

**BİR HEDEFİN FİZİKSEL OPTİK YÖNTEMİYLE RADAR KESİT
ALANININ HESAPLANMASI**

İdil ANT

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2010
ANKARA**

İdil ANT tarafından hazırlanan BİR HEDEFİN FİZİKSEL OPTİK YÖNTEMİYLE RADAR KESİT ALANININ HESAPLANMASI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd.Doç.Dr.Nursel AKÇAM

Tez Danışmanı, Elektrik-Elektronik Müh. 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 Müh. , Gazi Üniversitesi

Yrd.Doç.Dr.Nursel AKÇAM

Elektrik-Elektronik Müh. , Gazi Üniversitesi

Yrd.Doç.Dr.Hasan Şakir BİLGE

Bilgisayar Müh. , Gazi Üniversitesi

Tarih: 21 / 06 / 2010

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 orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

İdil ANT

BİR HEDEFİN FİZİKSEL OPTİK YÖNTEMİYLE RADAR KESİT ALANININ HESAPLANMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

İdil ANT

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Haziran 2010

ÖZET

Radar, elektromanyetik dalgaların herhangi bir cisme çarparak geri yansımaları prensibine dayanan bir sistemdir. Radar tarafından yayılan enerji cisme çarptığında hedef üzerinde akım indüklenmektedir ve bu akım tüm yönlerde elektromanyetik enerjiyi yaymaktadır. Radar Kesit Alanı (RCS), hedeflerin üzerine gelen elektromanyetik enerjiyi radar alıcısı yönünde yansıtma kabiliyetlerinin bir ölçüsüdür. Bu çalışmada, yüksek frekans yöntemlerinden biri olan Fiziksel Optik yöntemi esas alınarak radar kesit alanı hesaplayan bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yöntemin kullanımında yüzey, üçgenleme metodu ile düzlemlere bölünmüştür. Bu düzlemler kullanılarak Fiziksel Optik yüzey integrali hesaplanmıştır.

Bilim Kodu	: 905.1.034
Anahtar Kelimeler	: Radar kesit alanı, fiziksel optik
Sayfa Numarası	: 61
Tez Yöneticisi	: Yrd.Doç.Dr.Nursel AKÇAM

**RADAR CROSS SECTION CALCUTION OF A TARGET WITH
PHYSICAL OPTICS METHOD**

(M.Sc. Thesis)

İdil ANT

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

June 2010

ABSTRACT

Radar is a system, which based on principal of incidence and backscattering of electromagnetic waves strike on an arbitrary target. When radar radiates energy, a current induces on target and current radiates electromagnetic energy in all directions. Radar Cross Section is a measure that abilities of reflection of electromagnetics energy on radar receiver direction. In this study, being taken as a basis of physical optics, a software is developed which calculated radar cross section. In usage of physical optics, surface is divided planes by triangulation method. Integral of physical optics is calculated with usage of planes.

Science Code	: 905.1.034
Key Words	: Radar cross section, physical optics
Page Number	: 61
Adviser	: Assist.Prof.Dr.Nursel AKÇAM

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarını benden esirgemeyen Hocam Yrd.Doç.Dr.Nursel AKÇAM' a, Gazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölüm Başkanlığı' na, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitü Müdürlüğü' ne teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. RADAR SİSTEMLERİ	4
2.1. Radar Denklemi	6
3. RADAR KESİT ALANI	11
3.1. RCS Formülasyonu.....	12
3.2. Saçılma Mekanizmaları	15
3.3. RCS' nin Açısal Bağımlılığı	17
3.4. RCS' nin Frekans Bağımlılığı	18
3.5. RCS' nin Polarizasyon Bağımlılığı.....	20
3.6. Saçılma Bölgeleri	25
3.7. RCS Tahmin Yöntemleri	26
3.7.1. Sayısal yöntemler.....	27
3.7.2. Analitik yöntemler.....	28

	Sayfa
4. FİZİKSEL OPTİK YÖNTEM İLE RCS HESABI	31
4.1. Üçgen Yüzeylerle Hedef Yaklaşımı	32
4.2. Fiziksel Optik Formülasyonu	39
5. İNCELENECEK RADAR HEDEFİ	45
5.1. Dikdörtgen Düzlemsel Yüzey	45
5.2. Matlab Sonuçları	48
6. SONUÇ	57
KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ	61

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Frekans bandları	5
Çizelge 3.1. Bazı hedefler için RCS değerleri	14

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Frekans ve dalga boyu bandları	4
Şekil 3.1. Monostatik ve bistatik saçılım.....	15
Şekil 3.2. RCS' nin açısal bağımlılığı	17
Şekil 3.3. 0.1 m ve 0.7 m' de RCS' nin frekansa bağımlılığını gösteren deney	18
Şekil 3.4. 0.1 m uzaklıktaki saçıcı için RCS' nin frekans bağımlılığı.....	19
Şekil 3.5. 0.7 m uzaklıktaki saçıcı için RCS' nin frekans bağımlılığı.....	19
Şekil 3.6. x ve y doğrultusundaki elektrik alan bileşenleri	20
Şekil 3.7. Bir kürenin radar kesit alanı ve saçılım bölgeleri	25
Şekil 3.8. RCS Hesaplama Teknikleri	27
Şekil 4.1. Bir kürenin üçgen yüzeyler yaklaşımı	32
Şekil 4.2. Yüzey üzerindeki üçgen parçalar	35
Şekil 4.3. Yüzey üzerinde bir üçgen parça	38
Şekil 4.4. Vektör tanımları	40
Şekil 5.1. Dikdörtgen düzlem	45
Şekil 5.2. Dikdörtgenin RCS' si Uzunluk:3 Genişlik=1 Frekans:4 GHz	48
Şekil 5.3. Dikdörtgenin RCS' si Uzunluk:3 Genişlik=1 Frekans:4 GHz	48
Şekil 5.4. Dikdörtgenin RCS' si Uzunluk:3 Genişlik=1 Frekans:6 GHz	49
Şekil 5.5. Dikdörtgenin RCS' si Uzunluk:3 Genişlik=1 Frekans:6 GHz	50
Şekil 5.6. Dikdörtgenin RCS' si Uzunluk:3 Genişlik=1 Frekans:10 GHz	51
Şekil 5.7. Dikdörtgenin RCS' si Uzunluk:3 Genişlik=1 Frekans:10 GHz	51

Şekil	Sayfa
Şekil 5.8. Dikdörtgenin RCS' si Uzunluk:1 Genişlik=1 Frekans:4 GHz	52
Şekil 5.9. Dikdörtgenin RCS' si Uzunluk:1 Genişlik=1 Frekans:4 GHz	53
Şekil 5.10. Dikdörtgenin RCS' si Uzunluk:1 Genişlik=1 Frekans:6 GHz	54
Şekil 5.11. Dikdörtgenin RCS' si Uzunluk:1 Genişlik=1 Frekans:6 GHz	54
Şekil 5.12. Dikdörtgenin RCS' si Uzunluk:1 Genişlik=1 Frekans:10 GHz	55
Şekil 5.13. Dikdörtgenin RCS' si Uzunluk:1 Genişlik=1 Frekans:10 GHz	55

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
σ	Radar kesit alanı
B	Band genişliği
λ	Dalga boyu
k	Dalga sayısı
$\vec{E}^i$	Gelen elektrik alan vektörü
$\vec{E}^s$	Saçılan elektrik alan vektörü
$\vec{J}_{FO}$	Fiziksel optik yüzey akımı
Kısaltmalar	Açıklama
RCS	Radar Kesit Alanı
FO	Fiziksel Optik
GO	Geometrik Optik
FDTD	Zamanda Sonlu Farklar Metodu
MoM	Moment Metodu

1. GİRİŞ

Radar kelimesi 'Radio Detection and Ranging' kelimelerinin baş harflerinden bulunmuştur. Radar, elektromanyetik dalgaların herhangi bir cisme çarparak geri yansması prensibine dayanan bir sistemdir. Radar tarafından yayılan enerji cisme çarptığında hedef üzerinde akımlar indüklenir. Bu akımlar yeni kaynaklar gibi davranır ve yüzeyden yansıyan bir elektromanyetik alan oluşturur. Bu alan saçılan alan olarak tanımlanır [1]. Saçılan alan, gelen alan polarizasyonu ve frekansa bağlıdır. Ayrıca aydınlatılmış hedef yüzeyinin şekli de saçılan alan için etkilidir.

Radar Kesit Alanı (RCS), hedeflerin üzerine gelen elektromanyetik enerjiyi radar alıcısı yönünde yansıtma kabiliyetlerinin bir ölçüsüdür. Gelen alan dalga boyu ile saçılan hedef boyutunun oranına bağlı olarak saçılım bölgeleri tanımlanır. Bu bölgeler; Alçak frekans (Rayleigh), Rezonans (Mie) ve Yüksek frekans (optik) bölgeleridir.

Radar uygulamalarında radarları kıyaslarken RCS parametresi kullanılır. Bu kadar önemi bulunan RCS' yi önceden tanımlamak ve tahmin etmek gerekir. RCS değeri ne kadar kesin tahmin edilirse hedef hakkındaki bilgilerimiz o kadar doğru olur.

RCS hesaplamalarında öncelikle, levha, küre, silindir ve tel gibi temel şekiller ele alınır. Karmaşık yapılarda ise, hedef olabildiğince bu temel şekillerden oluşan alt bölgelere ayrılır. Bu sayede, bütünüde karmaşık bir yapıya sahip olan uçak, tank vs. gibi gerçek hedeflerin RCS tahmini daha gerçekçi bir şekilde yapılabilir [1].

