüntüsü



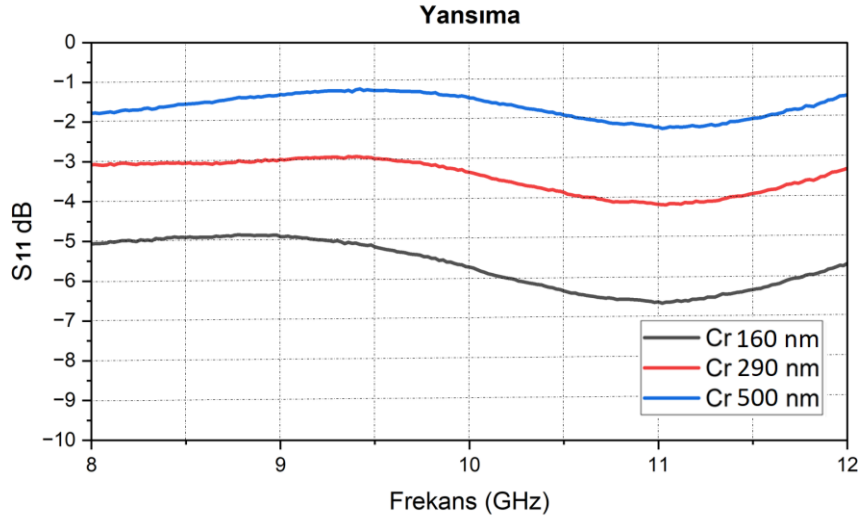
Şekil 40. 290 nm kalınlığındaki krom ince filminin yüzey ve kesit SEM görüntüsü



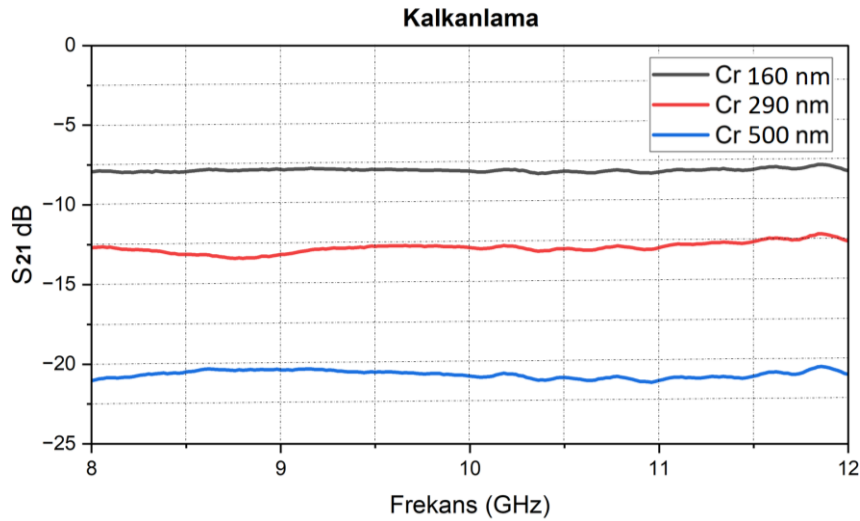
Şekil 41. 500 nm kalınlığındaki krom ince filminin yüzey ve kesit SEM görüntüsü

3.3.3. Krom İnce Filmlerinin Mikrodalga Kalkanlama Analizleri

Cam altlık üzerine kaplanan krom (Cr) ince filmlerinin elektromanyetik kalkanlama ölçümleri, Vektör Ağ Analizörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sonucunda, ağ analizöründen S_{11} , S_{21} , S_{12} ve S_{22} saçılma parametreleri elde edilmiştir. Numunelerin simetriğe oldukça yakın olması nedeniyle, yansıma ve iletim parametrelerinin birbirine benzer değerler verdiği gözlemlenmiştir. Aşağıda verilen grafiklerde, birinci porttan yansıyan ve iletilen dalgaların miktarını temsil eden S_{11} (yansıma) ve S_{21} (iletim) parametrelerinin değişimi 8 – 12 GHz frekans aralığında gösterilmektedir.



Şekil 42. Üç farklı kalınlıktaki krom ince filmlerinin S_{11} yansima parametresi grafiği



Şekil 43. Üç farklı kalınlıktaki krom ince filmlerinin S_{21} iletim parametresi grafiği

SEM kesit görüntülerinden görüldüğü üzere krom numunelerinin kalınlıkları kobalt numunelerinden yaklaşık iki katı daha kalın olmasına rağmen kalkanlama performansının kobalt mazemesinden daha düşük olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum, elektromanyetik dalga kalkanlamada kobalt malzemesinin krom malzemesinden daha etkili sonuç verdiğini göstermektedir. Fakat krom malzemesinde yarım mikrometre gibi ince bir kalınlıkta 20 dB üzeri yani yüzde 99 dan fazla engelleme yaptığı anlaşılmaktadır. Literatürde elektromanyetik dalga kalkanlama ile alakalı yapılan çalışmalar incelendiğinde saf krom

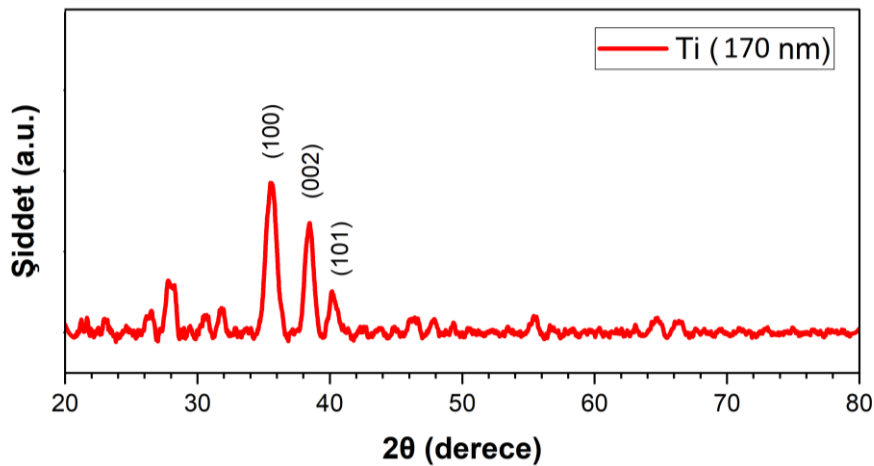
maddesinin kalkanlama performansının incelendiği spesifik bir akademik çalışma olmadığı görülmektedir. Yapılan bu çalışma sayesinde saf krom maddesinin elektromanyetik kalkanlama etkinliği diğer üç malzeme ile kıyaslanmış bir şekilde ortaya koyulmaktadır.

3.4. Farklı Kalınlıklarda Üretilen Titanyum İnce Filmlerin Analizleri

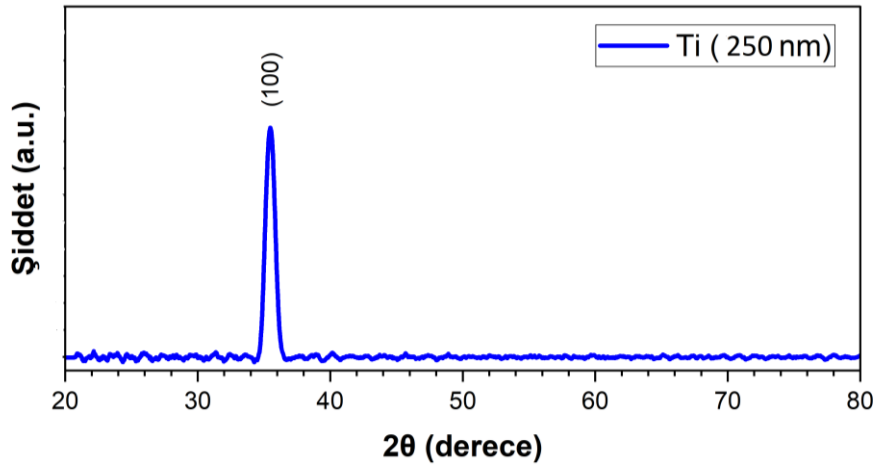
Bu bölümde, Titanyum (Ti) ince filmlerinin yapısal, morfolojik ve elektromanyetik kalkanlama performanslarına ilişkin analizler sunulacaktır. Sputter yöntemiyle cam altlıklar üzerine hedef kalınlıklarda kaplama yapılmıştır. Gerçek kalınlık değerleri, SEM kesit görüntüleri ile belirlenmiş, yapısal analizler XRD ve EDAX ile gerçekleştirilmiştir. Cr ince filmlerinin X-band (8-12 GHz) elektromanyetik kalkanlama performansı, vektör ağ analizörü kullanılarak ölçülmüş ve elde edilen sonuçlar ilgili alt başlıklarda detaylandırılmıştır.

3.4.1. Titanyum İnce Filmlerin XRD ve EDAX Analizleri

Büyütülen saf titanyum ince filmlerin XRD analiz grafikleri, film kalınlığının kristal yapı üzerindeki belirgin etkisini ortaya koymaktadır. Aşağıdaki grafiklerden, 170 nm kalınlığındaki filmin (100), (002) ve (101) düzlemlerine karşılık gelen piklerin varlığıyla çok yönelimli bir polikristal yapı sergilerken (Han vd., 2014; Raganya vd., 2019; Tripathy vd., 2008), 250 nm kalınlığındaki filmde ise yalnızca (100) yöneliminin baskın olduğu ve monokristal bir yapı kazandığı görülmektedir.

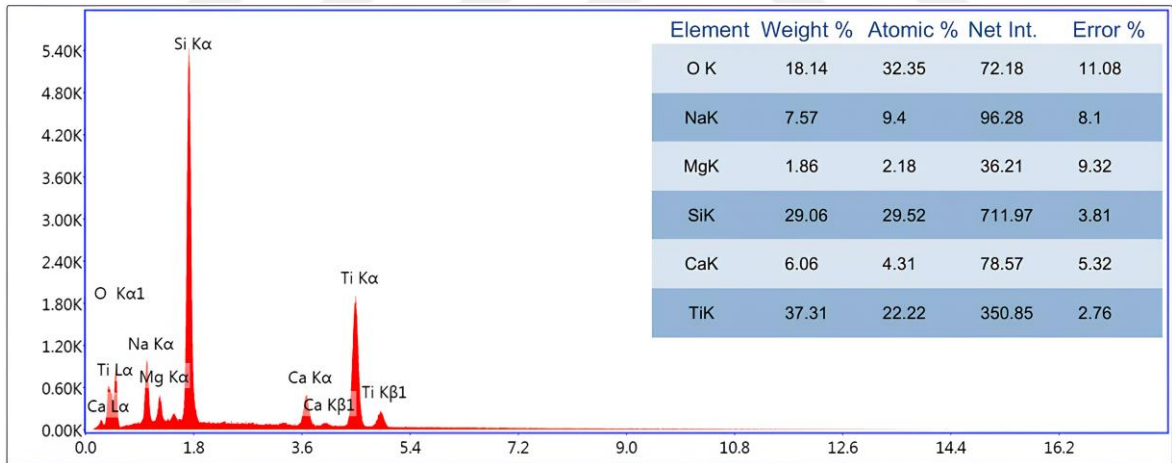


Şekil 44. Titanyum (170 nm) ince filminin XRD grafiği



Şekil 45. Titanyum (250 nm) ince filminin XRD grafiği

Ayrıca, 170 nm kalınlığındaki titanyum filminin XRD deseninde belirgin olmayan zayıf pikler gözlenmiş, bu durum filmin düşük kalınlığı nedeniyle kristalliğinin görece az olduğunu göstermektedir. Kalınlık 250 nm'ye çıktığında ise belirli bir yönelim baskın hale gelerek film monokristal yapı sergilemiştir.



