



**YAŞ YÖNTEM İLE İZ DÜŞÜRÜCÜ BOYALARIN PERFORMANS
ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Seray KARA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

NİSAN 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Seray KARA

26/04/2024

YAŞ YÖNTEM İLE İZ DÜŞÜRÜCÜ BOYALARIN PERFORMANS ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Seray KARA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2024

ÖZET

Radarlar, cisimlerin menzilini, yüksekliğini, yönünü veya hızını belirlemek amacıyla radyo dalgalarını kullanan sistemlerdir. Günümüzde askeri ve endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Radar sistemlerinin geliştirilmesi radarda görünmezlik sağlayan malzemelere olan ihtiyacı da artırmaktadır. İz düşürücü malzemeler savunma sanayinde, hava, deniz ve kara araçlarında, tekstil ürünlerinde kullanılmaktadır. Radar absorpsiyon malzemeleri, radar cihazlarından gönderilen elektromanyetik dalgaların bir kısmını soğurarak malzemenin radar tarafından tespit edilebilirliğini zorlaştırmaktadır. Bir malzemenin iyi bir RAM olarak adlandırılabilmesi için; geniş frekans aralığında yüksek absorpsiyon özelliği göstermesi, ince ve hafif olması gerekmektedir. Yapılan çalışmada sıcaklık dayanımını artıran ve geniş bant aralığında düşük görünürlük sağlayan boya üretimi amaçlanmaktadır. İz düşürücü boyada pigment olarak mekanik ve kimyasal özellikleri bakımından kararlı olan ve yüksek dielektrik özelliğine sahip olan baryum titanat ($BaTiO_3$) kullanılmıştır. Ayrıca yüksek sıcaklık dayanımı sağlaması amacıyla boya üretiminde silikon esaslı bağlayıcı kullanılmıştır. Radar absorpsiyon kapasitesini uygulanan boyanın kalınlığı, boyadaki pigment oranı gibi parametreler etkilemektedir. Bu çalışmada hem kaplama kalınlığının absorpsiyon kapasitesine etkileri hem de pigment-bağlayıcı oranının absorpsiyon kapasitesine etkileri incelenmiştir. Radar absorpsiyon ölçümü için dalga kılavuzu yöntemi kullanılmıştır. Hazırlanan boyanın radar absorpsiyon ölçümleri 8,2-12,4 GHz aralığında (X-Bandı) gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümlerde elde edilen sonuçlara göre %55 pigment oranında 2 mm kaplama kalınlığında 8,2-12,4 GHz frekans bandında 11,770 GHz'de -31,698 dB absorpsiyon yaptığı tespit edilmiştir.

Bilim Kodu : 91213

Anahtar Kelimeler : Radar absorpsiyon malzemeleri, iz düşürücü, X-Bandı,

Sayfa Adedi : 46

Danışman : Prof. Dr. Metin GÜRÜ

İkinci Danışman : Dr. Gülsün AKTAŞ

IMPROVING THE PERFORMANCE PROPERTIES OF TRACE-REDUCING PAINTS
BY WET METHOD

(M. Sc. Thesis)

Seray KARA

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2024

ABSTRACT

Radars are systems that utilize radio waves to determine the range, height, direction, or speed of objects. They are widely employed in both military and industrial applications today. The development of radar systems has increased the need for materials that provide radar invisibility. Absorptive materials are used in the defense industry, as well as in air, sea, and land vehicles, as well as textile products. Radar absorption materials make it challenging for the material to be detected by absorbing a portion of the electromagnetic waves sent by radar devices. For a material to be considered a good Radar Absorbing Material (RAM), it needs to exhibit high absorption characteristics over a broad frequency range while being thin and lightweight. This study aims to synthesize paint that enhances temperature resistance and provides low visibility across a wide frequency range. Barium titanate (BaTiO_3) is used as the pigment in the absorptive paint due to its stable mechanical and chemical properties and high dielectric characteristics. Additionally, a silicone-based binder is employed in paint production to ensure high-temperature resistance. The parameters such as coating thickness and pigment-to-binder ratio affect the radar absorption capacity of the applied paint. This research investigates the effects of both coating thickness and pigment-to-binder ratio on the absorption capacity. Waveguide methods are employed for radar absorption measurements. Radar absorption measurements of the prepared paint were performed in the 8.2-12.4 GHz range (X-Band). According to the results obtained from the measurements, it was determined that the paint with a coating thickness of 2 mm at 55% pigment ratio exhibited -31.698 dB absorption at 11.770 GHz in the 8.2-12.4 GHz frequency band.

Science Code : 91213

Key Words : Radar absorption materials, Trace reducing, X-Band,

Page Number : 46

Supervisor : Prof. Dr. Metin GÜRÜ

Co-Supervisor : Dr. Gülsün AKTAŞ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezim boyunca değerli bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşarak çalışmama yön veren, desteklerini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Metin GÜRÜ 'ye sonsuz teşekkür ederim. Çalışmalarında yönlendirip, yol gösteren, her konuda destek veren değerli hocam Dr. Gülsün AKTAŞ 'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarında boya kısmında kullanılan boya hammaddelerin temin edilmesinde destek veren Kardelen Boya firmasına ve Genel Müdürü Bilge DERYAL 'a teşekkür ederim. Boya çalışmalarında bana destek olup sorularıma cevap arayan meslektaşım Tolga AKSONGUR 'a teşekkür ederim.

Boya analiz çalışmalarında destek veren 5'inci Ana Bakım Fabrika Müdürlüğü çalışanlarından Dr. Mehmet TİKEN 'e, Faruk ÖZTÜRK 'e ve Tevfik DEMİR'e teşekkür ederim.

Yüksek lisans tezi boyunca her zaman, her konuda sonsuz desteklerini, güvenlerini hissettiğim annem Zerrin KARA ve babam Hasan Suphi KARA 'ya sonsuz teşekkür ederim. Bu süreçte beni motive eden değerli arkadaşım Hande KONUK 'a ve kuzenim Merve KART YILMAZ 'a teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ	1
2. RADAR ABSORPSİYON MALZEMELERİ	3
2.1. Radar Nedir	3
2.2. Radar Sistemlerine Yakalanmama Teknikleri	6
2.2.1. Yüzey şekillendirme ile radara yakalanmama	8
2.2.2. Radar soğurucu malzemeler ile radara yakalanmama	10
2.2.3. Aktif önleme ile radara yakalanmama	10
2.2.4. Pasif Önleme ile radara yakalanmama	10
2.3. Radar Absorpsiyon Malzemeleri (RAM)	10
2.4. RAM Ölçüm Teknikleri	12
2.4.1. Koaksiyel prob tekniği	12
2.4.2. İletim hattı tekniği	12
2.4.3. Serbest ortam yansıma tekniğinde	13
2.4.4. Rezonans kavite tekniği	13
2.5. Boya Hakkında Genel Bilgi	13
2.5.1. Bağlayıcılar	13

	Sayfa
2.5.2. Çözücüler	14
2.5.3. Pigment ve dolgu maddeleri	14
2.5.4. Katkı maddeleri	14
2.6. Baryum Titanat ($BaTiO_3$) Hakkında Genel Bilgi	14
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	17
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	23
4.1. Kullanılan Hammaddeler	23
4.2. Pigmenti Boya Haline Getirme	23
4.3. Kullanılan Ekipmanlar	24
4.3.1. Karıştırıcı	24
4.3.2. Aplikatör	25
4.3.3. Kaplama kalınlığı ölçüm cihazı	26
4.3.4. Vektörel ağ analizörü (VNA)	26
4.3.5. Dalga kılavuzları (Wave Guides)	27
4.4. Yapılan analizler	27
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	29
5.1. X-Bandı Frekans Aralığında Yapılan Analizlerin Sonuçları	30
5.1.1. Pigment oranının absorpsiyon kapasitesine etkileri:	30
5.1.2. Boya kalınlığının absorpsiyon kapasitesine etkileri:	33
6. MALİYET ANALİZİ	35
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	37
KAYNAKLAR	39
EKLER	43

Sayfa

EK-1. Radar absorpsiyon ölçümlerinde kullanılmış olan vektörel ağ analizatörüne ait örnek ölçüm grafikleri	44
EK-2. Tezden çıkan yayınlar- 3rd International Congress on Scientific Advances	45
ÖZGEÇMİŞ	46



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Frekans aralıklarına göre radarların kullanım alanları	4
Çizelge 3.1. Literatür araştırması özet tablosu	20
Çizelge 5.1. Parametre özelliklerine göre numune adlandırılması	29
Çizelge 6.1. Malzemelerin katalog fiyatları	35
Çizelge 6.2. %55 BaTiO ₃ içeren boya numunesinin maliyeti	35



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Temel radar tespitiinin şematik diyagramı	4
Şekil 2.2. (a) B2 Bombardıman Uçağı (Northrop Spirit B2) (b) Lockheed F-117 Nighthawk	7
Şekil 2.3. ANKA-3	7
Şekil 2.4. Milli Muharip Uçak (KAAN)	8
Şekil 2.5. Yüzey şekillendirme ile radara yakalanmama	8
Şekil 2.6. (a) F-22 Raptor, (b) F-35 Lightning II and (c) Eurofighter Typhoon	9
Şekil 2.7. (a) US Navy Sea Shadow, (b) US Zumalt-class Destroyer, (c) La Fayette class French frigate, (d) Swedish Navy's Visby-class corvette	9
Şekil 2.8. RAM 'lerin elektromanyetik dalgalar ile etkileşimi	11
Şekil 5.1. Pigment oranın sabit 0,7 mm kalınlığında uygulanmasının X-Bandı absorpsiyon kapasitesine etkisi	30
Şekil 5.2. Pigment oranın sabit 1,00 mm kalınlığında uygulanmasının X-Bandı absorpsiyon kapasitesine etkisi	31
Şekil 5.3. Pigment oranın sabit 1,5 mm kalınlığında uygulanmasının X-Bandı absorpsiyon kapasitesine etkisi	32
Şekil 5.4. Pigment oranın sabit 2,0 mm kalınlığında uygulanmasının X-Bandı absorpsiyon kapasitesine etkisi	33
Şekil 5.5. %55 pigment içeren farklı boya kalınlıklarına göre X-Bandı absorpsiyon kapasiteleri	34

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Gamak marka AGM-80 karıştırıcı	25
Resim 4.2. Aplikatör ile zebra kartı	25
Resim 4.3. Kaplama kalınlığı ölçüm cihazı	26
Resim 4.4. KEYSIGHT Marka FieldFox Microwave Analyzer N9917B model VNA	27
Resim 4.5. X-Bandı dalga kılavuzu	27



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

m

Açıklamalar

Metre

dB

Desibel

Hz

Hertz

GHz

Gigahertz

mm

Milimetre

ϵ

Dielektrik Geçirgenlik

Q

Kalite Faktörü

μ

Manyetik Geçirgenlik

f

Rezonans Frekansı

Kısaltmalar

Açıklamalar

EDX

Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi

EM

Elektromanyetik

EMC

Elektromanyetik Uyumluluk

EMI

Elektromanyetik Girişim

EDX

Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi

FTIR

Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi

RAM

Radar Absorpsiyon Malzemesi

RKA

Radar Kesit Alanı

RPM

Dakikadaki Devir Sayısı

SEM

Taramalı Elektron Mikroskobu

TGA

Termogravimetrik Analiz

VNA

Vektörel Ağ Analizörü

VSM

Titreşimli Numune Manyetometresi

XRD

X-Işını Difraksiyon Spektroskopisi

1. GİRİŞ

Radar, nesnenin menzilini, yüksekliğini, yönünü veya hızını belirlemek için radyo dalgalarını kullanan bir nesne algılama ve tespit etme sistemidir. Yaygın olarak gözetleme ve takip, atış kontrol ve ufuk ötesi görüntüleme gibi askeri uygulamalarda, meteorolojide hava tahminlerinde, hız ölçümü, uçak ve gemi navigasyon sistemleri, otomotiv sanayi gibi endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır [1]. Radar sistemleri geliştikçe radara yakalanmayan malzemelere olan ihtiyaç da artmaktadır. Radar tarafından tespitini önlemek için şekillendirme, aktif önleme, pasif önleme ve radar absorpsiyon malzemeleri (RAM) gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır [2].

Bir nesnenin radar kesit alanı (RKA), radar sistemine yansıttığı elektromanyetik (EM) dalgaların miktarı veya bu nesnenin radardaki görünürlük düzeyini ifade eder. EM dalgaların radar tarafından geri yansıtılması ve saçılması, radar kesit alanının hesaplanmasının temelini oluşturur [3].