RCS tam modelleme ve yaklaşım modellemesi olmak üzere iki yöntemle tahmin edilebilir.

RCS tahmininde kullanılan tam modellemede, karmaşık olmayan basit cisimlerin RCS tahminlerinde bile çok fazla zorlanılır. Tam modellemede

sınır koşulları dikkate alınarak diferansiyel ve integral içeren çok fazla eşitliğin çözülmesi gerekir. Bu sınır koşulları Maxwell denklemleri göz önüne alınarak belirlenir. Tam modellemede tam bir sonuç alınsa bile, bunu bilgisayar ortamında elde etmek ve yorumlamak bir hayli zordur.

RCS tahmininde kullanılan diğer bir yöntem ise yaklaşım modellemedir. Tam modellemedeki zorluklar dikkate alındığında yaklaşım modelini kullanmanın daha uygun olacağı düşünülür. Yaklaşım modeli optik alanda uygulanır. Optik alanda en sık kullanılan yöntemler Fiziksel Optik (FO) ve Geometrik Optik (GO) yöntemleridir.

Geometrik Optik gelen, yansıyan ve iletilen ışının izlenmesi prensibine dayanır. Fiziksel Optik ise, Geometrik Optik tarafından bulunan indüklenen akımların integral eşitliklerine dayanır [2].

Günümüzdeki çoğu yaklaşım modeli gerçek değere çok yakın tahminlerin elde edilmesini sağlar. Yaklaşım modeli sadece basit cisimlerin değil, aynı zamanda karmaşık cisimlerin de RCS tahminlerinde kullanılır.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde, radar tanımı yapılmış ve frekans bandları tanıtılmıştır. Radar denklemi eşitlikler ile çıkarılmış ve radar özel parametresi olan radar kesit alanı ifadesine giriş yapılmıştır.

3. Bölümde radar kesit alanı ayrıntılı olarak tanımlanmıştır. Önemi ve kullanım alanlarına değinilmiştir. Radar kesit alanını etkileyen faktörler detaylı olarak ifade edilmiş ve ayrıca tahmin yöntemleri açıklanarak değerlendirilmiştir.

4. Bölümde ise radar kesit alanı kestiriminde kullanılan, yüksek frekans yöntemlerinden Fiziksel Optik yönteminin tanımı yapılmış ve formülasyonu belirtilmiştir. Hedeflerin geometrilerini modellemek için üçgen modelleme metodu açıklanmıştır.

Bu çalışmanın beşinci bölümünde, Fiziksel Optik yöntemi ile mükemmel

iletken dikdörtgen düzlemsel yüzey için radar kesit alanı eşitlikleri verilmiştir. Bu eşitliklere dayanarak, farklı hedef boyutlarında ve farklı frekanslarda Matlab programı ile yazılım geliştirilmiş ve sonuç grafikleri yorumlanmıştır.

2. RADAR SİSTEMLERİ

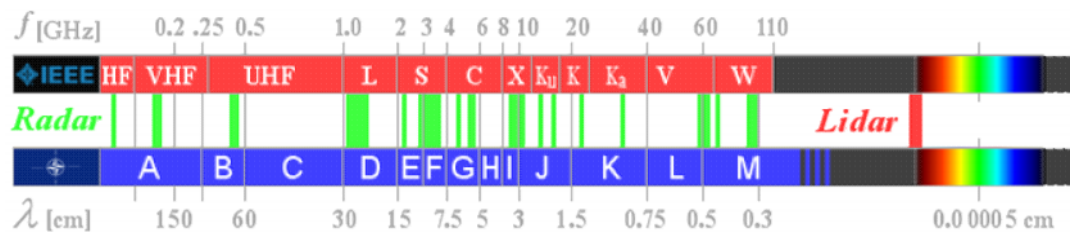
Radar, elektromanyetik dalgalar yayınlarak hareket eden ya da hareketsiz hedefler hakkında çeşitli bilgiler alabilen bir uzaktan algılama sistemidir.

Çalışma prensibi, radardan gönderilen bir elektromanyetik sinyalin hedefe çarparak geri gelmesi esasına dayanır. Geri yansıtılan bu elektromanyetik dalgalar, radarlar tarafından ölçülürler ve radar yazılımları vasıtasıyla kullanıcıya görsel bir ürün olarak sunulurlar.

Günümüzde birkaç megahertz' den, spektrumda ultraviyole bölgelere kadar çalışan radarlar bulunur. Tüm frekanslarda radarların çalışma prensipleri aynıdır. Buna rağmen pratikteki uygulamaları oldukça farklı olabilmektedir.

Frekans bandları, hem kullanım alanlarının hem de çalıştıkları frekans bölgelerinin farklılığı nedeniyle değişik isimler altında sınıflandırılabilir. Gözetleme ve izleme radarlarıyla savunma sistemleri güçlendirilirken, görüntüleme ve uzaktan algılama radarları her türlü meteorolojik, coğrafi ya da askeri bilgi toplama sisteminde yaygın olarak kullanılır.

Radarlar dalga şekline veya frekanslarına göre de sınıflandırılabilirler. Dalga şekillerine göre iki kısma ayrılırlar. Bunlar sürekli dalga radarı ve darbe radarlarıdır. Radar frekansları 30 MHz den yaklaşık 98 GHz' e olan bir bölgeye yayılır. Frekans aralıklarına göre ise L band, S band, C band, X band , K band, V band ve W bandır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Frekans ve dalga boyu bandları

Çizelge 2.1' de frekans bandları, frekans aralıkları ve bu bandların kullanım alanları gösterilmektedir.

Çizelge 2.1 Frekans bandları

BAND ADI	FREKANS ARALIĞI	KULLANIM ALANI
VHF	50-300 MHz	Çok uzun aralıkta gözetleme
		FM radyo ve televizyon yayını
		Telsiz haberleşmesi
UHF	300-1000 MHz	Çok uzun aralıkta gözetleme
		Askeri haberleşme
		GPS
L	1-2 GHz	Uzun aralıkta gözetleme
		Trafik kontrolü
S	2-4 GHz	Orta aralıkta gözetleme
		Terminal trafik kontrolü
		Uzun mesafe hava tahmini
C	4-8 GHz	Uzun mesafe takibi
		Hava tahmini
X	8-12 GHz	Kısa mesafe takibi
		Roket yön gösterimi
		Haritacılık
		Deniz radarı
Ku	12-18 GHz	Yüksek çözünürlü haritacılık
		Uydu altimetresi
Ka	27-40 GHz	Çok yüksek çözünürlü haritacılık
		Havaalanı gözetleme

L band radarları 1-2 GHz frekansında çalışırlar. 15-30 cm dalga boylu mikrodalga yayınlarlar (genellikle 20 cm). Askeri ve sivil amaçlı olarak uçakların algılanmasında kullanılır.

S band radarları 2-4 GHz frekansında çalışırlar. Dalga boyları 8-15 cm. arasındadır. Meteorolojik amaçlı olarak kullanılan S Band radarlar genelde 10 cm dalga boyunda olup, daha büyük çaplı anten gerektirdiklerinden oldukça pahalıdırlar. Uzun menzildeki hava olaylarını ve büyük okyanus kıyılarındaki hava olaylarını gözlemlemek için kullanılırlar.

C band radarları 4-8 GHz frekansında çalışır. Dalga boyları 4-8 cm arasındadır. Meteorolojik radarlar genelde 5 cm dalga boyunu kullanır. Bu radarlarla hem rüzgar bilgileri hem de yağış bilgilerini elde etmek mümkündür.

X band radarları 8-12 GHz frekansında çalışır. Dalga boyları 4-2,5 cm dir.

K band radarları 18-27 GHz frekansında çalışır. Dalga boyları 1,7-1,2 cm dir.

Pratikte her frekans bandı kendi karakteristik özelliklerinden dolayı belirli uygulamalarda daha iyi sonuçlar vermektedir.

Düşük frekanslar daha fazla güç tutma kapasitesine sahiplerdir. Çünkü uygulanan gerilim herhangi bir problem olmadan yüksek tutulabilmektedir.

2.1. Radar Denklemi

Tüm yönlere enerjiyi eşit olarak yayan bir anten farzedilsin. Bu antenler dairesel yayılım özelliğine sahip olduğu için güç yoğunluğunun genliği uzaydaki herhangi bir nokta için tanımlandığında güç yoğunluğu kayıpsız yayılma ortamı ve R mesafesi için,

$$P_D = \frac{P_t}{4\pi R^2} \quad (2.1)$$

olarak ifade edilir. Burada, $4\pi r^2$ küre yüzeyi, P_T iletilen güçtür.

Radar sistemlerinde güç yoğunluğunu artırmak için yönlü antenler kullanılır. Yönlü anten, antenin etkin açıklığı A_e ve anten kazancı G 'den tanımlanır. Kazanç,

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (2.2)$$

olur. λ dalga boyudur ve $\lambda = c/f$ olarak $c = 3 \times 10^8$ m/sn ışık hızı ve f , frekans cinsinden ifade edilir.

Her yöne eşit güç ışınlayan izotropik anten yerine yönlü bir anten kullanıldığında, uzayda bir noktadaki güç yoğunluğu G doğrultusundaki anten güç kazancı ile değişir. θ ve ϕ antenin düzlem açılarını ifade etmektedir.

G kazançlı yönlü anten kullanılan bir radardan R mesafesinde bulunan hedefteki güç yoğunluğu,

$$P_D = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \quad (2.3)$$

olarak elde edilir.

