
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

KONFORMAL FREKANS SEÇİCİ YÜZEYLERLE RADOM RADAR KESİT ALANI AZALTILMASI

Nagihan Aybegüm KORKUT

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARALIK 2024

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmasında 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.

Nagihan Aybegüm KORKUT

27/12/2024

KONFORMAL FREKANS SEÇİCİ YÜZEYLERLE RADOM RADAR KESİT ALANI AZALTILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Nagihan Aybegüm KORKUT

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2024

ÖZET

Radar kesit alanının azaltımı, platformların radar sistemleri tarafından algılanma ihtimalini azaltarak askeri ve havacılık alanlarında operasyonel önceliklerin sağlanmasına katkıda bulunmakta, aynı zamanda hayatta kalma oranlarını ve operasyonel etkinliği artırmaktadır. Bu nedenle, platformların düşük görünürlük kabiliyetinin geliştirilmesinde kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışmada konformal frekans seçici yüzey kullanarak radom geometrisinin radar kesit alanı azaltımı amaçlanmıştır. Konformal frekans seçici yüzeyler (FSY), elektromanyetik dalgaları belirli frekanslarda seçici olarak filtrelemek veya manipüle etmek için tasarlanmış, düzlemsel olmayan yüzeylerin şekline uyma kabiliyeti olan bu da onları uçak radomları vb. diğer aerodinamik yüzeyler gibi kavisli veya karmaşık geometrilerde uygulanmasını sağlayan gelişmiş elektromanyetik yapılardır. Bu çalışmada konformal yüzeylerde uygulanması amacıyla için 8-12GHz frekans aralığında çalışan bant geçiren bir frekans seçici yüzey tasarlanmıştır. Tasarlanan bu frekans seçici yüzey eğimli olan konik yapıdaki radom yüzeyine yerleştirilerek frekans seçici yüzey-radom entegrasyonu gerçekleştirilmiştir. Yerleştirilen frekans seçici yüzeyin, radomun radar kesit alanını nasıl etkilediğini anlamak için farklı frekanslarda birçok radar kesit alanı analizleri gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan konformal frekans seçici yüzey ile 2-14GHz frekans aralığında konik radom geometrisinin radar kesit alanının azaltımını sağlanmıştır.

Bilim Kodu : 93415
Anahtar Kelimeler : Radar kesit alanı, frekans seçici yüzey, radom
Sayfa Adedi : 63
Danışman : Prof. Dr. Ali KARA

RADAR CROSS SECTION REDUCTION OF RADOMES USING CONFORMAL FREQUENCY SELECTIVE SURFACES

(M. Sc. Thesis)

Nagihan Aybegüm KORKUT

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2024

ABSTRACT

The reduction of radar cross-section (RCS) plays a crucial role in enhancing the low observability capabilities of military and aerospace platforms by decreasing their likelihood of detection by radar systems, thereby contributing to operational priorities and increasing survival rates and operational effectiveness. This study aims to reduce the RCS of radome geometry through the use of conformal frequency selective surfaces (FSS). Conformal FSS are advanced electromagnetic structures designed to selectively filter or manipulate electromagnetic waves at specific frequencies, with the ability to conform to non-planar surfaces, making them suitable for application on curved or complex geometries, such as aircraft radomes and other aerodynamic surfaces. In this research, a band-pass frequency selective surface operating in the 8-12 GHz range was designed for application on conformal surfaces. The designed FSS was integrated onto the sloped surface of a conical radome to achieve frequency selective surface-radome integration. Multiple RCS analyses were conducted at different frequencies to understand how the integrated FSS affects the RCS of the radome. The conformal FSS successfully achieved RCS reduction of the conical radome geometry across the 2-14 GHz frequency range.

Science Code : 93415
Key Words : Radar cross section, frequency selective surface, radome
Page Number : 63
Supervisor : Prof. Dr. Ali KARA

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla bana yol gösteren ve yüksek lisans kariyerim boyunca beni destekleyen sayın danışman hocam Prof. Dr. Ali KARA'ya, yüksek lisans öğrenimimde gerekli destekleri sağlayan Türk Havacılık Uzay Sanayii A.Ş.' ye, yüksek lisans sürecinde her zaman bana yardımcı olan arkadaşlarıma, ayrıca beni her zaman destekleyen ve bu zamana gelmemde en büyük emeğe sahip olan canım aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ŞEKİLLERİN LİSTESİ ix

SİMGELER VE KISALTMALAR xi

1. GİRİŞ 1

2. RADAR TEMELLERİ VE RADAR KESİT ALANI 5

2.1. Radar Sistemleri 5

2.2. Radar Kesit Alanı 7

2.2.1. Temel saçılım mekanizmaları 11

2.3. Radar Kesit Alanı Azaltım Teknikleri 15

2.3.1. Geometrik şekillendirme 16

2.3.2. Aktif ve pasif iptal yöntemleri 19

2.3.3. Malzeme kullanımı 20

2.4. Radar Kesit Alanı Hesaplama Yöntemleri 21

3. FREKANS SEÇİCİ YÜZEYLER 23

3.1. Frekans Seçici Yüzey Parametreleri 28

3.1.1. Frekans seçici yüzeyin geometrik şekli ve boyutu 29

3.1.2. Birim hücreler arasındaki mesafe 31

3.1.3. Frekans seçici yüzey tasarımında kullanılan dielektrik tabaka 32

3.1.4. Frekans seçici yüzey tasarımında kullanılan elemanların iletkenliği 33

3.1.5. Dalgaların geliş açısı ve kutuplanma 33

3.2. Konformal Frekans Seçici Yüzey Uygulamaları 33

Sayfa

3.3. Düşük Görünür Radom Tasarımı 39
4. MATERYAL VE YÖNTEM 43
4.1. Birim Hücre Tasarımı 44
4.2. Konik FSY Radom Tasarımı 47
4.3. Radar Kesit Alanı Analizi 48
4.3.1. RKA analiz yöntemi validasyonu 48
4.4. Radar Kesit Alanı Azaltımı 50
5. TARTIŞMA 53
6. SONUÇ 55
KAYNAKLAR 57
ÖZGEÇMİŞ 63

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 2.1.	Radar sistemin genel blok şeması	5
Şekil 2.2.	Dalga boyuna göre kürenin radar kesit alanı	9
Şekil 2.3.	Hava platformlarının ve bazı canlıların RKA değerleri	11
Şekil 2.4.	Kompleks geometrilerde görülen saçılım çeşitleri	11
Şekil 2.5.	F-22 Raptor uçağının platform tasarımı	17
Şekil 2.6.	B-2 Spirit uçağının platform tasarımı	17
Şekil 2.7.	F-35 Gövde içi mühimmat taşıyan silah kapakları	18
Şekil 2.8.	F-35 Uçağındaki radar soğurucu elastomer ve boya uygulaması	21
Şekil 3.1.	Frekans seçici yüzeylerin çalışma prensibi	24
Şekil 3.2.	Frekans seçici yüzey filtre özellikleri (a) Alçak geçiren filtre (b) Yüksek geçiren filtre (c) Bant durduran filtre (d) Bant geçiren filtre	25
Şekil 3.3.	Tamamlayıcı elemanlardan oluşan periyodik yapılar (a) alçak geçiren ve (b) yüksek geçiren filtreler olarak tasarlanabilir, her biri kendi eşdeğer devrelerine ve frekans yanıtlarına sahiptir (metalik-gri renk)	26
Şekil 3.4.	Elemanların aralığını (D_x, D_z) ve L eleman uzunluğunu gösteren bir periyodik yapı	27
Şekil 3.5.	FSY tasarımında kullanılan elemanlar	30
Şekil 3.6.	Radar soğurucu köpük uygulaması	40
Şekil 4.1.	a) Tasarlanan birim hücre ve b) sınır koşulları	44
Şekil 4.2.	Tasarım parametreleri	44
Şekil 4.3.	Tasarlanan birim hücrenin iletim ve yansıma karakteristikleri	45
Şekil 4.4.	Metalik daire yarıçap değerinin rezonans frekansı ve bant genişliği üzerindeki etkisi	45
Şekil 4.5.	Metalik yama genişliğinin rezonans frekansı ve bant genişliği üzerindeki etkisi	46
Şekil 4.6.	Dielektrik alt tabaka kalınlığının rezonans frekansı ve bant genişliği üzerindeki etkisi	46

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.7. Farklı θ (theta) açılarının rezonans frekansı ve bant genişliği üzerindeki etkisi 47

Şekil 4.8. Tasarlanan FSY yapılı konik radom geometrisi 47

Şekil 4.9. Analizde kullanılan Nasa Almond modeli 48

Şekil 4.10. NASA Almond modelinin SBR+ yöntemi ile elde edilen RKA analiz sonuçlarının literatürdeki ölçüm değerleriyle karşılaştırılması a) HH polarizasyonu b) VV polarizasyonu 49

Şekil 4.11. Düzlem dalga uyarımının gösterimi 51

Şekil 4.12. RKA sonuçlarının karşılaştırılması 52

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
C	Kapasitif devre elemanı
dB	Desibel
GHz	Giga Hertz
L	İndüktif devre elemanı
m^2	Metrekare
mm	milimetre
ε	Dielektrik sabiti
λ	Dalga boyu

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
CEM	Computational Electromagnetics
CST MWS	Computer Simulation Technology Microwave Studio
EM	Elektromanyetik
FSY	Frekans Seçici Yüzey
GO	Geometrik Optik
GTD	Geometrik Kırınım Teorisi
MLFMM	Multi-Level-Fast-Multipole Method
PO	Fiziksel Optik
PTD	Fiziksel Kırınım Teorisi
RAM	Radar Absorbing Material
RCS	Radar Cross Section
RF	Radyo Frekansı
RKA	Radar Kesit Alanı
SBR	Shooting and Bouncing Rays
TE	Transverse Electric
TM	Transverse Magnetic

1. GİRİŞ

Radar Kesit Alanı (RKA), bir nesnenin radar dalgalarını ne kadar etkili bir şekilde yansıttığının bir ölçüsüdür ve nesnenin radar tarafından tespit edilmesinde belirleyici bir faktördür. Radarda düşük görünür olmak düşük radar kesit alanına sahip olmak demektir. Literatürde "stealth" olarak da geçen radarda düşük görünür olmak; düşman radarlarının hava araçlarını tespit etmesini zorlaştırır ve hava sahasında önemli bir taktiksel avantaj sağlar [5]. Düşük radar kesit alanı, hava aracının yansıyan dalgaları absorbe etmesini, dağıtmasını veya kaynağa geri dönmesini engellemesini sağlayan tasarımlar, malzemeler ve gelişmiş teknolojiler yoluyla elde edilir. Sonuç olarak, hava aracı düşman radarı tarafından tespit edilmesi daha zor bir hedef olarak görünür, düşmanın olası yanıt süresini azaltır ve hava aracının görevini daha güvenli ve etkili bir şekilde yerine getirmesine olanak tanır. Dolayısıyla, düşük RKA, hava aracının modern hava sahasında hayatta kalma şansını doğrudan artırır ve operasyonel başarısını etkiler.

Frekans seçici yüzeyler (FSY) radar kesit alanını azaltmak için kullanılan temel teknolojilerden biridir. FSY'ler belirli frekanslarda elektromanyetik dalgaların geçişine izin verirken diğer frekanslarda bu dalgaları engeller. Bu özellik FSY'leri RKA azaltma teknikleri içinde vazgeçilmez kılmaktadır [16]. Radar kesit alanını azaltmak için kullanılan geleneksel yöntemlerin aksine, Frekans seçici yüzeyler bazı benzersiz özellikler ve avantajlar sunar. Bu teknoloji, belirli radar tehdit frekansları için özel olarak tasarlanabilir, böylece bu frekanslarda maksimum RKA azaltımı sağlar ve hedefe yönelik bir çözüm sunar. Ek olarak, FSY'ler yansıyan radar dalgalarının yönünü aktif olarak kontrol edebilir, onları hedef yönlerden uzağa saçabilir, bu da düşman radarlarının tespit yeteneklerini zorlaştırır. Çok işlevli olmaları nedeniyle FSY'ler sadece RKA azaltımı için değil, aynı zamanda anten performansını arttırmak gibi ek işlevler için de kullanılabilir, bu da özellikle çok işlevli askeri platformlar için önemli bir avantajdır. Entegrasyon ve uygulama esnekliği açısından, FSY'ler mevcut hava aracı tasarımlarına ve geometrilerine kolayca uyum sağlayabilir, bu da önemli tasarım değişiklikleri gerektirmeden aerodinamik performansın korunmasını sağlarlar. Operasyonel olarak FSY'ler, tehditlerin ve taktik koşulların sürekli değiştiği modern elektronik harp ortamında dinamik olarak ayarlanabilir özellikler sağlar. Bu özellikler FSY teknolojisini belirli tehditlere karşı özelleştirilebilen son derece etkili bir RKA azaltma yöntemi haline getirerek diğer yöntemlere göre avantaj sağlamakta ve modern savunma ve savaş teknolojilerinde neden tercih edildiğini açıklamaktadır.

Tipik olarak düzlemsel olarak tasarlanan FSY'ler, konformal yapılara uygulandığında performans kayıpları yaşar; bu da üretim ve simülasyon zorluklarıyla birlikte bu teknolojinin etkinliğini sınırlayan önemli sorunlardır. Düzlemsel yüzeylerde geliştirilen bu yapıların elektromanyetik performansının tahmin edilmesi, eğimli veya karmaşık yüzeylere kıyasla daha kolay bir süreçtir. Ancak, düzlemsel yüzeyler için tasarlanan frekans seçici yüzeyler, eğimli veya kavisli yüzeylerde aynı derecede etkili bir performans sergileyemeyebilir. Modern hava araçlarının karmaşık geometrik yapıları düşünüldüğünde konformal uygulamaların da gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, konformal FSY tasarımlarının ve analizlerinin önemi giderek artmaktadır. Konformal tasarımlar, yüzeyin şekline tam olarak uyum sağlayarak, elektromanyetik dalgaların etkileşimini optimize edebilir ve bu sayede daha iyi performans elde edilebilir. Sonuç olarak, modern hava araçlarının karmaşık yapıları göz önüne alındığında, konformal FSY'lerin geliştirilmesi ve uygulanması kritik bir gereklilik haline gelmektedir. Bu bağlamda, mühendislik ve tasarım süreçlerinde konformal yüzeylerin dikkate alınması, gelecekteki hava aracı tasarımlarının başarısı için hayati öneme sahiptir.

Literatürdeki radom yapıları üzerine gerçekleştirilen konformal frekans seçici yüzey tasarım araştırmalarında, genellikle bu yüzeylerin konformal formlarının iletim ve yansıma özelliklerine odaklanılmıştır. Frekans seçici yüzeylerin çeşitli konformal formları üzerine birçok tasarım ve analiz üretim ve ölçümlerle desteklenmiştir. Bu çalışmalar, hem frekans seçici yüzeylerin konformal formlarının elektromanyetik karakteristiğine olan etkisini hem de radomların aerodinamik yapıları ile frekans seçici yüzeylerin elektromanyetik özellikleri arasındaki etkileşimi anlamaya yönelik önemli veriler sunmuştur. Ancak, bu entegrasyonun radar kesit alanı üzerindeki etkileri analiz ve ölçümlerle desteklenmemiştir. Radar kesit alanı, bir hedefin radar sistemleri tarafından ne kadar görünür olduğunu belirleyen kritik bir parametredir ve bu nedenle, radom ve frekans seçici yüzeylerin entegrasyonunun bu alandaki etkileri, özellikle düşük görünürlükteki platformlar için büyük bir önem taşımaktadır. Daha önceki çalışmalarda frekans seçici yüzeylerin iletim ve yansıma karakteristiklerinin analiz ve sonuçları üzerinden radar kesit alanına olan etkisi yorumlanmıştır. Frekans seçici yüzeyin elektromanyetik karakteristiği üzerinden radar kesit alanına olan etkisini yorumlamak yeterli değildir. Bu çalışmaların entegre edileceği düşük görünür platformlara olan etkisinin radar kesit alanı analiz ve ölçümleriyle desteklenmesi gerekmektedir. Radar kesit alanı üzerindeki etkilerin daha kapsamlı bir şekilde araştırılması,

bu tür sistemlerin etkinliğini artırmak ve yeni tasarım yaklaşımlarının geliştirilmesine olanak tanımak açısından kritik bir adım olacaktır.

Bu çalışmanın temel amacı, geliştirilen FSY'nin konformal yapılar üzerinde etkili bir şekilde çalıştığını kanıtlamak ve RKA azaltmak için nasıl kullanılabileceğini araştırmaktır. Bu bağlamda, FSY'nin tasarım ve optimizasyon süreçleri detaylı bir şekilde incelenecek ve konformal uygulamalarda performans kayıplarının nasıl en aza indirilebileceği üzerinde durulacaktır. Ayrıca, bu yüzeylerin radar kesit alanını azaltma konusundaki etkinliğinin artırılması için literatürde bulunan yöntemler ele alınacaktır. Bu çalışmada, 8-12 GHz frekans bandında bant geçiren bir frekans seçici yüzey tasarlamak ve bu tasarımın konformal yüzeyler için de etkili bir biçimde çalıştığını göstermektir. Bu amaçla tasarlanan FSY ile entegre edilmiş bir konik bir radom geometrisi hazırlanmıştır. Konik radom yapısına entegre edilen konformal frekans seçici yüzeyin monostatik radar kesit alanı üzerindeki etkileri, yapılan analizlerle ortaya konulmuştur. Bu analizler sonucunda, iletken konik radom geometrisi ile FSY entegre edilmiş konik radom geometrisinin monostatik RKA performansı karşılaştırılacak ve bu karşılaştırma neticesinde, FSY'nin radar kesit alanı üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde değerlendirilecektir. Ayrıca, çalışmada, frekans seçici yüzeylerin tasarımında kullanılan çeşitli optimizasyon teknikleri ve simülasyon yöntemleri de ele alınacaktır. Bu tekniklerin, konformal yapılar üzerindeki uygulamalarında nasıl bir rol oynadığı ve performans iyileştirmeleri sağladığı üzerinde durulacaktır. Sonuç olarak, bu çalışma, FSY'lerin konformal yapılar üzerindeki potansiyelini göstermek ve "stealth" radom yapılarının düşük görünürlüğüne katkıda bulunmak için önemli bir rol oynamayı amaçlamaktadır.

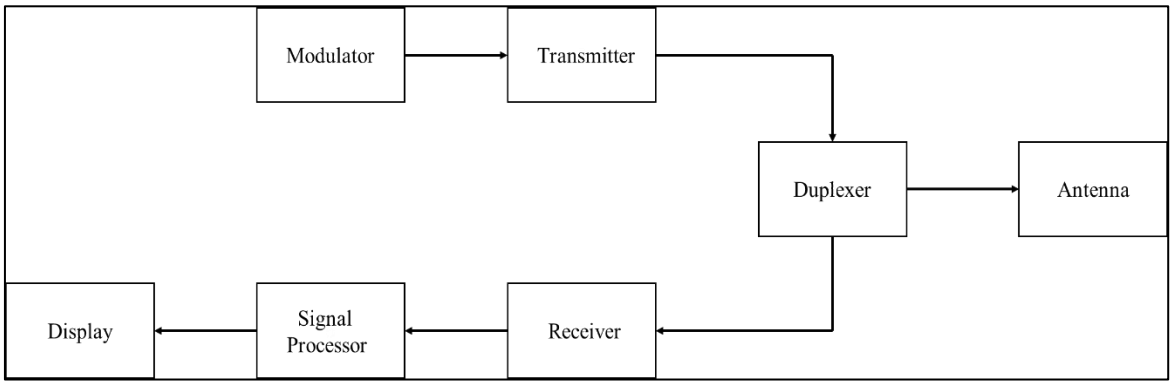
2. RADAR TEMELLERİ VE RADAR KESİT ALANI

Bu bölümde, askeri platformların stratejik üstünlüğü ve operasyonel verimliliğini sağlamak için kritik öneme sahip olan radar sistemlerinin temel çalışma prensipleri incelenecektir. Ardından radar kesit alanı ve düşük görünürlük kavramları ele alınarak, literatürdeki radar kesit alanının hesaplanması ve azaltılması için kullanılan yöntemler ve teknikler hakkında detaylı bilgi sunulacaktır.

2.1. Radar Sistemleri

Radar (RAdio Detection And Ranging) sistemleri elektromanyetik dalgalar yayarak hedefleri tespit etmek amacıyla tasarlanmıştır. Hedeften yansıyan dalgalar radar alıcıları tarafından yakalanır ve sinyal işleme birimlerinde hedefin şekli, konumu, yönü, menzili ve hızı gibi bilgileri elde edilir [1]. Radar sistemlerinin gelişimi, 20. yüzyılın başlarında askeri uygulamalar için düşman gemilerini ve uçaklarını tespit etmek amacıyla başlamış olsa da teknolojinin ilerlemesiyle askeri uygulamaların yanı sıra hava trafik kontrolü, denizcilik, jeoloji, otomotiv ve meteoroloji gibi çok çeşitli uygulamalarda da kullanılmaktadır [3]. Askeri amaçlar için geliştirilen radarlar günümüzde hem askeri hem de sivil hayatın birçok alanında vazgeçilmez hale gelmiştir.

Radar sistemleri temel olarak Şekil 2.1'de gösterildiği gibi modülatör, transmitter (gönderici), receiver (alıcı), duplexer, anten, sinyal işleme ve görüntüleme bloklarından oluşur.