Radar absorpsiyon malzemeleri, radar cihazları tarafından gönderilen elektromanyetik dalgaların bir bölümünü absorbe ederek, malzemenin radar tarafından algılanma olasılığını azaltan malzemelerdir. Savunma sanayinde görünmezlik teknolojilerinin önem kazanmasıyla RAM'ların kullanımı da gün geçtikçe artmaktadır. Özellikle uçaklar, gemiler, insansız hava araçları ve tanklarda kullanılan yüzey kaplamaları sayesinde bu araçların radarda tespitini önlenmek veya tespit süresinin uzatılmasını sağlamak amaçlanmıştır. Çoğu nesne radyo dalgalarını yansıtır ve bu dalgalar radar sistemi tarafından algılanabilir. Radarda RAM ile malzemenin tespit edilememesi veya tamamen görünmez kılınması mümkün değildir. Ancak malzemenin radar kesit alanı küçültülerek tespit edilmesinin zorlaştırılması veya radar tarafından algılanma süresinin uzatılması mümkündür. Farklı türde malzemeler, radar absorpsiyonu için kullanılabilir. Karbon, metal ve metal parçacıkları, iletken polimerler, polipiroler, polianilinler ve filamentler radar absorpsiyon malzemeleri olarak kullanılan bazı bileşikler arasında yer almaktadır [4].

Literatürde yapılan çalışmalarda genellikle iz düşürücü malzeme olarak ferromanyetik malzemeler kullanıldığı tespit edilmiştir. Bu çalışmada ise yüzey kaplama malzemesinin sıcaklık dayanımını artıran ve geniş bant aralığında düşük görünürlük sağlayan boya

üretimi amaçlanmıştır. İz düşürücü boyada pigment olarak mekanik ve kimyasal özellikleri bakımından kararlı olan ve yüksek dielektrik özelliğine sahip olan baryum titanat (BaTiO_3) kullanılmıştır. Bu malzemenin daha önce iz düşürücü boya ile ilgili yapılan çalışmalarda kullanılmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca malzemenin sıcaklık dayanımının artırması amacıyla boya sentezinde silikon esaslı bağlayıcı kullanılmıştır.

Radar absorpsiyon kapasitesi boya kalınlığı, pigment-bağlayıcı oranı gibi parametrelerle değişiklik göstermektedir. Yapılacak çalışmada hem kaplama kalınlığının absorpsiyon kapasitesi üzerine etkileri hem de pigment-bağlayıcı oranının absorpsiyon kapasitesine etkileri incelenmiştir. Radar absorpsiyon kapasitesi ölçümü için dalga kılavuzu yöntemi kullanılmıştır. Kullanılan olan dalga kılavuzu X-Bandı frekans aralığında ölçüm yapmaktadır. 8,2-12,4 GHz frekans aralığında ölçüm yapılarak elde edilen iz düşürücü boyanın geniş bir frekans bandında absorpsiyon kapasitesine sahip olması amaçlanmıştır.

2. RADAR ABSORPSİYON MALZEMELERİ

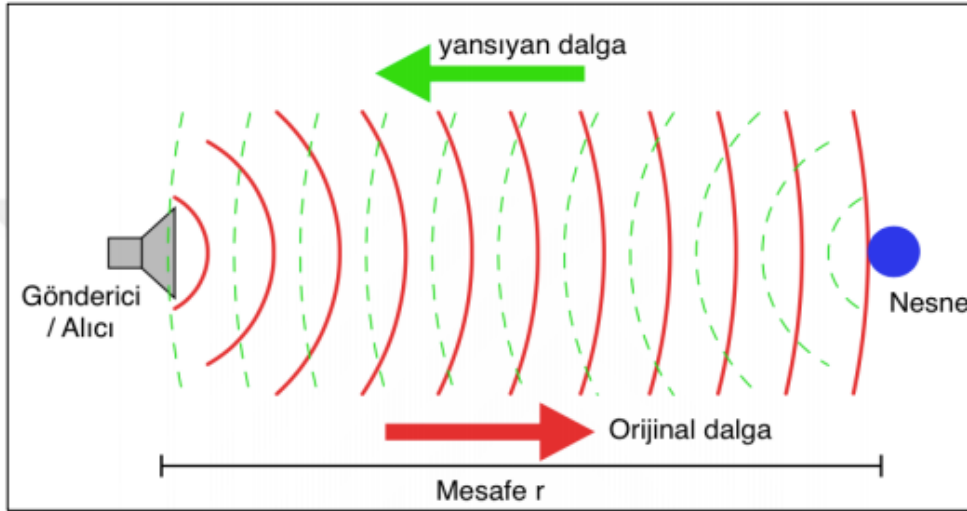
Bu bölümde radarlar, radar çalışma prensibi, radar sistemlerinin tarihçesi ve radara yakalanmama teknikleri ile ilgili kısa bilgiler verilecektir. Bunlara ek olarak radar absorpsiyon malzemeleri, kullanım alanları ve radar absorpsiyonu ölçüm metotlarından bahsedilecektir. Son olarak sentezi yapılan madde ile ilgili bilgiler verilecektir.

2.1. Radar Nedir

Radar kelimesi; radyo ile tespit etme ve menzil tayini anlamına gelen “Radio Detection And Ranging” kelimelerinin kısaltmasıdır. Nesnenin menzilini, yüksekliğini, yönünü veya hızını belirlemek için radyo dalgalarını kullanan bir nesne algılama sistemidir Radara göre hedefin açısal konumu ve hedefin yönü, yansıyan dalga'nın alıcı antene geliş yönü baz alınarak bulunur [6].

Radar bir elektromanyetik dalga sistemi olup mesafe, irtifa, yönelim ve bir cismin hızını tespit etmekte, ayrıca hareketli bir cisme odaklanıp takibini de yapmaktadır. Şekil 2.1’de klasik bir radar tespit sistemi verilmiştir. Radar çalıştığı zaman görünür aralıktaki cisimlere kesik kesik elektromanyetik dalgalar gönderir. Bu dalgalar cisim üzerinden geri yansıyıp radara tekrar iletilir ve cisim tespit edilir [3].

Radar sistemlerine bağlı olarak kullanılan radyo dalgalarının frekans aralığı değişiklik gösterir. Anten boyutu dalga boyu ile orantılıdır, bu nedenle frekansla ters orantılıdır. Daha küçük bir anten kullanılabilmesi için, daha yüksek frekans ve daha kısa dalga boyları tercih edilmesi gerekir. Radar sisteminin menzili de frekans aralığına göre değişiklik göstermektedir [7].



Şekil 2.1. Temel radar tespitinin şematik diyagramı [3]

Radar sistemlerinde kullanılan frekans aralıkları ve bu aralıklara göre radar kullanım alanları Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Frekans aralıklarına göre radarların kullanım alanları [8]

Radar Bandı	Frekans Aralığı	Kullanım Alanı
W	40–300 GHz	Deneysel çalışmalar
Ka	27–40 GHz	Çok yüksek çözünürlüklü haritalama, havaalanı gözetim
K	18–27 GHz	Su buharı absorpsiyonu (meteoroloji uygulamaları)
Ku	12,4–18 GHz	Yüksek çözünürlüklü haritalama ve uydu altimetrisi
X	8–12,4 GHz	Kısa menzilli izleme, füze güdüm, haritalama, deniz radarı, havadan önleme
C	4–8 GHz	Uzun menzilli izleme, hava durumu
S	2–4 GHz	Orta menzilli gözetleme, terminal trafik kontrolü, uzun menzilli hava durumu
L	1–2 GHz	Uzun menzilli gözetleme, yol trafik kontrolü
UHF	300-1000 MHz	Uzun menzilli gözetleme, uzun menzilli balistik füze savunma radarları
VHF	50-330 MHz	Uzun menzilli gözetleme
HF	3-30 MHz	Telefon ve faks
MF	300-3000 KHz	AM radyo ve yön bulma
LF	30-300 KHz	Radyo dalgaları ile gözetleme
VLF	3-30 KHz	Navigasyon, ses dalgaları

Radar sistemlerinin geliştirilmeye başlaması İkinci Dünya Savaşına dayansa da 1886 yılında Heinrich Hertz, Maxwell'in teorilerini deneysel olarak test etmiş ve elektromanyetik ışımanın varlığını ve bunların boşlukta yayılabildiklerini kanıtlamıştır. Radyo dalgalarının ışık dalgaları ile benzer özelliklere sahip olduğunu tespit etmiştir. Hertz, metalik ve dielektrik cisimlerin radyo dalgalarını yansıtabileceğini göstermiştir [1,9].

Alman mühendis Hülsmeyer'in radar prensiplerinin temelini attığı kabul edilmektedir. Gemilerden yansıyan radyo dalgalarını tespit etmek için deneyler yapmıştır. 1904 yılında geliştirdiği ve "Telemobiloskop" olarak adlandırdığı cihaz için patent (Reichspatent Nr. 1655461) almıştır. Bu cihazı bir atlama aralığına sahip bir gönderici olarak tasarlamıştır. Çok kutuplu bir anten aracılığıyla belirli bir yöne radyo dalgalarını iletebilen bu aygıt, özellikle gemi gibi metalik bir engelle karşılaştığında dalgaların kısmen geri yansımaları sağlamıştır. Bu yansıyan dalgalar, göndericinin bulunduğu yerde çift kutuplu dipol alıcı antenler tarafından algılamış ve bir zil çalmak üzere tasarlanmış bir mekanizmayı tetiklemiştir. Sistem, yaklaşık bir milden daha uzun menziller elde etmek için yeterli olmamıştır [1, 10].

1922'de Deniz Araştırma Laboratuvarından A. H. Taylor ve L. C. Young alıcısı ve vericisi farklı antenlere sahip CW (Sürekli Dalga) girişim radarı (dalga boyu; 5m) kullanarak ahşap bir gemiyi tespit etmişlerdir [1].

1930'da dalga-parazit etkisi kullanılarak uçakların ilk tespiti Deniz Araştırma Laboratuvarı'nda (NRL) L. A. Hyland tarafından yapılmıştır. Hyland, bu tespiti yerdeki bir uçakta bulunan yön bulma aparatı ile çalışırken tesadüfen keşfetmiştir. 33 MHz frekansında çalışan bir vericinin yaydığı ışıktan uçak geçtiğinde sinyallerde artış gözlemlenmiştir. Böylece ilk kez bir uçak elektromanyetik dalga girişiminden tespit edilmiştir. Bunun üzerine çalışmalarına devam ederek 50 mil kadar uzakta bulunan uçakların tespit edilebilirliğini kanıtlamıştır [1].

I. Dünya Savaşı sırasında, radarın öncüsü niteliğinde birçok teknolojik gelişme yaşanmıştır. Özellikle, uçak ve deniz araçlarının tespit edilebilmesi için kullanılan radar sistemleri geliştirilmiştir.

Radar sistemlerinin hızlı bir şekilde gelişmesi II. Dünya Savaşı zamanında olmuştur. İngiltere'nin "Chain Home" radar sistemi, savaşın seyrini değiştiren önemli bir etken olmuştur. Kurulan bu sistem sayesinde radar teknolojisi büyük ölçüde gelişmeler yaşamıştır ve farklı frekansta çalışabilen radar sistemleri geliştirilmiştir [11].

Savaş sonrası dönemde radar sistemleri sadece askeri uygulamalarda değil sivil uygulamalarda da kullanılmaya başlanmıştır. Hava trafik kontrolü, hava savunma sistemleri, meteoroloji ve uzaktan algılama gibi birçok alanda radar sistemleri kullanılmış ve geliştirilmiştir. Günümüzde, radar teknolojisi sürekli olarak gelişmektedir. Radar sistemleri yüksek çözünürlüklü radarlar, hava ve uzay araştırmaları, otomatik sürüş sistemleri ve bir dizi diğer uygulama için kullanılmaktadır.

2.2. Radar Sistemlerine Yakalanmama Teknikleri

Radar sistemlerindeki gelişmeler sebebiyle özellikle askeri uygulamalarda radar soğurma sistemlerinin geliştirilmesi de önem kazanmıştır. Radar sisteminden hedefe yansıyan sinyalin, hedeften geri yansıyan sinyale oranı radar kesit alanı olarak tanımlanır. Radar kesit alanı azaltılarak nesnelerin radara yakalanması engellenir veya yakalanma süresi uzatılır. RKA değeri ne kadar küçükse, nesnenin tespit edilme olasılığı da o kadar azalmaktadır. Radar kesit alanı, hedefin geometrik yapısı, kullanılan malzeme, radarın yönü, saçılan sinyalin polarizasyonu ve sinyal frekansına bağlı olarak değişiklik gösterir.

Radara yakalanmayan uçakların boyutları normal uçakların boyutlarından çok da küçük olmadığı için bu teknolojilerdeki uçakların radar sistemlerine geri yansıttığı sinyallerin azaltılması amaçlanmıştır. Görünmezlik teknolojisi genellikle savaş uçakları, bombardıman uçakları ve keşif uçakları gibi askeri hava araçlarında kullanılır. Bu uçaklar, düşman hava savunma sistemlerinden kaçınmak veya etkili bir saldırı gerçekleştirmek için tasarlanmıştır [7].