Elektromanyetik dalga hedefe çarptığında hedef yüzeyinde bir akım indüklenir ve bu akım elektromanyetik enerjinin tüm yönlerde yayılmasını

sağlar. Bu yayılan elektromanyetik alan sayesinde hedefe ait bilgiler, hedefin boyutu, yönü, fiziksel şekli, cismin malzeme tipi gibi hedefle ilgili bazı bilgiler tespit edilir. Tüm bu bilgileri içeren radar özel parametresine Radar Kesit Alanı (RCS) denir ve σ sembolüyle gösterilir.

RCS, hedef tarafından yansıtılan elektromanyetik dalga gücünün, hedefe gelen güç yoğunluğuna oranı olarak tanımlanır.

$$\sigma = \frac{P_r}{P_D} \quad (2.4)$$

Bu eşitlikte, P_r hedef tarafından yansıtılan güçtür. Anten tarafından radara gelen toplam güç ise;

$$P_{D_r} = \frac{P_t G \sigma}{(4\pi R^2)^2} A_e \quad (2.5)$$

ifadesi ile verilir. Eş.2.2, Eş.2.5' te yerine konursa,

$$P_{D_r} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (2.6)$$

elde edilir. $S_{\min}$ minimum sinyal gücü olmak üzere, radarın maksimum mesafesi,

$$R_{\max} = \left(\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{\min}} \right)^{1/4} \quad (2.7)$$

şeklinde ifade edilir. Ayrıca gürültü faktörünün radar mesafesi hesaplamalarına katılması gerekir. Gürültü tüm radar frekanslarında istenmeyen gerilimleri oluşturur ve istenilen sinyaller algılanamamaktadır.

Gürültü rastgeledir ve güç spektrum yoğunluğu (PSD – Power Spectrum Density) olarak tanımlanır.

N gürültü gücü radarın band genişliğinin (B) bir fonksiyonudur.

$$N = NoisePSD \times B \quad (2.8)$$

Kayıpsız bir antende giriş gürültü gücü,

$$N_i = kT_e B \quad (2.9)$$

ile tanımlanır. Burada $k = 1,38 \times 10^{-23}$ Boltzman sabiti, T_e Kelvin cinsinden etkin gürültü sıcaklığıdır. Her zaman S_{min} ' nun gürültüden büyük olması istenir.

Gürültü faktörü F,

$$F = \frac{(SNR)_i}{(SNR)_o} \quad (2.10)$$

olarak tanımlanır. $(SNR)_i$ giriş sinyal gürültü oranı olarak ifade edilir. Burada $(SNR)_o$ çıkış sinyal gürültü oranıdır. Aynı zamanda gürültü faktörü,

$$F = \frac{S_i / N_i}{S_o / N_o} \quad (2.11)$$

olarak ifade edilebilmektedir. Eşitlikte S_i giriş sinyal gücü, N_i giriş gürültü gücü, S_o çıkış sinyal gücü, N_o çıkış gürültü gücüdür. Eş.2.9, Eş.2.10' da yerine yazıldığında,

$$S_i = kT_e BF(SNR)_o \quad (2.12)$$

olarak giriş sinyalinin gücü elde edilir. Böylece minimum algılanabilir sinyal gücü,

$$S_{\min} = kT_e BF(SNR)_{o_{\min}} \quad (2.13)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu ifade, maksimum radar mesafesi eşitliğine eklenirse, maksimum radar mesafesi aşağıdaki eşitlikteki gibi elde edilir.

$$R_{\max} = \left(\frac{P_T G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 kT_e BF(SNR)_{o_{\min}}} \right)^{1/4} \quad (2.14)$$

3. RADAR KESİT ALANI

Radar Kesit Alanı, tanım olarak hedeflerin üzerine gelen elektromanyetik enerjiyi radar alıcısı yönünde yansıtma kabiliyetlerinin bir ölçüsüdür.

Bir radar vericisinden gönderilen işaret, hedef tarafından yansıtılarak tekrar radar alıcısına eriştiğinde işarettteki zayıflamalar radar uzaklık denkleminde göz önüne alınır ve hedefin yansıtması tek bir σ fonksiyonuyla tanımlanır. Bu σ fonksiyonuna hedefin Radar Kesit Alanı denir [1].

Ayrıca RCS'nin, sinyal dalga boyunun cismin boyutlarına oranla küçük olduğu durumda, hedef cisimden alınan yansıma miktarının aynısını verebilecek bir iletken kürenin fiziksel kesit alanına eşit olacağı da belirtilmiştir [3].

Standart tanımında cismin bir düzlemsel dalga ile uyarıldığı ve cisimden saçılan alanların da serbest uzayda yayıldığı varsayılmıştır [4].

Bu tanımlardan başka, yayılan tüm enerjinin hedef üzerine düşmeyeceği düşünüldüğünde RCS için diğer bir tanım da izdüşümsel geometrik kesit alan, yansıtıcılık oranı ve yönlülük oranı faktörlerinin çarpımı şeklinde ifade edilebilir.

İzdüşüm alanı fiziksel olarak radar tarafından görülen hedef kesitini ifade eder. Yansıtıcılık oranı, hedef tarafından saçılan gücün, yine hedef tarafından alınan güç içindeki yüzdesidir. Hedefin geri kalan gücü soğurduğu varsayılır. Yönlülük oranı ise, hedefin radar yönünde yansıttığı gücün, geri yansımanın tüm yönlerde eşit miktarda (izotropik) olması durumunda radarda alınması beklenen güce oranıdır [6].

Belirtilen bu üç ifade bir eşitlik altında toplanacak olursa, radar kesit alanını göstermek üzere, şu denklem elde edilir:

$RCS = \text{izdüşümsel geometrik kesit alan} \times \text{yansıtıcılık oranı} \times \text{yönlülük oranı}$

Radar kesit alanı, gerek radar gerekse hedef konumunda olan platformların başarılarını etkileyen temel faktörlerden biridir.

RCS radarın seçebilirliğini ifade etmesi açısından önem taşır ve hedefin görünür kısmını tarif eder. Hedef tarafından ne kadar güç akısının tutulmuş olduğunu ve ne kadarının radar alıcısına yansımış olduğunu ölçer.

Radarlar, vericilerinden çıkan elektromanyetik sinyallerinin alıcılarına erişen yansımalarıyla cisimleri algırlar. Hedef durumunda olan cisimlerin, radara en düşük seviyede sinyal yansıtması gerekir. Ancak bu şekilde algılanmazlık veya görünmezliği başarmış olurlar [7].

Hedeflerin sinyal yansıtma özellikleri onların radar imzalarını oluşturur. Cisimlerin radar imzalarının bilinmesiyle, bir radara hangi konumda yaklaşırsa cismin algılanmayacağı kestirilmiş olur. Aynı şekilde, bir cismin radar imzası biliniyorsa ve bu gerekenin üzerinde bir yansıtmayı işaret ediyorsa, o cisim için imza küçültme (signature reduction) yoluna gidilmesine gereksinim duyulur. Bu nedenlerle cisimlerin radar imzaları büyük önem taşır. Radar imzası, radar kesit alanına ve hedefin Doppler spektrumuna bağlıdır ve radar imzasının temelini cismin RCS' si oluşturur [2].

Görünmezlik teknolojileri ve radar imzasında önemli rol oynayan RCS bilgisi ayrıca yer haritacılığı ve yer altında bulunan tehdidin görüntülemesinde kullanılmaktadır.

3.1. RCS Formülasyonu

İkinci bölümde bahsedildiği gibi, elektromanyetik dalga hedefe çarptığında hedef yüzeyinde bir akım indüklenir ve bu akım elektromanyetik enerjinin tüm yönlerde yayılmasını sağlar. Bu yayılan elektromanyetik alan

sayesinde hedefe ait bazı bilgiler tespit edilir. Tüm bu bilgileri içeren parametre Radar Kesit Alanı' dır.

RCS, hedeften yansıyan ve hedefe gelen güçlerin oranı olarak verilir.

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|W_s|}{|W_i|} \quad (3.1)$$

Burada W_s saçılan güç ve W_i gelen gücü ifade eder.

Radar kesit alanının hesaplanması temel olarak hedeften dağılan elektrik alanının bulunması anlamına gelmektedir. Alıcı yönünde saçılan ve hedefe gelen elektrik alanlar E_s ve E_i cinsinden,

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_s|}{|E_i|} \quad (3.2)$$

yazılabilmektedir [1]. Burada R radar ile hedef arasındaki mesafedir.

Elde edilen formülden görüldüğü üzere RCS, radar ile hedef arasındaki mesafe olan R değerine bağlıdır. Bu durumu ortadan kaldırmak için, hedefin radardan yeteri kadar uzakta olduğu farzedilir. Dolayısıyla gelen alan düzlemsel dalga olarak nitelendirilir. Buna ek olarak, hedefin uzak alanında saçılan alanın mesafe (R) ile ilişkisi $1/R$ ' ye yaklaşır. Bundan dolayı radar kesit alanı mesafeden bağımsız hale gelir.

Radar kesit alanında birim genellikle desibel metre kare [dBm^2] olarak kullanılır.

$$\sigma[\text{dBm}^2] = 10 \text{ Log } (\sigma[\text{m}^2]) \quad (3.3)$$

Çizelge 3.1' de çeşitli hedefler için RCS değerleri ondalık ve logaritmik olarak olarak verilmiştir.