Şekil 2.1. Radar sistemin genel blok şeması

Transmitter (verici), radar sistemi tarafından yayılan radyo frekansı (RF) işaretini üretir. Tipik olarak bir osilatör, yükselteç ve modülatörden oluşur. Osilatör temel frekansı oluşturur, modülatör sinyali şekillendirir ve yükselteç sinyali iletim için uygun yüksek bir güç seviyesine çıkarır. Radar sistemlerinde modülatörün görevi, transmittere (vericiye) elektromanyetik dalganın yayılacağı süreyi ve yayılma zamanını belirlemektir. Modülatör, radar tarafından yayılan elektromanyetik dalgaların özelliklerini kontrol eder ve bu sayede radarın menzil ölçümü yapabilmesini sağlar. Modülatör, sinyalin gücünü, süresini ve tekrar aralığını belirleyerek, radarın hedefleri tespit etme, takip etme ve uzaklıklarını belirleme yeteneğini optimize eder [1].

Radarın menzilini, çözünürlüğü ve doğruluğunu belirleyen anten hem RF işaretinin uzaya gönderilmesinden hem de hedeften yansıyan yankıların alınmasından sorumludur. Anten, radar enerjisini bir demet halinde odaklayacak ve ilgili alana doğru yönlendirecek şekilde tasarlanmalıdır [2]. Anteni hem gönderme hem de alma için kullanan radar sistemlerinde gelen ve gönderilen sinyallerin birbirinden ayırt edilmesi, duplexer birimi tarafından gerçekleştirilir. Bu birim, darbenin yayıldığı anda vericiyi ve alıcıyı ardışık iki darbe arasındaki zamanda antene bağlar. Receiver (alıcı) hedeften dönen zayıf yansıma sinyallerini yükseltir bu sinyalleri işler ve aynı zamanda çok düşük güç seviyelerini tespit edebilmelidir [4].

Modern radar sistemlerinde alıcıdan çıkan sinyaller, sinyal işleme birimi tarafından analiz etmek için gelişmiş sayısal işaret işleme teknikleri kullanırlar. Sinyal işlemci, alınan sinyallerden yararlı bilgiler elde etmek için darbe sıkıştırma, Doppler filtreleme ve hedef tespit algoritmaları gibi görevleri yerine getirir. Bu işlemler sonucu hedefin tespiti, takibi ve uzaklığı belirlenir. İşlem sonucu elde edilen bilgiler, display (gösterim cihazı) aracılığıyla operatöre anlamlı bir şekilde sunar.

Radar sistemleri, alıcı ve vericinin konumu, kullanılan dalga biçimi ve kullanım alanları açısından sınıflandırılır. Alıcı ve vericinin konumuna göre radarlar bistatik veya monostatik olarak kategorize edilir. Bistatik radarlar, alıcı ve vericilerin farklı konumlarda bulunması nedeniyle daha geniş bir açıdan hedefleri izleme yeteneğine sahipken monostatik radarlarda ise alıcı ve vericinin aynı yerde bulunur. Kullanılan dalga biçimine göre radarlar darbeli ve sürekli dalga (CW) olarak ayrılır. Sürekli dalga radarlar basit yapıya sahip olup genellikle

hedeflerin hızını ölçmek için kullanılırken, darbeli dalga radarlar hedeflerin uzaklığını ve hızını ölçmek için kullanılır ve daha karmaşık teknoloji gerektirir [1,4].

2.2. Radar Kesit Alanı

Radar Kesit Alanı (RKA) (Radar Cross Section, RCS), bir nesnenin veya hedefin radar dalgalarını geri yansıtma miktarını belirtir. RKA, bir hedefin radar sistemleri tarafından ne kadar kolaylıkla tespit edilebileceğinin bir ölçüsüdür [1]. Bir hedefe gelen elektromanyetik dalgalar hedefte yüzey akımları meydana getirir. Bu yüzey akımları hedeften elektromanyetik dalgalar yayılmasına neden olup radar sistemleri tarafından tespit edilmesine yol açar [5]. Bu tespiti yapmak için hedefe çarpan radardan gönderilen elektromanyetik dalgaların enerjisinin ne kadarının radar sistemine geri yansıtıldığını hesaplamak gerekir.

Bir hedefin Radar Kesit Alanı o hedefin boyutuna, şekline ve malzemesine; gelen radar dalgasının frekansına, polarizasyonuna ve hedefin radara göre konumu dahil olmak üzere birçok faktöre bağlıdır. Daha büyük fiziksel boyutlara sahip olan platformlar daha yüksek RKA değerlerine sahip olma eğilimindedir, bu da onları radar sistemleri tarafından kolaylıkla tespit edilmelerine yol açar. Buna karşılık, daha küçük fiziksel boyutlara, belirli açılarla oluşturulmuş dış yüzey geometrisine ve radar dalgalarını absorbe eden ya da saçılmaları kontrol edilebilen malzemelere sahip platformalar daha düşük RKA değerlerine sahip olabilir. Düşük RKA değerine sahip olan bu sistemlerin radar sistemleri tarafından tespit edilmeleri daha zordur [6]. Bu nedenle radarda tespit edilmek istenmeyen platformlar tasarlamak isteyen bilim insanları ve mühendisler tasarımlarında birçok parametreye dikkat etmek zorundalardır.

Radar Kesit Alanı (RKA), genellikle σ ile gösterilir, radar teorisinde bir hedefin tespit edilebilirliğini niceliksel olarak ifade eder. RKA, radar alıcısına gerçek hedef tarafından saçılan güçle eşdeğer bir güç miktarını saçmak için gereken varsayımsal alan olarak tanımlanır [1]. Radar kesit alanını basitleştirilmiş bistatik radar formunda şu şekilde ifade edilebilir:

$$\sigma = \frac{P_r G_t G_r \lambda^2}{P_t (4\pi)^3 R_t^2 R_r^2 L} \tag{2.1}$$

Burada P_r alınan güç, P_t gönderilen güç, G_t gönderen antenin kazancı, G_r alıcı antenin kazancı, L sistem kayıpları, λ radar sinyalinin dalga boyu, R_t ile R_r ise sırasıyla gönderici ile hedef arasındaki ve hedef ile alıcı arasındaki mesafeleri temsil eder [1].

Monostatik radar sistemleri için, yani gönderici ve alıcının kayıpsız bir ortamda bir arada bulunduğu durumlarda, RKA şu şekilde basitleşir:

$$\sigma = \frac{P_r G^2 \lambda^2}{P_t (4\pi)^3 R^4} \tag{2.2}$$

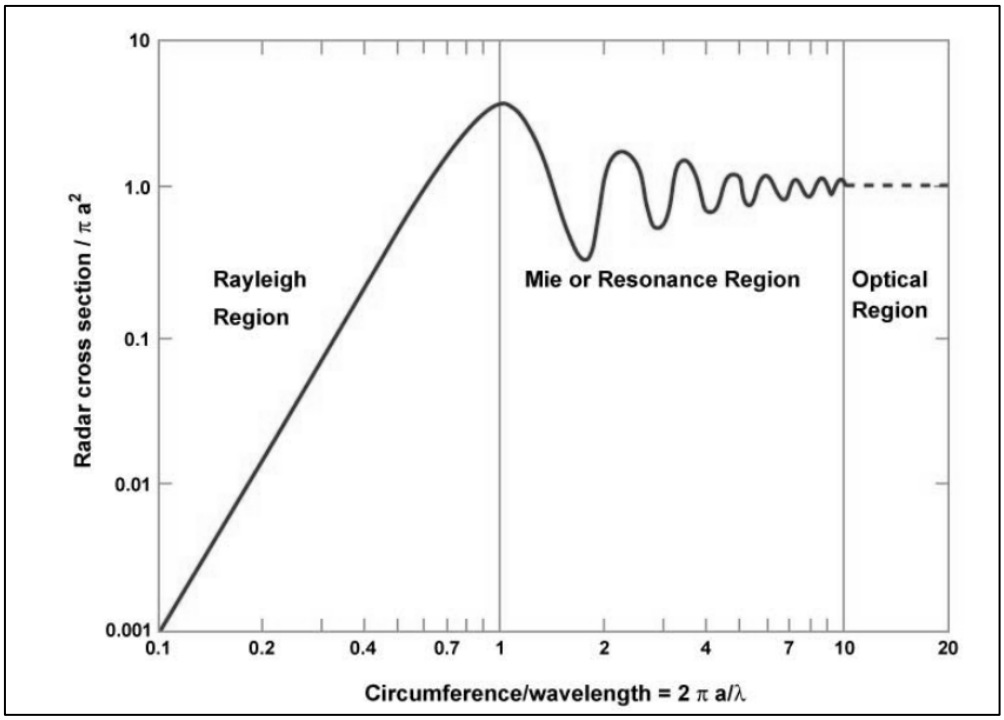
Burada R, radar ile hedef arasındaki tek yönlü mesafedir. Bu denklem, alınan gücün ters orantılı olarak mesafeye dördüncü dereceden bağlı olduğunu vurgular. Radar Kesit Alanını yansıyan ve gelen alan vektörleri cinsinden ifade edecek olursak:

$$\sigma = \lim_{R\to\infty} 4\pi R^2 \frac{\left|\vec{E_s}\right|^2}{\left|\vec{E_i}\right|^2} \tag{2.3}$$

Bu denklemde RKA, belirli bir yönde saçılan ve birim alana düşen gücün, gelen dalganın birim alana düşen gücüne oranı olarak tanımlanmıştır [7]. Bu denklemde saçılan alan gücü, gelen alan gücüne göre normalize edildiği için hedef ve kaynağın arasındaki mesafenin önemi yoktur [8]. Radar kesit alanı bir alanı temsil ettiği için birimi m^2'dir.Knott'un belirttiğine göre, bir nesnenin çeşitli açılardaki RKA değerleri 10^{-4} m^2 ile 10^4 m^2 arasında değişiklik gösterebilir. Bu geniş dinamik aralık nedeniyle, bu değerlerin aynı grafikte sunulması zorlaşmaktadır. Bu yüzden, 1 m^2'yi referans alarak "desibel metrekare" olarak adlandırılan logaritmik ölçek kullanılmaktadır [5,8].

$$\sigma_{dBsm} = \sigma_{dBm^2} = 10\,log_{10}\frac{\sigma_{m^2}}{\sigma_{ref}} = 10\,log_{10}\frac{\sigma_{m^2}}{1} \tag{2.4}$$

Bir hedefin radar kesit alanı, hedefin boyutu ve hedefe ulaşan sinyalin dalga boyunun oranına göre tanımlanan üç frekans bölgesinde incelenir [8]. Şekil 2.2'de de gösterildiği üzere bu bölgeler Düşük frekans (Rayleigh) Bölgesi, Rezonans (Mie) Bölgesi ve Yüksek frekans (Optik) Bölgesi, olmak üzere adlandırılır [1].



Şekil 2.2. Dalga boyuna göre kürenin radar kesit alanı [1]

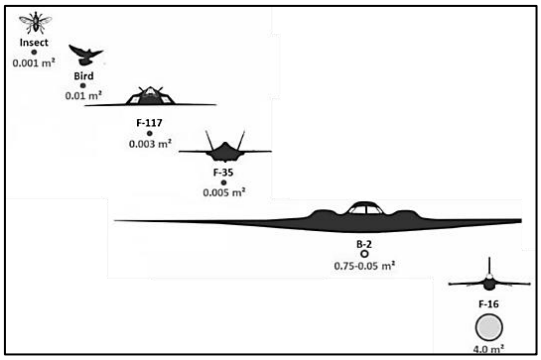
Düşük frekans (Rayleigh) bölgesinde, hedefin boyutları gelen radar dalgasının dalga boyundan önemli ölçüde daha küçüktür. Bu bölgede saçılma, frekansın dördüncü kuvvetiyle doğru orantılı olarak ölçeklenir. Hedefe çarpan düzlem dalgadan dolayı indüklenen akımın genlik ve fazının hedefin yüzeyi boyunca değişmediği kabul edilir bu nedenle bu bölgede hedefin şekli çok önem taşımaz [9]. Hedef boyutu gelen dalganın dalga boyuyla karşılaştırılabilir hale geldiğinde, hedef Rezonans (Mie) bölgesine girer. Bu bölgede RKA, hedefin farklı kısımlarından saçılan dalgaların yapıcı ve yıkıcı girişimleri nedeniyle frekansın bir fonksiyonu olarak dalgalanmalar gösterir. Bu bölgede hedefin geometrisi radar kesit alanına etki eder [10]. Hedefe ulaşan dalganın dalga boyu, hedefin boyutundan oldukça küçük olduğunda, örneğin uçak gibi büyük platformlar için Radar Kesit Alanı (RKA) analizleri yüksek frekans ya da diğer bir deyişle Optik Bölge kapsamında incelenmektedir. Bu durum, dalga boyunun hedefin fiziksel boyutlarıyla karşılaştırıldığında, hedefin yüzeyinde meydana gelen etkileşimlerin daha karmaşık hale gelmesine yol açar.

Yüksek frekanslı dalgalar, hedefin yüzeyine çarptığında, yüzeydeki farklı noktalar arasında çeşitli akım ve faz açısı değişiklikleri meydana gelir. Bu değişiklikler, hedefin her bir saçılma noktasının RKA üzerindeki etkisini belirler. Yani, hedefin yüzeyindeki her bir nokta, dalganın yansıma ve saçılma özelliklerini etkileyerek, genel radar kesit alanını

şekillendirir. Bu nedenle, RKA analizleri yapılırken, hedefin yüzey yapısı, malzeme özellikleri ve geometrik şekli gibi faktörler dikkate alınmalıdır. Ayrıca, bu tür analizler, radar sistemlerinin hedefleri daha iyi tespit edebilmesi için kritik öneme sahiptir. Hedefin yüzeyindeki akımın faz açısındaki değişkenlik, radar sinyallerinin nasıl dağıldığını ve hedefin radarda görünürlüğünü etkileyen önemli bir parametredir. Dolayısıyla, RKA hesaplamaları ve analizleri, askeri ve sivil havacılıkta, radar sistemlerinin tasarımında ve geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Sonuç olarak, yüksek frekanslı dalgaların hedef üzerindeki etkileri, radar teknolojisinin gelişimi ve hedef tespiti açısından büyük bir öneme sahiptir. Bu nedenle, RKA analizleri, hedeflerin radar görünürlüğünü azaltmak veya artırmak için stratejik bir araç olarak kullanılmaktadır [11].

Şekil 2.3'te görüldüğü üzere böcekler ve kuşlar gibi küçük nesnelerin RKA değerleri genellikle çok düşüktür. Bu düşük RKA değerleri, böceklerin ve küçük kuşların radar sistemleri tarafından tespit edilmesini zorlaştırır. Düşük görünürlük teknolojisine sahip savaş uçakları, düşük RKA değerleri ile dikkat çekerler. Örneğin, F-117 Nighthawk ve B-2 Spirit gibi uçaklar, özel geometrik tasarımları ve kullandıkları malzemeler sayesinde radar tarafından yansıtılan sinyalin miktarını minimize ederler. F-35 Lightning II, gelişmiş tasarımı, malzemeleri ve gelişmiş teknolojik sensörleri sayesinde düşük RKA değerleri elde eder. Bu, uçağın düşman radar sistemleri tarafından daha zor tespit edilmesini sağlar. F-16 gibi geleneksel savaş uçakları ise daha yüksek RKA değerlerine sahiptir.

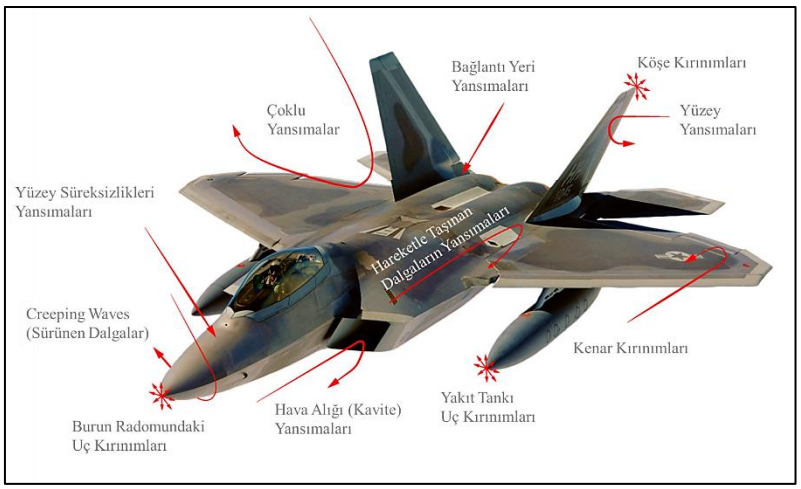
Düşük RKA değerine sahip olmak askeri platformların düşman radar sistemlerinden daha az algılanmasını sağlayarak, gizlilik ve hareket özgürlüğünü artırır. Bu, operasyonların daha etkili ve güvenli bir şekilde yürütülmesini mümkün kılar. Aynı zamanda, platformun tehdit altında kalma riskini azaltarak, daha uzun süre operasyon yapabilmesini ve stratejik avantaj sağlamasını destekler. Kısacası düşük görünür platformlar askeri sahada hem savunma hem de saldırı stratejileri için önemli bir avantajdır.



Şekil 2.3. Hava platformlarının ve bazı canlıların RKA değerleri [12]

2.2.1. Temel saçılım mekanizmaları

Elektromanyetik dalgalar kompleks bir hedefle etkileşime girdiğinde çeşitli saçılma mekanizmaları ortaya çıkar ve bu saçılmalar frekans ve açının bir fonksiyonu olan hedefin radar kesit alanına doğrudan etki ederler.[5]. Şekil 2.4'te kompleks bir geometriye sahip olan F-22 Raptor savaş uçağındaki saçılım mekanizmaları örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Kompleks geometrilerde görülen saçılım çeşitleri

- Yansımalar (Reflections), radar dalgalarının bir nesnenin yüzeyine çarptıktan sonra sekerek geldiği yöne dönmesidir. Radar kesit alanını etkileyen en önemli saçılma mekanizmalarından biridir. Kompleks geometrilerde, dalgaların çeşitli yüzeylerden ve kenarlardan yansımasıyla birden fazla yansıma meydana gelebilir. Bu çoklu yansımalar, birbirleriyle nasıl etkileşime girdiklerine bağlı olarak radar kesit alanını etkiler.
- Kırınımlar (Diffraction), radar dalgaları keskin kenar ve köşelerle karşılaştıklarında nesnenin etrafında bükülür ve yayılır bu da çeşitli yönlerde saçılmalara neden olur. Bu

düzensiz saçılmalar dalgaların radara beklenmedik açılarda ulaşmasına neden olabilir. Kırınım sonucu saçılan dalgalar nesnenin geometrisine göre değişim gösterebilir. Bu durum RKA hesaplarını zorlaştırabilir.

- Yüzey Dalgaları (Surfaces Waves), nesnenin yüzeyi boyunca hareket eden dalgalardır. Genellikle yuvarlak yüzey geometrisine sahip olan nesnelerde creeping wave (sürünen dalga) etkileriyle birlikte hedefte sızıntı dalgalarını üretir. Bu dalgalar da yüzey geometrisinde herhangi bir süreksizlikle karşılaştığında ekstra yansımalara sebep olur. Creeping Wave (Sürünen Dalga), nesnenin yüzeyindeki eğriliği takip eden özel bir yüzey dalgası türüdür. Yüzey boyunca ilerleyebilen bu dalga doğrudan yansımanın sınırlı olduğu durumlarda ekstra yansımaya sebep olurlar. Genellikle içbükey ve boşluk barındıran yapıların RKA hesabında önemli bir parametredir.
- Kavite (Cavity) Yansımaları, nesnenin içindeki boşluklara giren dalgaların bu boşluklarda birden fazla iç yansımaya sebep olmasıdır. Örneğin bir savaş uçağının hava alık boşlukları, motor yapılarındaki boşluklar yapıları gereği kavite yansımalarına neden olurlar. Dalgalar bu boşluklarda yönetilemeyen bir dizi yansımalara neden olabilir farklı açılarda geri yansımalara neden olabilirler. Kavite yapıları bulunduran karmaşık platformların karmaşık bir radar kesit alanı profiline sahip olmasına yo açabilirler. Düşük görünür platform tasarımlarında kavite yansımalarına neden olacak tasarımlardan kaçınılır.

Radar kesit alanı, bir nesnenin radar dalgalarıyla etkileşimi sonucunda ortaya çıkan yansımaların ölçülmesiyle belirlenir. Ancak karmaşık geometrilere sahip nesnelerde, bu etkileşimler basit bir şekilde analiz edilemez. Çünkü bu nesnelerin yüzey yapıları, malzeme özellikleri ve çevresel faktörler, radar dalgalarının nasıl saçılacağını etkileyen önemli unsurlardır. Elektromanyetik dalgaların kompleks geometrilerde birçok farklı saçılma mekanizmasını ortaya çıkardıkları için bu tür geometrilere sahip nesnelerin radar kesit alanlarını anlamak ve hesap etmek, gelişmiş modelleme ve simülasyon teknikleri gerektirir. Bu tekniklerin, bir nesnenin radar dalgalarıyla etkileşimini doğru bir biçimde öngörebilmesi için hem saçılma mekanizmalarını hem de bu mekanizmalar arasındaki karmaşık etkileşimleri dikkate alması gerekmektedir. Örneğin, bir nesnenin yüzeyindeki düzensizlikler, farklı açılardan gelen radar dalgalarının nasıl yansıyacağını etkileyebilir. Ayrıca, nesnenin malzeme özellikleri, elektromanyetik dalgaların emilimini ve saçılmasını da belirleyici bir rol oynar. Bu nedenle, radar kesit alanı hesaplamalarında hem geometrik hem de fiziksel parametrelerin bir arada değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu teknikler, bir

nesnenin radar dalgalarıyla nasıl etkileşime gireceğini doğru bir şekilde tahmin etmek için hem saçılma mekanizmalarını hem de bu mekanizmaların arasındaki karmaşık etkileşimi hesaba katması gereklidir.

