

**FİZİKSEL OPTİK YÖNTEMİ KULLANILARAK
BASİT VE KARMAŞIK ŞEKLİ NESNELERİN RADAR KESİT
ALANI HESAPLANMASI**

Tayfun OKAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2012

ANKARA

Tayfun OKAN tarafından hazırlanan “FİZİKSEL OPTİK YÖNTEMİ KULLANILARAK BASİT VE KARMAŞIK ŞEKLİ NESNELERİN RADAR KESİT ALANI HESAPLANMASI” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Nursel AKÇAM

.....

Tez Danışmanı, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Erkan AFACAN

.....

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Yrd. Doç. Dr. Nursel AKÇAM

.....

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Yrd. Doç. Dr. Hasan Şakir BİLGE

.....

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Tarih: 10/05/2012

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Tayfun OKAN

**FİZİKSEL OPTİK YÖNTEMİ KULLANILARAK BASİT VE KARMAŞIK
ŞEKLİ NESNELERİN RADAR KESİT ALANI HESAPLANMASI
(Yüksek Lisans Tezi)**

Tayfun OKAN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Mayıs 2012**

ÖZET

Bu çalışmada herhangi bir şekle sahip, basit ve karmaşık geometrili cisimlerin Radar Kesit Alanları (RKA) fiziksel optik (FO) yöntemi yardımıyla MATLAB programı kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar radarın verici ve alıcı anteninin aynı olduğu veya birbirine yakın olduğu, monostatik durum için hesaplanmıştır. Ayrıca RKA hesaplanırken hedefin yüzeyine bağlı kırınımalar göz önünde bulundurulmamıştır.

İlk başta levha, kutu gibi basit şekilli hedefler daha sonra insansız hava aracı, F-16 savaş uçağı, X-29 uçağı gibi karmaşık şekilli nesneler MATLAB’da modellenerek RKA’larının açığa bağlı değişimi gözlemlenmiştir.

Fiziksel optik metodu ile hedef gövdeleri küçük üçgen parçalara bölünmüş ve her bir üçgen yüzeyden saçılan alanlar açlarına göre vektörel olarak toplanarak toplam radara yansıyan alan elde edilmiştir.

Bilim Kodu : 905.1.034
Anahtar Kelimeler : Radar, radar kesit alanı (RKA), yüksek frekans metotları, fiziksel optik (FO), monostatik
Sayfa Adedi : 76
Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Nursel AKÇAM

**RADAR CROSS SECTION CALCULATION BY USING PHYSICAL OPTICS
METHOD FOR SIMPLE AND COMPLEX SHAPED OBJECTS**

(M.Sc. Thesis)

Tayfun OKAN

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

May 2012

ABSTRACT

In this study any arbitrary shaped, simple and complex geometrical objects Radar Cross Section (RCS) is calculated by using the physical optics (PO) method in MATLAB. The calculations have been made for monostatic case in which the radars' receiver and transmitter antennas are the same or different but placed side by side. Throughout the thesis the effect of the diffused scattering component of rough surface is not taken into account.

First we started with the modelling of simple shaped objects like plate, box then continued with complex geometrical objects like UAV, F-16, X-29 and then last but not least we calculated the RCS of all these objects and received the RCS to angle graphs by using MATLAB.

By using physical optics method to obtain the total scattered field received at the receiver part of the radar, the body of the target is seperated into number of facets, then all these facets scattered field components are super imposed.

Science Code	: 905.1.034
Key Words	: Radar, radar cross section (RCS), high frequency methods, physical optics (PO), monostatic
Page Number	: 76
Adviser	: Assist. Prof. Dr. Nursel AKÇAM

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım Hocam Yrd. Doç. Dr. Nursel AKÇAM'a, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan ve gerek hayatım boyunca gerekse de bu tez döneminde beni her zaman destekleyen çok değerli Annem Emel OKAN, Babam Cengiz OKAN, Ablam Pınar OKAN GÖKTEN ve Abim Soner GÖKTEN'e ayrıca gene bana manevi açıdan destek sağlamış üzerimde emeği büyük Hocam Prof. Dr. Nevzat AYPEK'e teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
2. RADAR SİSTEMLERİNİN TEMELLERİ	5
2.1. Radar Hakkında Temel Bilgiler	5
2.2. Elektromanyetik Saçılım	7
2.2.1. Radar kesit alanı (RKA)	7
2.2.2. Saçılım ve yankı mekanizmaları	10
2.2.3. Saçılım bölgeleri	12
2.2.4. Hedef saçılım matrisi	15
2.3. RKA Tahmin Metotları	16
2.3.1. Momentler metodu	18
2.3.2. Sonlu farklar metodu	18
2.3.3. Geometrik optik	19
2.3.4. Fiziksel optik	19

Sayfa

3. ÜÇGEN PARÇALARA FİZİKSEL OPTİĞİN UYGULANMASI	21
3.1. Bölünmüş Küçük Yüzeylerden Rastgele Yönlere Saçılım	21
3.2. Gelen ve Saçılan Alanlar	25
3.3. Koordinat Dönüşümleri	29
3.4. Fiziksel Optik Akımı	32
3.5. Tüm Yüzeylerden Elde Edilen Toplam Saçılan Alan	35
4. BAZI BASİT VE KARMAŞIK ŞEKİLLERİN MATLAB UYGULAMASI	39
4.1. Hedef Modelin Tasarımı	39
4.2. Hedefin Monostatik RKA Hesaplaması	45
4.2.1. Levha hedef modeli	46
4.2.2. Kutu hedef modeli	47
4.2.3. Füze hedef modeli	49
4.2.4. Tank hedef modeli	50
4.2.5. DİHA hedef modeli	53
4.2.6. Helikopter hedef modeli	55
4.2.7. F-16 savaş uçağı hedef modeli	57
4.2.8. X-29 uçağı hedef modeli	59
4.2.9. Silahlandırılmış X-29 uçağı hedef modeli	63
4.3. Görünmezlik Teknolojisi	67
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	71
KAYNAKLAR	73
ÖZGEÇMİŞ	76

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Levha için koordinat verileri	39
Çizelge 4.2. Levha için parça yüzeylerin tanımı	40
Çizelge 4.3. Kutu için koordinat verileri	41
Çizelge 4.4. Kutu için parça yüzeylerin tanımı	41
Çizelge 4.5. Füze için koordinat verileri	43
Çizelge 4.6. Füze için parça yüzeylerin tanımı	44

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Klasik bir radar sisteminin modellenmesi	5
Şekil 2.2. RKA'nın fiziksel olarak yorumlanması	8
Şekil 2.3. Gelen dalganın polarizasyonu için koordinat sistemi	9
Şekil 2.4. İletken kenar üzerinde gelen ışın ile saçılan ışını gösteren Keller Konisi.....	11
Şekil 2.5. Karmaşık şekillerde farklı saçılım mekanizmaları	11
Şekil 2.6. r yarıçaplı bir kürenin radar kesit alanı gösterimi	14
Şekil 2.7. 30 metre uzunluğundaki bir cisim için RKA hesaplamasında kullanılan metotların etkili olduğu frekans bölgeleri	17
Şekil 3.1. (a) Rastgele yönlü üçgensel yüzey, (b) Doğal koordinatlar için yüzey alt alanları	22
Şekil 3.2. Sağ el kuralına göre üçgenin ön yüzünün bulunması	22
Şekil 3.3. "Komşu üçgen yüzeylerden birinin köşesi diğerlerinin kenarında yer alamaz" kuralına göre üçgen yüzeylerin oluşumu	23
Şekil 3.4. Rastgele yönlü bir yüzeyin koordinat sisteminde gösterimi	29
Şekil 3.5. Global ve bölgesel koordinat sistemleri	30
Şekil 3.6. z eksenini boyunca α açısı kadar olan birinci dönme işlemi	30
Şekil 3.7. y' eksenini boyunca β açısı kadar olan ikinci dönme işlemi	31
Şekil 3.8. RKA hesaplamasının akış diyagramı	37
Şekil 4.1. Hedef nesnesi olarak seçilen levhanın üçgen yüzeylere bölünmüş halinin üç boyutlu çizimi	40
Şekil 4.2. Hedef nesnesi olarak seçilen kutunun üçgen yüzeylere bölünmüş halinin üç boyutlu çizimi	42
Şekil 4.3. Hedef nesnesi olarak seçilen kutunun üçgen yüzeylere bölünmüş halinin MATLAB'da üç boyutlu çizimi	45

Şekil	Sayfa
Şekil 4.4. Pürüzsüz yüzü levha modeli için RKA'nın açığa (θ) bağılı değişimi	46
Şekil 4.5. RKA'nın 3 boyutlu hedef model üzerinde gösterimi	47
Şekil 4.6. Pürüzsüz yüzü kutu modeli için RKA'nın açığa (θ) bağılı değişimi	48
Şekil 4.7. RKA'nın üç boyutlu hedef model üzerinde gösterimi	48
Şekil 4.8. Pürüzsüz yüzü füze modeli için RKA'nın açığa (θ) bağılı değişimi	50
Şekil 4.9. RKA'nın üç boyutlu hedef model üzerinde gösterimi	50
Şekil 4.10. Üç boyutlu tank hedef modeli	51
Şekil 4.11. Tank modeli için RKA'nın açığa (θ) bağılı değişimi	52
Şekil 4.12. RKA'nın üç boyutlu hedef model üzerinde gösterimi	52
Şekil 4.13. Oyuk yapılarda çoklu yansımalar	53
Şekil 4.14. Hedef nesnesi olarak seçilen DİHA'nın üçgen yüzeylere bölünmüş halinin MATLAB'da üç boyutlu çizimi	54
Şekil 4.15. DİHA modeli için RKA'nın açığa (θ) bağılı değişimi	55
Şekil 4.16. RKA'nın üç boyutlu hedef model üzerinde gösterimi	55
Şekil 4.17. Hedef nesnesi olarak seçilen helikopterin üçgen yüzeylere bölünmüş halinin MATLAB'da üç boyutlu çizimi	56
Şekil 4.18. Helikopter modeli için RKA'nın açığa (θ) bağılı değişimi	57
Şekil 4.19. RKA'nın üç boyutlu hedef model üzerinde gösterimi	57
Şekil 4.20. F-16 savaş uçağının simülasyon ortamında üç boyutlu gösterimi	58
Şekil 4.21. F-16 savaş uçağı için RKA'nın açığa (θ) bağılı değişimi	59
Şekil 4.22. RKA'nın üç boyutlu hedef model üzerinde gösterimi	59
Şekil 4.23. Üç boyutlu X-29 uçağı hedef modeli	61
Şekil 4.24. Birinci konumlanma durumu için iç dirençsiz ve pürüzsüz yüzü X-29 uçak modeli RKA'sının açığa (θ) bağılı değişimi	61

Şekil	Sayfa
Şekil 4.25. Birinci konumlanma durumu için RKA'nın üç boyutlu hedef model üzerinde gösterimi	62
Şekil 4.26. İkinci konumlanma durumu için iç dirençsiz ve pürüzsüz yüzlü X-29 uçak modeli RKA'sının açığa (θ) bağlı değişimi	62
Şekil 4.27. İkinci konumlanma durumu için RKA'nın üç boyutlu hedef model üzerinde gösterimi	63
Şekil 4.28. Üç boyutlu silahlandırılmış X-29 uçağı hedef modeli	64
Şekil 4.29. Birinci konumlanma durumu için iç dirençsiz ve pürüzsüz yüzlü silahlandırılmış X-29 uçak modeli RKA'sının açığa (θ) bağlı değişimi	65
Şekil 4.30. Birinci konumlanma durumu için RKA'nın üç boyutlu hedef model üzerinde gösterimi	65
Şekil 4.31. İkinci konumlanma durumu için iç dirençsiz ve pürüzsüz yüzlü silahlandırılmış X-29 uçak modeli RKA'sının açığa (θ) bağlı değişimi	66
Şekil 4.32. İkinci konumlanma durumu için RKA'nın üç boyutlu hedef model üzerinde gösterimi	66
Şekil 4.33. (a) Yüzey iç dirençsiz X-29 uçağı için açığa (θ) bağlı monostatik RKA hesabı (b) Yüzey iç dirençli X-29 uçağı için açığa (θ) bağlı monostatik RKA hesabı	70

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Savaş uçağına takılı olan bir füze	42
Resim 4.2. Dikey kalkış ve iniş yapabilen insansız hava aracı (DİHA)	53
Resim 4.3. İleri ok açılı kanatlı Grumman X-29 uçağı	60
Resim 4.4. Görünmezlik özelliğine sahip iki uçak (a) B-2 Spirit (b) F-117 Nighthawk	68

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı kısaltmalar açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Kısaltmalar	Açıklama
DİHA	Dikey Kalkıp İniş Yapabilen İnsansız Hava Aracı
EM	Elektromanyetik
FO	Fiziksel Optik
GO	Geometrik Optik
KFT	Kırınımın Fiziksel Teorisi
KGT	Kırınımın Geometrik Teorisi
MM	Momentler Metodu
RKA	Radar Kesit Alanı
RSM	Radar Soğurucu Malzeme
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu
SFM	Sonlu Farklar Metodu

1. GİRİŞ

19. yüzyılın sonlarında James Clerk Maxwell klasik elektromanyetik teorisinde daha önceden birbirleriyle ilişkisiz olarak gözüken elektrik ve manyetizmanın aynı şey olduğunu kendisine ait olan Maxwell Denklemleriyle (4 denklem) ispatlamıştır. Maxwell'in bu ispatı ile elektromanyetik saçılım problemleri araştırılmaya başlanmıştır. Maxwell Denklemlerinin önemli bir uygulama alanı da elektromanyetik dalgaların cisimlerden saçılımıdır. Özellikle radarların 2. Dünya Savaşı'nda önem kazanması ve yaygın olarak kullanılması ile bu konu üzerinde çalışmalar giderek hız kazanmıştır.

Radar basitçe, uzaktaki nesneleri radyo dalgalarının yansıması yardımıyla tespit eden cihazdır. Radar kelimesi *Radio Detection And Ranging* (Radyo Algılama ve Menzil Tayini) kelimelerinin baş harflerinden oluşmaktadır.

Radar bir alıcı verici düzeninden oluşmakta olup, bir cismin varlığını tayin etme, bulunduğu yön ve uzaklığı ölçme işlevlerini yerine getirir. Bunun için radar tarafından yayılan elektromanyetik dalgalar hedefe çarptığında hedef üzerinde bir akım oluşur ve bu akım, hedekten tüm yönlere dalgaların yayılmasını sağlar. Yayılan bu dalgaları radar işleyerek hedefin boyutu, fiziksel şekli, hedefi oluşturan maddenin cinsi gibi hedefe ait bazı parametreleri tespit eder.

Radar uygulamalarında, hedef tarafından engellenen elektromanyetik dalgaların modellenmesinde kullanılan varsayımsal alana Radar Kesit Alanı (RKA) denir. Başka bir deyişle radar kesit alanı, bir cismin veya platformun bir radardaki görünürlük miktarı veya elektromanyetik dalgalar olan radar sinyallerini, yansıtma miktarı olarak tanımlanabilir.

Günümüz elektronik harp ortamında hava araçlarının düşman radarlarına görünmezliğini sağlamak amacıyla RKA üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Bir nesnenin RKA'sı o nesnenin geçirgenliği, iletkenliği gibi temel parametrelerin yanında geometrik şekliyle de ilişkilidir. RKA değerini indirgeyerek radara

görünmeyen hedefler tasarlamak 1970’li yıllarda oldukça popüler olmuştur. Günümüz modern radarları sadece düşük RKA’lı hedefleri belirlemekle kalmamakta aynı zamanda onların saçılım karakteristiklerine göre sınıflandırıp ayırt edebilmektedir. Bu nedenle günümüz tasarımcıları RKA’sı düşük, görünmeyen hedefler tasarlamak için sayısal elektromanyetiğe başvurmuştur. Bu sayede karmaşık şekilli hedeflerden saçılan elektromanyetik dalgaların hesabı mümkün kılınmıştır. Temel olarak sayısal elektromanyetik tekniklerini iki temel gruba ayırmak mümkündür: optik tabanlı yaklaşımlarla çalışan yüksek frekans teknikleri veya yaklaşımsal modelleme metotları ve elektromanyetik problemi tam olarak çözme için hedefleyen alçak frekans teknikleri veya tam modellemedir.

Tam modellemede Maxwell Denklemleri ile sınır koşulları dikkate alınarak çok sayıda integral ve diferansiyel eşitlikler hesaplanmalıdır. Bu nedenle RKA ölçümü için tam modelleme şekli oldukça karmaşık olup, zaman ve maliyet gerektiren bir yöntemdir. Momentler Metodu (MM) ve Sonlu Farklar Metodu (SFM) en bilinen tam modelleme metotlarıdır. Bu metotlar yüksek frekans değerlerinde fazla bilgisayar becerisine ihtiyaç duyarlar ve birçok zaman düşük frekans metotları olarak da adlandırılırlar.

Tam modellemedeki bu zorluklardan dolayı eşitliklerde yuvarlamalar yaparak bazı yaklaşım modellemeleri ortaya çıkmıştır. Bu yaklaşım modellemeleri tam modellemeye çok yakın sonuçlar vermesinin yanında karmaşık şekilli hedeflerin RKA hesabını da olanaklı kılmıştır [1]. Yaklaşım modellemeleri elektriksel olarak büyük, sayısal olarak karmaşık problemlerle başa çıkmak için kullanılırlar. Bu metotlar yüksek frekanslarda etkili oldukları için aynı zamanda yüksek frekans çözümleme metotları olarak da adlandırılırlar. En bilinen yüksek frekans metotları: Geometrik Optik (GO), Fiziksel Optik (FO), Kırınımın Geometrik Teorisi (KGT), Kırınımın Fiziksel Teorisidir (KFT).

Yeni hava araçları tasarlamak ve bunların radar kesit alanını farklı frekans değerlerinde hesaplamak günümüz elektronik harp ortamında zor bir konudur. Hedefin toplam radar kesit alanı, hedefi basit şekillere bölerek ve bu her bir basit

şekilden saçılan dalgaları kullanarak hesaplanır [2]. Herhangi bir üç boyutlu hedefin RKA tahmininde en çok kullanılan metotlar: Momentler Metodu, Sonlu Fark Metodu, Geometrik Optik ve Fiziksel Optiktir. Bu metotlar günümüze kadar birçok makalede kullanılmış ve zamanla yeni yöntemler geliştirilmiştir.

MM, elektrik ve manyetik alan integrali denklemini matris problemine indirgeyerek çözümler. Bu metot çok kesin sonuçlar verir fakat sayısal olarak karmaşıktır [3].

SFM’de, zaman veya frekans alanında Maxwell eşitliğindeki diferansiyel işlemin hesabı için sonlu farklar kullanılır. Bu yöntemde de MM’de olduğu gibi hedefin ayrıklaştırılması gerekmektedir [4].

GO ve KGT ışın izleme metodunu uygularlar. Kırınımına uğrayan ışınlar hedefin kenar, köşe ve uç kısımlarından yansımalar sonucu oluşur. GO yönteminde kaynak ve gözlem noktasının Snell Yasasını sağlaması gerekir veya yansıyan alan sıfır kabul edilir. Bu da gölge sınırlarında kesintili alan oluşmasına ve gölge bölgesinde alan olmamasına neden olur. KGT bu sorunu kenar bağlantılı etkenleri hesaplayarak çözer [5] .

FO düz ve tek kıvrımlı yüzeyler için ışın izlemenin sonsuzluğu problemini indüklenmiş yüzey akımlarını yuvarlayarak çözer. Hedefin radar tarafından aydınlatılan kısımları yüzey akımına sahip olurken, gölge kısımlarında yüzey akımı sıfır kabul edilir. Fakat FO yöntemi ile gölge sınırlarında akım sıfır kabul edildiği için geniş açılarda hesaplanan alan değerleri hatalı sonuç vermektedir. Fiziksel Optik yöntemi hem büyük hedeflerde hassas sonuçlar verir, hem de hesap karmaşıklığı içermez [6].

KFT metodu toplam alanın kesin çözümünden gelen alanı ve FO alanını çıkartarak nesnenin kenarlarının yaptığı katkıyı hesaplayabilmektedir. Aynı KGT’nin GO’nun düzeltilmesi olduğu gibi, KFT de FO’nun kenar kırınımının hesaba katıldığı bir düzeltimdir [7].

MATLAB gibi yazılım programları kullanılarak nesnelerin RKA hesapları birçok teze konu olmuştur. Kimisinde çift eğrili yüzeylerde monostatik ve bistatik durumlar için RKA hesaplanmıştır [8]. Tırtıklı yüzeyler kullanarak gelen dalgaların yansımaya kısmen engel olunarak radar kesit alanı azaltma yöntemleri araştırılmıştır [9]. Gemilerde geometrik düzenlemeyle veya dış yüzeylerinin soğurucu maddeyle kaplanması ile RKA'larının azaltılması ve nümerik yöntemlerle hesaplanması hakkında çalışmalar yapılmıştır [10]. Yine başka bir çalışmada, basit cisimlerin radar kesit alanları MATLAB uygulaması kullanılarak hesaplanmıştır [11].

Tezin ikinci bölümünde, kodun formülasyonunun arkasındaki teorilerin tanımı yapılmış, bunun yanında radarın temel ilkeleri, elektromanyetik saçılım, polarizasyon ve RKA tahmin teknikleri hakkında bilgiler verilmiştir.

Üçüncü kısmında ise hedef modellerin ayrıştığı küçük üçgen yüzeye fiziksel optiğin uygulanışı açıklanmıştır. Bunun yanında gelen ve saçılan alanlardan, fiziksel optik akımından, koordinat dönüşümlerinden ve yüzeylerin toplamından elde edilen toplam saçılan alandan bahsedilmiştir.

Tezin dördüncü bölümünde de sırasıyla basit nesnelerden başlayarak karmaşık nesnelerin MATLAB programında nasıl modellendiği, RKA'nın farklı frekans değerleri için verdiği farklı sonuçlar, görünmezlik teknolojisi ve RKA üzerindeki etkisi ve son olarak da farklı nesnelerin MATLAB'da RKA hesaplaması yapılmıştır.

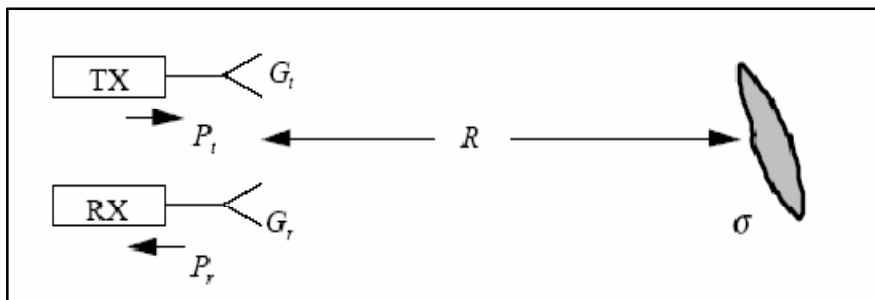
2. RADAR SİSTEMLERİNİN TEMELLERİ

Bu başlık altında radar kesit alanının günümüz elektronik ortamındaki öneminden ve radar denklemindeki görevinden bahsedilmiştir. Daha sonra RKA detaylı olarak tanımlanmış ve saçılım bölgeleri hakkında bilgi verilmiştir. En son olarak da en çok kullanılan RKA tahmin metotları işlenerek birbirleri ile karşılaştırması yapılmıştır.

