

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ VE SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI
SAVUNMA PLATFORMLARI TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

STATİK YÜK ALTINDA ÇALIŞAN FARKLI YAPIDAKİ CAM
ELYAF KOMPOZİT RADOMLARDA ELEKTROMANYETİK
PERFORMANS ANALİZİ

HAZIRLAYAN

MUSTAFA MERT AYDOĞAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA - 2024

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ VE SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI
SAVUNMA PLATFORMLARI TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

STATİK YÜK ALTINDA ÇALIŞAN FARKLI YAPIDAKİ CAM
ELYAF KOMPOZİT RADOMLARDA ELEKTROMANYETİK
PERFORMANS ANALİZİ

HAZIRLAYAN

MUSTAFA MERT AYDOĞAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

PROF. DR. ÖMER FARUK ELALDI

ANKARA - 2024

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Savunma Teknolojileri ve Sistemleri Anabilim Dalı Savunma Platformları Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Mustafa Mert AYDOĞAN tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 20 / 12 / 2024

Tez Adı: Statik Yük Altında Çalışan Farklı Yapıdaki Cam Elyaf Kompozit Radomlarda Elektromanyetik Performans Analizi

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı - Soyadı, Kurumu)

İmza

Prof. Dr. Ömer Faruk Elaldı – Başkent Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Adem Acır – Gazi Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi Murat Üçüncü – Başkent Üniversitesi

.....

ONAY

Prof. Dr. Dilek Çökeliler Serdaroğlu

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih : ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: ... / ... / 20...

Öğrencinin Adı, Soyadı: Mustafa Mert AYDOĞAN

Öğrencinin Numarası: 22210131

Anabilim Dalı: Savunma Teknolojileri ve Sistemleri

Programı: Savunma Platformları

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı: Prof. Dr. Ö. Faruk ELALDI

Tez Başlığı: Statik Yük Altında Çalışan Farklı Yapıdaki Cam Elyaf Kompozit Radomlarda Elektromanyetik Performans Analizi

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans/Doktora tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 36 sayfalık kısmına ilişkin, 29 / 11 / 2024 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 3'dür. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:

ONAY

Prof. Dr. Ö. Faruk ELALDI

Tarih: ... / ... / 20...

TEŞEKKÜR

Öncelikle, tez çalışmam boyunca bana rehberlik eden ve değerli bilgilerini benimle paylaşan tez danışmanım Prof. Dr. Ömer Faruk Elaldı' ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez sürecinde gösterdiği sabır, destek ve anlayış için minnettarım.

Ailem de bu süreçte bana verdikleri moral ve destek ile her zaman yanımda oldular. Özellikle sevgili eşim Selin F. Aydoğan' a sabrı ve teşvikleri için sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Bu tezin her aşamasında yanımda oldu ve beni motive etti.

Ayrıca, çalışmam sırasında bana destek olan, tezim için gerekli verileri elde etmemde yardımcı olan ve malzeme temininde destek veren çalışma arkadaşlarıma ve değerli SDT ailesine teşekkür ederim. Onların yardımları ve fikirleri, tezimin tamamlanmasına büyük katkı sağlamıştır. Onların yardımları olmadan bu çalışmayı gerçekleştirmek mümkün olmazdı.

ÖZET

Mustafa Mert Aydoğan

STATİK YÜK ALTINDA ÇALIŞAN FARKLI YAPIDAKİ CAM ELYAF

KOMPOZİT RADOMLARDA ELEKTROMANYETİK PERFORMANS ANALİZİ

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Savunma Teknolojileri ve Sistemleri Anabilim Dalı

2024

Bu çalışmada, statik yük altında çalışan farklı fiber oryantasyonunda cam elyaf kompozit radomların elektromanyetik performans analizi yapılmıştır. Cam elyaf kompozit radomlar, radar ve iletişim sistemlerinde kullanılan önemli yapı elemanlarıdır ve elektromanyetik geçirgenlikleri ile mekanik dayanımları kritik öneme sahiptir. Radom, antenleri çevresel etkilerden koruyan ve radyo dalgalarının geçişini engellemeyen özel yapılardır. Radomların, anten ve radar sistemlerini çevresel atmosfer hasarlarından ve fiziki hasarlardan korumanın yanı sıra antenleri gizlemek amacıyla kullanılır. Bu koruma işlevini yerine getirirken radyo dalgalarını minimum kayıpla geçirirler.

Radar ve anten sistemlerinin sağlıklı çalışabilmesi için sinyallerin doğru ve kayıpsız yayınlanması ve yansıyan sinyallerin de doğru ve kayıpsız alınması gerekmektedir. Radomların radyo dalgalarını geçirgenliği bu sebeple giderek kritikleşmektedir. Bu geçirgenlikten dolayı endüstride kullanılabilecek malzemeler kısıtlı durumda olduğu için mevcut malzemelerde yapılabilecek iyileştirmelerde sistemlerin doğru çalışmasına büyük katkı sağlayacaktır.

Çalışmada, farklı fiber oryantasyonlarına sahip (monolitik ve sandviç) olarak hazırlanan radom numuneleri üzerinde deneyler yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, dikkate alınan cam elyaf oryantasyonları ve kompozit yapıların radomların elektromanyetik geçirgenlik performansı üzerinde önemli bir etkisi olmadığı gözlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELE: Radom, Cam elyaf kompozit, Radyo dalgaları, Elektromanyetik geçirgenlik

ABSTRACT

Mustafa Mert Aydoğan

ELECTROMAGNETIC PERFORMANCE ANALYSIS OF GLASS FIBER COMPOSITE RADOMES WITH DIFFERENT STRUCTURES UNDER STATIC LOAD

BAŞKENT UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

Department of Defense Technologies

2024

In this study, the electromagnetic performance analysis of glass fiber composite radomes with different fiber orientations under static load was conducted. Glass fiber composite radomes are important structural elements used in radar and communication systems, and their electromagnetic transparency and mechanical strength are critical. Radomes are special structures that protect antennas from environmental effects and do not obstruct the passage of radio waves. Radomes are used to protect antenna and radar systems from environmental atmospheric and physical damage and camouflage the antennas. While performing this protective function, they transmit radio waves with minimal loss.

For radar and antenna systems to operate effectively, signals need to be transmitted and received accurately and without loss. Therefore, the permeability of radomes to radio waves is becoming increasingly critical. Due to this permeability, the materials that can be used in the industry are limited, so improvements in existing materials will greatly contribute to the accurate operation of systems.

In the study, experiments were carried out on radome samples arranged with different fiber orientations (monolithic and homogeneous). According to the process, it was observed that glass fiber orientations and composite structures that were considered did not have considerable effect on the performance of the radome electromagnetic transmission capability.

KEYWORDS: Radome, Glass fiber composite, Radio waves, Electromagnetic permeability

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	viii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Radomun Tanımı	1
1.1.1. Radomun işlevi	2
1.1.2. Radom çeşitleri ve kullanılan malzemeler	2
1.2. Radyo Dalgaları	3
1.2.1. Radyo dalgalarına karşı geçirgenlik.....	4
1.2.2. Radyo dalgaları ve radar	4
1.3. Literatür Taraması	5
1.4. Amaç.....	11
2. BENZETİM VE TEST ÇALIŞMALARI	12
2.1. Malzeme Seçimi ve Üretimi.....	12
2.2. Deneyin Yapılışı	18
3. ELDE EDİLEN BULGULAR VE DEĞERLENDİRME.....	24
4. SONUÇ	34
KAYNAKLAR.....	37

TABLÖLER LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1. Frekanslara göre Monolitik numune kullanımı sonrası alınan sinyal değerleri	24
Tablo 2. Frekanslara göre Sandviç numune kullanımı sonrası alınan sinyal değerleri	24
Tablo 3. Frekanslara göre numune kullanımı sonrası alınan sinyal değerleri ortalamaları.	25
Tablo 4. 2 GHz frekans bandında numuneler arasında tespit edilen sinyal gücü değer farkları	26
Tablo 5. 4 GHz frekans bandında numuneler arasında tespit edilen sinyal gücü değer farkları	27
Tablo 6. 6 GHz frekans bandında numuneler arasında tespit edilen sinyal gücü değer farkları	28
Tablo 7. 8 GHz frekans bandında numuneler arasında tespit edilen sinyal gücü değer farkları	29
Tablo 8. 10 GHz frekans bandında numuneler arasında tespit edilen sinyal gücü değer farkları	30
Tablo 9. 12 GHz frekans bandında numuneler arasında tespit edilen sinyal gücü değer farkları	31

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Radom Örnekleri	1
Şekil 1.2. Kullanılan Kompozit Malzeme Bileşenleri.....	2
Şekil 1.3. Elektromanyetik Dağılım	4
Şekil 1.4. RF sinyallerinin bir malzemeden geçerken karşılaşabileceği durumlar.....	4
Şekil 1.5. Hava Trafik Kontrol Radarı	5
Şekil 2.1. Otoklav Şeması.....	15
Şekil 2.2. Ürün teknik föyünden alınan Otoklav Sıcaklık/Basınç - Zaman Grafiği (Monolitik Numune için Sol - Sandviç Numune İçin Sağ).....	15
Şekil 2.3. Monolitik 1 /M1	16
Şekil 2.4. Monolitik 2 /M2	16
Şekil 2.5. Sandviç 1 /S1.....	17
Şekil 2.6. Sandviç 2 /S2.....	17
Şekil 2.7. EMI/EMC Odası İç Alan.....	18
Şekil 2.8. EMI/EMC Odası Dış Görünüm.....	19
Şekil 2.9. Deney Düzeneği Şematik Gösterim	20
Şekil 2.10. Boş Deney Düzeneği	21
Şekil 2.11. Boş Deney Düzeneği	21
Şekil 2.12. Boş Deney Düzeneği	22
Şekil 2.13. Numuneler ile Deney Düzeneği	22
Şekil 2.14. Numuneler ile Deney Düzeneği	23
Şekil 3.1. 2 GHz frekans bandında alınan sinyal gücü değerleri.....	25
Şekil 3.2. 4 GHz frekans bandında alınan sinyal gücü değerleri.....	26
Şekil 3.3. 6 GHz frekans bandında alınan sinyal gücü değerleri.....	27
Şekil 3.4. 8 GHz frekans bandında alınan sinyal gücü değerleri.....	28
Şekil 3.5. 10 GHz frekans bandında alınan sinyal gücü değerleri.....	29

Şekil 3.6. 12 GHz frekans bandında alınan sinyal gücü değerleri.....	30
--	----



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

c	ışık hızı
cm	santimetre
d	mesafe
dB	Desibel
E	elektrik alan
EMC	Elektromanyetik Uyumluluk (Electromagnetic Compatibility)
EMI	Elektromanyetik Girişim (Electromagnetic Interference)
f	frekans
g	gram
GHz	Gigahertz
L	kablo kaybı
L0	belirli bir frekansta kayıp sabiti
m	metre
mm	milimetre
M1	1 numaralı Monolitik numune
M2	2 numaralı Monolitik numune
RF	Radyo Frekansı
S1	1 numaralı Sandviç numune
S2	2 numaralı Sandviç numune
ϵ''	dielektrik kayıp katsayısı
$\omega=2\pi f$	açısal frekans

1. GİRİŞ

1.1. Radomun Tanımı

Radom, radar antenlerinin üzerine kaplama şeklinde yapılan ve antenleri çevresel etkilerden koruyan yapılara verilen isimdir. İngilizce “radar” ve “dome” kelimelerinin birleşiminden oluşturulmuştur. “Radar”, radyo dalgalarının gönderilip, yansımaları alarak cisimlerin yer ve uzaklığının tespitine yarayan aygıttır. “Dome” kelimesi ise, kubbe veya yarım küre anlamındadır [1], [2], [3].



Şekil 1.1. Radom Örnekleri

1.1.1. Radomun işlevi

Radomların görevi, çeşitli sektörlerde ve değişik amaçlarda kullanılan radar ve antenleri dış etkilerden korumak ve kamufle etmektir [2]. Koruma sağlanması istenilen durum özellikle dış ortam şartlarıdır. Radom, zorlu dış ortam şartlarına (Yüksek sıcaklık, soğuk, rüzgâr, yağış vb.) karşı dayanım sağlarken, içerisinde bulunan anten veya radarın istenilen performansta çalışabilmesi ve görevini gerektiği gibi icra edebilmesi için yayılan RF enerjisini de mümkün olduğunca en az biçimde etkilemelidir. Şekil 1.1 'de farklı radom örnekleri gösterilmektedir.

1.1.2. Radom çeşitleri ve kullanılan malzemeler

Günümüzde birçok alanda anten sistemleri kullanılmaktadır. Bu çeşitli kullanım alanlarından dolayı da farklı özelliklerde radom ihtiyacı doğmuştur [3], [4]. Kompozit malzemeler, dayanıklılık, hafiflik, maliyet gibi avantajlarından dolayı Radom yapımında tercih edilmektedir. Özellikle RF sinyallerinin minimum kayıpla geçirilmesi hedeflendiğinden radomlarda cam elyaf kompozit malzeme kullanımı çok yaygındır. Şekil 1.2'de cam elyaf ve nomex bal peteği ara katman malzemesi örnekleri gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Kullanılan Kompozit Malzeme Bileşenleri

Cam elyaf kompozit malzemeler kullanılarak üretilen radomlar duvar tiplerine göre aşağıdaki şekilde sıralanmaktadır [3], [6]

1.1.2.1. Tek kat

Cam elyaf, sertleştirilmiş plastik gibi malzemeler kullanılarak üretilen tek kat radomlar birçok radom uygulamasında tercih edilmektedir.

1.1.2.2. A Sandviç

Genellikle cam elyaf dış katman, köpük veya bal peteği iç katman olarak üretilen radom tipidir. Bu tip ağırlığına göre yüksek dayanıklılık sağlamaktadır [5].

1.1.2.3. B Sandviç

Yoğun ara katman sebebi ile çok tercih edilen bir tip değildir. Ara katmanda düşük dielektrik sabiti olan materyal kullanılarak üretilir [5].

1.1.2.4. C Sandviç

C sandviç 5 katmandan oluşan bir yapıdır. Simetrik üretilen C sandviç art arda gelen A sandviç gibi de düşünülebilir. Sıradan bir A sandviç yeterli dayanıklılık ve elektriksel performans sağlamadığında tercih edilebilir[5].