Temel yansıma mekanizmalarına etki eden bir diğer parametre ise platform yerleşiminde bulunan antenlerdir. Anten yapıları platformun radar kesit alanına büyük ölçüde etki etmektedir çünkü bu yapılar hem geometrik olarak bir yansıma yapabilirken aynı zamanda antenin iletim hattındaki elemanlar da radardan gelen sinyallere göre platformun radar kesit alanına doğrudan etki ederler. Özellikle yapı üzerinde konformal yapıda olmayan ve platformun dış geometrini doğrudan etkileyen yapıdaki antenlerin geometri yapıları düzensiz açılarda yansımalara neden olabilirler [14]. Platformun yüzeyinde elektromanyetik süreksizliğe sebebiyet verecek girintili yapılar veya kavite içeren yapılardaki antenler platformun radar kesit alanının artmasına sebep olacaktır. Ayrıca, platforma ulaşan radar dalgaları, anten yapılarının besleme hatlarındaki uyumu olumsuz etkileyerek antenin radar kesit alanını artırma potansiyeline sahiptir. Bu durum, radar sistemlerinin etkinliğini ve platformun görünmezlik özelliklerini doğrudan etkileyebilir. Antenlerin tasarımı ve yerleşimi, radar dalgalarının nasıl yayıldığı ve alındığı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Eğer antenlerin besleme hatları arasında uyumsuzluk varsa, bu durum radar dalgalarının istenmeyen şekillerde yansımasına veya dağılmasına neden olabilir. Sonuç olarak, antenin radar kesit alanı artar ve bu da platformun radar tarafından tespit edilme olasılığını yükseltir.Bu nedenle, antenlerin istenen çalışma koşullarında radarda düşük görünür olması, platformun radar kesit alanı açısından son derece önemlidir. Düşük görünürlük, askeri ve sivil uygulamalarda, özellikle de gizlilik gerektiren durumlarda kritik bir faktördür. Antenlerin tasarımında, radar dalgalarının etkili bir şekilde yönetilmesi ve platformun radar kesit alanının minimize edilmesi için çeşitli mühendislik çözümleri ve teknikleri uygulanmalıdır. Bu, hem antenlerin fiziksel yapısının optimize edilmesi hem de kullanılan malzemelerin seçimi açısından önem taşır. Sonuç olarak, radar dalgalarının anten yapıları üzerindeki etkilerini dikkate almak, hm platformun görev sistemlerinin performansını hem de platformun genel düşük görünürlük kabiliyetini artırmak için kritik bir adımdır.

Antenler, radar kesit alanına etki eden yansıma kaynaklarına göre anten modu (Antenna Mode) ve yapısal mod (Structural Mode) olmak üzere iki farklı yansıma karakteristiğine sahiplerdir [15]. Anten radar kesit alanının yapısal modu, antenin ışıma özelliklerinden bağımsız olarak, antenin kendi fiziksel yapısı nedeniyle meydana gelen saçılmayı ifade eder

[2,5]. Bu mod, antenin geometrik ve malzeme özelliklerinden etkilenir. Anten ve üzerine monte edildiği platform üzerinde indüklenen akımlardan kaynaklanır ve dolayısıyla antenin entegrasyonu da platformun radar kesit alanını doğrudan etkiler. Örneğin anten yerleşiminde meydana gelen platform üzerinde kavite vb. yapıların oluşması platformun radar kesit alanının artmasına neden olur.Anten modu ve yapısal moddaki etkiler değerlendirildiğinde bir antenin radar kesit alanı Eşitlik (2.5)'te gösterilmektedir [13].

$$\sigma_{anten\ modu+yapısal\ mod} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_i G_r p_i p_r |\Gamma + C|^2 \tag{2.5}$$

Burada G_i geliş yönündeki anten kazancı, G_r radyasyon yönündeki anten kazancı, P_i anten ve radar sinyali arasındaki uyumsuzluk (mismatch) faktörü, Γ anten modu yansıma katsayısı, C yapısal mod yansıma katsayısı, λ radar sinyalinin dalga boyu, p_r ise uzak alandaki alıcı/verici antenler arasında uyumsuzluk (mismatch) faktörünü temsil eder. Bu eşitlikte Γ (anten modu yansıma katsayısı) ihmal edildiğinde antenin yapısal moddaki radar kesit alanı, C (yapısal mod yansıma katsayısı) ihmal edildiğinde ise antenin anten modundaki radar kesit alanı elde edilmiş olur.

Antenlerin radar kesit alanı etkileyen bir diğer parametre ise antenin çalıştığı frekans bandıdır. Antenin radar kesit alanı, antenin çalıştığı bant ve bu bandın dışında farklılık göstermektedir. Çalışma frekansı dışındaki düşük frekanslarda antenin besleme hattına az miktarda enerji girer ya da hiç enerji girmez. Bu durumda radar sinyali anten elemanlarından geçip anten düzleminden yansıma yapar. Çalışma frekansı bölgesinde antenin besleme hattına giren enerji antenin iç yapısında uyumsuzluklara (mismatch) neden olur ve bu uyumsuzluklardan dolayı yansımalar meydana gelir. Bu yansımalar belirli açı ve frekanslarda sıklaştığında bu açı ve frekanslarda antenin radar kesit alanının artmasına neden olabilirler. Antenin çalışma frekansı dışındaki yüksek frekanslarda Bragg lob adı verilen; temel yansımalar harici meydana gelen ekstra yansımalar oluşur [14]. Antenin ve dolayısıyla platformun RKA'sını artırabilen bu ek yansımalar, elektromanyetik dalgaların yayılımı ve etkileşimleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu durum, özellikle iletişim sistemleri ve radar teknolojileri gibi alanlarda performansın artırılması açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bragg lobları, belirli açılarda ve frekanslarda ortaya çıkan yansıma ve girişim desenleri olarak bilinir ve bu lobların etkisi, sistemin genel verimliliğini olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle, Bragg loblarının etkisini azaltacak tasarım çözümlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu çözümler, anten tasarımında kullanılan malzemelerin

seçimi, anten geometrisinin optimize edilmesi ve yansımaların kontrolü gibi çeşitli stratejileri içerebilir. Ayrıca, bu tür tasarım iyileştirmeleri, sistemin daha geniş bir frekans aralığında daha iyi performans göstermesini sağlayarak, iletişim kalitesini artırabilir ve sinyal kaybını minimize edebilir. Sonuç olarak, bu ek yansımaların etkilerini azaltmak için yapılacak çalışmalar hem antenin hem de platformun genel performansını artıracak ve daha etkili sistemlerinin geliştirilmesine katkıda bulunacaktır. Bu bağlamda, mühendislik ve tasarım süreçlerinde yenilikçi yaklaşımların benimsenmesi büyük önem taşımaktadır.

Genellikle faz dizi antenlerde belirli bir frekans ve dalga boyu ilişkisi altında ortaya çıkan Bragg loblar anten elemanlarını arasındaki mesafe dalga boyunun yarısından daha fazla olduğunda oluşurlar bu yüzden antenin çalışma frekansı dışındaki yüksek frekanslarda RKA'nın kompleks hale gelmesine sebep olurlar.

Gelişmiş platformların görev sistemleri dikkate alındığında birçok farklı yapıda ve çeşitte anten yapılarının platformla entegre olması gerekliliği kaçınılmazdır. Bu yapıların her birinin platformun platform radar kesit alanının etkisi düşünüldüğünde bu yapıların da radar kesit alanlarının oldukça düşük olması gerekmektedir. Bu yüzden anten tasarımında Bragg loblarının etkilerini minimize etmek önemlidir. Anten elemanlarının yerleşimi ve faz ayarları dikkatlice optimize edilerek, istenmeyen Bragg loblarının etkisi azaltılabilir ve radar kesit alanı kontrol altında tutulabilir. Literatürdeki çalışmalar Frekans Seçici Yüzeylerin (FSY) anten RKA'nı azaltmada kullanılan en etkili çözüm yöntemlerinden biri olduğunu kanıtlamıştır [16,17]

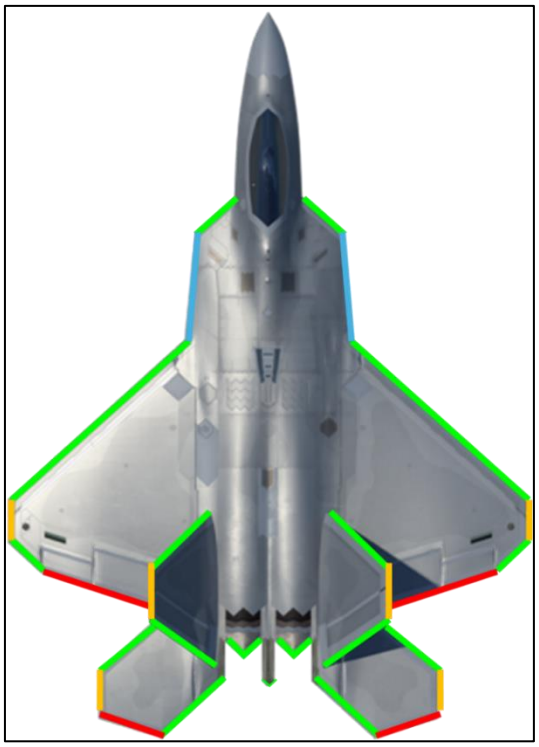
2.3. Radar Kesit Alanı Azaltım Teknikleri

Radar kesit alanı (RKA) azaltım teknikleri, radar tarafından bir nesnenin algılanmasını zorlaştırmayı amaçlar. Bu teknikler temel olarak elektromanyetik dalganın davranışlarına odaklanır. Elektromanyetik dalganın hedef üzerindeki saçılma mekanizmalarının bilinmesi hedefin radar kesit alanının yönetilebilmesi için önemlidir. Radar kesit alanı (RKA) azaltım teknikleri, bir nesneye gelen elektromanyetik dalgaların saçılma, yansıma ve kırılma gibi davranışlarını en aza indirerek, radar sinyallerinin büyük bir bölümünün soğurulmasını veya farklı yönlere dağılmasını sağlamayı hedefler. Bu sayede, radar sistemine geri yansıyan sinyallerin miktarı mümkün olduğunca azaltılır. Geometrik şekillendirme, radar absorbe eden malzeme (Radar Absorbing Material- RAM) kullanımı, metamalzeme ve frekans seçici

yüzey tasarımları, aktif ve pasif iptal yöntemleri (Active and Passive Cancellation Methods) temel RKA azaltım tekniklerindendir.

2.3.1. Geometrik şekillendirme

Radar tarafından tespit edilmesi zor olan düşük radar kesit alanına sahip bir platformun tasarımı; geometri optimizasyonu ile başlar. Geometrik şekillendirme ile nesnenin dış geometrisinden kaynaklı meydana gelen saçılma, yansıma ve kırılma gibi elektromanyetik saçılma mekanizmaları yönetilebilir hale gelir [5]. Yönetilebilirlik kavramı, düşük görünür tasarım ihtiyacına göre belirlenen öncelikli bölgelerde; geometriden kaynaklanan saçılma, yansıma ve kırılma gibi etkileri en aza indirilip bu etkilerden arındırılması ya da bu istenmeyen etkilerin belirlenen bölgelerde toplanabilmesi anlamına gelir. Tasarım ihtiyacına göre planlanan öncelikli bölgeler bu saçılma mekanizmalarından arındırılmaya çalışılır bu da bu bölgelerde elektromanyetik saçılmaların etkisinin az olmasına yani radarda düşük görünür olması anlamına gelir. Saçılma mekanizmalarının etkilerinin yönetilmesi için nesnenin geometrisinde belirlenen açı ve büyüklüklerde yüzey şekilleri tasarlanır, bu şekilde yüzeydeki saçılma mekanizmaları yönlendirilebilir. Geri yansıyan radar sinyalleri kaynağına dönmeyecek şekilde manipüle edildiği için radar izi düşük olur. Radarda düşük görünürlük kabiliyeti bakımından öne çıkan; Lockheed Martin firması tarafından üretilen F-22 Raptor savaş uçağının dış geometri tasarımında kullanılan platform açıları Şekil 2.5'te, Northrop Grumman B-2 Spirit uçağına ait platform açıları ise Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



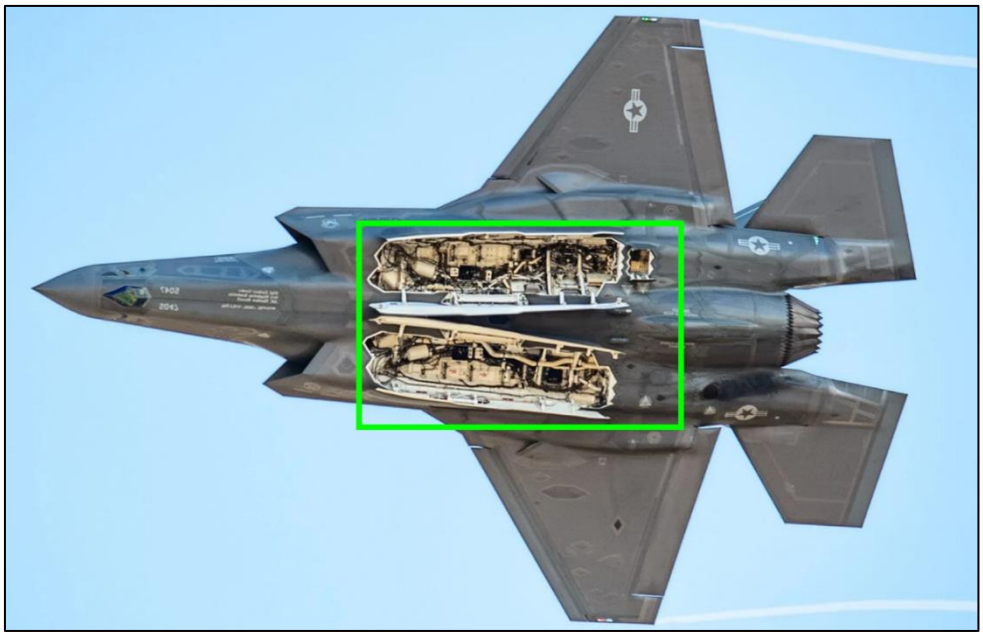
Şekil 2.5. F-22 Raptor uçağının platform tasarımı



Şekil 2.6. B-2 Spirit uçağının platform tasarımı

Ayrıca platformun dış geometrisinde bulunan ve elektromanyetik süreksizlik yaratan her kaynağın platforma uygun şekilde tasarlanması gerekmektedir.

Düşük RKA profiline sahip platformlar incelendiğinde genel olarak uygulanan geometrik şekillendirmelerden biri de dış yüzey üzerinde bulunan erişim kapakları ve panelleridir. Örneğin silah kapakları hava platformlarında yüzey alanı olarak elektromanyetik süreksizlik yaratan en büyük saçılma mekanizmalarından biridir. Bu kapakların tasarımında platform açıları kullanılarak düzenli ve simetrik yapılar tercih edilmiştir. Şekil 2.6'da Lockheed Martin F-35 Lightning II uçağının silah kapakları gösterilmiştir. Kapak sınırlarına dikkat edildiğinde uçağın platform açılarının kullanıldığı görülmektedir.



Şekil 2.7. F-35 Gövde içi mühimmat taşıyan silah kapakları

Geometrik şekillendirmenin temel amacı, RKA'na katkıda bulunan başlıca faktörleri azaltmak veya mümkünse tamamen ortadan kaldırmaktır. Ancak, düşük RKA elde etmek için uygulanan şekillendirme önlemleri zaman zaman daha zayıf aerodinamik performans, artan maliyetler, daha fazla bakım ihtiyacı veya daha düşük mühimmat kapasitesi gibi bazı olumsuzluklara yol açabilmektedir. Platformun radarda görünürlüğünün azaltılması ve diğer sistemlerle entegrasyonunun sağlanarak aerodinamik performansın olumsuz etkilenmemesi amacıyla, platform geometrisi üzerinde kapsamlı bir optimizasyon çalışması yapılması gerekmektedir. Bu optimizasyon süreci, radar kesit alanının (RKA) minimize edilmesi için çeşitli tasarım parametrelerinin dikkatlice değerlendirilmesini ve yeniden şekillendirilmesini içermektedir. Özellikle, platformun dış hatlarının ve yüzeylerinin, radar dalgalarını en az şekilde yansıtacak şekilde tasarlanması, görünürlüğü azaltmak için kritik bir öneme sahiptir. Aynı zamanda, bu süreçte diğer sistemlerle entegrasyonun sağlanması da büyük bir önem taşımaktadır. Bütünleşmiş sistemlerin, platformun aerodinamik yapısını olumsuz etkilemeden çalışabilmesi için, her bir bileşenin yerleşimi ve tasarımı üzerinde titizlikle durulmalıdır. Bu hem radarda görünürlüğünü azaltırken hem de platformun genel performansını korumak için gereklidir. Bu dezavantajlara rağmen, radar kesit alanının (RKA) azaltılmasıyla elde edilen avantajlar, operasyonel süreçlerde uçağın hayatta kalma kabiliyetini artırarak bu olumsuz etkileri dengelemektedir. Düşman radar sistemlerinden kaçınma yeteneği, platformun hayatta kalma oranını önemli ölçüde artırmakta ve bu da operasyonel başarı için kritik bir faktör haline gelmektedir. Sonuç olarak, radar

görünürlüğünün azaltılması ve sistem entegrasyonu konularında yapılacak olan optimizasyon çalışmaları, platformun genel etkinliğini artıracak ve modern savaş ortamında rekabetçi bir avantaj sağlayacaktır.

2.3.2. Aktif ve pasif iptal yöntemleri

Bir platformun radar sistemleri tarafından tespit edilme ihtimalini azaltmak için kullanılan yöntemlerden biri de iptal (Cancellation) yöntemidir. RKA azaltmada kullanılan iptal yöntemleri Aktif ve pasif iptal yöntemi olarak ikiye ayrılmaktadır. (Active and Passive Cancellation) [14]. Aktif iptal (Active Cancellation), bir hedefin radar kesit alanını azaltmak için bir hedeften yansıyan radar dalgaları ile yıkıcı bir şekilde etkileşime giren sinyaller üretir. Bu yöntemde, radar sinyallerini algılayan ve fazlarını, genliklerini ve frekanslarını inceleyen gelişmiş elektronik sistemleri kullanılır. Bu özellikler belirlendikten sonra sistem, aynı frekans ve genlikte ancak ters fazda bir karşı sinyal üretir. Bu sinyal yayıldığında, yıkıcı girişim yoluyla yansıyan radar sinyalini iptal eder [5]. Hedeften yansıyan sinyallerin iptal edildiği bu yöntemde tehdit unsurlarının değişen frekans, faz ve genlik gibi bilgilerinin bilinmesi ve bu bilgilere göre tam zamanlı bir güncelleme yapması gerekmektedir. Sinyalde yapılan değişiklik miktarına göre bu yöntem tam ve yarı aktif iptal yöntemi olarak sınıflandırılır. Geleneksel elektronik harp yöntemleriyle karşılaştırıldığında bu yöntemin avantajı genellikle çok düşük güç kullanmasıdır. Zorluğu ise çok hızlı işlem gerektirmesidir. Ayrıca sistemin hatalı bir biçimde çalışması, hedefin radarda daha fazla görünür hale gelebilmesine yol açabilmektedir.

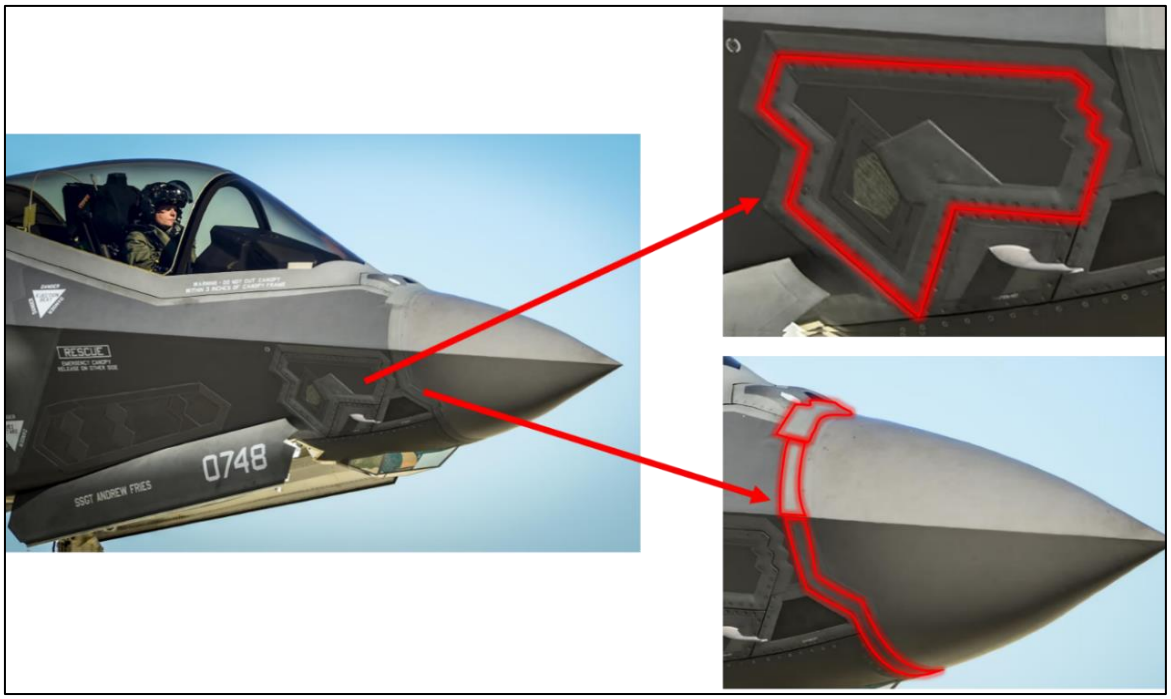
Pasif iptal (Passive Cancellation) yöntemi, radarda düşük görünür olması istenen platformdan yansıyan sinyalleri en aza indirmek ya da yok etmek için ikinci bir yansıma kaynağının sisteme entegre edilerek platformun radar kesit alanını düşürmeyi amaçlar. Pasif iptalle RKA azaltımında empedans yükleme tekniği kullanılır.[14] Empedans yükleme tekniği, bir nesnenin yüzeyine belirli empedans değerlerine sahip malzemeler yükleyerek radar kesit alanını (RKA) azaltır. Bu yaklaşımın amacı, bir nesnenin radar dalgalarının yansıma biçimini değiştirmektir. Bu biçim değiştirme empedans yükleme tekniğini kullanarak gerçekleştirilir. Bir malzemenin elektrik akımına karşı gösterdiği direnç, empedans olarak bilinir. Bu özellik, radar dalgalarının yansıma şeklini ve miktarını etkiler. Empedans yükleme, nesnenin yüzeyine yerleştirilen malzemelerin elektriksel ve manyetik özelliklerini değiştirerek radar dalgalarının fazını ve genliğini değiştirir. Bu nedenle, radar

alıcısına ulaşan yansıyan dalgalar belirli frekanslarda zayıflatılabilir veya iptal edilebilir. Bu teknik, genellikle dar bir frekans bandı aralığında etkili olduğundan, sadece belirli radar sistemlerine optimize edilmiş bir koruma sağlar [5]. Bununla birlikte, teknik olarak kompleks yüzey geometrileri ve geniş bant frekans aralıklarında etkisi sınırlı ve azdır. Empedans yükleme, gemiler ve askeri hava araçları gibi platformların radarda görünürlüğünü azaltmak için sıklıkla diğer RKA azaltma teknikleriyle birlikte kullanılmaktadır.