2.1. Radar Hakkında Temel Bilgiler

Radar elektromanyetik dalga ileten ve hedefi alıcı yönüne hedeften saçılan enerji yardımıyla belirleyen bir cihazdır. Bazen radarın alıcısı ve vericisi hedef tarafından bakıldığında farklı konumlarda olabilir. Bu tip radarlara bistatik radar denir. Birçok uygulamada ise alıcı ve verici aynı yere konumlanmıştır hatta bazen aynı anteni kullanırlar. Bu radarlara da monostatik radar denir [12].

Radar denkleminde radarın ölçebildiği mesafenin vericinin, alıcının, antenlerin, hedefin ve çevrenin özelliklerine bağlı olduğu çıkarılabilir. Klasik bir radar sistemi Şekil 2.1'deki gibi modellenir. Şekilde TX radarın vericisini, RX alıcısını, gri nesne de hedefi ifade etmektedir. Verici ve alıcı antenleri birbirlerine yakın konumlanmıştır ve hedefe uzaklıkları R 'dir.



Şekil 2.1. Klasik bir radar sisteminin modellenmesi

Radar denkleminin klasik formu Eş. 2.1’de gösterilmiştir.

$$P_r = \left(\frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \right) \left(\frac{\sigma}{4\pi R^2} \right) \left(\frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \right) L \quad (2.1)$$

Bu eşitlikte watt cinsinden alınan güç P_r , vericinin çıkış gücü P_t , vericinin kazancı G_t , alıcının kazancı G_r , radar kesit alanı (metre kare cinsinden) σ , dalgaboyu (metre cinsinden) λ ($\lambda = \frac{c}{f}$), alınan sinyaldeki kayıp L ($0 < L < 1$), hedefin radarla arasındaki mesafe de R ile ifade edilmektedir. Eşitliğe bütünü ile bakılırsa parantez içindeki ilk terim vericideki yayılmadan dolayı oluşan hedefteki güç yoğunluğu (watt/m^2), ikinci terim alıcıya yansıyan saçılan güç, üçüncü terim ise alıcı anteni tarafından efektif alanına bağlı olarak yakalanan enerjiyi ifade etmektedir. Monostatik bir radarda alıcı ve verici için aynı anteni kullanılacağı için ($G_r = G_t$) Eş. 2.1’deki eşitlik aşağıdaki gibi sadeleşir [13].

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

Radarın daha ilerisindeki hedefleri tespit edemediği, maksimum mesafesi R_{max} , alınan sinyal gücü P_r ’nin minimum olduğu değerdir. Eş. 2.2’de $P_r = S_{min}$ eşitliği koyulursa;

$$R_{max} = \left[\frac{P_t G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 S_{min}} \right]^{1/4} \quad (2.3)$$

sonucu elde edilir. Ayrıca bu denklemden radarın maksimum mesafesi ile hedefin RKA arasındaki ilişki de kolaylıkla görülebilmektedir.

2.2. Elektromanyetik Saçılım

2.2.1. Radar kesit alanı (RKA)

RKA, kullanılan radarın özelliklerinden ve içinde bulunduğu ortamdan bağımsız bir parametredir ve sadece hedefin geometrik özellikleri (şekli) ve yapıldığı malzemenin bir fonksiyonudur [14].

Radar kesit alanı, bir hedefin radar tarafından yayılan dalgalarla aydınlatılması sonucu hedeften belli bir yönde saçılan güç yoğunluğunun, radardan hedefe giden alanın güç yoğunluğuna normalize edilmesinin ölçüsüdür. Burada normalizasyonun amacı mesafe etkisini ortadan kaldırmak, böylece RKA hesabının hedef ve radar arasındaki mesafeden bağımsız bir hale getirmektir.

Unutulmamalıdır ki RKA'nın tanımı, cisimden gelen sinyalin cisme yollanan sinyale oranı değildir. Eğer tanım böyle olsaydı hem RKA değerleri daima birden küçük olur, hem de birimi metrekare olmazdı. RKA'nın tanımı, radar alıcısına cisimden geri gelen elektromanyetik (EM) dalganın gücü cinsinden yapılır. Radar alıcısında hedefin şeklinin ve malzemesinin ne olduğu hakkında bir bilgi bulunmadığı için, hedeften gelen enerjinin her yönde aynı miktarda yayıldığı varsayılır. Açıkça yanlış olan bu varsayım sebebiyle çok ufak cisimlerin binlerce metrekarelik RKA değerlerine sahip olduğu veya çok büyük cisimlerin bir kuşun yüzey kesidinden daha küçük RKA değerinin olduğu durumlar ortaya çıkar. Bunun sebebini anlamak için ufak bir cismin, üzerine gelen EM dalgasının enerjisinin çoğunu alıcıya doğru yansıttığını varsayalım. Doğal olarak bu cismin diğer yönlerde yansıttığı EM enerji alıcıya doğru yansıttığından çok daha az olacaktır. Fakat alıcıda bulunan kişi, kendisine göre çok parlak görünen bu hedefin her yönde eşit miktarda enerji yaydığını varsaymak zorundadır. Bu durumda hedeften çıkan EM gücün (P_s) çok büyük bir değer olduğu varsayılacaktır. Güç ifade ettiği için P_s 'nin birimi watt olmalıdır. Radardaki temel prensip, hedefin kendi yaptığı ışımanın değil, hedefe bir verici ile yollanan sinyalin yansımalarının algılanmasıdır. Bu yüzden hedefin etrafa yaydığı P_s gücünün hepsini, üzerine gelen EM dalgadan temin etmesi gereklidir.

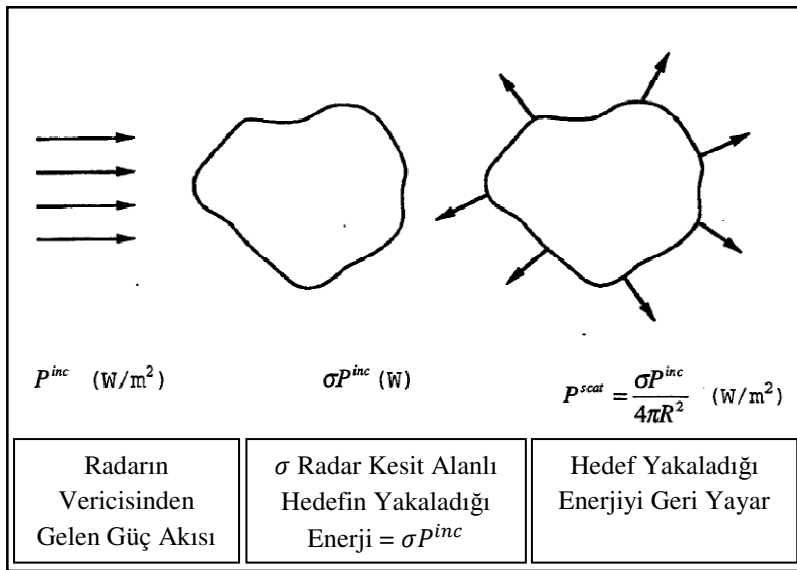
Cismin üzerine gelen EM dalganın şiddeti, metrekare başına taşıdığı güç ile, yani $watt/m^2$ cinsinden güç yoğunluğu (S_i) ile ifade edilir. İşte, RKA'nın tanımı da P_s ile S_i 'nin oranlarından bulunur. Yani, 'Cismin RKA değeri nedir?' sorusunun cevabı 'Üzerine gelen S_i yoğunluğundaki EM dalgadan P_s gücünü elde etmek için kaç m^2 olması gerekiyorsa, cismin RKA değeri odur.' olur [14]. Formül ile

$$\sigma = \frac{P_s}{S_i} \left[\frac{watt}{watt/m^2} = m^2 \right] \quad (2.4)$$

şeklinde gösterilebilir. Çarpan ve saçılan elektrik alan şiddeti cinsinden RKA ise aşağıdaki gibi hesaplanır. RKA'nın fiziksel olarak yorumlanması da Şekil 2.2'de gösterilmiştir.

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|\vec{E}_s|^2}{|\vec{E}_i|^2} \quad (2.5)$$

Burada $\vec{E}_i$, radardan hedefe gelen elektrik alanın; $\vec{E}_s$ ise hedeften radara saçılan elektrik alanın vektörel olarak gösterimidir.



Şekil 2.2. RKA'nın fiziksel olarak yorumlanması [15]

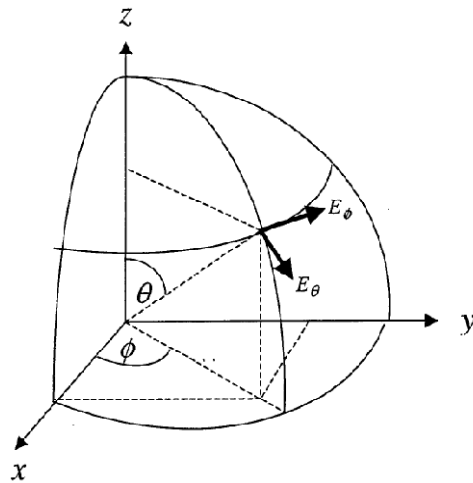
Yukarıdaki denklemlerden de anlaşılacağı üzere RKA'nın birimi metrekaredir. Fakat bir cismin değişik açılardaki RKA değeri 100 m^2 'ler kadar değişim gösterebilmektedir. Bu kadar geniş aralıktaki RKA değerlerini aynı grafik üzerinde göstermek zor olduğu için RKA ölçümlerinde genellikle logaritmik bir ölçekle gösterilen *desibel metrekare* (dBm^2) veya İngilizce *decibel square-meter* teriminin kısaltması olan dBsm birimi kullanılır [14]. Metrekare ile dBsm cinsinden RKA değerlerinin arasında

$$\sigma_{dB} = 10 \log_{10}(\sigma) \quad (2.6)$$

$$\sigma = 10^{(0,1 \times \sigma_{dB})} \quad (2.7)$$

formülleri ile geçiş sağlanabilir.

Radar kesit alanı hedefin görünümü, yapıldığı materyallerin bileşimi, frekans veya dalgaboyu, alıcı ve verici polarizasyonları ve hedefin radara göre açısal durumu gibi birçok faktöre bağlı bir fonksiyondur. Bu nedenle σ genel literatürde $\sigma_{pq}(\theta, \phi)$ olarak kullanılır ki burada p ve q giden ve alınan polarizasyonları, (θ, ϕ) ise Şekil 2.3'deki gibi kutup küresel açıları ifade etmektedir.

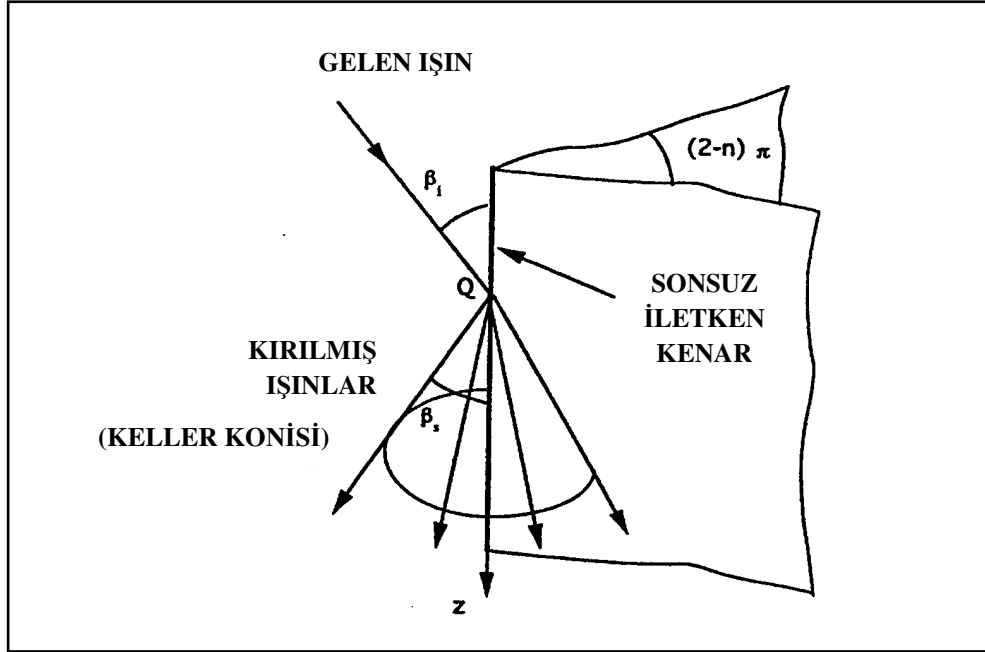


Şekil 2.3. Gelen dalganın polarizasyonu için koordinat sistemi [15]

2.2.2. Saçılım ve yankı mekanizmaları

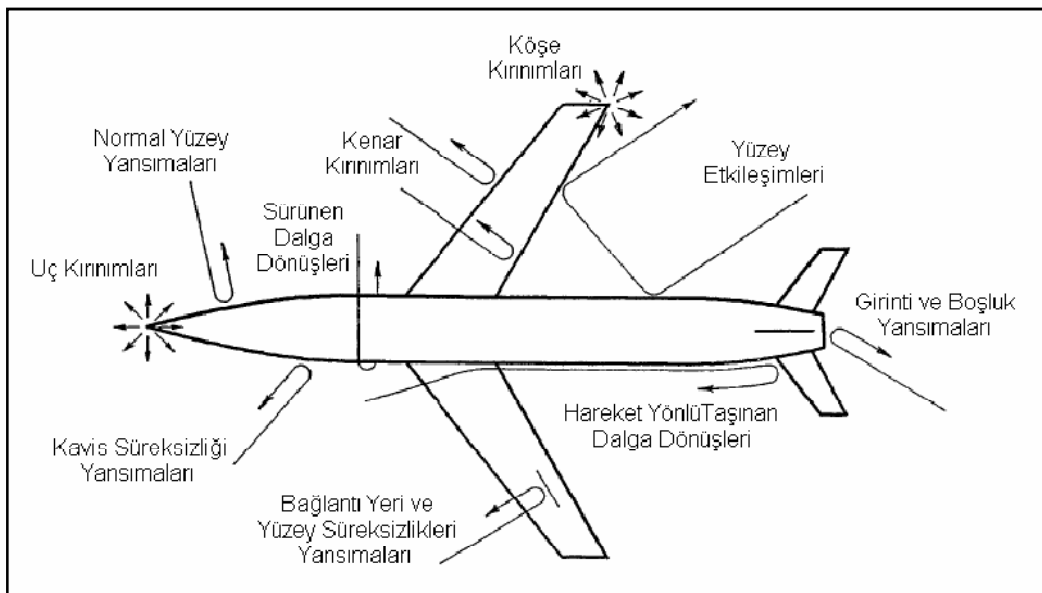
Karmaşık hedefler birçok saçılım mekanizmasını doğurur ve bu saçılım mekanizmaları frekans ve açının karmaşık bir fonksiyonu olan RKA'nın oluşmasında etkilidirler. Bazı temel saçılım mekanizmaları şunlardır:

- *Yansımalar*, en yüksek RKA tepe değerlerini verir. Başka bir deyişle RKA üzerinde en etkili olan saçılım mekanizmasıdır. Birden fazla yüzeyin var olduğu durumlarda çoklu yansımalar oluşabilir.
- *Kırınım*lar, kenar ve uçlardaki süreksizlikten oluşur. Bu dalgalar yansıyan dalgalardan daha az yoğun olmasına rağmen geniş bir açı yelpazesinde ortaya çıkabilirler. Gelen ışının hedefe dik gelmediği durumlarda kenar kırınımlı ışın, kenar ve gelen ışın arasındaki açı yarı tepe açısına eşit olan koni üzerinde herhangi bir yere konumlanabilir. Bu koni Şekil 2.4'te gösterilmiştir ve Keller Konisi olarak adlandırılır. Burada β_i gelen ışının kenarla yaptığı açıyı, β_s ise saçılan ışının kenarla yaptığı açıyı ifade etmektedir.
- *Yüzey dalgaları* çok çeşitlidir. Yuvarlak gövdenin arkasından sarılan sürünen (sarılan) dalgaları ve düz gövdelerde meydana gelen yayılan yüzey dalgaları olan sızıntı dalgalarını içerir. Eğer dalgalar köşe gibi bir süreksizlikle karşılaşırlarsa tekrar kaynaklarına doğru geri yansır. Geri yansırken de büyük RKA lobları oluştururlar.
- *Kanallama* bir dalganın kısmen kapalı yapılarda tutsak kalması durumunda oluşur. Işınlardan birçok yolu izlerler bu da ışınların neredeyse her açıda ortaya çıkmasına sebep olur. Bu da büyük ve geniş RKA hüzmesi (lobu) oluşmasına neden olur.



Şekil 2.4. İletken kenar üzerinde gelen ışın ile saçılan ışını gösteren Keller Konisi [5]

Karmaşık şekiller temelinde küre, silindir ya da düzlem plaka gibi basit şekillerin bir araya gelmesiyle oluşur. Ancak bu karmaşık şekillerde RCS değerinin hesaplanmasını daha da zor hale getiren farklı davranışlar ortaya çıkar. Bu davranışlara sebep olan mekanizmalar Şekil 2.5'te gösterilmektedir [16].



Şekil 2.5. Karmaşık şekillerde farklı saçılım mekanizmaları [16]

2.2.3. Saçılım bölgeleri

Daha önceki paragraflarda da belirtildiği gibi radar kesit alanı hedefe gönderilen dalganın frekansına bağlıdır. Hedefin RKA'nın belirgin derecede farklı olduğu 3 frekans bölgesi mevcuttur. Bu 3 farklı bölge hedefin gelen dalgaboyu (λ) cinsinden boyutuna (L) bağlı olarak tanımlanır. L boyundaki bir pürüzsüz yüzlü hedef için bahsi geçen bölgeler aşağıdadır.

i. Alçak frekans bölgesi veya Rayleigh bölgesi $\left(\frac{2\pi}{\lambda}L \ll 1\right)$

Bu frekanslarda, radardan gelen düzlem dalgasının faz değişimi hedefin gövdesi boyunca azdır. Böylece hedefin gövdesi üzerindeki indüklenen akım, genlik ve faz açısından yaklaşık olarak sabittir. Gövdenin şekli burada önemli değildir. Genellikle σ 'ya karşı $\frac{2\pi}{\lambda}L$ düzgündür ve $1/\lambda^4$ oranıyla değişiklik gösterir.

ii. Rezonans bölgesi veya Mie bölgesi $\left(\frac{2\pi}{\lambda}L \approx 1\right)$

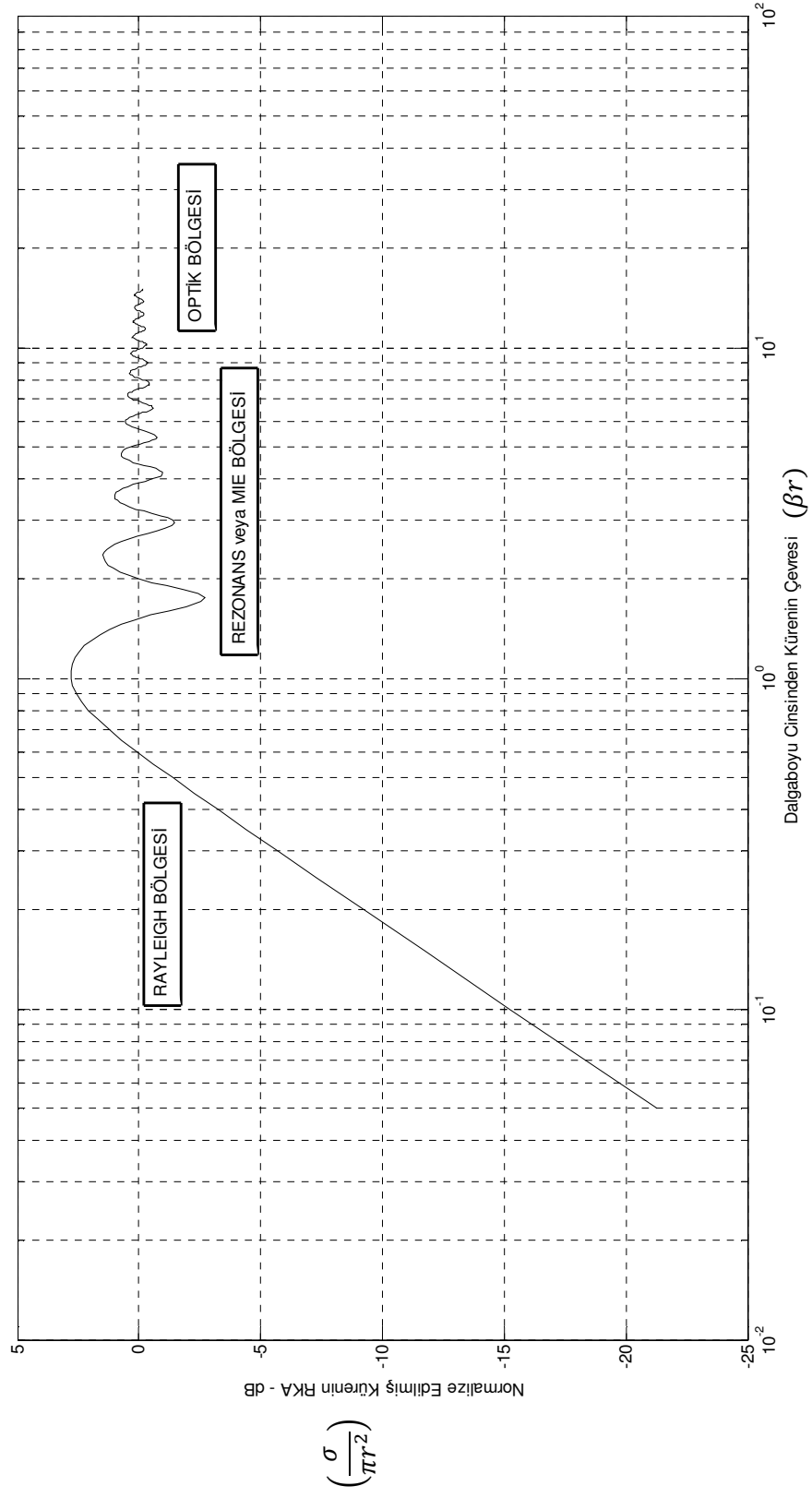
Bu frekanslarda akımın faz çeşitliliği hedefin gövdesi boyunca önemlidir ve gövdenin her parçası saçılıma katkı sağlar. Genellikle σ 'ya karşı $\frac{2\pi}{\lambda}L$ grafiği salınım yapar.

iii. Yüksek frekans bölgesi veya optik bölgesi $\left(\frac{2\pi}{\lambda}L \gg 1\right)$

Bu frekanslarda ise hedefin gövdesi boyunca akımın faz çeşitliğinde birçok döngü vardır ve bu nedenle saçılan alanın açıya bağımlılığı fazla olacaktır. Bu bölgede σ 'ya karşı $\frac{2\pi}{\lambda}L$ düzgündür ve bazen dalgaboyundan (λ) bağımsız olabilir [17].