1.1.2.5. Çoklu Sandviç

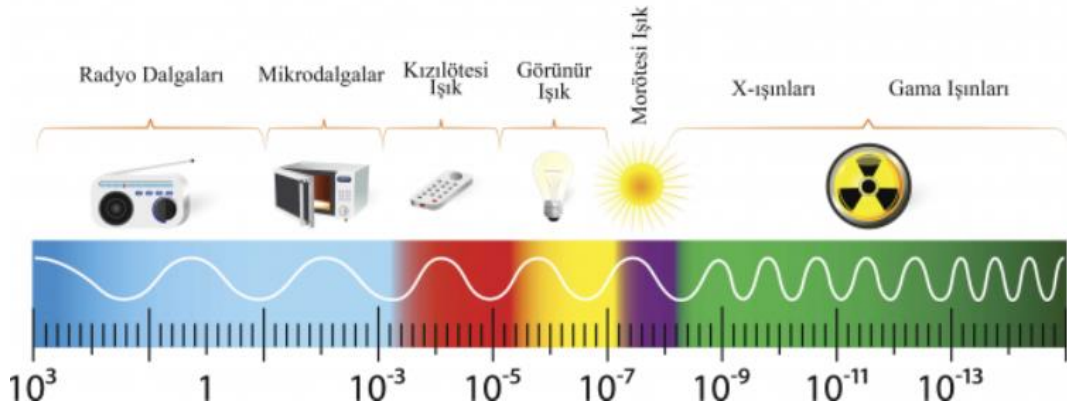
7, 9, 11 veya daha fazla katmandan oluşan tiptir. Yüksek dayanıklılık ve ek olarak hafiflik ihtiyacı duyulduğunda tercih edilebilir. İnce fiber dış katman ve düşük yoğunluklu ara katmanlar kullanılır [5].

1.1.2.6. Metal Sandviç

Frekans filtreleme, ihtiyaç haline gelirse kullanılır. Metal sandviç yapılar bir transmisyon hattında şöntlenmiş (paralel bağlanmış) devre elemanı karakteristiğini gösterir. Bu şu şekilde ifade edilebilir. Transmisyon hattı elektrik sinyallerini, güç veya bilgi iletimini gerçekleştiren kablo veya hat sistemidir. Hat üzerine şönt olarak bağlanmış bir kapasitör, yüksek frekanslı sinyalleri kısa devre ederek belirli frekansların bastırılmasını sağlar. Aynı şekilde, bir direnç şöntlendiğinde, hattın toplam empedansını düşürüp, sinyalin gücünü düzenleyebilir [5], [6] .

1.2. Radyo Dalgaları

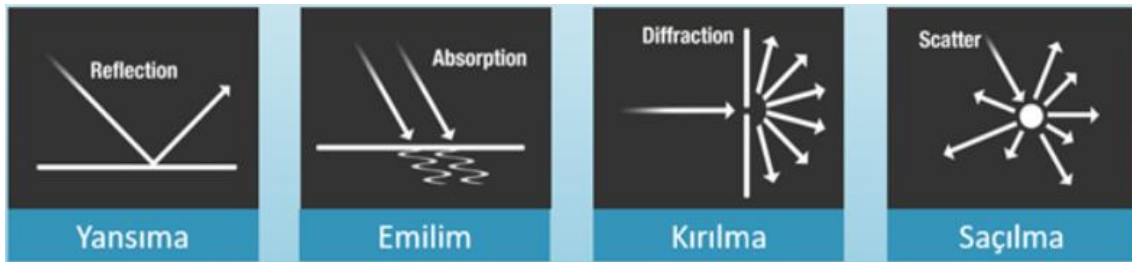
Radyo dalgaları (radio waves), elektromanyetik spektrumun bir parçasını oluşturan elektromanyetik dalgaların bir türüdür. Bu dalgalar, belirli bir frekansta hareket eden elektromanyetik enerjinin dalga formunda taşınmasını sağlar. Radyo dalgaları, Şekil 1.3' de görüldüğü gibi genellikle frekansta daha düşük, dalga boyundan daha uzun ve enerji seviyesi daha düşük olan elektromanyetik dalgalar arasında yer alır [7].



Şekil 1.3. Elektromanyetik Dağılım

1.2.1. Radyo dalgalarına karşı geçirgenlik

Radyo dalgalarına karşı geçirgenlik, bir malzemenin radyo frekanslarındaki elektromanyetik dalgaların geçişine izin verme yeteneğini ifade eder. Şekil 1.4' de radyo dalgalarının bir malzemedan geçerken karşılaşılabileceği farklı durumlar gösterilmektedir. Geçirgenliği yüksek bir malzemenin, radyo dalgalarını emmeyerek, yansıtmayarak veya saçılmaya sebep olmayacak bir şekilde geçirmesi beklenir. Diğer bir deyimle malzemelerin bu özelliği radyo dalgalarının malzeme içinden serbestçe geçmesini ifade etmektedir [8].



Şekil 1.4. RF sinyallerinin bir malzemedan geçerken karşılaşılabileceği durumlar

1.2.2. Radyo dalgaları ve radar

Radar, "Radio Detection and Ranging" kelimelerinin kısaltılması olan bir terimdir. Radar, elektromanyetik dalgalar kullanarak nesneleri konumlarını ve hızlarını belirlemek için kullanılan bir sistemdir. Temel olarak, bir radar sistemi, bir anten aracılığıyla

elektromanyetik dalgaları yayar, bu dalgalar çarptığı bir nesne tarafından geri yansıtılır ve yansıyan sinyal radar sistemi tarafından alınır. Şekil 1.5’ de bir Hava Trafik Kontrol Radarının temel iletişim parametreleri gösterilmektedir. Alıcı ve verici görevinde bulunan anten ve gelen sinyaller işleyerek radar ekranına yansıtan sistemden oluşmaktadır.

Yansıtılan radyo dalgalarının kayıpsız şekilde iletilmesi ve yansıldıktan sonra geri alınan radyo dalgalarının da doğru ve kayıpsız gelmesi için radom malzemesinin geçirgenliği çok önemlidir. Yansıma sonrası alınan radyo dalgalarındaki hatalar sistem tarafından yanlış yorumlamalara ve sonuçta sistemin hatalı çalışmasına sebep olacaktır [9].



Şekil 1.5. Hava Trafik Kontrol Radarı

1.3. Literatür Taraması

Literatür taramasında, radom imalatında ve onarımında malzeme seçimi, malzemelerin özelliklerinin incelenmesinde kullanılan deney yöntemleri ve analiz metotları incelenmiş, ayrıca radyo frekansı ve elektromanyetik geçirgenlik konuları araştırılmıştır.

M. Ece tarafından yapılan [10] bir çalışmada küçük ebatlı radom test numunelerinin sinyal geçirgenliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu etkiler incelenirken radom ve antenin farklı şekilde konumlandırılmaları durumunda oluşan değişiklikler ve geçirgenlik özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmada uçağın havadaki hareketlerini simüle eden bir test düzeneğini kurulmuş ve küçük ebatlı radom malzeme numuneleri ile yapılan çalışmada sinyal iletiminin sağlıklı bir biçimde çalıştığı tespit edilmiştir. Netice olarak, tasarlanan test düzeneğinin küçük ebatlı radom numuneleri ile de güvenilir sonuçlar verdiği sonucuna varılmıştır.

B. Audone ve arkadaşları tarafından yapılan [11] bir diğer çalışmada radom üreticilerinin dikkat etmesi gereken bazı anten özellikleri ortaya konmuştur. Bu kapsamda bir benzetim çalışması yapılarak, malzeme özelliklerini değiştirerek radyo frekansı geçirgenliğinin ne şekilde etkilendiği tespit edilmiştir. Ayrıca, malzeme özelliklerinin ve geometrisinin radom imalatında çok önemli iki parametre olduğu ortaya konmuştur.

R.U. Nair ve R.M. Jha [12] tarafından yapılan çalışmada havacılık sektöründe kullanılan radomların sahip olması gereken geometriler ortaya konmuş ve bu geometrik yapılardan kaynaklı duvar kalınlıkları değişimi ile bu kalınlıkların radyo frekansı geçirgenliğindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma sonucunda aerodinamik özelliklere göre üretilen değişken duvar kalınlıklı radomların elektromanyetik performansının sabit duvar kalınlıklı olarak üretilen radomlardan geçirgenlik açısından daha iyi olduğu ortaya konmuştur.

İ. Çor ve B. Saka [13] tarafından yapılan çalışmada farklı malzemeler kullanılarak malzeme kalınlık farklılıklarının etkileri ile radom ve anten pozisyonları dikkate alınarak bir çok benzetim çalışması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde tek katlı ve sandviç tip kompozit radomlarda kalınlık arttıkça elektro manyetik sinyal geçirgenliğinin olumsuz etkilendiği görülmüştür. Ayrıca, ara malzemenin kalınlığının farklı frekanslara göre geçirgenlik performansları ortaya konmuştur.

M. T. Aamir ve arkadaşlarınca yürütülen bir çalışmada [14] sandviç yapılı kompozit radomlar için çok disiplinli bir tasarım optimizasyonunu ele alınmıştır. Bu çalışmada, yapısal dayanıklılığı sağlarken elektromanyetik performansında artırılması temel hedef olarak belirlenmiştir. Çalışmada çeşitli analiz yazılımları kullanarak gerçekleştirilen benzetim çalışmaları ile çok disiplinli bir tasarım süreci ile radom üretimi yapılmıştır. Benzetim sonuçları ile üretilen radom kullanılarak yapılan deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Tasarım ile üretim arasında çok az fark gözlenmiştir. Bu sonuçlarla aerodinamik açıdan başarılı ve

elektromanyetik açıdan geçirgenliği çok iyi radomların benzetim çalışması ile tasarlanıp, üretilebileceği sonucuna varılmıştır.

Bilindiği üzere hava araçlarında radomlar yüksek sıcaklıklara maruz kalmaktadır. Dan ve J. Yang radomlarda geçirgenlik üzerinde yüksek sıcaklığın etkisini konu alan bir çalışma yapmıştır [15]. Bu yazarlar literatürü incelediklerinde sıcaklığın elektromanyetik yayılım üzerine olan etkileri ile ilgili birçok çalışma yapıldığını tespit etmişler, fakat yüksek sıcaklık sonucu oluşan ablasyonun (yüksek sıcaklık etkisi sonucu malzeme yüzeyinde oluşan aşınmalar) etkilerinin bu çalışmanın hiç birinde yer almadığını görmüşlerdir. Bu nedenle yaptıkları çalışmada [15] ablasyondan dolayı homojenliği bozulan radom duvarlarını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda sıcaklık ne kadar yüksekse ablasyonun o kadar arttığını görmüşler ve yüksek sıcaklık sonucu oluşan ablasyonun elektro manyetik yayılımı olumsuz yönde etkilediğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, geleneksel 3 katmanlı radomlarda yüksek sıcaklığın etkisinden ziyade ablasyondan dolayı eriyen katmanların elektro manyetik geçirgenliği etkilediğini tespit etmişlerdir.

H. Meng ve W. Dou tarafından radomların geçirgenliği ile ilgili milimetre dalga bandında bir çalışma yapılmıştır [16]. Bu dalga bandında yapılan analizlerde radom parçası kalınlığının elektro manyetik performansa etkisi incelenmiştir. Yapılan optimizasyon ile değişken katman kalınlığı içeren bir radom tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan değişken katman kalınlıklı radomun sabit katman kalınlıklı radoma göre güç iletme oranının %66'dan %86 ya çıktığı ortaya konmuştur.

M. H. Nişancı ve Ş. Ç. Yener tarafından yapılan bir çalışmada [17] frekans seçici yüzey malzemeleri ile ilgili benzetimler yapılmıştır. Bu çalışmada metal fiber katkılı malzemelerinin yönelimleri incelenmiş ve 90° lik açı dışında yönelimin bir etkisi olmadığını görmüşlerdir. Fiberlerin yönelimi 90° olduğunda katkılı malzemelerinin gelen dalganın polarizasyonuna dik olmasından dolayı frekans seçici yüzey malzemesinin bant durduran filtre karakteristiği göstermediği ortaya konmuştur.

B. Kışla ve Y. Yörük disiplinler arası bir çalışma ile havacılık standartlarına uygun olarak üretilen sandviç tip cam elyaf kompozit malzemenin elektromanyetik geçirgenliğini incelemiştir[18]. Bu çalışmada tek bir frekans bandında tek bir numune ile deneme yapılarak malzemenin geçirgenliği kontrol edilmiştir. Yapılan deney sonucunda hem havacılık standartlarına uygun hem de elektromanyetik geçirgenliği yüksek olan radom üretilebileceği belirlenmiştir.

J. Deng ve arkadaşları, çok disiplinli bir çalışma ile sandviç tip radomların tasarımında optimizasyonu incelemişlerdir [19]. Bu çalışma elektromanyetik performans ve

mekanik özelliklerin aynı anda dikkate alındığı bir tasarımı incelemektedir. Geleneksel yöntemler bu özelliklerin ayrı ayrı değerlendirilmesi şeklindedir, bu çok disiplinli çalışma ile zamandan ve ekonomik açıdan tasarruf edileceğini düşünmüşlerdir. Düşünceleri elektromanyetik model, üç boyutlu ışın izleme ve fiziksel optik tabanlı açıklık entegrasyonu yöntemleri kullanılarak doğrulanmıştır. Malzeme başarısızlıklarını öngörmek için Tsai–Wu kriteri ve maksimum stres kriteri kullanılmıştır. Yapısal kararlılık, sertlik matrislerinin lineer perturbasyonu kullanılarak analiz edilmiştir. Planlanan çok disiplinli tasarım optimizasyon modeli, iletim katsayısı ve boresight hatası açısından önemli iyileştirmeler sağlamıştır. Mekanik kısıtlamalar ise önceden belirlenmiş sınırlar içinde kalmıştır.

R. A. Pandhare ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada uçak ve radar sistemleri için ultra geniş bant radom duvarlarının tasarımını incelenmektedir [20]. Çalışmada, özellikle "A-Sandwich" yapısında çok katmanlı Frekans Seçici Yüzey (FSS) yapıları kullanılarak, elektromanyetik performansın nasıl artırılabilirliği anlatılmaktadır. Araştırmanın bir diğer hedefi, Radar Kesit Alanı (RCS) değerini düşürerek, radardan kaçınma yeteneğini artırmaktır. A-Sandwich yapısı, Nomex malzemesinden yapılan bir çekirdek tabakası ve sentetik köpükten oluşan kaplama katmanları ile oluşturulmuştur. Çalışmada merkez frekansı 14.875 GHz 'dir ve 7.75 GHz ile 22 GHz arasında çalışmak yapılmıştır. Çalışmada farklı açılardan gelen sinyaller için tasarımın performansı test edilmiştir. Radom numunesi, ayrıca bükülme analizine de tabi tutulmuştur. Çalışmada kullanılan çok katmanlı yapının, geleneksel tasarımlara göre daha geniş bant genişliği sunduğu ve düşük radar kesit alanı değerleri ile radar görünürlüğünü azalttığı belirtilmiştir. Bu çalışma, radom yapısının hem mekanik dayanıklılık hem de elektromanyetik performans açısından geliştirilmesini ele alarak, uçak ve radar sistemlerinin verimliliğini artırmayı hedeflemektedir.