2.3.3. Malzeme kullanımı

Platformu oluşturan malzemeler, platformun radar kesit alanını etkileyerek radar sistemleri tarafından algılanabilirliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Amaç diğer RKA azaltma yöntemlerinde olduğu gibi bu yöntemde de hedeften yansıyan sinyalin radar kaynağına dönmesini engellemektir. Malzeme kullanımıyla hedefe farklı açılardan gelen elektromanyetik dalgalar absorbe edilebilir, farklı yönlere yansıtılabilir ya da ısı vb. bir enerji formuna dönüştürülebilir. Radar soğurucu malzemeler, metamalzemeler, frekans seçici yüzeyler, plazma teknolojileri, nanomalzemeler; Jaumann, Salisbury ve Dallenbach katmanları RKA azaltımında kullanılan malzemelere örnek olarak verilebilir [5]. Konformal frekans seçici yüzeylerin radar kesit alanını azaltmak için kullanılması, bu tez çalışmasının odak noktasıdır ve takip eden bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

Radar soğurucu malzemeler (Radar Absorbing Materials), elektromanyetik dalgaları absorbe edip yansıyan dalgaları zayıflatarak, radar kaynağına geri yansıyan enerji miktarını azaltırlar. Bu malzemeler genellikle ferritler veya karbon bazlı kompozitler gibi özel bileşimler içerir ve platformun çeşitli radar sistemlerince yakalanma ihtimalini azaltırlar. Genellikle geniş bir radar frekansı aralığında etkilidirler. Şekil 2.6’da F-35 savaş uçağında erişim paneli ve burun radomu etrafında kullanılan radar soğurucu malzemeler gösterilmiştir.



Şekil 2.8. F-35 Uçağındaki radar soğurucu elastomer ve boya uygulaması

2.4. Radar Kesit Alanı Hesaplama Yöntemleri

Hesaplamalı elektromanyetik (CEM) yöntemleri, elektromanyetik problemleri sayısal olarak çözmeyi amaçlayan tekniklerdir ve bu yöntemler, mühendislik ve bilim alanlarında geniş bir uygulama alanına sahiptir. Genellikle alçak frekans ve yüksek frekans yöntemleri olarak iki ana gruba ayrılmaktadır [18]. Bu ayrım, kullanılan matematiksel modellerin ve çözüm tekniklerinin temeline dayanmaktadır. Radar Kesit Alanı (RKA) tahmin yöntemleri, bu hesaplamalı elektromanyetik tekniklerin önemli bir uygulamasıdır. Elektromanyetik çözüm yöntemlerinden hangisinin tercih edileceği, büyük ölçüde uygulamanın frekansına ve alanına bağlıdır. Düşük frekanslı yöntemler, genellikle tam dalga çözümlerine odaklanır ve bu nedenle karmaşık hesaplamalar gerektirir. Bu kategoriye tam dalga hesaplama yöntemlerinin yanı sıra Moment Metodu, Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Sonlu Farklar Yöntemi de dahildir [19].

Bu yöntemler, elektromanyetik alanların daha geniş bir spektrumda analiz edilmesini sağlarken; çözüm süresi ve hesaplama maliyeti açısından daha fazla kaynak tüketebilir.

Yüksek frekans yöntemler, yaklaşık çözümler sunarak karmaşık problemleri daha ekonomik bir şekilde çözme imkânı sağlar. Bu yöntemler, genellikle dalga yayılımı ve etkileşimlerini

daha hızlı bir şekilde modellemek için kullanılır [8]. Yüksek frekanslı yöntemler büyük nesneler için uygundur ve daha çok yaklaşık çözümlerle çalışır. Yüksek frekanslı yöntemler alan tabanlı ve akım tabanlı yöntemler olmak üzere iki alt grupta incelenebilir. Geometrik Optik (GO) ve Geometrik Kırınım Teorisi (GTD) yöntemleri alan tabanlı yöntemler iken, Fiziksel Optik (PO) ve Fiziksel Kırınım Teorisi (PTD) yöntemleri akım tabanlı yöntemlerdir Yüksek frekanslı teknikler, özellikle anten tasarımı, radar sistemleri ve iletişim sistemleri gibi alanlarda yaygın olarak tercih edilmektedir [19].

Hem düşük hem de yüksek frekanslı elektromanyetik çözüm teknikleri, radar kesit alanı tahmininde önemli bir işlev üstlenmektedir. Bu tekniklerin seçimi, radar kesit alanı hesaplamalarında önemli bir karar verme sürecini temsil etmektedir. Bu yöntemlerin etkin bir biçimde uygulanması, elektromanyetik alanların anlaşılması ve kontrolü açısından son derece önemlidir. Düşük frekanslı teknikler, genellikle daha geniş uygulama alanlarını kapsayabilme yeteneği ve daha az karmaşık yapıları analiz edebilme avantajı sunarken, yüksek frekanslı teknikler ise daha detaylı ve hassas sonuçlar elde etme imkanı tanır.

Bu iki frekans aralığı, farklı uygulama alanlarına ve ihtiyaçlara göre seçilerek, radar sistemlerinin performansını artırmak için kritik bir rol oynamaktadır. Ayrıca, bu tekniklerin uygulanması sırasında dikkate alınması gereken birçok faktör bulunmaktadır. Örneğin, hedef nesnenin boyutu, şekli ve malzeme özellikleri, kullanılan elektromanyetik çözüm yönteminin etkinliğini doğrudan etkileyebilir. Bu nedenle, radar kesit alanı tahmininde kullanılacak yöntemin belirlenmesi, sadece teknik bir seçim değil, aynı zamanda hedefin özelliklerine ve çevresel koşullara bağlı olarak stratejik bir karar sürecidir. Sonuç olarak, elektromanyetik çözüm tekniklerinin doğru bir şekilde seçilmesi ve uygulanması, radar sistemlerinin güvenilirliğini ve doğruluğunu artırarak, askeri, sivil ve endüstriyel alanlarda daha etkili sonuçlar elde edilmesine olanak tanır. Bu bağlamda, araştırmaların ve geliştirmelerin devam etmesi, gelecekte daha yenilikçi ve etkili radar sistemlerinin ortaya çıkmasına katkı sağlayacaktır.

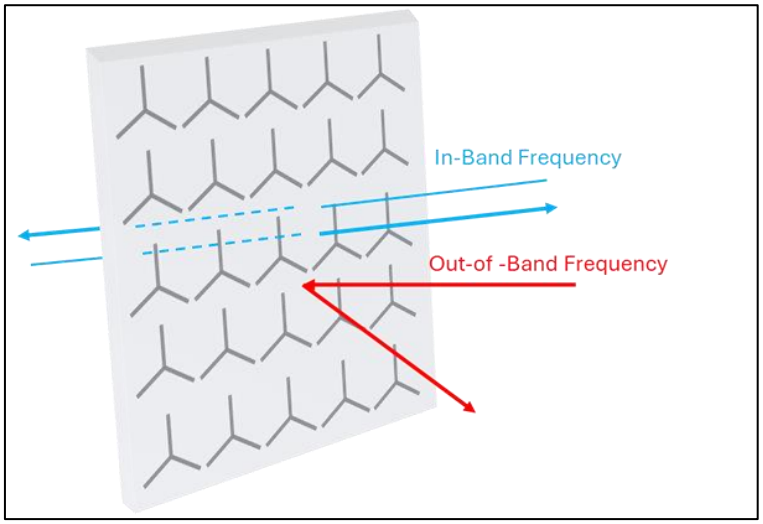
3. FREKANS SEÇİCİ YÜZEYLER

Frekans seçici yüzeyler (Frequency Selective Surfaces), gelen elektromanyetik dalgaların frekansına bağlı olarak iletim ve yansıma özellikleri değişen, yalıtkan bir alt tabaka üzerinde düzenlenmiş iletken eleman dizileri içeren periyodik yapılardır. Frekans seçici yüzeyler (FSY), elektromanyetik dalgaları yansıtmak, iletmek veya soğurmak amacıyla tasarlanmış iletken yamalar veya açıklık elemanlarından oluşan yapılar olarak da tanımlanabilir [16]. Frekans seçici yüzeylere dair ilk patent, 1919 yılında Marconi ve Franklin tarafından alınmış olmasına rağmen, bu teknolojinin askeri uygulamalarda kullanılmaya başlanması 1960'lı yılların ortalarına denk gelmektedir.[20]. R. Mittra ve C. H. Chan, 1971 yılında FSY'yi "Belirli frekanslarda elektromanyetik dalgaların iletimini veya yansımasını seçici olarak kontrol eden yapılar" olarak tanımlayarak, FSY'nin elektromanyetik dalgaları manipüle etme yeteneğini vurgulamıştır [21]. Daha sonra, Ben Munk, 2000 yılında FSY'yi "Belirli frekanslarda elektromanyetik dalgaları yansıtma veya iletme yeteneğine sahip, periyodik olarak düzenlenmiş metalik veya dielektrik elemanlardan oluşan yapılar" olarak tanımlayarak, yapıların düzenlenme ve malzeme özelliklerinin önemini belirtmiştir [13]. Munk, askeri radar sistemlerinin etkinliğini önemli ölçüde artıran çalışmalarıyla FSY'nin gelişiminde öncülerden biri olarak kabul edilmektedir.

Birim hücre, FSY'nin genel özelliklerini belirleyen en küçük tekrarlayan birimdir ve bu birimlerin düzenlenmesi, malzeme yapısı, geometrik şekli ve tasarımı, frekans yanıtını doğrudan etkileyen kritik unsurlardır. Birim hücrelerin malzeme yapısı, kullanılan malzemenin elektriksel ve manyetik özelliklerini içerir. Örneğin, iletkenlik, dielektrik sabiti ve kayıplar gibi parametreler, FSY'nin performansını belirleyen önemli faktörlerdir. Geometrik şekil ise, birim hücrelerin boyutları, şekilleri ve aralarındaki mesafeleri kapsar. Bu unsurlar, belirli frekanslarda dalga etkileşimlerini optimize etmek için dikkatlice tasarlanmalıdır.

Tasarım aşamasında, birim hücrelerin yerleşimi ve düzeni de büyük bir öneme sahiptir. Farklı düzenlemeler, FSY'nin frekans yanıtını değiştirebilir ve istenen iletim ve yansıma karakteristik özelliklerin elde edilmesine yardımcı olabilir. Örneğin, birim hücrelerin simetrik veya asimetrik yerleşimi, belirli frekanslarda daha iyi performans sağlamak için kullanılabilir.

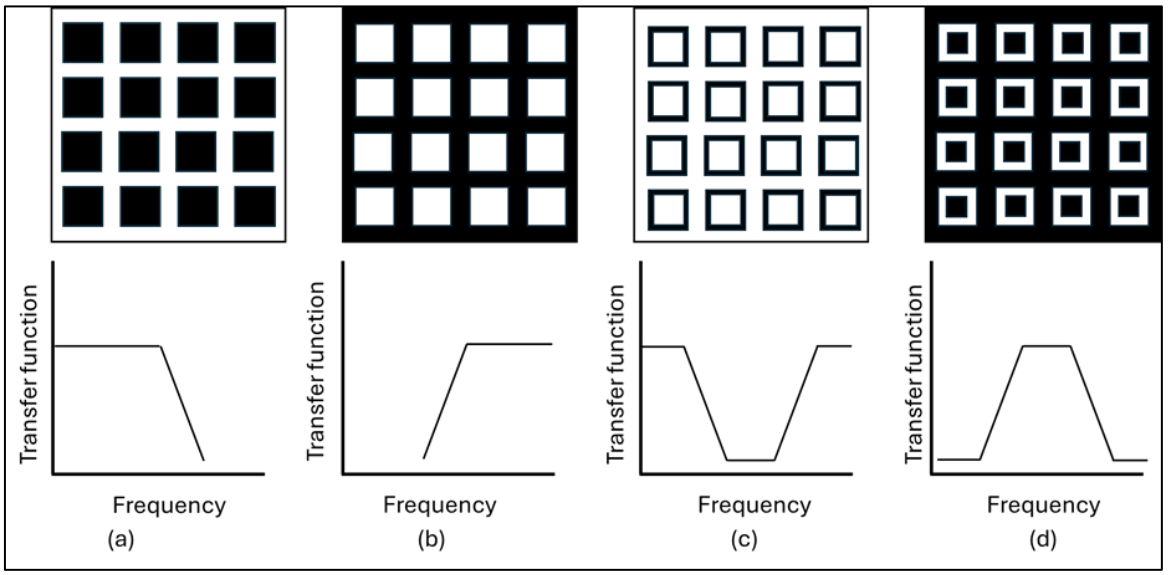
Şekil 3.1'de, frekans seçici yüzeylerin işleyiş prensibi detaylı bir şekilde sunulmuştur. Bu şekil, FSY'nin nasıl çalıştığını ve elektromanyetik dalgaların bu yüzeylerle etkileşimini görsel olarak açıklamaktadır. FSY'lerin tasarımında ve uygulamalarında bu prensiplerin anlaşılması, daha etkili ve verimli sistemlerin geliştirilmesine olanak tanır. Bu nedenle, birim hücrelerin özellikleri ve düzenlemeleri, frekans seçici yüzeylerin başarısı için kritik bir rol oynamaktadır.



Şekil 3.1. Frekans seçici yüzeylerin çalışma prensibi [33]

Frekans Seçici Yüzeyler (FSY), belirli frekanslardaki elektromanyetik dalgaları seçici olarak yansıtarak veya ileterek manipüle etmek üzere özel olarak tasarlanmış yapılardır. FSY yüzeyine herhangi bir açıdan gelen düzlemsel dalga, FSY elemanlarının rezonans frekansı ile eşleştiğinde ya tamamen ya da kısmen yüzeyin diğer tarafına iletilebilir ya da yüzeyden geri yansıyabilir. Sonuç olarak, FSY'ler, belirli geliş açıları, polarizasyon türleri ve frekanslarda elektromanyetik dalgaları geçirebilen veya durdurabilen en etkili uzamsal filtrelerdir [22]. FSY'lerin filtreleme özellikleri dört ana kategoriye ayrılır: alçak geçiren filtre, yüksek geçiren filtre, bant durduran filtre ve bant geçiren filtre. Alçak Geçiren FSY'ler belirli bir frekans aralığına kadar düşük frekanslı dalgaların geçmesine izin verirken, daha yüksek frekanslı dalgaları engeller. Yüksek Geçiren FSY'ler ise alçak geçiren FSY'lerin aksine; yüksek frekanslı dalgaların belirli bir frekans kesiminin üzerinden geçmesine izin verirken, daha düşük frekansların geçişine izin vermezler. Bant Geçiren FSY'ler belirli bir frekans bandında dalgaların geçmesine izin verirken, bu bandın dışındaki frekansları engellerken; Bant durduran FSY'ler, belirli bir frekans bandındaki dalgaların geçişini durdururken, bu bandın dışındaki frekansların geçmesine izin verir [16].

Birim hücrelerin tasarımı, seçici yüzeylerin alçak geçiren, yüksek geçiren, bant geçiren ve bant durduran özelliklerini etkileyen önemli faktörlerden biridir. FSY yapısı, birim hücrelerden oluşur ve bu hücrelerin boyutu, geometrisi ve düzenlemesi yüzeyin frekans seçici özelliklerini doğrudan etkiler. Frekans seçici yüzeyler, bu tasarım farklılıklarından büyük ölçüde etkilenir. İstenilen filtreleme özelliklerini elde etmek için, birim hücrelerin düzeni ve geometrisi dikkatlice tasarlanmalıdır. Şekil 3.2'de frekans seçici yüzeylerin filtrele çeşitleri tasarım örnekleri ve transfer fonksiyonlarıyla birlikte verilmiştir.



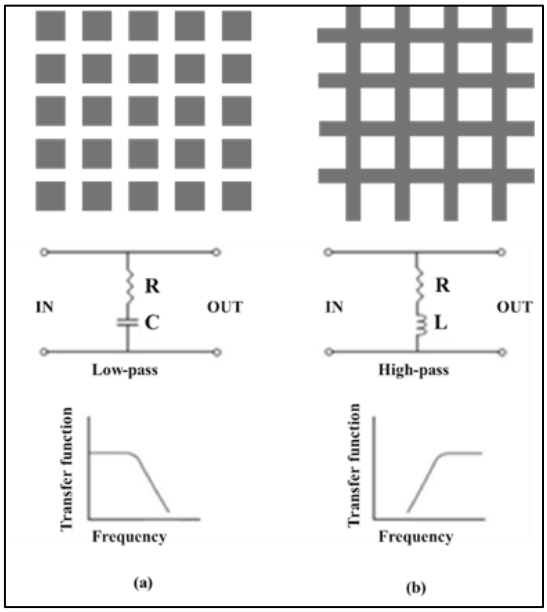
Şekil 3.2. Frekans seçici yüzey filtre özellikleri (a) Alçak geçiren filtre (b) Yüksek geçiren filtre (c) Bant durduran filtre (d) Bant geçiren filtre [33]

FSY yüzey tasarımda ilk kritik adım, FSY'in istenen rezonans kriterlerini karşılamasını sağlamak amacıyla elemanların seçimi, yani geometrisi, boyutu ve kullanılan yalıtkan ve iletken tabakaların özellikleridir. FSY'in kapasitif (C), endüktif (L) ve dirençsel (R) etkilerini içeren rezonans frekansı (3.1)'deki formülde verilmiştir.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{3.1}$$

Elektromanyetik temel kavramlar kullanılarak, bu pasif bileşen değerleri, FSY'nin frekans tepkisini özelleştirmek için ayarlanabilir. Belirli bir filtre tepkisi oluşturulurken, bu endüktif ve kapasitif elemanları stratejik olarak değiştirmek önemli görünmektedir. FSY'nin boyutlandırılması, L ve C değerlerindeki değişikliklerle de ilişkilidir. Bir elektromanyetik dalga, FSY'nin birim hücresi ile etkileşime girdiğinde, hücre eşdeğer özelliklere sahip bir

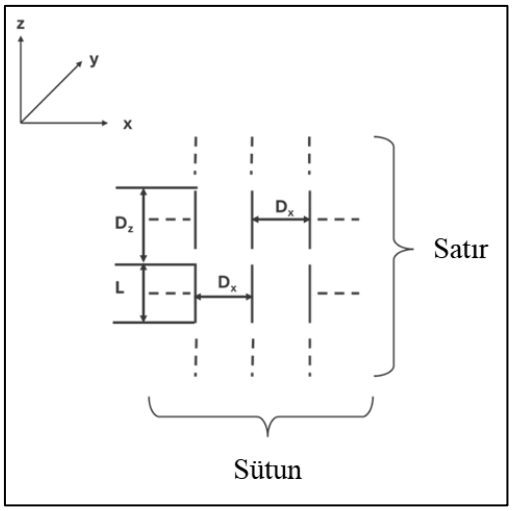
rezonans devresi gibi davranır. Dizinin uygun elemanını seçmek, FSY tasarımında kritik öneme sahiptir. FSY birim hücresinde elektromanyetik dalgaların frekans tepkisi, kapasitans (C) ve endüktans (L) ile belirlenir. Kapasitans, birim hücrenin elektrik alanını depolama yeteneğini ifade ederken, endüktans manyetik alanın depolama yeteneğini ifade eder. Birim hücrenin rezonans frekansı bu iki değişken tarafından doğrudan etkilenir ve bu da sistemin genel performansını etkiler. FSY yapısı, L ve C'nin doğru bir şekilde belirlenmesi ve optimize edilmesiyle gerekli frekans aralığında başarıyla çalışabilir. Şekil 3.3'te, alçak geçiren filtrenin ve yüksek geçiren filtrenin devre yapılarını göstermektedir.