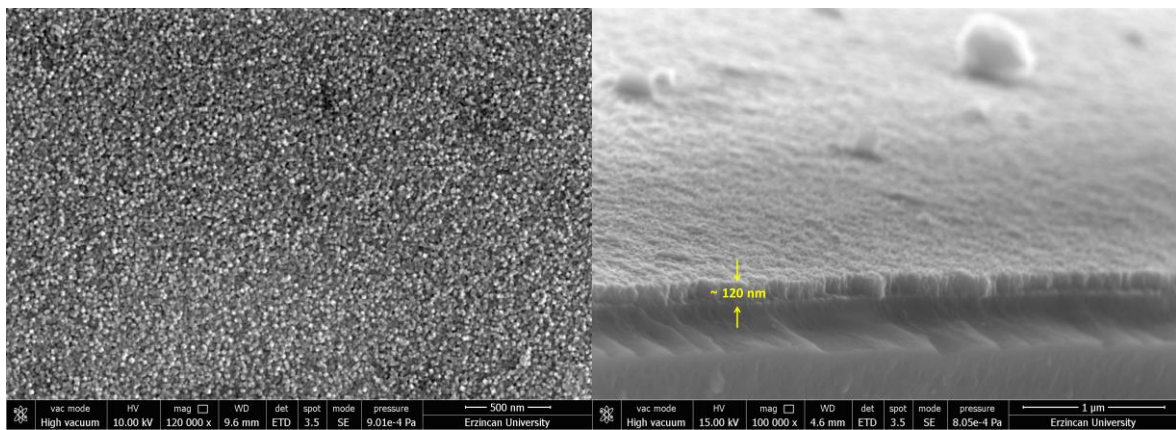
Şekil 46. Titanyum (250 nm) ince filminin enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDAX) sonucu

Titanyum ince filmlerinin de farklı kalınlıklardaki elemental bileşim analizleri EDAX yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda, numunelerde bulunan elementlerin türleri ve miktarları belirlenmiştir. EDAX sonuçları, kaplama yapılan cam altlık malzemesine ait silisyum (Si), oksijen (O) ve kalsiyum (Ca) elementlerinin yanı sıra, kaplama malzemesi olarak kullanılan titanyum (Ti) bileşeninin de varlığını doğrulamıştır.

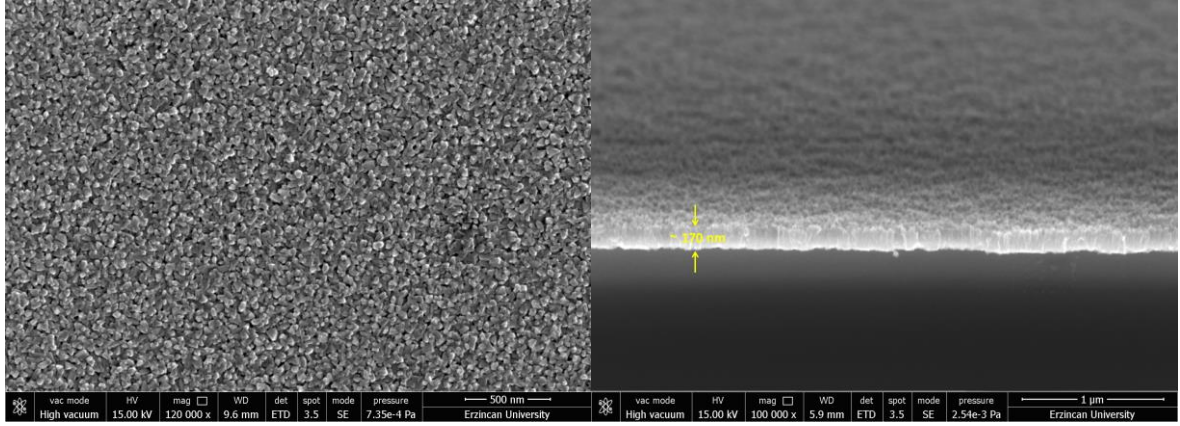
Cam altlık malzemesinin baskın bileşenlerinin yanı sıra, cam üretiminde kullanılan katkı maddelerinden kaynaklanan sodyum (Na) ve magnezyum (Mg) elementlerinin de varlığı tespit edilmiştir. Ayrıca, yapılan bu analiz sonucunda numunelerde cam bileşenleri ve titanyum dışında herhangi bir yabancı elementin bulunmadığı belirlenmiştir. Üç farklı kalınlık için de EDAX verileri benzer eğilimler göstermekte olup, yalnızca titanyum miktarında film kalınlığına bağlı olarak bir artış gözlenmiştir. Yukarıdaki şekilde en kalın titanyum ince filminin EDAX analiz grafiği görülmektedir.

3.4.2. Titanyum İnce Filmlerin SEM Analizleri

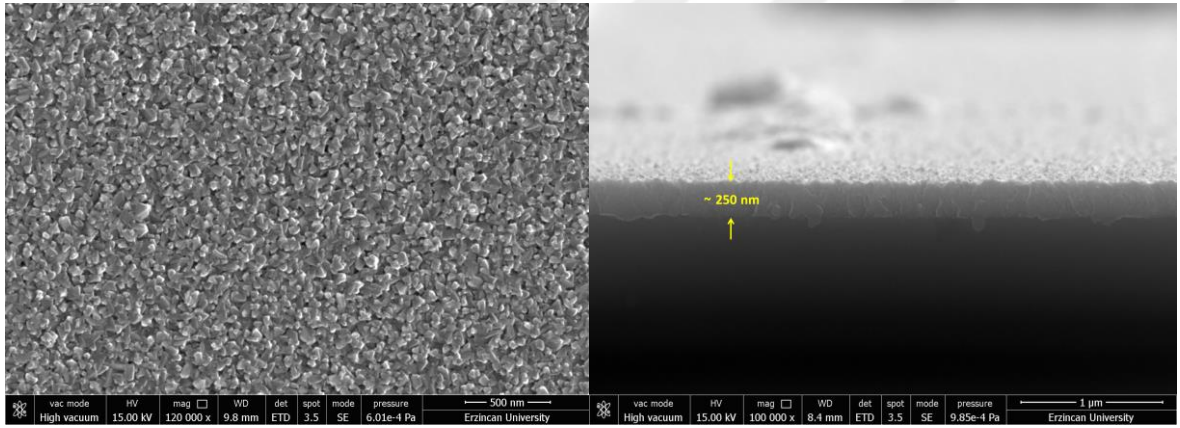
Titanyum ince filmleri için alınan SEM görüntüleri, Al ile benzer morfolojiye sahip olup, yüzeyin granüler yapıda olduğu gözlemlenmiştir. Film boyunca keskin hatlara sahip, yoğun paketlenmiş ve düzgün dağılım gösteren taneler mevcuttur. Film yüzeyinde belirgin bir çatlak, düzensizlik veya yığılma bulunmamaktadır. Farklı kalınlıklardaki SEM görüntüleri incelendiğinde, genel morfolojik yapının korunduğu görülmüştür. Granül boyutlarının nanometre mertebesinde olduğu belirlenmiş olup, bu durum Ti filmlerinin ince film büyütme sürecinde düzenli bir şekilde biriktiğini ve uygun kristalleşme mekanizmasına sahip olduğunu göstermektedir. SEM yüzey görünümünün yanında paylaşılan SEM kesit görüntülerinden titanyum ince filmlerinin kesit kalınlığının sırasıyla 120 nm, 170 nm ve 250 nm olduğu görülmektedir.



Şekil 47. 120 nm kalınlığındaki titanyum ince filminin yüzey ve kesit SEM görüntüsü



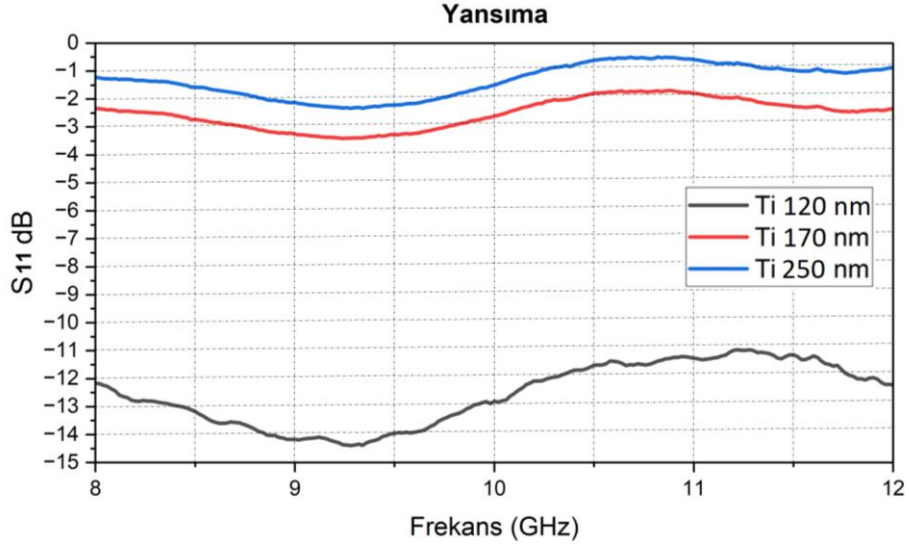
Şekil 48. 170 nm kalınlığındaki titanyum ince filminin yüzey ve kesit SEM görüntüsü



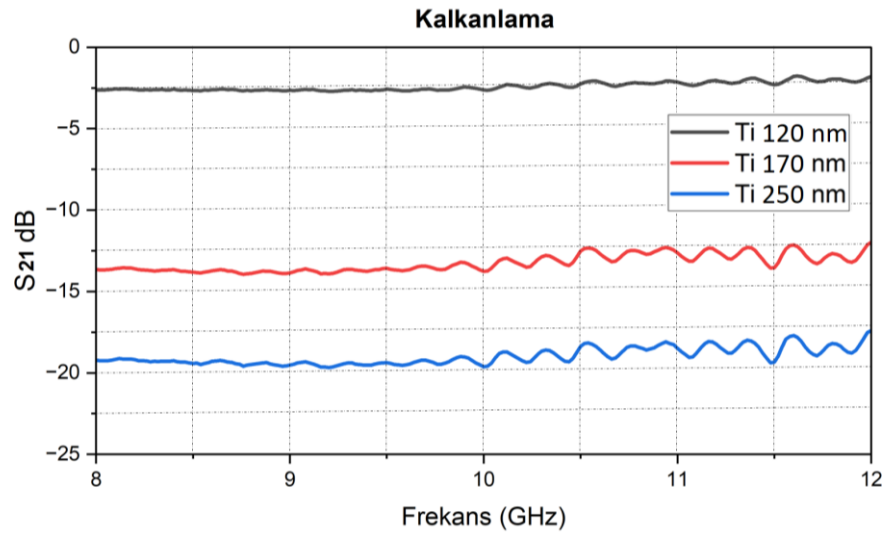
Şekil 49. 250 nm kalınlığındaki titanyum ince filminin yüzey ve kesit SEM görüntüsü

3.4.3. Titanyum İnce Filmlerinin Mikrodalga Kalkanlama Analizleri

Titanyum (Ti) ince filmlerinin cam altlık üzerine kaplanması ardından, elektromanyetik kalkanlama performansları Vektör Ağ Analizörü ile incelenmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda, cihazdan S_{11} , S_{21} , S_{12} ve S_{22} saçılma parametreleri elde edilmiştir. Numunelerin simetrik yapıya oldukça yakın olması nedeniyle, yansıma ve iletim parametrelerinin birbirine yakın değerler gösterdiği tespit edilmiştir. Aşağıda sunulan grafikte, birinci porttan yansıyan ve iletilen dalgaların seviyelerini gösteren S_{11} (yansıma) ve S_{21} (iletim) parametrelerinin 8–12 GHz frekans aralığındaki değişimi verilmiştir.