Uçağın tasarımındaki şekil ve kontur, radar kesitini önemli ölçüde etkiler. Genel olarak, içbükey bir yüzey, radar dalgalarını genel yönünde geri yansıtma eğilimindedir, bu durum da gizli bir uçak (hayalet uçak) için istenmeyen bir özelliktir. İçbükey yüzeylere motor girişleri, kanatların gövdeyle birleştiği dik açılar, açık bomba bölmeleri ve hatta radyo

dalgalarını geçirgen camlara sahipse kokpit bölmesi örnek olarak verilebilir. Diğer taraftan, dışbükey yüzeyler radar dalgalarını birbirinden farklı yönlerde dağıtarak kaynağa geri yansıyan sinyal miktarını azaltır, bu da uçağın daha az tespit edilmesine katkıda bulunur [7]. Amerika Birleşik Devletleri'nin ürettiği hayalet uçak Northrop Spirit B2 (Resim 2.2.a) dış bükey yüzeylere sahiptir. Lockheed F-117 Nighthawk (Resim 2.2.b) hayalet uçağı da yaygın olarak kullanılan düşük görünürlük özelliğine sahip uçaklardandır.



Şekil 2.2. (a) B2 Bombardıman Uçağı (Northrop Spirit B2) (b) Lockheed F-117 Nighthawk

Ülkemizde geliştirilen uçan kanat tasarımına ve görünmezlik özelliğine sahip insansız hava aracı ANKA-3 Şekil 2.3'de, geliştirilmekte olan Milli Muharip Uçak (KAAN) Şekil 2.4'de verilmiştir.



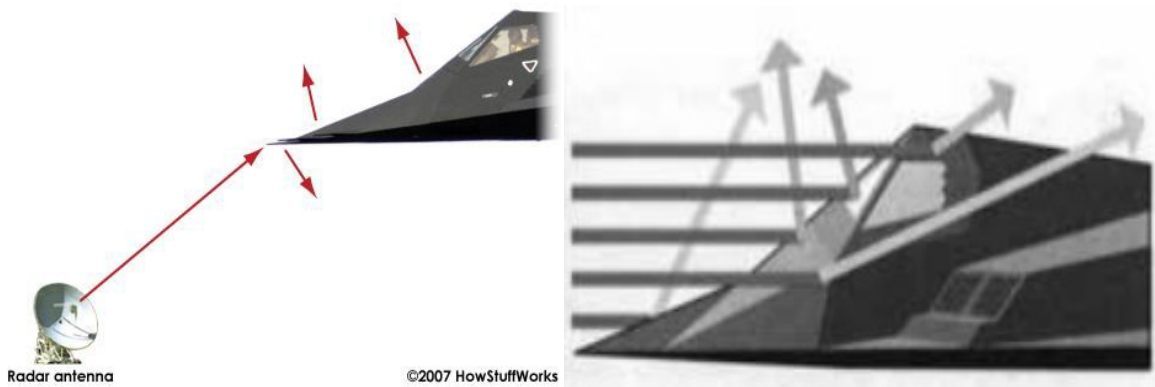
Şekil 2.3. ANKA-3



Şekil 2.4. Milli Muharip Uçak (KAAN)

2.2.1. Yüzey şekillendirme ile radara yakalanmama

Yüzey şekillendirme yüzey profillerinin tasarımının veya dış yüzey özelliklerinin değiştirilmesi ile sağlanır. Böylece radar tarafından gönderilen sinyaller geri yansımayacak veya etrafa saçılacaktır (Şekil 2.5). RKA'yı kontrol etmek için en etkili yöntemlerden biridir. Ancak belirli tasarım sınırlamaları nedeniyle, yüzey şekillendirme yoluyla tam olarak radar kesit alanı kontrolü sağlamak mümkün değildir. Çünkü yüzey şekilleri değiştirilen uçakların aerodinamik yapıları bozulabilir ve bu da manevra kabiliyetinin azalmasına yol açabilir. Lockheed F-117 hayalet uçağına ve Northrop Spirit B2 bombardıman uçağına ağırlıklı olarak yüzey şekillendirme metodu ile görünmezlik özelliği kazandırılmıştır [2, 12].



Şekil 2.5. Yüzey şekillendirme ile radara yakalanmama [13]

F-22 Raptor, F-35 Lightning II and Eurofighter Typhoon (Şekil 2.6) gibi savaş uçaklarında yüzey şekillendirme metodu kullanılarak radar kesit alanı azaltılmıştır.



Şekil 2.6. (a) F-22 Raptor, (b) F-35 Lightning II and (c) Eurofighter Typhoon

Yüzey şekillendirme metodu sadece uçaklarda değil US Navy Sea Shadow, US Zumalt-class Destroyer, La Fayette class French frigate ve Swedish Navy's Visby-class corvette gibi (Şekil 2.7) savaş gemilerinde de uygulanmıştır.



Şekil 2.7. (a) US Navy Sea Shadow, (b) US Zumalt-class Destroyer, (c) La Fayette class French frigate, (d) Swedish Navy's Visby-class corvette

2.2.2. Radar soğurucu malzemeler ile radara yakalanmama

Bu yöntem radar cihazlarından gönderilen sinyalleri soğurarak nesnenin radarda tespit edilebilirliğini zorlaştırmaktadır. Radar soğurucu malzemeler kullanılarak nesnenin radar kesit alanı azaltılmaktadır. Ferromanyetik malzemeler, kompozit malzemeler yaygın olarak radar soğurucu olarak kullanılmaktadır.

2.2.3. Aktif önleme ile radara yakalanmama

Aktif önleme metoduna göre, hedef, yoğunluk bakımından eşit ancak radardan gelen yansımayla zıt fazda bir radar sinyali üretir. Bu sayede, radar tarafından gönderilen sinyalin yansıması taklit edilmiş olur ve bu şekilde radar hiçbir geri bildirim almaz. Hedefin varlığını çok düşük güç kullanarak gizlemesi avantajlıdır. Ancak, düşük frekansta uygulaması zor olduğu için bu metot ile ilgili araştırmalar halen devam etmektedir [14].

2.2.4. Pasif Önleme ile radara yakalanmama

Pasif önleme yöntemi ile asıl hedefteki yansımayı önlemek amacıyla ikinci bir dağıtıcı kullanarak radar saçılma yüzeyini azaltmak amaçlanır. Pasif önlemede empedans yükleme tekniği kullanılır. Radarda algılanacak nesnenin üzerinde bulunan saçıcı bölüme yüklenmiş gövde, çıplak hedefe ise yüklü olmayan gövde denir. Bu yöntem sadece dar frekans bandında etkilidir. Savunma sanayinde ve askeri uygulamalarda birçok dalga boyu ve enerji kaynağı bulunmaktadır bu sebeple her enerji kaynağına farklı pasif önleme yöntemi kullanmak pratik bir yöntem değildir [12,14].

2.3. Radar Absorpsiyon Malzemeleri (RAM)

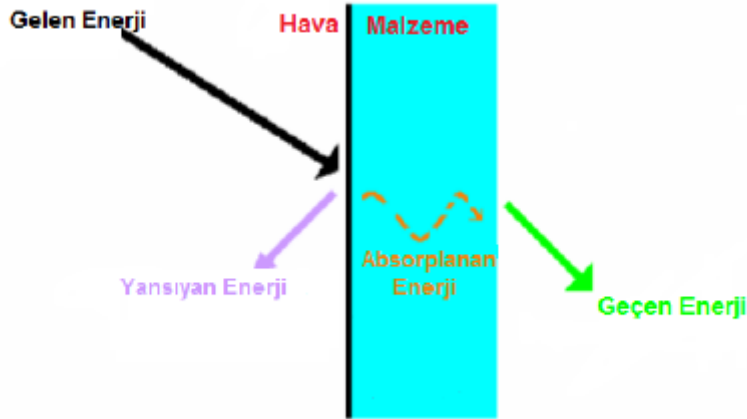
Radar Absorpsiyon Malzemeleri (RAM), radar cihazlarından gönderilen elektromanyetik dalgaların bir kısmını soğurarak malzemenin radar tarafından tespit edilebilirliğini zorlaştıran malzemelerdir [5].

Radar absorpsiyon malzemeleri; yüksek frekans (GHz) aralığında mikrodalga radyasyonuna sahip sistemlerde, askeri amaçlı kullanılan; hava, deniz ve kara araçları

yüzey kaplamalarında, elektromanyetik girişim kirliliğini azaltma çalışmalarında, cep telefonları gibi kablosuz iletişim cihazlarında, mikrodalga fırınların koruyucu tabakalarında, elektromanyetik uyumluluk (EMC) testleri için gereken yankısız oda uygulamalarında kullanılmaktadır [15].

Bir malzemenin iyi bir radar absorpsiyon malzemesi olarak adlandırılabilmesi için gereken en önemli özellik geniş bir frekans aralığında yüksek absorpsiyon özelliği göstermesidir. Hava araçlarında taşınabilir yük çok önemli bir etken olduğu için kullanılan malzemenin hafif ve ince olması da önemli bir parametredir. Bunların dışında yüksek sıcaklık dayanımı da aranılan özelliklerdendir. Çünkü obüs gibi kara araçlarında namlularda veya hava araçlarında egzozdan gaz çıkışı olduğunda o bölgeye uygulanan kaplamaların sıcaklık dayanımı sağlaması beklenmektedir. Kaplama yapılacak malzemenin kolay uygulanabilir olması da bir diğer etkidir.

Elektromanyetik özelliklere bağlı olarak, malzeme elektromanyetik radyasyonun absorbanı veya yansıtıcısı olarak kullanılabilir. Şekil 2.8. 'de absorban olarak kullanılan radar absorpsiyon malzemesinin gelen enerji ile etkileşimi verilmiştir [16,17].



Şekil 2.8. RAM 'lerin elektromanyetik dalgalar ile etkileşimi [17]

RAM'ların uygulama şekilleri aşağıdaki gibidir;

- Karbon, metal, cam elyaftan yapılmış iletken fiberler,
- Kaplama yapılmış iletken malzemeler,
- İletken boya veya mürekkep içeren spreiler,
- Boyanmış veya emici mürekkep/boya nüfuz ettirilmiş küçük hücreler içeren köpükler,
- İnce tanecikli ferromanyetik veya ferritik partikül içeren manyetik radar absorplayıcı malzemeler [26].

2.4. RAM Ölçüm Teknikleri

Malzemelerin elektromanyetik dalga ile etkileşimini karakterize eden kompleks dielektrik (ϵ) ve manyetik (μ) geçirgenlik gibi fiziksel parametreleri aşağıdaki metotlar ile belirlenebilir.

RAM ölçüm teknikleri koaksiyel prob tekniği, iletim hattı tekniği, serbest ortam yansıma tekniği ve rezonans kavite tekniği radar absorpsiyonu ölçüm teknikleridir.

2.4.1. Koaksiyel prob tekniği

Koaksiyel prob tekniği, sıvı ve yarı katı malzemeler için en etkili ölçüm yöntemidir. Bu yöntem, katı malzemeler için düzgün bir yüzey gerektirir. Test numunesi ve prob arasında oluşabilecek hava boşluklarını önlemek önemlidir. Bu teknik, sadece S11 parametresinin ölçüldüğü için dielektrik özelliklerin hesaplanabilmesine olanak tanır ve test numunesinin manyetik olmaması gerekir. Bu basit, pratik ve hasarsız yöntem, 50 GHz frekansına kadar ölçüm yapabilme yeteneği sunar [18].

2.4.2. İletim hattı tekniği

İletim hattı yöntemi, genellikle dikdörtgen dalga kılavuzu veya koaksiyel hat içine yerleştirilmiş malzemeyi ölçer. İletim hattı yönteminde koaksiyel veya dalga kılavuzları aracılığıyla geniş frekans aralığında (0,100-110 GHz) kullanılabilme, katı malzemelerde iyi çözünürlük sağlama ve manyetik malzemelerde ölçüm yapılabilme gibi avantajları

vardır. Ancak hassas malzeme şekilleri gereklidir ve düşük frekanslar için büyük, yüksek frekanslar için küçük numunelere ihtiyaç vardır [18].

2.4.3. Serbest ortam yansıma tekniğinde

Serbest ortam yansıma tekniğinde, slab veya levha halindeki malzeme boyunca mikrodalgaları odaklayan antenler kullanılır. Bu metot temassızdır ve yüksek sıcaklıktaki veya özel ortam koşullarındaki malzemeleri test etmek amacıyla uygundur [18].

2.4.4. Rezonans kavite tekniği

Vektörel network analizörü, karşılıklı iki anten, uygun serbest alan numune tutucusu ve dielektrik ile manyetik özellikleri hesaplayan bir yazılımdan oluşur. Rezonans kaviteleri, belirli frekansta yüksek kalite faktörü (Q) ile rezonans üreten yapılardır. Numune kavite fikstürüne yerleştirildiğinde rezonans frekansı (f) ve kavite kalite faktörü (Q) tarafından etkilenir. Bu parametrelerden, malzemelerin kompleks permitivitelere (dielektrik sabitleri) belirli bir frekansta hesaplanır [18].

2.5. Boya Hakkında Genel Bilgi

Boya, uygulandığı cisimlerin yüzeyini koruyan, cisme dekoratif bir görünüm kazandıran genellikle sıvı veya toz formda olan kaplama malzemesidir. Boyalar içerdikleri malzemeler açısından 4 ana gruba ayrılabilir; bağlayıcılar, çözücüler, pigment ve dolgu maddeleri ile katkı maddeleridir.