Şekil 2.6, r yarıçaplı bir kürenin radar kesit alanını göstermektedir. Burada β ile gösterilen değer $\beta = 2\pi/\lambda$ olarak tanımlanmıştır ve yukarıda bahsi geçen üç bölge net olarak görülmektedir. $\beta r < 0,5$ iken Rayleigh bölgesindeki eğri neredeyse

doğrusaldır. Fakat 0,5'in üzerindeyken, Rezonans bölgesindeyken, RKA salınım yapmaktadır. βr değeri artmaya başladığında salınım yavaş yavaş azalmaktadır. Son olarak $\beta r > 10$ için radar kesit alanının değeri neredeyse sabitlenir ve πr^2 'ye eşitlenir.



Şekil 2.6. r yarıçaplı bir kürenin radar kesit alanı gösterimi

2.2.4. Hedef saçılım matrisi

Radar kesit alanı hedefe çarpan ve hedeften yayılan dalgalarının polarizasyonunun bir fonksiyonudur ve sayısal bir değerdir. Radardan hedefe giden dalganın polarizasyonu her zaman hedefin koordinat sisteminin polarizasyonu ile aynı yönde olmayabilir. Bu nedenle hedef koordinat sisteminde gelen dalganın polarizasyonunu bileşenlerine ayırtmak gerekir. Uzak mesafelerde dalganın vektör bileşenleri küreye teğet olduğu için, merkezi hedefe konumlandırılmış küresel bir sistemde gelen dalgayı tanımlamak üzere birbirine dik iki bileşen olan θ ve ϕ değişkenleri kullanılır. Böylece radardan hedefe gelen elektrik alan aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\vec{E}_i = E_{i\theta}\hat{\theta} + E_{i\phi}\hat{\phi} \quad (2.8)$$

Denklemdaki $\hat{\theta}$ ve $\hat{\phi}$ değerleri hedef koordinat sisteminde birim vektörleri, i indeksi ise hedefe ulaşan (incident) alanı ifade etmektedir. Radardan hedefe çarpan dalgalar karmaşık şekilli yüzeylerde çoklu kırınım ve yansımalarla uğrayacağından gelen elektrik alanla saçılan elektrik alanın polarizasyonları aynı olmayacaktır. Aşağıdaki saçılım matrisi gelen ve saçılan elektrik alanlar arasındaki ilişkiyi göstermede kullanılır [18].

$$\begin{bmatrix} E_{s\theta} \\ E_{s\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{\theta\theta} & S_{\theta\phi} \\ S_{\phi\theta} & S_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{i\theta} \\ E_{i\phi} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Yukarıdaki eşitlikte indis s saçılan (scattered) alanı gösterirken, i radardan hedefe gelen (incident) alanı gösterir. S_{pq} değerleri ise saçılım parametreleri olarak ifade edilir. Bahsi geçen parametrelerdeki ilk indeks olan p saçılan alanın polarizasyonunu, ikinci indeks olan q ise gelen alanın polarizasyonunu ifade etmektedir. Saçılım matrisinin elemanları kompleks değerdedir ve RKA ile bağıntıları aşağıdaki gibidir.

$$S_{pq} = \frac{|\sigma_{pq}|^{1/2} e^{j\psi_{pq}}}{\sqrt{4\pi R^2}} \quad (2.10)$$

Burada S_{pq} saçılım parametresinin fazı ψ_{pq} ,

$$\psi_{pq} = \arctan \left[\frac{\text{Im}(\sigma_{pq})}{\text{Re}(\sigma_{pq})} \right] \quad (2.11)$$

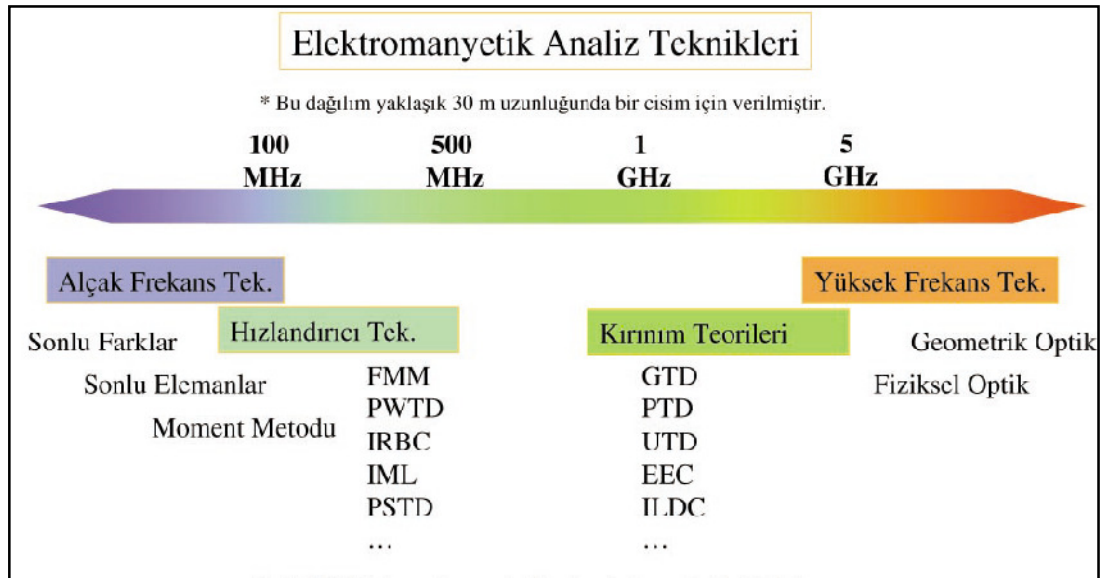
olarak ifade edilir.

2.3. RKA Tahmin Metotları

Günümüze kadar RKA'nın tahmini hakkında birçok makale yazılmış ve zaman içinde birçok farklı hesaplama yöntemleri geliştirilmiştir. Geliştirilen ilk tekniklerde mikrodalga frekanslardaki elektromanyetik dalganın optik kurallarına uyduğu varsayılmıştır. Bu yaklaşımlarda elektromanyetik dalganın cisimle etkileşmesi modellenirken kırınım etkileri tamamen ihmal edilmiştir. Bu yüzden fiziksel optik ve geometrik optik gibi yaklaşımlar, elektromanyetik dalganın etkileşimde bulunduğu cismin yüzeyinde keskin kenarlar ve köşeler bulunmadığı durumlarda oldukça iyi tahmin değerleri vermektedir.

1980'lerden itibaren bilgisayarların işlem kapasitesinde hızlı bir artış yaşanmıştır. Bu artışa paralel olarak RKA hesabında kullanılan yaklaşıklıkları azaltan yöntemler de geliştirilmiştir [19]. En yaygın RKA hesaplama tekniklerini iki temel gruba ayırmak mümkündür: optik tabanlı yaklaşımlarla çalışan yüksek frekans teknikleri ve elektromanyetik problemi tam olarak çözmeyi hedefleyen alçak frekans teknikleri. Şekil 2.7'de 30 metre uzunluğundaki bir cisim için bu iki tekniğin RKA hesabında kullanılabileceği frekans bölgeleri gösterilmiştir. Görüldüğü üzere fiziksel optik ve geometrik optik gibi yüksek frekans teknikleri mikrodalga radarların çalıştığı 2 GHz'in altındaki frekans bandını tam olarak kaplayamamaktadırlar. Buna karşın sonlu farklar (SFM), sonlu elemanlar (SEM) ve moment metodu gibi alçak frekans teknikleri ile GHz bandında çözüm üretmek mümkün değildir. Ancak hem alçak

frekans, hem de yüksek frekans tekniklerinin eksik olduğu yönlerini telafi etmek üzere pek çok yöntem geliştirilmektedir. Geliştirilen bu tekniklerle birlikte günümüz hesaplama yöntemleri değerlendirildiğinde mikrodalga radar frekanslarında en etkin çözümün, kırınımın geometriksel teorisi ve kırınımın fiziksel teorisi gibi kırınım teorileriyle desteklenmiş yüksek frekans tekniklerinin olduğu görülmektedir. KGT metodu yüksek frekanslarda kırınım sorununu çözümlemek için Keller tarafından geliştirilmiştir [20]. Bu sonuç kesinlikle alçak frekans tekniklerinin gereksiz olduğu olarak yorumlanamaz çünkü yüksek frekans teknikleri daima EM dalganın davranışı hakkında belirli varsayımlarla çalışırlar ve bu varsayımlar daima hatalar üretebilirler. Fakat alçak frekans teknikleri temelde hiçbir teorik kısıtlama getirmeden cisim ile EM dalganın etkileşimini modellerler ve ortaya çıkan hata seviyesi genellikle mühendislik yaklaşımlarının gerektirdiğinin çok altında kalır. Son yıllarda ülkemizde hem alçak frekans, hem de yüksek frekans teknikleri konusunda birçok araştırma yapılmıştır [14].



Şekil 2.7. 30 metre uzunluğundaki bir cisim için RKA hesaplamasında kullanılan metotların etkili olduğu frekans bölgeleri [14]

2.3.1. Momentler metodu

Bir integral eşitliğini çözmek için kullanılan yöntemlerden en bilineni momentler metodudur. RKA tahmini sırasında da Maxwell denklemlerinde ve sınır koşullarında bilinmeyen nicelliğin elektrik veya manyetik akım olmasından kaynaklı integral denklemleri ortaya çıkacaktır. Momentler metodu bu integral eşitliklerini birkaç eşzamanlı doğrusal eşitliğe indirgeyerek standart matris matematiği kullanılarak çözülebilmesine olanak sağlar. Birçok momentler metodu formülasyonunda hedef gövdesi ayrıştırılır ve böylece sonlu elemanlar metoduyla uyumlu hale getirilir.

Momentler metodunun başka bir avantajı da RKA hesabında çok kesin sonuçlar sağlayarak doğru çözümler üretmesidir. Tüm bu avantajlarının yanında bu metot büyük matrisler üreterek gelişmiş hesap kabiliyetine ve artan çalışma zamanına ihtiyaç duyar. Bu nedenle günümüzdeki gelişmiş bilgisayar sistemlerine rağmen yüksek frekanslarda boyutça büyük hedefler için kullanışlı değildir [21].

2.3.2. Sonlu farklar metodu

Sonlu farklar metodu zaman veya frekans bölgesinde Maxwell eşitliklerindeki diferansiyelleri yaklaşık olarak değerlemek için kullanılır. MM'da olduğu gibi hedefin küçük parçalara bölünmesi, ayrıklaştırılması gerekir. Maxwell denklemleri ve sınır koşulları hedefin yüzeyinde ve ayrıklaştırılmış hücrelerin sınırlarında uygulanır. Zaman bölgesinde bu metot hedefin çeşitli dalga biçimlerine verdiği geçici cevabı hesaplamada yaygın olarak kullanılır. Ayrıca bu metot momentler metodu gibi büyük matrislere gereksinim duymaz. Frekans alanı verileri zaman verilerinin fourier dönüşümleri yapılarak elde edilir. Sonlu farklar metodu da momentler metodu gibi RKA tahmininde kesin çözümler sağlar [22]. Dezavantajı olarak da hedefin ayrıştırılmış parçalarındaki alanı ve hedefin farklı genlikteki dalgaboyları ile RKA'nı hesapladığından çalışması için oldukça uzun bir süre gerekmesidir.

2.3.3. Geometrik optik

Geometrik optik metodu rastgele şekilli, elektriksel olarak büyük hedeflerin analizinde ışın izleme metotlarını kullanır. Çünkü basit ortamlarda ışın izleme kuralları optikteki yansıma ve kırınım ile benzer özellikler taşırlar. Bunun yanında bu metot gelen dalganın hedefin kenar, köşe ve uç kısımlarında kırınımına uğrayarak saçılması sonucu ortaya çıkan kırınımına uğrayan ışınları da hesaba katmaktadır. Formüller sonsuz frekans ($\lambda \rightarrow 0$) esasına, ki bu da elektriksel olarak büyük hedef anlamına gelmektedir, dayanarak elde edilir. GO ile ilgili sorun kaynak ve gözlem noktasının Snell Kanununu sağlamasıdır, yoksa yansıyan alan sıfır kabul edilir. Kırınımın geometrik teorisi metodu GO'ya ek olarak toplam elektriksel alana, kenar ve köşelerde oluşan kırınımın meydana getirdiği geri yansıma etkilerini de hesaba katarak daha kesin sonuçlar vermesi için geliştirilmiştir.

2.3.4. Fiziksel optik

Fiziksel optik metodu hedefe gelen ışımlar tarafından rastgele bir gövde üzerinde indüklenmiş yüzey akımını tahmin eder. Gelen alan tarafından gövdenin direkt olarak aydınlatılan kısımlarında indüklenen akım gelen manyetik alan şiddeti ile orantılıdır. Hedefin gölgelenmiş kısımlarında ise akım sıfırdır. Böylece akımın yaklaşık değeri aşağıdaki gibidir.

$$J_s \approx \begin{cases} 2\hat{n} \times \vec{H}_i, & \text{aydınlık kısımlar için} \\ 0, & \text{gölge kısımlar için} \end{cases} \quad (2.12)$$

Burada $\vec{H}_i$ ile ifade edilen yüzeydeki gelen manyetik alan şiddeti, $\hat{n}$ ise yüzeye dik (normal) birim vektörüdür. Yukarıda elde edilen akım daha sonra hedeften uzaktaki saçılan alanı hesaplamak için ışıyım integrallerinde kullanılır [8]. FO metodu yüksek frekanslarda etkili olan ve en iyi sonucu elektriksel olarak büyük nesnelerde ($L \geq 10\lambda$) veren bir metottur. Gölge sınırlarında aniden akımı sıfıra çektiği için, geniş açılarda ve gölge kısımlarında hesaplanan alan değerleri hatalıdır. Ayrıca yüzey dalgaları, çoklu yansımalar ve kenar kırınımları hesaba katılmamaktadır. Fakat

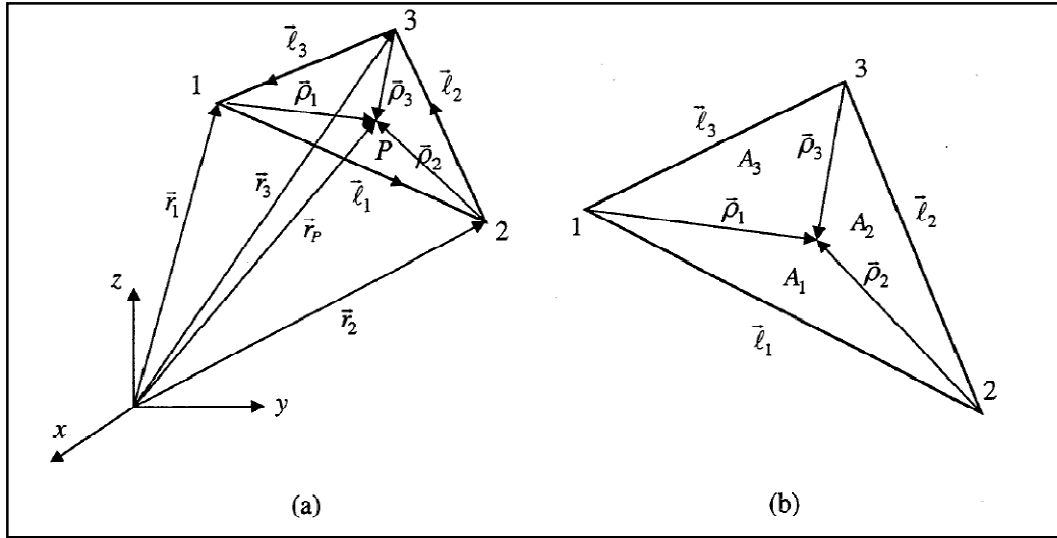
yaklaşımın sadeliği dolayısıyla hesaplama kaynağı ve çalışma süresi gereksinimleri azdır [23].

3. ÜÇGEN PARÇALARA FİZİKSEL OPTİĞİN UYGULANMASI

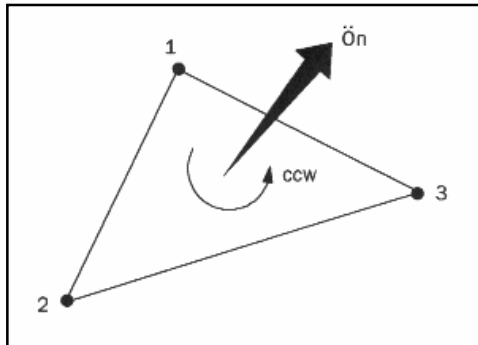
Bu ana başlık altında fiziksel optik yaklaşımın teorik kısmı ve kodda da kullanılan bazı matematiksel formüller hakkında bilgi verilmiştir. Küçük üçgen yüzeylerden rastgele yönlere saçılım ile başlayarak, küçük üçgen yüzeyler için saçılan alanın formülasyonunun nasıl elde edildiği anlatılmıştır. Bölünmüş parçalardaki yüzey akımlarının bulunması için fiziksel optik yaklaşımının kullanıldığı ve saçılan alanın hesaplanması için Taylor Serilerinden yararlanıldığı gösterilmiştir. Kısacası hesaplamada kullanılan tüm formül, materyal ve yaklaşımlar parça parça açıklanmıştır. Son kısımda da bölünmüş küçük parçalardan saçılan alanın elde edilmesi yöntemi ile bu küçük parçaların bir bütünü olan toplam gövdeden saçılan alan elde edilmiştir.

3.1. Bölünmüş Küçük Yüzeylerden Rastgele Yönlere Saçılım

Rastgele yönlü basit bir yüzeyin geometrik gösterimi Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Yüzeyin köşeleri kartezyen koordinat sisteminde $n = 1, 2, 3$ için x_n, y_n, z_n olarak gösterilir. Köşelerin sağ el kuralına göre (saatin tersi yönünde) sınıflandırıldığı varsayılırsa sağ elin başparmağı dışa doğru normal yönünü göstermektedir (Şekil 3.2). Başlangıç noktasını (orijini) çevreleyen bir kapalı gövde için dışa doğru olan normal genellikle başlangıç noktasından dışarıyı işaret eder. Noktaların pozisyon vektörleri $\vec{r}_n = x_n\hat{x} + y_n\hat{y} + z_n\hat{z}$ şeklinde ifade edilir.

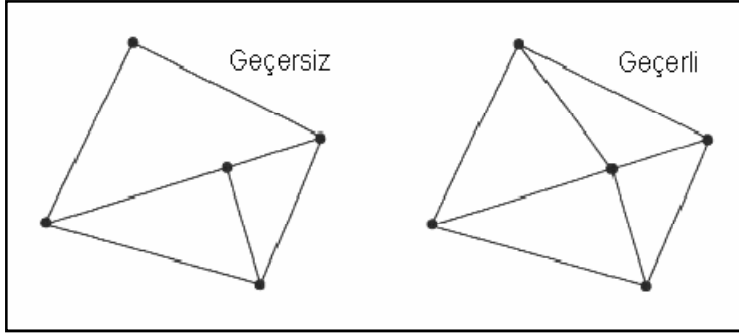


Şekil 3.1. (a) Rastgele yönlü üçgensel yüzey, (b) Doğal koordinatlar için yüzey alt alanları [13]



Şekil 3.2. Sağ el kuralına göre üçgenin ön yüzünün bulunması [20]

Köşe köşeye kuralına göre, bir üçgen yüzey parçası komşu üçgen yüzey parçası ile iki köşe paylaşmak zorundadır. Bir başka deyişle, bir yüzeyin köşesi başka bir yüzeyin kenarı üzerinde olamaz. Söz konusu durum Şekil 3.3'te açık olarak gösterilmektedir. RKA'sı hesaplanacak olan hedef model de bu kurallar çerçevesinde modellenir.



Şekil 3.3. “Komşu üçgen yüzeylerden birinin köşesi diğerlerinin kenarında yer alamaz” kuralına göre üçgen yüzeylerin oluşumu [13]

Nokta koordinatlarından kenar vektörleri aşağıdaki gibi elde edilir (Bkz. Şekil 3.1. (a)).

$$\vec{l}_1 = \vec{r}_2 - \vec{r}_1, \quad \vec{l}_2 = \vec{r}_3 - \vec{r}_2, \quad \vec{l}_3 = \vec{r}_1 - \vec{r}_3 \quad (3.1)$$

n kenar vektörünün ucu n noktasından başlamaktadır. Dışa doğru olan normali elde etmek için sağ el kuralına göre herhangi iki kenar vektörünün çapraz çarpımını almak gerekmektedir.

$$\hat{n} = \frac{\vec{l}_1 \times \vec{l}_3}{|\vec{l}_1||\vec{l}_3|} \equiv n_x \hat{x} + n_y \hat{y} + n_z \hat{z} \quad (3.2)$$

Köşelerin bu şekilde sıralanması ile yüzeyin dışa doğru olan (görünen) tarafı ön yüz, diğer tarafı ise arka yüz olarak ifade edilir (Bkz. Şekil 3.2). Bir düzlem dalgası (θ_i, ϕ_i) açısından gelerek başlangıç noktasına doğru yayılırsa bu dalganın yayılma vektörü aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} \hat{k}_i &= -\hat{r} = -(\hat{x} \sin \theta_i \cos \phi_i + \hat{y} \sin \theta_i \sin \phi_i + \hat{z} \cos \theta_i) \\ &= -(\hat{x}u_i + \hat{y}v_i + \hat{z}w_i) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Burada (u_i, v_i, w_i) ile gösterilenler sırasıyla x , y ve z yön kosinüsleri ve $\hat{r}$ ise başlangıç noktasından (θ_i, ϕ_i) 'deki kaynağa doğru olan merkez doğrultusunda birim

vektörüdür. Ön yüzün aydınlanıp aydınlanmadığının tespiti oldukça kolaydır ve şu şekildedir:

$$-\hat{k}_i \cdot \vec{n} \geq 0 \quad (3.4)$$

Yüzeyin toplam alanı, A , kenarlar arasındaki bir vektör ilişkisinden çıkartılabilir.

$$A = \frac{1}{2} |\vec{l}_1 \times \vec{l}_3| \quad (3.5)$$

Üçgenin yüzeyi üzerindeki integral hesabını basitleştirmek için normalize edilmiş (simpleks veya doğal koordinatlar olarak da bilinen) alan koordinatları kullanılır. Düzlem üzerinde (x_p, y_p, z_p) noktasında konumlu bir P integral alma noktasını göz önüne alırsak, bunun konum vektörü aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\vec{r}_p = x_p \hat{x} + y_p \hat{y} + z_p \hat{z} \quad (3.6)$$

$$\vec{\rho}_1 = \vec{r}_p - \vec{r}_1, \quad \vec{\rho}_2 = \vec{r}_p - \vec{r}_2, \quad \vec{\rho}_3 = \vec{r}_p - \vec{r}_3 \quad (3.7)$$

Toplam yüzey alanının alt alanları normalize edilmiş alan koordinatları kullanılarak bulunabilir.

$$\zeta = \frac{A_1}{A}, \quad \xi = \frac{A_2}{A}, \quad \eta = \frac{A_3}{A} \quad (3.8)$$

$A_1 + A_2 + A_3 = A$ olduğundan dolayı $\zeta + \xi + \eta = 1$ sonucu çıkartılabilir. O zaman $\zeta = 1 - \xi - \eta$ ve

$$\int \int_A ds_p = 2A \int_0^1 \int_0^{1-\eta} d\xi d\eta \quad (3.9)$$

eşitlikleri elde edilir.