Şekil 50. Üç farklı kalınlıktaki titanyum ince filmlerinin S_{11} yansımada parametresi grafiği



Şekil 5148. Üç farklı kalınlıktaki titanyum ince filmlerinin S_{21} iletim parametresi grafiği

Titanyum ince filmlerinin kalkanlama etkinliği ölçüm sonuçları incelendiğinde, en düşük kalınlığa sahip numunenin yansıtıcılığının belirgin şekilde azaldığı ve bu durumun iletimin daha baskın hale gelmesine neden olduğu görülmektedir. 8–12 GHz mikrodalga frekans aralığında, gelen sinyalin yarısından fazlasının numune tarafından iletildiği tespit edilmiştir. Film kalınlığının artmasıyla birlikte numunelerin kalkanlama performansında doğru orantılı bir iyileşme gözlemlenmiş olup, en yüksek kalınlığa sahip titanyum ince filminin %90'ın üzerinde kalkanlama sağladığı belirlenmiştir. Titanyumun elektriksel

iletkenliği kromdan daha düşük olmasına rağmen, aynı kalınlıklarda krom ince filmlere kıyasla daha yüksek kalkanlama performansı sergilediği görülmektedir.

Literatürde titanyum malzemesi kullanılarak gerçekleştirilen çeşitli elektromanyetik kalkanlama çalışmaları mevcuttur. Bu çalışmalardan biri Soethe ve çalışma arkadaşları tarafından yürütülmüştür. Araştırmada, magnetron sputter yöntemi ile nanometre ölçeğinde titanyum ince filmler üretilmiş ve bu filmler polietilen tereftalat (PET) alt tabaka üzerine kaplanmıştır. 8-12 GHz frekans aralığında gerçekleştirilen elektromanyetik radyasyon zayıflatma ölçümleri sonucunda, 25 nm ile 100 nm arasında değişen film kalınlıklarının radyasyonu %20 ile %50 oranında zayıflattığı tespit edilmiştir (Soethe vd., 2011). Sorgucu tarafından gerçekleştirilen çalışmada, ticari saf titanyum malzemesi kullanılarak fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemi ile titanyum ince filmleri üretilmiştir. Üretilen filmlerin elektromanyetik kalkanlama performansı, Vektör Ağ Analizörü (VNA) cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Yapılan analizler sonucunda, titanyum filmlerinin 3,3 - 6 GHz frekans bandında maksimum 70 dB seviyesine kadar kalkanlama etkinliği sağladığı belirlenmiştir (Sorgucu, 2024).

3.5. Tüm Numunelerin X-band Mikrodalga Soğurma Performansları

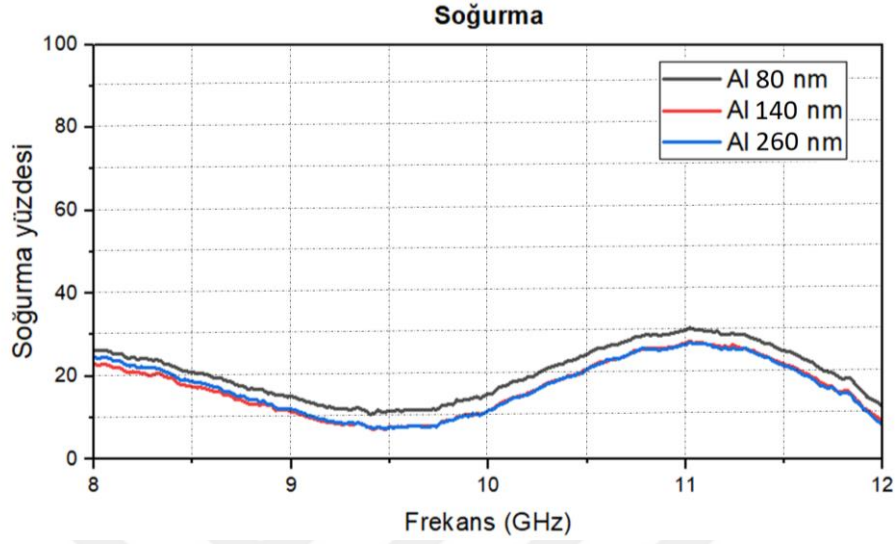
Yukarıdaki kalkanlama etkinliği başlığında bahsedildiği üzere bir elektromanyetik dalga bir engelle karşılaştığında, gelen dalganın bir kısmı iletilir, bir kısmı yansır ve bir kısmı ise malzeme içinde soğurularak ısıya dönüşür. Bu nedenle, formül 17’de ifade edildiği gibi, iletilen, yansıyan ve soğurulan dalgaların oransal toplamı her zaman 1’e eşit olmalıdır. Kalkanlama etkinliği ölçümlerinde iletim (T) ve yansıma (R) miktarları, sırasıyla S_{21} ve S_{11} saçılma parametrelerinin lineer ifadelerinin kareleri alınarak hesaplanmaktadır. Vektör ağ analizörü tarafından ölçülen saçılma parametreleri desibel (dB) cinsinden verildiğinden, öncelikle bu değerlerin lineer forma dönüştürülmesi gerekmektedir. Daha sonra, elde edilen lineer değerlerin kareleri alınarak ilgili formülde yerine konulmalıdır.

$$A = 1 - (S_{21(\text{linear})})^2 - (S_{11(\text{linear})})^2 \quad (23)$$

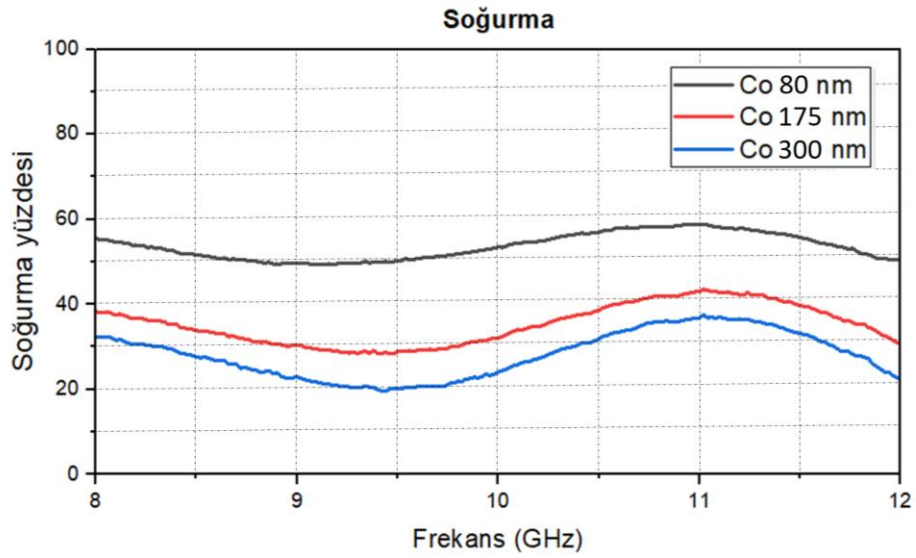
$$A = 1 - (10^{S_{21\text{dB}}/20})^2 - (10^{S_{11\text{dB}}/20})^2$$

Bu hesaplama sonucunda bulunan soğurma oranı, gelen dalganın yüzde kaçının malzeme tarafından soğurulduğunu belirlemek amacıyla 100 ile çarpılmaktadır. Bu adımlar

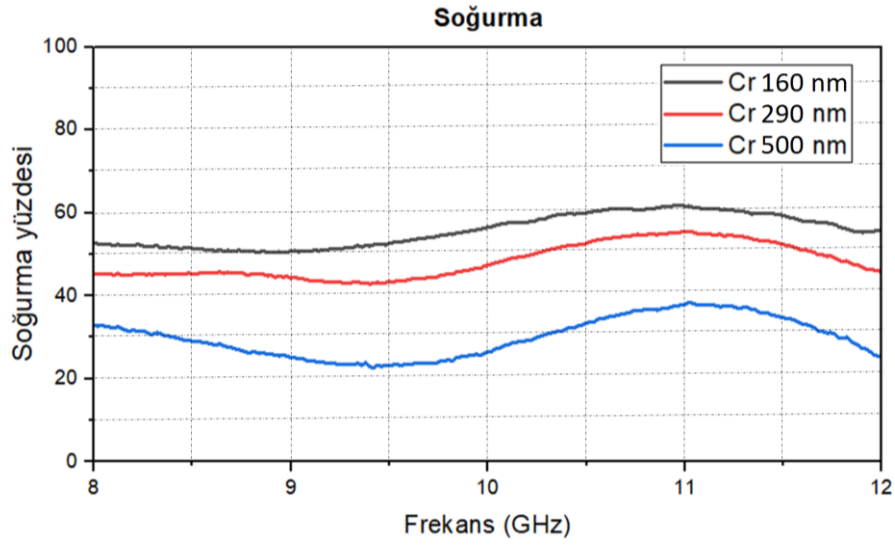
izlenerek, Al, Co, Cr ve Ti kalkanlayıcı malzemeleri için üç farklı kalınlıkta soğurma grafikleri oluşturulmuş olup, aşağıda sunulmuştur.