2.5.1. Bağlayıcılar

Boyanın temel bileşenlerinden biri olan bağlayıcılar; kuruma biçimi ve süresi, boya içerisinde bulunan diğer katmanlarla uyumu, boyanın dayanıklılığı ve parlaklık derecesi, uygulama kolaylığı ve uygulandığı yüzeydeki davranışı gibi boyanın bütün temel özelliklerini ve niteliğini belirleyen maddelerdir. Polyester reçineler, alkid reçineler, selülozik reçineler, epoksi reçineler, poliüretan reçineler, vinil reçineler ve akrilik reçineler boya üretiminde kullanılan bağlayıcı türlerine örnek olarak verilebilir [27].

2.5.2. Çözücüler

Boyada kullanılan reçine türünün akışkan yapıda olmasını çözücüler sağlamaktadır. Boyanın yüzeye yapışması, yüzey pürüzlülüğü, yüzey parlaklığı, boyanın kuruma süresi gibi boya ile ilgili dikkat edilmesi gereken özellikleri seçilen çözücü türü etkilemektedir. Boyada kullanılacak çözücü çeşidi ile bağlayıcı çeşidinin benzer yapıda olması gerekmektedir [28].

2.5.3. Pigment ve dolgu maddeleri

Pigmentler boyaya renk, örtücülük özelliği ve kimyasal dayanım özelliği sağlaması için kullanılan malzemelerdir. Boyada kullanılan pigment cinsine göre radyasyonu absorbe edebilir veya metal yüzeyi pasifleştirerek korozyon direncini artırabilir. Dolgu malzemeleri ise boya maliyetini düşürmek amacıyla kullanılan malzemelerdir. Kalsit, talk, titanyum dioksit ve barit kullanılmakta olan dolgu malzemelerine örnek olarak verilebilir [27, 28].

2.5.4. Katkı maddeleri

Katkı maddeleri ile boyaların depolanması kolaylaştırılır, boyaların fiziksel ve kimyasal özellikleri güçlendirilir. Sürfaktanlar, kurutucular, matlaştırıcılar, çökme önleyiciler, UV ışınlarından koruyucular boya üretiminde kullanılan katkı maddelerinden bazılarıdır [29].

2.6. Baryum Titanat (BaTiO_3) Hakkında Genel Bilgi

Baryum titanat, mükemmel dielektrik, ferroelektrik ve piezoelektrik özellikleri nedeniyle çeşitli uygulamalar için iyi bir aday olan ilk ferroelektrik seramiklerden biridir. Baryum titanat, genel formülü ABO_3 olan rengi beyazdan griye değişen perovskit ailesine bağlı inorganik bir bileşiktir.

Baryum titanat kimyasal ve mekanik olarak stabildir ve yüksek dielektrik sabitine sahip olması nedeniyle geniş kapsamda çalışılan en önemli ferroelektrik malzemelerden biridir. Ayrıca ferroelektrik özelliğini oda sıcaklığında ve üzerinde koruyabilir. TiO_2 alaşımlarının sağladığı yüksek dayanım, sertlik, tokluk, düşük yoğunluk ve iyi bir korozyon direnci gibi

özellikler, uzay ve havacılık endüstrisinde ve diğer yüksek performans uygulamalarında büyük ağırlık tasarruflarının yapılmasına olanak sağlamaktadır [30, 31].

Baryum titanat toz veya kristal formda bulunabilir. Katı baryum titanatın kristal yapısı sıcaklık ile değişim göstermektedir. Baryum titanat düşük sıcaklıktan yüksek sıcaklığa doğru rhombohedral yapıda, ortorombik yapıda, tetragonal yapıda, kübik yapıda ve hekzagonal yapıda bulunabilir [32].





3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde iz düşürücü malzemeler ile ilgili yapılan çalışmalar incelenmiştir ve özet halinde sunulmuştur. Ayrıca elde edilen bilgilerden literatür tablosu oluşturulmuştur.

Asadinia ve arkadaşları katı hal reaksiyonu metodunu kullanarak farklı Zn-Mn ($x=0,5$; $x=1$ ve $x=1,5$) oranlarında U-tipi hekzaferrit seramik tozu ($Ba_4Zn_{2-x}Mn_xFe_{36}O_{60}$) sentezlemişlerdir. Sentezlenen pigmentin radar absorpsiyon kapasitesini ve korozyon direncini artırmak amacıyla poliüretan bağlayıcı kullanmışlardır. Elde edilen pigmentin kristal yapısını ve yüzey morfolojisini inceleyebilmek amacıyla XRD ve SEM analizlerini yapmışlardır. Radar absorpsiyon kapasitesini ölçmek amacıyla X-Bandı frekansında VNA metodunu kullanmışlardır. Pigment: bağlayıcı oranı (1:1) ve boya kalınlığı (1,5 mm) sabit tutulmuştur. En yüksek absorpsiyon kapasitesi Zn-Mn ($x=1$) iken 9,82 GHz 'de -16,10 dB olarak ölçülmüştür [19].

Aisiyah ve arkadaşları birlikte çöktürme metodu ile Baryum M-hekzaferrit ($BaFe_{11.7}Zn_{0.3}O_{19}$) sentezlemişlerdir. XRD analizi, VSM analizi ve iletkenlik ölçümü yapmışlardır. Yapılan XRD analizi sonucunda sentezlenen pigmentin iki fazdan (Baryum M-hekzaferrit fazı ve hematit fazı) oluştuğu sonucuna ulaşmışlardır. Elde edilen RAM 4 mm kalınlığında AH36 çelik levha üzerine uygulanmıştır. Radar absorpsiyon kapasitesi X-Bandı frekans aralığında VNA metodu ile 9,34 GHz 'de -29,10 dB olarak ölçülmüştür [20].

Padhy ve arkadaşları radar absorpsiyon malzemesi olarak U-tipi hekzaferrit ($Ba_4(Co_{1-5x}P_{2x})Fe_{36}O_{60}$), ($x=0,05$) pigment ve poliimid bağlayıcı kullanmışlardır. Pigment sentezini katı hal reaksiyonu yöntemi ile gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında radar absorpsiyon kapasitesini ölçmek amacıyla 30 mm çapında topçu mermisine farklı kalınlıklarda (1,43 mm ve 1,83 mm) iz düşürücü boya uygulaması yapmışlardır. En uygun radar absorpsiyon kapasitesi 1,83 mm kalınlıkta X-bandı frekansında 7-10 GHz frekans aralığında 17 dB olarak tespit edilmiştir [21].

Padhy ve arkadaşları askeri görünmezlik uygulamalarında kullanmak ve elektromanyetik girişimi (EMI) azaltmak amacıyla U-tipi hekzaferrit ($Ba_4Mg_{2-x}Mn_xFe_{36}O_{60}$), ($0 \leq x \leq 2$)

pigment ve poliimid bağlayıcı kullanarak radar absorpsiyon malzemesi elde etmişlerdir. Bağlayıcı olarak poliimid kullanılmasıdaki başlıca etkenler; yüksek termal kararlılık göstermesi, yüksek aşınma direnci sağlaması ve iyi yapışkanlık özellikleri göstermesidir. RAM uygulamalarında en uygun kırılmayı $x=0,5$ iken, X-Bandı frekans aralığında 8-10 GHz 'de -43 dB olarak tespit etmişlerdir [22].

Aktaş ve arkadaşları demir esaslı pigment kullanarak bağlayıcı türünün ve boya kalınlığının radar absorpsiyonuna etkilerini ve kullanılan bağlayıcıların sıcaklık dayanımını incelemişlerdir. Boya üretiminde pigment bağlayıcı oranı %70 - %30 oranında sabit tutulmuştur. Radar absorpsiyon kapasitesi ölçümlerinde ise boya kalınlığı 2 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Sonuç olarak epoksi bağlayıcının yüksek sıcaklık için uygun olmadığı, silikon bazlı bağlayıcının 570° C'a kadar özelliklerini koruduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca dalga kılavuzu yöntemi ile RAM kapasitesini 18-40 GHz frekans aralığında -16 dB olarak tespit etmişlerdir [5].

Qiang ve arkadaşları sol-jel yöntemi ile NiCoTi ferrit ve sert SrCoTi ferrit olmak üzere iki tip ferrit sentezlemişlerdir. Sentezlenen iki farklı ferrit türüne mikro-bakır parçacıkları ilave edilerek ve pirolün kimyasal polimerizasyonu ile pigmentler polipirol ile kaplanmıştır. Yapılan çalışmada farklı derişimlerde ferrit ve mikro-bakır/polipirol pigment sentezi yapmışlardır. Elde edilen pigmentler poliüretan bağlayıcı ile boya formuna getirilmiştir. XRD ve FTIR analizleri ile malzemenin yapısını, SEM analizi ile malzemenin morfolojik yapısını, VSM ile manyetik histerezis döngülerini, VNA ile absorpsiyon kapasitesini incelemişlerdir. Optimum absorpsiyon kapasitesini %10 mikro-bakır ilavesi yapılan numunede X-Bandı frekans aralığında -24 dB olarak ölçmüşlerdir [23].

Widyastuti ve arkadaşları manyetik malzeme olan Baryum M-Hekzaferrit (BaM) ile iletken malzeme olan polyaniline (PANI) sentezlemişlerdir. BaM katı hal metodu ile PANI ise polimerizasyon yöntemi ile sentezlenmiştir. Elde edilen malzemelerin karakterizasyonu için XRD, SEM, FTIR analizlerini yapmışlardır. Radar absorpsiyon kapasitesi ise VNA ile ölçülmüştür. Pigment olarak kullanılacak malzemede BaM/ PANI oranı 1/ 2,5'ta sabit tutulmuştur. İz düşürücü olarak kullanılacak kaplama malzemesinde bağlayıcı olarak epoksi kullanmışlardır. Bağlayıcı/pigment oranı değiştirilerek farklı numuneler elde etmişlerdir. Boya AL-2024 plakalar üzerine püskürtme tabancası ile çift katman ve tek

katman olmak koşuluyla farklı kalınlıklarda uygulanmıştır. En yüksek radar absorpsiyon kapasitesi çift katman uygulanan %15'lik numunede 9,022 GHz 'de -27,153 dB olarak ölçülmüştür [24].

Pan ve arkadaşları yaptıkları çalışmada manyetik partiküller; küresel karbonil demir (SCI) ve yassı karbonil demir (FCI) ile poliüretan matrisli bağlayıcı kullanarak radar absorpsiyon malzemesi sentezlemeyi amaçlamışlardır. Farklı derişimlerde SCI/FCI/PU oranları ile manyetik partiküllerin radar absorpsiyonuna etkisi incelemişlerdir. Sentezlenen kaplama malzemesi radar kapasitesine ölçmek amacıyla 1,5 mm kalınlığında tek katmanlı ve çift katmanlı şekilde alüminyum levhalara uygulanmıştır. Radar ölçümleri VNA ile 2-18 GHz aralığında yapılmıştır. En optimal sonucu -35 dB olarak ölçmüşlerdir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda SCI/FCI/PU ile yapılan kaplamaların, askeri ve sivil uygulamalarda iz düşürücü malzeme olarak kullanılabileceğini tespit etmişlerdir [25].

Çizelge 3.1. Literatür araştırması özet tablosu

Çalışma Grubu	Pigment Sentez Yöntemi	Kullanılan İz Düşürücü Malzeme ve Oranları	Yapılan Karakterizasyonlar	Sonuçlar
Asadinia ve arkadaşları [19] (2020)	Katı Hal Reaksiyonu	U-tipi Hekzaferrit ($\text{Ba}_4\text{Zn}_{2-x}\text{Mn}_x\text{Fe}_{36}\text{O}_{60}$), $[x=0,5, 1, 1,5]$ Poliüretan bağlayıcı, P: B = 1:1 Boya Kalınlığı: 1,5 mm	XRD, SEM, VNA, İletkenlik Ölçümü	Radar absorpsiyon performansı ise VNA ile X-bandı frekansında 8,2-12,4 GHz frekans aralığında ölçülmüştür. En uygun sonucu 9,82 GHz'de -16,10 dB olarak tespit etmişlerdir.
Aisiyah ve arkadaşları [20] (2019)	Birlikte Çöktürme	Baryum M-hekzaferrit ($\text{BaFe}_{11,7}\text{Zn}_{0,3}\text{O}_{19}$), Hematit, P: B = Ağırlıkça %10: 90 Boya Kalınlığı: 4 mm	XRD, VNA, VSM, İletkenlik Ölçümü	Radar absorpsiyon kapasitesini X-bandı frekansında aralığında 9,34 GHz 'de -29,10 dB olarak tespit etmişlerdir.
Padhy ve arkadaşları [21] (2013)	Katı Hal Reaksiyonu	U-tipi hekzaferrit ($\text{Ba}_4(\text{Co}_{1-5x}\text{P}_{2x})\text{Fe}_{36}\text{O}_{60}$), $[x=0,05]$ Poliimid Bağlayıcı, P: B = 1:1 Boya Kalınlığı: 1,43 mm ve 1,83 mm	XRD, VNA	En uygun radar absorpsiyon kapasitesini 1,83 mm kalınlıkta X-bandı frekansında 7-10 GHz frekans aralığında 17 dB olarak tespit etmişlerdir.
Padhy ve arkadaşları [22] (2013)	Katı Hal Reaksiyonu	U-tipi hekzaferrit ($\text{Ba}_4\text{Mg}_{2-x}\text{Mn}_x\text{Fe}_{36}\text{O}_{60}$), $(0 \leq x \leq 2)$ Poliimid Bağlayıcı P:B = 1:1 Boya Kalınlığı: 1,7 mm	XRD, VNA,	Poliimid çözeltisinin, yüksek termal kararlılık, yüksek aşınma direnci ve iyi yapışkanlık özellikleri göstermesi sebebiyle bağlayıcı olarak kullanılmasına karar verilmiştir. RAM uygulamalarında en uygun kırılmayı $x=0,5$ iken, X-Bandı frekansında 8-10 GHz frekans aralığında -43 Db olarak tespit etmişlerdir.