Şekil 3.3. Tamamlayıcı elemanlardan oluşan periyodik yapılar (a) alçak geçiren ve (b) yüksek geçiren filtreler olarak tasarlanabilir, her biri kendi eşdeğer devrelerine ve frekans yanıtlarına sahiptir (metalik-gri renk). Bu tasarımlarda, patch array yapısı kapasitif bir tepki gösterirken, slot array yapısı endüktif bir tepki gösterir. [16,33]

Periyodik yapıların empedans nitelikleri iki teknikle değerlendirilebilir: karşılıklı empedans (eleman-eleman) yöntemi ve düzlem dalga açılımı (spektral) yöntemi. Periyodik FSY tabanlı elektromanyetik yapıların tasarımı için Floquet teoreminden yararlanılabilir. Bu teorem, çözümün aynı periyodikliği sergileyeceğini gösterir [16].

Düzlemsel bir dizinin x ve z yönlerinde sonsuza uzandığı varsayılırsa, tek tip elemanlar arası aralığa sahiptir ($D_x = D_z$). Periyodik bir konfigürasyon (sonsuz × sonsuz) olarak adlandırılır ve Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Elemanların aralığını (D_x, D_z) ve L eleman uzunluğunu gösteren bir periyodik yapı [33]

Bu periyodik bir konfigürasyondur ve xz düzleminde sonsuza kadar uzatılmıştır. Belirli bir yönde hareket eden bir elektromanyetik dalganın bu diziye çarptığını varsayalım [23]. Gelen dalga nedeniyle FSY'in tüm bir elemanı boyunca indüklenen akımlar, gelen elektromanyetik alanın fazı indüklenen akımın fazı ile aynı hizada olacak şekilde eşit genlikler sergiler. Dizideki periyodiklik, konfigürasyon boyunca indüklenen akım ve gerilimde periyodik değişimlere yol açar. Floquet teoremi bu periyodik değişimlerin temel harmoniğinin belirlenmesine yardımcı olur. Floquet teoremine göre, elemanın m sütunu ve n satırı ile ilişkili akımlar aşağıdaki gibi yazılabilir [24]:

$$I_{mn} = I_{0,0} e^{-j\beta m D_x s_x} e^{-j\beta n D_z s_z} \tag{3.2}$$

Burada $I_{0,0}$ merkezdeki (0,0) akımın genliği, β faz sabiti, s_{xy} x ve y eksenindeki birim vektördür. Merkezdeki referans elemana göre Ohm kanunu kullanıldığında aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$V^{0,0} = \left[Z_L + \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} Z_{0,mn} e^{-j\beta m D_x s_x} e^{-j\beta n D_z s_z}\right] I_{0,0} \tag{3.3}$$

$$Z^{0,0} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} Z_{0,mn} e^{-j\beta m D_x s_x} e^{-j\beta n D_z s_z} \tag{3.4}$$

3.1. Frekans Seçici Yüzey Parametreleri

Munk'a göre, frekans seçici yüzeylerin karakteristiktik özelliklerini belirleyen en önemli faktörler şunlardır: tasarımda kullanılan birim hücrenin geometrik şekli ve boyutu, dielektrik tabaka ve elemanların iletkenliği, birim hücreler arasındaki mesafe, elektromanyetik dalganın yüzeye geliş açısı ve kutuplanmasıdır [16]. Bu faktörlerin her biri, elektromanyetik dalgaların bir yüzeyle etkileşimini ve bu etkileşimin sonucunda ortaya çıkan yansıma ve iletim özelliklerini doğrudan etkileyen unsurlardır. Öncelikle, birim hücre geometrisi, tasarımın temel yapı taşını oluşturur. FSY'i oluşturan birim hücrenin geometrisi, yüzeye gelen elektromanyetik dalgaların yüzeyle nasıl etkileşeceğini belirleyen kritik bir etkendir. Farklı geometrik yapıların, elektromanyetik dalgaların yansıma ve iletim özellikleri üzerinde farklı etkileri olabilir. Unsurlardır. Öncelikle, birim hücre geometrisi, tasarımın temel yapı taşını oluşturur. FSY'i oluşturan birim hücrenin geometrisi, yüzeye gelen elektromanyetik dalgaların yüzeyle nasıl etkileşeceğini belirleyen kritik bir etkendir. Farklı geometrik yapıların, elektromanyetik dalgaların yansıma ve iletim özellikleri üzerinde farklı etkileri olabilir.

Elemanların iletkenlik özellikleri de yansıma ve iletim karakteristiklerini etkileyen bir diğer önemli faktördür. İletkenlik, bir malzemenin elektrik akımını ne kadar iyi iletebildiğini gösterir ve bu özellik, elektromanyetik dalgaların yüzeyde nasıl yayıldığını ve ne kadarının yansıyacağını belirler [14]. Yüksek iletkenliğe sahip malzemeler, genellikle daha az yansıma ve daha fazla iletim sağlar. Dielektrik malzemeler, elektromanyetik dalgaların geçişini etkileyerek, yansıma ve iletim oranlarını değiştirebilir [13]. Bu malzemelerin kalınlığı ve dielektrik sabiti, dalgaların yüzeyden geçişini ve yansımasını etkileyen önemli parametrelerdir. Birim elemanlar arasındaki boşluk mesafesi, elektromanyetik dalgaların yayılma özelliklerini doğrudan etkileyen bir unsurdur. Bu mesafe, elektromanyetik dalgaların birbirleriyle etkileşimini, yansıma ve iletim süreçlerini belirler. Boşluk mesafesi arttıkça, elektromanyetik dalgaların etkileşimi azalabilir ve bu durum, yüzeyin yansıma ve iletim karakteristiklerini değiştirebilir.

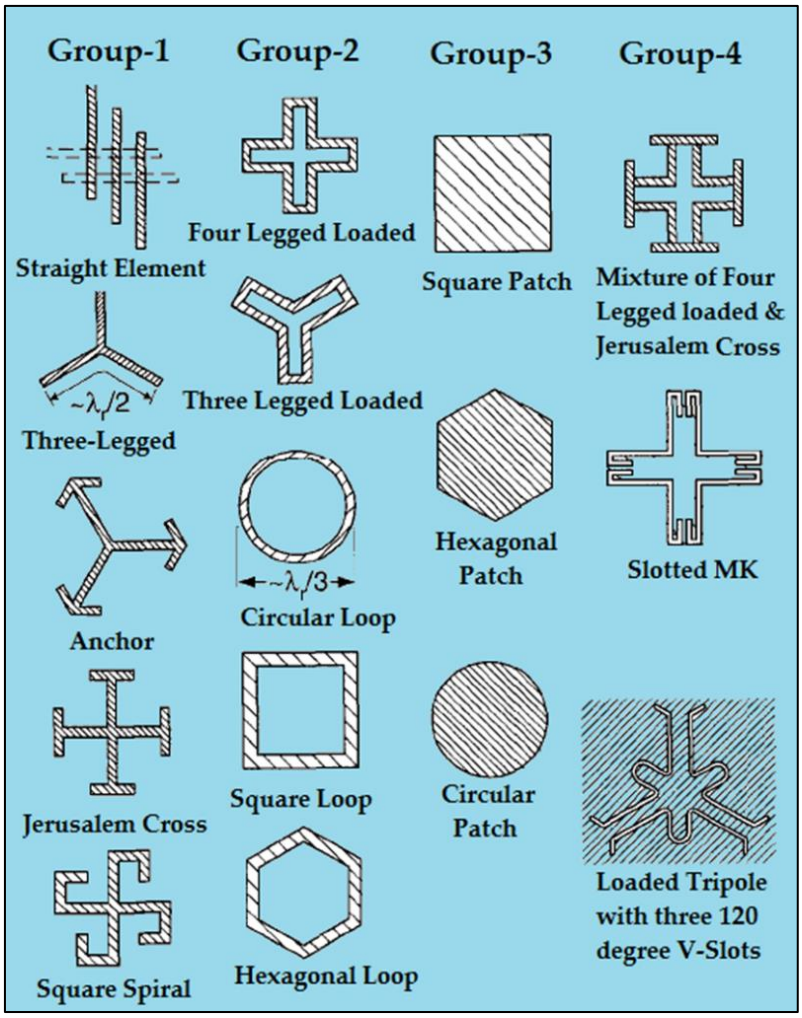
Elektromanyetik dalgaların yüzeye çarpma açısı ve polarizasyonu, seçici yüzeylerin özelliklerini etkileyen diğer önemli faktörlerdir. Elektromanyetik dalgalar yüzeye farklı açılardan çarptıklarında, yüzeyin yapısı ve özellikleri onlara farklı tepkiler verebilir. Frekans seçici yüzeylerin davranışı da elektromanyetik dalgaların polarizasyonuna bağlıdır.

Polarizasyon, elektromanyetik dalgaların elektrik alan vektörünün yönünü tanımlayan önemli bir özelliktir. Bu yön, dalgaların çeşitli yüzeylerle etkileşiminde belirleyici bir rol oynamaktadır. Örneğin, yatay polarizasyona sahip dalgalar, bir yüzeyle etkileşime girdiğinde, yüzeyden yansıma, kırılma veya emilim gibi olayları farklı bir şekilde gerçekleştirir. Yatay polarizasyona sahip dalgalar, yüzeyle paralel bir düzlemde hareket ederken, yüzeyin özelliklerine bağlı olarak belirli bir açıda yansıyabilir veya kırılabilir. Öte yandan, dikey polarizasyona sahip dalgalar, elektrik alan vektörünün dikey bir düzlemde yönlendirilmesiyle karakterize edilir. Bu tür dalgalar, yüzeyle etkileşimde farklı bir etki yaratabilir; örneğin, dikey polarizasyona sahip dalgalar, yüzeyin yapısına ve malzeme özelliklerine bağlı olarak daha fazla emilim veya farklı bir yansıma açısı gösterebilir. Bu durum, özellikle optik ve elektromanyetik uygulamalarda, dalgaların davranışını anlamak ve kontrol etmek açısından kritik öneme sahiptir [16].

3.1.1. Frekans seçici yüzeyin geometrik şekli ve boyutu

Frekans seçici yüzeyi meydana getiren birim hücrenin geometrik şekli ve boyutu, yüzeye ulaşan elektromanyetik dalgaların yüzeyle etkileşim biçimini belirleyen önemli bir faktördür. Bu etkileşim, dalgaların yüzeyden yansıma, emilim ve iletim gibi davranışlarını içerir. Elektromanyetik dalgaların yüzeyle etkileşimi, birim hücrenin şekli, boyutu ve düzeni gibi geometrik parametrelerden büyük ölçüde etkilenir.

Dört ana tip FSY eleman grubu, genel olarak belirli kriterlere göre sınıflandırılmıştır [16]. Bu sınıflandırma, ilgili literatürde detaylı bir şekilde ele alınmış ve Şekil 3.4'te görsel olarak sunulmuştur. Bu sınıflandırma, FSY eleman gruplarının daha iyi anlaşılmasını sağlamakta ve farklı uygulama alanlarında kullanılabilecek yapıların sistematik bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Bunlar Grup-1 (dipol, tripol, kare-spiral, köşeli çapraz kutuplar ve N-kutuplu ya da merkeze bağlı yapılar), Grup-2 (dairesel, kare, altıgen döngüler gibi döngülü yapılar), Grup-3 (yama tipi yapılar) ve Grup-4 (hepsinin kombinasyonları) 'tür.



Şekil 3.5. FSY tasarımında kullanılan elemanlar [16, 23, 25]

1. Gruptaki yapılar, N-kutuplu veya merkeze bağlı yapılar, elektromanyetik alanların etkileşimini optimize etmek amacıyla tasarlanmış çeşitli geometrik formları içermektedir. Bu yapılar arasında dipoller, üçlü kutuplar (tripoller) ve köşeli çapraz kutuplar gibi örnekler bulunmaktadır. Bu tür yapıların etkin bir şekilde çalışabilmesi için, FSY uzunluğunun dalga boyunun yaklaşık yarısı kadar olması gerekmektedir. Bu koşul, tam yansıtma elde edilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. N-kutuplu yapılar genellikle dar bantlı yapılar olarak sınıflandırılmakta olup, belirli bir frekans aralığında yüksek verimlilikle çalışabilme yetenekleri ile dikkat çekmektedir 2. Gruptaki döngü içeren yapılar, elektromanyetik dalgaların etkileşimini sağlamak için tasarlanmış üç veya dört bacaklı elemanlar, dairesel döngüler, kare ve altıgen döngüler gibi çeşitli geometrik formları kapsamaktadır. Bu yapılar, tam yansıtma sağlamak için FSY'nin uzunluğunun dalga boyuna eşit olması gerektiği bir özelliğe sahiptir. N-kutuplu yapılara kıyasla daha geniş bantlı yapılar olarak değerlendirilirler, bu da onları farklı frekans aralıklarında daha esnek ve etkili hale getirir.

Bu geniş bantlı yapıların tasarımı, çeşitli uygulamalarda daha fazla uyumluluk ve performans sunma potansiyeline sahiptir [16,25].

3. Grupta bulunan yama tipi yapılar; daire, kare ve altıgen gibi çeşitli geometrik formları içeren özel yapılar olarak tanımlanabilir. Bu tür yapılar, elektromanyetik dalgaların yansıtılması ve yönlendirilmesi açısından önemli bir rol oynamaktadır. Yama tipi yapıların etkin bir şekilde çalışabilmesi için, FSY (Frekans Seçici Yüzey) uzunluğunun, kullanılan dalga boyuna yakın bir değerde olması gerekmektedir. Bu durum, tam yansıtma elde edilmesini sağlamakta ve yapının performansını artırmaktadır. Ayrıca, yama tipi yapılarda elektromanyetik dalgaların geliş açısına bağlı olarak kararlılık özelliğinin artması, bu yapıların çeşitli uygulamalarda avantajlı hale gelmesine katkıda bulunmaktadır. Örneğin, bu yapılar, radar sistemleri, iletişim cihazları ve diğer elektromanyetik uygulamalarda daha etkili sonuçlar elde edilmesine olanak tanır. Son olarak 4. Grup ise diğer gruplardaki elemanların kombinasyonları ile, oluşturulan karmaşık yapılar olarak tanımlanabilir. Bu hibrit yapılar, farklı yapıların özelliklerini birleştirerek, daha geniş bir frekans aralığında çalışabilme yeteneğine sahip olmaktadır. Ancak, hibrit yapıların rezonans frekansı, diğer yapıların rezonans frekanslarıyla aynı şekilde belirlenmemektedir. Bunun nedeni, bu yapıların karmaşık yapısının, farklı bileşenlerin etkileşimleri ve yapıların geometrik düzenlemeleri ile rezonans frekansını etkileyen çok sayıda faktör içermesidir. Bu durum, hibrit yapıların tasarımında daha fazla esneklik ve özelleştirme imkanı sunmakta, böylece belirli uygulamalar için optimize edilmiş performans elde edilmesine olanak tanımaktadır. Hibrit yapılar, özellikle iletişim sistemleri, sensörler ve diğer yüksek frekanslı uygulamalarda önemli avantajlar sağlayabilir [16,23,25].

3.1.2. Birim hücreler arasındaki mesafe

Birim hücreler, dielektrik tabakanın x-y düzleminde periyodik bir şekilde yerleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Bu yapı, elektromanyetik dalgaların etkileşimini optimize etmek ve belirli frekanslarda rezonans özellikleri elde etmek amacıyla tasarlanmıştır [26]. Birim hücrelerin bir katman üzerine yerleştirilmesi sırasında, aralarındaki mesafelerin "w. cos θ" formülüne uygun olması gerekir. "w" birim hücrenin genişliğini ve "θ" elektromanyetik dalganın geliş açısını ifade eder. Bu formül, dalga açısına bağlı olarak hücreler arasındaki mesafenin nasıl değişmesi gerektiğini belirler. Bu durumda, elektromanyetik dalganın geliş açısına (θ) bağlı olarak rezonans frekansı ve bant genişliği değişmektedir. Yani, sistemin

rezonans özellikleri, dalga açısı değiştikçe değişir. Özellikle belirli uygulamalarda istenen performansı elde etmek için bu durum çok önemlidir [16,25].

Daha stabil bir yapı elde etmek amacıyla, yapılar arasındaki mesafenin kısa tutulması önerilmektedir. Kısa mesafeler, birim hücrelerin etkileşimlerini artırarak, sistemin genel performansını iyileştirebilir. Bu, özellikle yüksek frekanslı uygulamalarda ve hassas elektromanyetik kontrol gerektiren sistemlerde önemlidir. Kısa mesafeler, aynı zamanda yapının mekanik dayanıklılığını da artırabilir, bu da uzun ömürlü ve güvenilir bir yapı tasarımı için gereklidir. Bu nedenle, birim hücrelerin yerleştirilmesi ve aralarındaki mesafenin optimize edilmesi, dielektrik tabakaların performansını artırmak için kritik bir aşamadır [27].

3.1.3. Frekans seçici yüzey tasarımında kullanılan dielektrik tabaka

Yapının rezonans frekansı, büyük ölçüde dielektrik alt tabakanın özelliklerine bağlıdır. Bu durum, özellikle elektromanyetik dalgaların yayılımı ve etkileşimi açısından kritik bir öneme sahiptir. Örneğin, bir yama yapısının her iki tarafında yer alan dielektrik alt tabakanın kalınlığı, dalga boyunun 0.05 katından daha fazla olduğunda, bu alt tabaka, en az dielektrik sabitinin oranı kadar etki gösterir. Bu, dielektrik alt tabakanın, yamanın elektromanyetik özelliklerini belirlemede önemli bir rol oynadığını gösterir [16,20,25]. Yarık tipi yapılar için ise durum daha karmaşık bir hal alır. Bu tür yapılar, dielektrik alt tabakanın kalınlığının değiştirilmesiyle rezonans frekansında belirgin değişikliklere neden olabilir. Dielektrik alt tabakanın kalınlığının azaltılması, rezonans frekansının serbest alan rezonans frekansına doğru kaymasına neden olur. Bu kayma, yapının elektromanyetik davranışını etkileyerek, rezonans frekansının tahmin edilmesini zorlaştırır.

Dolayısıyla, bu tür yapılar için rezonans frekansının belirlenmesi, daha karmaşık matematiksel ve fiziksel modeller gerektirebilir. Ayrıca, rezonans frekansının kalınlıkla olan ilişkisini açıklamak için ε_r yerine ε_{eff} kullanılan bir yaklaşım mevcuttur. ε_{eff}, esasen iki yama arasındaki statik kapasitans değişimini ifade eder. Bu yaklaşım, dielektrik alt tabakanın etkilerini daha iyi anlamak ve rezonans frekansını daha doğru bir şekilde tahmin etmek için kullanılabilir. ε_{eff}'nin hesaplanması, yapının geometrik özellikleri ve dielektrik malzemenin

özellikleri göz önünde bulundurularak gerçekleştirilir. Bu sayede, rezonans frekansının belirlenmesi ve optimize edilmesi sürecinde daha güvenilir sonuçlar elde edilebilir [20].

3.1.4. Frekans seçici yüzey tasarımında kullanılan elemanların iletkenliği

FSY tasarımında kullanılan iletken yüzeyin farklılığı, yapının eşdeğer devre modelindeki direncinin değişmesine yol açar. Eşdeğer devre modelinin değişmesi; frekans seçici yüzeyin farklı özelliklere sahip olması demektir. Dirençteki bu değişiklikler, yüzeyin frekans yanıtını etkileyerek, belirli frekanslarda daha iyi performans göstermesini veya istenmeyen frekansları bastırmasını sağlar. Farklı iletken malzemeler ve yüzey yapıları kullanarak, frekans seçici yüzeylerin belirli uygulamalara uygun hale gelmesi sağlanabilir [16,28].

3.1.5. Dalgaların geliş açısı ve kutuplanma

Bir elektromanyetik (EM) dalganın geliş açısı ve polarizasyonu, frekans seçici bir yüzeyin dalga ile nasıl etkileşime gireceğini belirlemede çok önemlidir. Geliş açısı, dalganın FSY'e yaklaştığı açıdır ve dalganın ne kadarının yansıtıldığını, iletildiğini veya absorbe edildiğini etkiler. Belirli açılarda, rezonans koşulları değişebilir ve yüzeyin belirli frekansları seçici olarak filtreleme yeteneğini etkileyebilir [16]. Polarizasyon, doğrusal (yatay veya dikey) veya dairesel olabilen dalganın elektrik alanının yönünü ifade eder. FSY genellikle çeşitli polarizasyonlara farklı tepki verecek şekilde tasarlanır, yani filtreleme özellikleri polarizasyona bağlı olabilir. Bu, dalgaların polarizasyon durumlarına göre seçici olarak manipüle edilmesini sağlayarak FSY'i radar ve iletişim sistemleri gibi belirli frekans bantlarının geçirilmesini veya engellenmesini gerektiren uygulamalarda kullanışlı hale getirir. Bu faktörler birlikte FSY'in elektromanyetik dalga davranışını kontrol etmedeki etkinliğini ve özgüllüğünü belirler. Kutuplanma, özellikle tam simetrik olmayan yapılarda hem TE (Transverse Electric) hem de TM (Transverse Magnetic) modlarında farklı sonuçlar üretecektir [25].

3.2. Konformal Frekans Seçici Yüzey Uygulamaları

Konformal frekans seçici yüzeyler, belirli frekanslardaki elektromanyetik dalgaların geçişine veya yansımasına olanak tanıyan yapılar olarak çeşitli alanlarda önemli bir rol oynamaktadır. Bu yüzeyler, öncelikle radar sistemlerinde, belirli frekanslardaki radar

sinyallerinin geçişine izin vererek radar kesit alanını azaltmakta; böylece platformların radarda düşük görünürlüğünü artırmaktadır. Ayrıca, telekomünikasyon sistemlerinde istenmeyen frekansların filtrelenmesi ve sinyal gürültüsünün azaltılması amacıyla da kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, uydu iletişim sistemlerinde frekans bandının optimize edilmesi ve istenmeyen sinyallerin en aza indirilmesi açısından da kritik bir işlev üstlenmektedirler [33].