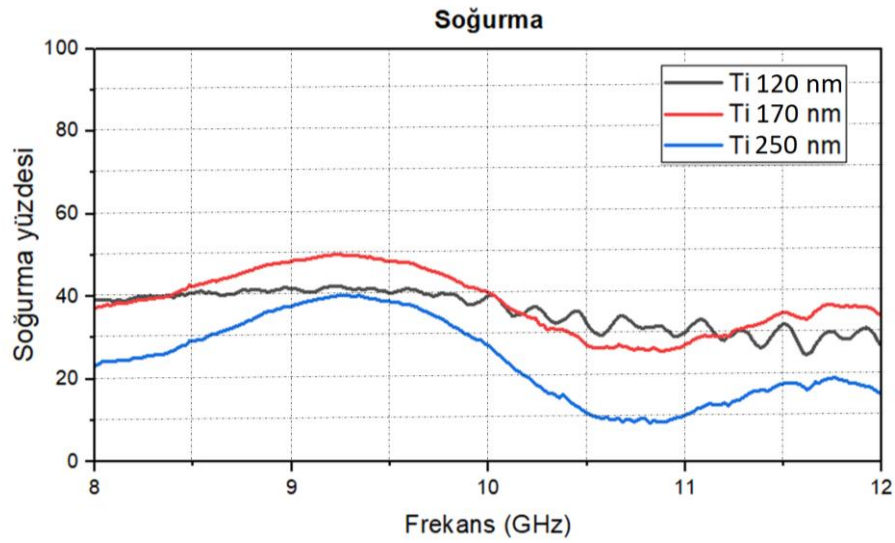
Şekil 52. Üç farklı kalınlıktaki alüminyum ince filmlerinin mikrodalga soğurma yüzdeleri



Şekil 53. Üç farklı kalınlıktaki kobalt ince filmlerinin mikrodalga soğurma yüzdeleri



Şekil 54. Üç farklı kalınlıktaki krom ince filmlerinin mikrodalga soğurma yüzdeleri



Şekil 55. Üç farklı kalınlıktaki titanyum ince filmlerinin mikrodalga soğurma yüzdeleri

Yukarıda sunulan soğurma grafiklerinden, film kalınlığı ile soğurma yüzdesi arasında ters orantılı bir ilişki olduğu gözlemlenmektedir. Kalınlığı ince olan filmlerde yansımanın daha düşük olması nedeniyle elektromanyetik dalga, engelin içerisine daha fazla nüfuz edebilmekte ve dolayısıyla soğurulma oranı artmaktadır.

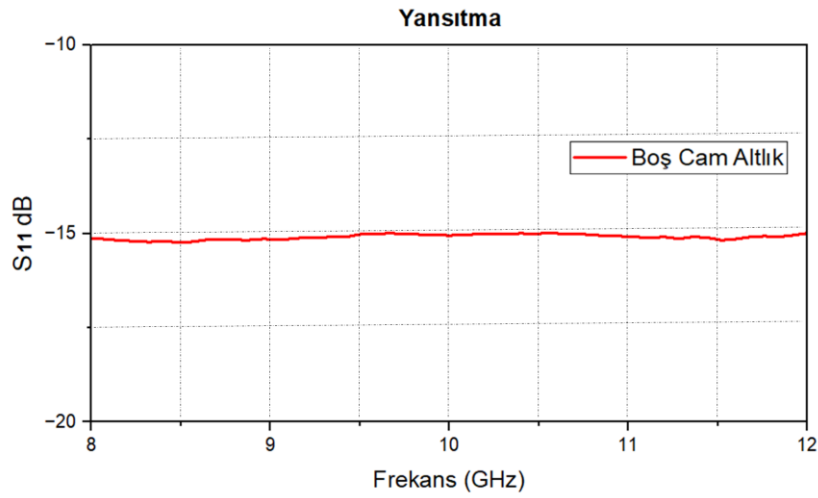
Özellikle kobalt, krom ve titanyum numunelerinde, en ince kalınlıklarda kalkanlama mekanizmasının baskın bileşeninin soğurma olduğu dikkat çekmektedir. Örneğin, en ince kalınlığa sahip Titanyum kalkanlayıcı numunesinde, gelen elektromanyetik dalganın %45'i

engellenirken, bu oranın büyük bir kısmı (yaklaşık %40) soğurma yoluyla gerçekleşmektedir. Titanyum filminin üzerine gelen dalganın yalnızca %5'i yansıtılmaktadır. Bu kalkanlama etkinliği ölçümleri, ortalama 100 nm gibi oldukça ince bir film kalınlığına sahip kalkanlayıcı malzemenin, gelen elektromanyetik dalganın yaklaşık yarısını soğurarak yok edebildiğini göstermektedir.

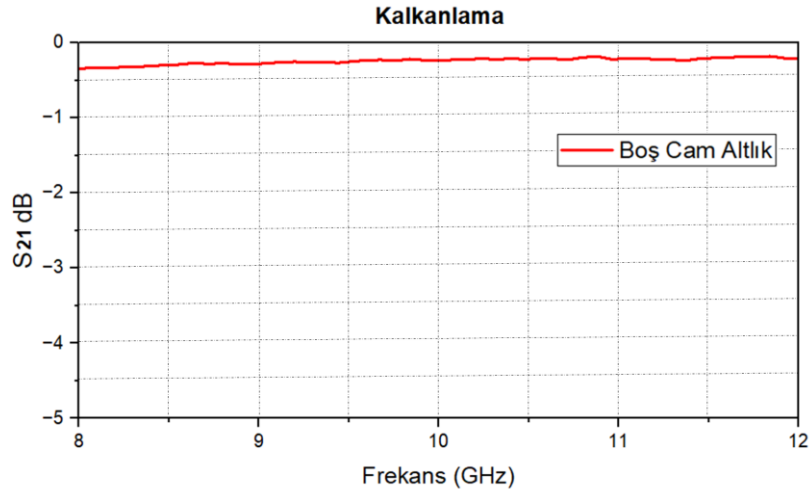
3.6. Altlık Cam Malzemesinin Kalkanlanmaya Etkisi

Elektromanyetik dalga kalkanlamaya yönelik ultra ince malzemelerin tasarlanması amaçlanmış olup, ince film üretim sürecinde bu filmin uygun bir altlık yüzey üzerine kaplanması gerekmektedir. Bu nedenle, ince film üretimine başlamadan önce en uygun altlık malzemesinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

Altlık malzemesi olarak cam, silisyum, metal levhalar veya polimerler gibi çeşitli seçenekler bulunmaktadır. Altlık seçimi yapılırken, malzemenin kaplanacak ince film ile uyumu, kalınlığı, ebatları, mekanik dayanımı ve ısı direnci gibi faktörler dikkate alınmalıdır. Tez çalışmasında, kalkanlayıcı ince filmlerin üzerine kaplanacağı altlık malzemesinin temel özelliği, elektromanyetik dalgalara karşı yüksek geçirgenliğe sahip olması, dolayısıyla numunenin elektromanyetik kalkanlama performansını doğrudan etkilememesidir. Bu nedenle, elektromanyetik dalgaya karşı yüksek geçirgenlik gösteren ince cam altlık malzemesi tercih edilmiştir.



Şekil 56. Cam altlık malzemesinin S₁₁ iletim parametresi grafiği

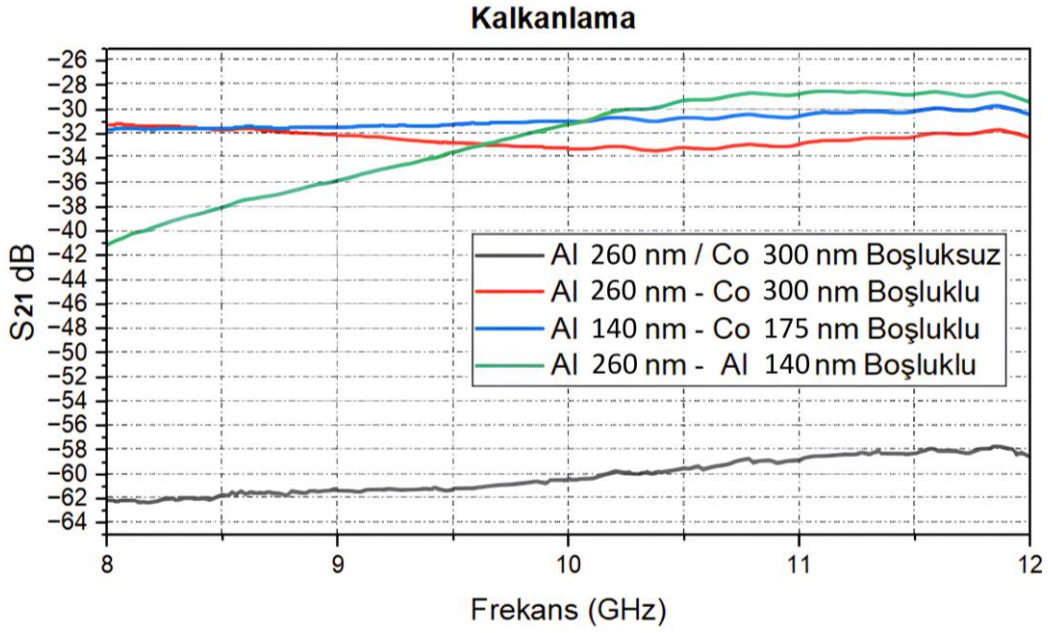


Şekil 57. Cam altlık malzemesinin S_{21} iletim parametresi grafiği

Yukarıdaki grafiklerde cam malzemesinin yansıma ve iletim parametreleri incelendiğinde, bu malzemenin çok düşük yansıtıcılık gösterdiği görülmektedir. Özellikle 8-12 GHz frekans aralığında, gelen elektromanyetik dalganın yalnızca yaklaşık %3'ünün yansıtıldığı ve yaklaşık %95'ini iletildiği tespit edilmiştir. Bu veriler, cam altlık malzemesinin kalkanlayıcı numunelerin sonuçlarına etkisinin oldukça sınırlı olduğunu ve kalkanlamada esas rolü, cam yüzeyine kaplanmış nanometre kalınlığındaki ince filmlerin oynadığını göstermektedir.

3.7. Çok Katmanlı Bazı Kalkanlayıcı Yapıların Kalkanlama Etkinliği Analizi

Literatürde, ince filmlerin elektromanyetik kalkanlama etkinliği analizlerinde tek katmanlı yapıların yanı sıra çok katmanlı yapıların performansları da incelenmektedir. Bu tez çalışmasında, cam altlık malzemesi üzerine büyütülen tek katmanlı kalkanlayıcı yapılara ek olarak çok katmanlı yapıların kalkanlama etkinliği de analiz edilmiştir. Oluşturulan çok katmanlı kalkanlayıcı numunelerde iki farklı yapı tasarlanmıştır. İlk yapı, sputter cihazı kullanılarak, farklı katmanların birbirine doğrudan üst üste ve boşluksuz şekilde kaplanmasıyla oluşturulmuştur. Diğer yapı ise, elde edilen tek katmanlı ince filmlerin sonradan üst üste yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur.



Şekil 58. Çok katmanlı bazı kalkanlayıcı yapıların iletim parametresi grafiği

Şekil 58’de görülen S_{21} kalkanlama etkinliği grafiğinde, siyah çizgili ölçümde, sputter cihazı ile ilk olarak yaklaşık 260 nm kalınlığında alüminyum ince filmi büyütülmüş ve ardından cihaza kobalt target’ı yerleştirilerek alüminyum filmin üzerine direkt olarak yaklaşık 300 nm kalınlığında kobalt ince filmi kaplanmıştır. Bu yapı, alüminyum ve kobalt katmanları arasında hava boşluğu olmadan oluşturulmuştur. Şekil 58’de gösterilen ve kırmızı çizgi ile temsil edilen diğer numunede ise, cam altlığı üzerine büyütülmüş 260 nm kalınlığında alüminyum kalkanlayıcı yapısı ile cam üzerine ayrıca büyütülmüş 300 nm kalınlığında kobalt kalkanlayıcı yapısının birbirine temas ettirilip birleştirilmesiyle yapılan çok katmanlı yapı temsil edilmektedir. Mavi ve yeşil çizgilerle gösterilen numunelerde de çok katmanlı yapı oluştururken ikinci yöntem kullanılmıştır.