Çizelge 3.1. (devam) Literatür araştırması özet tablosu

Çalışma Grubu	Pigment Sentez Yöntemi	Kullanılan RAM ve Oranları	Yapılan Karakterizasyonlar	Sonuçlar
Aktaş ve arkadaşları [5] (2016)	Katı Hal Reaksiyonu	Demir Esaslı Pigment, Epoksi Bağlayıcı, Silikon Bağlayıcı, Yağlı Alkit Bağlayıcı P:B = Ağırlıkça %70:30 Boya Kalınlığı: 2 mm	TGA, Mikrodalga Analiz, İletkenlik Ölçümü	Malzemenin sıcaklık dayanımını Curie sıcaklığını ölçerek test etmişlerdir. Dalga kılavuzu yöntemi ile RAM kapasitesini 18-40 GHz frekans aralığında -16 dB olarak tespit etmişlerdir.
Qiang ve arkadaşları [23] (2020)	Sol-jel	NiCoTi Ferrit & SrCoTi Ferrit, Mikro-Bakır, Polipirol, Poliüretan Bağlayıcı	XRD, FTIR, SEM, VSM, VNA	En yüksek absorpsiyon kapasitesini %10 mikro-bakır ilavesi yapılan numunede 8-12 GHz frekans aralığında -24 dB olarak ölçmüşlerdir.
Widyastuti ve arkadaşları [24] (2018)	Katı Hal Reaksiyonu, Polimerizasyon	BaM, PANI, Epoksi BaM: PANI = 1:2,5 P:B = %0, %5, %10, %15	XRD, FTIR, SEM EDX, VSM,	En yüksek radar absorpsiyon kapasitesi çift katman uygulanan %15'lik numunede 9,022 GHz 'de -27,153 dB olarak ölçmüşlerdir.
Pan ve arkadaşları [25] (2019)	-	Küresel Karbonil Demir (SCI), Yassı Karbonil demir (FCI) Poliüretan Bağlayıcı Boya Kalınlığı: 1,5 mm	XRD, SEM	2-18 GHz frekans aralığında yapılan radar absorpsiyon kapasitesi ölçümleri -35 dB olarak tespit edilmiştir.



4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde yapılan çalışmada kullanılan hammaddeler, boya sentezi ve yapılan analizler anlatılmıştır.

4.1. Kullanılan Hammaddeler

İz düşürücü boya sentezinde pigment olarak Nanografi marka %99,95 saflıkta ve partikül boyutu 370 nm olan BaTiO_3 , Wacker marka silikon esaslı reçine Silres KX, Riedel-de Haen marka Ksilen ve BYK marka DISPERBYK-108 dispersiyon ajanı kullanılmıştır.

4.2. Pigmenti Boya Haline Getirme

İz düşürücü olarak kullanılması amaçlanan pigment (BaTiO_3) toz formda olduğundan absorpsiyon kapasitesi ölçümü yapılabilmesi için pigmentin boya haline getirilmesi gerekmektedir. Boya içerisine farklı türde katkı malzemeleri eklenmesi safsızlıkları artıracığı için boya katkı malzemeleri minimum düzeyde tutulmuştur. Radar absorpsiyon kapasitesini etkileyen en önemli parametreler pigment/bağlayıcı oranı ve boya kalınlığıdır. Tez çalışmasında pigment/bağlayıcı oranı %70 pigment- %30 bağlayıcı, %55 pigment- %45 bağlayıcı ve %40 pigment- %60 bağlayıcı olacak şekilde belirlenmiştir. Uygulanan boya kalınlıkları ise; 0,7 mm, 1,0 mm, 1,5 mm ve 2,0 mm şeklindedir.

Pigmenti boya haline getirme aşamaları aşağıdaki gibidir;

- i. Belli bir çapa ve yüksekliğe sahip olan bir kap içerisine %70 pigment BaTiO_3 ve %30 Silres KX eklenmiştir.
- ii. Pigment-bağlayıcı karışımı 60 dk boyunca 3000 RPM’de karıştırma ve ezme işlemine tabi tutulmuştur.
- iii. BaTiO_3 ve Silres KX’in ezilme işleminin bitmesinin ardından ksilen ve dispersiyon ajanı eklenmiştir. Karıştırıcı hızı yarıya düşürülerek (1500 RPM) karıştırma işlemine 15 dk daha devam edilmiştir. Karıştırılma hızının düşürülmesinin sebebi boyanın ısınarak bağlayıcıya zarar vermesini engellemektir.
- iv. 15 dk sonunda elde edilen boyanın örtücülüğü aplikatör ve zebra kartı kullanılarak test edilmiştir. Yapılan test sonucunda ezme işleminin tam gerçekleşmediği tespit

edilmiştir. Bu sebeple 1800 RPM’de 25 dk boyunca karıştırma işlemine devam edilmiştir.

- v. Boya homojen hale geldikten sonra karıştırıcı kapatılmıştır ve tekrar örtücülük testi yapılmıştır. Boyanın homojen olması uygulama açısından önemli bir parametredir. Homojen olarak dağılmayan pigment radar absorpsiyon kapasitesi ölçümleri esnasında tutarlı sonuçlar vermeyecektir. Pigmentin yoğun olarak bulunduğu bölgelerde absorpsiyon miktarı yüksek, yoğunluğun az olduğu bölgelerde ise absorpsiyon miktarı düşük çıkacaktır.
- vi. Aynı işlemler %55 BaTiO₃ – %45 Silres KX+ Ksilen+ DISPERBYK108 ve %40 BaTiO₃ – %60 Silres KX+ Ksilen+ DISPERBYK108 oranı için tekrar edilir.
- vii. Elde edilen farklı derişimlerdeki boyalar damlalık ile 0,8x10x25 mm boyutlarında 2025 alüminyum levhalara uygulanmıştır. Bu çalışmada parametre kabul edilen diğer bir etken ise levhalara uygulanan boya kalınlığıdır.
- viii. Alüminyum levhalara uygulanan boya kuruması amacıyla 50°C ‘de 4 saat etüvde bekletilmiştir. Radar ölçümleri yapılırken boyanın tamamen kurumuş olması gerekmektedir.

4.3. Kullanılan Ekipmanlar

Bu bölümde iz düşürücü boya üretimi ve radar absorpsiyon kapasitesi ölçümleri için kullanılan ekipmanlar ile ilgili bilgiler verilmiştir.

4.3.1. Karıştırıcı

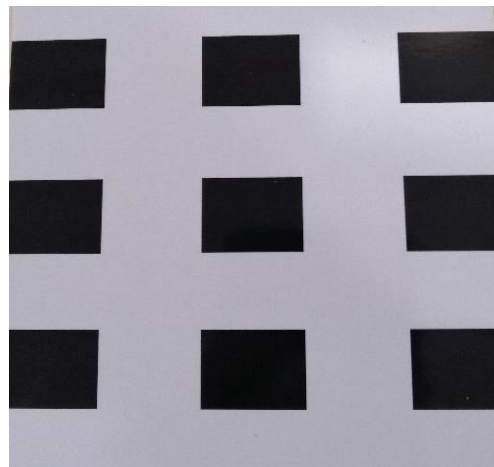
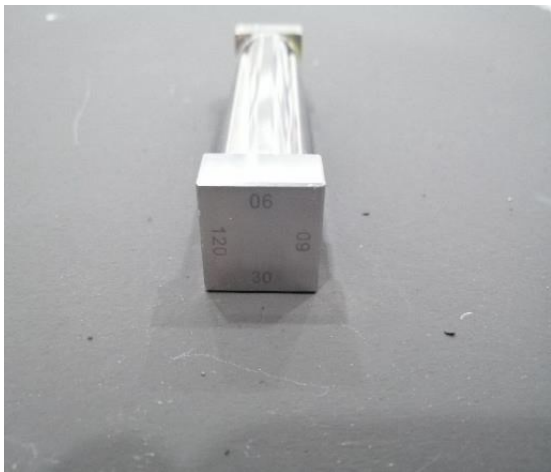
Boya sentezinde Gamak marka AGM-80 model karıştırıcı kullanılmıştır. Hem karıştırma hem de ezme işlemini gerçekleştirmek üzere kullanılmıştır. Karıştırıcı Resim 4.1’de gösterildiği gibidir.



Resim 4.1. Gamak marka AGM-80 karıştırıcı

4.3.2. Aplikatör

Aplikatör ile mikron ayarı yapıp zebra kart üzerine boya çekilmiştir. Kuruduktan sonra örtme gücü kontrolü yapılmıştır. Aplikatör ve zebra kart Resim 4.2’de verilmiştir.



Resim 4.2. Aplikatör ile zebra kartı

4.3.3. Kaplama kalınlığı ölçüm cihazı

En önemli parametrelerden biri olan kaplama kalınlığının ölçülmesi amacıyla ElektroPhysik marka MINITEST 4100 kaplama kalınlığı ölçüm cihazı kullanılmıştır. Cihaza ait görsel Şekil 4.3'te verilmiştir.



Resim 4.3. Kaplama kalınlığı ölçüm cihazı

4.3.4. Vektörel ağ analizörü (VNA)

KEYSIGHT Marka FieldFox Microwave Analyzer N9917B model vektörel ağ analizörü, radar absorpsiyon kapasitesi ölçümlerinde kullanılmıştır. Resim 4.4 'te Vektörel Ağ Analizörü 'ne ait görsel verilmiştir.



Resim 4.4. KEYSIGHT Marka FieldFox Microwave Analyzer N9917B model VNA

4.3.5. Dalga kılavuzları (Wave Guides)

Radar absorpsiyon kapasitesi ölçümleri X-Bandı frekans aralığında (8,2 - 12,4 GHz) yapılmıştır. X-Bandı absorpsiyon kapasitesi ölçümleri için Maury Microwave marka X230B1 model dalga kılavuzu kullanılmıştır. Resim 4.5.'te dalga kılavuzuna ait görsel verilmiştir.



Resim 4.5. X-Bandı dalga kılavuzu

4.4. Yapılan analizler

Boyaların örtücülüğü, kaplama yapılan yüzeyi kapatma gücü olarak tanımlanır. Boyaların örtme gücü pigment konsantrasyonu ile doğru orantılıdır. Pigment oranı arttıkça boyaların örtücülüğü de artmaktadır. Bu çalışmada boya, farklı pigment-bağlayıcı oranları

sentezlenmiştir. Sentezlenen boyaların örtücülüğü aplikatör ve zebra kart ile analiz edilmiştir.

Radar absorpsiyon malzemelerinin absorpsiyon kapasitelerinin ölçümü için dalga kılavuzu yöntemi kullanılmıştır. Test düzeneği vektörel ağ analizatörü ve farklı frekanslarda ölçüm yapan X-Bandı, dalga kılavuzlarından oluşmaktadır. Bu yöntem laboratuvar ölçekli uygulamalar için daha uygundur. KEYSIGHT Marka FieldFox Microwave Analyzer N9917B model vektörel ağ analizörü, X-Bandı (8,2-12,4 GHz) absorpsiyon kapasitesi ölçümleri için Maury Microwave marka X230B1 model dalga kılavuzu kullanılmıştır. Absorpsiyon kapasitesi ölçümlerinde S11 parametresi kullanılmıştır. Giden dalga ile gelen elektromanyetik dalga arasındaki güç kaybı onluk logaritma tabanı oranı şeklinde ifade edilmesi S11 parametresidir.

5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Radar absorpsiyon kapasitesinin ölçülmesi konusunda literatür araştırması yapıldığında BaTiO_3 'ün boya haline getirilip radar absorpsiyon ölçümü ile ilgili bir çalışma tespit edilememiştir. Dalga kılavuzu yöntemi ile absorpsiyon değeri ölçülebilmesi için toz haldeki pigmentin boya formuna veya kaplama haline getirilmesi gerekmektedir. BaTiO_3 kimyasal ve mekanik olarak stabil bir yapıya sahiptir. Kullanılan BaTiO_3 'ün partikül büyüklüğü 370 nm'dir. Boya üretiminde pigmentin nano boyutta olması boya örtücülüğünü artırmaktadır. Boyanın yüksek sıcaklıkta dayanımının artırılması için silikon esaslı reçine kullanılmıştır. Yapılan literatür araştırmasında Aktaş ve arkadaşları bağlayıcı türünün sıcaklık dayanımına etkisini incelemişlerdir ve elde edilen sonuçlarda silikon esaslı reçinenin diğer türlere göre daha başarılı olduğunu tespit etmişlerdir [5]. Boya içerisine katılan pigment hariç her malzeme absorpsiyon kapasitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu sebeple minimum katkı ilavesi ile boya sentezlenmesi amaçlanmıştır.