Çizelge 3.1. Bazı hedefler için RCS değerleri

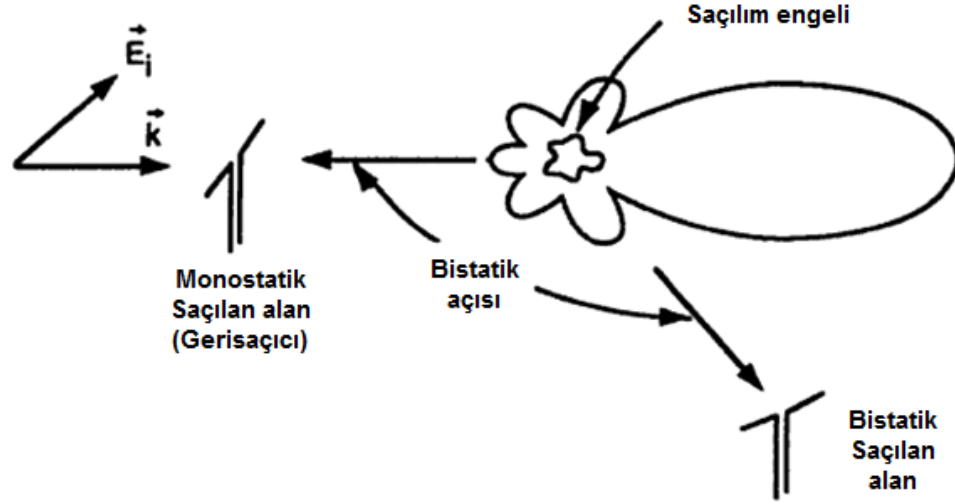
HEDEF	RCS (ondalık ölçek)	RCS (logaritmik ölçek)
Kuş	0,001 m ²	-30 dBm ²
Cruise füzesi	0,01 m ²	-20 dBm ²
İnsan	1 m ²	0 dBm ²
Küçük bot	1 m ²	0 dBm ²
Küçük uçak	1 m ²	0 dBm ²
Büyük füze	10 m ²	10 dBm ²
Büyük uçak	100 m ²	20 dBm ²
Trafik	100 m ²	20 dBm ²
Büyük yolcu gemisi	1000 m ²	30 dBm ²
Tanker	1000 m ²	30 dBm ²

Radar kesit alanı, alıcı ve verici aynı yerde ise monostatik RCS olarak adlandırılır. Monostatik ya da geri saçıcı kesit alanı bir çok radar sistemi için olağan bir durumdur. Bu durumda sadece bir açısal koordinat sistemine ihtiyaç duyulur. Çoğu deneysel ölçümler monostatik kesit alanında yapılır.

Alıcı ve vericinin farklı yerde olduğu durumda ise RCS, bistatik RCS olarak adlandırılır. Analitik RCS tahminlerinin bistatik kesit alanında yapılması daha kolaydır.

Her iki durumda da radar kesit alanı, hedeften çok uzaktaki bir konumda saçılan alan genişliğinin gelen alan genişliğine oranı olarak elde edilir.

Şekil 3.1' de monostatik ve bistatik radar gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Monostatik ve bistatik saçılım

3.2. Saçılma Mekanizmaları

Karmaşık yapıdaki cisimler temelde küre, düzlem plaka veya silindir gibi basit şekillerin bir araya getirilmesi ile oluşturulur. Böylece RCS tahmininde hesaplama karmaşıklığı bir miktar azalır.

Fakat bu karmaşık şekilli cisimlerde RCS değerinin hesaplanmasını daha da zor hale getiren çeşitli durumlar ortaya çıkar. Bu durumlara saçılma mekanizmaları neden olmaktadır ve önemlerine göre şu şekilde sıralanırlar [1]:

Normal yüzey yansımaları

Radar kesit alanını en yüksek düzeyde etkileyen mekanizmalardandır. Gelen dalga boyunun yüzeylerin eğrilik yarıçaplarına göre çok küçük olduğu koşullarda etkili olurlar.

Hareket yönlü taşınan dalgalar

Gelme açısının tümleyeni olarak adlandırılan sıyırma (grazing) açısının, gelme açısından daha büyük olduğu durumda, bir yüzey yürüyen dalgası indüklenebilir.

Küçük değerdeki sıyırma açılarında yürüyen dalga yansımaları yaklaşık olarak aynasal yansımalar kadar önemli hale gelir.

Kenar ve köşe kırınimleri

Köşe ve kenar gibi süreksizlik gösteren yüzeylerden olan saçılmalardır. Bu tür geometriye sahip hedeflerin RCS tahmini için temel ışın-optik yöntemler yerine kırınım terimlerini içeren Geometrik Kırınım Teorisi veya Fiziksel Kırınım Teorisi kullanılır.

Sürünen dalgalar

Yüzey dalgaları, iç bükey yüzeylerde yüzeyi yalayarak gelen dalgalardır. Bu dalgalar dış bükey yüzeylerde zayıflayarak yol alırlar ki, buna da sürünen dalga denir.

Sürünen dalgalar küçük boyutlardaki kürelerden kürenin boyutu ile değişen yansımalara neden olurlar.

Hedef geometrilerine göre bu saçılma mekanizmalarının etkinliği de değişebilmektedir. Bazıları baskın bazıları ise zayıf etki gösterirler.

Radar kesit alanının,

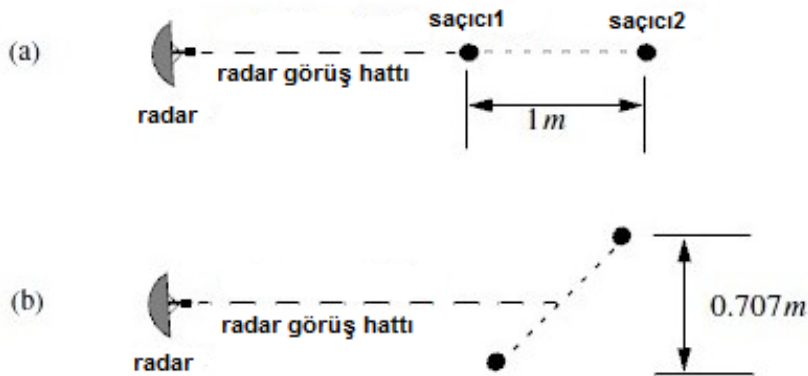
- Alıcı ve vericinin hedefe göre konumları,

- Alıcı ve vericinin polarizasyonları,
- Hedefin şekli ve malzeme özellikleri,
- Hedefin açısal duruşu,
- Sinyalin dalga boyu

gibi bir çok faktöre bağlı olduğu söylenebilir. Bu faktörler özel bir hedef için tasarlandığında dikkate alınmalıdır.

3.3. RCS' nin Açısal Bağımlılığı

Radar kesit alanı radar yön açısının fonksiyonu olarak değişir. Şekil 3.2' de iki birim izotropik saçıcı (1m^2) uzak alan aralığında radar gözlem hattı boyunca yerleştirilmiştir. Radar yön açısı 0° ' dan 180° ' ye değişir.



Şekil 3.2. RCS' nin açısal bağımlılığı a) 0° yön açısı, b) 45° yön açısı [8]

Radardan ölçülen saçıcıların bileşik RCS' si hesaplanır. Bu bileşik RCS iki ayrı radar kesit alanının süperpozisyonundan oluşur. 0° görünüş açısında bileşik $\text{RCS}=2\text{ m}^2$ 'dir. 1. saçıcı faz referansı olarak alınırsa, görüş hattı

değiştiğinde bileşik RCS iki saçıcı arasındaki elektriksel mesafeye karşılık gelen fazdan dolayı değişir.

Örnek olarak, 10 derece yön açısında, iki saçıcı arasındaki elektriksel aralık,

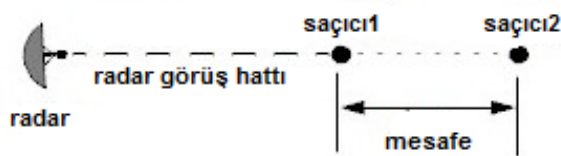
$$e_{aralık} = \frac{2 \times (1.0 \times \cos(10))}{\lambda} \quad (3.4)$$

olarak ifade edilir.

Radar kesit alanı radarın gözlem açısına bağlıdır. İki saçıcı arasındaki etkileşimin bilinmesi radarın karmaşık ve manevralı hedeflerin radar kesit alanının hesaplamasında oldukça önemlidir. Bu durumun iki nedeni vardır. Bu nedenler; gözlem açısının sürekli değişmesi ve hedef yüzeyinde gösterilen bir çok saçıcı noktalarının katkılarından oluşan, karmaşık hedef RCS' sinin gözlenebilmesidir [12].

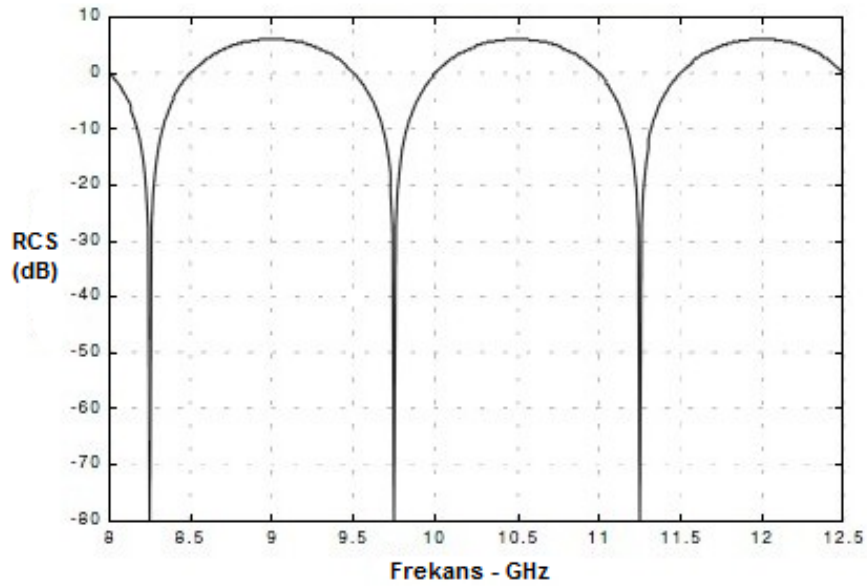
3.4. RCS' nin Frekans Bağımlılığı

Şekil 3.3' de RCS' nin frekansa bağıllığını gösteren deney düzeneği görülmektedir. Burada uzak alandaki iki izotropik saçıcı radar gözlem hattı boyunca yerleştirilmiştir ve 8-12.5 GHz aralığında değişen frekans değerlerinde radar tarafından RCS ölçülmüştür.