Radom ile ilgili çalışmalarda elektromanyetik sinyallere karşı geçirgenlik kadar frekans seçici yüzey tasarımları da önem arz etmektedir. Yi Li ve arkadaşları yaptıkları çalışmada modern iletişim ve radar sistemleri için çift geçiş bantlı frekans seçici yüzeylerin (FSS) tasarımını ele alıyor [21]. Amaçları bu yüzeylerin yüksek açı stabilitesi ve polarizasyon duyarsızlığı ile performanslarını artırmaya odaklanmaktır. İki farklı frekans bandında çalışmayı yürütmüşlerdir. Bu frekanslar 8.45 GHz ve 12.76 GHz. 0° ile 86° arasındaki açılarda TE polarizasyon ve 0° ile 83° arasında TM polarizasyon için kararlı iletim sağlanmıştır. Bu sayede sinyal iletiminde minimum kayıp elde etmişlerdir. (1 dB' nin altında). Bu çalışmalarıyla, yüksek frekans uygulamalarında kullanılan FSS yapılarının hem

teorik hem de deneysel analizini sunarak, geniş bant performansı ve açısal stabiliteyi artırmayı amaçlamışlardır.

R. U. Nair, S. Shashidhara ve R. M. Jha çalışmalarında havacılık uygulamaları için homojen olmayan düzlemsel katman (IPL) radom tasarımını ele almaktalar [22]. Geleneksel olarak, radomlar tek tabakalı, yarım dalga kalınlığında duvarlardan yapılır ve belirli bir frekansta yüksek elektromanyetik (EM) performans sağlasa da farklı frekanslarda performansları düşmektedir. Bu problemi çözmek için çalışmada araştırmacılar, homojen olmayan düzlemsel katman (IPL) radom tasarımı önermektedirler. IPL radom tasarımında, geçirgenlik özellikleri katman boyunca üstel olarak değişmekte, yani katmanın içindeki malzeme özellikleri yavaşça farklılaşmaktadır. Bu yapının, geniş bir frekans aralığında daha iyi uyum sağladığı gözlemlenmiştir. Çalışmanın sonuçları, IPL radomun geleneksel monolitik radom tasarımlarına kıyasla çok daha üstün bir EM performans sunduğunu göstermektedir.

Uçaklarda bulunan burun konisi radomlar yüksek elektromanyetik performans gereksinimlerine sahiptir. P. S. M. Yazeen ve arkadaşları çalışmalarında burun konisi radomlarının iyileştirilmesini ele almaktadırlar [23]. Çalışmalarında, klasik sabit veya değişken kalınlıklı radom tasarımları yerine, dereceli dielektrik özelliklere sahip homojen olmayan bir duvar yapısı öneriyor. Bu yeni radom tasarımları, yedi farklı dielektrik katman içermekte ve ortadaki katmanın en yüksek dielektrik özelliklere sahip olmasıyla birlikte, katmanlar ortadan dışa doğru dereceli olarak azalacak şekilde yerleştirilmektedir. Dış yüzey de anti-statik ve aşınmaya karşı koruyucu bir kaplama ile kaplanmıştır. Çalışmanın bulguları, önerilen bu dereceli yapının X-bandında (10 GHz) çalışan radar antenleri için çok yüksek güç iletim verimliliği ve düşük yansıma gibi avantajlar sağladığını göstermektedir. Ayrıca, bu yapının üretilmesi sabit veya değişken kalınlıklı radomlara kıyasla daha kolay olduğu belirtilmekte ve performans avantajları daha geniş bir frekans aralığında devam ettiği söylenmektedir. Sonuç olarak, bu dereceli dielektrik özelliklere sahip homojen olmayan radom yapısının, yüksek performanslı havacılık uygulamaları için daha iyi bir çözüm sunduğu ortaya koymuşlardır.

Havacılık sektöründe olduğu kadar diğer alanlarda da radom performansları önem göstermektedir. F. Fitzek ve R. H. Rasshofer yaptıkları çalışmada otomotiv radar sensörleri için kullanılan radomları incelemişlerdir [24]. Çalışmada, yansımayı azaltmaya yönelik bir tasarımı ele almaktalar ve özellikle 77-81 GHz frekans bandında çalışacak yeni nesil radar sensörleri için yansıma sorunlarına çözüm aramaktalar. Radar sensörlerinin plastik kaplama veya boya arkasında çalışması yansıma sorunlarına yol açmakta ve bu durum, sensör

performansını düşürmektedir. Çalışmada, dörtlü dalga transformatörü yaklaşımının yetersiz olduğu gösterilerek, daha etkili bir yansıma azaltma yöntemi önerilmektedir. Kaburga profili adı verilen bir yapıyla katmanlı ortamlarda yansımalar azaltılmaya çalışılmıştır. Bu tasarımda, malzeme üzerine oluklu bir yapı işlenmiş ve böylece hem yansıma azaltılması hem de sıcaklık değişimlerine uyum sağlanması amaçlanmıştır. Simülasyon ve deney sonuçları, bu yöntemin yansıma seviyesini yaklaşık 7 dB düşürdüğünü ve klasik yöntemlere kıyasla daha etkili olduğunu göstermektedir.

H. N. Liu ve arkadaşları çalışmalarında 5 GHz frekansında çalışan bir anten radomu tasarlamışlar ve antenin sinyal gücünü artırmak için özel metamalzemeler kullanılmışlardır [25]. Meta-malzemeler, doğal olarak bulunmayan ancak özel yapılandırmalarla elde edilen malzemelerdir. Bu malzemeler, negatif kırılma indisi gibi olağandışı özellikler gösterir, bu da elektromanyetik dalgaların yönlendirilmesi ve şekillendirilmesinde yararlı olur. Çalışmanın benzetim sonuçlarına göre, radom eklenen antenin kazancı (sinyal gücü) yaklaşık 6 dBi'ye çıkarılmış ve ışın genişliği %37,5 oranında daraltılmıştır. Bu, sinyalin daha odaklanmış bir şekilde yayılmasını sağlarken, iletişim mesafesini artırdığı gözlenmiştir. Böylece, radomun tasarımı binalar arası noktadan noktaya iletişim gibi uygulamalarda kullanılabilir hale gelmiştir.

H. Chen, X. Hou, ve L. Deng çalışmalarında 9.5 GHz frekansında çalışan bir düzlemsel yarıklı dalga kılavuzu anteni için frekans-seçici yüzeyler (FSS) kullanılarak geliştirilmiş bir radom tasarımını anlatmaktalar [26]. FSS radomunun eklenmesiyle, antenin radar kesit alanında belirgin bir düşüş sağlandığı gözlenmiştir. Tasarlanan FSS radomu, 7.8–11.2 GHz aralığında geniş bir bant genişliğine sahip olup, merkez frekansta (9.5 GHz) yüksek performans göstermektedir. FSS radom, antenin iletim kayıplarını azaltırken yüksek geçirgenlik sunmaktadır. Ancak, çift katmanlı FSS kullanımı, polarizasyon saflığında hafif bir bozulma ve yanal lob seviyelerinde artış gibi bazı küçük performans etkilerine yol açabildiği görülmüştür. Bu çalışma, FSS teknolojisi ile geliştirilen radomun, özellikle radar sistemleri ve kablosuz iletişim uygulamaları için potansiyel faydalarını göstermektedir.

Yapılan araştırmalar incelendiğinde radom imalatında ticari ve operasyonel konulara dikkat edildiği görülmüştür. Radyo frekansı geçirgenliği ve mekanik özelliklerinin getirdiği avantaj sebebi ile cam elyaf kompozit malzeme üzerinde durulmaktadır. Çoğu üretici istenilen geçirgenliği sağladığı için anten özelliklerini bilmeden radom imal etmektedir. Literatürdeki deney ve analiz çalışmalarında da görüldüğü üzere malzeme kalınlığı ve geometrisi, anten pozisyonu, radom pozisyonu gittikçe artan bir şekilde ele alınmaya

başlanmıştır. Fiber malzemenin serim şeklinin ve monolitik ya da sandviç yapılı kompozit malzemenin elektromanyetik geçirgenliğine ilişkin çalışmalara çok sıklıkla karşılaşılmamaktadır.

1.4. Amaç

Radar ve anten sistemlerinin önemi, sivil ve askeri uygulamalarda gelişen teknoloji ile birlikte artmaktadır. Bu sistemlerin sağlıklı çalışabilmesi için sinyallerin doğru ve kayıpsız biçimde iletilmesi ve yansıyan sinyallerin de doğru ve kayıpsız alınması gerekmektedir. Radomların radyo dalgalarını geçirgenliği bu sebeple giderek kritikleşmektedir. Bu geçirgenlikten dolayı endüstride kullanılabilecek malzemeler kısıtlı durumda olduğu için mevcut malzemelerde yapılabilecek iyileştirmelerde sistemlerin doğru çalışmasına büyük katkı sağlayacaktır [18] .

Birçok alanda kullanılan radom malzemeleri, üretim, maliyet ve geçirgenlik açısından değerlendirildiğinde endüstride cam elyaf ve epoksi den oluşan kompozit malzemelerin kullanımı yaygındır. Bu kompozit malzeme hem gerekli geçirgenlik değerlerini sağlamakta hem de fiziki şartlara karşı başarılı bir şekilde direnç göstermektedir.

Cam elyaf kompozitler üretilirken malzemenin kullanım amacı, maruz kalacağı şartlar gibi birçok faktör göz önünde bulundurulur. Bu faktörlerden bir tanesi de cam elyafların oryantasyonudur. Cam liflerinin oryantasyonu özellikle malzemenin dayanım değerlerini şekillendirdiğinden istenilen malzemeye göre oryantasyon belirlenmektedir.

Endüstriyel çalışmalarda ve literatüre bakıldığında bu oryantasyonlar malzemenin fiziksel özellikleri açısından ele alınmaktadır.

Bu tez çalışmasının amacı malzemenin dayanım değerlerinde kritik bir öneme sahip olan fiber oryantasyonlarının ve monolitik ya da sandviç yapının radyo dalgaları geçirgenliğinde etkisi olup olmadığını gözlemlemektir.

Bu çalışmada aynı kalınlıkta farklı oryantasyonlara sahip cam elyaf kompozit numuneler imal edilerek radyo dalgaları geçirgenlikleri arasında fark olup olmadığı incelenmiştir. Ayrıca endüstride ağırlığa minimum etkide bulunarak dayanıklılığı arttırmak amacıyla kullanılan nomex bal peteği çekirdek malzeme ile yapılan sandviç tip malzemeyi de gözlemlemek için arasında nomex bal peteği çekirdek bulunan farklı oryantasyonlara sahip numuneler üzerinde de inceleme yapılmıştır.

2. BENZETİM VE TEST ÇALIŞMALARI

2.1. Malzeme Seçimi ve Üretimi

Bu çalışmada, malzeme seçimi için dikkate alınan noktalar şu şekildedir. Öncelikle radom imalatında genel olarak kullanılan cam elyaf takviyeli kompozit malzeme test malzemesi olarak tercih edilmiştir. Cam elyaf düşük dielektrik sabite sahiptir. Düşük dielektrik sabiti elektromanyetik geçirgenliği temsil etmektedir, düşük değerler radar sinyalinin en az kayıpla yayınlanmasını sağlamaktadır. Radom anten ya da radarı dış şartlardan korumak için tasarlanmıştır. Radom bulunduğu platforma göre birçok farklı dış ortam şartına maruz kalmaktadır. Bundan dolayı tasarımda aranan diğer bir özellik de fiziki dayanımdır. Ayrıca platform üzerindeki ağırlığını da minimum seviyede tutmak gerekmektedir. Bu özellikler dikkate alındığında radom malzemesi olarak cam elyaf öne çıkmaktadır.

Dayanım gerektirmeyen yapılarda belirli seviyede ortam şartlarından korumak için daha ince yapıda bulunan monolitik kompozit malzeme tercih edilmektedir. Monolitik kompozit malzeme iki temel elemandan oluşmaktadır. Bu kapsamda, deney çalışmamızda takviye elemanı olarak cam fiber, matris elemanı olarak epoksi bazlı malzeme tercih edilmiştir. İlk olarak fiber oryantasyonları farklı olan monolitik numuneler üretilmiştir. Fiziki özellikleri arttırmak fakat ağırlıktan tasarruf etmek için radom üretiminde bu malzemelere ilave olarak nomex bal peteği çekirdek malzeme kullanılması tercih edilmiştir. A tipi sandviç olarak tabir edilen sandviç kompozit yapı için iki cam elyaf katman arasına nomex bal peteği çekirdek malzeme konulmak suretiyle numune üretilmiştir.

Numune Üretimi TUSAŞ A.Ş. Kompozit Üretim Atölyesinde gerçekleştirilmiştir. Cam elyaf malzeme olarak ” PREPREG GLASS FABRIC, HEXPLY, M21/56RC/1080” olarak bilinen Pre-impregnated malzeme tercih edilmiştir. Bu malzemenin özellikleri ve tercih edilme sebepleri takip eden paragraflarda özetlenmiştir.

- a. HexPly: Hexcel Corporation tarafından üretilen bir marka adıdır. HexPly ürünleri, çeşitli uygulamalarda kullanılan yüksek performanslı Pre-impregnated kompozit malzemelerdir.

- b. Prepreg: "Pre-impregnated" kelimesinin kısaltmasıdır ve reçineyle önceden doyurulmuş elyaf malzemeleri ifade eder. Prepreg malzemeler, üretim sırasında ek bir reçine veya yapıştırıcı uygulaması gerektirmez.
- c. HexPly M21: Uçak ve uzay uygulamaları için yaygın olarak kullanılan bir prepreg türüdür. Yüksek sıcaklıklara dayanıklı ve yüksek mekanik performans sunar. Bu prepregde dokuma cam elyaf kullanılmaktadır.

M21/56RC/1080

- a. M21: Belirli bir reçine sistemini ifade eder. M21 reçine sistemi, yüksek sıcaklık dayanımı ve mükemmel mekanik özellikler sunar.
- b. 56RC: Reçine içeriği yüzdesini ifade eder. 56RC ifadesi %56 reçine içeriği bulunduğu anlamına gelmektedir.
- c. 1080: Kullanılan cam kumaşın türünü ve dokuma stilini ifade eder. 1080, hafif ve ince cam elyaf kumaşıdır, genellikle yüksek performanslı kompozit yapıların yüzey katmanlarında kullanılır.