Sputter cihazı ile birbirine doğrudan kaplanan alüminyum ve kobalt katmanlarından oluşan çok katmanlı yapının kalkanlama etkinliği, Şekil 27 ve Şekil 35’te görülen tek katmanlı 260 nm kalınlığındaki alüminyum ve kobalt filmlerine kıyasla daha yüksek performans göstermektedir. Ancak, hava boşluğu içeren çok katmanlı yapılar, ilginç bir şekilde, tek katmanlı yapıların kalkanlama performansından daha düşük sonuçlar vermektedir. Örneğin, tek katmanlı 260 nm kalınlığındaki alüminyum ince filmin kalkanlama etkinliği yaklaşık -56 dB iken, 260 nm alüminyum ve 300 nm kobalt içeren hava boşluklu çok katmanlı yapının kalkanlama performansı azalarak yaklaşık -32 dB SE değerine düşmektedir. Aynı şekilde, 260 nm kalınlığında alüminyum filmi ile 140 nm

kalınlığındaki alüminyum ince filminin oluşturduğu hava boşluklu çok katmanlı yapı da, tek katmanlı 140 nm ve 260 nm kalınlığındaki alüminyum filmlerinden daha düşük kalkanlama performansı sergilemektedir.

Hava boşluğu, ince filmler üst üste yerleştirildiğinde istemsiz olarak oluşur ve elektromanyetik dalgaların yayılımı üzerinde kritik bir etkiye sahiptir. Bu boşluk, dielektrik bir tabaka gibi davranarak empedansda değişimlere neden olur. Sonuç olarak, dalga, metalden hava tabakasına ve tekrar metal yüzeye geçerken yansımanın etkinliği azalır. Özellikle yüksek frekanslı (>1 GHz) dalgalarda, hava boşluğu belirli kalınlıklarda yarı dalga veya çeyrek dalga rezonansına da neden olabilir. Bu rezonans etkileri, dalganın bir kısmının daha etkin bir şekilde yapı içinde ilerlemesine yol açabilir ve bu da kalkanlamanın etkinliğini değil, geçişin artmasını sağlar. Ayrıca, çok katmanlı yapılarda meydana gelen çoklu yansımalar, birbirini sönmölemek yerine içeriye giren dalgaların daha güçlü bir şekilde dışarıya çıkmasına da neden olabilmektedir.

Bu nedenle, tez kapsamında ölçümleri gerçekleştirilen hava boşluklu çok katmanlı birbirinden farklı yapıların, bileşenlerini oluşturan tek katmanlı ince filmlere kıyasla her zaman daha düşük kalkanlama performansı sergilediği gözlemlenmiştir. Normal koşullarda toplam kalınlığın artmasıyla birlikte kalkanlama etkinliğinde de artış beklenirken, söz konusu yapılarda bu etkinliğin azalmasının temel nedeni, katmanlar arasında oluşan mikro hava boşluklarıdır. Özellikle 8–12 GHz aralığında yer alan mikrodalga frekanslarında, bu tür hava boşluklarının elektromanyetik dalgaların zayıflamasını engellediği ve yapıların daha geçirgen hale gelmesine neden olduğu, literatürdeki çeşitli çalışmalarda da rapor edilmiştir (H. H. Park vd., 2024; Zhechev & Zabolotsky, 2021).

4. SONUÇLAR

Günümüzde elektromanyetik spektrumun tüm sınıflarında artan kullanım, özellikle mikrodalga frekans bandındaki uygulamaların yaygınlaşmasına neden olmuştur. Radar sistemleri, kablosuz haberleşme teknolojileri (5G ve 6G gibi), uydu iletişimi ve diğer mikrodalga tabanlı elektronik sistemlerin hızla gelişmesi, elektromanyetik girişim (EMI) problemini de beraberinde getirmektedir. Elektromanyetik uyumluluğun sağlanması için bu girişimlerin kontrol altına alınması büyük bir gereklilik arz etmektedir. Işıma yoluyla meydana gelen girişimlerin engellenmesinde en etkili yöntemlerden biri elektromanyetik kalkanlamadır. Bu bağlamda, literatürde elektromanyetik kalkanlama üzerine çok sayıda araştırma yürütülmekte ve yeni malzemeler ile yapıların geliştirilmesine yönelik çalışmalar devam etmektedir.

Bu tez kapsamında, mikrodalga frekanslarında (8–12 GHz) elektromanyetik kalkanlama sağlayacak ultra ince metalik yapılar üzerine odaklanılmıştır. İnce film üretiminde avantajları bulunan sputter yöntemi kullanılarak yaklaşık 80 nm ile 500 nm aralığında değişen farklı kalınlıklarda saf alüminyum, kobalt, krom ve titanyum ince filmleri büyütülmüştür. Oluşturulan filmlerin morfolojik ve yapısal analizleri uygun yöntemlerle gerçekleştirilmiştir. Daha sonra üretilen ince filmlerin elektromanyetik kalkanlama performansları, vektör ağ analizörü kullanılarak dalga kılavuzu iletim hattı içerisinde incelenmiş ve saçılma parametreleri üzerinden kalkanlama etkinlikleri detaylı şekilde analiz edilmiştir.

Aşağıdaki Tablo 6’da, 9 GHz sabit frekansında tüm numunelerin yansıma, iletim ve soğurma yüzdeleri gösterilmektedir. Bu özet tablodan da görüldüğü üzere, ultra ince metalik filmler gelen elektromanyetik dalgalara karşı yüksek derecede kalkanlama etkisi sergilemektedir. Özellikle alüminyum bazlı ince filmler, elektromanyetik dalgaların yansıtılması ve kalkanlanması açısından önemli bir performans ortaya koymuştur. Yapılan ölçümler, ultra ince metalik filmlerin yalnızca elektromanyetik dalgaları yansıtmakla kalmayıp, aynı zamanda gelen dalganın büyük bir kısmını ısıya dönüştürerek soğurduğunu da göstermektedir. Bu durum, ilgili frekans aralığında metalik ince filmlerin elektromanyetik dalga soğurucu özellik gösterme potansiyeline sahip olduğuna işaret eden önemli bir bulgudur.

Tablo 7. Tüm numunelerin 9 GHz frekansında yansım, iletim ve soğurma yüzdeleri

Numune Türü	Yansım		İletim		Soğurma
	S ₁₁ dB	Yüzde (%)	S ₂₁ dB	Yüzde (%)	Yüzde (%)
Al (80 nm)	-0,7224	84,6759	-32,1450	0,0610	15,2631
Al (140 nm)	-0,5235	88,6441	-46,0650	0,0025	11,3534
Al (260 nm)	-0,5581	87,9407	-55,0470	0,0003	12,0590
Co (70 nm)	-4,0486	39,3676	-9,5999	10,9650	49,6674
Co (175 nm)	-1,6811	67,9031	-17,7890	1,6637	30,4332
Co (300 nm)	-1,1569	76,6143	-22,6100	0,5482	22,8375
Cr (160 nm)	-4,8784	32,5207	-7,7762	16,6870	50,7923
Cr (290 nm)	-2,9380	50,8393	-13,1060	4,8910	44,2697
Cr (500 nm)	-1,3052	74,0423	-20,3530	0,9219	25,0358
Ti (120 nm)	-14,172	3,8264	-2,644	54,4001	41,7735
Ti (170 nm)	-3,2552	47,2585	-13,8630	4,1086	48,6329
Ti (250 nm)	-2,1223	61,3437	-19,5200	1,1168	37,5395

Tez çalışmasında ortaya konulan sonuçlar, ultra ince metalik filmlerin, özellikle yer tasarrufunun büyük önem taşıdığı mini elektronik cihazlarda etkin bir elektromanyetik kalkanlayıcı malzeme alternatifi olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Alüminyum tabanlı ince filmlerin yüksek kalkanlama performansı ve hafifliği, bu tür uygulamalarda ön plana çıkmasını sağlamaktadır. Elde edilen veriler, bu malzemelerin çeşitli elektronik ve haberleşme sistemlerinde EMI kontrolü açısından önemli bir seçenek sunduğunu göstermektedir.

Gelecekte yapılacak çalışmalar, farklı metal alaşımlarının ve çok katmanlı yapıların elektromanyetik kalkanlama performansı üzerindeki etkisini inceleyerek, daha geniş bir frekans aralığında yüksek etkinlik sağlayabilecek yeni malzeme tasarımlarına katkı sağlayabilir. Ayrıca, ultra ince filmlerin farklı üretim parametreleri ile optimize edilerek mekanik ve termal dayanımlarının artırılması, sanayi ve akademik araştırmalar açısından önemli bir gelişme alanı olacaktır.

5. ÖNERİLER

Bu doktora tezinde, mikrodalga kalkanlayıcı malzeme tasarımının analizine odaklanılmış ve malzeme bileşimleri ile mikrodalga kalkanlama özellikleri üzerine yapılan deneysel çalışmalar sunulmuştur. Bu çalışma ile mikrodalga kalkanlamada kullanılan malzemelerin performansı incelenmiş ve tasarım parametrelerinin etkileri ortaya konmuştur. Aşağıda, bu çalışma çerçevesinde gelecekteki araştırmalar ve uygulamalar için bazı öneriler belirtilmiştir:

- **Malzeme Seçimi ve Katkı Bileşenleri:** Bu tezde, farklı katkı bileşenleri içeren malzeme tasarımları yapılmıştır. Gelecek çalışmalarda, daha fazla katkı maddesi ile farklı matrislerin kombinasyonları araştırılabilir. Özellikle nanoteknolojik katkıların mikrodalga kalkanlama üzerindeki etkisi daha ayrıntılı incelenebilir.
- **Farklı Frekans Aralıklarında Testler:** Çalışmada mikrodalga frekansları kullanılarak malzeme kalkanlama performansı test edilmiştir. Gelecek çalışmalar, farklı frekans aralıklarında (örneğin, UHF, VHF, SHF) malzeme performansını inceleyerek daha geniş bir yelpazede kalkanlayıcı özelliklerin belirlenmesine olanak sağlayabilir. Ayrıca, yüksek frekanslı sistemler için tasarım yapılırken, malzeme parametrelerinin daha ayrıntılı bir şekilde optimize edilmesi gerekebilir.
- **Çok Katmanlı Yapıların İncelenmesi:** Bu tezde, tek katmanlı malzeme tasarımları üzerine yoğunlaşmıştır. Ancak, gelecekteki çalışmalarda çok katmanlı malzeme yapılarının tasarımına odaklanılabilir. Çok katmanlı yapılar, mikrodalga kalkanlama performansını artırmak için kullanılabilir ve katmanlar arasındaki etkileşimlerin nasıl optimize edileceği araştırılabilir.
- **Hibrit Tasarımlar:** Geleneksel metalik ince filmler ile polimer veya seramik matrikslerin kombinasyonlarını içeren hibrit malzeme tasarımlarının incelenmesi, daha etkili kalkanlama özellikleri elde edilmesine yardımcı olabilir. Bu tür hibrit malzeme sistemlerinin elektromanyetik dalgalara karşı direncinin nasıl arttırılabileceği üzerine daha fazla araştırma yapılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Abegunde, O. O., Akinlabi, E. T., Oladijo, O. P., Akinlabi, S., Ude, A. U., Abegunde, O. O., Akinlabi, E. T., Oladijo, O. P., Akinlabi, S., & Ude, A. U. (2019). Overview of thin film deposition techniques. *AIMS Materials Science*, 6(2), Article matersci-06-02-174. <https://doi.org/10.3934/matensci.2019.2.174>
- Abu Bakar, N. F., Amira Othman, S., Amirah Nor Azman, N. F., & Saqinah Jasrin, N. (2019). Effect of ionizing radiation towards human health: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 268(1), 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/268/1/012005>
- Afilipoaei, C., & Teodorescu-Draghicescu, H. (2020). A Review over Electromagnetic Shielding Effectiveness of Composite Materials. *Proceedings*, 63(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/proceedings2020063023>
- Alenezi, M., Stinson, K., Maqbool, M., & Bolus, N. (2018). Klein–Nishina electronic cross-section, Compton cross sections, and buildup factor of wax for radiation shielding and protection. *Journal of Radiological Protection*, 38(1), 372. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/aaa57b>
- Alizadeh, M., & Samiei, M. (2014). Fabrication of nanostructured Al/Cu/Mn metallic multilayer composites by accumulative roll bonding process and investigation of their mechanical properties. *Materials & Design (1980-2015)*, 56, 680-684.
- Al-Saleh, M. H., & Al-Sharman, M. M. (2023). Influence of carbon nanofiller geometry on EMI shielding and electrical percolation behaviors of polymer composites. *Synthetic Metals*, 294, 117314. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2023.117314>
- Al-Saleh, M. H., & Sundararaj, U. (2009). Electromagnetic interference shielding mechanisms of CNT/polymer composites. *Carbon*, 47(7), 1738-1746. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2009.02.030>
- Al-Saleh, M. H., & Sundararaj, U. (2012). X-band EMI shielding mechanisms and shielding effectiveness of high structure carbon black/polypropylene composites. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46(3), 035304. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/3/035304>
- Aragón-Zavala, A., Angueira, P., Montalban, J., & Vargas-Rosales, C. (2021). Radio Propagation in Terrestrial Broadcasting Television Systems: A Comprehensive Survey. *IEEE Access*, 9, 34789-34817. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3061034>
- Asri, J. E. and Erraml, H. (2019). Gamma Rays: Applications in Environmental Gamma Dosimetry and Determination Samples Gamma-Activities Induced by Neutrons. *Use of Gamma Radiation Techniques in Peaceful Applications*. <https://dx.doi.org/10.5772/intechopen.85503>
- Aytaç, A., & Malayoğlu, U. (2018). Comparison of PVD and JVD/DVD thin film coatings by physical vapor deposition methods and a conceptual, academic and theoretical

analysis on industrial applications of DVD coating technology. *The Journal of Defense Sciences*, 17(1).

- Azzurli, F., & Lechner, K. (2014). Electromagnetic fields and potentials generated by massless charged particles. *Annals of Physics*, 349, 1-32. <https://doi.org/10.1016/j.aop.2014.06.005>
- Balanis, C. A. (2016). *Antenna Theory: Analysis and Design*. John Wiley & Sons.
- Balanis, C. A. (2024). *Balanis' Advanced Engineering Electromagnetics*. John Wiley & Sons. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10534250/>
- Balela, M. D. L., Yagi, S., Lockman, Z., Aziz, A., Amorsolo, A. V., & Matsubara, E. (2009). Electroless Deposition of Ferromagnetic Cobalt Nanoparticles in Propylene Glycol. *Journal of The Electrochemical Society*, 156(9), E139. <https://doi.org/10.1149/1.3169776>
- Bashter, I. I. (1997). Calculation of radiation attenuation coefficients for shielding concretes. *Annals of Nuclear Energy*, 24(17), 1389-1401. [https://doi.org/10.1016/S0306-4549\(97\)00003-0](https://doi.org/10.1016/S0306-4549(97)00003-0)
- Beyazay, E., Karabul, Y., Korkut, S. E., Kılıç, M., & Özdemir, Z. G. (2023). Multifunctional PCz/BaO nanocomposites: Ionizing radiation shielding ability and enhanced electric conductivity. *Progress in Nuclear Energy*, 155, 104521. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104521>
- Bianchi, C., & Meloni, A. (2007). Natural and man-made terrestrial electromagnetic noise: An outlook. *Annals of geophysics*, 50(3), 435-445.
- Blinder, S. M. (2021). Chapter 1 - Atoms and photons: Origins of the quantum theory. İçinde S. M. Blinder (Ed.), *Introduction to Quantum Mechanics (Second Edition)* (ss. 1-19). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822310-9.00009-4>
- Boisselier, G., Maury, F., & Schuster, F. (2011). Growth of Chromium Carbide in a Hot Wall DLICVD Reactor. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 11(9), 8289-8293. <https://doi.org/10.1166/jnn.2011.5028>
- Bora, P. J., Vinoy, K. J., Ramamurthy, P. C., & Madras, G. (2017). Electromagnetic interference shielding effectiveness of polyaniline-nickel oxide coated cenosphere composite film. *Composites Communications*, 4, 37-42.
- Bortkiewicz, A. (2019). Health effects of Radiofrequency Electromagnetic Fields (RF EMF). *Industrial Health*, 57(4), 403-405. https://doi.org/10.2486/indhealth.57_400
- Chang, D. C. (2017). Physical interpretation of Planck's constant based on the Maxwell theory*. *Chinese Physics B*, 26(4), 040301. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/26/4/040301>
- Cheng, D. K. (David K. (1993). *Fundamentals of engineering electromagnetics*. Prentice Hall. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130000797657533312>

- Cheng, K. B., Ramakrishna, S., & Lee, K. C. (2000). Electromagnetic shielding effectiveness of copper/glass fiber knitted fabric reinforced polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31(10), 1039-1045. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(00\)00071-3](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(00)00071-3)
- Chintada, V. B., Koona, R., & Raju Bahubalendruni, M. V. A. (2021). State of Art Review on Nickel-Based Electroless Coatings and Materials. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 7(4), 134. <https://doi.org/10.1007/s40735-021-00568-7>
- Chung, D. D. L. (2020). Materials for electromagnetic interference shielding. *Materials Chemistry and Physics*, 255, 123587.
- Chung, D. D. L., & Ozturk, M. (2022). Electromagnetic skin depth of cement paste and its thickness dependence. *Journal of Building Engineering*, 52, 104393. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104393>
- Culhaoglu, A. E., Osipov, A. V., & Russer, P. (2013). Mono- and Bistatic Scattering Reduction by a Metamaterial Low Reflection Coating. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 61(1), 462-466. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. <https://doi.org/10.1109/TAP.2012.2220095>
- Devender, & Ramasamy, S. R. (1997). A review of EMI shielding and suppression materials. *Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility '99 (IEEE Cat. No. 99TH 8487)*, 459-466. <https://doi.org/10.1109/ICEMIC.1997.669850>
- Dilsiz, K., Ogul, H., Akman, F., Agar, O., Kacal, M. R., Polat, H., & Dursun, İ. (2021). Evaluation of CdS doped polyester composites regarding gamma and neutron shielding properties. *Progress in Nuclear Energy*, 139, 103865. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103865>
- Elsukov, E. P., Kolodkin, D. A., Ul'yanov, A. L., & Porsev, V. E. (2014). Probe Mössbauer spectroscopy of mechanical alloying in binary Cr-57Fe(1 at%) system. *AIP Conference Proceedings*, 1622(1), 114-119. <https://doi.org/10.1063/1.4898619>
- Erdogan, N., Erden, F., Astarlioglu, A. T., Ozdemir, M., Ozbay, S., Aygun, G., & Ozyuzer, L. (2020). ITO/Au/ITO multilayer thin films on transparent polycarbonate with enhanced EMI shielding properties. *Current Applied Physics*, 20(4), 489-497.
- Eren Belgin, E. (2022). Comparison of gamma spectrometric method and XCOM method in calculating mass attenuation coefficients of reinforced polymeric composite materials. *Radiation Physics and Chemistry*, 193, 109960. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.109960>
- Ersoy, M. S. (2018). *Nanokompozit yapıları elektriksel iletken ve elektromanyetik kalkan özellikli teknik tekstillerin tasarımı ve geliştirilmesi*, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/644654>
- Eskalen, H., Kavun, Y., Kerli, S., & Eken, S. (2020). An investigation of radiation shielding properties of boron doped ZnO thin films. *Optical Materials*, 105, 109871. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.109871>

- Fan, C., Wu, B., Song, R., Zhao, Y., Zhang, Y., & He, D. (2019). Electromagnetic shielding and multi-beam radiation with high conductivity multilayer graphene film. *Carbon*, 155, 506-513.
- Fan, W. C., Drumm, C. R., Roeske, S. B., & Scrivner, G. J. (1996). Shielding considerations for satellite microelectronics. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 43(6), 2790-2796. <https://doi.org/10.1109/23.556868>
- Fornalski, K. W. (2018). Simple empirical correction functions to cross sections of the photoelectric effect, Compton scattering, pair and triplet production for carbon radiation shields for intermediate and high photon energies. *Journal of Physics Communications*, 2(3), 035038. <https://doi.org/10.1088/2399-6528/aab408>
- Franklin, A. (2013). Millikan's measurement of Planck's constant. *The European Physical Journal H*, 38(5), 573-594. <https://doi.org/10.1140/epjh/e2013-40021-3>
- Gao, Y.-N., Wang, Y., Yue, T.-N., & Wang, M. (2023). Achieving absorption-type electromagnetic shielding performance in silver micro-tubes/barium Ferrites/Poly(lactic acid) composites via enhancing impedance matching and electric-magnetic synergism. *Composites Part B: Engineering*, 249, 110402. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110402>
- Geetha, S., Satheesh Kumar, K. K., Rao, C. R. K., Vijayan, M., & Trivedi, D. C. (2009). EMI shielding: Methods and materials—A review. *Journal of Applied Polymer Science*, 112(4), 2073-2086. <https://doi.org/10.1002/app.29812>
- Giurlani, W., Innocenti, M., & Lavacchi, A. (2018). X-ray Microanalysis of Precious Metal Thin Films: Thickness and Composition Determination. *Coatings*, 8(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/coatings8020084>
- Gonçalves, F. J. F., Pinto, A. G. M., Mesquita, R. C., Silva, E. J., & Brancaccio, A. (2018). Free-Space Materials Characterization by Reflection and Transmission Measurements using Frequency-by-Frequency and Multi-Frequency Algorithms. *Electronics*, 7(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/electronics7100260>
- González, M., Pozuelo, J., & Baselga, J. (2018). Electromagnetic Shielding Materials in GHz Range. *The Chemical Record*, 18(7-8), 1000-1009. <https://doi.org/10.1002/tcr.201700066>
- Guo, Y., Ruan, K., Wang, G., & Gu, J. (2023). Advances and mechanisms in polymer composites toward thermal conduction and electromagnetic wave absorption. *Science Bulletin*, 68(11), 1195-1212. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2023.04.036>
- Guo-hui, W., Man-li, H., Fan-chao, C., Jun-dong, F., & Yao-dong, D. (2019). Enhancement of flame retardancy and radiation shielding properties of ethylene vinyl acetate based radiation shielding composites by EB irradiation. *Progress in Nuclear Energy*, 112, 225-232. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2019.01.001>
- Gupta, A., Avci, P., Dai, T., Huang, Y.-Y., & Hamblin, M. R. (2013). Ultraviolet Radiation in Wound Care: Sterilization and Stimulation. *Advances in Wound Care*, 2(8), 422-437. <https://doi.org/10.1089/wound.2012.0366>