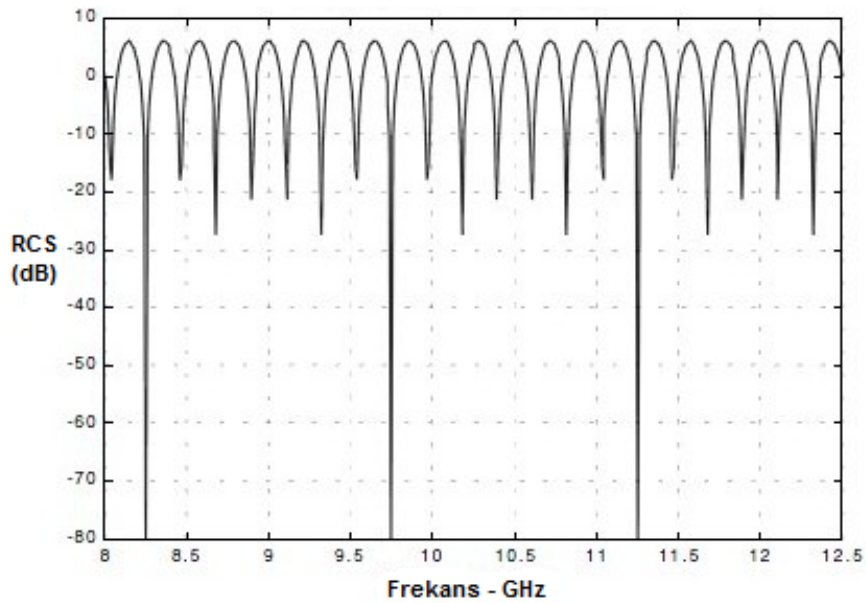


Şekil 3.3. 0.1 m ve 0.7 m' de RCS' nin frekansa bağıllığını gösteren deney [8]

Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’ te 0.1 m ve 0.7 m’ ye yerleştirilmiş saçıcı için RCS – frekans eğrileri görülmektedir.



Şekil 3.4. 0.1 m uzaklıktaki saçıcı için RCS’ nin frekans bağımlılığı [8]



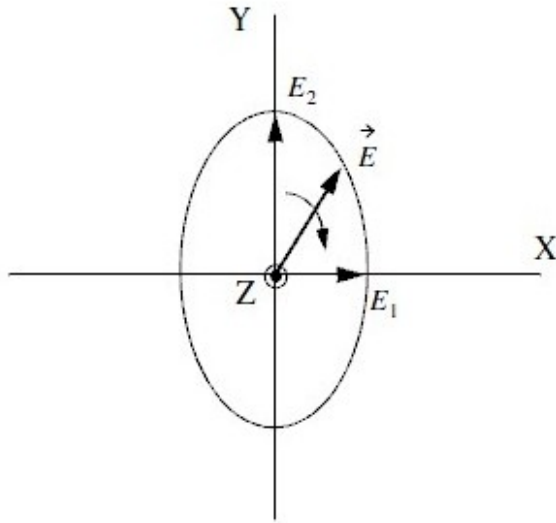
Şekil 3.5. 0.7 m uzaklıktaki saçıcı için RCS’ nin frekans bağımlılığı [8]

Bu iki grafik incelendiğinde, RCS' nin sayısal değerinde bir değişim olmadığı ancak incelenen frekans aralıklarında 0.7 m uzaklıktaki saçıcının RCS eğrilerinin, 0.1 m uzaklıktaki saçıcının RCS eğrilerine göre daha sık olduğu gözlenmektedir.

Düşük frekans değişimi, saçıcı aralığı geniş olduğu durumda ciddi RCS dalgalanmasına neden olur.

3.5. RCS' nin Polarizasyon Bağımlılığı

Şekil 3.6' da z doğrultusunda ilerleyen bir elektromanyetik dalganın x ve y elektrik alan bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 3.6. x ve y doğrultusundaki elektrik alan bileşenleri

x yönündeki elektrik alan bileşeninin genliği

$$E_x = E_1 \sin(\omega t - kz) \quad (3.5)$$

ve y yönündeki elektrik alan bileşeninin genliği

$$E_y = E_2 \sin(\omega t - kz + \delta) \quad (3.6)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada $k = 2\pi / \lambda$ dalga sayısı, ω dalga frekansı, δ E_x ile E_y arasındaki zaman faz açısı, E_1 ile E_2 ise x ve y doğrultusundaki elektrik alan dalga genlikleridir.

Eş.3.5 ve Eş.3.6' nın vektörel toplamından toplam elektrik alan elde edilir.

$$\vec{E} = \hat{a}_x E_1 \sin(\omega t - kz) + \hat{a}_y E_2 \sin(\omega t - kz + \delta) \quad (3.7)$$

Burada $\hat{a}_x$ ve $\hat{a}_y$ x ve y doğrultusundaki birim vektörleri ifade etmektedir.

$E_1=0$ olduğunda dalga y doğrultusunda lineer polarizasyonludur. $E_2=0$ olduğunda ise x doğrultusunda lineer polarizasyonludur. Ayrıca $\delta = 45^\circ$ ve $E_1 = E_2$ olduğu durumda lineer polarizasyonludur. $E_1 = E_2$ ve $\delta = 90^\circ$ koşulunda sol el dairesel polarizasyonlu, $\delta = -90^\circ$ de ise sağ el dairesel polarizasyonlu olur.

Genelde rastgele polarize olmuş elektrik alan, iki dairesel polarizeli alanın toplamı ile ifade edilir.

$$\vec{E} = \vec{E}_R + \vec{E}_L \quad (3.8)$$

Benzer şekilde sol el ve sağ el dairesel polarizasyonlu elektrik alanlar, dikey ve yatay polarizasyonlu elektrik alan cinsinden yazılabilir.

$$\vec{E}_R = \vec{E}_V + j\vec{E}_H \quad (3.9)$$

$$\vec{E}_L = \vec{E}_V - j\vec{E}_H \quad (3.10)$$

Eş.3.9 ve Eş.3.10 çözümünden E_R sağ el dairesel polarizasyonlu elektrik alan ve E_L sol el dairesel polarizasyonlu elektrik alan değerleri elde edilir. Burada E_V yatay, E_H ise dikey elektrik alanları ifade eder.

$$E_R = \frac{E_H - jE_V}{\sqrt{2}} \quad (3.11)$$

$$E_L = \frac{E_H + jE_V}{\sqrt{2}} \quad (3.12)$$

Bu eşitlikler matris formunda yazılabilir ve,

$$\begin{bmatrix} E_R \\ E_L \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ 1 & j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_H \\ E_V \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} E_H \\ E_V \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$\begin{bmatrix} E_H \\ E_V \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ j & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_R \\ E_L \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} E_R \\ E_L \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

ifadeleri elde edilebilir.

Hedef saçılım matrisi

Radar kesit alanı gelen ve yansıyan dalga polarizasyonunun bir fonksiyonudur. Gelen dalga ile hedef ilişkisinin daha kapsamlı tanımı polarizasyon saçılım matrisi $[S]$ tarafından verilir. Saçılım matrisi, saçılan elektrik alan vektörünün $\vec{E}^s$ gelen elektrik alan vektörü $\vec{E}^i$ ile ilişkisini gösterir.

$$\vec{E}^s = \vec{S} \times \vec{E}^i \quad (3.15)$$

$$\begin{bmatrix} \vec{E}_1^s \\ \vec{E}_2^s \end{bmatrix} = [\vec{S}] \begin{bmatrix} \vec{E}_1^i \\ \vec{E}_2^i \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Hedefe, lineer polarizasyonlu bir elektromanyetik dalga çarptığında, hedeften geri saçılan alan,

$$\begin{bmatrix} E_1^s \\ E_2^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1^i \\ E_2^i \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

şeklinde ifade edilir. i ve s sırası ile gelen ve saçılan alanları belirtmektedir. Yukarıdaki eşitlikte '1' H ve R, '2' L ve V olarak gösterilebilir.

Radar kesit alanı, saçılım matrisi ile ilişkilendirildiğinde,

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} \end{bmatrix} = 4\pi r^2 \begin{bmatrix} |s_{11}|^2 & |s_{12}|^2 \\ |s_{21}|^2 & |s_{22}|^2 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

ifadesi elde edilir.

Hedefin radar kesit alanı hesaplanırken ilk olarak saçılım matrisi belirlenir ve RCS iletilen ve saçılan alan polarizasyonunun kombinasyonu şeklinde ifade edilir.