Özellikler ve Uygulamalar

- a. Yüksek Performans: Uçak gövdeleri, kanatlar ve diğer yüksek performanslı kompozit yapılar gibi zorlu uygulamalarda kullanılır.
- b. Mükemmel Mekanik Özellikler: Yüksek çekme ve basınç mukavemeti sunar, yapısal uygulamalar için ideal bir özelliktir.
- c. Isı Dayanımı: Yüksek sıcaklıklarda bile mekanik özelliklerini korur.
- ç. Düşük Ağırlık: Hafif bir malzeme olduğundan, özellikle havacılık ve uzay endüstrilerinde ağırlık tasarrufu sağlar.

HexPly M21/56RC/1080 türü malzemeler, havacılık, uzay, otomotiv, spor ekipmanları ve diğer endüstriyel uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahiptir. HexPly M21/56RC/1080, özellikle yüksek performans ve dayanıklılık gerektiren yerlerde tercih edilir.

Bu tez kapsamında kullanılan numune üretimleri el yatırma tekniği kullanılarak yapılmıştır. Prepreg malzemeler planlanan oryantasyonda düz kalıp malzemesi üzerine serilmiştir. Kalıp malzemesi için düz alüminyum plaka kullanılmış ve numunelerin üretim sonrası kolay ayrılmasını sağlamak amacıyla kalıbın üst yüzeyine ayırıcı sürülmüştür. Daha

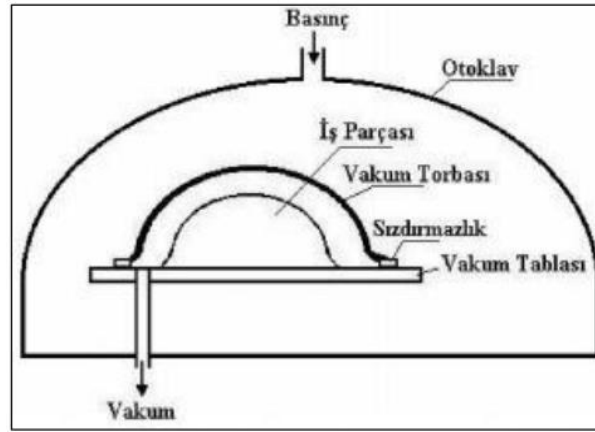
sonrasında Prepreg malzemeler planlanan oryantasyonlarda üst üste serimi gerçekleştirilerek otoklav için hazır hale getirilmiştir.

Cam Elyaf Oryantasyonu

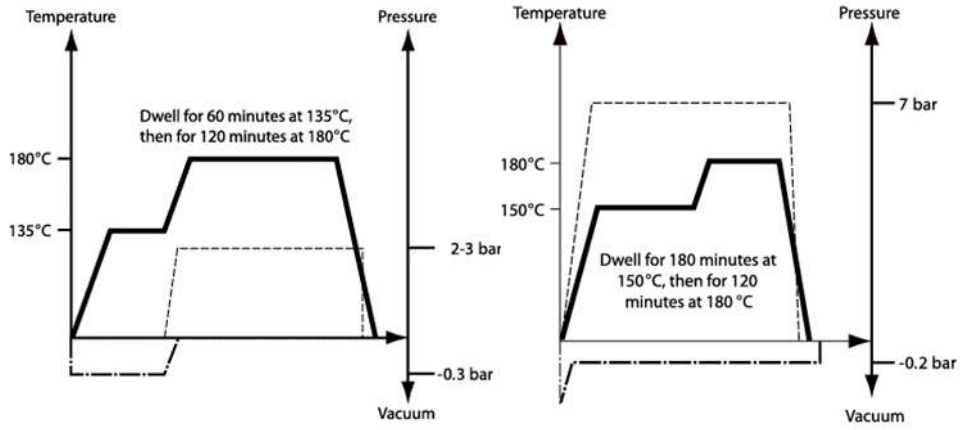
Aşağıda numuneler üretilirken dikkat edilen cam elyaf liflerinin oryantasyonları tarif edilmektedir. Cam elyaf lifleri birbirleri ile aralarında 90^0 açı bulunacak şekilde dokunurlar. Bu nedenle, serim işlemi sırasında kullanılan prepreg malzeme fiberler birbirine dik dokunmuş olduğundan belirlenen 0^0 eksenine göre prepereg konumlandırılken 0^0 , 90^0 açı yapacak şekilde serim yapılmıştır. $\pm 45^0$ fiber oryantasyonları ise prepereg malzeme döndürülerek $\pm 45^0$ olacak şekilde elyaf lifleri konumlandırılmıştır.

1. $[\pm 45/0, 90/\pm 45/0, 90/\pm 45]4S$ (Monolitik 1)
2. $[\pm 45/\pm 45/0, 90/\pm 45/\pm 45]4S$ (Monolitik 2)
3. $[\pm 45/\pm 45/0, 90/\pm 45/\pm 45]2S$ Nomex Core $[\pm 45/\pm 45/0, 90/\pm 45/\pm 45]2S$ (Sandviç 1)
4. $[\pm 45/0, 90/\pm 45/0, 90/\pm 45]2S$ Nomex Core $[\pm 45/0, 90/\pm 45/0, 90/\pm 45]2S$ (Sandviç 2)

Otoklav, Şekil 2.1’ de şematik olarak da gösterildiği üzere genellikle yüksek sıcaklık ve basınç altında kürleme işlemlerini gerçekleştirmek için kullanılan bir cihazdır. Kürleme sırasında kompozit malzeme Şekil 2.2’ de bulunan grafikler dikkate alınarak istenilen sıcaklık ve basınç değerlerine belirli aşamalarla getirilir, istenilen sıcaklık ve basınçta üretici firma tavsiyesi de dikkate alınarak bir süre bekletildikten sonra tekrar kontrollü bir şekilde soğutulur. Bu sırada kompozit parçalar vakum altında da tutularak katmanlar arası boşluklar giderilmiş olur.

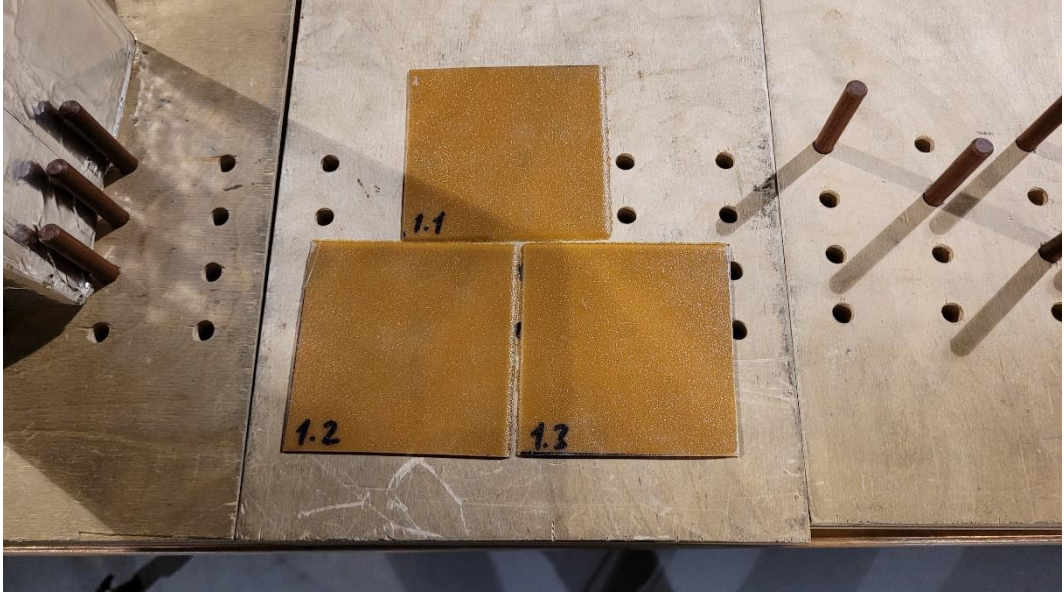


Şekil 2.1. Otoklav Şeması

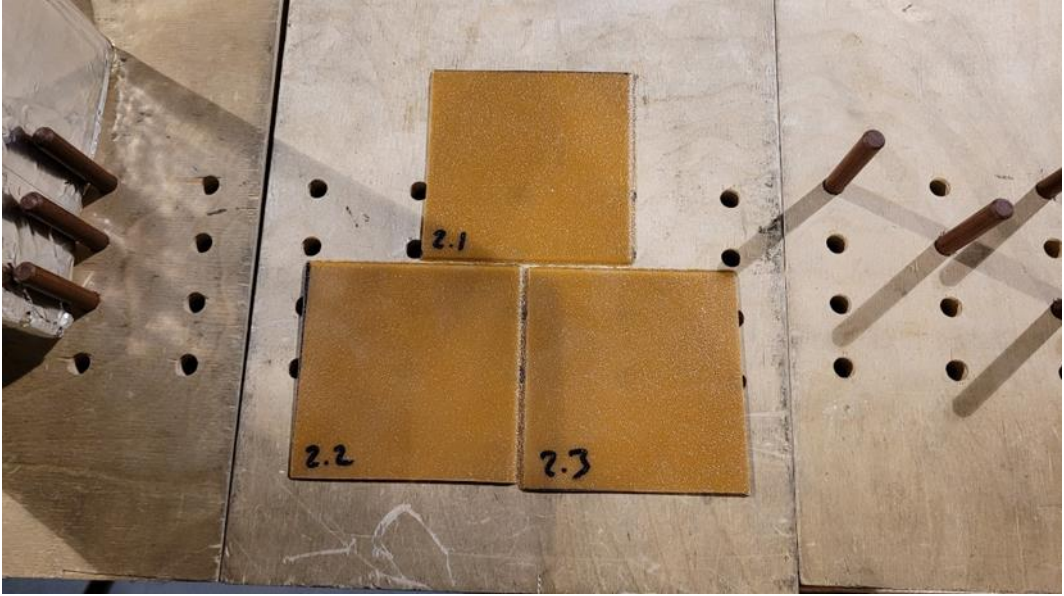


Şekil 2.2. Ürün teknik föyünden alınan Otoklav Sıcaklık/Basınç - Zaman Grafiği (Monolitik Numune için Sol - Sandviç Numune İçin Sağ)

Numuneler 200X200mm ölçülerinde üretici firmanın önerileri dikkate alınarak üretilmiştir. Daha sonra numuneler 100mmX100mm ölçülerinde olacak şekilde her biri 4 parçaya bölünmüştür. Her oryantasyondaki numuneden 3'er adet test numunesi elde edilmiştir. Şekil 2.3, Şekil 2.4 ile Monolitik olarak üretilen Monolitik 1 ve Monolitik 2 numunelerinin fotoğrafları gösterilmektedir. Şekil 2.5 ve Şekil 2.6 da ise Sandviç yapıda üretilen Sandviç 1 ve Sandviç 2 numunelerinin fotoğrafları gösterilmektedir.



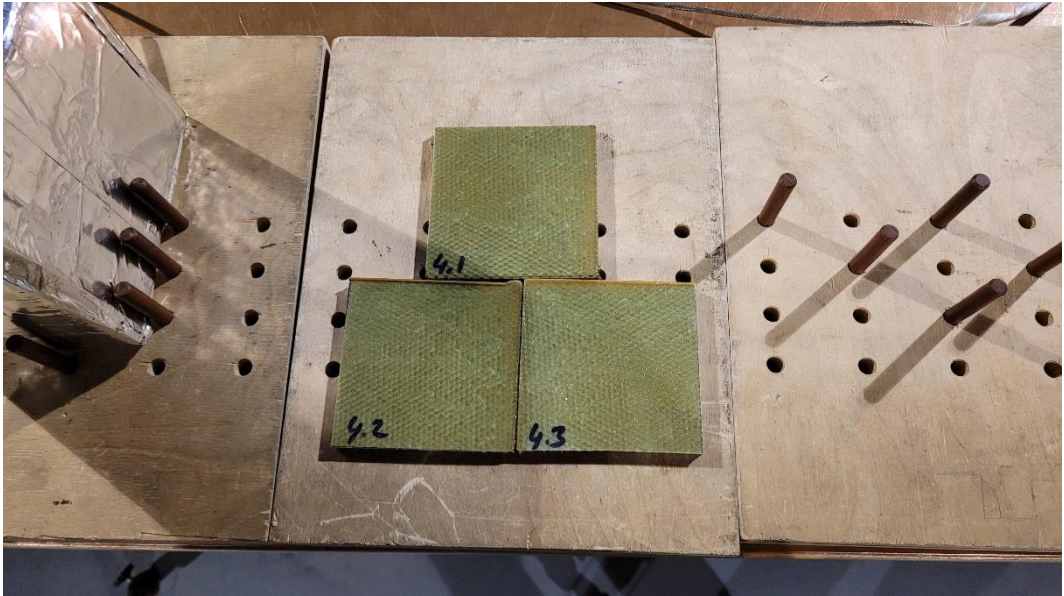
Şekil 2.3. Monolitik 1 /M1



Şekil 2.4. Monolitik 2 /M2



Şekil 2.5. Sandviç 1 /S1



Şekil 2.6. Sandviç 2 /S2

2.2. Deneyin Yapılışı

EMI (Elektromanyetik Girişim) ve EMC (Elektromanyetik Uyumluluk) laboratuvarları, elektronik cihazların elektromanyetik çevreye olan etkilerini ve bu çevreden nasıl etkilendiklerini test eden ve değerlendiren özel laboratuvarlardır. Bu laboratuvarların başlıca özellikleri ve amaçları şunlardır:

- Yankısız Oda (Anechoic Chamber): Elektromanyetik dalgaların yansımalarını önleyen odalar, hassas ve doğru ölçümler yapmak için kullanılır.
- Yankılama Odası (Reverberation Chamber): Elektromanyetik dalgaların çeşitli yönlerden gelerek cihaz üzerinde nasıl bir etki yarattığını test etmek için kullanılır.
- EMC Test Receiver ve Spektrum Analizör: Elektromanyetik sinyalleri ölçmek ve analiz etmek için kullanılır.
- Antenler: Çeşitli frekans aralıklarında sinyal alımı ve gönderimi için kullanılır.

Numune üretiminin tamamlanmasının ardından üretilen numunelerin Şekil 2.7 ve Şekil 2.8’de gösterilen EMI/EMC laboratuvarındaki test düzeneği kullanılarak testler yapılmıştır.