- Gürel Özdemir, H., Kaçal, M. R., Akman, F., Polat, H., & Agar, O. (2023). Investigation of gamma radiation shielding characteristics of bismuth reinforced ternary composites in wide photon energy region. *Radiation Physics and Chemistry*, 208, 110924. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.110924>
- Håkansson, E., Amiet, A., Nahavandi, S., & Kaynak, A. (2007). Electromagnetic interference shielding and radiation absorption in thin polypyrrole films. *European Polymer Journal*, 43(1), 205-213. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2006.10.001>
- Halliwell, E., Couch, C., Begum, R., Li, W., & Maqbool, M. (2021). Increase in linear attenuation coefficient by changing crystal structure of materials for radiation shielding and biomedical devices safety. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 622, 126646. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126646>
- Han, M.-K., Hwang, M.-J., Won, D.-H., Kim, Y.-S., Song, H.-J., & Park, Y.-J. (2014). Massive Transformation in Titanium-Silver Alloys and Its Effect on Their Mechanical Properties and Corrosion Behavior. *Materials*, 7(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/ma7096194>
- Hashemi, S. A., Ghaffarkhah, A., Hosseini, E., Bahrani, S., Najmi, P., Omidifar, N., Mousavi, S. M., Amini, M., Ghaedi, M., Ramakrishna, S., & Arjmand, M. (2022). Recent progress on hybrid fibrous electromagnetic shields: Key protectors of living species against electromagnetic radiation. *Matter*, 5(11), 3807-3868. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2022.09.012>
- Heinß, J.-P., & Fietzke, F. (2020). High-rate deposition of thick aluminum coatings on plastic parts for electromagnetic shielding. *Surface and Coatings Technology*, 385, 125134. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125134>
- Huang, J. L., Yau, B. S., Chen, C. Y., Lo, W. T., & Lii, D. F. (2001). The electromagnetic shielding effectiveness of indium tin oxide films. *Ceramics International*, 27(3), 363-365. [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(00\)00088-2](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(00)00088-2)
- Jalali, M., Dauterstedt, S., Michaud, A., & Wuthrich, R. (2011). Electromagnetic shielding of polymer-matrix composites with metallic nanoparticles. *Composites Part B: Engineering*, 42(6), 1420-1426. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.05.018>
- Jung, M. J., Nam, K. H., Shaginyan, L. R., & Han, J. G. (2003). Deposition of Ti thin film using the magnetron sputtering method. *Thin Solid Films*, 435(1), 145-149. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(03\)00344-4](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(03)00344-4)
- Karmaker, N., Maraz, K. M., Islam, F., Haque, M. M., Razzak, M., Mollah, M. Z. I., Faruque, M. R. I., & Khan, R. A. (2021). Fundamental characteristics and application of radiation. *GSC Advanced Research and Reviews*, 7(1), Article 1. <https://doi.org/10.30574/gscarr.2021.7.1.0043>
- Kaur, M., Kakar, S., & Mandal, D. (2011). Electromagnetic interference. *2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology*, 4, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICECTECH.2011.5941844>

- Kavun, Y., Kerli, S., Eskalen, H., & Kavgacı, M. (2022). Characterization and nuclear shielding performance of Sm doped In_2O_3 thin films. *Radiation Physics and Chemistry*, 194, 110014. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110014>
- Khalid, T., Albasha, L., Qaddoumi, N., & Yehia, S. (2017). Feasibility Study of Using Electrically Conductive Concrete for Electromagnetic Shielding Applications as a Substitute for Carbon-Laced Polyurethane Absorbers in Anechoic Chambers. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65(5), 2428-2435. <https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2670538>
- Kim, B. R., Lee, H. K., Kim, E., & Lee, S.-H. (2010). Intrinsic electromagnetic radiation shielding/absorbing characteristics of polyaniline-coated transparent thin films. *Synthetic Metals*, 160(17), 1838-1842. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2010.06.027>
- Kim, J. H. (2018). Three principles for radiation safety: Time, distance, and shielding. *The Korean Journal of Pain*, 31(3), 145-146. <https://doi.org/10.3344/kjp.2018.31.3.145>
- Kim, S.-C., & Cho, S.-H. (2019). Analysis of the Correlation between Shielding Material Blending Characteristics and Porosity for Radiation Shielding Films. *Applied Sciences*, 9(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/app9091765>
- Kondawar, S. B., & Modak, P. R. (2020). Chapter 2—Theory of EMI shielding. İçinde K. Joseph, R. Wilson, & G. George (Ed.), *Materials for Potential EMI Shielding Applications* (ss. 9-25). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817590-3.00002-6>
- Kontomaris, S. V., Malamou, A., Balogiannis, G., & Antonopoulou, N. (2019). A simplified approach for presenting the differences between ionising and non-ionising electromagnetic radiation. *Physics Education*, 55(2), 025007. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ab5c00>
- Król, M., Snopinski, P., Tomiczek, B., Tanski, T., Pakiel, W., & Sitek, W. (2016). Structure and properties of an Al alloy in as-cast state and after laser treatment. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 65(2), 107.
- Kulkarni, G., Kandesar, P., Velhal, N., Phadtare, V., Jatrakar, A., Shinde, S. K., Kim, D.-Y., & Puri, V. (2019). Exceptional electromagnetic interference shielding and microwave absorption properties of room temperature synthesized polythiophene thin films with double negative characteristics (DNG) in the Ku-band region. *Chemical Engineering Journal*, 355, 196-207.
- Kumar, R., Sahoo, S., Joanni, E., Singh, R. K., Tan, W. K., Kar, K. K., & Matsuda, A. (2021). Recent progress on carbon-based composite materials for microwave electromagnetic interference shielding. *Carbon*, 177, 304-331. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.02.091>
- Laal, M. (2013). Innovation Process in Medical Imaging. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 81, 60-64. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.06.388>

- Lax, M., & Nelson, D. F. (1976). Maxwell equations in material form. *Physical Review B*, 13(4), 1777-1784. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.13.1777>
- Li, C., Peng, Z., Huang, T.-Y., Fan, T., Wang, F.-K., Horng, T.-S., Muñoz-Ferreras, J.-M., Gómez-García, R., Ran, L., & Lin, J. (2017). A Review on Recent Progress of Portable Short-Range Noncontact Microwave Radar Systems. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 65(5), 1692-1706. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2650911>
- Li, Y.-T., & Sun, Y.-T. A. (2022). An investigation of electromagnetic interference shielding effectiveness with multilayer thin films material. *Thin Solid Films*, 753, 139259.
- Liu, D.-H., & Lai, Y.-S. (2021). Effectiveness of electromagnetic interference shielding of sputtered nitrogen-doped carbon thin films. *Diamond and Related Materials*, 111, 108234.
- Liu, X., Wang, N., & Wang, Z. (2022). Effects of the absorber, thickness and surface roughness on the electromagnetic wave absorption characteristics of magnesium phosphate cement. *Construction and Building Materials*, 344, 128149. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128149>
- Manjunatha, M., Reddy, G. S., Mallikarjunaiah, K. J., Damle, R., & Ramesh, K. P. (2019). Determination of Phase Composition of Cobalt Nanoparticles Using ⁵⁹Co Internal Field Nuclear Magnetic Resonance. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 32(10), 3201-3209. <https://doi.org/10.1007/s10948-019-5083-7>
- Medhat, M. E. (2009). Gamma-ray attenuation coefficients of some building materials available in Egypt. *Annals of Nuclear Energy*, 36(6), 849-852. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2009.02.006>
- Meng, Q., Guo, S., Zhao, X., & Veintemillas-Verdaguer, S. (2013). Bulk metastable cobalt in fcc crystal structure. *Journal of Alloys and Compounds*, 580, 187-190. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.05.115>
- Mihut, D. M., Lozano, K., Tidrow, S. C., & Garcia, H. (2012). Electromagnetic interference shielding effectiveness of nanoreinforced polymer composites deposited with conductive metallic thin films. *Thin Solid Films*, 520(21), 6547-6550. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2012.07.018>
- Mino, L., Borfecchia, E., Segura-Ruiz, J., Giannini, C., Martinez-Criado, G., & Lamberti, C. (2018). Materials characterization by synchrotron x-ray microprobes and nanoprobe. *Reviews of Modern Physics*, 90(2), 025007. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.90.025007>
- More, C. V., Alsayed, Z., Badawi, Mohamed. S., Thabet, Abouzeid. A., & Pawar, P. P. (2021). Polymeric composite materials for radiation shielding: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(3), 2057-2090. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01189-9>