3.2. Gelen ve Saçılan Alanlar

Genelde radardan hedefe gelen elektrik alan vektörü Eş. 3.10'daki gibi, manyetik alan vektörü ise Eş. 3.11'deki gibi ifade edilir.

$$\vec{E}_i = (E_{i\theta}\hat{\theta} + E_{i\phi}\hat{\phi})e^{-j\vec{k}_i \cdot \vec{r}} \quad (3.10)$$

$$\vec{H}_i = \frac{\vec{k}_i \times \vec{E}_i}{Z_o} = \frac{1}{Z_o}(E_{i\phi}\hat{\theta} - E_{i\theta}\hat{\phi})e^{-j\vec{k}_i \cdot \vec{r}} \quad (3.11)$$

Burada Z_o ortamın empedansıdır. Serbest uzayın empedansı η ile gösterilir ve değeri $\eta = 120\pi = 377\Omega$ 'dur. Denklemden $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ iken $\vec{k}_i = k\hat{k}_i$ eşitliği geçerlidir. Yüzey parçası üzerinde akan yüzey akımı için fiziksel optik yaklaşımı aşağıdaki gibidir.

$$\vec{J}_s = 2\hat{n} \times \vec{H}_i = \frac{2}{Z_o}\hat{n} \times (E_{i\phi}\hat{\theta} - E_{i\theta}\hat{\phi})e^{jkh} \quad (3.12)$$

Yukarıdaki denklemde kolaylık için şu şekilde bir h değişkeni tanımlanmıştır.

$$h = \vec{r}_p \cdot \hat{r}_i = x_p u_i + y_p v_i + z_p w_i \quad (3.13)$$

Yayılmı integrali kullanılarak saçılan elektrik alanı Eş.3.14'deki gibi bulabiliriz.

$$\vec{E}_s = \frac{jkZ_o}{4\pi r} e^{-jkr} \iint_A \vec{J}_s e^{jkg} ds_p \quad (3.14)$$

Burada g şu şekilde hesaplanır:

$$g = \vec{r}_p \cdot \hat{r} = x_p u + y_p v + z_p w \quad (3.15)$$

Alıcı ve vericinin aynı anten olduğu monostatik durum için

$$g = h \quad (3.16)$$

eşitliği geçerlidir. Eş. 3.15 ve Eş. 3.16 kullanılarak saçılan alan aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\vec{E}_s = \frac{jk}{2\pi r} e^{-jkr} \underbrace{\left[\hat{n} \times (E_{i\phi} \hat{\theta} - E_{i\theta} \hat{\phi}) \right]}_{\text{Polarizasyon Faktörü (PF)}} \underbrace{\iint_A e^{jk(h+g)} dS_p}_{\equiv I_c} \quad (3.17)$$

Yukarıdaki integral için kesin bir kapalı sonuç elde etmek mümkün değildir. Fakat gelen dalganın düzlemsel olduğu ve yüzey köşelerinde bilindiği farz edilirse, içteki integral hesaplama noktalarındaki genlik ve faz değerleri ekleme yapma (interpolasyon) yoluyla bulunabilir. Daha sonra Taylor Serileri kullanarak türevlenecek fonksiyon genişletilebilir ve her bir terimin yaklaşık bir sonuç vermek için integrali alınır. Genellikle az sayıda terim (beş civarı), integral için oldukça doğru bir yaklaşık tahmin değeri sağlar.

Moreira ve Prata'nın makalelerindeki gösterim biçimini kullanarak [24],

$$I_c = \iint_A C_c(\eta, \xi) e^{jD_c(\eta, \xi)} d\eta d\xi \quad (3.18)$$

eşitliği elde edilir. Denklemdaki $C_c(\eta, \xi)$ aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$C_c(\eta, \xi) = C_p\eta + C_q\xi + C_o \equiv |\vec{E}_i| \quad (3.19)$$

Birim genlikli düzlem dalgası için

$$|\vec{E}_i| = 1 \rightarrow C_p = C_q = 0, C_o = 1 \quad (3.20)$$

eşitlikleri geçerlidir. Benzer şekilde

$$D_c(\eta, \xi) = D_p\eta + D_q\xi + D_o \quad (3.21)$$

elde edilir. Yukarıdaki denklemde kullanılan D_p , D_q ve D_o değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$D_p = k[(x_1 - x_3)u + (y_1 - y_3)v + (z_1 - z_3)w] \quad (3.22)$$

$$D_q = k[(x_2 - x_3)u + (y_2 - y_3)v + (z_2 - z_3)w] \quad (3.23)$$

$$D_o = k[x_3u + y_3v + z_3w] \quad (3.24)$$

Böylece Eş. 3.18'deki integral aşağıdaki forma dönüşmüş olur.

$$I_c = 2Ae^{jD_o} \left\{ e^{jD_p} \left[\frac{C_o}{D_p(D_q - D_p)} \right] - e^{jD_q} \left[\frac{C_o}{D_q(D_q - D_p)} \right] - \frac{C_o}{D_q D_p} \right\} \quad (3.25)$$

Yukarıdaki denklem için değerinin sonsuz değere yaklaştığı durumda (payda sıfıra yaklaştığında) oluşan sayısal problemleri önlemek için aşağıdaki özel durumlar kullanılır.

Durum 1: $|D_p| < L_t$ ve $|D_q| \geq L_t$ için,

$$I_c = \frac{2Ae^{jD_o}}{jD_q} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(jD_p)^n}{n!} \left\{ \frac{-C_o}{n+1} + e^{jD_q} C_o G(n, -D_q) \right\} \quad (3.26)$$

Durum 2: $|D_p| < L_t$ ve $|D_q| < L_t$ için,

$$I_c = 2Ae^{jD_o} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{C_o(jD_p)^n (jD_q)^m}{(m+n+2)!} \quad (3.27)$$

Durum 3: $|D_p| \geq L_t$ ve $|D_q| < L_t$ için,

$$I_c = 2Ae^{jD_o} e^{jD_p} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(jD_q)^n}{n!} \left(\frac{C_o}{n+1} \right) G(n+1, -D_p) \quad (3.28)$$

Durum 4: $|D_p| \geq L_t$, $|D_q| < L_t$ ve $|D_q - D_p| < L_t$ için,

$$I_c = \frac{2Ae^{jD_o}}{jD_q} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(jD_p - jD_q)^n}{n!} \left\{ -C_o G(n, D_q) + \frac{e^{jD_q} C_o}{n+1} \right\} \quad (3.29)$$

denklemleri kullanılır. Yukarıdaki eşitliklerde kullanılan G fonksiyonu ise aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$G(n, \gamma) = \int_0^1 s^n e^{j\gamma s} ds \quad (3.30)$$

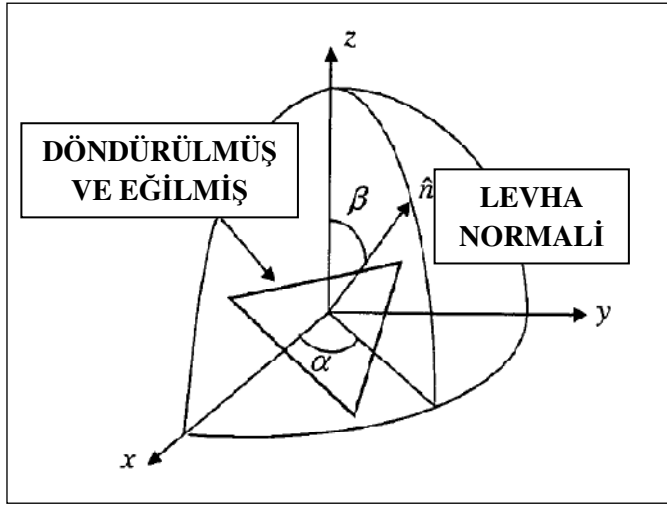
Eş. 3.31'deki gibi, n 'nin büyük değerleri için G 'yi hesaplarken G 'nin önceki değerlerine bağlı (rekursif) olduğu gözlemlenir.

$$G(n, \gamma) = \frac{e^{j\gamma} - nG(n-1, \gamma)}{j\gamma}, n \geq 1 \quad (3.31)$$

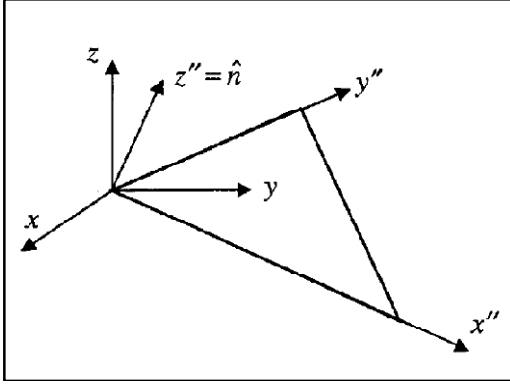
$$G(0, \gamma) = \frac{e^{j\gamma} - 1}{j\gamma} \quad (3.32)$$

3.3. Koordinat Dönüşümleri

Genellikle bölgesel yüzey koordinat sistemi global koordinat sistemiyle aynı doğrultuda olmaz. Bu nedenle bölgesel ve global koordinat değişkenleri ve birim vektörler arasında bir ilişki kurmak için bir dizi dönüşümler gerçekleştirmek gereklidir. Şekil 3.4'te rastgele yönü olan bir yüzey gösterilmektedir. Buradaki global koordinatlar (x, y, z) , bölgesel koordinatlar ise (x'', y'', z'') olarak ifade edilir. Şekil 3.5'te ise z'' ekseninin yüzey normali ile aynı hizada, yönde olduğu belirtilmiştir. Aynı zamanda şekilde kenarları x'' ve y'' eksenleri ile hizalanmış olan bir dik üçgen yüzey görülmektedir. Buradan koordinat dönüşümünün sadece belirtilen dik üçgen yüzeyde olabileceği sonucu çıkartılmamalıdır, dönüşüm $x'' y''$ düzlemindeki herhangi bir yüzey için uygulanabilir.

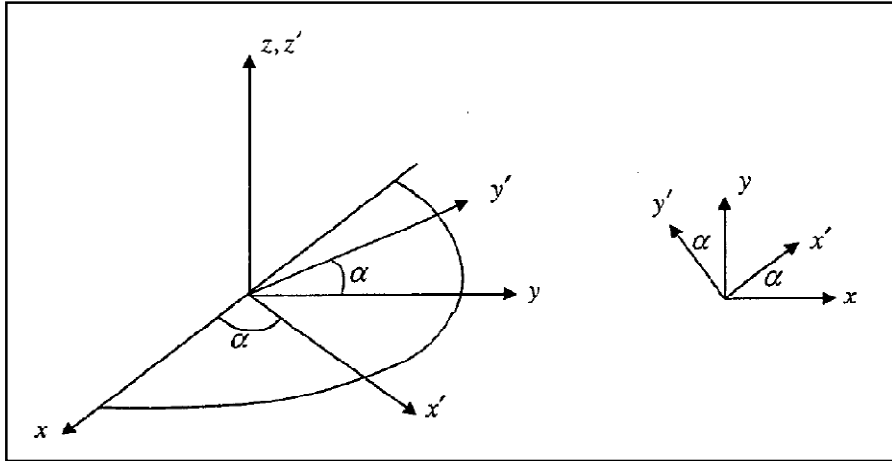


Şekil 3.4. Rastgele yönlü bir yüzeyin koordinat sisteminde gösterimi [13]

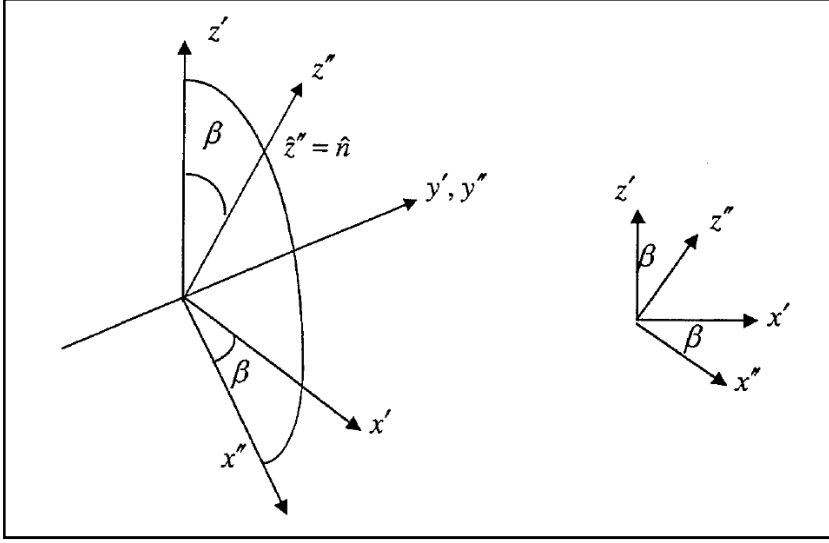


Şekil 3.5. Global ve bölgesel koordinat sistemleri [22]

İki üstlü değişkenler global koordinat değişkenlerinden iki kez açısal dönüş yapılarak elde edilir. İlk dönme işlemi Şekil 3.6'da gösterildiği gibi z eksenine sabit kalacak şekilde, x y eksenlerinin α açısı kadar döndürülmesi sonucu belirlenir. Sonuçta elde edilen koordinatlar (x', y', z') olarak ifade edilir. Dönme açısı α MATLAB'da $\alpha = \text{atan2}(n_y, n_x)$ şeklinde hesaplanır. İkinci dönme işlemi ise y' eksenine sabit kalacak şekilde, x z eksenlerinin β ($\beta = \cos^{-1}(\hat{z} \cdot \hat{n})$) açısı kadar döndürülmesi ile tamamlanır (Şekil 3.7).



Şekil 3.6. z eksenine boyunca α açısı kadar olan birinci dönme işlemi [22]



Şekil 3.7. y' eksenini boyunca β açısı kadar olan ikinci dönme işlemi [22]

Dönüşüm matrisleri geometri kullanılarak şu şekilde tanımlanır.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\overline{\overline{T'}}} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

$$\begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}}_{\overline{\overline{T''}}} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Birbirine paralel olan çift üst çizgiler matrisi ifade etmektedir. O halde yukarıdaki eşitliklerden

$$\begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} = \overline{\overline{T''}} \overline{\overline{T'}} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

sonucu çıkartılabilir. Aynı dönüşüm matrisi birim vektörler ve yön kosinüsleri için de kullanılır.

$$\begin{bmatrix} \hat{x}'' \\ \hat{y}'' \\ \hat{z}'' \end{bmatrix} = \overline{\overline{T''T'}} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

$$\begin{bmatrix} u'' \\ v'' \\ w'' \end{bmatrix} = \overline{\overline{T''T'}} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Yön kosinüslerinin eşitliksel ifadesi

$$\begin{aligned} u &= \sin \theta \cos \phi \\ v &= \sin \theta \sin \phi \\ w &= \cos \theta \end{aligned} \quad (3.38)$$

ve

$$\begin{aligned} u'' &= \sin \theta'' \cos \phi'' \\ v'' &= \sin \theta'' \sin \phi'' \\ w'' &= \cos \theta'' \end{aligned} \quad (3.39)$$

olarak ifade edilir. Bu nicelikler geliş açıları (i alt indisli) için de geçerlidir, gözlem açıları (p alt indisli) için de geçerlidir. Monostatik durum için geliş açısı veya gözlem açısı fark etmez çünkü her ikisi de aynıdır. Bu nedenle de alt indis belirtmeye gerek yoktur.

3.4. Fiziksel Optik Akımı

Fiziksel optik metoduna göre, gövdenin gelen alan tarafından direkt olarak aydınlatılan kısımlarında, indüklenen akım gelen manyetik alan şiddetiyle orantılıdır. Hedefin gölge kısımlarında ise akım sıfır olarak ayarlanır [13]. Eşitlik olarak

$$\vec{J}_s = \begin{cases} 2\hat{n} \times \vec{H}_i, & \text{aydınlık yüzeyler için} \\ 0, & \text{gölge yüzeyler için} \end{cases} \quad (3.40)$$

şeklinde gösterilebilir. Burada H_i yüzeydeki gelen manyetik alan şiddetidir [13].

Genelde gelen elektrik alan Eş. 3.41’de gösterildiği gibi ifade edilir.

$$\vec{E}_i = (E_{i\theta}\hat{\theta} + E_{i\phi}\hat{\phi})e^{-j\vec{k}_i \cdot \vec{r}} \quad (3.41)$$

Burada $k = 2\pi/\lambda$ ve $\vec{k}_i = k\hat{k}_i = -k\hat{r}_i$ ’dir [13]. Yüzey üzerinde bir (x_p, y_p, z_p) noktası için $\hat{r}_p = \hat{r}$ olacağından Eş. 3.41

$$\vec{E}_i = (E_{i\theta}\hat{\theta} + E_{i\phi}\hat{\phi})e^{jk\vec{r}_i \cdot \vec{r}_p} \quad (3.42)$$

şeklinde yazılabilir [13]. O halde manyetik alan şiddeti de

$$\vec{H}_i = \frac{\vec{k}_i \times \vec{E}_i}{Z_o} = \frac{1}{Z_o}(E_{i\phi}\hat{\theta} - E_{i\theta}\hat{\phi})e^{jk\vec{r}_i \cdot \vec{r}_p} \quad (3.43)$$

olarak yazılabilir [13]. Parça yüzey üzerinde akan yüzey akımı için fiziksel optik yaklaşımı

$$\vec{J}_s = 2\hat{n} \times \vec{H}_i = \frac{2}{Z_o}(E_{i\phi}\hat{\theta} - E_{i\theta}\hat{\phi})e^{jkh} \quad (3.44)$$

şeklinde ifade edilir. Eş. 3.44’de kullanılan h değişkeni aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$h = \vec{r}_p \cdot \hat{r}_i = x_p u_i + y_p v_i + z_p w_i \quad (3.45)$$

Eş. 3.44’deki $\vec{J}_s$ değeri x , y ve z bileşenlerinin toplamı şeklinde yazılabilir [13].

$$\vec{J}_s = (J_x \hat{x} + J_y \hat{y} + J_z \hat{z}) e^{jkh} \quad (3.46)$$

Fakat yüzey bölgesel koordinat sisteminde yüzey, $x'' y''$ düzleminde konumlandığı için yüzey akımının $\widehat{z''}$ bileşeni yoktur. O halde denklem

$$\vec{J}_s = (J_{x''} \widehat{x''} + J_{y''} \widehat{y''}) e^{jkh} \quad (3.47)$$

şeklinde yazılabilir. Yüzey akımının bileşenleri bölgesel kartezyen koordinat değişkenleri cinsinden şunlardır [25]:

$$J_{x''} = \left[\frac{E_{i\theta''} \cos \theta'' \cos \phi''}{2R_s + Z_o \cos \theta''} - \frac{E_{i\phi''} \cos \theta'' \sin \phi''}{2R_s \cos \theta'' + Z_o} \right] \quad (3.48)$$

$$J_{y''} = \left[\frac{E_{i\theta''} \cos \theta'' \sin \phi''}{2R_s + Z_o \cos \theta''} + \frac{E_{i\phi''} \cos \theta'' \cos \phi''}{2R_s \cos \theta'' + Z_o} \right] \quad (3.49)$$

Bu denklemlerdeki R_s ile gösterilen yüzey direncidir. $R_s = 0$ ($|\Gamma| = 1$) iken yüzey mükemmel elektrik iletkenidir. R_s sonsuza giderken yüzey transparan hale gelmeye başlar ($R_s \rightarrow \infty, |\Gamma| \rightarrow 0$).

Birçok değişken $\Gamma_{\parallel}$ (paralel) ve $\Gamma_{\perp}$ 'nin (dik) içeriği olarak kullanılabilir örneğin sırasıyla, enine manyetik (TM) ve enine elektrik (TE) yansıma bileşenleri gibi ve bunlar Eş. 3.50 ve Eş 3.51'de gösterildiği gibi tanımlanırlar.

$$\Gamma_{\parallel} = \Gamma_{TM} = -\frac{Z_o \cos \theta''}{2R_s + Z_o \cos \theta''} \quad (3.50)$$

$$\Gamma_{\perp} = \Gamma_{TE} = -\frac{Z_o}{2R_s \cos \theta'' + Z_o} \quad (3.51)$$

Böylece yüzey akımının bileşenlerini şu şekilde de yazabiliriz [25].

$$J_{x''} = \left[-\frac{E_{i\theta''} \cos \phi''}{Z_o} \Gamma_{\parallel} + \frac{E_{i\phi''} \sin \phi''}{Z_o} \Gamma_{\perp} \right] \cos \theta'' \quad (3.52)$$

$$J_{y''} = \left[-\frac{E_{i\theta''} \sin \phi''}{Z_o} \Gamma_{\parallel} - \frac{E_{i\phi''} \cos \phi''}{Z_o} \Gamma_{\perp} \right] \cos \theta'' \quad (3.53)$$

Burada $E_{i\theta''}$, $E_{i\phi''}$ bölgesel yüzey koordinatlarında gelen alanın bileşenleridir ve θ'' ile ϕ'' ise bölgesel koordinatların küresel kutup açılarıdır.