Çizelge 5.1. Parametre özelliklerine göre numune adlandırılması

Pigment / Bağlayıcı Oranı	Boya Kalınlığı (mm)	Numune Adı
%40 P- %60 B	0,7	40-1
%40 P- %60 B	1,0	40-2
%40 P- %60 B	1,5	40-3
%40 P- %60 B	2	40-4
%55 P- %45 B	0,7	55-1
%55 P- %45 B	1,0	55-2
%55 P- %45 B	1,5	55-3
%55 P- %45 B	2	55-4
%70 P- %30 B	0,7	70-1
%70 P- %30 B	1,0	70-2
%70 P- %30 B	1,5	70-3
%70 P- %30 B	2	70-4

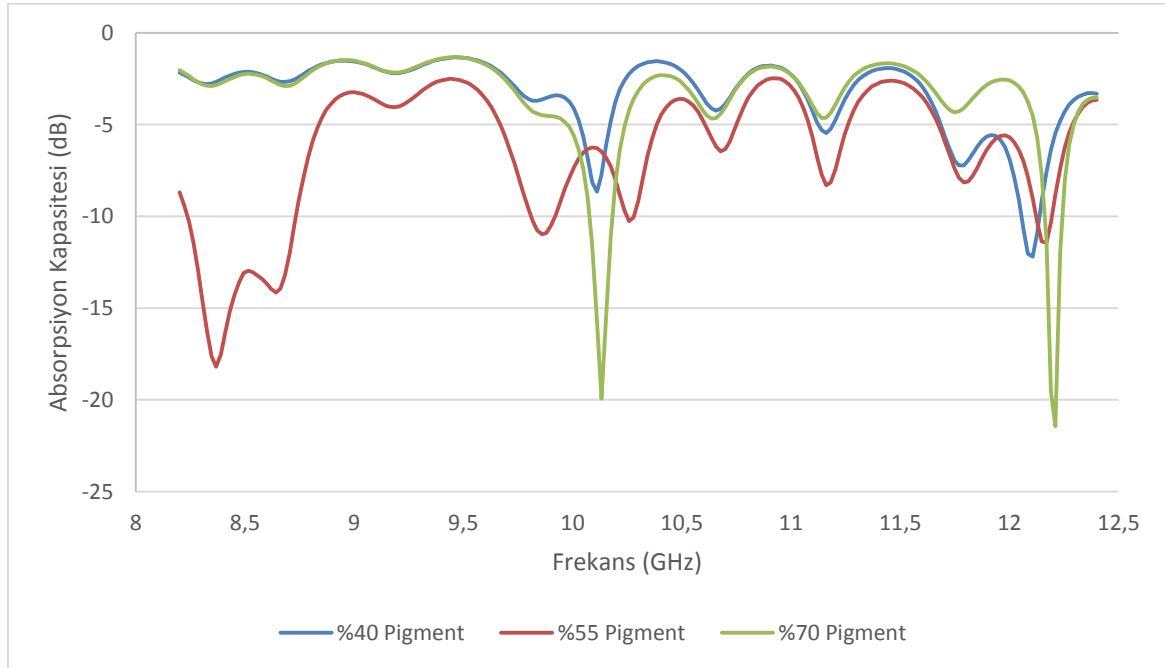
5.1. X-Bandı Frekans Aralığında Yapılan Analizlerin Sonuçları

5.1.1. Pigment oranının absorpsiyon kapasitesine etkileri:

Yapılan çalışmada incelemek istenen ilk parametre boya kalınlığı sabit tutulduğunda pigment oranının absorpsiyon değerleri üzerindeki etkileridir. Boya kalınlıkları 0,7 mm, 1,00 mm, 1,5 mm ve 2,00 mm’de sabit tutulmuş ve farklı pigment oranları arasında karşılaştırma yapılmıştır.

Pigment oranının 0,7 mm kalınlığına etkileri

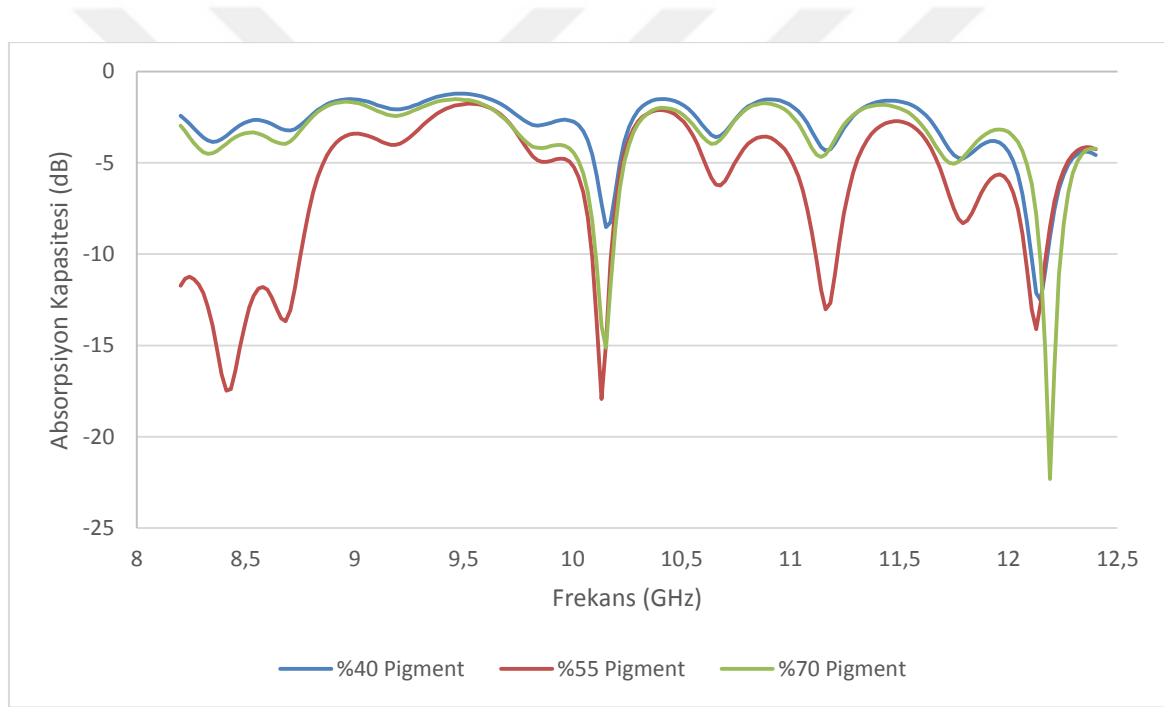
Şekil 5.1.’de %70’i pigment, %55’i pigment ve %40’ı pigment olan boya kalınlıkları 0,7 mm olan 3 farklı numunenin karşılaştırmalı grafiği verilmiştir. X-Bandı frekans aralığında 0,7 mm kaplama kalınlığında ortalama absorpsiyon kapasitesi %40 BaTiO₃ içeren RAM için -3,34 dB, %55 BaTiO₃ içeren RAM için -6,45 dB, %70 BaTiO₃ içeren RAM için -3,52 dB olarak hesaplanmıştır. Elde edilen veriler incelendiğinde 0,7 mm kalınlık için en yüksek absorpsiyon değerlerinin %55 pigment içeren malzemeye ait olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.1. Pigment oranının sabit 0,7 mm kalınlığında uygulanmasının X-Bandı absorpsiyon kapasitesine etkisi

Pigment oranının 1,0 mm kalınlığına etkileri

Şekil 5.2’de %70 pigment, %55 pigment ve %40 pigment içeren iz düşürücü boyanın sabit 1,00 mm kalınlığında uygulanan numunelerin ölçüm sonuçlarında elde edilen absorpsiyon kapasiteleri grafiği verilmiştir. X-Bandı frekans aralığında 1,0 mm kaplama kalınlığında ortalama absorpsiyon kapasitesi %40 BaTiO₃ içeren iz düşürücü malzeme için -3,08 dB, %55 BaTiO₃ içeren iz düşürücü malzeme -6,22 dB ve %70 BaTiO₃ içeren iz düşürücü malzeme için -3,70 dB olarak hesaplanmıştır. Elde edilen veriler incelendiğinde 1,0 mm kalınlık için de en yüksek absorbans değerlerinin %55 pigment içeren malzemeye ait olduğu belirlenmiştir.

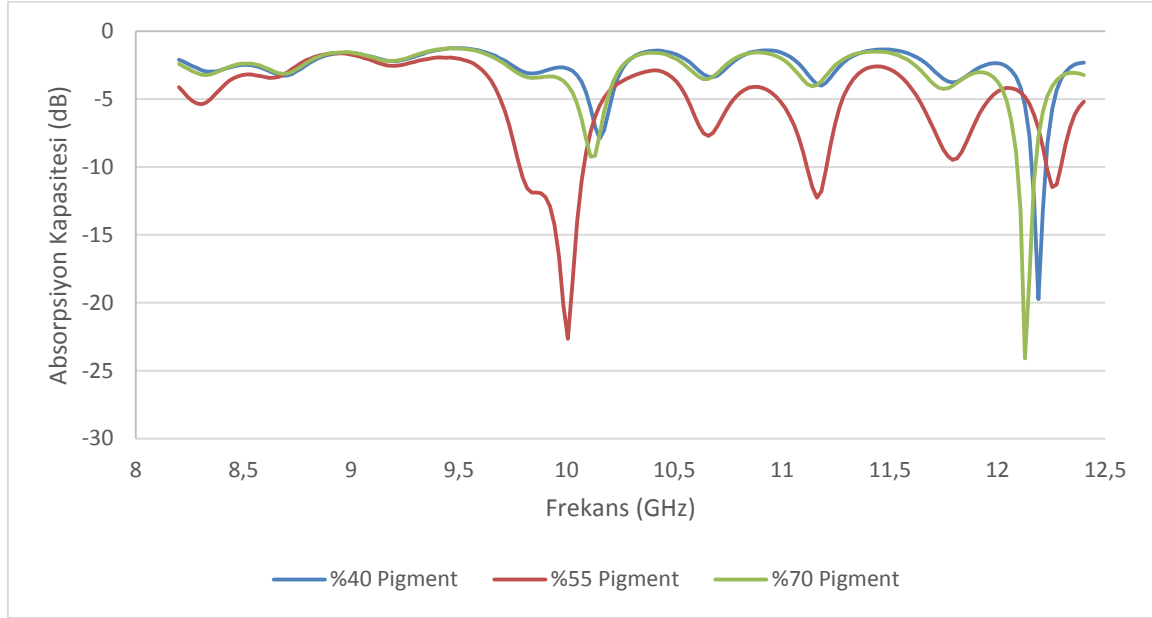


Şekil 5.2. Pigment oranının sabit 1,00 mm kalınlığında uygulanmasının X-Bandı absorpsiyon kapasitesine etkisi

Pigment oranının 1,5 mm kalınlığına etkileri

Şekil 5.3’de %70 pigment, %55 pigment ve %40 pigment içeren iz düşürücü boyanın sabit 1,5 mm kalınlığında uygulanan numunelerin ölçüm sonuçlarında elde edilen absorpsiyon kapasiteleri grafiği verilmiştir. 8,2 - 12,4 GHz frekans aralığında 1,5 mm kaplama kalınlığında %40 pigment içeren iz düşürücü boyanın -2,75 dB, %55 pigment içeren iz düşürücü boyanın -5,34 dB ve %70 pigment içeren iz düşürücü boyanın -3,08 dB ortalama

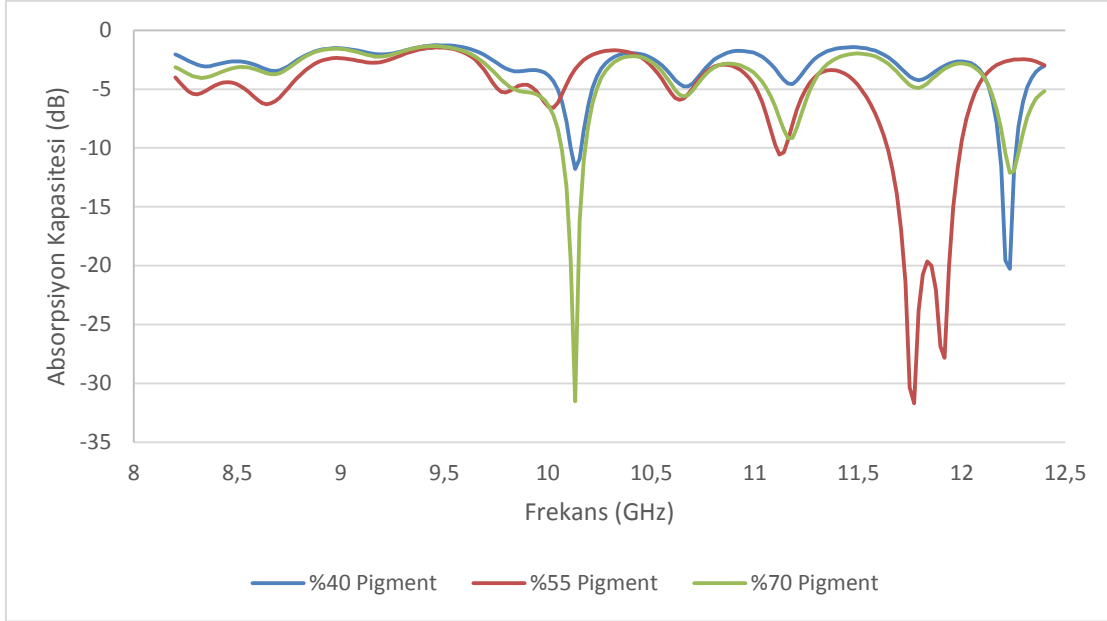
absorpsiyon kapasitesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Hesaplanan ortalama değerler doğrultusunda %55 pigment içeren boyanın en yüksek absorpsiyon kapasitesine sahip olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.3. Pigment oranının sabit 1,5 mm kalınlığında uygulanmasının X-Bandı absorpsiyon kapasitesine etkisi

Pigment oranının 2,0 mm kalınlığına etkileri

Şekil 5.4'te %70 pigment, %55 pigment ve %40 pigment içeren iz düşürücü boyanın sabit 2,0 mm kalınlığında uygulanan numunelerin ölçüm sonuçlarında elde edilen absorpsiyon kapasiteleri grafiği verilmiştir. X-Bandı (8,2-12,4 GHz) frekans aralığında sabit 2,0 mm boya kalınlığında %40 pigment içeren numune -3,21 dB, %55 pigment içeren numune -5,40 dB ve %70 pigment içeren numune -4,16 dB ortalama absorpsiyon kapasitesine sahiptir.