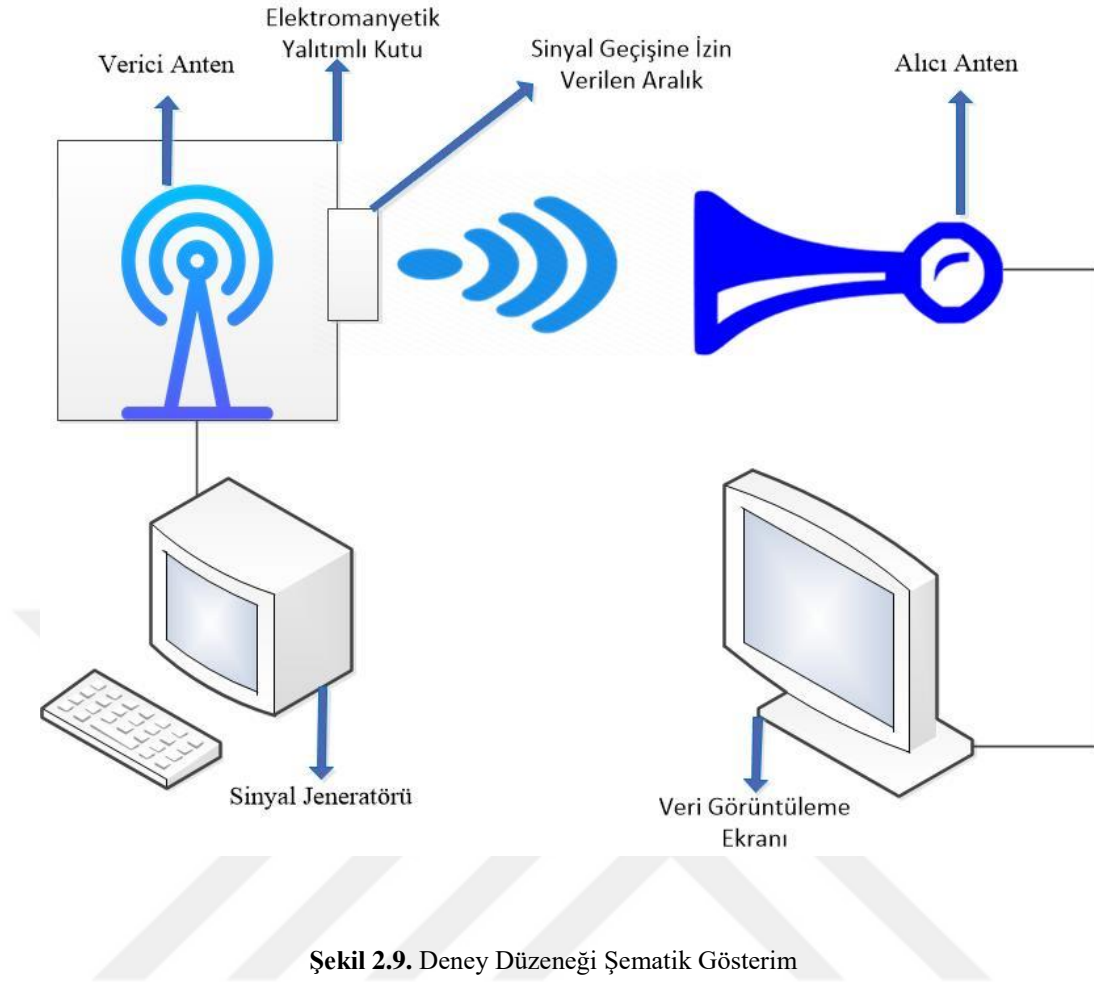


Şekil 2.7. EMI/EMC Odası İç Alan



Şekil 2.8. EMI/EMC Odası Dış Görünüm

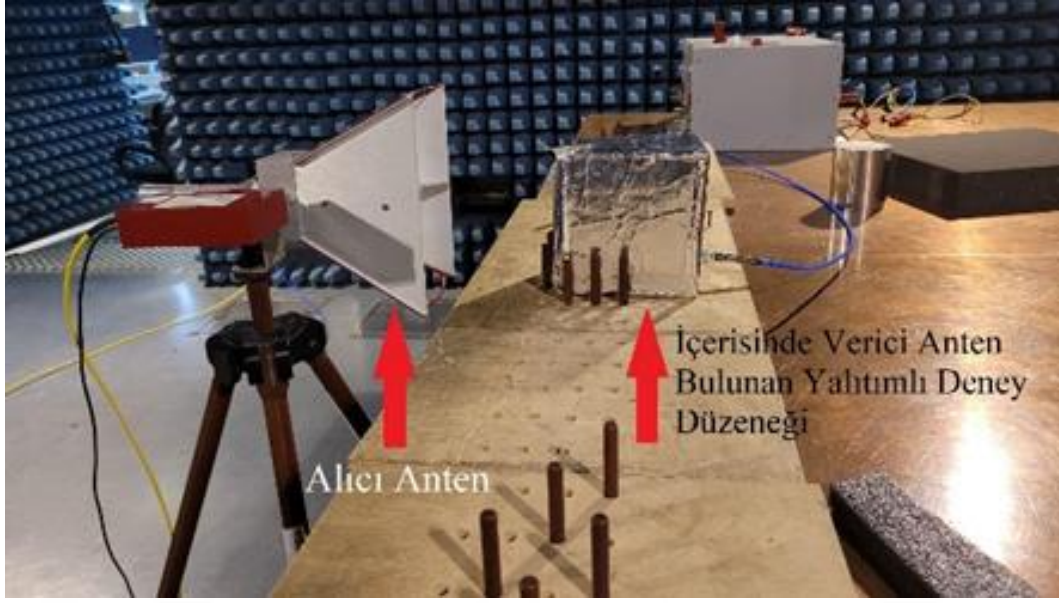
Deney EMI/EMC laboratuvarında yapılarak yukarıda belirtilen özelliklerden faydalanılıp daha hassas ve sağlıklı ölçüm yapılması amaçlanmıştır. Deney için laboratuvarında benzer radomların testinde kullanılan alıcı ve verici anten kullanılmıştır. Numunelerin antenler arasına sabit bir şekilde konulmasını sağlamak ve alıcı ile verici anten arasında iletilen sinyalin sadece radom üzerinden geçebilmesi için özel düzenek hazırlanmıştır. Bu düzenek radom konulacak tarafta açıklık bırakılacak şekilde her tarafından elektromanyetik olarak yalıtılmıştır. Düzenek içerisine konulan verici anten ile sinyal yayını yapılmıştır. Yapılan yayın sırasında bu yalıtımın sağlıklı çalıştığını kontrol edilmesi amacıyla EMI/EMC laboratuvarında sinyal kaçağı test edilmiş ve açıklık dışından sinyal çıkışı olmadığı gözlenmiştir. Sadece açıklık bölgesinden sinyal alınmıştır. Düzenneğin uygunluğu kontrol edildikten sonra sabitleilmiş ve açıklık olan bölgenin karşısına gelecek şekilde alıcı anten yerleştirilmiştir [27]. Şekil 2.9’da oluşturulan deney düzeneği şematik olarak gösterilmiştir.



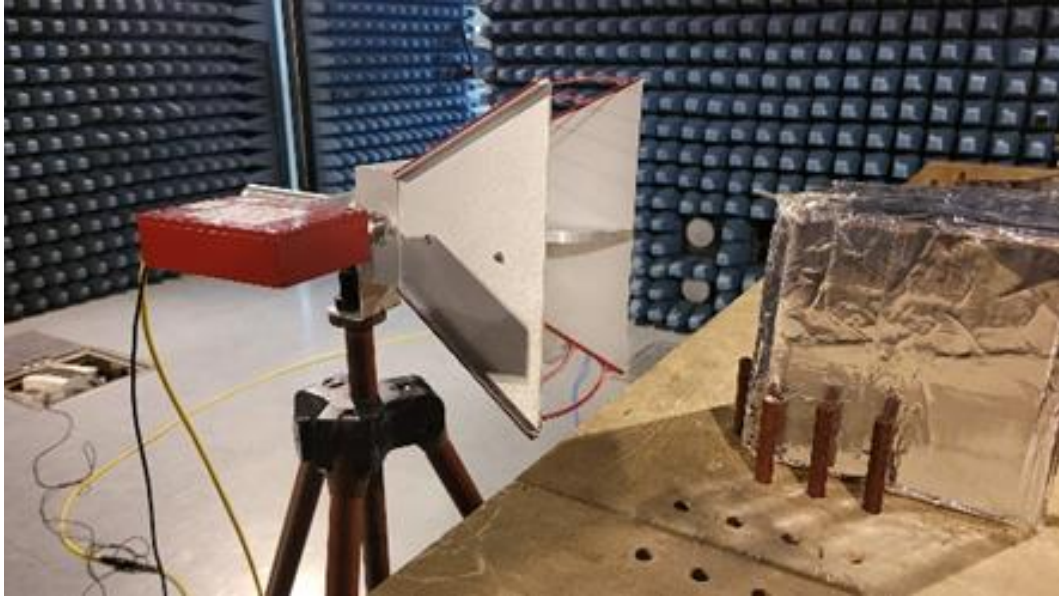
Şekil 2.9. Deney Düzeneği Şematik Gösterim

Düzenek test için hazır hale getirildikten sonra radom malzemesi kullanılmadan mevcut sistemin sinyal iletimi ölçümleri 2 GHz, 4 GHz, 6 GHz, 8 GHz, 10 GHz, 12 GHz frekanslarında yapılmıştır. Daha sonra radom kullanılarak yapılan deneyler ile kıyaslamak için bu frekanslarda numune konulmayan test düzeneğinde oluşan kayıplar incelenmiştir.

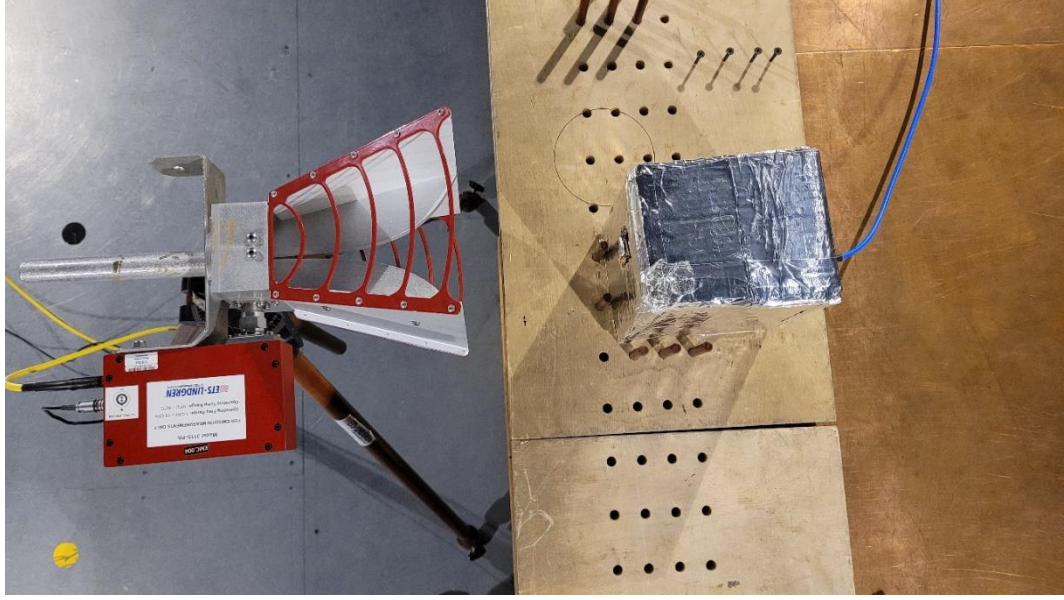
Farklı frekanslarda inceleme yapılmasının sebebi antenlerin çalışmaya uygun oldukları frekanslarda geniş bir tarama yaparak farklı frekanslarda oluşabilecek değişimleri gözlemleyebilmektir. Radomlar geniş bir kullanım alanına sahip olduklarından birçok değişik frekans aralığında çalışmaları gerekmektedir. Bu deney sayesinde farklı frekanslar için radom'un performansı gözlemlenebilecektir. Şekil 2.10, Şekil 2.11 ve Şekil 2.12'de hazırlanan test düzeneği detaylı olarak gösterilmektedir. Şekil 2.13 ve Şekil 2.14'de numuneler konulduktan sonraki test düzeneği gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Boş Deney Düzeneği



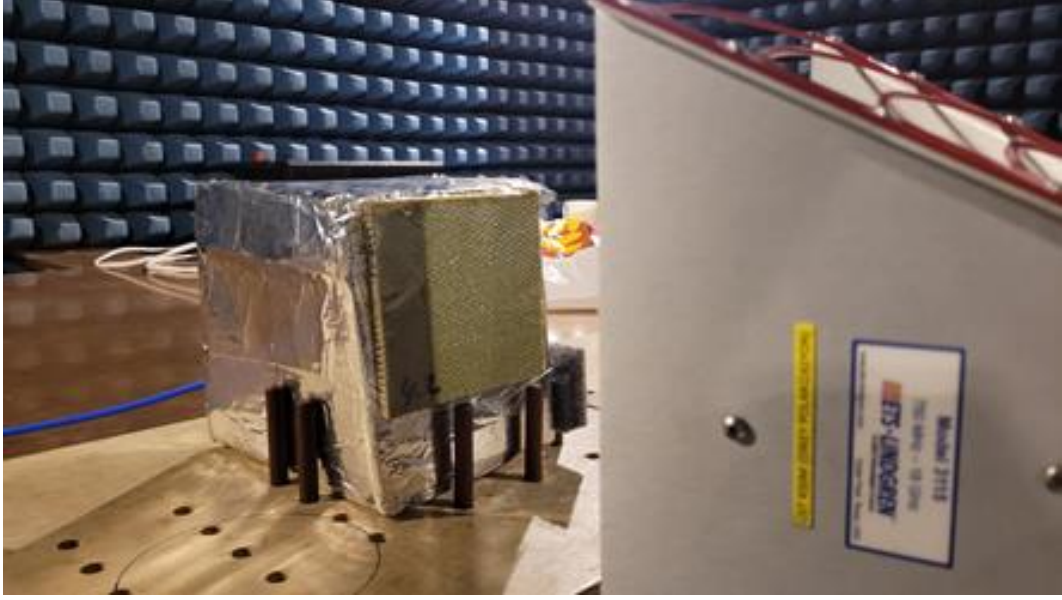
Şekil 2.11. Boş Deney Düzeneği



Şekil 2.12. Boş Deney Düzeneği



Şekil 2.13. Numuneler ile Deney Düzeneği



Şekil 2.14. Numuneler ile Deney Düzeneği

3. ELDE EDİLEN BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Yapılan çalışmada her dizilimdeki malzemeden 3 er adet numuneye, verici çok yönlü anten ile 2GHz, 4GHz, 6GHz, 8GHz, 10GHz, 12GHz frekanslarında -10 dB genliğinde sinüs dalga manyetik alan yayılmıştır ve alıcı horn anten ile dikey ekseninde dinleme yapılmıştır. Toplamda antenler arasında numune bulunmadan yapılan ölçümler ile birlikte Tablo 1 ve Tablo 2 de gösterilen 78 adet deney sonucu alınmıştır. Bu sonuçlar her dizilimdeki malzeme için ayrı ortalama alınmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 3’ te sunulmuştur. Bu ortalama sonuçlar grafik haline getirilmiştir. Bu grafikler her frekans için ayrı şekilde malzemeler arasındaki kıyaslamayı içermektedir. Şekil 3.1’ de 2 GHz frekansında, Şekil 3.2’ de 4 GHz frekansında, Şekil 3.3’ te 6 GHz frekansında, Şekil 3.4’ de 8 GHz frekansında, Şekil 3.5’ te 10 GHz frekansında ve Şekil 3.6’ da 12 GHz frekansında alınan sinyal gücü değerleri grafik olarak gösterilmektedir.