Küresel kutup açıları yön kosinüslerinden hesaplanabilir.

$$\sin \theta'' = \sqrt{(u'')^2 + (v'')^2}$$

$$\cos \theta'' = \sqrt{1 - (u'')^2 - (v'')^2} \quad (3.54)$$

$$\tan \phi'' = \tan^{-1} \left(\frac{v''}{u''} \right)$$

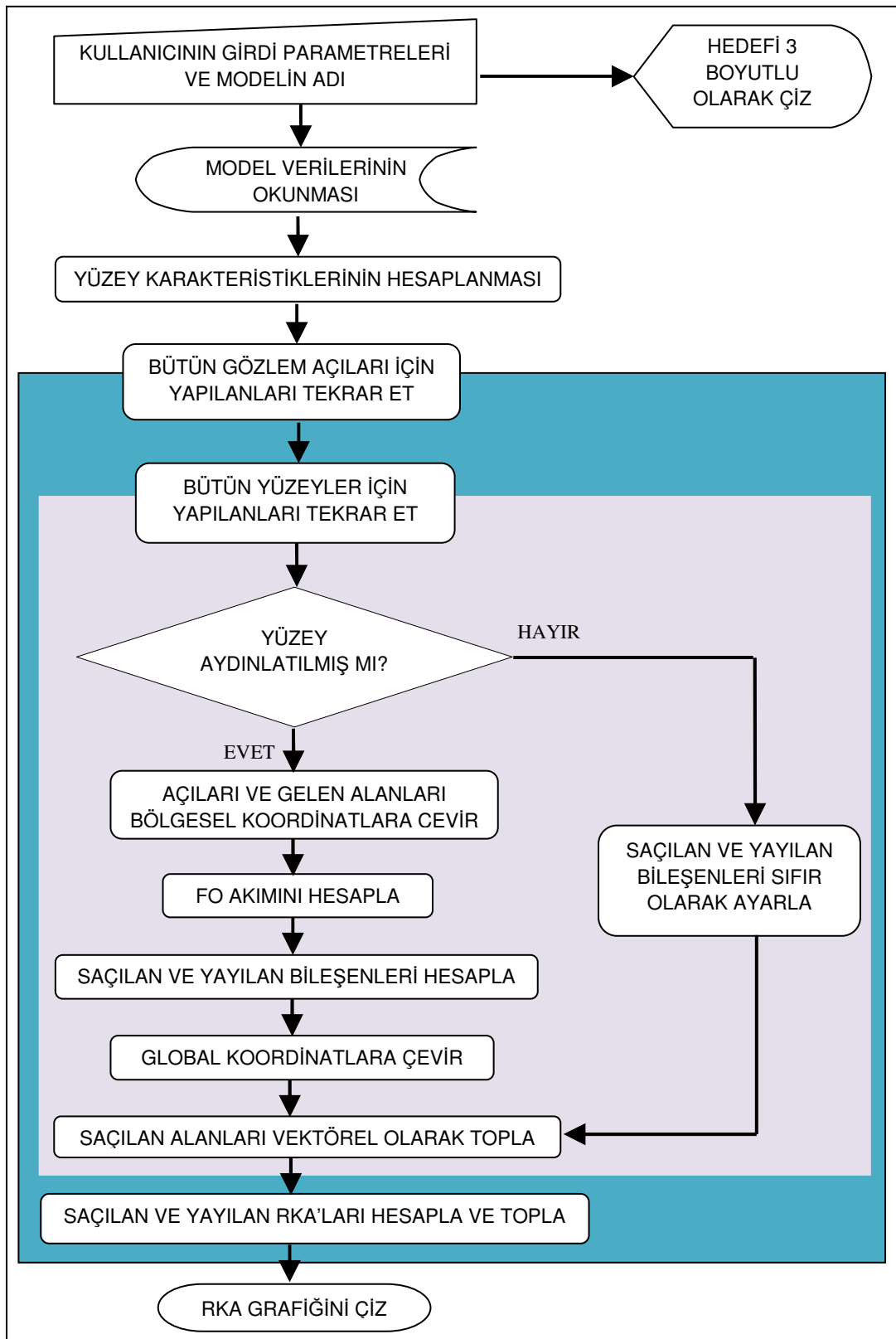
3.5. Tüm Yüzeylerden Elde Edilen Toplam Saçılan Alan

Rastgele bir hedef üçgen yüzeylerin toplamıyla tahmin edilebilir. Eş. 3.17 tüm yüzeyler için hesaplanmalıdır ve polarizasyon faktörleri ile koordinat sistemleri her bir yüzey için farklılık gösterebilir. Fakat tüm yüzeyler üzerinden alınan integral Eş. 3.18'deki şekilde olacaktır. Yüzey dizilerinin oluşturduğu saçılan alanı elde etmek için aşağıdaki prosedürler sırasıyla takip edilmelidir.

1. Gelen alan global koordinatlarda geliş açısı (θ_i, ϕ_i) ve polarizasyonu $(E_{i\theta}, E_{i\phi})$ ile belirlenir.

2. Her bir yüzey için ($c = 1, 2, \dots, N_c$) gelen alan global koordinatlardan bölgesel yüzey koordinat sistemine dönüştürülür. Ayrıca geliş açısı da bölgesel yüzey koordinat sisteminde tanımlanır.
3. Gelen manyetik alan kullanılarak fiziksel optik akımı hesaplanır ve yayılım integrali saçılan alan bileşenlerini $(E_{s\theta}, E_{s\phi})$ elde etmek üzere bölünmüş parça yüzeyi üzerinden ölçülür.
4. Saçılan alan bileşenleri, her bir yüzey için $(E_{s\theta}, E_{s\phi})$ değerleri elde edilerek, tekrar global alan koordinat sistemine dönüştürülür.
5. Bütün N_c tane dönüştürülmüş saçılan alan bileşenleri gözlem yönünde toplam saçılan alanı elde etmek üzere vektörel olarak üst üste toplanır.
6. RKA Eş. 2.5'deki gibi toplam saçılan alan kullanılarak hesaplanır.

Şekil 3.8'de monostatik RKA hesaplama yöntemi için bir akış şeması gösterilmektedir.



Şekil 3.8. RKA hesaplamasının akış diyagramı

Bu bölümde tezin programlama kısmında kullandığımız temel teoriler açıklanmıştır. Yayılım (radyasyon) integralleri kullanılarak üçgen yüzeylerden saçılan alanın hesaplanma şekli gösterilmiş ve her bir yüzey parçası üzerindeki yüzey akımları fiziksel optik metodu kullanılarak nasıl belirlendiği anlatılmıştır. Verilen geliş ve gözlem açıları için elde edilen toplam RKA değerinin hedefin bütün yüzey parçalarından saçılan alanların vektörel olarak toplanmasıyla hesaplandığı belirtilmiştir.

4. BAZI BASİT VE KARMAŞIK CİSİMLERİN MATLAB UYGULAMASI

4.1. Hedef Modelin Tasarımı

Bu bölümde MATLAB programında yeni bir modelin nasıl yaratıldığı ve tanımladığı anlatılmıştır. Tam bir model tanımlaması iki adımdan oluşmaktadır. Tasarım işleminin birinci adımında hedefin gövdesinin köşelerini oluşturan noktaların koordinatlarının tanımı yapılır. Belirtilen noktaların (x, y, z) koordinatlarındaki bileşenleri sırasıyla yan yana yazılarak “*koordinat.m*” isimli dosyada kaydedilir. İkinci adımında ise hedefin gövdesinin ayrıştırılmasıyla oluşan üçgen yüzey parçalarının özellikleri tanımlanır. Bu kısımda tanımlama yaparken bu üçgen parçalarının köşelerini oluşturacak olan noktaların hangileri olduğu ile aydınlanma ve direnç karakteristikleri belirlenerek “*yüzeyler.m*” isimli bir başka dosyaya kaydedilir.

İlk başta tasarımın temelini daha rahat anlamak için (x, y) düzleminde konumlu, 5 metre eninde ve 5 metre boyunda iletken basit bir levhayı ele alalım. Bunun için MATLAB’da bir “*koordinat.m*” dosyası açılır ve içine Çizelge 4.1’deki gibi levhanın köşelerini oluşturan noktaların (x, y, z) koordinat sistemindeki değerleri yazılır ve kaydedilir. Kısacası her bir satır bir noktayı, her bir sütun ise üç farklı koordinatı ifade etmektedir.

Çizelge 4.1. Levha için koordinat verileri [26]

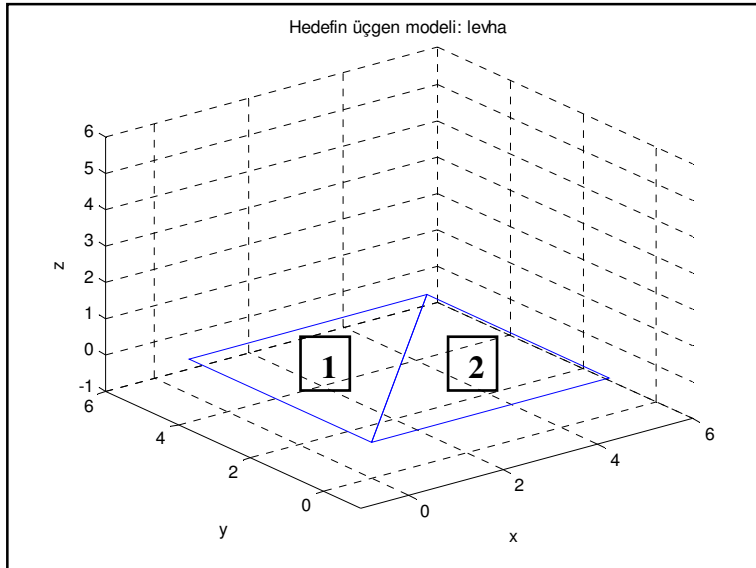
KÖŞE NO	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	5	5	0
2	0	5	0
3	0	0	0
4	5	0	0

Daha sonra “*yüzeyler.m*” isimli ikinci bir dosya açılır ve buna da RKA hesaplama yöntemi olan fiziksel optik metodunda kullanılan üçgen yüzey parçaları oluşturacak yüzeyler tanımlanır. Tanımlama Çizelge 4.2’de gösterildiği gibidir. İlk sütun üçgen

yüzeyin numarasını gösterir, ikincisi, üçüncüsü ve dördüncüsü ise üçgenin köşelerini oluşturan üç noktayı gösterir. Örneğin burada birinci yüzeyi “1”, “2” ve “3” numaralı noktalar oluşturur. Bu noktalar Çizelge 4.1’de ifade edilen noktalardır. Beşinci sütun aydınlanma parametresini gösterir. Bu parametre yüzeyin her iki tarafının da gelen dalga tarafından aydınlatılıp aydınlatılmadığını gösterir. Eğer aydınlanma değeri sıfıra eşitse levhanın her iki tarafı da aydınlatılmıştır, bire eşitse sadece yüzeyin dış yüzü aydınlatılmıştır. Altıncı sütun ise normalize edilmiş iç direnci ifade eder. Bu parametre model yüzeyinin direnç karakteristiğini tanımlamak için kullanılır. Koordinat ve yüzeyleri ifade eden bu iki “.m” uzantılı dosyayı kullanarak hedef modeli MATLAB’da çizdirilirse Şekil 4.1’deki gibi bir sonuç elde edilir.

Çizelge 4.2. Levha için parça yüzeylerin tanımı [26]

YÜZEY NO	1. NOKTA	2. NOKTA	3. NOKTA	AYDINLANMA	NORMALİZE EDİLMİŞ DİRENÇ
1	1	2	3	0	0
2	3	4	1	0	0



Şekil 4.1. Hedef nesnesi olarak seçilen levhanın üçgen yüzeylere bölünmüş halinin üç boyutlu çizimi

Bu sefer üç boyutlu, iyi iletken, bir metre eninde, boyunda ve yüksekliğinde bir kutu tanımlayalım. Yukarıdaki gibi ilk önce kutuyu oluşturan sekiz köşenin noktasal olarak koordinatları “*koordinat.m*” dosyasına Çizelge 4.3’deki gibi kaydedilir. Daha sonra Çizelge 4.4’deki şekilde oluşturulan “*yüzeyler.m*” dosyasında her bir üçgen yüzeyi oluşturan üç nokta ve özellikleri tanımlanır.

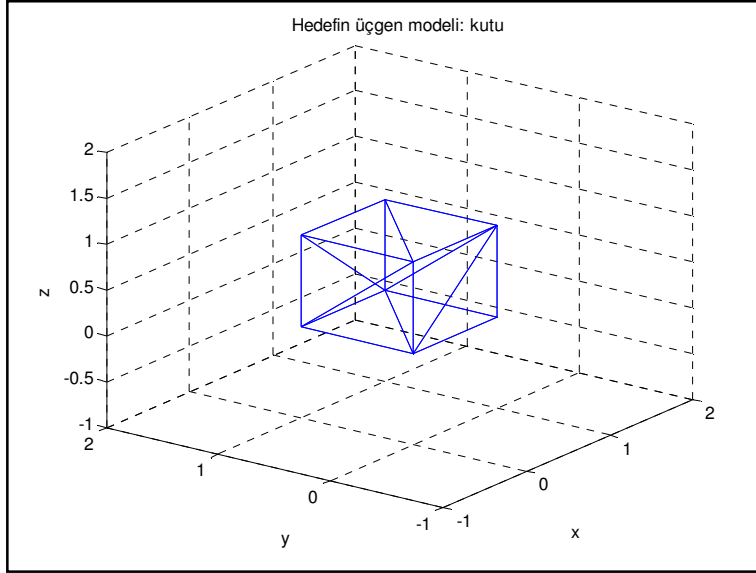
Çizelge 4.3. Kutu için koordinat verileri [26]

KÖŞE NO	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	0	0	0
2	1	0	0
3	1	1	0
4	0	1	0
5	0	0	1
6	1	0	1
7	1	1	1
8	0	1	1

Çizelge 4.4. Kutu için parça yüzeylerin tanımı [26]

YÜZEY NO	1. NOKTA	2. NOKTA	3. NOKTA	AYDINLANMA	NORMALİZE EDİLMİŞ DİRENÇ
1	1	3	2	1	0
2	1	4	3	1	0
3	1	2	6	1	0
4	1	6	5	1	0
5	1	5	4	1	0
6	4	5	8	1	0
7	2	3	6	1	0
8	3	7	6	1	0
9	3	4	8	1	0
10	3	8	7	1	0
11	5	6	7	1	0
12	5	7	8	1	0

Bu “.m” uzantılı dosyalar kullanılarak hedefin üç boyutlu çizimi yapılır ve Şekil 4.2’deki sonuç elde edilir. Görüldüğü gibi kutunun her bir kenarının uzunluğu tanımlandığı gibi bir metredir.



Şekil 4.2. Hedef nesnesi olarak seçilen kutunun üçgen yüzeylere bölünmüş halinin üç boyutlu çizimi

Son olarak Resim 4.1’deki füze gibi biraz daha karmaşık üç boyutlu bir kısa menzilli savaş uçağı füzesi tanımlayalım. Bunun için Çizelge 4.5’deki gibi füzeyi oluşturan otuz yedi noktanın (x, y, z) koordinat değerleri “koordinat.m” dosyasına kaydedilir. RKA hesabı için hedefin bölündüğü yirmi altı üçgen yüzeyin özellikleri de Çizelge 4.6’daki gibi “yüzeyler.m” dosyasında kaydedilir.



Resim 4.1. Savaş uçağına takılı olan bir füze [27]

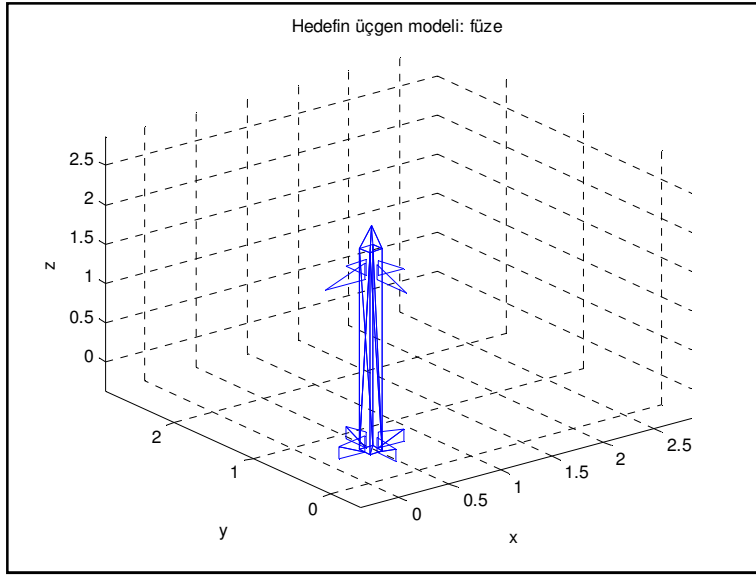
Çizelge 4.5. Füze için koordinat verileri [26]

KÖŞE NO	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	0	0	0
2	0,130	0	0
3	0,130	0,130	0
4	0	0,130	0
5	0	0	2,570
6	0,130	0	2,570
7	0,130	0,130	2,570
8	0	0,130	2,570
9	0,065	0,065	2,870
10	0,130	0,065	0
11	0,130	0,065	0,200
12	0,380	0,065	0,150
13	0,380	0,065	0
14	0,065	0,130	0
15	0,065	0,130	0,200
16	0,065	0,385	0,150
17	0,065	0,385	0
18	0	0,065	0
19	0	0,065	0,200
20	-0,250	0,065	0,150
21	-0,250	0,065	0
22	0,065	0	0
23	0,065	0	0,200
24	0,065	-0,250	0,150
25	0,065	-0,250	0
26	0,130	0,065	2,200
27	0,130	0,065	2,400
28	0,380	0,065	2,200
29	0,065	0,130	2,200
30	0,065	0,130	2,400
31	0,065	0,380	2,200
32	0	0,065	2,200
33	0	0,065	2,400
34	-0,380	0,065	2,200
35	0,065	0	2,200
36	0,065	0	2,400
37	0,065	-0,380	2,200

Çizelge 4.6. Füze için parça yüzeylerin tanımı [26]

YÜZEY NO	1. NOKTA	2. NOKTA	3. NOKTA	AYDINLANMA	NORMALİZE EDİLMİŞ DİRENÇ
1	3	2	1	1	1
2	1	4	3	1	1
3	3	7	6	1	1
4	6	2	3	1	1
5	4	8	7	1	1
6	7	3	4	1	1
7	4	1	5	1	1
8	5	8	4	1	1
9	2	6	5	1	1
10	5	1	2	1	1
11	2	9	6	1	1
12	8	9	7	1	1
13	5	9	8	1	1
14	5	6	9	1	1
15	10	11	12	0	1
16	12	13	10	0	1
17	16	15	14	0	1
18	14	17	16	0	1
19	20	19	18	0	1
20	18	21	20	0	1
21	22	23	24	0	1
22	24	25	22	0	1
23	26	27	28	0	1
24	29	31	30	0	1
25	32	34	33	0	1
26	35	36	37	0	1

En son her zamanki gibi elde edilen “.m” uzantılı dosyalar kullanılarak hedefin üç boyutlu şekli Şekil 4.3’de görüldüğü gibi elde edilir.



Şekil 4.3. Hedef nesnesi olarak seçilen kutunun üçgen yüzeylere bölünmüş halinin MATLAB’da üç boyutlu çizimi

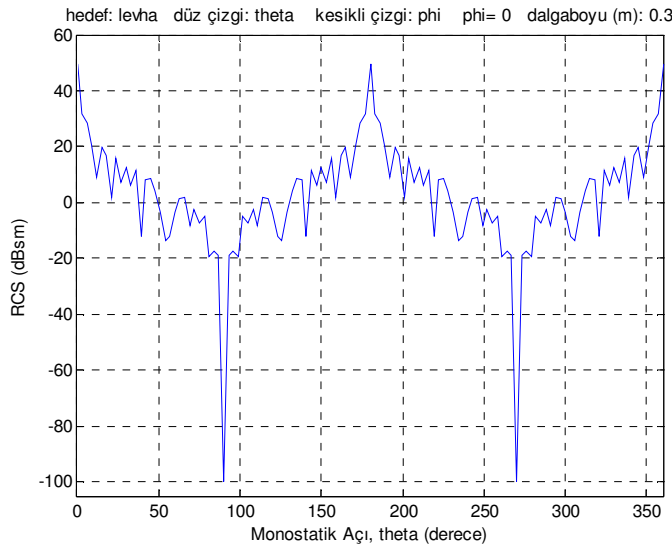
4.2. Hedefin Monostatik RKA Hesaplaması

Bu kısımda, tanımlanan üç boyutlu basit ve kompleks şekilli hedef modellerin monostatik durum için RKA’ları hesaplanmıştır. İlerleyen alt bölümlerde cisimlerin yüzey iç dirençleri olduğu varsayılarak RKA değerleri tekrar hesaplanıp yüzey iç dirençsiz RKA değerleri ile karşılaştırılmıştır. En son bölümde ise farklı frekans değerlerinin RKA’ya etkisi tartışılıp, ayrı frekans değerlerine ait RKA grafikleri incelenmiştir.

Bilgisayarda yapılan benzetimlerde bütün hedeflerin RKA’larını hesaplarken gelen dalga θ -polarizeli (TM-z) olarak seçilmiştir. Bu nedenle grafiklerdeki RKA-theta, $\sigma_{\theta\theta}$ olarak belirtilmiştir. Bu da θ polarizeli gelen dalga ve θ polarizeli alıcı anlamına gelmektedir. $\sigma_{\theta\theta}$ RKA’nın aynı polarizeli bileşendir. RKA-phi ise $\sigma_{\phi\theta}$ olarak belirtilir. Bu ise θ polarizeli gelen dalga ve ϕ polarizeli alıcı anlamına gelir. $\sigma_{\phi\theta}$ RKA’nın ters polarizeli birleşenidir [13]. Ayrıca bilgisayar ortamında hedef nesnelerin modellenmesi sırasında kullanılan koordinat verileri ve parça yüzeylerinin tanımları için David C. Jenn’in verilerinden yararlanılmıştır [26].

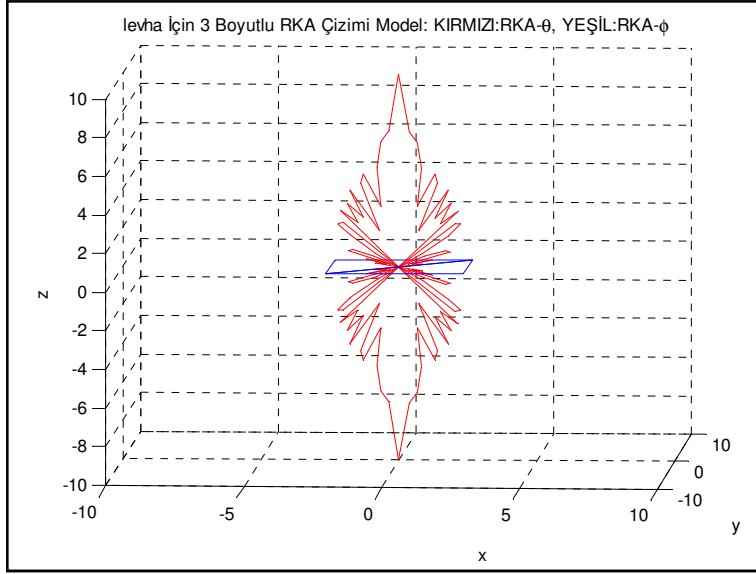
4.2.1. Levha hedef modeli

Simülasyon ortamında yapacağımız hesaplamada ilk hedef modeli olarak çok iyi elektrik iletken malzemeden yapılmış, kenarlarının uzunluğu beşer metre olan, pürüzsüz yüzeyli bir levhayı ele alalım. Modellenen levha sabit bir z değerinde ve x y düzleminde konumlanmıştır (Bkz. Şekil 4.1). RKA'sı hesaplanan bu levhanın yüzey iç direnci sıfırdır ve nesnenin her iki yüzü de aydınlandığı için üçgen yüzeylerin aydınlanma değeri sıfır olarak ayarlanmıştır. Gelen dalga θ -polarizeli (TM-z) olarak seçilmiştir ve kullanılan frekans değeri 1 GHz'dir. θ açısı 0'dan 360 dereceye 3'er derece artmaktadır ve her bir θ açısı için RKA hesabı yapılmaktadır. Levha hedef modeli için elde edilen RKA grafiği Şekil 4.4'de gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi RKA değeri 0, 180 ve 360 derecelerde maksimum değerde iken 90 ve 270 derecede minimum değerdedir. Bunun nedeni hedefe gelen dalgaların bu açılarda hedefe dik gelerek, geldikleri yönde neredeyse aynı değerde geri yansımasıdır. 90 ve 270 derecede de RKA değeri minimumdur çünkü levha x y düzleminde konumlandığı için gelen dalgaların pek azı tekrar alıcıya yansımaktadır.