Havacılık mühendisliğinin karmaşık yapısında, radomlar iki önemli işlevi yerine getirir: anten sistemlerini; yağmur, dolu ve kuşlar gibi dış etkenlerden korumak ve uçuş sırasında hava direncini azaltmak [29]. Ancak geleneksel radomlar, modern hava aracı uygulamaları için giderek artan bir ihtiyaç olan elektromanyetik filtreleme ve "stealth" kabiliyetini sağlamakta genellikle yetersiz kalmaktadır. Frekans seçici yüzeylerin (FSY) radom teknolojisine entegrasyonu, bu alanda önemli bir gelişme sağlamıştır. Elektromanyetik dalga yayılımını modelleme ve frekansların seçici olarak filtrelenmesi için eleman tasarımı konusundaki yenilikçi araştırmalar, radomların antenleri korurken istenen sinyallerin iletimini kolaylaştırmasını mümkün kılmıştır [30]. Konformal FSY radomlar, geleneksel alternatiflerinin ötesinde bir evrimsel adım teşkil etmektedir. Bu yapılar, anten sistemini çevresel olumsuzluklardan koruma işlevini sürdürmenin yanı sıra, düzensiz yüzeylere mükemmel bir uyum sağlama yeteneğine sahiptir [31]. Bu adaptasyon, yalnızca işlevsellik açısından değil, aynı zamanda aerodinamik ve estetik unsurları da içermekte, gizlilik yeteneklerini ve çok bantlı frekans işletilebilirliğini artırmaktadır; bu da modern iletişim ve radar sistemleri için kritik öneme sahiptir.

Düşük görünür platformların sahip olduğu antenler de radarda düşük görünür özelliklere sahip olmalıdır [5]. Antenlerin radar kesit alanını etkileyen bir diğer önemli faktör, antenin çalıştığı frekans bandıdır. Antenin radar kesit alanı, bu frekans bandına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Çalışma frekansı dışında kalan düşük frekanslarda, antenin besleme hattına çok az enerji girişi olur ya da hiç enerji girişi gerçekleşmez. Bu durumda, radar sinyali anten elemanlarından geçerek anten düzleminden yansır. Antenin çalışma frekansı bölgesinde, besleme hattına giren enerji, antenin iç yapısında uyumsuzluklara yol açar ve bu uyumsuzluklar nedeniyle yansımalar meydana gelir.

Eğer bu yansımalar belirli açı ve frekanslarda yoğunlaşırsa, antenin radar kesit alanında bir artışa neden olabilirler. Antenin çalışma frekansı dışındaki yüksek frekanslarda ise, Bragg

lobları olarak adlandırılan, temel yansımaların dışında ekstra yansımalar oluşur. Bu ekstra yansımalar, antenin ve dolayısıyla platformun radar kesit alanının artmasına yol açabileceğinden, Bragg loblarının etkisini azaltacak tasarım çözümlerine başvurulması gerekmektedir.

Özellikle faz dizi antenlerde, belirli bir frekans ve dalga boyu ilişkisi altında, anten elemanları arasındaki mesafe dalga boyunun yarısından fazla olduğunda Bragg lobları ortaya çıkar ve bu durum, antenin çalışma frekansı dışındaki yüksek frekanslarda radar kesit alanının karmaşık hale gelmesine neden olur. Bu nedenle, anten tasarımında Bragg loblarının etkilerini azaltmak büyük bir önem taşımaktadır. Anten elemanlarının yerleşimi ve faz ayarları dikkatlice optimize edilerek, istenmeyen Bragg loblarının etkisi azaltılabilir ve radar kesit alanı kontrol altında tutulabilir. Literatürde, Frekans Seçici Yüzeylerin (FSY) anten radar kesit alanını azaltmada en etkili yöntemlerden biri olduğu yapılan çalışmalarla kanıtlanmıştır. Ancak günümüzde hava platformlarının radom yapıları göz önünde bulundurulduğunda planar tasarlanan FSY'lerin bu uygulamalara uygun olmadığı bilinmektedir. Hem anten performansı hem de platformlara uygun entegrasyon söz konusu olduğunda konformal yapılara ihtiyaç duyulmaktadır.

Konformal frekans seçici yüzeyler, düzlemsel frekans seçici yüzeylere kıyasla birkaç avantaja sahiptir. FSY'in düz olmayan yüzeylerle entegrasyonunun gerektiği uygulamalar için uyarlanabilirler [25]. Ayrıca, elektromanyetik dalgalar, yansıma ve geçiş özellikleri üzerinde daha iyi kontrol sağlarlar. Konformal FSY, eğimli radom yapılarıyla kolayca uyum sağlar, aerodinamik performansı olumsuz yönde etkilemez ve genel olarak anten-radom entegrasyon verimliliğini artırır. Bu özellik, uçakların radarda düşük görünürlüğünü azaltmak için çok kritiktir. Ayrıca, konformal yapıları sayesinde, uçakların aerodinamik profili ile daha etkili bir şekilde entegre olurlar, optimum hava akışı ve azalan platform sürüklemesi sağlarlar. Bu avantajlar, konformal frekans seçici yüzeylerin hava platformlarındaki radom uygulamaları için üstünlüğünü gösterir ve yüksek hızda, yüksek manevra kabiliyetine sahip uçakların işlevselliği ve tasarımındaki kritik rollerini vurgular [32].

Konformal frekans seçici yüzeyler (FSY) birçok fayda sağlar, ancak tasarım sırasında dikkate alınması gereken dezavantajlar ve zorluklar da vardır. Yüzeyin eğriliği frekans

tepkisini değiştirebileceğinden, önemli bir sorun, yüzey eğimli olduğunda gerekli elektromanyetik performansı elde etmenin zorluğudur.

Elektromanyetik simülasyon programlarında tasarlanan ve genel olarak planar çözüm algoritmalarına sahip olan bu programlarla konformal yapıları tasarlamak ve analiz etmek birçok zorluğu da beraber getirmektedir. Literatürde konformal yapıların test ve analiz süreçlerinde ortaya çıkan farklılıklar simülasyon ortamının doğruluğu hakkında birçok soru işaretini de beraber getirmektedir. Davranışı doğru bir şekilde tahmin etmek ve optimize etmek için karmaşık hesaplamalı modeller ve simülasyonlar gereklidir. Ayrıca, FSY'in düz olmayan yüzeylere uygun hale getirilmesi gerektiği için, üretim sürecinin karmaşıklığını ve maliyetini artıran hassas üretim prosedürleri gereklidir. Bir diğer sorun ise doğru malzemenin seçilmesidir, çünkü gerekli elektromanyetik özelliklere sahip olmalı ve yapısal bütünlüğünden ödün vermeden bükülebilecek kadar esnek olmalıdır. Bu unsurlar, daha uzun ve maliyetli tasarım ve üretim döngülerine neden olabilir, bu da titiz bir planlama ve ileri teknoloji gerektirir.

Konformal FSY üzerine literatürdeki çalışmalar incelenmiştir. Çalışmalar, genellikle belirli bir bant için FSY'in birim hücre tasarımının performansına odaklanmaktadır ve şu şekildedir: C ve X frekans bantlarında çift bant geçişli uygulamalar için yenilikçi bir fraktal frekans seçici yüzey (FSY) önerilmiştir [34]. Geometrik yapı merkezi simetrik olup, çift bant özellikleri için altın oran fraktal geometrisini kullanmaktadır. Sonuçlar, tasarlanan FSY'in düşük görünürlük ve çift bant geçişli performans gerektiren uygulamalar için potansiyelini doğrulamaktadır. X bant (9,6-10,7 GHz) operasyonu kapsamında düşük eklem kayıplı (insertion loss), polarizasyona duyarsız bir FSY-radom sisteminin tasarım ve performans analizi önerilmiştir [31]. Simülasyonlar, FSY'nin X bantta -10 dB yansıma ve yüksek kazanç elde ettiğini, ayrıca 0,04 ila 0,15 dB arasında önemli ölçüde düşük ekleme kaybına sahip olduğunu göstermektedir. Bir diğer çalışma [36], belirli bir frekans bandını seçici olarak geçiren üçgen konik bant geçişli bir FSY radomun tasarımını ve analizini sunmaktadır. Bir adım daha ileri gidilerek [30], uçan silahların radarda görünürlüğünü azaltıp stealth kabiliyetini artırmak için bütünleşmiş serbest duran kalın ekranlı FSY radom tasarlanmıştır. Bu radom, belirli frekans bantlarını seçici olarak geçirirken kalanları engellemektedir. FSY radom Y şeklinde açıklıklara sahiptir ve bakır kabuk için döndürme şekillendirme işlemi ile üretilip, ardından hassas lazer robot sistemi ile ince ayar yapılmıştır. Bu, yaklaşık %80 geçiş bandı geçirgenliği ve %10'dan az durdurma bandı geçirgenliği elde etmektedir. Sistem

yankısız bir odada test edilmiş ve deneysel olarak doğrulanmıştır. Antik Çin menteşe ve kama bağlantılarından esinlenerek önerilen yeni şekilli bir yapboz bant geçişli FSY (JS-FSS) önerilmiştir [38]. Çalışmanın temek motivasyonu, mekanik esneklik ve büküldüğünde baskılı hatlarda çatlamayı önlemeye yönelik bir sistem olarak görünmektedir.

Önerilen JS-FSS, çeşitli düşey açılarda TE ve TM polarizasyonları için bant geçiş performansını koruyarak geliştirilmiş açısal stabilite göstermektedir. Deneysel olarak, JS-FSY'in bant geçişli performansının eğrilik yarıçapları ile değiştiği, daha küçük yarıçapların elemanlar arasındaki karşılıklı etkileşimi artırarak frekans tepkisini etkilediği gösterilmiştir. 6,1 GHz civarında çalışan bir monopol bir konik FSS radom ile birleştiren bir filtre-anten sistemi, düşük radar kesit alanı (RKA) ve elektronik karşı önlemlerin hedeflendiği askeri uygulamalar için önerilmiştir [39]. FSY radom, yüksek seçicilik, düşük ekleme kaybı (insertion loss) ve farklı düşey açı ve polarizasyonlar için kararlı performans sunan bir bağlı rezonatör uzaysal filtre (CRSF) kullanmaktadır. Bu, CRSF'yi hibrit FSY radom uygulamaları için iyi bir örnek yapmaktadır.

Esneklik ve yeniden yapılandırılabilirdik, konformal FSY'ler için dikkat çeken araştırma alanlarından biridir. Bant durdurucu esnek ve frekans yeniden yapılandırılabilir bir FSY, deneysel olarak gösterilmiştir [40]. FSY, ekran baskı yöntemi ile ilave üretim yöntemi kullanılarak ultra ince esnek bir alt tabaka üzerinde üretilmiştir. 3,5 GHz 'de $\lambda/15$ boyutunda bir birim hücreye sahip olan FSY, 10 cm çapında yarı silindir üzerine uyumlu bir şekilde monte edildiğinde yüksek performans elde ederek, esnek ve uyumlu uygulamalara yönelik potansiyelini göstermektedir. Yoğun iletişim ortamlarında elektromanyetik girişimi (EMI) azaltmak için X bant operasyonu için başka bir esnek ve düşük profilli FSY tasarlanmış ve analiz edilmiştir [41]. Özel kaplanmış Polietilen Tereftalat (PET) alt tabakası üzerinde kıvrımlı halka döngü (CRL) elemanları kullanılmış olup; FSY prototipi, gümüş nanoparçacık mürekkebi ile bir inkjet baskı tekniği kullanılarak üretilmiştir ve kimyasal sinterleme süreci ile iletken hale gelerek geleneksel termal sinterlemeye göre hızlı ve verimli bir üretim sağlamaktadır. Frekans seçici yüzeyler (FSY) ile yüklenmiş tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatörler (CSRR'ler) kullanılarak tasarlanan bir mikrodalga polarizör [42], esnek 50μm kalınlığında sıvı kristal polimer (LCP) tabanında düzlemsel olmayan ve uyumlu FSY uygulamaları için üretilmiştir. Polarizör, TE-polarizasyon giriş dalgaları için minimal iletim kaybı (10,24 GHz 'de 0,75dB) ve TM-polarizasyon giriş dalgaları için daha yüksek kayıp (19,05dB) göstermektedir. Bu, FSY uygulamaları için etkili polarizasyon

seçiciliği sağlayarak 18,3dB polarizasyon yok etme oranı sunmaktadır. Düşük frekanslı sivil uygulamalar için minyatürize edilmiş çift bant FSY [43], kablosuz yerel alan ağı (WLAN) frekanslarını (2,4 GHz ve 5,5 GHz) hedefleyerek kavisli yüzey uygulamaları için tasarlanmıştır ve FSY, tek metal katmanlı baskı devre kartı (PCB) üzerine monte edilmiştir. Bu FSY esnektir ve farklı uygulamalar için kompakt tasarımlar oluşturmak veya çok ince alt tabakalar oluşturmak amacıyla eleman boyutlarının alt tabaka kalınlığını değiştirerek ayarlanmasına izin verir. Ayrıca [47], [49], [50] ve [51], X bant için EM Koruma uygulama alanında esnek uyumlu bir frekans seçici yüzeyin tasarımını gerçekleştirmiştir.

Hava platformlarındaki radom uygulamaları için FSS tasarımı ve analizi hem düz hem de uyumlu yapılarda anten kazancını sabit tutmaya odaklanmaktadır [44]. Konformal hava platformları için FSY tasarımının karmaşıklığını aşmak amacıyla düşük maliyetli FR-4 malzemeden yapılmış basit kare yuva ve çapraz dipol yuva elemanları kullanılmıştır.

Bu FSY, anten sistemine entegre edilen FSY etkisini en aza indirmenin iyi bir örneği olarak gösterilmiştir.

Geleneksel üretim yöntemlerinin aksine, [35], [37] ve [45]'de 3D baskı kullanılmış ve yapı, elektro kaplama yoluyla bakır ile kaplanarak daha uygun maliyetli ve hafif bir tasarım elde edilmiştir. Üretilen konformal frekans seçici yüzeyin, antenin yakın alan bölgesine yerleştirilerek kompakt yüksek performanslı mm-dalga sistemleri gerçekleştirmek için bir radom olarak kullanılabileceği gösterilmiştir.

Gelişen teknoloji ile, farklı tasarım yöntemleri de literatürde yerini almıştır. Özellikle konformal yüzeyler için geliştirilen algoritmalarla, yüzey eğriliğinden bağımsız tasarımlar geliştirilmiştir. [46]'da frekans seçici yüzeyler (FSY) üretmek için bir algoritma geliştirilmiş olup, bu algoritma, frekans seçici yüzeyi oluşturan birim hücrelerin boyutunu, şeklini ve aralığını koruyarak herhangi bir eğriliğe uyum sağlayabilmektedir. Bu algoritma hem eleman tasarımından hem de yüzey eğriliğinden bağımsız olup, radomlar, otonom araçlar ve herhangi bir eğriliğe sahip yüzeyler için uygulanabilir tasarımlar oluşturmasını sağlamaktadır. Bu ayrıca, üç eksenden fazla sisteme sahip 3D baskı veya esnek elektronikler için algoritmayı uygun hale getirmiştir. [48]'de, ince kabukların elastik deformasyon teorisine dayalı olarak, yüzeyin ağırlıklı minimum bozulma düz açılım çözümü kullanılarak,

kavisli bir yüzey ile düzlemsel bir dizi arasında mükemmel bir haritalama oluşturulmuş ve bu, kalınlık yönünde 3D (Üç Boyutlu) koşullara genişletilmiştir.

Literatürdeki konformal frekans seçici yüzey tasarımları, son yıllarda önemli ilerlemeler kaydedilen bir alan olarak öne çıkmaktadır. Konformal yapılar için geliştirilen algoritmalar, tasarım sürecini optimize etmekte ve istenen elektromanyetik özellikleri elde etmeye yardımcı olmaktadır. Yapay zeka, makine öğrenimi ve derin öğrenme teknikleri, karmaşık tasarım problemlerinin çözümünde önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, yenilikçi malzeme teknolojileri ve modern üretim yöntemleri, konformal frekans seçici yüzeylerin performansını artırmakta ve daha karmaşık yapılar oluşturulmasına olanak tanımaktadır. 3D baskı ve nanoteknoloji gibi teknikler, bu yüzeylerin daha hassas ve verimli bir şekilde üretilmesini sağlamaktadır. Sonuç olarak, konformal frekans seçici yüzey tasarımları, disiplinler arası bir yaklaşım gerektirmektedir.

3.3. Düşük Görünür Radom Tasarımı

Radarda düşük görünür radomlar olarak da bilinen “stealth radomlar”, modern radar ve askeri teknolojide önemli bir rol oynar. Bu radomların birincil amacı, hava, deniz veya kara tabanlı platformların radar kesit alanını (RKA) azaltmak ve bu platformların “stealth” kabiliyetlerini artırmaktır.

Bu özel radomlar, düşman radar sistemleri tarafından tespit edilmeyi en aza indirmek için geliştirilmiş malzemeler, yenilikçi tasarım yöntemleri ve gelişmiş mühendislik teknolojileri kullanılarak tasarlanmıştır.

Stealth radomların üretiminde genellikle radar dalgalarını absorbe etme veya yönlendirme yetenekleri ile seçilen ve böylece platformun radarda görünürlüğünü azaltan ileri düzey kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Bu radomlarda sıkça tercih edilen malzemeler arasında E-glass/S-glass/epoksi kompozitlerden oluşan kompozit sandviç yapılar ve PVC yapılı köpük malzemeler bulunmaktadır [55]. Bu malzemeler, iki yönlü bir avantaj sunmaktadır: Ekipmanı rüzgar, yağmur ve diğer çevresel etkenlerden korumak için gerekli olan yapısal dayanıklılığı sağlarken, aynı zamanda ana platformun kullandığı radar sinyallerine elektromanyetik geçirgenlik sunarlar; bu şekilde radar sinyallerinin radomdan en az bozulma ile geçmesini sağlayarak radar sisteminin bütünlüğünü ve performansını

koruması açısından son derece önemlidir [52]. Şekil 3.5'te F-35 savaş uçağının burun radomunda kullanılan radar soğurucu köpük uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Radar soğurucu köpük uygulaması

Frekans seçici yüzeyler ve metamalzemeler, düşük görünür radomlarda kullanılan temel teknolojilerdendir. FSY, elektromanyetik dalgaları seçici olarak filtreleyebilen ve manipüle edebilen, radomun radar tarafından kullanılan belirli frekanslara karşı şeffaf olmasını sağlarken istenmeyen frekansları yansıtan veya absorbe eden şekilde tasarlanmış yüzeylerdir.

Metamalzemeler düşük gözlemlenebilir radomların tasarımında bir başka yenilikçi yaklaşımı temsil etmektedir. Metamalzemeler, negatif kırılma indisleri ve özelleştirilmiş elektromanyetik tepkiler gibi doğal malzemelerde bulunmayan özellikler sergileyen yapay olarak tasarlanmış malzemelerdir. Bu özellikler, belirli radar frekansları için neredeyse radarda görünmez olan radomlar oluşturmak için kullanılabilir ve platformun "stealth" kabiliyetini artırmaktadır [53]. Radar absorbe boyalar gibi kaplamalar da radomun dış yüzeyine sıklıkla uygulanmaktadır. Bu kaplamalar, radardan gelen enerjiyi absorbe eder ve dalgaların radar kaynağına geri yansımasını engeller.

Radarda düşük görünürlük üzerine gelişen teknolojilere rağmen, "stealth" radomların tasarımı, geleneksel radomların işlevsel gereksinimlerini de karşılamak zorundadır. Bu gereksinimler, radar ekipmanının sağlam bir çevresel koruma ile desteklenmesi, sinyal bütünlüğünün korunması ve çeşitli operasyonel koşullar altında güvenilir bir şekilde çalışabilmesi gibi unsurları içerir [54].

Platformun “Stealth” kabiliyeti ile işlevsel performansı arasında bir denge sağlamak, titiz mühendislik çalışmaları ve kapsamlı test süreçleri gerektirmektedir. Sistemin elektromanyetik performansı haricinde; aerodinamik performansı, yapısal tasarım ve analiz süreçlerinin getirdiği koşullar, sahip olunan üretim ve malzeme teknolojisi de düşünüldüğünde her bir disiplin arasında iyi bir denge kurmak gerekmektedir.