Çeşitli dik polarizasyona sahip dalga tipleri için elde edilen eşitlikler düzenlendiğinde,

$$\begin{bmatrix} E_H^s \\ E_V^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{HH} & s_{HV} \\ s_{VH} & s_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_H^i \\ E_V^i \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$\begin{bmatrix} E_R^s \\ E_L^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{RR} & s_{RL} \\ s_{LR} & s_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_R^i \\ E_L^i \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

ifadeleri elde edilir. Eş.3.13' de dönüşüm matrisi $[T]$ kullanıldığında, lineer saçılım bileşenlerinden dairesel saçılım bileşenleri bulunabilir.

$$\begin{bmatrix} s_{RR} & s_{RL} \\ s_{LR} & s_{LL} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} s_{HH} & s_{HV} \\ s_{VH} & s_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} [T]^{-1} \quad (3.21)$$

Bileşenler ayrı ayrı şu şekilde ifade edilebilir.

$$s_{RR} = \frac{-s_{VV} + s_{HH} - j(s_{HV} + s_{VH})}{2} \quad (3.22)$$

$$s_{RL} = \frac{s_{VV} + s_{HH} + j(s_{HV} - s_{VH})}{2} \quad (3.23)$$

$$s_{LL} = \frac{-s_{VV} + s_{HH} + j(s_{HV} + s_{VH})}{2} \quad (3.24)$$

$$s_{LR} = \frac{s_{VV} + s_{HH} - j(s_{HV} - s_{VH})}{2} \quad (3.25)$$

Benzer şekilde lineer saçılım bileşenleri,

$$\begin{bmatrix} s_{HH} & s_{HV} \\ s_{VH} & s_{VV} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} s_{RR} & s_{RL} \\ s_{LR} & s_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} [T] \quad (3.26)$$

şeklindedir. Ayrı ayrı bileşenleri ise,

$$s_{HH} = \frac{-s_{RR} + s_{RL} + s_{LR} - s_{LL}}{2} \quad (3.27)$$

$$S_{VH} = \frac{j(s_{RR} - s_{LR} + s_{RL} - s_{LL})}{2} \quad (3.28)$$

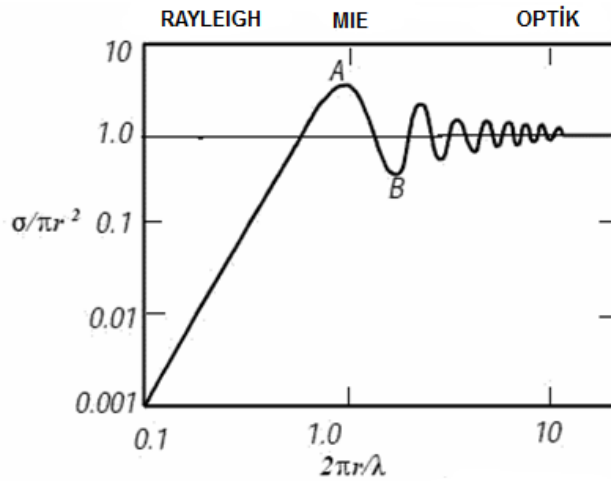
$$S_{VV} = \frac{s_{RR} + js_{RL} + s_{LR} + s_{LL}}{2} \quad (3.29)$$

$$S_{HV} = \frac{-j(s_{RR} + s_{LR} - s_{RL} - s_{LL})}{2} \quad (3.30)$$

eşitlikleri ile verilebilir.

3.6. Saçılım Bölgeleri

Önceki bölümde belirtildiği gibi radar kesit alanı, gelen dalganın frekansına bağlıdır. Hedefin RCS' sini belirgin şekilde değiştirebilecek üç frekans bölgesi vardır. Bu bölgeler hedef boyutunun gelen dalga boyu cinsinden ifadesine göre tanımlanır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Bir kürenin radar kesit alanı ve saçılım bölgeleri

Alçak frekans (Rayleigh) bölgesi

Bu frekanslarda, gelen dalganın faz değişimi hedef boyutu boyunca düşüktür. Dolayısıyla hedef yüzeyinde indüklenen akım genlik ve faz olarak yaklaşık sabittir. Yarıçapı radar dalga boyunun onda birinden daha küçük olan küresel parçacıklar bu bölgede saçılırlar.

Rezonans (Mie) bölgesi

Bu bölgede radar dalga boyu ile hedef yaklaşık olarak aynıdır. RCS dalga boyundaki değişimlere bağlı olarak geniş bir alanda değer almaktadır.

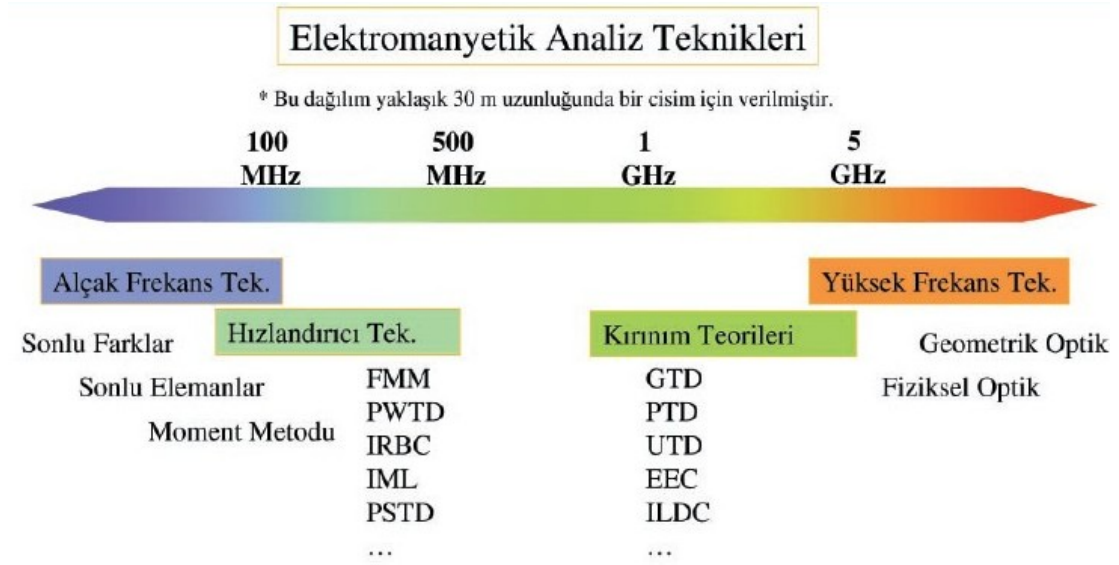
Yüksek frekans bölgesi (Optik bölge)

RCS yaklaşık olarak hedefin alanıyla aynı büyüklüktedir. RCS optik değere yaklaştığından dolayı bu bölgeye Optik Bölge denilir.

Optik bölgede frekans değerleri yüksektir ve bağımsız saçınım merkezleri kavramı geçerlilik kazanır. Ayrıca bu bölgede hedef parça parça incelenir.

3.7. RCS Tahmin Yöntemleri

1980 sonrası dönemdeki RCS hesaplama teknikleri, optik tabanlı yaklaşımlarla çalışan yüksek frekans teknikleri ve elektromanyetik problemi tam olarak çözmeyi hedefleyen alçak frekans teknikleri olarak iki temel gruba ayrılabilir. Şekil 3.8’ de bir cisim için bu tekniklerin RCS hesabında kullanılabileceği frekans bölgeleri gösterilmiştir [7].



Şekil 3.8. RCS hesaplama teknikleri

3.7.1. Sayısal yöntemler

RCS sayısal tahmin yöntemleri, Moment Metodu (MoM) ve Zamanda Sonlu Farklar Yöntemi (FDTD)' dir. Bu yöntemler, incelemesi yapılan hedeflerin boyutlarının gelen dalga boyuna göre çok küçük olduğu Rayleigh bölgesi olarak da adlandırılan alçak frekans bölgesinde, saçılan alanın hesaplanmasında kullanılır.

MoM, Moment metodu

Moment Metodu (MoM), günümüzde elektromanyetik problemlerin çözülmesinde başarıyla kullanılan bir frekans bölgesi yöntemidir.

Green fonksiyonlarından oluşan integral denklemi ana formülasyonunu oluşturur. MoM, sağ tarafında dürtü fonksiyonu şeklinde bir terim bulunan Green fonksiyonu problemidir. İncelenen yapıya ait Green fonksiyonunun analitik olarak bulunması ve bu yapı üzerinde oluşan yüzey akımlarının sayısal olarak hesaplanmasına dayanır [1].

MoM yöntemi, sadece iletken yapılara ve homojen kayıpsız dielektriklere uygulanır. Karmaşık ve çok malzemeli yapılarda etkin bir şekilde kullanılmaz.

MoM yönteminde, RCS tahmini probleminde çok doğru sonuçlar vererek kesin bir sonuç elde edilmesi mümkün olur. MoM yöntemi özellikle iletken tellerden oluşmuş üç boyutlu yapıların saçılan alanlarının hesaplanmasında oldukça başarılıdır.

FDTD, Zamanda sonlu farklar yöntemi

Zamanda Sonlu Farklar (FDTD) yöntemi, birçok elektromanyetik problemin sayısal çözümünde kullanılabilen bir yöntemdir.

Yöntem, Maxwell denklemlerindeki kısmi türev operatörlerinin merkezi farklara dayalı sonlu farklar karşılıkları ile değiştirilip, doğrudan zaman ve konum domenlerinde sayısallaştırılmasına dayanır [5].

Maxwell eşitlikleri ve sınır koşulları, hedefin yüzeyinde ve kesitlere ayrılmış bölgelerde uygulanır.

FDTD yönteminin uygulanmasında en önemli kriter, çözülmeye çalışılan problemin fiziğinin iyi anlaşılması ve her adımda izlenmesidir [9].

Moment Metodu' nda olduğu gibi bu yöntemde de RCS tahmini probleminde kesin bir çözüm elde edilmektedir.