Şekil 4.4. Pürüzsüz yüzü levha modeli için RKA'nın açıya (θ) bağlı değişimi

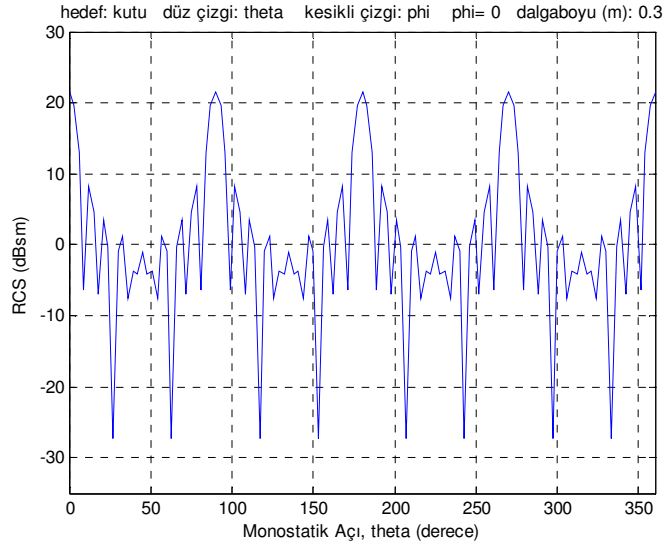
Şekil 4.5'te de RKA'nın üç boyutlu hedef model üzerindeki dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.5. RKA'nın 3 boyutlu hedef model üzerinde gösterimi

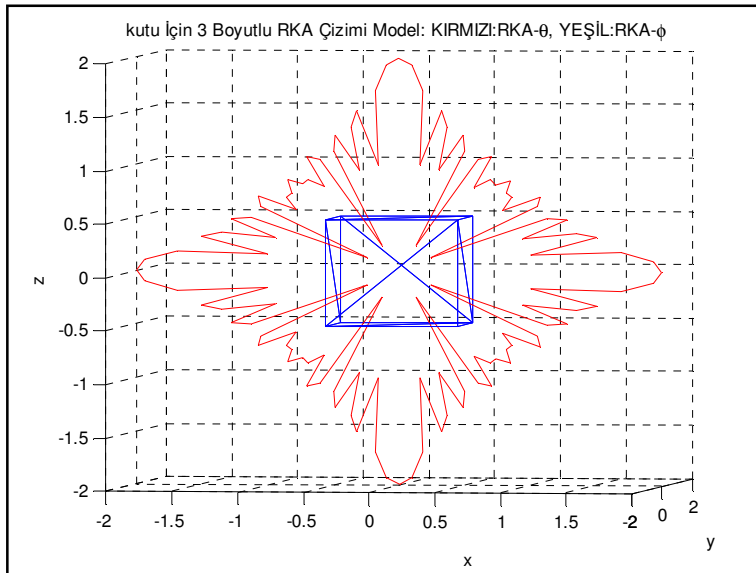
4.2.2. Kutu hedef modeli

Bir başka örnek olarak gene çok iyi elektrik iletken malzemeden yapılmış, kenarlarının uzunluğu birer metre olan, pürüzsüz yüzeyli, kapalı bir kutu modeli ele alınmış ve bu model için monostatik RKA değeri hesaplanmıştır. Bu hedef modeli kapalı formda bir nesne olduğu için sadece dış yüzü aydınlatılacaktır ve bütün üçgen yüzey parçalarının aydınlanma değeri bir olacaktır. Yapılan hesaplamalarda kullanılan frekans değeri 1 GHz olarak seçilmiştir. Buna ek olarak gelen dalga θ -polarizeli (TM-z) olarak ayarlanmıştır, böylece $\phi = 0$ düzleminde, 0'dan 360 dereceye 3'er derecelik artışlarla artan her θ açısı için RKA hesabı yapılmaktadır. Kutu hedef modeli için elde edilen RKA grafiği Şekil 4.6'da gösterilmektedir.



Şekil 4.6. Pürüzsüz yüzlü kutu modeli için RKA'nın açığa (θ) bağlı değişimi

Hesaplanan RKA değerini hedef model üzerinde Şekil 4.7'deki gibi gözlemleyebiliriz. Buradan şu sonuç çıkartılabilir ki θ açısının değişmesine bağlı olarak, kutunun levhamsı düz yüzeylerinde RKA değeri maksimum değerde iken kutunun kenar ve köşelerinde RKA değeri azalmaktadır.

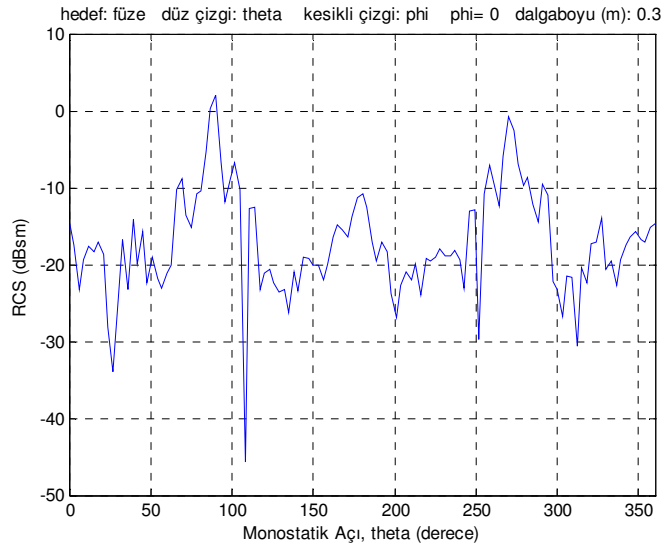


Şekil 4.7. RKA'nın üç boyutlu hedef model üzerinde gösterimi

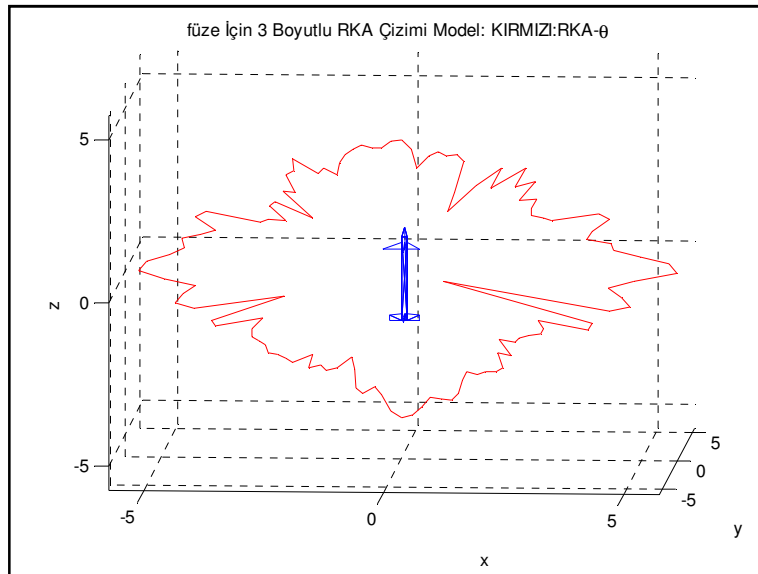
Yapılan işlemler içinde farklı değerler alabilen iki hesaplama parametresi vardır. Bunlar Taylor Serisi bölgesi ve terim sayılarıdır. Bu parametrelerin hesaplama zamanına ve sonucun kesinliğine etkisini daha detaylı olarak kavramak için Moreira, Fernando J. S. ve Prata, Aluizio Jr.'ın makalesi incelenebilir [24]. Taylor Serisi bölgesi ve terim sayılarının farklı değerler almasının sonuca etkisi hakkında bir şeyler söylemek gerekirse, farklı terim sayılarıyla yapılan simülasyonlarda terim sayısını arttırdığımızda RKA hesaplaması için geçen sürenin uzadığı gözlemlenmiştir. Genel olarak kodda kullanılan değerler hem iyi ve kesin sonuçlar vermektedir hem de hızlı bir çalışma zamanı sunmaktadır.

4.2.3. Füze hedef modeli

Simülasyon ortamında yapılan gözlemlerin bu başlığında pürüzsüz yüzeyli ve çok iyi iletken olan bir füzenin RKA'sı hesaplanmıştır. Modellenen füzenin uzunluğu yaklaşık üç metredir (Bkz. Şekil 4.3). RKA'sı hesaplanan bu füzenin yüzey iç direnci sıfır olarak ayarlanır ve hedefin sadece dış yüzü gelen dalga ile aydınlatıldığı için üçgen yüzeylerin aydınlanma değeri bir olarak ayarlanmıştır. Gelen dalga θ - polarizeli (TM-z) olarak seçilmiştir ve kullanılan frekans değeri 1 GHz'dir. θ açısı 0'dan 360 dereceye 3'er derece artmaktadır ve her bir θ açısı için RKA hesabı yapılmaktadır. Füze hedef modeli için elde edilen RKA grafiği Şekil 4.8'de gösterilmektedir. Aynı zamanda RKA'nın üç boyutlu hedef üzerinde gösterimi de Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.8. Pürüzsüz yüzlü füze modeli için RKA'nın açığa (θ) bağlı değişimi

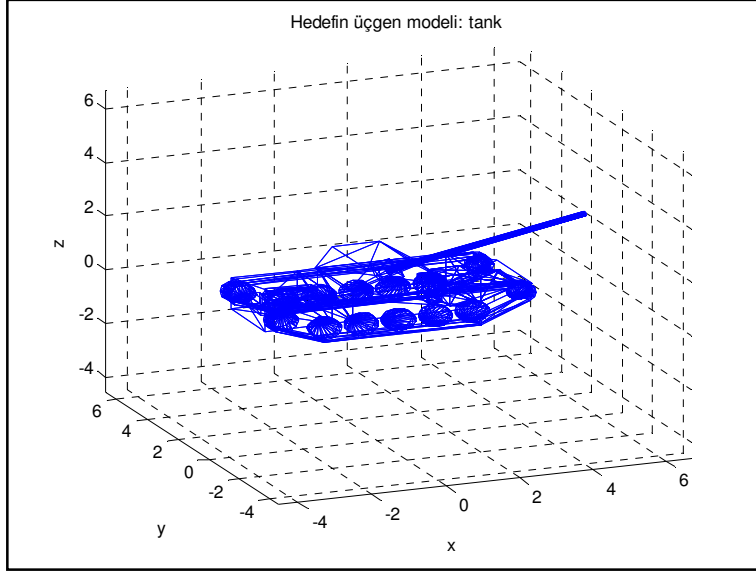


Şekil 4.9. RKA'nın üç boyutlu hedef model üzerinde gösterimi

4.2.4. Tank hedef modeli

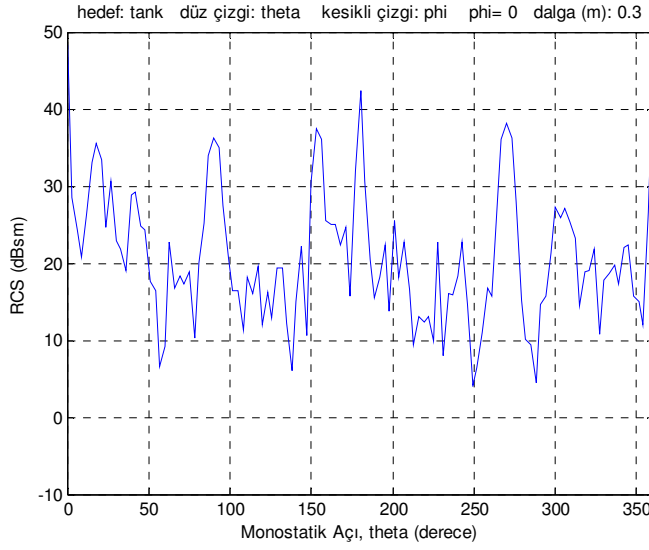
Bu başlık altında bu sefer daha karmaşık geometrili bir hedef model olan tank ele alınmıştır. Köşelerin koordinatları ve bu köşelerin oluşturduğu ayrılmış üçgen yüzey

parçaların özellikleri tanımlanarak Şekil 4.10'daki gibi bir hedef modellemesi elde edilir.

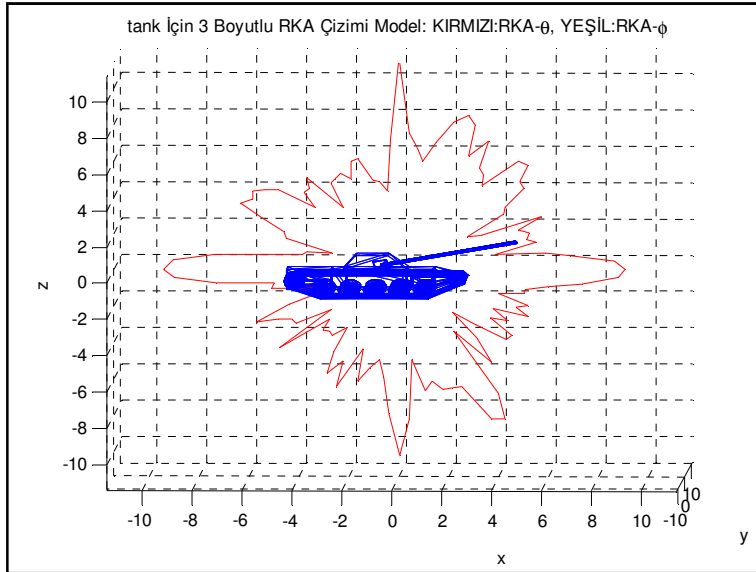


Şekil 4.10. Üç boyutlu tank hedef modeli

Modellenen tank yaklaşık yedi metre uzunluğunda ve üç buçuk metre genişliğindedir. Ayrıca çok iyi elektrik iletken malzemeden yapıldığı ve yüzeyinin pürüzsüz olduğu varsayılmaktadır. Hedefin RKA'sını hesaplamak için frekans değeri 1 GHz seçilmiştir ve gelen dalga θ -polarizeli (TM-z) olarak ayarlanmıştır. Böylece $\phi = 0$ düzleminde, 0'dan 360 dereceye 3'er derecelik artışlarla artan her θ açısı için RKA hesabı yapılmıştır (Şekil 4.11, Şekil 4.12).



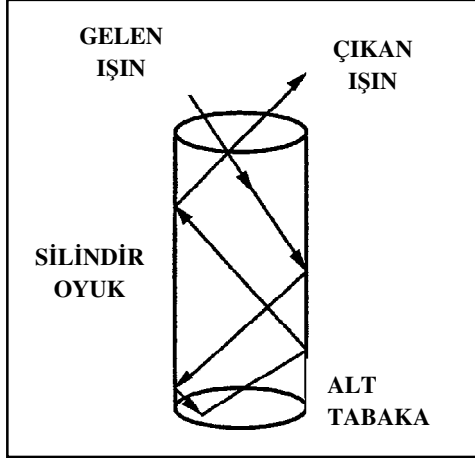
Şekil 4.11. Tank modeli için RKA'nın açığa (θ) bağlı değişimi



Şekil 4.12. RKA'nın üç boyutlu hedef model üzerinde gösterimi

Hedef modelin birçok büyük düz ve hafif kavisli yüzeylerden oluştuğu durumlarda çoklu yansımalar ortaya çıkar. Örneğin tank modelini ele alırsak tankın namlusu gibi oyuk parçalarda gelen ışının izlediği yol Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Eğer radardan gelen dalga uygun geliş açısı ile yaklaşırsa, tankın namlusunun içine girebilir bu da çoklu kırınımın meydana gelmesine neden olur. Oyuk yapılar konumlarına ve

büyükliklerine göre bazen önemli RKA değerleri oluştururlar. Bu durum uçak ve gemi gibi nesnelerin hava girişleri, bacaları ve egzoz çıkışları için de geçerlidir.



Şekil 4.13. Oyuk yapılarda çoklu yansımalar [22]

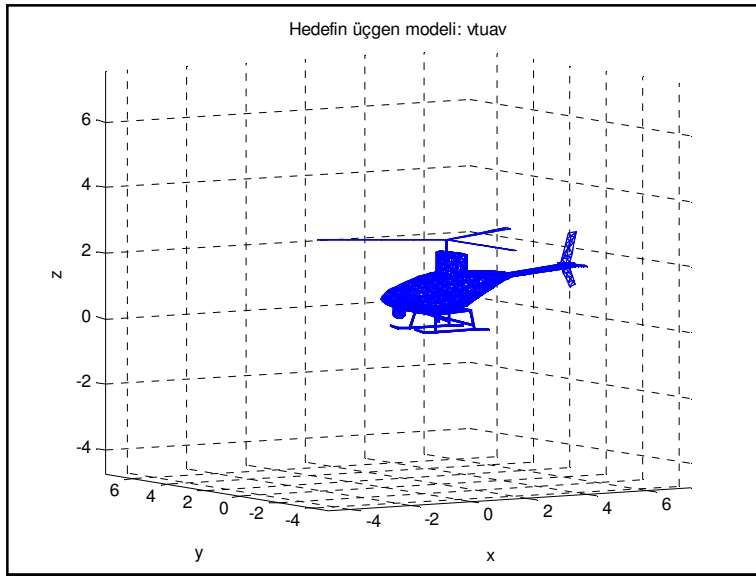
4.2.5. DİHA hedef modeli

Amerika Birleşik Devletleri'ndeki bir savunma firması tarafından geliştirilen dikey kalkış ve iniş yapabilen insansız hava aracının (DİHA) görüntüsü Resim 4.2'de görülmektedir.



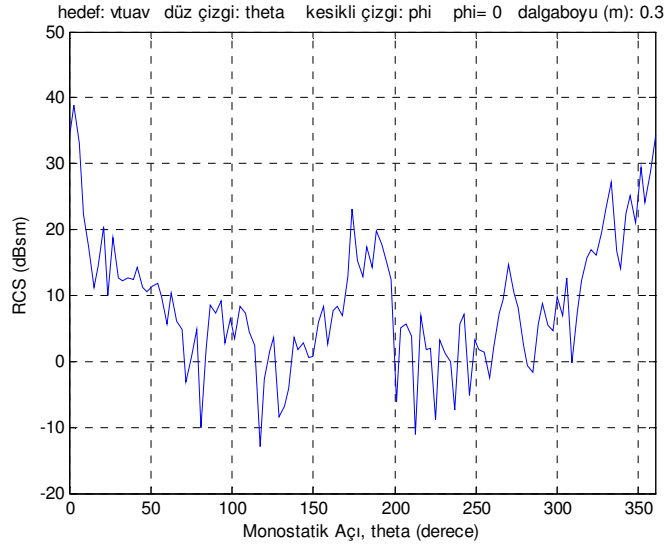
Resim 4.2. Dikey kalkış ve iniş yapabilen insansız hava aracı (DİHA) [28]

Bu hava aracının uzunluğu yaklaşık yedi metre, yüksekliği ise üç metredir. DİHA hedef modelinin koordinat sistemindeki üçgen yüzeylere bölünmüş haldeki modellemesi Şekil 4.14'te gösterilmiştir.

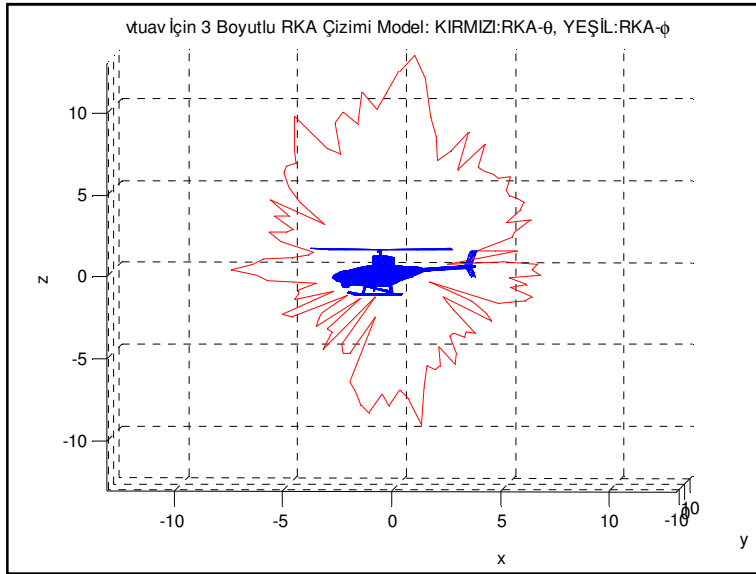


Şekil 4.14. Hedef nesnesi olarak seçilen DİHA'nın üçgen yüzeylere bölünmüş halinin MATLAB'da üç boyutlu çizimi

Simülasyon ortamındaki DİHA'nın çok iyi elektrik iletken malzemeden yapıldığı ve yüzeyinin pürüzsüz olduğu varsayılmaktadır. Modellenen insansız hava aracının yüzey iç direnci sıfır olarak belirlenir ve buna göre RKA'sı hesaplanır. Gelen dalga θ -polarizeli (TM-z) olarak seçilir ve radarın frekans değeri 1 GHz olarak ayarlanır. θ açısı 0'dan 360 dereceye 3'er derece artmaktadır ve her bir θ açısı için RKA hesabı yapılmaktadır. DİHA hedef modeli için elde edilen RKA grafiği Şekil 4.15'te RKA'nın üç boyutlu hedef üzerinde gösterimi ise Şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.15. DİHA modeli için RKA'nın açığa (θ) bağlı değişimi

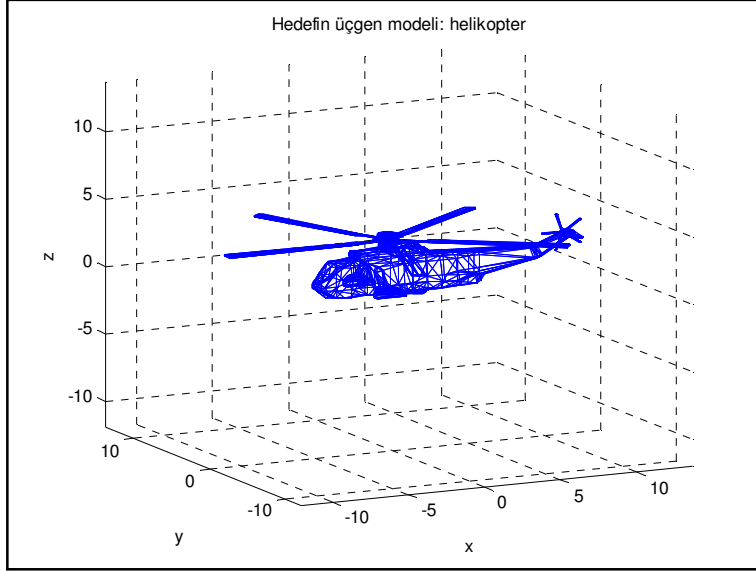


Şekil 4.16. RKA'nın üç boyutlu hedef model üzerinde gösterimi

4.2.6. Helikopter hedef modeli

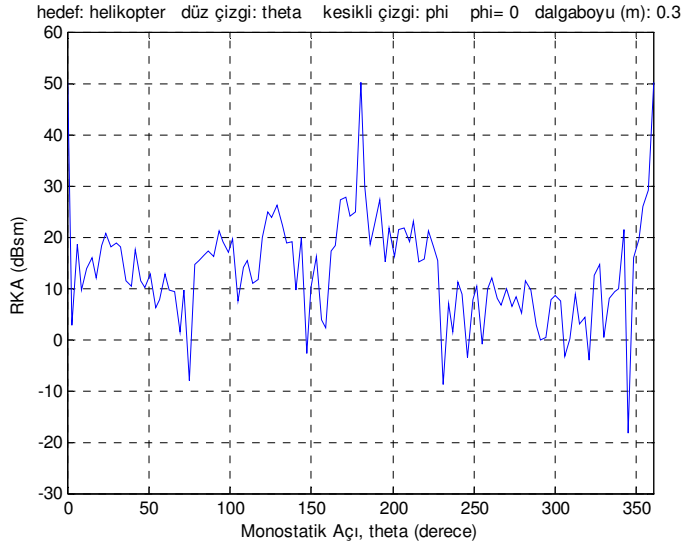
Üzerinde en çok radar kesit alanı hesabı yapılan araçlardan biri de helikopterdir. Uzunluğu yaklaşık on sekiz metre, yüksekliği de dört metre olan bir helikopter simülasyon ortamında modellenmiştir. Küçük üçgen yüzeyleri oluşturan köşe ve

bunların koordinat verileri girilerek Şekil 4.17'deki gibi hedefin üç boyutlu gösterimi elde edilir.