Tablo 1. Frekanslara göre Monolitik numune kullanımı sonrası alınan sinyal değerleri

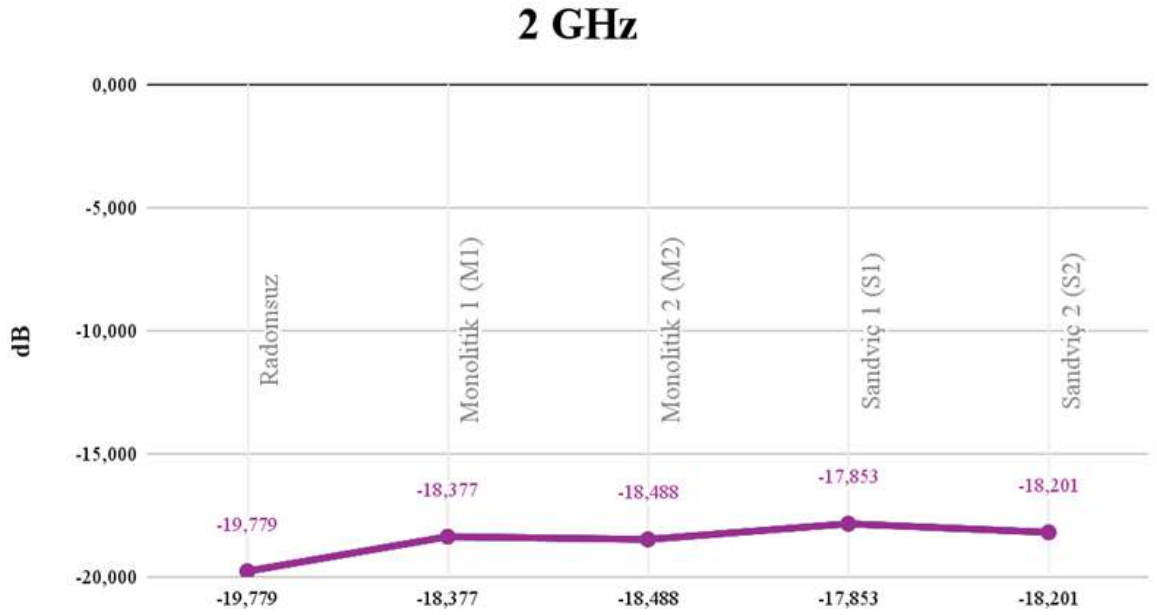
	Radomsuz dB	M 1.1 dB	M 1.2 dB	M 1.3 dB	M 2.1 dB	M2.2 dB	M 2.3 dB
2 GHz	-19,779	-17,881	-18,886	-18,365	-18,765	-18,59	-18,109
4 GHz	-12,853	-11,235	-12,014	-11,284	-11,996	-12,21	-13,404
6 GHz	-10,626	-11,833	-10,833	-11,554	-11,063	-10,273	-10,133
8 GHz	-23,261	-24,605	-26,215	-24,927	-26,784	-26,388	-27,341
10 GHz	-30,138	-30,316	-29,895	-31,323	-28,778	-30,136	-29,12
12 GHz	-28,719	-27,731	-28,682	-26,625	-26,558	-28,899	-28,736

Tablo 2. Frekanslara göre Sandviç numune kullanımı sonrası alınan sinyal değerleri

	Radomsuz dB	S 1.1 dB	S 1.2 dB	S 1.3 dB	S 2.1 dB	S 2.2 dB	S 2.3 dB
2 GHz	-19,779	-18,229	-17,564	-17,765	-18,465	-17,293	-18,844
4 GHz	-12,853	-13,409	-13,657	-12,095	-12,638	-12,652	-12,293
6 GHz	-10,626	-10,199	-9,828	-9,706	-9,373	-9,993	-9,991
8 GHz	-23,261	-26,914	-27,379	-27,936	-27,956	-27,735	-27,499
10 GHz	-30,138	-30,964	-31,446	-33,95	-33,616	-32,304	-33,713
12 GHz	-28,719	-28,785	-29,043	-28,598	-30,782	-25,541	-26,204

Tablo 3. Frekanslara göre numune kullanımı sonrası alınan sinyal değerleri ortalamaları

	Radomsuz dB	Monolitik 1 (M1) dB	Monolitik 2 (M2) dB	Sandviç 1 (S1) dB	Sandviç 2 (S2) dB
2 GHz	-19,779	-18,377	-18,488	-17,853	-18,201
4 GHz	-12,853	-11,511	-12,537	-13,054	-12,528
6 GHz	-10,626	-11,407	-10,490	-9,911	-9,786
8 GHz	-23,261	-25,249	-26,838	-27,410	-27,730
10 GHz	-30,138	-30,511	-29,345	-32,120	-33,211
12 GHz	-28,719	-27,679	-28,064	-28,809	-27,509



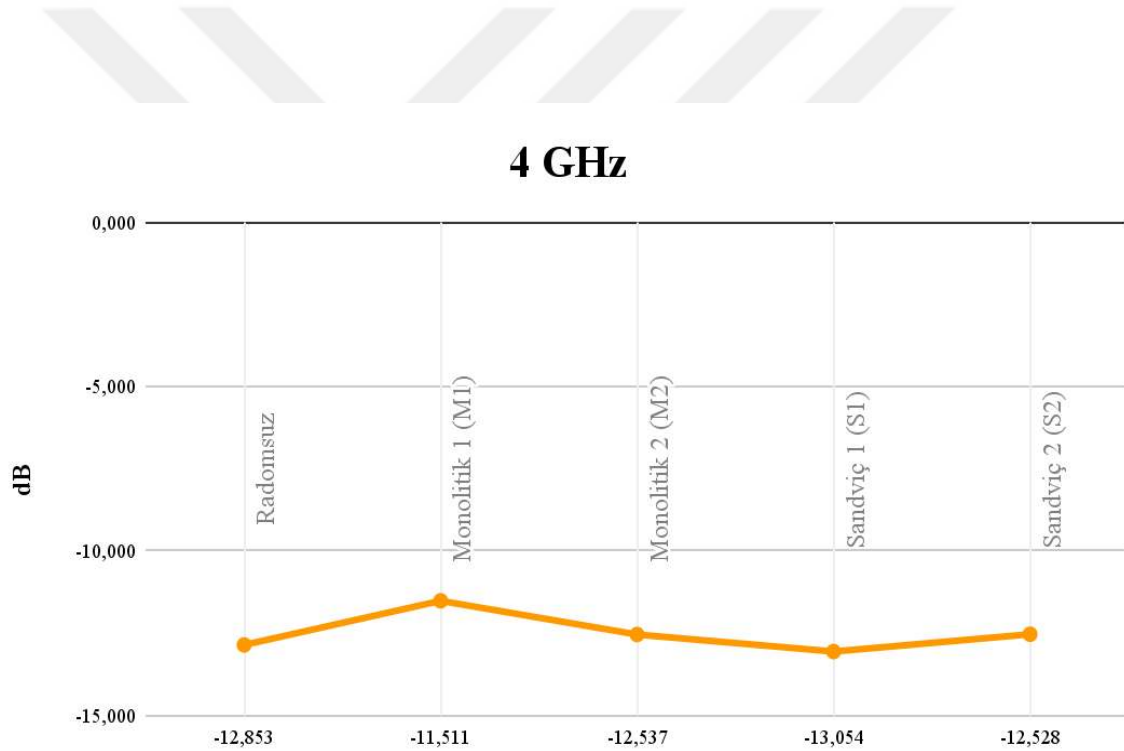
Şekil 3.1. 2 GHz frekans bandında alınan sinyal gücü değerleri

2 GHz frekansında yapılan -10dB genlikli yayında kompozit radom numunesi konulmayan deney düzeneğinde 9,779 dB' lik bir kayıpla yayın alıcı anten tarafından alınmıştır. Oluşan bu kayıp deney düzeneği ve ortam kayıpları ve oluşan yansılardan kaynaklanmaktadır. Sırası ile numuneler düzeneğe yerleştirildikten sonra yapılan ölçümler Şekil 3.1 de gösterilmiştir.

Tablo 4. 2 GHz frekans bandında numuneler arasında tespit edilen sinyal gücü değer farkları

	Radomsuz-M1 dB	Radomsuz-M2 dB	Radomsuz-S1 dB	Radomsuz-S2 dB	M1-M2 dB	S1-S2 dB	M-S dB
2GHz	1,402	1,291	1,946	1,578	0,111	0,348	0,405

Tablo 4’te gösterilen 2 GHz bandında gözlemlenen bulgular değerlendirildiğinde farklı fiber yönelimine sahip numuneler arasındaki bu ufak farklar değerlendirmeye alınmayacak ölçekte dir. Bu tür farklar her türlü testte ortama bağlı olarak gözlemlenebilmektedir. Radom kullanımının etkisi olduğu görülse de fiber oryantasyonlarındaki değişimin önemli bir etki yaratmadığı gözlenmiştir.



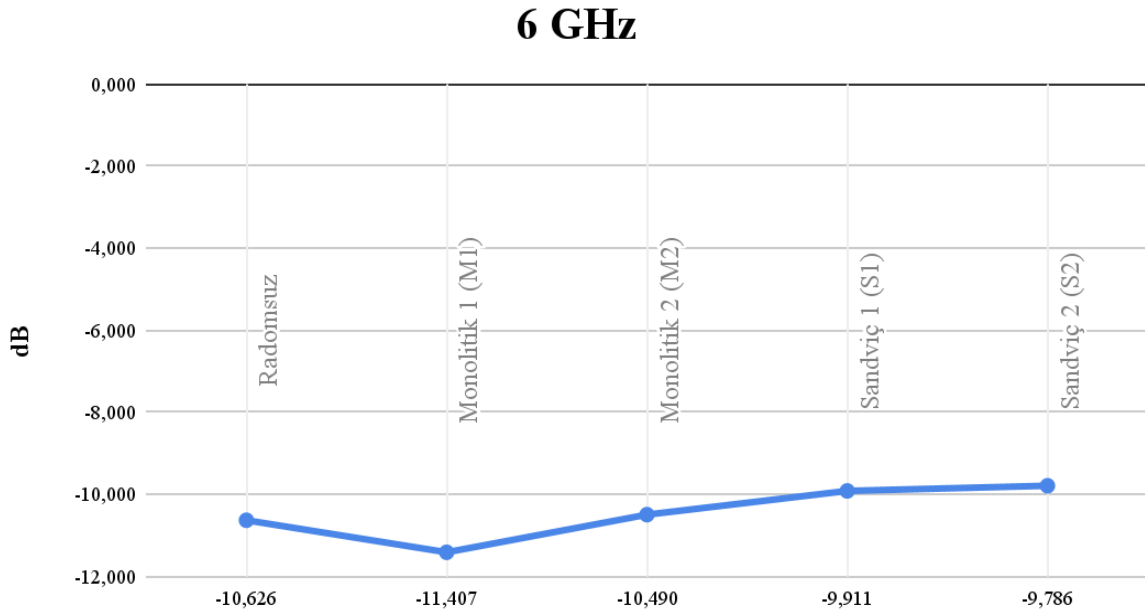
Şekil 3.2. 4 GHz frekans bandında alınan sinyal gücü değerleri

4 GHz frekansında, kompozit radom numunesi bulunmayan deney düzeneğinde yayın, alıcı anten tarafından 2,853 dB’lik bir kayıpla alınmıştır. Numuneler sırayla düzeneğe yerleştirildikten sonra yapılan ölçümler kaydedilmiş ve Şekil 3.2’de grafiksel olarak sunulmuştur.

Tablo 5. 4 GHz frekans bandında numuneler arasında tespit edilen sinyal gücü değeri farkları

	Radomsuz-M1 dB	Radomsuz-M2 dB	Radomsuz-S1 dB	Radomsuz-S2 dB	M1-M2 dB	S1-S2 dB	M-S dB
4GHz	1,342	0,316	0,201	0,325	1,026	0,526	0,767

Tablo 5’te gösterilen 4 GHz bandında gözlemlenen bu küçük farklar, değerlendirme açısından önemsiz kabul edilmiştir. Bu tür farklar, çeşitli testlerde ortam ve ölçüm koşullarına bağlı olarak sıklıkla gözlemlenebilir. Fiber oryantasyonundaki değişimlerin geçirgenliğe etkisi gözlenmemiştir.



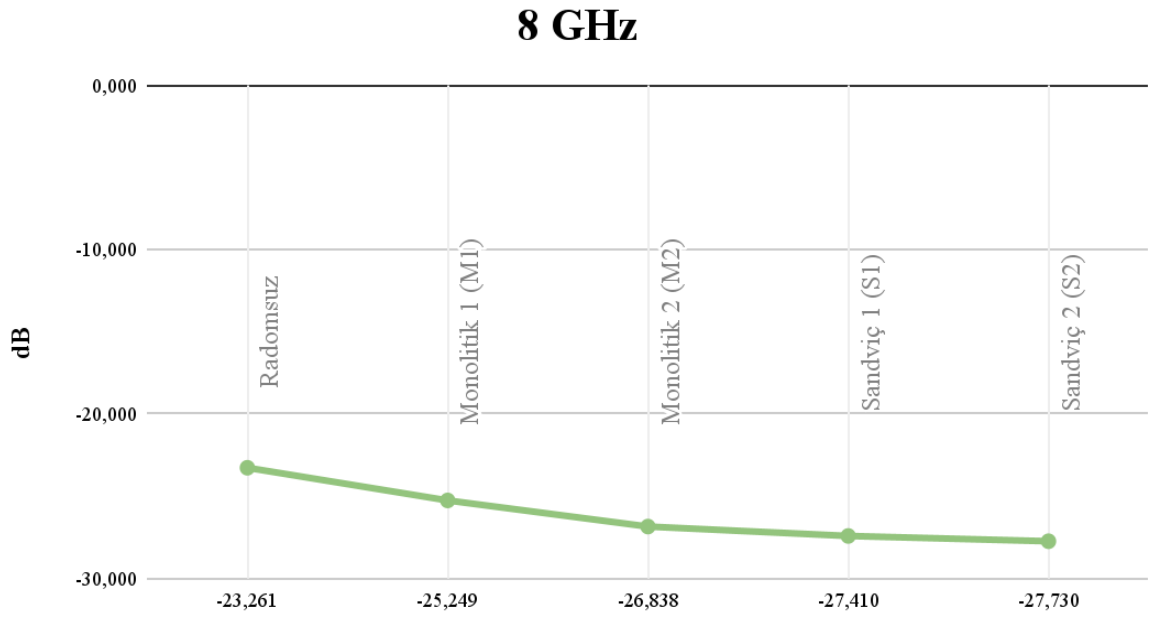
Şekil 3.3. 6 GHz frekans bandında alınan sinyal gücü değerleri

6 GHz frekansında yapılan yayında kompozit radom numunesi konulmayan deney düzeneğinde neredeyse kayıpsız şekilde 0,626 dB lik bir farkla yayın alıcı anten tarafından alınmıştır. Sırası ile numuneler düzeneğe yerleştirildikten sonra yapılan ölçümler kaydedilmiştir ve Şekil 3.3’ de grafik olarak gösterilmektedir.