3.7.2. Analitik yöntemler

RCS tahmini için, yüksek frekans bölgesi varsayımlarına dayanan ve daha basit hesaplamalar gerektiren yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler,

- Geometrik Optik (Geometric Optics, GO)
- Fiziksel Optik (Physical Optics, PO)
- Geometrik Kırınım Teorisi (Geometric Theory of Diffraction, GTD)
- Fiziksel Kırınım Teorisi (Physical Theory of Diffraction, PTD)
- Eşdeğer Akımlar Metodu (Method of Equivalent Currents, MEC)

şeklinde sıralanabilir. Bu yöntemlerden her birinin farklı avantajları olabildiği gibi yetersiz kaldıkları alanlar da olabilir.

Hedef boyutunun gelen dalga boyuna göre çok büyük olduğu optik bölge olarak da adlandırılan yüksek frekans bölgesinde kullanılabilecek yaklaşık metotlar Geometrik Optik (GO) ve Fiziksel Optik (FO) yöntemleridir.

Geometrik Optik (GO)

Yüksek frekans bölgesinde kullanılan yaklaşık yöntemlerin ilk olanı Geometrik Optik yöntemidir.

GO teorisi ışın tüpü içinde enerjinin korunumuna dayanır. Gelen dalga, çok sayıda ışının birleşiminden temsil edilebilir. Işın yüzeye çarptığında, enerjinin bir kısmı yansır ve diğer bir kısmı ise yüzey boyunca iletilir. Yansıyan ve iletilen ışınların genlik ve fazları yüzeyin özelliklerine bağlıdır. Eğer yüzey mükemmel iletken bir yüzey ise yansıma mükemmel olur.

Yüzeyin eğrilik derecesi ve cismin yapısına bağlı olarak yansıyan ve iletilen ışınlar birbirinden ayrılabilir ya da birbirlerine doğru hareket edebilirler. Bu bağımlılık, optik dalga boyları gibi radar dalga boylarında merceklerin ve yansıtıcıların tasarımının temelini oluşturur [10].

Geometrik Optikte, saçılan alanın hesaplanmasında elektromanyetik enerjinin izlediği yollar ışınlarla modellenir. Bu yollar, direkt, yansımış ve kırınımına uğramış terimler içerebilir.

Yaygın kullanımı ile GO, direkt yollardan başka yansıyan ışın yollarını içerir ancak kırınım terimlerini içermez.

GO' da basit ışın yansıma yöntemleri kullanarak cisimlerden geri saçılmalar bulunabilir. Ancak, GO yönteminde karanlık bölgeler olarak adlandırılan cisimlerin doğrudan aydınlatılmayan yüzeylerinde saçılmanın ne şekilde oluştuğu belirlenememektedir. Bu nedenle bu saçılan alanlar hesaba katılmadığı için toplam saçılan alan hatalı olarak bulunur. Fakat, GO' da cisimlerin gölgeli kısımlarında saçılma oluşacaktır ve hesaba katılmaktadır [11].

Yüksek frekans teknikleri daima elektromanyetik dalga'nın davranışı hakkında belirli varsayımlarla çalışırlar ve bu varsayımlar daima hatalar üretebilirler.

4. FİZİKSEL OPTİK YÖNTEMİ İLE RCS HESABI

Fiziksel Optik, iletken yüzeye sahip geniş hedeflerin radar kesit alanlarının hesaplamasında kullanılır [12].

Bir elektromanyetik dalga hedef yüzeyine geldiğinde, hedefin aydınlatılan bölgelerinde yüzey akımı oluşur. Fiziksel Optik yöntemine göre, hedeflerden saçılan alan, gelen dalganın ve hedef yüzeyi üzerinde indüklenen bu yüzey akımlarının bulunması ile hesaplanır. Yüzey akımları, mükemmel iletken ve eğrilik yarıçapları dalga boyuna göre yeterince büyük yüzeylerde, yüzey süreksizlikleri (köşeler, kenarlar vs.) ihmal edilmek suretiyle belirlenir.

FO yönteminde hedef yüzeyinin çok büyük olduğu ve dalga boyu dikkate alındığında yüzeyin düz olduğu kabul edilir. Yüzey akımının ise yüzeye teğet olduğu farzedilir.

Optik bölgede çalışıldığında incelenecek hedefler düzlemlere bölünürler. Hedeflerin üçgen modellemeleri Autocad, CAD gibi programlarla yapılabilir. Geniş hedeflerin yüzeyi de büyük sayıda üçgenler ile modellenirler. Bu üçgenlerin her birinin FO integrali, hesaplama karmaşıklığını artırır.

Modelleme işlemi tamamlandıktan sonra her bir üçgen için saçılan alan hesaplanır ve her üçgenin katkısı hesaba katılarak toplam saçılan alan bulunur.

Düzlem olduğu takdirde hedef yüzeyi, geniş üçgen düzlemlere ayrılırsa yüzey empedansı, yüzey birim normali gibi yüzey özellikleri değişmeyecektir. Bu geniş yüzeyde FO integralinin bulunması hesaplama karmaşıklığını değiştirmez.

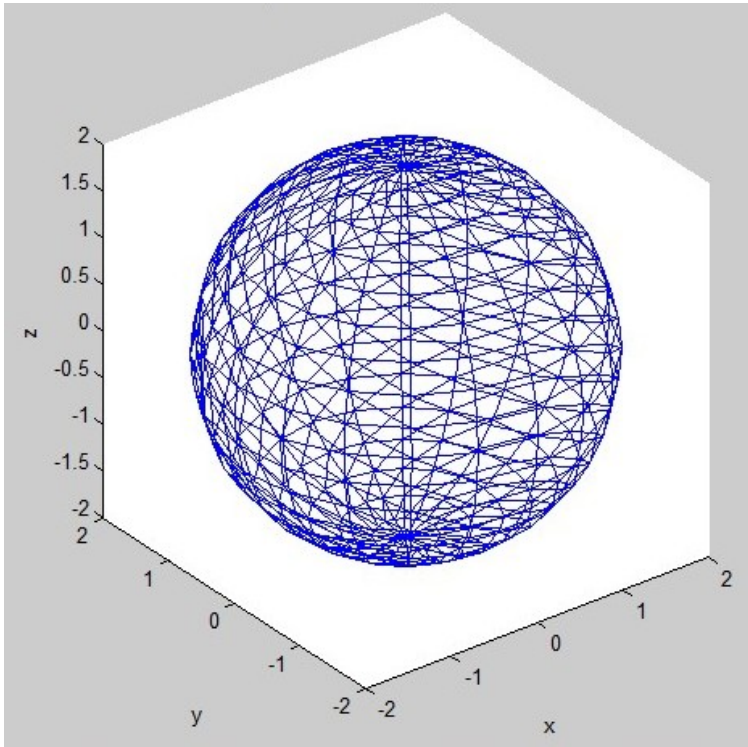
4.1. Üçgen Yüzeylerle Hedef Yaklaşımı

Büyük nesnelerin radar kesit alanlarını hesaplayabilmek için yüksek frekans yöntemlerinin kullanılması gereklidir. Yaygın olarak kullanılan yüksek frekans yöntemlerinden biri olan Fiziksel Optik yönteminde, basit olsa da analitik olarak kolaylıkla tanımlanamayan karmaşık şekilli nesneler düz plakalar halinde modellenmelidir.

Fiziksel Optik integralini hesaplamak, aynı zamanda, düzlemsel yüzeyler kullanılarak saçıcı yüzeyi için yaklaşık çözümler sunar [13].

Hedef şekli, yüzeyde bir çok sayıda noktanın kartezyen koordinatları cinsinden tanımlanır. Daha sonra yüzey, bu noktalarla ilişkili düzlemsel üçgen yüzeylere bölünür.

Şekil 4.1’ de üçgen yüzeylere ayrılmış bir küre gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Bir kürenin üçgen yüzeyler yaklaşımı

Hedef yüzeyi için üçgenleme işlemi, yüzeyi z eksenine dik bir şekilde bölmekle başlar. $z = z_m$ ($m=1, \dots, N$) her bölüm için hedef yüzeyi $S(m)$ noktalarıyla tanımlanır. Böylece $\sum_{m=1}^N \sum_{s=1}^{S(m)} (x_{sm}, y_{sm}, z_m)$ noktalarının toplamı elde edilir.

Her yüzeyin boyutu yeterince küçük olmalıdır. Böylece gerçek yüzey yeterli doğrulukla tahmin edilebilir. Bu her yüzey alanının, gerçek yüzey toplam alanının belirli bir kısmını aşmaması gerektiği anlamına gelir.

Yüzey normalinin yüzeyde küçük mesafelerle değiştiği konumda, bölge eğer yüzey alanının maksimum değerini belirlemede referans olarak alınıyorsa, yüzeyin tüm tiplerine bu kısıtlama uygulanır. Bu ekstra bir çalışma süresine mal olabilir. Ancak tam doğruluk için bu gereklidir.

Yüzeylerin boyutunu sınırlandıran diğer bir kısıtlama ise, yüzey merkez noktasının normal vektörünün, tüm yüzey boyunca bir normal vektör olarak farzedilebilmesidir. Yüzey boyutu küçüldüğü takdirde bu varsayım geçerli olur.

Yüksek frekansta alanların, saçıcı boyutu parametreleri ve ortam özelliklerinin, dalga boyu cinsinden mesafe boyunca az miktarda değiştiği bir sistemde var olduğu kabul edilir. Diğer bir deyişle, yüksek frekans yöntemi uygulamasını ne kısıtlarsa kısıtlasın saçıcı boyutu, verilen frekansta dalga boyu cinsinden büyük olmalıdır. Bu yüzden, adı geçen kısıtlama zaten tatmin edici olacaktır.