Mühendisler, radomun tüm gerekli kriterleri karşıladığından emin olmak için malzeme özellikleri, yapısal tasarım ve elektromanyetik performans arasındaki dengeyi dikkatlice incelemelidir. Genel olarak, radarda düşük görünür radomlar, malzeme bilimi, elektromanyetik mühendislik ve aerodinamik tasarımın karmaşık bir birleşimini temsil etmektedir. Radar ekipmanlarını etkili bir şekilde korurken, aynı zamanda hizmet ettikleri platformların gizlilik yeteneklerini artırmak amacıyla tasarlanmışlardır. Bu alandaki araştırmalar ilerledikçe, “stealth” teknolojideki yeniliklerin malzeme ve tasarım tekniklerinde daha fazla gelişim sağlayacağı öngörülmektedir.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

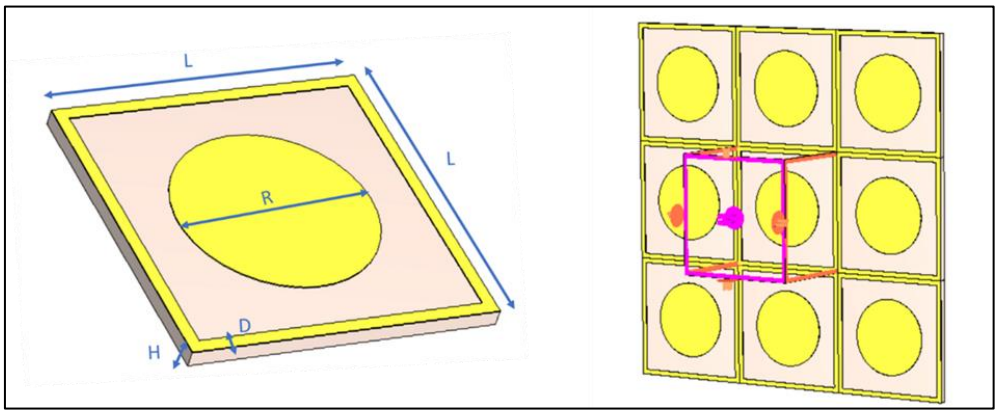
Frekans seçici yüzey tasarımında, halka ve yama geometrisinin seçiminde etkili olan çeşitli temel unsurlar bulunmaktadır. Bu unsurlar, tasarımın genel performansını ve uygulama alanlarını doğrudan etkileyen faktörlerdir. Halka ve yama yapıları, kendilerine özgü esneklikleri sayesinde konformal uygulamalar için son derece uygun bir alternatif sunmaktadır. Bu yapıların, küresel veya silindirik yüzeyler gibi çeşitli yüzey şekillerine kolaylıkla uyum sağlaması, performans kaybını önemli ölçüde azaltmaktadır. Özellikle belirli frekans aralıklarında etkin bir şekilde çalışması gereken frekans seçici yüzeyler (FSY) gibi uygulamalar, bu adaptasyon yeteneğinden önemli ölçüde yararlanabilir.

Halka ve yama yapılarının konformal uygulamalardaki avantajları, bu yapıların tasarımında kullanılan malzemelerin ve geometrilerin esnekliğinden kaynaklanmaktadır. Bu esneklik, antenlerin veya diğer elektromanyetik bileşenlerin, farklı yüzey şekillerine entegre edilmesini kolaylaştırır. Ayrıca, bu yapıların tasarımında kullanılan teknikler, elektromanyetik dalgaların yönlendirilmesi ve dağıtımında da önemli rol oynamaktadır. Halka ve yama yapıları, belirli frekanslarda maksimum verimlilik sağlamak için optimize edilebilir. Bu, özellikle iletişim sistemlerinde, radar teknolojilerinde ve diğer yüksek frekanslı uygulamalarda kritik öneme sahiptir. Frekans seçici yüzeyler (FSY) gibi uygulamalarda, bu yapıların adaptasyon yeteneği, belirli frekanslarda sinyalin iletimini artırırken, diğer frekanslarda ise sinyal kaybını minimize etme imkanı sunar. Bu sayede, sistemin genel performansı artırılır ve istenmeyen parazitlerin etkisi azaltılır. Bu sayede, tasarımın işlevselliği artırılmakta ve çeşitli uygulama alanlarında daha verimli sonuçlar elde edilmektedir. Ayrıca, halka ve yama tasarımlarının basit yapıları, üretim açısından daha fazla tercih edilmelerini sağlamaktadır. Bu yapıların üretim süreçleri, karmaşık geometrilere sahip diğer tasarımlara göre daha az maliyetli ve daha hızlı gerçekleştirilebilmektedir. Bu durum, endüstriyel uygulamalarda zaman ve maliyet tasarrufu sağlarken, aynı zamanda tasarımın yaygınlaşmasına da katkıda bulunmaktadır [56]. Bu unsurların birleşimi, halka ve yama tasarımını konformal yüzeyler için mantıklı bir alternatif haline getirirken, performans ile boyut, esneklik ve üretim kolaylığı gibi pratik özellikler arasında bir denge sağlamaktadır. Bu denge, tasarımın hem teknik hem de ekonomik açıdan avantajlı olmasını mümkün kılmaktadır. Sonuç olarak, bu nedenler, birim hücre mimarisinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamış ve tasarım sürecinin temel taşlarını oluşturmuştur. Bu çalışma, konformal

frekans seçici yüzeylerin geliştirilmesi ve uygulanabilirliğinin artırılması açısından önemli bir katkı sağlamaktadır.

4.1. Birim Hücre Tasarımı

Bu çalışmada önerilen frekans seçici yüzeyin birim hücre tasarım boyutları, uyarma yönleri ve sınır koşulları Şekil 1'de detaylı bir şekilde gösterilmektedir. Frekans seçici yüzeyin birim hücresi, dielektrik alt tabaka olarak Rogers RO4003C malzemesi kullanılmıştır. Bu dielektrik tabaka üzerine bir tarafı bakır olan kare bir çerçeve ve içinde dairesel bir yama tasarlanmıştır. Alt tabaka malzeme kalınlığı 0,508 mm ve Rogers RO4003C malzemesinin dielektrik katsayısı Ɛr = 3,55'tir. Tasarımda kullanılan parametrelerden; L dielektrik katmanın genişliği ve uzunluğu, H dielektrik katmanın kalınlığı, R kullanılan bakır yamanın çapı, D ise yamanın genişliğidir. Kullanılan bakırın kalınlığı 35 µm'dir. Önerilen tasarım parametreleri Şekil 4.1'de verilmiştir.



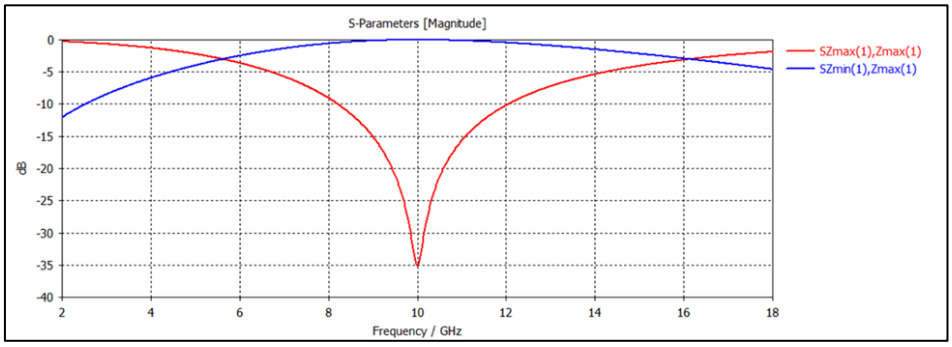
Şekil 4.1. a) Tasarlanan birim hücre ve b) sınır koşulları

parameter	value
L	10 mm
R	3.15 mm
D	0.4 mm
H	0.508 mm

Şekil 4.2. Tasarım parametreleri

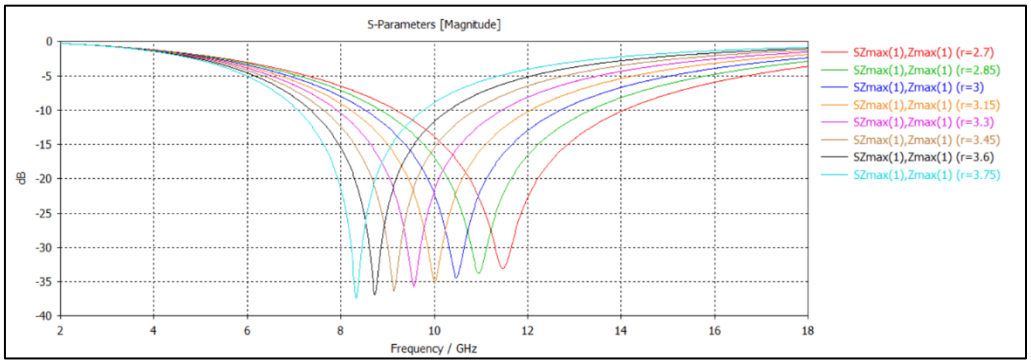
Birim hücre tasarımları ve analizleri CST Studio Suite® ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ANSYS HFSS yazılımında tasarım yapılmış ve aynı sonuçlar elde edilmiştir. Tasarlanan

frekans seçici yüzeyin bant genişliği 4GHz'dir. Şekil 2'de CST Studio Suite® ile elde edilen frekansa göre birim hücrenin yansıma ve iletim grafiği gösterilmektedir.

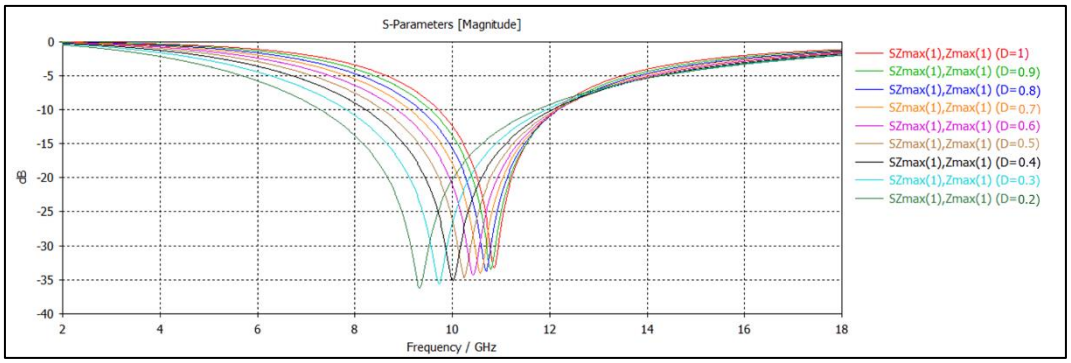


Şekil 4.3. Tasarlanan birim hücrenin iletim ve yansıma karakteristikleri

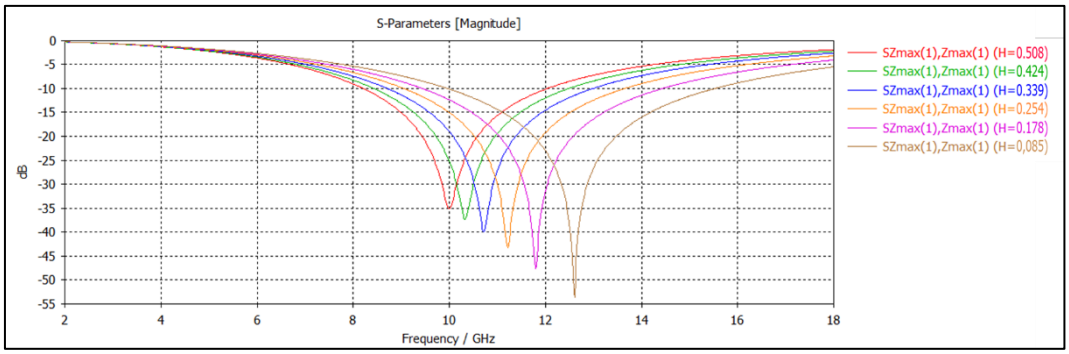
Frekans seçici yüzey geometrisinin tasarım aşamasında, geometrik parametrelerin rezonans frekansı ve bant genişliği üzerindeki etkisi incelenmiş ve bu incelemeler sonrasında istenen rezonans frekansı ve bant genişliğine karar verilmiştir. Örneğin Şekil 4.3'te daire yamanın çapının, Şekil 4.4'te metalik yamanın genişliğinin ve son olarak Şekil 4.5'te dielektrik alt tabakanın kalınlığının değiştirilmesinin rezonans frekansı ve bant genişliği üzerindeki etkisi gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Metalik daire yarıçap değerinin rezonans frekansı ve bant genişliği üzerindeki etkisi

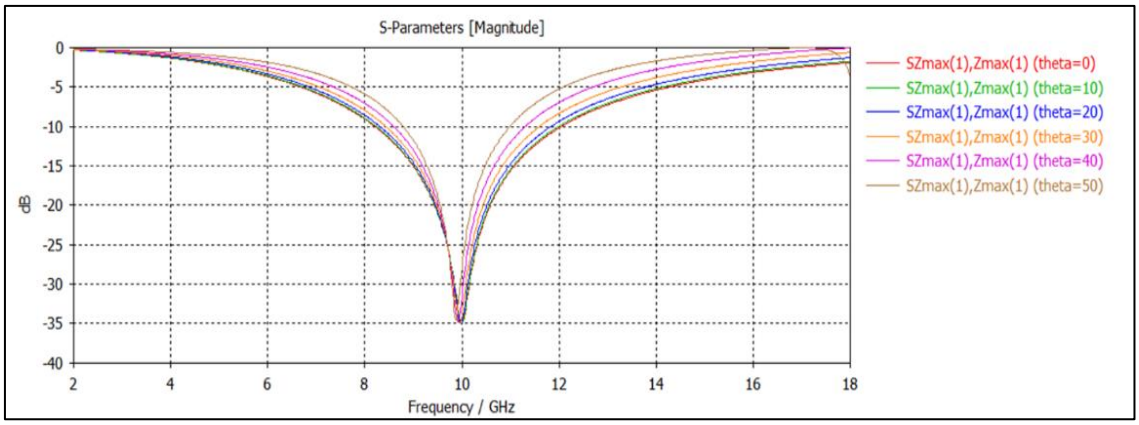


Şekil 4.5. Metalik yama genişliğinin rezonans frekansı ve bant genişliği üzerindeki etkisi



Şekil 4.6. Dielektrik alt tabaka kalınlığının rezonans frekansı ve bant genişliği üzerindeki etkisi

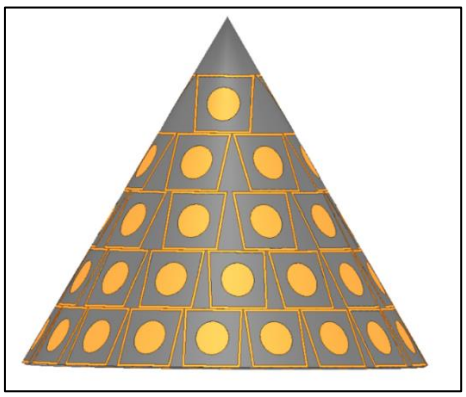
Birim hücrenin çeşitli θ (theta) açılarındaki yansıma özellikleri, Şekil 4.6'da detaylı bir şekilde sunulmuştur. Yapılan, analizler sonucunda, tasarlanan birim hücrenin 50° theta açısına kadar elektromanyetik dalgaları etkili bir şekilde yansıttığı tespit edilmiştir. Bu bulgu, birim hücrenin geniş bir açı aralığında yüksek performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu geniş açı aralığında gösterdiği yansıtma performansı bu tasarımın konformal uygulamalarda da kullanılma potansiyeline sahip olması, bu tür yüzeylerin çeşitli yüzeylere entegre edilebilmesi anlamına gelmektedir. Sonuç olarak, geniş açı aralığında gösterdiği yansıtma performansı, bu tasarımın konformal uygulamalarda ve farklı yüzeylerle entegrasyonunda sağladığı faydalar, onu yenilikçi ve etkili bir çözüm olarak öne çıkarmaktadır. Bu da araştırma ve geliştirme süreçlerinde bu tür tasarımlara yönelik ilginin artmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.7. Farklı θ (theta) açılarının rezonans frekansı ve bant genişliği üzerindeki etkisi

4.2. Konik FSY Radom Tasarımı

Tasarım süreci, karmaşık elektromanyetik simülasyonlar gerektirmekte olup, radar sistemlerinin etkinliğinin artırılması ve elektromanyetik spektrum yönetiminin optimize edilmesinde hayati bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, geliştirilen frekans seçici yüzey, koni biçimindeki radom yüzeyine yansıtılmaktadır. Frekans seçici yüzeyin konformal uygulamalarda işlevselliğini kanıtlamak amacıyla, tasarlanan birim hücreler konik radom geometrisi üzerine yerleştirilmiştir. Tasarlanan koni geometrisi, çapı 70 mm ve uzunluğu 60 mm olan bir yapıya sahiptir. Tasarım sürecinde, frekans seçici yüzeyde kullanılan malzemelerin elektromanyetik özellikleri dikkate alınarak, koninin radom geometrisi ile uyumlu bir şekilde tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan frekans seçici yüzeyin konformal yüzeylerdeki performansını analiz etmek için tasarlanan koni radom geometrisinin frekans seçici yüzeyle entegrasyonu Şekil 4.7'de gösterilmiştir



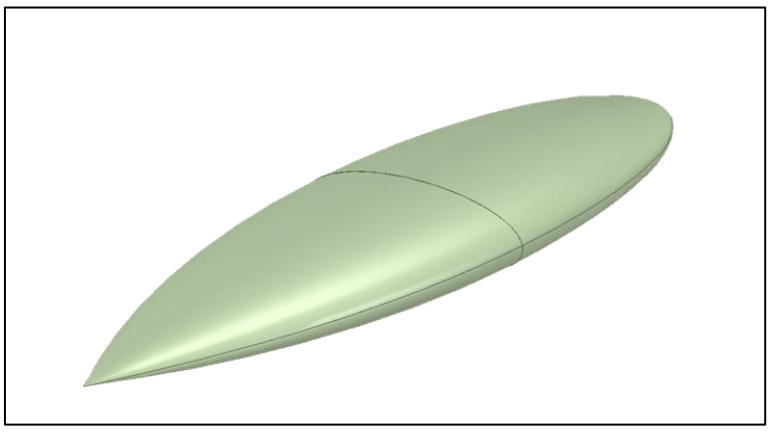
Şekil 4.8. Tasarlanan FSY yapılı konik radom geometrisi

4.3. Radar Kesit Alanı Analizi

Tasarlanan Konformal frekans seçici yüzey bütünleştirilmiş radom yapısının radar kesit alanı analizi yapılmıştır. Bu RKA analizinde Seken Işın Yöntemi (Shooting and Bouncing Rays-SBR) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, Fiziksel Optik (PO) yöntemi, Geometrik Optik (GO) yöntemi ve ışın izleme algoritmalarını kullanır. Bu yüzden diğer yüksek frekans yöntemlerinden daha gerçekçi analiz sonuçları sunmaktadır. Bu yöntemde hedefe gönderilen ışınlar Geometrik Optik (GO) yöntemi kullanılarak hedefteki kesişim noktaları hesaplanır. Daha sonra hesaplanan bu noktalarda Fiziksel Optik (PO) integralleriyle yüzey akımları belirlenir ve bu akımlar saçılan alan hesabında kullanılır. Bu art arda yapılan hesaplamalar seken ışın yöntemi için belirlenen maximum sekme sayısına ulaşana kadar aynı döngüde tekrarlanarak hesaplanır [57]. Çoklu yansıma ve kırınımların etkilerini hesaba katabilme yeteneği ve hesaplama verimliliğinden dolayı Seken Işın Yöntemi (Shooting and Bouncing Rays-SBR) kullanılarak tasarlanan radom geometrisinin radar kesit alanı hesaplanmıştır.

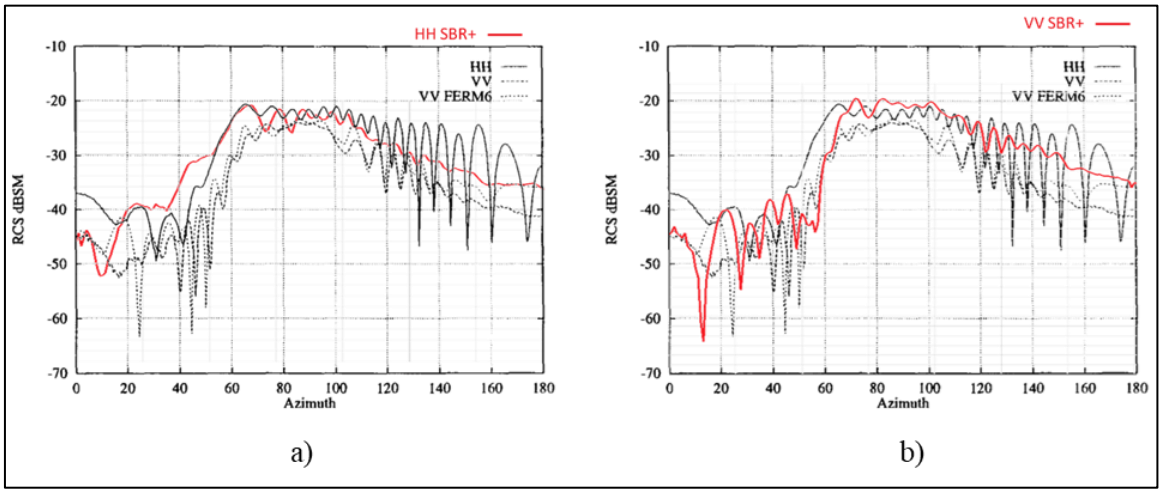
4.3.1. RKA analiz yöntemi validasyonu

Radar kesit alanını (RKA) hesaplamak için yaygın olarak kullanılan geometrik model NASA Almond modelidir [58, 59]. Bu model, RKA simülasyonlarının ve ölçümlerinin yürütülmesinde tutarlı bir yaklaşım sunması, çeşitli tekniklerin ve algoritmaların hassasiyetini karşılaştırmak ve değerlendirmek için bir temel oluşturması açısından önemlidir. Örneğin, Shoot-Bouncing-Ray (SBR) yaklaşımı ve Multi-Level-Fast-Multipole yaklaşımı (MLFMM) için NASA Almond modeli kullanılarak RKA sonuçları değerlendirilmiştir [58].



Şekil 4.9. Analizde kullanılan Nasa Almond modeli

Bu çalışmada kullanılan RKA analiz yönteminin doğrulamasını yapmak için Nasa Almond modelinin radar kesit alanını SBR+ yöntemi ile hesaplanmıştır. Analiz simülasyonları ANSYS HFSS ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, literatürde yer alan Nasa Almond modelinin RKA ölçüm verileri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, RKA analiz yönteminin doğruluğunu ve güvenilirliğini değerlendirmek için kritik bir aşamadır. Nasa Almond modeli, radar kesit alanı hesaplamalarında referans bir model olarak kabul edilmektedir ve bu nedenle elde edilen simülasyon sonuçlarının bu modelle karşılaştırılması, çalışmanın geçerliliğini ve sonuçların güvenilirliğini artırmaktadır.