Tablo 6. 6 GHz frekans bandında numuneler arasında tespit edilen sinyal gücü değer farkları

	Radomsuz-M1 dB	Radomsuz-M dB2	Radomsuz-S1 dB	Radomsuz-S2 dB	M1-M2 dB	S1-S2 dB	M-S dB
6GHz	0,781	0,136	0,715	0,840	0,917	0,125	1,099

Tablo 6’ da gösterilen 6 GHz bandında tespit edilen bu küçük farklar, değerlendirme açısından önemsiz kabul edilmiştir. Bu tür farklılıklar, ölçüm ortamı ve koşullarına bağlı olarak her türlü testte ortaya çıkabilir.



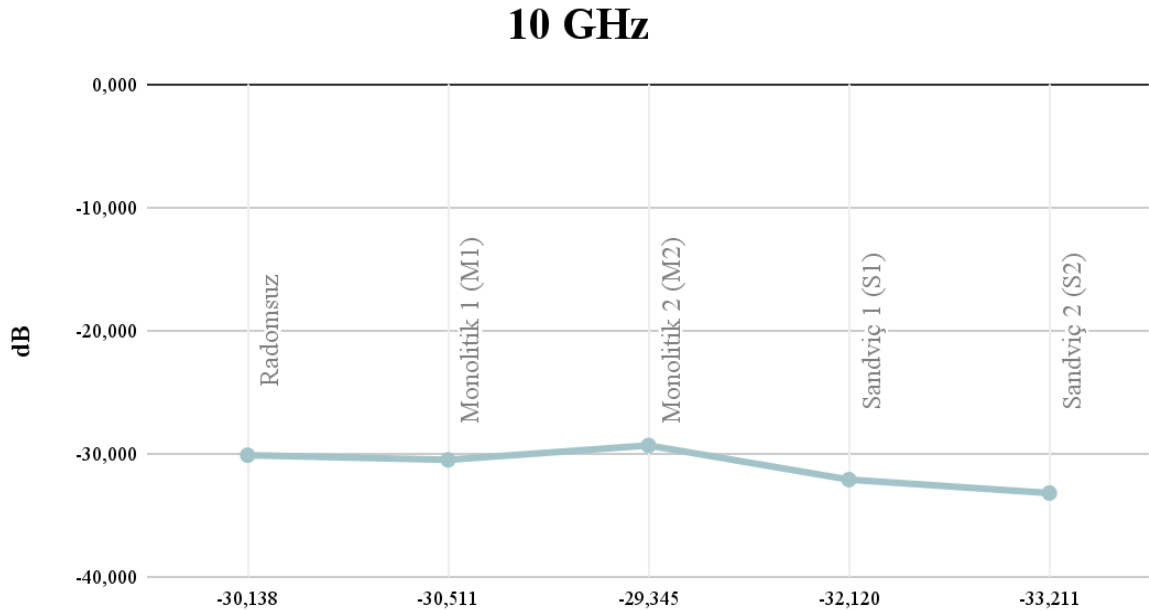
Şekil 3.4. 8 GHz frekans bandında alınan sinyal gücü değerleri

8 GHz frekansında yapılan yayında kompozit radom numunesi konulmayan deney düzeneğinde 13,261 dB’ lik bir kayıpla yayın alıcı anten tarafından alınmıştır. Sırası ile numuneler düzeneğe yerleştirildikten sonra yapılan ölçümler Şekil 3.4’ de grafik olarak gösterilmektedir.

Tablo 7. 8 GHz frekans bandında numuneler arasında tespit edilen sinyal gücü değer farkları

	Radomsuz-M1 dB	Radomsuz-M2 dB	Radomsuz-S1 dB	Radomsuz-S2 dB	M1-M2 dB	S1-S2 dB	M-S dB
8GHz	1,988	3,577	4,149	4,469	1,589	0,320	1,527

Tablo 7’ de gösterilen 8 GHz bandında ortaya çıkan bu farklar, değerlendirme açısından dikkate alınması gereken düzeye ulaşmıştır. Radom kullanımının bu frekans bandında etkisinin kritik düzeye ulaştığı görülmüştür. Özellikle 3 dB ve üzeri kayıplar, sistem performansını etkileyebilir. Radom kullanımının bu önemli etkisine karşın fiber oryantasyonunun (M1-M2) ve sandviç yapının (S1-S2) etkisinin kritik değerlere ulaşmadığı gözlenmiştir.



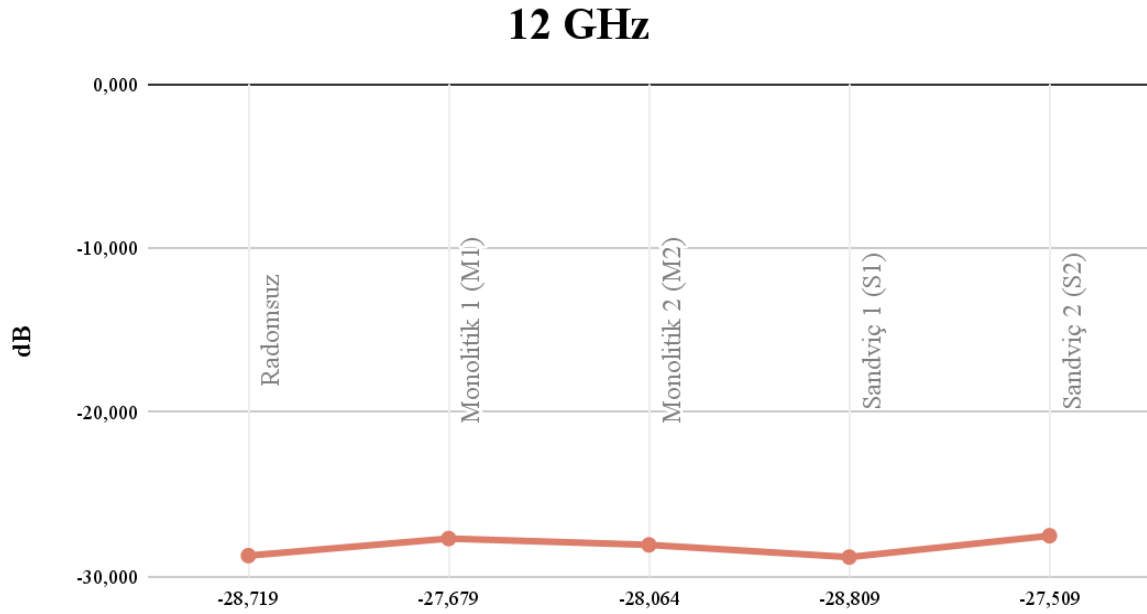
Şekil 3.5. 10 GHz frekans bandında alınan sinyal gücü değerleri

10 GHz frekansında yapılan yayında kompozit radom numunesi konulmayan deney düzeneğinde 20,138 dB lik bir kayıpla yayın alıcı anten tarafından alınmıştır. Sırası ile numuneler düzeneğe yerleştirildikten sonra yapılan ölçümler Şekil 3.5’ de grafik olarak gösterilmektedir.

Tablo 8. 10 GHz frekans bandında numuneler arasında tespit edilen sinyal gücü değer farkları

	Radomsuz-M1 dB	Radomsuz-M2 dB	Radomsuz-S1 dB	Radomsuz-S2 dB	M1-M2 dB	S1-S2 dB	M-S dB
10GHz	0,373	0,793	1,982	3,073	1,166	1,091	2,737

Tablo 8’ de gösterilen 10 GHz bandında gözlemlenen bu ufak farklar değerlendirmeye alınmayacak ölçekte dir. Bu tür farklar her türlü testte ortama bağı olarak gözlemlenebilmektedir. Fiber oryantasyonundaki değışimlerin ve sandviç yapının sonucu etkilemediğı bu frekansta da tespit edilmiştir.



Şekil 3.6. 12 GHz frekans bandında alınan sinyal gücü değıerleri

12 GHz frekansında yapılan yayında kompozit radom numunesi konulmayan deney düzeneğinde yaklaşık 18,719 dB’ lik bir kayıpla yayın alıcı anten tarafından alınmıştır. Sırası ile numuneler düzeneğıe yerleştirildikten sonra yapılan ölçümler Şekil 3.6’ da grafik olarak gösterilmektedir.

Tablo 9. 12 GHz frekans bandında numuneler arasında tespit edilen sinyal gücü değer farkları

	Radomsuz-M1 dB	Radomsuz-M2 dB	Radomsuz-S1 dB	Radomsuz-S2 dB	M1-M2 dB	S1-S2 dB	M-S dB
12GHz	1,040	0,655	0,090	1,210	0,385	1,300	0,287

Tablo 9’ da gösterilen 12 GHz bandında gözlemlenen bu ufak farklar değerlendirmeye alınmayacak ölçekte dir. Fiber oryantasyonlarındaki değişim ve sandiviç yapının sonuçlara anlamlı bir şekilde etki etmemektedir.

Genel olarak yapılan RF (Radyo Frekans) testlerinde 1 dB lik bir değişim dikkate alınmayacak seviyede küçük sayılmaktadır. Bu tür farklar anlık olarak ortamdaki kayıplardan kaynaklı olarak gerçekleşebilmektedir. 3 dB ye kadar olan farklar da genel olarak kabul gören seviyededir. 3 dB sonrası ise yayın gücü azalacağından incelemeye alınmakta ve durum değerlendirilmektedir.

Radom malzemesi konulmadan oluşturulan deney düzeneklerinde frekanslar arasında oluşan farklar ise frekans büyüdükçe kayıplar arttığı için normal olarak değerlendirilmiştir. Özellikle 10 GHz ve sonrasında Atmosferik emilim etkisi ile kayıpların artması beklenmektedir ve bu yapılan deneylerde de gözlenmiştir. Her frekans kendi içerisinde numuneler ile değerlendirildiğinde benzer farklar olduğu gözlemlenmiştir.

Frekans arttıkça kayıpların artışının nedenleri şu şekilde açıklanabilir [28].

a. Malzeme Kayıpları

- Dielektrik Kayıp: Yüksek frekanslarda, dielektrik malzemelerin içindeki moleküler hareketler artar, bu da daha fazla enerji kaybına yol açar.
- İletkenlik Kaybı: İletken malzemelerde, cilt etkisi nedeniyle akım taşıyan alanın küçülmesiyle direncin artması, yüksek frekanslarda daha fazla enerji kaybına neden olur.[29]

b. Sinyal Yayılımı

- Serbest Uzak Kaybı: Sinyalin yayılması sırasında enerjinin dağılması, frekans arttıkça daha belirgin hale gelir. Yüksek frekanslı sinyaller daha kısa dalga boylarına sahiptir ve bu da yayılım sırasında daha fazla kayba yol açar.
- Atmosferik Emilim: Yüksek frekanslı sinyaller, atmosferdeki gazlar ve partiküller tarafından daha fazla absorbe edilir. Bu durum özellikle 10 GHz ve üzerindeki frekanslarda önem kazanır.

c. Girişim ve Geri Yansıma

- Yansıma ve Kırınım: Yüksek frekanslı sinyaller, yüzeyler ve engeller tarafından daha fazla yansıtılır ve kırılır. Bu da sinyalin güç kaybetmesine neden olabilir.
- Parazit ve Girişim: Yüksek frekanslı bantlarda daha fazla elektronik cihaz ve sistem çalıştığı için parazit ve girişim de artar, bu da sinyal kalitesini düşürür.

d. Kablo ve Bağlantı Elemanları

- Kablo Kayıpları: İletim hatlarında, yüksek frekanslarda direnç artar ve bu da daha fazla kayba neden olur.
- Bağlantı ve Konektör Kayıpları: Yüksek frekanslarda konektörlerdeki küçük hatalar ve uyumsuzluklar bile önemli kayıplara yol açabilir.

Radyo frekans (RF) uygulamalarında, frekans arttıkça kayıpların artması beklenen bir durumdur. Yüksek frekanslarda çalışan sistemlerde kayıpları minimize etmek için daha kaliteli malzemeler, uygun tasarım ve mühendislik çözümleri gerekebilir.

Frekans arttıkça kayıpların artması hem malzeme özelliklerinden hem de fiziksel etkenlerden kaynaklanmaktadır.

Elde edilen sonuçların literürde yer alan bazı çalışmalar ile karşılaştırılması yapıldığında, Örnek olarak; İ. Çor ve B. Saka [13] tarafından yapılan çalışmada, monolitik numune ve sandviç tipi numunede malzeme kalınlıklarının artmasının ilettime etkisi kalınlık arttıkça olumsuz şekilde arttığı tespit edilmiştir. Ara malzeme kalınlıklarının ise frekansa göre değişen iletim performansı sergilediği bildirilmektedir. Bu sonuçlar deneylerden elde edilen tespitler ile benzer durumdadır.

Yine, B. Kışla ve Y. Yörük [18] tarafından yapılan bir çalışmada; tek bir sandviç tipi numunenin belirli bir frekans aralığındaki davranışı inlenmiştir. Elde ettikleri sonuçlara bakıldığında frekansa göre farklı iletim katsayıları sergilediği görülmüştür. Yaptıkları çalışmanın sonucunda frekansa göre buldukları iletim katsayıları bu tez çalışması kapsamında elde edilen veriler ile benzerlik göstermektedir.



4. SONUÇ

Yapılmış olan testler ile verici antenden farklı dalga boylarında sinyal gönderilerek alıcı antene ulaşan sinyaldeki kayıplar incelenmiştir. Bu incelemelerde Radom numunesi konulmadan her frekans için sinyal gönderimi yapılmış ve bir referans değer elde edilmiştir.

Bu referans değer ile test düzeneğine eklenen her bir radom numunesi ayrı ayrı kıyaslanmış ayrıca radom numunelerinden elde edilen değerler de kendi içlerinde kıyaslanmıştır.