Şekil 5.4. Pigment oranının sabit 2,0 mm kalınlığında uygulanmasının X-Bandı absorpsiyon kapasitesine etkisi

Sabit boya kalınlığında pigment oranlarının karşılaştırıldığı bütün veriler incelendiğinde her boya kalınlığında belirli bir frekansta en yüksek absorpsiyon kapasitesini %70 pigment içeren boya numunesinin gösterdiği tespit edilmiştir. Ancak ortalama absorpsiyon kapasiteleri incelendiğinde grafiklerden de anlaşıldığı üzere 8,2-12,4 GHz aralığında tüm kaplama kalınlıklarında %55 pigment oranına sahip kaplamanın en yüksek ortalama absorpsiyon kapasitesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, iz düşürücü malzemede optimum pigment oranı %55 pigment- %45 bağlayıcı olarak belirlenmiştir.

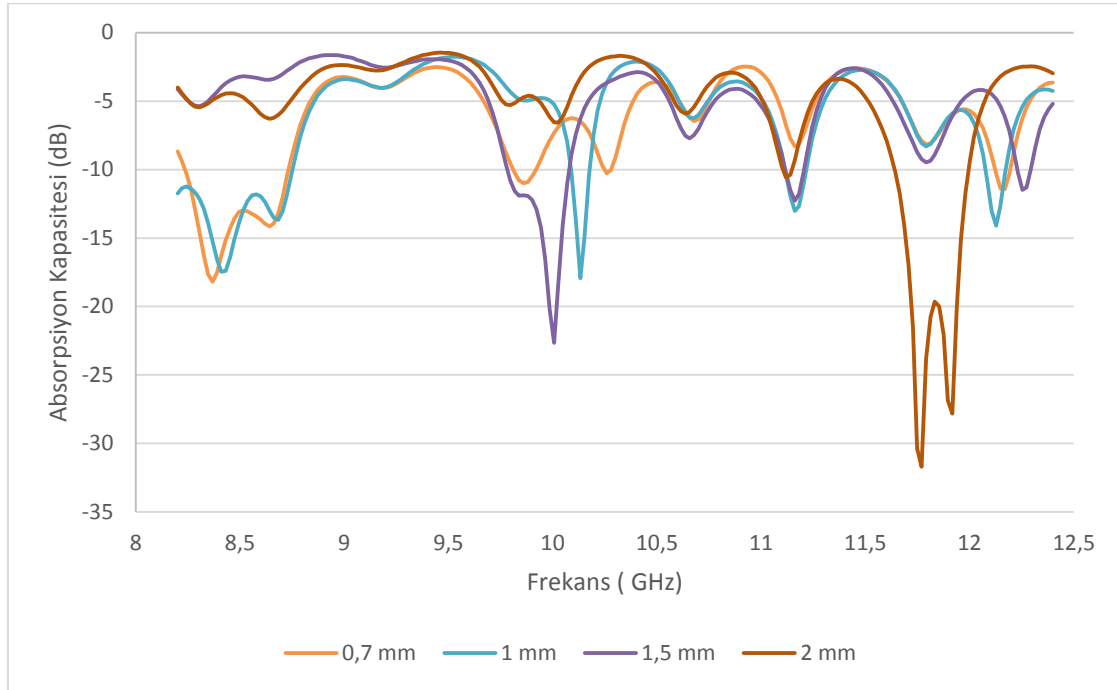
5.1.2. Boya kalınlığının absorpsiyon kapasitesine etkileri:

X-Bandı frekans (8,2 – 12,4 GHz) aralıklarında yapılan ölçümlerde optimum pigment oranı %55, bağlayıcı oranı %45 olarak belirlenmiştir. Optimum boya kalınlığının belirlenebilmesi amacıyla 0,7 mm, 1,0 mm ve 2,0 mm kalınlığında kaplama yapılmıştır. 8,2 – 12,4 GHz frekans aralığında belirlenen kalınlıklarda uygulanan numunelerin absorpsiyon kapasitesi ölçümleri Şekil 5.5’de verilmiştir.

Maksimum absorpsiyon kapasitesi 2,0 mm kalınlığındaki numunede 11,770 GHz ’de -31,698 dB olarak ölçülmüştür. Ortalama absorpsiyon değerleri hesaplandığında ise 2,0

mm'de -5,39 dB, 1,5 mm'de -5,34 dB, 1 mm'de -6,21 dB ve 0,7 mm'de ise -6,45 dB olduğu tespit edilmiştir.

Boya kalınlığı arttıkça pigmentin boya içerisinde homojen olarak dağılmamasının ve kuruma esnasında oluşan mikro çatlakların absorpsiyon kapasitesini olumsuz yönde etkilediği değerlendirilmektedir.



Şekil 5.5. %55 pigment içeren farklı boya kalınlıklarına göre X-Bandı absorpsiyon kapasiteleri

Optimum boya kalınlığının belirlenmesinde absorbans olarak kullanılacak malzemenin geniş frekans aralığında yüksek absorpsiyon kapasitesine sahip olması önemli bir etkidir. Bu sebeple optimum boya kalınlığı belirlenirken ortalama absorpsiyon kapasiteleri dikkate alınmıştır. %55 pigment içeren iz düşürücü malzemenin optimum kalınlığı 0,7 mm olarak belirlenmiştir.

6. MALİYET ANALİZİ

İz düşürücü boya sentezinde kullanılan hammaddelerin birim fiyatları Çizelge 6.1.'de verilmiştir. Boya formülasyonlarının maliyetleri hesaplanırken Euro/Dolar paritesi 1,0871 olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 6.1. Malzemelerin katalog fiyatları

Malzeme	Miktar (g)	Fiyat (€)
Pigment (BaTiO ₃)	1000	215
Silikon Esaslı Bağlayıcı	1000	8,5
Ksilen	1000	35
Dispersiyon Ajanı	1000	5

%55 BaTiO₃ içeren 1 kg boyanın maliyeti Çizelge 6.2.'de verilmiş olup yaklaşık 124,125 euro olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 6.2. %55 BaTiO₃ içeren boya numunesinin maliyeti

Malzeme	Katkı Oranı (%)	Miktar (g)	Fiyat (€)
Pigment (BaTiO ₃)	55	550	118,25
Silikon Esaslı Bağlayıcı	35	350	2,975
Ksilen	8	80	2,8
Dispersiyon Ajanı	2	20	0,1
Toplam			124,125

%55 BaTiO₃ içeren radar absorpsiyon malzemesinden 0,7 mm kalınlığında 1 m² alanı boyamak için 4,2 kg boya gerekmektedir. Kullanılacak hammaddelerin metrekare maliyeti

yaklaşık olarak 521,33 euro olarak hesaplanmıştır. Maliyet hesaplamasında malzeme amortisman maliyeti, elektrik ve işçilik maliyetleri dahil edilmemiştir.

Radar absorpsiyon malzemeleri tüm yüzey kaplamalarında değil sadece radar kesit alanının azaltılması istenilen alanlarda kullanılacağı için toplam maliyeti çok da yükseltmeyecektir.



7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan yüksek lisans çalışması neticesinde elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

- X-Bandı frekans aralığında boya kalınlığı sabit tutulup pigment oranlarının absorpsiyon kapasitesine etkileri incelendiğinde %55 BaTiO₃ içeren boyanın optimum pigment orana sahip olduğu tespit edilmiştir. Maksimum absorpsiyon kapasiteleri %70 BaTiO₃ içeren numunelerde elde edilmesine rağmen ortalama absorpsiyon kapasitesi en yüksek olan pigment oranı %55 pigment içeren boyadadır.
- Silikon esaslı bağlayıcı ile hazırlanan boyanın (%55 pigment ve 2,00 mm kalınlıkta boya) VNA ile X-Bandı frekans aralığında 11,770 GHz 'de -31,698 dB absorpsiyon kapasitesine sahip olduğu ve RAM olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.
- %55 pigment içeren radar absorpsiyon malzemesinin geniş frekans aralığında yüksek absorpsiyon kapasine sahip olması amaçlandığı için optimum boya kalınlığı 0,7 mm olarak belirlenmiştir. 0,7 mm'de ortalama absorpsiyon kapasitesi -6,45 dB olarak hesaplanmıştır.
- %55 pigment içeren radar absorpsiyon malzemesinin hammadde maliyeti 1 kg için 124,125 euro olarak ve 0,7 mm kalınlığında 1 metrekare alanın kaplanması için gereken hammadde maliyeti 521,33 euro olarak hesaplanmıştır.
- Kaplama kalınlığının; frekans aralığına göre belirlenmesinin daha uygun olacağına karar verilmiştir. Uzaktaki bir cismin belirlenmesinde (Örneğin; helikopter, uçak vb.) düşük frekanslarda çalışan radarlar kullanıldığından buralarda daha ince kaplama kullanılması daha uygun olacağı değerlendirilmiştir.
- Dünya standartlarında bir malzemenin RAM olarak sayılabilmesi için -10 dB soğurma yapması gerekmektedir. Pigment olarak BaTiO₃ içeren boyanın X-Bandı çalışma frekansında radar absorpsiyon malzemesi olarak kullanılabileceği yapılan ölçümlerle kanıtlanmıştır.
- Radar absorpsiyon kapasitesi ölçümleri dalga kılavuzu yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem ile yapılan ölçümlerde kapalı ortamda ölçüm yapıldığından ekstra kırılma ve yansımalar meydana getirerek ölçülen absorpsiyon miktarını etkilenebilmektedir. Gelecekte yapılacak olan çalışmalar için atmosfer

ortamında ölçüm yapılan ve gerçek ölçüme daha yakın sonuçlar elde edilebilecek olan boşluk uzay yöntemi kullanılması önerilmektedir.