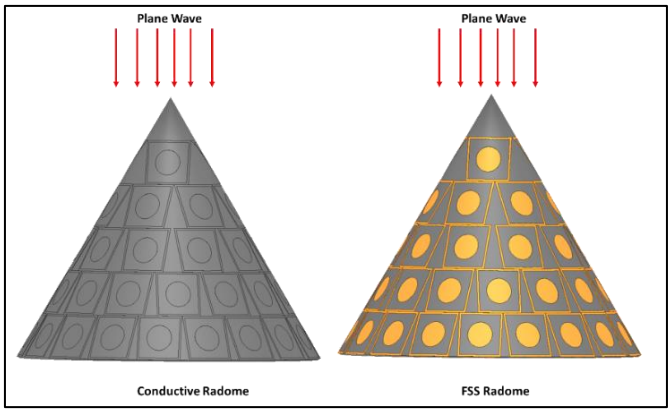


Şekil 4.10. NASA Almond modelinin SBR+ yöntemi ile elde edilen RKA analiz sonuçlarının literatürdeki ölçüm değerleriyle karşılaştırılması [29] a) HH polarizasyonu b) VV polarizasyonu

Şekil 4.9'da Nasa Almond modelinin 9.2 GHz 'deki analiz ve ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Bu sonuçlara göre HH ve VV sonuçlarında özellikle 0-20° azimut değerlerinde farklılıklar görülebilir ancak ortalama değerler olarak değerlendirildiğinde analiz ve ölçüm sonuçları oldukça yakındır. Özellikle 60° azimuttan sonra hem HH hem de VV polarizasyonlarında değerlerin daha yakın olması SBR+ analiz yönteminin güvenilirliği hakkında fikir vermektedir Ayrıca SBR+ yönteminde kullanılan ışın yoğunluğu (ray density), maksimum sıçrama sayısı (number of bounce) değerleri, PDT/UTD ayarları ve mesh ayarlarındaki değişiklikler de bu sonucu etkilemektedir.

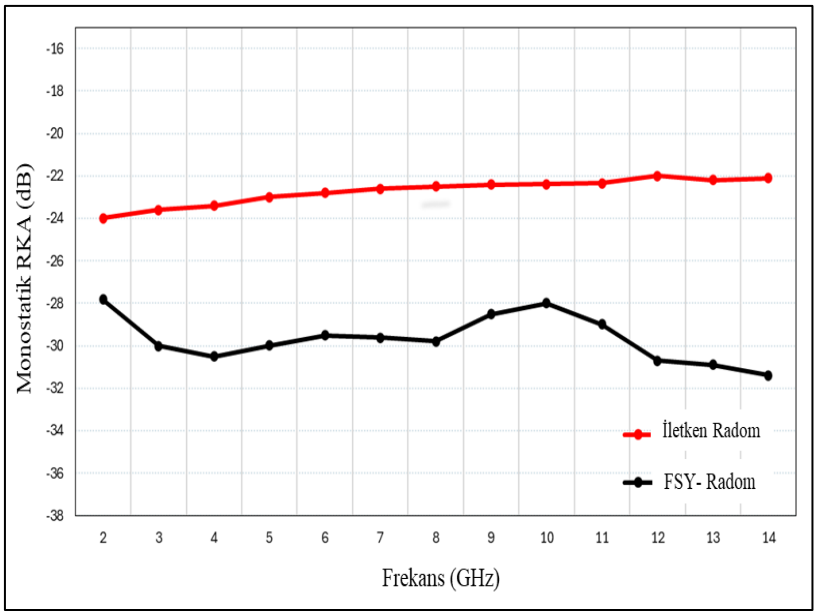
4.4. Radar Kesit Alanı Azaltımı

İletken bir koninin radar kesit alanı (RKA), elektromanyetik dalgaların dalga boyu ile koninin boyutları arasındaki ilişkiye bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu durum, radar sistemlerinin performansını ve algılama yeteneklerini etkileyen önemli bir faktördür. Düşük frekanslarda, dalga boyu koninin boyutlarından belirgin şekilde büyük olduğunda, radar kesit alanı genellikle artan frekansla birlikte yükselme eğilimindedir. Bu, dalga boyunun koninin boyutlarına göre daha büyük olması nedeniyle, elektromanyetik dalgaların koniyi daha iyi "görmesi" ve dolayısıyla daha fazla enerji yansıtması ile ilişkilidir. Bu aşamada, koninin yüzey özellikleri ve malzeme yapısı, radar kesit alanının artışını etkileyen unsurlar arasında yer alır. Orta frekanslarda, dalga boyu koninin boyutlarına yaklaştıkça daha karmaşık bir davranış sergileyebilir. Bu durum, RKA sonuçlarında rezonans etkileri nedeniyle dalgalanmalara yol açabilir. Rezonans, belirli frekanslarda dalgaların koninin yüzeyinde daha fazla etkileşimde bulunmasına ve bu nedenle yansımanın artmasına neden olur. Bu aşamada, koninin geometrik yapısı, yüzey pürüzlülüğü ve malzeme özellikleri gibi faktörler, radar kesit alanının dalgalanma davranışını etkileyebilir. Yüksek frekanslarda, yani dalga boyu koninin boyutlarından çok daha küçük olduğunda, radar kesit alanı genellikle koninin geometrik özelliklerine bağlı olarak sabit bir değere yaklaşır. Bu durumda, dalgaların koninin yüzeyine çarpması ve yansıması, daha çok koninin şekli ve boyutları ile belirlenir. Yüksek frekanslarda, dalga boyunun küçülmesi, koninin yüzeyindeki detayların daha belirgin hale gelmesine ve bu nedenle RKA'nın daha az değişkenlik göstermesine neden olur. Bu çalışmada, tasarlanan iki tip koni şeklindeki radomun monostatik RKA analizlerini gerçekleştirmek için ANSYS HFSS yazılımı kullanılmıştır. Şekil 4.10'da gösterildiği gibi, iletken radom ve konformal frekans seçici yüzey-radom geometrisin monostatik RKA analizinde kullanılan düzlem dalga ile uyarımı gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Düzlem dalga uyarımının gösterimi

Şekil 4.11'de, frekans artışına bağlı olarak iletken radom ve FSY-radomun monostatik radar kesit alanı (RKA) sonuçları detaylı bir şekilde sunulmaktadır. Tasarlanan konik radom geometrisi, milimetre boyutlarında bir yapı olduğundan, frekansın artmasıyla birlikte iletken radomun radar kesit alanında X bandı frekanslarına kadar yalnızca çok az bir artış gözlemlenmektedir. Genel olarak, analiz edilen frekans aralığında belirgin bir değişiklik yaşanmamaktadır. Öte yandan, FSY-radomun radar kesit alanı değeri, incelenen tüm frekanslarda iletken radomun monostatik radar kesit alanından daha düşük bir seviyede kalmaktadır. Ancak, 10 GHz frekansında FSY-radomun radar kesit alanı, iletken radomun radar kesit alanından daha yüksek bir değer göstermektedir. Bu durum, radomun şeklinin bant dışı sinyal enerjisinin büyük bir kısmını farklı bir yönde yansıtmasına neden olmasından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, geri saçılma yönünde zayıf bir sinyal ve dolayısıyla düşük bir RKA ile karşılaşılmaktadır. Geçiş bandında, özellikle 10 GHz civarında ekleme kaybının artmasıyla birlikte, FSY-radomun radar kesit alanı biraz daha yüksek bir değer almasına rağmen, yine de iletken radomun radar kesit alanı değerinin önemli ölçüde altında kalmaktadır. Bu bulgular, tasarlanan konik radomun monostatik radar kesit alanının bant geçiren bir frekans seçici yüzey kullanılarak etkili bir şekilde azaltılabileceğini göstermektedir. Bu durum, radom tasarımında frekans seçici yüzeylerin kullanımının, radar kesit alanını optimize etme potansiyelini ortaya koymaktadır. Böylece, radomların performansını artırmak ve istenmeyen yansımaları minimize etmek mümkün hale gelmektedir.



Şekil 4.12. RKA sonuçlarının karşılaştırılması

5. TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında konik radom geometrisine bant geçiren frekans seçici yüzey entegre edilerek radom geometrisinin radar kesit alanı azaltımı sağlanmıştır. Önerilen frekans seçici yüzeyin farklı theta açılarındaki analiz sonuçlarında istenen iletim ve yansıma karakteristik özelliklerini göstermesi; bu frekans seçici yüzeyin konformal uygulamalar için uygulanabilir olduğunu göstermiştir. Daha önce radom yapıları üzerine çalışılan konformal frekans seçici yüzey tasarım çalışmalarında; genellikle sadece frekans seçici yüzeylerin konformal formlarının iletim ve yansıma karakteristik özelliklerine odaklanılmıştır [31, 34, 38, 40, 41, 43, 44]. Frekans seçici yüzey ve radom entegrasyonu üzerine yapılan çalışmalarda konformal frekans seçici yüzey ve radom geometrilerinin iletim ve yansıma karakteristik analizleri yapılmıştır [17, 30, 32, 36] fakat bu entegrasyonun radar kesit alanı üzerine etkisi incelenmemiş olup genellikle sözel olarak düşük görünür platformlar için uygulanabilir çalışmalar olduğundan bahsedilmiştir. Bu çalışmada tasarlanan frekans seçici yüzeyin, radomun radar kesit alanı üzerindeki etkisini anlamak amacıyla çeşitli frekanslarda çok sayıda radar kesit alanı analizi yapılmış ve radar kesit alanında azalma sağlandığı gözlemlenmiştir.

6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, konformal uygulamalar için özel olarak tasarlanmış bir frekans seçici yüzey (FSY) ile koni biçiminde bir radom geometrisi geliştirilmiştir. Bant geçiren filtre gibi davranan bu frekans seçici yüzey konik yapıdaki radom geometrisi ile entegre edilmiştir. Bu entegrasyon sürecinde oluşturulan frekans seçici yüzey, eğimli olan koni yüzeyine yerleştirilmiştir. Planar olarak tasarlanan frekans seçici yüzey, eğimli yüzeye yerleştirilmek için koninin eğimine göre bükülerek yerleşim sağlanmıştır. Bu yerleştirme işlemi, radomun elektromanyetik dalgaları nasıl yönlendirdiği ve dağıttığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yerleştirilen frekans seçici yüzeyin, radomun radar kesit alanını nasıl etkilediğini anlamak için farklı frekanslarda birçok radar kesit alanı analizleri gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan konformal frekans seçici yüzey ile 2-14GHz frekans aralığında iletken konik radom geometrisinin radar kesit alanının azaltımını sağlanmıştır.

KAYNAKLAR

1. Skolnik, M.I. (2008). *Radar handbook*. (3. Edition). New York: McGraw Hill, 38-42.

2. Balanis, C. A. (2015). *Antenna theory: Analysis and design*. New York: John Wiley & Sons, 78-92.

3. İnternet: Radarın Kısa Tarihçesi. Radar Tutorial. Web: https://www.radartutorial.eu/04.history/hi04.tr.html, Son Erişim Tarihi: 11.10.2024.

4. Scheer, J. A., Melvin, W. L., Richards, M. A. and Holm, W. A. (2013). *Principles of modern radar*. New York: Scitech Pub Incorporated, 15-22.

5. Knott, E. F., Schaeffer, J. F., Tulley, M. T. (2004). *Radar cross section*. New York: SciTech Publishing, 45-52.

6. Richards, M. A., and Melvin, W. L. (2023). *Principles of modern radar: Basic principles*. New York: SciTech Publishing, 122-136.

7. Örünç, I. (2021). *Fiziksel optik yöntemiyle üç boyutlu cisimlerin radar kesit alanının hesaplanması*, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 78-92.

8. Otenel, M. (2024*). Radar cross section computation of objects coated by frequency dispersive materials using finite difference time domain method*, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 68-72.

9. Chen, W. K. (2004). *The electrical engineering handbook*. Boston, Elsevier Academic Press, 65-78.

10. Balanis, C. A. (2012). *Advanced engineering electromagnetics*. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 823-867.

11. Wentworth, S. M. (2007). *Applied electromagnetics: early transmission lines approach*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. 320-370.

12. İnternet: The B-2 at 30: Improving with age, air force magazine. Web: https://www.airandspaceforces.com/article/the-b-2-at-30-improving-with-age/, Son Erişim Tarihi: 13/10/2024.

13. Munk, B. A. (2003). *Finite antenna arrays and FSS*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 220-250.

14. Jenn, D. C. (2005). *Radar and laser cross section engineering*. New York: AIAA (American Institute of Aeronautics & Astronautics), 50-80.

15. Singh, H., Jha, R. M. (2015). *Active radar cross section reduction*. Cambridge: Cambridge University Press,1-14.

16. Munk, B. A. (2005). *Frequency selective surfaces: Theory and Design*. New York: Wiley, 63-78.

17. Shin, H., Yoon, D., Na, D. and Park, Y. B. (2021). Analysis of transmission loss and boresight error of a curved FSS Radome-Enclosed antenna. *IEEE Access*, 9, 95843–95852.

18. Sheng, X., Song, W. (2012). *Essentials of computational electromagnetics*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 120-130

19. Sumithra, P., Thiripurasundari, D. (2017). Review on computational electromagnetics. *Advanced Electromagnetics*, 6(1), 42.

20. Ates, S. H., Aksoy, E., Kuzu, S. and Akcam, N. (2017). *Analysis of apollonius circles fractals as frequency selective surface.* 2017 18th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF) Book of Abstracts, Lodz, 179, 1–2.

21. Mittra, R., Chan, C., Cwik, T. (1988). Techniques for analyzing frequency selective surfaces-a review. *Proceedings of the IEEE*, 76(12), 1593–1615.

22. Wu, T. K. (1995). *Frequency selective surface and grid array*. New York: Wiley-Interscience, 78-82.

23. Anwar, R., Mao, L., Ning, H. (2018). Frequency Selective Surfaces: A review. *Applied Sciences*, 8(9), 1689.

24. Yang, F., Rahmat-Samii, Y. (2009). *Electromagnetic band gap structures in antenna engineering*. New York: Cambridge University Press, 32-45.

25. Kapoor, A., Mishra, R., Kumar, P. (2021). Frequency selective surfaces as spatial filters: Fundamentals, analysis and applications. *Alexandria Engineering Journal*, 61(6), 4263–4293.

26. Göksel, F. (2018). *Geniş bant durduran frekans seçici yüzeyin tasarımı,* Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırklareli, 102-105.

27. Sung, G., Sowerby, K., Neve, M. and Williamson, A. (2006). A Frequency-Selective wall for interference reduction in wireless indoor environments. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 48(5), 29–37.

28. Sung, H.H., (2006). *Frequency selective wallpaper for mitigating indoor wireless interference,* Unpublished Doctoral Thesis, The University of Auckland, Auckland, 115-122.

29. Kozakoff, D. J. (2010). *Analysis of radome-enclosed antennas*. Norwood, MA: Artech House, 103-157.

30. Gao, B., Huang, S., Ren, Z., Chen, Y. and Wang, X. (2018). Design and verification of an integrated free-standing thick-screen FSS radome. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 17(9), 1630–1634.

31. Okramcha, M., Tripathy, M. R. (2023). *Designing and performance analysis of low insertion loss with polarization-insensitive FSS-antenna-radome system for airborne applications*. 2023 10th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN). Noida, India, 323-328.

32. Chen, Q., Fu, Y. (2014). A planar stealthy antenna radome using absorptive frequency selective surface. *Microwave and Optical Technology Letters*, 56(8), 1788–1792.

33. Korkut, N. A., Kara, A., Yardım, F. E. (2024). Conformal frequency selective surfaces in radome design: A mini review. *Savunma Bilimleri Dergisi,* 20(2), 211–222.

34. Solunke, Y., Kothari, A. (2023). An ultra-thin, low-RCS, dual-bandpass novel fractal-FSS for planar/conformal C&X bands applications. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 175, 155073.

35. İnternet: Casale, D. M., Rollins, D. S., Inc, I. V. (2013). *US20140265042A1- 3D Direct Write Patterning Apparatus and Method of Generating Patterns on Doubly-Curved Surfaces- Google Patents*. Web: https://patents.google.com/patent/US20140265042A1/en, Son Erişim Tarihi: 22/06/2024.

36. Xu, Y., Zhang, S., Chen, S. and Zhao, H. (2021). *A band pass conformal frequency selective surface radome.* 2021 IEEE 6th International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP), Nanjing, 876–880.

37. Liang, F., Gao, J. (2014). *A novel method for fabricating curved frequency selective surface via 3D printing technology.* Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering/Proceedings of SPIE. Beijing, China, 9295, 929513.

38. Zhang, Y., Dong, T., Sun, D., Wang, Y. and Lu, S. (2021). *Electromagnetic analysis of a Jigsaw-Shaped FSS for conformal application*. 2020 50th European Microwave Conference (EuMC), Utrecht, Netherlands.768–771.

39. Zhou, H., Qu, S., Lin, B., Wang, J., Ma, H., Xu, Z., Peng, W. and Bai, P. (2012b). Filter-antenna consisting of conical FSS radome and monopole antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 60(6), 3040–3045.

40. Tian, T., Huang, X., Cheng, K., Liang, Y., Hu, S., Yao, L., Guan, D., Xu, Y. and Liu, P. (2020). Flexible and reconfigurable frequency selective surface with wide angular stability fabricated with additive manufacturing procedure. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 19(12), 2428–2432.

41. Yong, W. Y., Rahim, S. K. A., Himdi, M., Seman, F. C., Suong, D. L., Ramli, M. R. and Elmobarak, H. A. (2018). Flexible convoluted ring shaped FSS for X-Band screening application. *IEEE Access*, 6, 11657–11665.

42. Li, W., Lan, Y., Wang, H. and Xu, Y. (2021). Microwave polarizer based on complementary split ring resonators frequency selective surface for conformal application. *IEEE Access*, 9, 111383–111389.

43. Wei, P., Chiu, C., Chou, C. and Wu, T. (2020). Miniaturized dual-band FSS suitable for curved surface application. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 19(12), 2265–2269.

44. Dhegaya, S., Tanwar, L. (2022). *Stable gain with frequency selective surface in planar and conformal structure: for radome application.* 2022 Trends in Electrical, Electronics, Computer Engineering Conference (TEECCON), Bengaluru, India, 97-102.

45. Álvarez, H. F., Cadman, D. A., Goulas, A., De Cos Gómez, M. E., Engstrøm, D. S., Vardaxoglou, J. C., and Zhang, S. (2021). 3D conformal bandpass millimeter-wave frequency selective surface with improved fields of view. *Scientific Reports*, 11(1), 45-52.

46. Valle, C. L., Carranza, G. T., Rumpf, R. C. (2022). Conformal frequency selective surfaces for arbitrary curvature. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 71(1), 612–620.

47. Gurrala, P., Oren, S., Liu, P., Song, J. and Dong, L. (2017). Fully conformal square-Patch frequency selective surface toward wearable electromagnetic shielding. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 2602–2605.

48. Minjie, H. (2024). High precision modelling for arbitrary curved frequency selective structures based on perfect mapping between thick surface and its minimum distortion flat unfolding solution. *IEEE Access*, 12, 30533-30543.

49. Fu, Y., Ding, F., Jin, J., Cheng, H., Yang, Y., Zhou, X., Dai, Y. and Yang, H. (2024). Conformal frequency selective rasorber in S, C, X-band with low backward-scattering. *Optics Express*, 32(10), 16879.

50. Zargar, M. M., Rajput, A., Saurav, K. and Koul, S. K. (2021). Single layered flexible dual transmissive rasorbers with dual/triple absorption bands for conformal applications. *IEEE Access*, 9, 150426–150442.

51. Yong, W. Y., Hartman, T., Glazunov, A. A. (2019). *Flexible low profile frequency selective surface for X-Band shielding applications.* 2019 Joint International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Sapporo and Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Sapporo/APEMC). Sapporo, Japan, 435-438.

52. Choi, I., Lee, D., Lee, D. G. (2014). Hybrid composite low-observable radome composed of E-glass/aramid/epoxy composite sandwich construction and frequency selective surface. *Composite Structures*, 117, 98–104.

53. Xu, C., Wang, B., Pang, Y., Wang, J., Yan, M., Wang, W., Wang, A., Jiang, J. and Qu, S. (2019). Hybrid metasurfaces for infrared multiband radar stealth compatible materials applications. *IEEE Access*, 7, 147586–147595.

54. Mei, P., Lin, X. Q., Yu, J. W., Zhang, P. C. and Boukarkar, A. (2017). A low radar cross section and low-profile antenna co-designed with absorbent frequency selective radome. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66(1), 409–413.

55. Qiu, C., Li, S., Zhang, W., Song, L., Li, X., Yan, Z., Chen, Y. and Suo, S. (2024). A rapid modelling method for airborne FSS radomes based on dynamic customizable primitives. *Aerospace*, 11(7), 505.

56. Dalkilic, A., Alatan, L., Top, C. B. (2014). *Analysis of conformal frequency selective surface radome*. 2014 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Hague, Netherlands, 45-56.

57. Baldauf, J., Lee, S., Lin, L., Jeng, S., Scarborough, S. and Yu, C. (1991). High frequency scattering from trihedral corner reflectors and other benchmark targets: SBR versus experiment. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 39(9), 1345–1351.

58. Chung, S. S. M., Tuan, S. (2020). *Comparison of nasa almond radar cross section simulation results from shoot-bouncing-ray method and multi-level-fast-multipole-method.* 2020 International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM), Penghu, 1–2.

59. Woo, A., Wang, H., Schuh, M. and Sanders, M. (1993). EM programmer's notebook-benchmark radar targets for the validation of computational electromagnetics programs. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 35(1), 84–89.



Gazili olmak ayrıcalıktır