Frekans arttıkça radom numunesi bulunmayan deney ile radom numunesi bulunan deneyler arasında ki kaybın arttığı tespit edilmiştir. Frekans arttıkça kayıpların artması beklenen bir durumdur. Her bir numune için değerlendirme yapıldığında bu kayıplar arasındaki farklar benzer şekilde gözükmemektedir. Bazı numuneler arasında oluşan küçük farklılıklar anlık olarak ortam kayıpları, kablo kayıpları, konnektör kayıpları gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Frekans değerine bağlı olarak bazı değerlerde kayıp yerine kazanç gözlenmesinin nedeni deney düzeneğinde oluşan yansımalarından kaynaklanmaktadır.

Deney verilerine detaylı olarak bakıldığında; 2 GHz frekansında yapılan incelemede Monolitik numuneler arası kayıplar aynı seviyede çıkmaktadır. Sandviç numuneler arası kayıplarda benzer olacak şekilde aynı seviyede çıkmıştır. Monolitik ve Sandviç tip numuneler arası kayıp farklarının da çok az olduğu görülmüştür. Tüm numunelerin değerleri radom numunesi kullanılmadan yapılan değer ile kıyaslandığında aradaki farkın çok az olduğu gözlenmiştir. 2 GHz frekansında farklı fiber oryantasyonlu cam elyaf numunelerinin sinyal gücüne etkisi olmadığı görülmüştür.

4 GHz ve 6 GHz frekanslarındada gerçekleştirilen incelemede, monolitik numuneler arasındaki kayıpların yaklaşık 1 dB seviyesinde olduğu tespit edilmiştir. Bu farkın, deney sırasında ortamdaki anlık değişimlerden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Sandviç numuneler arasındaki kayıpların ise 1 dB'nin altında olduğu görülmüştür. Her iki numune tipi için elde edilen kayıp değerleri, deney açısından anlamlı bir seviye farkı oluşturmaz. Monolitik ve sandviç numuneler arasındaki kayıp farklarının da oldukça düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, tüm numunelerin kayıp değerleri, radom kullanılmadan gerçekleştirilen deney sonuçları ile karşılaştırıldığında, farkın 1 dB'yi aşmadığı görülmüştür. Bu seviyedeki farklılıklar deney açısından dikkate değer kabul edilmemektedir.

8 GHz frekansında yapılan incelemede frekansın artmasıyla birlikte kayıpta oluşan artış daha belirgin olmaktadır. Monolitik numuneler arası fark 1,5 dB seviyelerinde tespit edilmiştir. Sandviç numunelerin kendi aralarında neredeyse fark tespit edilmemiştir. Monolitik ve Sandviç tip numuneler arası kayıp farklarının da 1,5 dB seviyelerinde olduğu tespit edilmiştir. Radom numunesi konulmadan alınan ölçüm ile monolitik ve sandviç numuneler düzeneğe konulduktan sonra alınan ölçümlerde gözükken 3 dB ile 4 dB arasındaki fark kayıp olarak göz ardı edilebilecek seviyeyi geçmektedir. Sandviç tip numunede görülen kayıplar Monolitik numunelerden daha fazla olarak ölçülmüştür. Bu fark malzeme kalınlığından kaynaklı olmaktadır. Bu frekansta yapılacak bir çalışmada cam elyaf radom malzemesinde oluşacak kayıpların dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi malzeme kalınlığının ve katman sayısının olabilecek minimum seviyede tutulması gerektiği düşünülmektedir. Bu kayıplar iletilen sinyal gücünde büyük oranda kayba sebep olabilmektedir.

10 GHz frekansında yapılan incelemede de frekansın artmasıyla birlikte oluşan kayıp belirgin bir artış içindedir. Monolitik numuneler arası kayıplar 1 dB seviyesinde olmaktadır. Sandviç numuneler arası kayıplarında 1 dB seviyesinde olduğu görülmüştür. Bu fark göz ardı edilebilecek seviyededir. Monolitik ve sandviç tipi numuneler arasında fark kıyaslandığında 2,7 dB seviyelerinde olduğu tespit edilmiştir. Bu tespit edilen geçirgenlik farkı kritik seviyeye yakın bir değerdedir. Radom numunesi olmadan yapılan düzenek ile Radom numunesi bulunan düzeneğten alınan değerler kıyaslandığında Sandviç tipi radom numunesinden alınan değerlerdeki kayıplar 3 dB civarındadır. Bu değer kritik noktadadır. 3db den daha büyük farklı kayıplarda iletilen gücün azalma oranı sistem için önemli seviyede olabilmektedir. Bu frekansta çalışan sistemlerde sandviç tip radom kullanımında malzeme incelemesine dikkat edilmesi tavsiye edilir.

12 GHz frekansında yapılan incelemede de frekansın artmasıyla birlikte oluşan kayıp belirgin bir artış içindedir. Monolitik numuneler arası kayıplarında 1dB seviyesinin altında olduğu görülmüştür. Sandviç numuneler arası kayıplarında 1dB seviyesinde olduğu görülmüştür. Bu fark göz ardı edilebilecek seviyededir. Radom numunesi olmadan yapılan düzenek ile Radom numunesi bulunan düzeneğten alınan değerler kıyaslandığında bu frekansta anlamlı bir değişiklik gözlenmemiştir.

Monolitik numuneler ile sandviç numuneler kıyaslandığında ise tespit edilen farklar kritik değer olarak kabul ettiğimiz 3 dB değerinin altında çıkmaktadır. Bu farklar sandviç

numunenin daha kalın olmasından ve daha fazla katmandan oluşmasından kaynaklı oluşmaktadır [12], [30].

Monolitik ve Sandviç tip radom numunesi ile radom numunesi olmadan yapılan deney değerleri ile kıyaslandığında ise 8GHz ve 10GHz frekanslarında Radom numunesi bulunmayan düzenek ile Monolitik ve Sandviç Radom numunesi bulunan düzenekler arasında kayıp farkı, incelenmesi ve değerlendirilmesi gereken sınır değerini bir miktar aşmaktadır. Bu frekanslarda, yüksek frekanslarda oluşması beklenen kayıptaki artış belirgin seviyede gözlenmiştir. Malzemenin yapısı radyo dalgalarının geçişini etkilemektedir. Cam elyaf kompozit malzemeler, cam lifleri ve epoksi matris malzemesinin birleşimi ile oluşur. Radyo dalgaları yüksek frekanslarda malzemenin yüzeyinde yoğunlaşır. Kompozit malzemelerde de bu yüzeydeki katmanlar arası geçişlerde enerji kaybına sebep olur. Bu kayıplar, kompozit malzemenin içyapısındaki cam elyaf ve epoksi arasındaki geçişten kaynaklanır. Ayrıca cam elyafların farklı yönler yönlenmesinden dolayı yüksek frekanslarda dalgaların farklı yönler farklı hızlarla ilerlemesi de kayıplara sebep olur. Malzemenin içyapısının ve katman düzeninin kayıplar üzerindeki etkileri yüksek frekanslarda daha belirgin olarak görülmektedir. Bu seviyedeki kayıp kullanılan sistemin istenilen verimde çalışmasını etkileyebileceğinden bu frekanslarda çalışması gereken sistemlerde radomun, malzeme kalınlığı ve katmanları istenilen mekanik özellikleri sağlayacak, bunun yanında istenilen elektromanyetik geçirgenliğe de müsaade edecek şekilde gerekli analizler yapılarak tasarlanması gerekmektedir.

Genel olarak yapılan deneyden elde edilen sonuçlar incelendiğinde monolitik numuneler kendi aralarında ve sandviç numuneler kendi aralarında kıyaslandığında fiber oryantasyonundaki değişimin sinyal geçirgenliğinde önemli bir farka sebep olmadığı görülmektedir. Radom malzemesi üretirken kullanılan oryantasyon düzeni sinyal geçirgenliğini etkilememektedir.

KAYNAKLAR

- [1] “Radome”, Wikipedia, <https://en.wikipedia.org/wiki/Radome> (Accessed: April 29, 2024)
- [2] “Antennas For Communications”, [www.radome.net.](http://www.radome.net/), [http:// www.radome.net/](http://www.radome.net/) (Accessed: April 29, 2024)
- [3] M. Özdin, “Tümleşik Anten Kulesi İçin Geniş Bantlı Soğurucu Özellikli Çok Katmanlı Frekans Seçici Radom Tasarımı”, Doktora Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye, 2020
- [4] C. Kumar, H. Mohammed, G. Peake, “mmWave Radar Radome Design Guide”, Texas Instruments Incorporated, Texas, USA, August 2021, [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/pdf/swra705>
- [5] L. Shangji, Z. Huiyuan, D. Chang, S. Lizhong,” Electrical properties analysis of conical radome”, *IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband*, Oct. 2016, doi: 10.1109/ICUWB.2016.7790590
- [6] W. Xu, B.Y. Duan, P. Li, G. Yang, Y. Qiu, “Integrated optimum design of metal space frame radomes with variable size members involving electromagnetic and structural analysis”, *IET Microwave. Antennas & Propagation*, Vol. 11, No. 11, pp. 1565-1571, 2017
- [7] R.E. Collin, “Antennas”, “Antennas and Radiowave Propagation”, Singapore, McGraw-Hill ,1988.
- [8] R. Shavit, A. P. Smolski, E. Michielssen, R. Mittra “Scattering Analysis of High-Performance Large Sandwich Radomes” *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, Vol.40, No.2, pp. 126-133, February 1992

- [9] M. Skolnik, "Reflector Antennas" ,in *Radar Handbook*, 3th ed.,The McGraw-Hill Companies, USA, 2008, ch. 12.39-12.41
- [10] M. Ece, "Küçük Ebatlı Radomların Test Edilmesi", Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye, 2006
- [11] B. Audone, A. Delogu, P. Moriondo, "Radome Design and Measurements", *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, Vol. 37, No. 2, pp. 292-295, June 1988
- [12] R. U. Nair, R. M. Jha, "Electromagnetic Performance Analysis of a Novel Monolithic Radome for Airborne Applications", *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, Vol. 57, No. 11, pp. 3664-3666, November 2009
- [13] İ. Çor, B. Saka, "Geniş Bantlı Radom Analizi ve Eniyilenmesi", *Signal Processing and Communications Applications Conference*, İzmir, 2018, doi: 10.1109/SIU.2018.8404437
- [14] M. T. Aamir, M. A. Nasir, Z. Iqbal, H. A. Khan, "Multi-disciplinary optimization of hybrid composite radomes for enhanced performance", *Results in Engineering*, Vol. 20, 2023, [Online]. Available: [https:// doi.org/10.1016/j. rineng.2023.101547](https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101547)
- [15] Y. Dan, J. Yang, "Electromagnetic Performance Analysis of Inhomogeneous Radome Walls Considering Temperature and Ablation", Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, 2023, [Online]. Available: [https://www.mdpi.com/ 2226-4310/10/11/927](https://www.mdpi.com/2226-4310/10/11/927)
- [16] H. Meng, W. Dou, "Analysis and Design of Radome in Millimeter Wave Band" in *Microwave and Millimeter Wave Technologies from Photonic Bandgap Devices to Antenna and Applications*, I. Minin, Ed., March 2010, ch. 17 pp. 383-403, [Online]. Available: [https:// www.intechopen.com/books/3707](https://www.intechopen.com/books/3707)
- [17] M. H. Nişancı, Ş. Ç. Yener, "X Bandı Radar Antenleri için Üç Boyutlu (3D) Eklemeli İmalat Yöntemi ile Kompozit Frekans Seçici Yüzey Kaplama Malzemesi Üretimi",

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2018, [Online]. Available: <https://search.trdizin.gov.tr/tr/yayın/detay/619742/>

- [18] B. C. Kışla, Y. E. Yörük, “Elektromanyetik Geçirgen Kompozit Hibrit Malzemelerin Tasarımı Ve Üretimi”, VOLO Kompozit ve Mühendislik, Ar-Ge Birimi, Ankara, Türkiye, January 2024, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/377566123_ElektromanyetikGecirgen_Kompozit_Hibrit_Malzemelerin_Tasarimi_Ve_Uretimi
- [19] J. Deng, G. Zhou, Y. Qiao, “Multidisciplinary design optimization of sandwich-structured radomes”, *Proc IMechE Part C: J Mechanical Engineering Science*, Vol. 233(1), pp. 179–189, 2019, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0954406218757268>
- [20] R. A. Pandhare, J. D. Shah, A. Kothari, Y. Solunke, F. L. Lohar, D. Yadav, “ Ultra-wideband A-Sandwich Radome wall with Multilayer FSS”, *IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference*, 2023 doi: 10.1109/MAPCON58678.2023.10463872
- [21] Y. Li, Y. Ma, P. Ren, M. Wang, Z. Xiang, “A Dual-Passband Frequency Selective Surface with High Angular Stability and Polarization Insensitivity”, *Micromachines*, 2024, [Online] Available: <https://doi.org/10.3390/m15060690>, May 2024
- [22] R. U. Nair, S. Shashidhara, R. M. Jha, “Novel Inhomogeneous Planar Layer Radome Design for Airborne Applications”, *IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters*, Vol. 11, pp. 854–856, 2012
- [23] M. Yazeen, P.S., Vinisha, C.V., Vandana, S., Suprava, M., Nair R. U., “Electromagnetic performance analysis of graded dielectric inhomogeneous streamlined airborne radome”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 65, No 5, pp. 2718-2723, May 2017
- [24] F. Fitzek, R. H. Raschofer, “Automotive radome design–reflection reduction

- of stratified media”, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol 8, pp. 1076-1079, 2009
- [25] H.N. Liu, H. L. Su, K. H. Lin, C. Y. Wu, C. L. Tang, S. H. Yeh, “Design of antenna radome composed of metamaterials for high gain”, *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, pp. 9-14, 2006
- [26] H. Chen, X. Hou, L. Deng, “Design of frequency-selective surfaces radome for a planar slotted waveguide antenna”, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol 8, pp. 1231-1233, 2009
- [27] *Requirements For The Control Of Electromagnetic Interference Characteristics Of Subsystems And Equipment*, MIL-STD-461E, August 1999
- [28] O. Gürdal, *Elektromanyetik Dalga Teorisi*, 3.Baskı, Bursa Osman Gazi Üniversitesi Yayınları, Bursa, 2020
- [29] A. Zengin, “Deri Etkisi Nedir? İletkenleri Tam Performansta Kullanıyor muyuz?”, Elektronik Port, [Online]. Available: [https:// www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/deri-etkisi-nedir-iletkenleri-tam-performansta-kullaniyor-muyuz/22406#ad-image-0](https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/deri-etkisi-nedir-iletkenleri-tam-performansta-kullaniyor-muyuz/22406#ad-image-0)
- [30] T. Sheret, C. Parini, B. Allen, “Efficient design of a radome for minimised transmission loss”, *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, Vol. 10, Iss. 15, pp. 1662–1666, June 2016, doi: 10.1049/iet-map.2016.0041