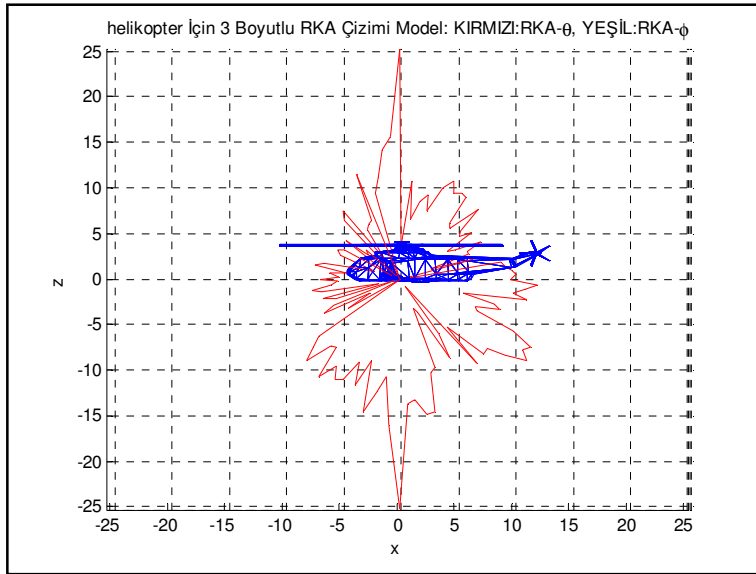


Şekil 4.17. Hedef nesnesi olarak seçilen helikopterin üçgen yüzeylere bölünmüş halinin MATLAB’da üç boyutlu çizimi

Hedefe gelen dalga, diğer hesaplamalarda olduğu gibi θ -polarizeli (TM-z) olarak seçilmiştir. Kullanılan radar frekans değeri 1 GHz’dir ve θ açısı 0’dan 360 dereceye 3’er derece artmaktadır. Bu veriler ışığında elde edilen RKA grafiği Şekil 4.18’de gösterilmektedir. Aynı zamanda RKA’nın üç boyutlu hedef üzerinde gösterimi de Şekil 4.19’da verilmiştir. Ayrıca hedefin çok iyi elektrik iletken malzemeden yapıldığı ve pürüzsüz yüzeyli olduğu varsayılmaktadır.



Şekil 4.18. Helikopter modeli için RKA'nın açıya (θ) bağlı değişimi

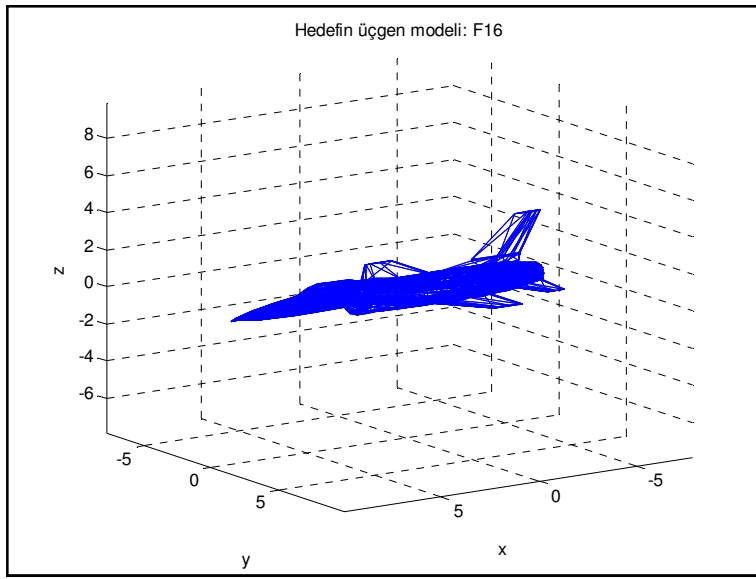


Şekil 4.19. RKA'nın üç boyutlu hedef model üzerinde gösterimi

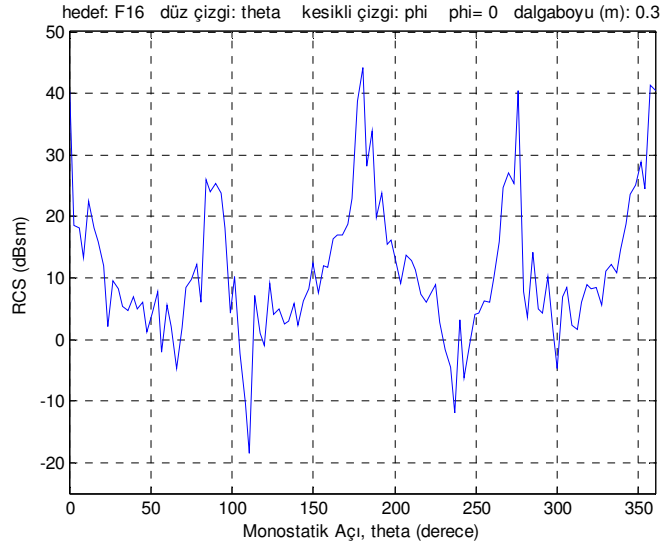
4.2.7. F-16 savaş uçağı hedef modeli

F-16 Savaşan Şahin savaş uçağı günümüze kadar yaklaşık 4 500 adet üretilerek 2. Dünya Savaşından bu yana en çok üretilen ikinci savaş uçağı olma unvanını kazanmıştır. Bu nedenle elektronik harp ortamında üzerinde birçok çalışmalar

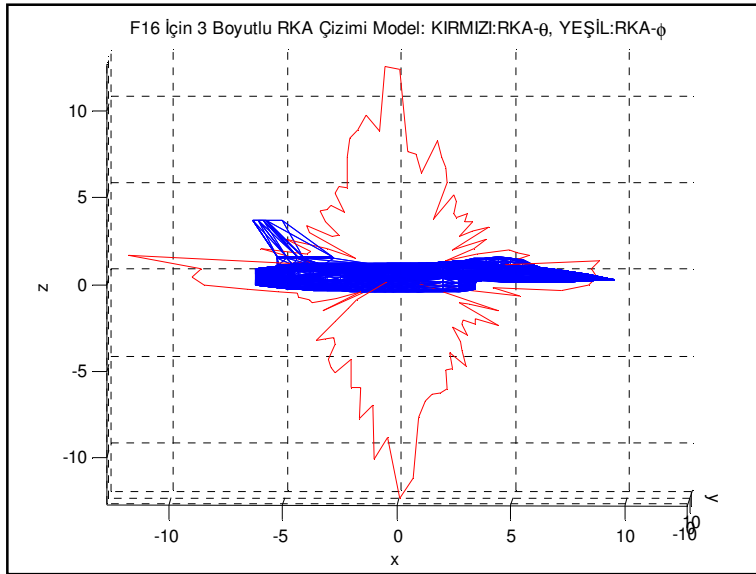
yapılmıştır. F-16 savaş uçağının uzunluğu yaklaşık on beş metredir (Şekil 4.20), çok iyi iletken malzemeden yapıldığı ve yüzeyinin pürüzsüz olduğu varsayılmaktadır. Simülasyon ortamında RKA'sı hesaplanan F-16'nın yüzey iç direnci sıfır olarak ayarlanır. Hedefe gelen dalga θ -polarizeli (TM-z) olarak seçilmiştir ve kullanılan frekans değeri 1 GHz'dir. θ açısı 0'dan 360 dereceye 3'er derece artmaktadır ve her bir θ açısı için RKA hesabı yapılmaktadır. F-16'nın RKA grafiği Şekil 4.21'de, üç boyutlu hedef üzerinde gösterimi ise Şekil 4.22'de gösterilmektedir.



Şekil 4.20. F-16 savaş uçağının simülasyon ortamında üç boyutlu gösterimi



Şekil 4.21. F-16 savaş uçağı için RKA'nın açığa (θ) bağlı değişimi



Şekil 4.22. RKA'nın üç boyutlu hedef model üzerinde gösterimi

4.2.8. X-29 uçağı hedef modeli

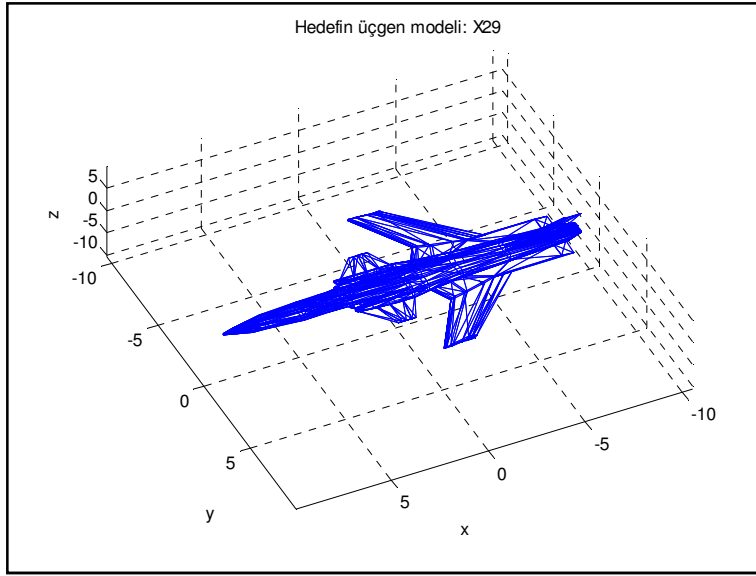
X-29 uçağı 1984 yılında deneysel amaçlı olarak üretilen ileri ok açılı kanatlı bir uçaktır (Resim 4.3). Ters ok açılı uçaklar dengesiz davranış özelliklerine rağmen çeviklik ve manevra kabiliyeti konusunda benzerlerine fark atabilmektedir.



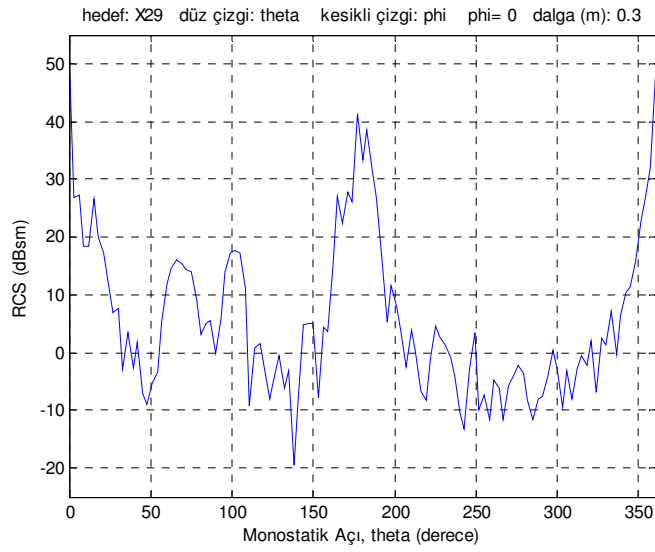
Resim 4.3. İleri ok açılı kanatlı Grumman X-29 uçağı [29]

Bu başlık altında 15 metre uzunluğundaki X-29 uçağının modellenmesi ve buna bağlı RKA hesabı iki farklı şekilde yapılmıştır. Birincisinde uçağın $+x$ yönünde konumlandığı durum için hesaplamalar yapılır (Şekil 4.23). İkinci durumda ise uçak $+y$ yönünde konumlanmıştır.

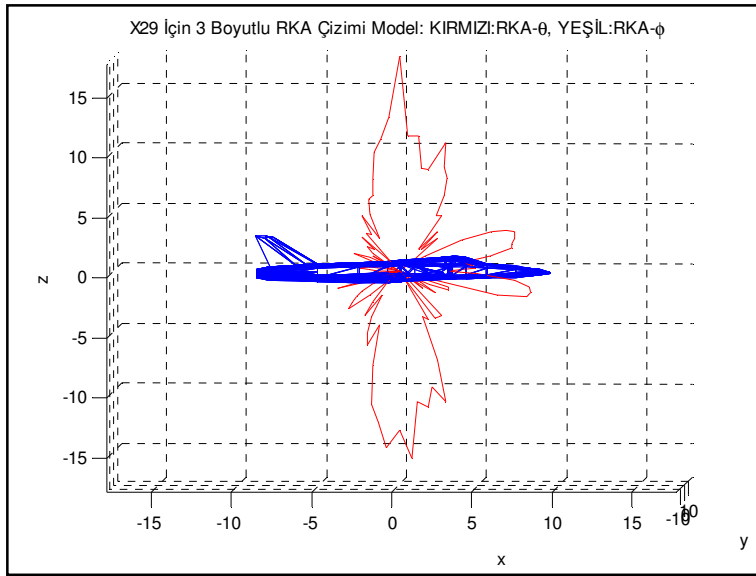
Diğer modellemelerde olduğu gibi hedefin çok iyi elektrik iletken malzemeden yapıldığı varsayılır. Hedefin yüzeyi pürüzsüzdür ve yüzey iç direnci sıfır olarak ayarlanır. Hedefe gelen dalga θ -polarizeli (TM-z) olarak seçilmiştir ve kullanılan frekans değeri 1 GHz'dir. θ açısı 0'dan 360 dereceye 3'er derece artmaktadır ve her bir θ açısı için RKA hesabı yapılmıştır. X-29 hedef modelinin birinci konumlanış durumu için elde edilen açıya bağlı RKA grafiği Şekil 4.24'te, ikinci konumlanış durumu için RKA grafiği ise Şekil 4.26'da gösterilmektedir. RKA sonuçlarının üç boyutlu hedef model üzerinde gösterimi ise Şekil 4.25 ve Şekil 4.27'de görülmektedir.



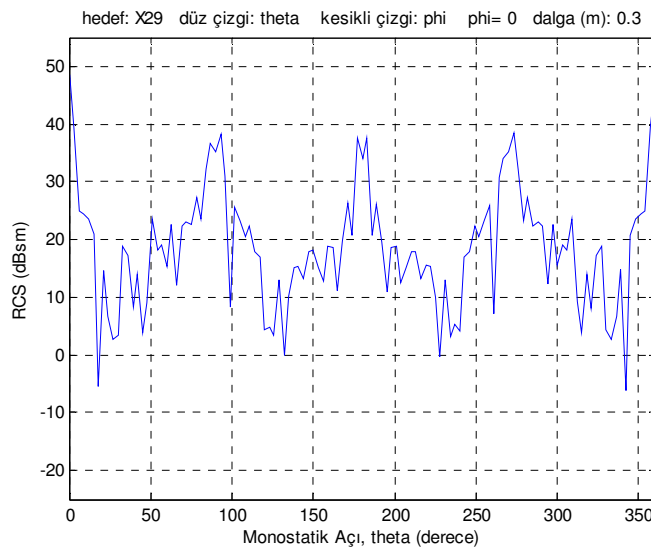
Şekil 4.23. Üç boyutlu X-29 uçağı hedef modeli



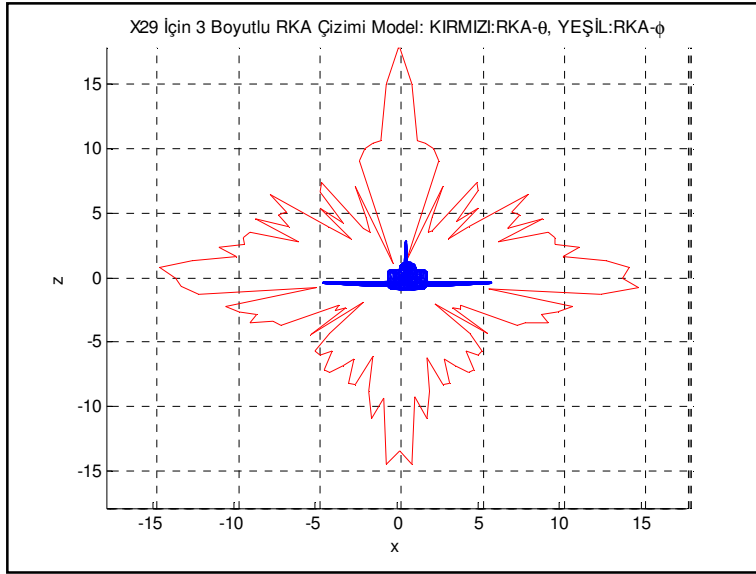
Şekil 4.24. Birinci konumlanma durumu için iç dirençsiz ve pürüzsüz yüzü X-29 uçağı modeli RKA'sının açığa (θ) bağlı değişimi



Şekil 4.25. Birinci konumlanma durumu için RKA'nın üç boyutlu hedef model üzerinde gösterimi



Şekil 4.26. İkinci konumlanma durumu için iç dirençsiz ve pürüzsüz yüzü X-29 uçak modeli RKA'sının açığa (θ) bağlı değişimi

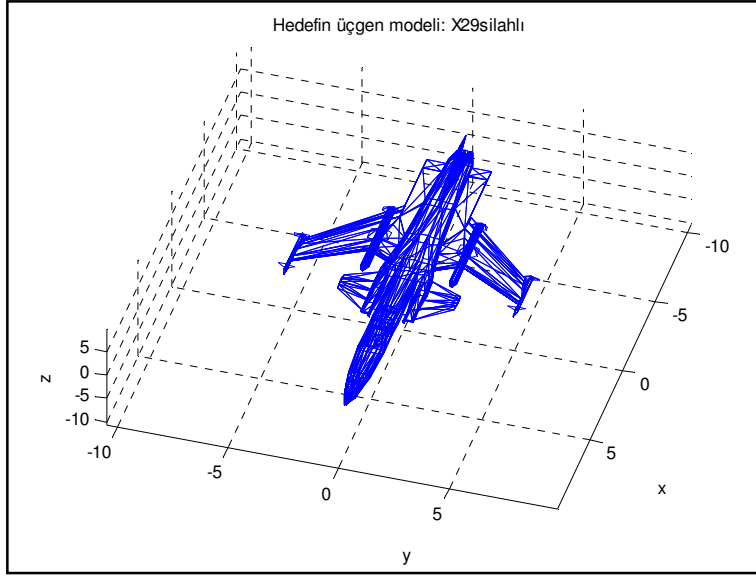


Şekil 4.27. İkinci konumlanma durumu için RKA'nın üç boyutlu hedef model üzerinde gösterimi

4.2.9. Silahlandırılmış X-29 uçağı hedef modeli

Silahlandırılmış X-29 uçağını modellemekteki ve RKA değerlerini hesaplamaktaki amacımız, bir önceki başlıktaki silahlandırılmamış X-29 uçağı (Şekil 4.28) verileri ile karşılaştırma yaparak, silahlandırmanın uçağın RKA'sına etkisini gözlemlemektir.

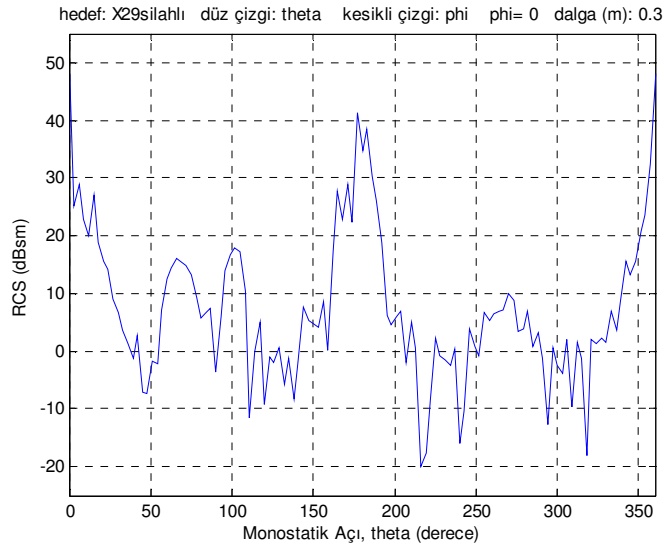
Bu kısımda da X-29 uçağının modellenmesi ve buna bağlı RKA hesabı, uçağın $+x$ ve $+y$ yönünde iki farklı konumlanma durumu için yapılmıştır. Birinci durumda uçağında $+x$ yönünde konumlandığı durum için hesaplamalar yapılır (Şekil 4.29). İkinci durumda ise uçağın $+y$ yönünde konumlandığı durum için RKA hesaplanır (Şekil 4.31).