KAYNAKLAR

1. Skolnik, M., I. (1981) Introduction to Radar System, İkinci Baskı, USA, *McGraw-Hill*, 12-13.
2. Kumar, A., Singh, S. (2018) Development of Coatings for Radar Absorbing Materials at X-band. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 330, 012006.
3. Dawei H. (2010) Development of the epoxy composite complex permittivity and its application in wind turbine blades. *School of Engineering and Materials Science Queen Mary*, University of London, 57-59.
4. Saville, P. (2005) Review of Radar Absorbing Materials, *Defence R&D Canada Technical Memorandum DRDC Atlantic TM 2005- 003*, Kanada, 2-5.
5. Aktaş G., Aktaş, A., R., Gürü, M. (2015) Boya Özelliklerinin Radar Absorpsiyon Kapasitesine Etkisi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(1), 87-93.
6. İnternet: <https://www.radartutorial.eu/01.basics/Radar%20Prensibi.tr.html> (Erişim Tarihi ve Saati: 25.12.2020 09.54).
7. Parker, M. (2010) Chapter-16 Radar Basics, *Digital Signal Processing 101*, 191-200.
8. Knott, E. F., Shaeffer, J. F. and Tuley, M. T. (2004) Radar Cross Section 2nd Edition”, *SciTech Publishing*, USA, 25.
9. İnternet: https://www.emo.org.tr/ekler/9f9df6233db7e68_ek.pdf?dergi=1120 (Erişim Tarihi ve Saati: 10.12.2023 02.53).
10. İnternet: <https://www.radartutorial.eu/04.history/hi86.tr.html> (Erişim Tarihi ve Saati: 10.12.2023 15.03).
11. İnternet: <https://www.radartutorial.eu/19.kartei/11.ancient/karte012.tr.html> (Erişim Tarihi ve Saati: 10.12.2023 16.48).
12. Aktaş G. (2013) *Mekanokimyasal Yöntemle Demir Silisyum Bileşiğinin Üretilmesi ve Radar Absorpsiyon Malzemesi Olarak Kullanılabilirliği*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
13. Jha, B., K., Aswale, M., S. (2016) Mechanical Aspects in Stealth Technology: Review, *International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)*, ISSN: 2321-0869 (O) 2454-4698 (P), 4, 4.
14. Altay, Barış, Y. (2022) *Radar Kesit Alanının Azaltılması İçin Ultra Geniş Bantlı Frekans Seçici Yüzey Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi.
15. Aktaş, A., R. (2013) *Mekanokimyasal Yöntemle Radar Absorplayıcı Madde Sentezlenmesi İçin Reaktör Tasarımı ve Katkılarla Absorplayıcı Malzemenin Geliştirilmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara

16. Folgueras, L., C., Alves, M., A., Rezende, M., C. (2009) Electromagnetic Radiation Absorbing Paints Based on Carbonyl Iron and Polyaniline, *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC 2009)*, 978-1-4244-5357.
17. Gürkan, N., (2008) Studies On Interaction Of Electromagnetic Waves With Barium Hexaferrite Ceramics, Yüksek Lisans Tezi, *Ortadoğu Teknik Üniversitesi*, Ankara, 3, 22-43.
18. Akınay, Y., (2018) Radar soğurucu kompozit malzeme üretimi, Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi.
19. Asadinia E., Pakshir M., Hosseini S., E. (2020) Synthesis of $(\text{Ba}_4\text{Zn}_{2x}\text{Mn}_x\text{Fe}_{36}\text{O}_{60})$ type hexaferrite pigments and studying their influence on the protective performance mechanical behaviour and microwave absorption properties of polyurethane paint coatings *Progress in Organic Coatings*, 139, 105435.
20. Aisiyah, M., C., Zainuriand, M., Ristiani, D. (2019) Magnetic and microwave absorbing properties of Zn-substituted Barium M-Hexaferrite in X-band frequency range. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 496, 012024.
21. Padhy, S., Sanyal, S., Meena, R., S., Chatterjee, R., Bose, A. (2013) Characterization and performance evaluation of radar absorbing materials. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 27-2, 191-204.
22. Padhy, S., Sanyal, S., Swaroop, R. (2013) Development and characterization of (Mg, Mn) U-type microwave absorbing materials and its application in radar cross sections reduction. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 1751-8725.
23. Qiang G., Jafarian, M., Afghahic, S., S., S., Atassid, Y., Al-Qassard, R. (2020) Tuning the impedance matching characteristics of microwave absorbing paint in X-band using copper particles and polypyrrole coating, *Materials Research Bulletin*, 125, 110780.
24. Widyastuti, Fajarin, R., Pratiwi, V., M., Kholid, R., R., Habib, A. (2018) The Effect of BaM/PANI Composition with Epoxy Paint Matrix on Single and Double Layers Coating with Spray Coating Method for Radar Absorbing Materials Applications, *AIP Conference Proceedings*, 1945, 020036.
25. Pan, Y., Ma, G., Liu, X., Wang, C., Li1, N., Wang, J., Jian, X. (2019) Electromagnetic and microwave absorption properties of coatings based on spherical and flaky carbonyl iron, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 30:18123–18134.
26. İnternet: <https://malzemebilimi.net/stealth-teknolojisi-ve-radar-absorplayici-malzemler.html> (Erişim Tarihi ve Saati: 17.01.2024, 15.45)
27. Aksongur, T. (2022) *Bor Esaslı Antibakteriyel Boya Üretimi Ve Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi. Ankara.
28. Gürü, M. ve Yalçın, H. (2006). *Malzeme Bilgisi (İkinci Baskı)*. Ankara: PALME Yayıncılık, 263, 306.

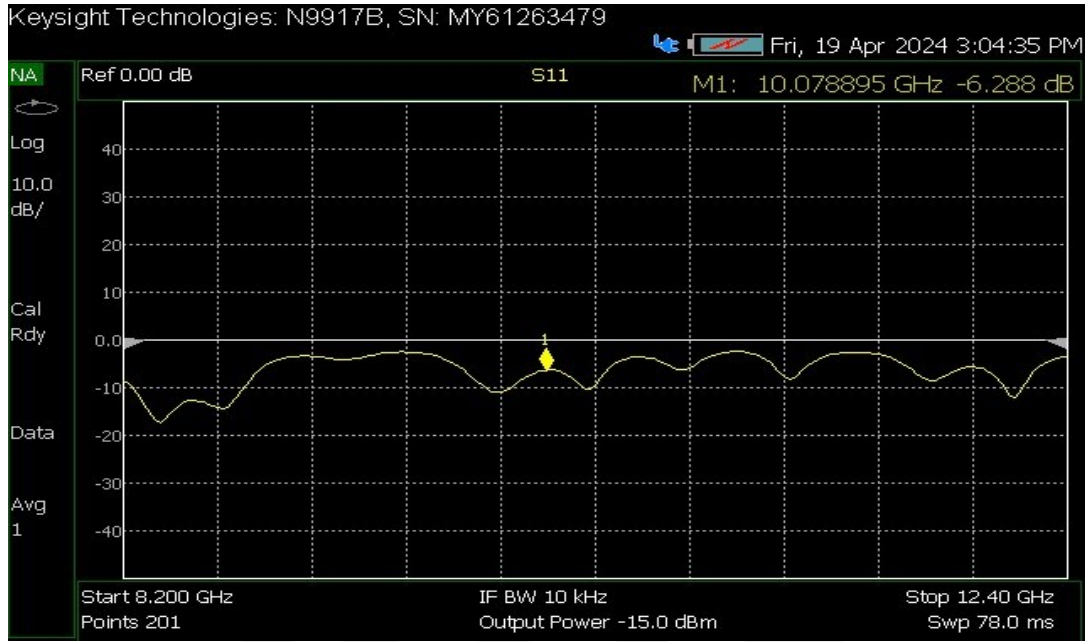
29. İnternet: https://webdosya.csb.gov.tr/db/sanayihavarehberi/icerikler/05_boya-uret-m--20200103075113.pdf (Erişim Tarihi ve Saati: 21.04.2024, 16.10)
30. Vijatović, M., M., Bobić, J., D., Stojanović, B., D. (2008) History and Challenges of Barium Titanate: Part I, *Science of Sintering*, 40, 155-165.
31. Vijatović, M., M., Bobić, J., D., Stojanović, B., D. (2008) History and Challenges of Barium Titanate: Part II, *Science of Sintering*, 40, 235-244.
32. Çelen, R., Ulcay, Y. (2018) Baryum Titanatın Tekstilde Elektromanyetik Kalkanlama Uygulamalarında Kullanımı, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 23(2), 29-44.



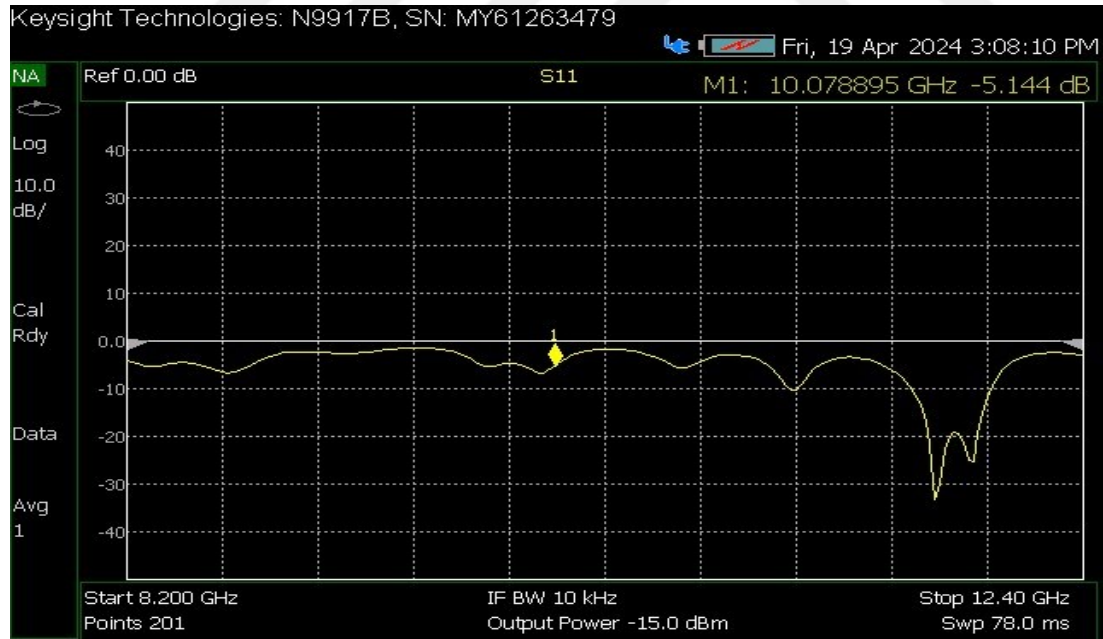




EK-1. Radar absorpsiyon ölçümlerinde kullanılmış olan vektörel ağ analizatörüne ait örnek ölçüm grafikleri.



Resim 9.1. 55-1 numunesinin VNA ölçümü



Resim 9.2. 55-4 numunesinin VNA ölçümü



ICONSAD'23 20-23 December 2023

Boya Kalınlığının X-Bandı ve Ku-Bandı Absorbans Değerlerine Etkisi

Effect of Coating Thickness on X-Band and Q-Band Radar Absorbance Values

Seray KARA ^{*1}, Gülsün AKTAŞ², Metin GÜRÜ³

ORCID: 0000-0002-0421-0481

^{1,2,3}: Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazî Üstüven, Ankara, Türkiye

Özet: Radarlar, cisimlerin menzülünü, yüksekliğini, yönünü veya hızını belirlemek amacıyla radyo dalgalarını kullanan sistemlerdir. Yaygın olarak askeri ve endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Radar sistemlerinin gün geçtikçe geliştirilmesi radara yakalanmayan malzemelere olan ihtiyacı da artırmaktadır. Radar tespitini önlemek için yapılan uygulamalar; şekillendirme, aktif önleme, pasif önleme ve radar absorpsiyon malzemelerinin kullanılmasıdır. Radar absorpsiyon malzemeleri (RAM) savunma sanayinde, hava, deniz ve kara araçlarında, tekstil ürünlerinde kullanılmaktadır. Radar absorpsiyon malzemeleri, radar cihazlarından gönderilen elektromanyetik dalgaların bir kısmını soğurarak malzemenin radar tarafından tespit edilebilirliğini zorlaştırmaktadır. Bir malzemenin iyi bir RAM olarak adlandırılabilmesi için; geniş frekans aralığında yüksek absorpsiyon özelliği göstermesi, ince ve hafif olması gerekmektedir. Uçaklar, gemiler, insansız hava araçları ve tanklarda kullanılan yüzey kaplamaları sayesinde bu araçların radarda tespitini önlenmek veya tespit süresinin uzatılmasını sağlamak amaçlanmıştır. Yapılan çalışmalarda genellikle RAM olarak ferromanyetik malzemeler kullanılmıştır. Bu çalışmada ise sıcaklık dayanımını artıran ve geniş bant aralığında düşük görünürlük sağlayan boya üretimi amaçlanmaktadır. İz düşürücü boyada pigment olarak mekanik ve kimyasal özellikleri bakımından kararı olan ve yüksek dielektrik özelliğine sahip olan baryum titanat (BaTiO₃) kullanılmıştır. Ayrıca yüksek sıcaklık dayanımı sağlaması amacıyla boya üretiminde silikon esash bağlayıcı kullanılmıştır. Radar absorpsiyon miktarı boya kalınlığı, pigment oranı gibi parametrelerle değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada kaplama kalınlığının absorpsiyon kapasitesi üzerine etkileri incelenmiştir. Radar absorpsiyon ölçümü için dalga kılavuzu yöntemi kullanılmıştır. Hazırlanan boyanın radar absorpsiyon ölçümleri 8,2-12,4 GHz aralığında (X-Bandı) ve 12,4-18 GHz aralığında (Ku-Bandı) gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümlerde elde edilen sonuçlara göre 1 mm kaplama kalınlığında 12,4-18 GHz frekans bandında -15,04 dB absorpsiyon yaptığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Radar Absorpsiyon Malzemeleri, İz Düşürücü, Boya Kalınlığı

Abstract: Radars are systems that utilize radio waves to determine the range, height, direction, or speed of objects. They are commonly used in military and industrial applications. The continuous development of radar systems increases the need for materials that are not easily detected by radar. Applications to prevent radar detection include shaping, active prevention, passive prevention, and the use of radar-absorbing materials. Radar Absorbing Materials (RAM) are used in generally defense industries, on air, sea, and land vehicles, as well as in textile products. These materials absorb a portion of the electromagnetic waves emitted by radar devices, making it challenging for the material to be detected by radar. For a material to be considered a good RAM, it needs to exhibit high absorption properties across a wide frequency



Gazili olmak ayrıcalıktır