- Morgenthaler, F. R. (1958). Velocity Modulation of Electromagnetic Waves. *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 6(2), 167-172. IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1958.1124533>
- Motasemi, F., & Ani, F. N. (2012). A review on microwave-assisted production of biodiesel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 4719-4733. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.069>
- Obaid, S. S., Sayyed, M. I., Gaikwad, D. K., & Pawar, Pravina. P. (2018). Attenuation coefficients and exposure buildup factor of some rocks for gamma ray shielding applications. *Radiation Physics and Chemistry*, 148, 86-94. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.02.026>
- Pandey, R., Tekumalla, S., & Gupta, M. (2020). Chapter 21—EMI shielding of metals, alloys, and composites. İçinde K. Joseph, R. Wilson, & G. George (Ed.), *Materials for Potential EMI Shielding Applications* (ss. 341-355). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817590-3.00021-X>
- Park, H. H., Song, E., Kim, J., & Kim, C. (2024). Impact of Air Gaps Between Microstrip Line and Magnetic Sheet on Near-Field Magnetic Shielding. *Electronics*, 13(21), Article 21. <https://doi.org/10.3390/electronics13214313>
- Park, J., Lee, J. W., Choi, H. J., Jang, W. G., Kim, T. S., Suh, D. S., Jeong, H. Y., Chang, S. Y., Roh, J. C., Yoo, C. S., Kim, K. H., Park, C., & Suh, S. J. (2019). Electromagnetic interference shielding effectiveness of sputtered NiFe/Cu multi-layer thin film at high frequencies. *Thin Solid Films*, 677, 130-136. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2019.03.015>
- Pavlík, M., Bereš, M., & Beňa, L. (2024). The Influence of Various Commonly Used Building Materials on the Shielding Effectiveness, Reflection and Absorption of the Electromagnetic Wave. *Applied Sciences*, 14(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/app14062521>
- Pavlík, M., Kolcunová, I., & Lisoň, L. (2015). Measuring the shielding effectiveness and reflection of electromagnetic field of building material. *2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, 56-59. <https://doi.org/10.1109/EPE.2015.7161186>
- Prokopchuk, A., Zozulia, I., Didenko, Y., Tatarchuk, D., Heuer, H., & Poplavko, Y. (2021). Dielectric Permittivity Model for Polymer-Filler Composite Materials by the Example of Ni- and Graphite-Filled Composites for High-Frequency Absorbing Coatings. *Coatings*, 11(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/coatings11020172>
- Raganya, M. L., Moshokoa, N. M., Obadele, B., Olubambi, P. A., & Machaka, R. (2019). The microstructural and mechanical characterization of the β -type Ti-11.1Mo-10.8Nb alloy for biomedical applications. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 655(1), 012025. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/655/1/012025>
- Ryu, J. S., Baek, S. W., Jung, C. H., Cho, S. J., Jung, E. G., Kim, H. K., & Kim, J. H. (2013). The Survey about the Degree of Damage of Radiation-Protective Shields in

- Operation Room. *The Korean Journal of Pain*, 26(2), 142-147. <https://doi.org/10.3344/kjp.2013.26.2.142>
- Sabath, F. (2017). A systematic approach for electromagnetic interference risk management. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 6(4), 99-106. IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine. <https://doi.org/10.1109/MEMC.0.8272296>
- Santhosi, B., Ramji, K., & Rao, N. M. (2020). Design and development of polymeric nanocomposite reinforced with graphene for effective EMI shielding in X-band. *Physica B: Condensed Matter*, 586, 412144.
- Schmid, R., & Wakelam, M. (2013). Radiation—Ionising and non-ionising. İçinde *Principles of Occupational Health and Hygiene* (2. bs). Routledge.
- Seltzer, S. (1987, Ocak). *XCOM-Photon Cross Sections Database, NIST Standard Reference Database 8*. National Institute of Standards and Technology (NIST). <https://doi.org/10.18434/t48g6x>
- Shafi, M., Zhang, J., Tatara, H., Molisch, A. F., Sun, S., Rappaport, T. S., Tufvesson, F., Wu, S., & Kitao, K. (2018). Microwave vs. Millimeter-Wave Propagation Channels: Key Differences and Impact on 5G Cellular Systems. *IEEE Communications Magazine*, 56(12), 14-20. IEEE Communications Magazine. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1800255>
- Shi, F. (2018). *Introductory Chapter: Basic Theory of Magnetron Sputtering*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80550>
- Shin, J. C., Kim, J., & Grigsby-Toussaint, D. (2017). Mobile Phone Interventions for Sleep Disorders and Sleep Quality: Systematic Review. *JMIR mHealth and uHealth*, 5(9), e7244. <https://doi.org/10.2196/mhealth.7244>
- Shukla, V. (2019). Review of electromagnetic interference shielding materials fabricated by iron ingredients. *Nanoscale Advances*, 1(5), 1640-1671.
- Soethe, V. L., Nohara, E. L., Fontana, L. C., & Rezende, M. C. (2011). Radar absorbing materials based on titanium thin film obtained by sputtering technique. *Journal of aerospace technology and management*, 3, 279-286.
- Sorgucu, U. (2024). Potential of Commercial Titanium in Electromagnetic Shielding for 5G Frequency Domain. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, 6(2), Article 2. <https://doi.org/10.46387/bjesr.1511306>
- Sousa, E., Vardasca, R., Teixeira, S., Seixas, A., Mendes, J., & Costa-Ferreira, A. (2017). A review on the application of medical infrared thermal imaging in hands. *Infrared Physics & Technology*, 85, 315-323. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2017.07.020>
- Sowa, P., Rutkowska-Talipska, J., Sulkowska, U., Rutkowski, K., & Rutkowski, R. (2012). Ionizing and non-ionizing electromagnetic radiation in modern medicine. *Polish Annals of Medicine*, 19(2), 134-138. <https://doi.org/10.1016/j.poamed.2012.07.001>

- Strijckmans, K., Schelfhout, R., & Depla, D. (2018). Tutorial: Hysteresis during the reactive magnetron sputtering process. *Journal of Applied Physics*, 124(24), 241101. <https://doi.org/10.1063/1.5042084>
- Şimşekçi, U. (2018). *Nükleer tıp ünitelerinde radyoaktif kaynak yönetimi, radyoaktif atık yönetimi ve işletmeden çıkarma işlemlerinin incelenmesi, güvenlik ve emniyete yönelik zaafiyetlerin tespiti ve önlenmesine yönelik öneriler geliştirilmesi*. <http://kurumsalarsiv.tenmak.gov.tr/handle/20.500.12878/1841>
- Testov, O. A., Komlev, A. E., Gareev, K. G., Khmel'nitskiy, I. K., Luchinin, V. V., Sevost'yanov, E. N., & Testov, I. O. (2021). Providing a specified level of electromagnetic shielding with nickel thin films formed by DC magnetron sputtering. *Coatings*, 11(12), 1455.
- Tong, X. C. (2016). *Advanced Materials and Design for Electromagnetic Interference Shielding*. <https://doi.org/10.1201/9781420073591>
- Tripathy, P. K., Patra, A. K., & Sastry, P. U. (2008). Studies on pore morphology of titanium and its oxide by small angle neutron scattering. *Pramana*, 71(5), 1033-1038. <https://doi.org/10.1007/s12043-008-0219-5>
- URL-1. (2025, Nisan 23). LAC ve MAC Değerleri: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html> adresinden alınmıştır.
- URL-2. (2025, Mayıs 11). Yansımaz Oda Görseli: <https://www.ume.tubitak.gov.tr/tr/laboratuvarlarimiz/elektromanyetik-laboratuvari> adresinden alınmıştır.
- URL-3. (2025, Ağustos 1). Sputter Hedef Malzemelerinin Fiziksel Özellikleri: <https://www.lesker.com/materials-division.cfm?section=sputtering-targets> adresinden alınmıştır.
- Villanueva, M., Harasym, J., Muñoz, J. M., & Ronda, F. (2018). Microwave absorption capacity of rice flour. Impact of the radiation on rice flour microstructure, thermal and viscometric properties. *Journal of Food Engineering*, 224, 156-164. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.12.030>
- Wang, H., Ji, C., Zhang, C., Zhang, Y., Zhang, Z., Lu, Z., Tan, J., & Guo, L. J. (2019). Highly Transparent and Broadband Electromagnetic Interference Shielding Based on Ultrathin Doped Ag and Conducting Oxides Hybrid Film Structures. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(12), 11782-11791. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b00716>
- Wang, J., Su, H., Xie, W., & Yu, S. (2017). Mobile Phone Use and The Risk of Headache: A Systematic Review and Meta-analysis of Cross-sectional Studies. *Scientific Reports*, 7(1), 12595. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12802-9>
- Wang, J., Wang, Z., Zhao, D., & Xu, C. (2014). Facile fabrication of nanoporous PdFe alloy for nonenzymatic electrochemical sensing of hydrogen peroxide and glucose. *Analytica chimica acta*, 832, 34-43.

- Weston, D. A. (2016). *Electromagnetic Compatibility: Methods, Analysis, Circuits, and Measurement, Third Edition* (3. bs). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315372013>
- Yang, S. M., Chang, Y. Y., Hsieh, Y. C., & Lee, Y. J. (2008). Electromagnetic shielding effectiveness of multilayer metallic thin film on plastic substrates. *Journal of Applied Polymer Science*, 110(3), 1403-1410. <https://doi.org/10.1002/app.28806>
- Yaşar, U. Ş., & Kaya, H. (2024). EMI Shielding Properties of Al, Co, and Al/Co Thin Films. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 19(11), 1756-1762. <https://doi.org/10.1002/tee.24147>
- Yu, J., Li, X., & Zhou, W. (2018). Tutorial: Broadband fiber-wireless integration for 5G+ communication. *APL Photonics*, 3(11), 111101. <https://doi.org/10.1063/1.5042364>
- Yu, X., Shen, Z., & Cai, C. (2009). Millimeter wave electromagnetic interference shielding by coating expanded polystyrene particles with a copper film using magnetron sputtering. *Vacuum*, 83(12), 1438-1441. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2009.05.021>
- Zhang, J., Li, X., Zhang, M., Zhu, Q., & Sun, X. (2022). Flexible and ultra-thin silver films with superior electromagnetic interference shielding performance via spin-coating silver metal–organic decomposition inks. *Materials Advances*, 3(1), 647-657.
- Zhechev, Y. S., & Zabolotsky, A. M. (2021). The analysis of shielding effectiveness of the enclosure of an EMI-filter for a spacecraft power bus. *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, 15, 470-475.
- Zhou, C., Reyes, M., & Girman, M. (2022). Electromagnetic Interference (EMI) In Underground Coal Mines: A Literature Review and Practical Considerations. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 39(2), 421-431. <https://doi.org/10.1007/s42461-021-00535-3>
- Zwinkels, J. (2015). Light, Electromagnetic Spectrum. İçinde R. Luo (Ed.), *Encyclopedia of Color Science and Technology* (ss. 1-8). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27851-8_204-1

ÖZGEÇMİŞ

İlköğrenimini Erzincan Ziya Gökalp İlköğretim Okulu'nda bitirdikten sonra lise eğitimini 2007 yılında Erzincan Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2008-2009 öğretim yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2013 yılında bu bölümden mezun oldu. 2014 yılında Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. 2018 yılında “PLC Kontrollü Sılar Cihazı Yapımı” başlıklı yüksek lisans tezini tamamladı. 2018 yılından itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği anabilim dalında doktora eğitimine devam etmektedir. 2015-2018 yılları arasında Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Yapı İşleri Teknik Dairesinde Elektrik kontrol mühendisi olarak; 2018-2021 yılları arasında Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünde araştırma görevlisi olarak görev yapmıştır. 2021 yılından itibaren Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Kemah Meslek Yüksekokulunda Öğretim Görevlisi olarak çalışmaya devam etmektedir.

Yaşar, U. Ş., & Kaya, H. (2024). EMI Shielding Properties of Al, Co, and Al/Co Thin Films. *IEEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 19(11), 1756-1762. <https://doi.org/10.1002/tee.24147>

Yaşar, U. Ş., & Kaya, H. (2024). Investigation Of Electromagnetic Shielding Effectiveness Of Thin Films With Different Conductivity Values In The 8-12 Ghz Frequency Band Using CST Simulation Software. 6. *Uluslararası Boğaziçi Bilimsel Araştırmalar Kongresi*, Kongre Kitabı, s. 689-697. İstanbul.