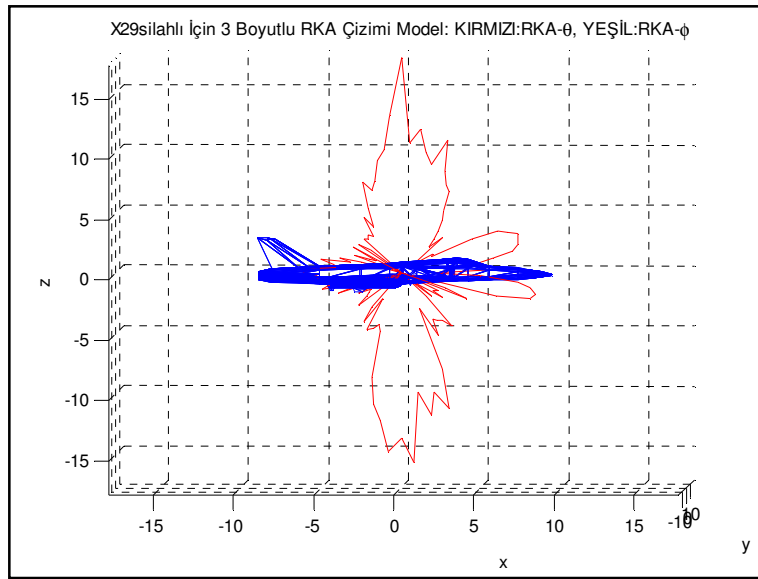
Şekil 4.28. Üç boyutlu silahlandırılmış X-29 uçağı hedef modeli

Yapılan hesaplamalarda hedefin çok iyi elektrik iletken malzemeden yapıldığı, pürüzsüz yüzeyli olduğu ve yüzey iç direncinin olmadığı göz önünde bulundurulmuştur. Kullanılan frekans değeri 1 GHz olarak seçilir. Ayrıca gelen dalga θ -polarizeli (TM-z) olarak ayarlanmıştır, böylece $\phi = 0$ düzleminde, 0'dan 360 dereceye 3'er derecelik artışlarla artan her θ açısı için monostatik RKA hesabı yapılmaktadır.

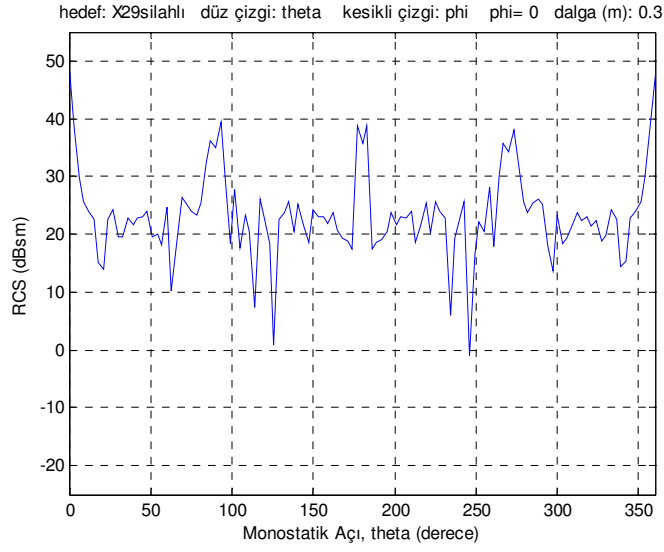
RKA sonuçlarının üç boyutlu hedef model üzerinde gösterimi ise Şekil 4.30 ve Şekil 4.32'de görülmektedir.



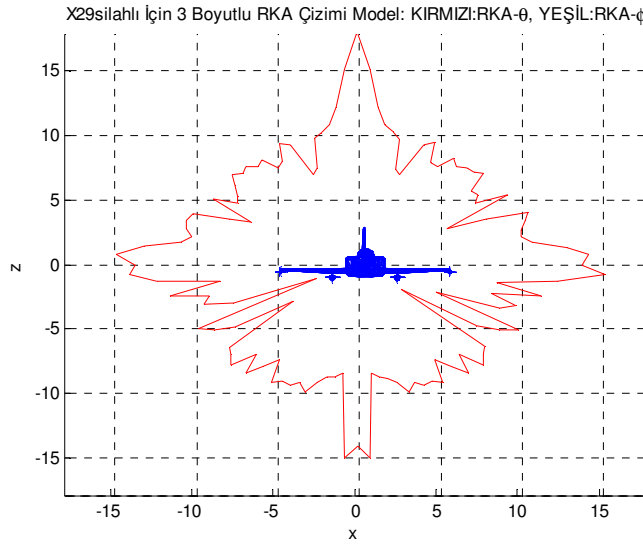
Şekil 4.29. Birinci konumlanma durumu için iç dirençsiz ve pürüzsüz yüzlü silahlandırılmış X-29 uçak modeli RKA'sının açığa (θ) bağlı değişimi



Şekil 4.30. Birinci konumlanma durumu için RKA'nın üç boyutlu hedef model üzerinde gösterimi



Şekil 4.31. İkinci konumlanma durumu için iç dirençsiz ve pürüzsüz yüzü silahlandırılmış X-29 uçak modeli RKA'sının açığa (θ) bağlı değişimi



Şekil 4.32. İkinci konumlanma durumu için RKA'nın üç boyutlu hedef model üzerinde gösterimi

Silahlandırılmış ve silahlandırılmamış X-29 uçaklarının RKA grafiklerini karşılaştırdığımız zaman bazı farklılıklar gözlemlenir. Karşılaştırma için her iki uçağın +y yönünde konumlu iken elde ettiğimiz RKA grafiklerini göz önünde bulundurulmuştur. Bunun sonucu olarak uçağın kanatları altındaki silahların,

konumları dolayısıyla, 110 ve 220 derecelerde RKA artışına sebebiyet verdiği söylenebilir.

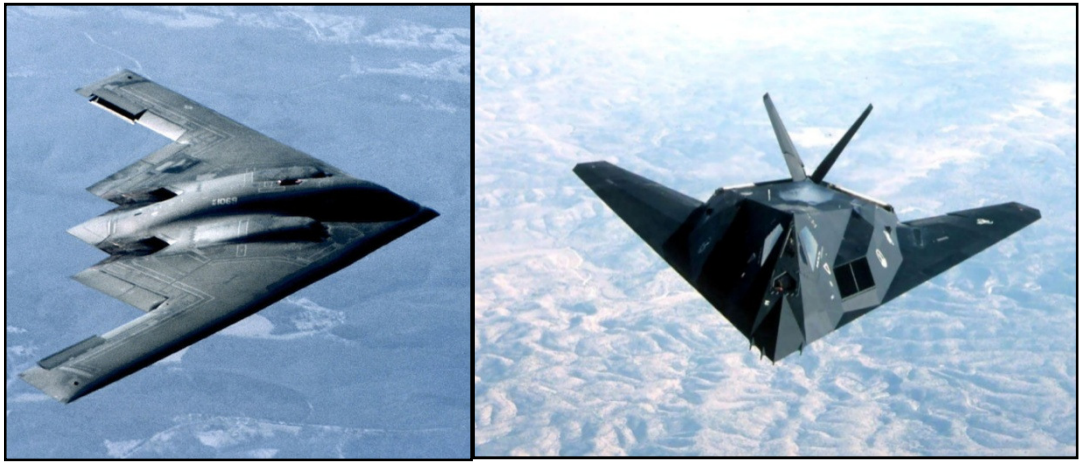
4.3. Görünmezlik Teknolojisi

Muharebe sahasında düşman kuvvetler tarafından geç tespit edilmek ve hatta mümkünse hiç tespit edilememek doğal bir üstünlük sağlar. Görünmezlik teknolojilerinin temel hedefi bu üstünlüğü elde etmektir. Burada görünmezlikten kasıt, gözetleme yapan birimlerin sensörlerinde alarm oluşturacak seviyede bir tespiti sebep olmamaktır. Radar ve sonar gibi kendi yolladığı sinyalin ekolarına göre tespit yapan aktif sensörlere karşı görünmezlik ancak bu sensörlere kendi sinyallerini geri yansıtmayarak mümkündür.

Aktif sensörlerde mutlak anlamda görünmezliğin sağlanması mümkün değildir. Bunun sebebi, en küçük cisimlerin bile sensöre yeterince yaklaştıklarında mutlaka tespit edilebilmeleridir. Dolayısıyla, radara karşı görünmezlik teknolojisinin maksadı mutlak görünmezliği sağlamaktan çok hedef cismin bir radar tarafından tespit edilme mesafesinin kısaltılmasıdır. Diğer bir anlatımla bir cismi olduğundan küçük göstermektir. Buradaki büyüklük veya küçüklüğün tanımı metrekaresi cinsinden ölçülen radar kesit alanı ile belirtilir [14].

Uçaklar için de durum benzer şekildedir. Uçakları görünmez kılmamanın başlıca yolu, radar vericileriyle gönderilen radyo dalgalarının hedeften sekerek alıcı antene dönmesini engellemektir. Bunun için de uçak gövde kanatları yumuşak kıvrımlarla ya da dik olmayan açılarla kesişen birçok düzeye tasarlanarak, çarpan radar sinyallerinin sağa sola, hatta yukarı saçılarak antene dönmemesi amaçlanır. Daha fazla görünmezlik özelliği kazanmak için uçağın yüzeyleri de radar sinyallerini geri yansıtmadan emen malzemelerle kaplanmıştır. Özel tasarlanmış yüzeyler ve bu yüzeylerin kaplanması kullanılan malzemeler sayesinde, hayalet uçaklar radar ekranında bir uçaktan çok, bir kuş gibi görünür. Resim 4.4'te iki hayalet uçak görülmektedir.

Hayalet uçakların radara yakalanma olasılığı sıfır değildir; ama bu olasılık normal uçaklardan çok daha düşüktür. Bu da radar dalgalarını geldikleri yönden farklı yönlerde yansıtacak şekilde düzenlenmiş değişik açılı gövde yapısı ve uçağın birçok yerinde dış kaplamanın hemen altına yerleştirilmiş, radar dalgalarını emici özellikte bir madde ve radar dalgalarını karıştıran elektronik sistemler yardımıyla gerçekleşmektedir. Böylece uçağın RKA'sı küçük olur. Normalde bir uçağın RKA'sı büyüklüğüne ve geometrik şekline bağlı olmasına karşın hayalet uçaklar kendileriyle aynı büyüklükte normal uçaklardan çok daha düşük RKA'ya sahiptirler. Bu sayede radara yakalanma olasılıkları çok daha azdır. Örneğin yüz elli kilometre maksimum menzilli bir radar, normal bir uçağı yüz yirmi kilometrede yakalıyorsa bir hayalet uçağı üç kilometrede ancak yakalayabilecektir ki bu mesafede radar tespiti anlamsızdır; çünkü uçak bu noktadan sonra çıplak gözle bile tespit edilebilir. Ayrıca üç kilometrede tespit edilen bir hedefe kilitlenip vurmak da oldukça zordur.



(a)

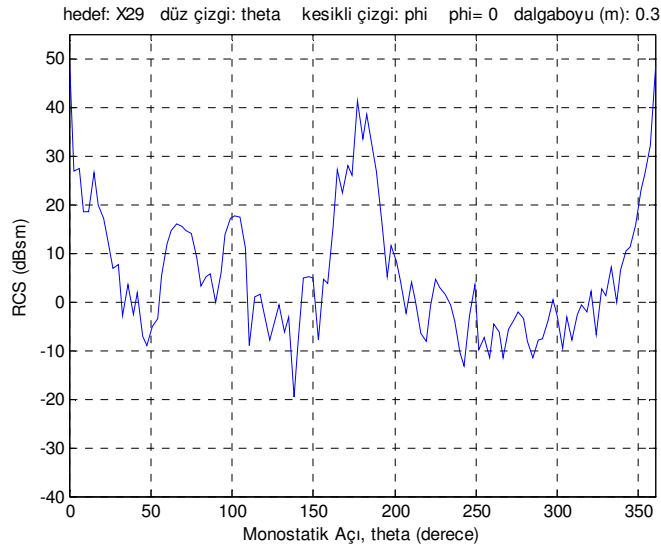
(b)

Resim 4.4. Görünmezlik özelliğine sahip iki uçak (a) B-2 Spirit bombardıman uçağı
(b) F-117 Nighthawk avcı uçağı [30]

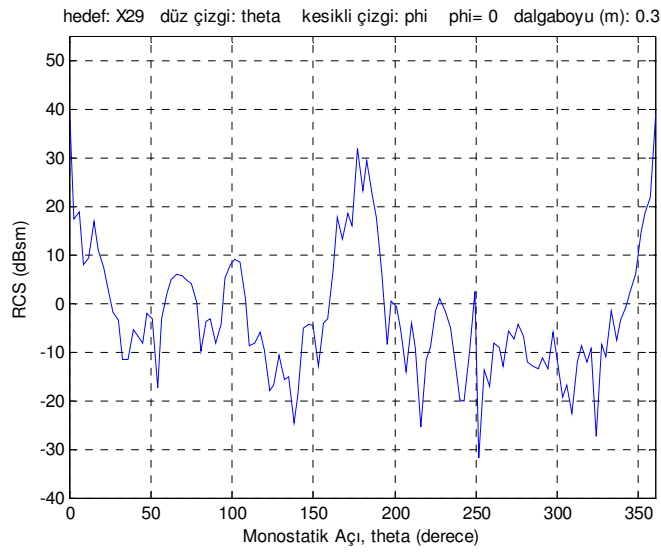
Radar soğurucu malzeme ile kaplanmış bir nesne veya öz dirençli materyalden yapılmış dış yüzeyi olan bir nesne, yüzeyinin iç direnç değeri olduğu tanımlanarak benzetilebilir. Eş.3.30 ve Eş.3.31'de hedefin yüzeyin direnciyle ters orantılı olan yüzey akım bileşenleri tanımlanmıştır. Örnek olarak önceden modellediğimiz ve RKA hesabını yaptığımız X-29 uçak modeli gövdesinin radar sinyallerini emip geri

yansıtmayan bir malzeme ile kaplandığını ve uçağın gövdesinin yüzey direncinin serbest uzayınkinin üç katı olduğunu varsayalım. Bunun için MATLAB'daki “*yüzeyler.m*” dosyasında iç direnç (R_s) değerlerini bir yapmamız gerekecektir. Şekil 4.33'te görüldüğü gibi elde ettiğimiz RKA sonucunu iç dirençsiz RKA sonucu ile karşılaştırsak radar kesit alanının genel olarak 10 dBsm kadar azaldığını söyleyebiliriz.

Hedefin radara veya herhangi bir alıcıya görünmesine sebep olan bir diğer şey de motorundan çıkan egzozdur. Bunun için görünmezlik özelliğine sahip birçok uçağın egzoz çıkışı gövdenin içine gizlenmiştir ve egzoz dumanının ısısı dağıtılarak veya soğutularak dışarı verilir [15]. Örneğin Lockheed firmasının üretilen sıra dışı tasarıma sahip F-117 Nighthawk uçağı, egzoz gazının yoğunluğunu azaltabilen bir sisteme sahiptir. Uçak bu sayede kızılötesi güdümlenme sistemi kullanan füzelere işaret bırakmamaktadır.



(a)



(b)

Şekil 4.33. (a) Yüzey iç dirençsiz X-29 uçağı için açıya (θ) bağlı monostatik RKA hesabı (b) Yüzey iç dirençli X-29 uçağı için açıya (θ) bağlı monostatik RKA hesabı

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın amacı, üçgen yüzeyler kullanarak karmaşık şekilli nesnelerin modellenmesinde kullanışlı bir yol geliştirmek, radara görünmemek için üzeri radar emici materyal ile kaplı bir nesneyi modellemek için iç direnç tanımlaması ile RKA hesabı yapabilmek ve istenilen frekans değeri ile hedefin monostatik radar kesit alanını hesaplayabilmektir.

Tezde ilk başta temel radar kuralları ve prensiplerinden, bazı radar denklemlerinden ve radar çalışma frekanslarından bahsedilmiştir. Daha sonraki başlıklarda radar kesit alanı tanımlanıp nelere bağlı olduğu açıklanmıştır. RKA hesaplaması için geliştirilen teknikler üzerinde durulmuş, bunlar içinden tez boyunca kullandığımız fiziksel optik yöntemi detaylı olarak açıklanmıştır.

Geliştirilen kodda kullanıcı tarafından sadece radarın frekans değeri belirlenmemekte aynı zamanda gelen dalganın polarizasyon türü, kullanılacak hedef nesnesi, gözlem açısının hangi dereceler arasında kaç derece artarak gözlem yapacağı gibi birçok veri girilebilmektedir. Girilen veriler ışığında önce hedef nesne MATLAB programı kullanılarak üç boyutlu şekilde modellenmekte, daha sonra hedefin açığa bağlı radar kesit alanı grafiği üretilmektedir. Ayrıca en sonunda hesaplanan radar kesit alanı hedef nesne üzerinde gösterilmektedir. Tezin daha sonraki bölümlerinde görünmezlik üzerinde durulmakta, görünmezlik özelliğine sahip uçaklar incelenmiştir.

Geliştirilen yazılım, temel fiziksel optik yaklaşımına dayanmaktadır. Gelecek çalışmalar için yapılabilecek şeylerden biri, çoklu yansımaların oluşturduğu etkiler gibi diğer saçılım mekanizmalarını da dâhil etmektir. Çoklu yansımalar FO yaklaşımını zorlaştırır. Bunun nedeni bir üçgen yüzeye gelen alanın sadece kaynaktan gelen alan olmaması, aynı zamanda başka bir üçgen yüzeye gelen alanın saçılması sonucu bu üçgen yüzey üzerine gelen alanın da göz önünde bulundurulması gerekliliğidir. Bunun için sayısal entegrasyonlara gereksinim duyulur, bu da hesaplama zamanını arttırır.

Tez boyunca hesaplanan radar kesit alanları hep pürüzsüz yüzeyler için geçerlidir. Bu nedenle bozuk ve kusurlu malzemenin neden olduğu pürüzlü yüzeylerde oluşan iç kırınımın göz önünde bulundurulmamıştır.

Bazen radarın alıcı ve vericisi hedef tarafından bakıldığında farklı konumlarda olabilir. Bu tip radarlara bistatik radar denilmektedir. Birçok uygulamada ise alıcı ve verici aynı yere konumlanmıştır hatta bazen aynı anteni kullanırlar. Bu radarlara da monostatik radar denilmektedir. Bu tez boyunca sadece monostatik durum için hesaplamalar yapılmıştır. Radardan gelen dalganın theta ve phi açısı değerlerinin belirtilmesi ile bistatik durum için hedefin radar kesit alanı hesabı yapılabilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Hongwei, L., Antar, Y.M.M., "Frequency dependence of radar cross-section for complex targets", *IEEE*, 34 (7): 697-698 (1998).
2. Saez de Adana, F., Nieves, S., Lozano, P., Gonzalez, I., Gutierrez, O., Catedra, M.F., "Contribution of the triple effects to the monostatic RCS of arbitrary targets modeled by plane facets", *IEEE*, 2: 216-219 (2001).
3. Perotoni, M.B., Barbin, S.E., "A Study on RCS of missile models using the method of moments", *IEEE*, October: 492-495 (2007).
4. Furse, C.M., Mathur, S.P., "Gandhi, O.P.; improvements to the finite-difference time-domain method for calculating the radar cross section of a perfectly conducting target", *IEEE*, 38 (7): 919-927 (1990).
5. Bechtel, M.E., "Application of geometric diffraction theory to scattering from cones and disks", *IEEE*, 53 (8): 877-882 (1965).
6. Ufimtsev, P.Y., "On polarization coupling in the PO and PTD approximations", *IEEE*, 56 (12): 3883 - 3885 (2008).
7. Johansen, P.M., "Time-domain version of the physical theory of diffraction", *IEEE*, 47 (2): 261-270 (1999).
8. Waddell, R.C., "Radar cross section synthesis of doubly curved surfaces", Master Thesis, *Naval Postgraduate School*, California, 9-12 (1995).
9. Yong, M.K.M., "Radar Cross section reduction: geometric control of discontinuities using serrated edges" Master Thesis, *Naval Postgraduate School*, California, 15-22 (1998).
10. Kontbay, T., "Gemilerde radar kesit alanı düşürme ve nümerik yöntemle hesaplanması", Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 12-15 (2009).
11. Kapan, M., "Basit cisimlerin radar kesit alanı uygulamaları", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 7-8 (2009).
12. Levanon, N., Mozeson, E., "Radar Signals", *John Wiley & Sons*, New Jersey, 7-18 (2004).
13. Jenn, D. C., "Radar and Laser Cross Section Engineering 2nd ed.", *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, Portland, 14-45, 320-410 (2007).

14. Ergin, A. A., "Görünmezlik teknolojileri: radar kesit alanı nedir?", *Savunma ve Havacılık*, IDEF, 120: 1-5 (2007).
15. Kouteas, D., "Investigation of high frequency ship radar cross section reduction by means of shaping", Master Thesis, *Naval Postgraduate School*, California, 20-27 (1998).
16. Skolnik, M., "Radar Handbook 3rd ed.", *McGraw Hill*, New York, 14.1-14.41 (2008).
17. Knott, E. F., Shaeffer, J. F., Tuley, M. T., "Radar Cross Section 2nd ed.", *SciTech Publishing Inc.*, Raleigh, 444-480 (2004).
18. Mahafza, B. R., "Introduction To Radar Analysis", *CRC Press*, Florida, 77-79 (1998).
19. Chonghua, F., Xiaonan, Z., Qian, L., "An improved physical optics method for the computation of radar cross section of electrically large objects", *IEEE*, 722 - 725 (2008).
20. Keller, J. B., "Diffraction By An Aperture" *J. Appl. Phys.*, 28 (4): 426-444 (1957).
21. Schleher, D. C., "Electronic Warfare in the Information Age 1st ed.", *Artech House*, Norwood, Massachusetts, 388-439 (1999).
22. Balanis, C. A., "Advanced Engineering Electromagnetics", *John Wiley & Sons*, New York, 273-411 (1989).
23. Chew, C., Jin, J. M., Michielssen, E., Song, J., "Fast and Efficient Algorithms in Computational Electromagnetics", *Artech House*, Boston, 14-94 (2001).
24. Moreira, F. J. S., Prata, A. Jr., "A self predictor-corrector algorithm for efficient evaluation of reflector antenna radiation integrals," *IEEE*, 42 (2): 246-254 (1994).
25. Faros, N., "Radar cross section synthesis for planar resistive surfaces", Master Thesis, *Naval Postgraduate School*, California, 19-26 (1994).
26. İnternet : Naval Postgraduate School, "Matlab Software"
<http://faculty.nps.edu/jenn/>.
27. İnternet : Wikipedia free encyclopedia "AIM-9 Sidewinder"
http://en.wikipedia.org/wiki/AIM-9_Sidewinder.
28. İnternet : Wikipedia free encyclopedia "Northrop Grumman MQ-8 Fire Scout"
http://en.wikipedia.org/wiki/Northrop_Grumman_MQ-8_Fire_Scout.

29. Internet : Wikipedia free encyclopedia “Grumman X-29”
[http://en.wikipedia.org/wiki/X29.](http://en.wikipedia.org/wiki/X29)

30. Internet : Wikipedia free encyclopedia “Stealth aircraft”
[http://en.wikipedia.org/wiki/Stealth aircraft.](http://en.wikipedia.org/wiki/Stealth_aircraft)

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : OKAN, Tayfun
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 14.06.1988 Ankara
Medeni hali : Bekar
Cep Telefonu : 0 (505) 591 26 73
e-mail : tayfunokan@gmail.com

Eğitim

Derece

Eğitim Birimi

Mezuniyet tarihi

Lisans	Başkent Üniversitesi/ Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü	2009
Lise	Gazi Anadolu Lisesi	2005
Orta ve ilköğretim	TED Ankara Koleji	2002

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Model uçak maketleri, Squash, Bilgisayar teknolojileri, Yüzme, Basketbol