Üçgenlere bölünen her bir yüzey, kenar uzunluğu $\lambda/10$ ' dan büyük olmayan eşkenar üçgenler olarak farzedilir. Bu uzunluk yüksek frekans yaklaşımı ile doğru tahmin için yeteri kadar küçüktür. Küçük değerler daha doğru sonuçlar

elde etmekte kullanılabilir. Ancak bu hesaplama karmaşıklığını artırır. Ayrıca daha uzun bir çalışma zamanı gerekecektir ve maliyeti artıracaktır [14].

FO integralinin nümerik değerlendirilmesinde, her üçgen parçanın katkıları ayrı ayrı hesaplanmıştır. Böylece, üçgenlerin yeterince küçük olması ile üçgen normal vektörü, tüm yüzey boyunca sabit kabul edilir.

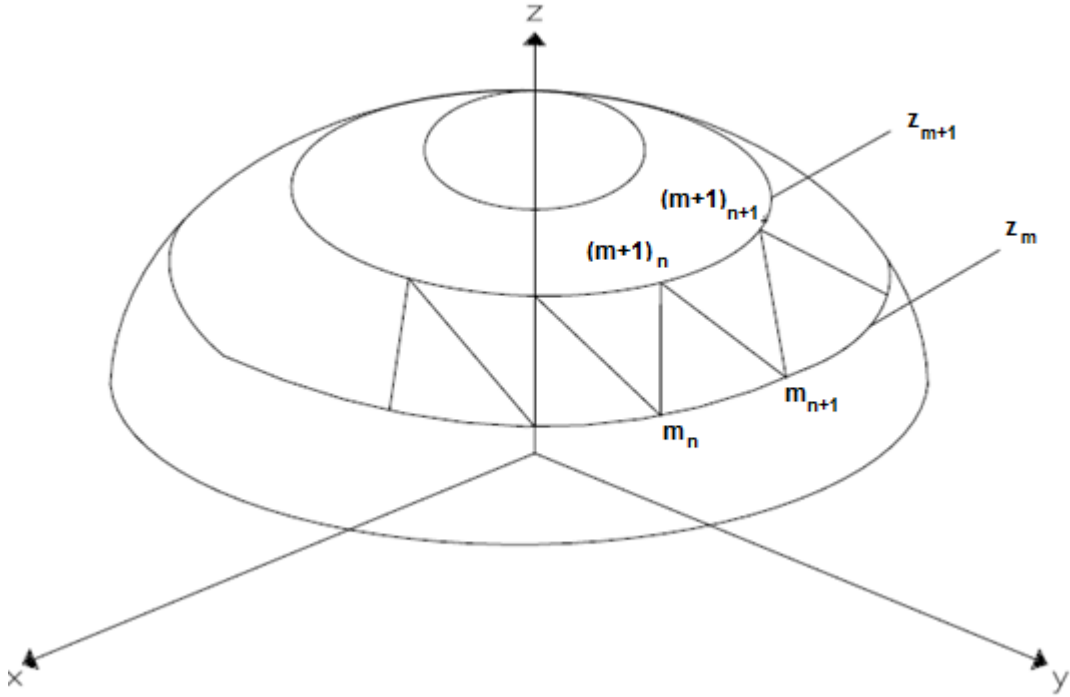
Hedef yüzeyi ilk olarak sınır değerlerinden tanımlanır. Bu bilgi kullanılarak hedef, z eksenine boyunca birkaç düzleme ayrılır.

Hedef yüzeyini tanımlamada kullanılan düzlem sayısı bilinmemektedir ve belirlenmesi gerekir. z eksenine boyunca bu düzlemlerin eşit olarak yerleştirilmemiş olabileceği dikkate alınmalıdır. Her bir düzlemdeki nokta sayısı biliniyorsa, sonraki aşama, düzlemlerin z bileşenlerinin bulunmasıdır. Her düzlemde alınan nokta sayıları ile toplam yüzey alanı arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla, iki birbirini izleyen düzlem arasındaki yüzey alanı hesaplanır.

Daha sonra, m. ve (m+1). düzlemler arasındaki bölgeyi kaplaması gereken üçgenlerin sayısı, alanın $\lambda^2 / 200$ 'e bölünmesi ile belirlenir. $\lambda^2 / 200$, her üçgenin alanı için önceden tanımlanmış bir değerdir. Düzlemlerden biri sadece tek bir noktadan oluşmadıkça, üçgen sayısının her düzlemde alınan noktaların sayısının iki katı olduğu dikkate alınmalıdır.

Üçgen sayısı T olarak belirlenirse T/2 eşit aralıkla yerleştirilmiş noktalar her bir düzlem için seçilir. (alınan nokta sayısı her düzlem için aynıdır). Üçgenlerin köşesi için Kartezyen koordinatlar belirlidir.

Ayrıca her üçgen için belirlenmesi gereken parametreler, vektör alanı ve orta noktasının koordinatlarıdır. Belirlenen bu parametreler köşelerin koordinatlarını kullanır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Yüzey üzerindeki üçgen parçalar [15]

n. nokta bir üçgen oluşturmuştur. Bir sonraki üçgenin köşeleri, (m+1) düzlemindeki n. ve (n+1). noktaları ve m düzlemindeki (n+1). noktasıdır. Bu işlem, tüm yüzeylerin ilk noktalarından başlayarak ulaşılan son noktalara kadar devam eder. m ve (m+1) düzlemleri arasındaki bölge tamamlandığında, bu işlem (m+1) ve (m+2) düzlemleri arasındaki bölge için devam eder.

m ve (m+1) düzleminde bir noktanın küresel koordinatları (R, θ_m, ϕ_m) ve $(R, \theta_{m+1}, \phi_{m+1})$ biçiminde tanımlanır. Burada,

$$\theta_m = \arccos \frac{z_m}{R} \quad (4.1)$$

$$\theta_{m+1} = \arccos \frac{z_{m+1}}{R} \quad (4.2)$$

şeklinde ifade edilir. Bu iki düzlem arasındaki yüzey alanı,

$$A_{m,m+1} = \int_{\theta_{m+1}}^{\theta_m} \int_0^{2\pi} \sin \theta r^2 d\theta d\phi \quad (4.3)$$

eşitliği ile elde edilir. İntegral sonucu yüzey alanı,

$$A_{m,m+1} = 2\pi r^2 (\cos \theta_{m+1} - \cos \theta_m) \quad (4.4)$$

olarak elde edilir.

Eş.4.1, Eş.4.2 ve Eş.4.4 kullanılarak, m ve (m+1) düzlemleri arasındaki yüzey alanı,

$$A_{m,m+1} = 2\pi r^2 \left(\frac{z_{m+1} - z_m}{R} \right) \quad (4.5)$$

şeklinde bulunur. Buradan üçgen sayısı T,

$$T = \frac{A_{m,m+1}}{\frac{\lambda^2}{200}} = \left(\frac{400\pi R^2}{\lambda^2} \right) \left(\frac{z_{m+1} - z_m}{R} \right) \quad (4.6)$$

eşitliği ile elde edilir.

Her düzlemde alınan nokta sayısı N biliniyor ise, T=2N durumu ve Eş.4.6

kullanılarak z_{m+1} ifadesi z_m cinsinden yazılabilir.

$$z_{m+1} = z_m + \frac{\lambda^2 N}{200\pi R} \quad (4.7)$$

$z=0$ ' dan başlayarak Eş.4.7' nin kullanılması ile her düzlemin z bileşeni bulunur. Bu eşitlik, Z_{m+1} R' yi geçene kadar uygulanır.

z değerleri bulunduğunda, Şekil 4.4' ten, köşe koordinatlarının kullanılması ile m ve $(m+1)$ düzlemleri arasındaki bölgenin içindeki her bir yüzeyin alanı ve orta noktası bulunur [15].

(X_i, Y_i, Z_i) tüm yüzeylerin orta noktaları için koordinatlar $(k = 1 : N)$ olmak üzere,

$$X_{2k-1} = \frac{x_{(m+1)_k} + x_{(m+1)_{k+1}} + x_{m_{k+1}}}{3} \quad (4.8)$$

$$X_{2k} = \frac{x_{(m+1)_k} + x_{m_k} + x_{m_{k+1}}}{3} \quad (4.9)$$

$$Y_{2k-1} = \frac{y_{(m+1)_k} + y_{(m+1)_{k+1}} + y_{m_{k+1}}}{3} \quad (4.10)$$

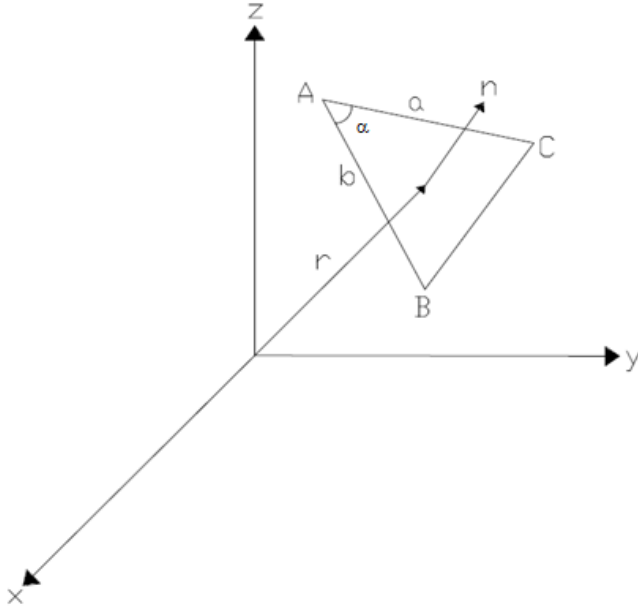
$$Y_{2k} = \frac{y_{(m+1)_k} + y_{m_k} + y_{m_{k+1}}}{3} \quad (4.11)$$

$$Z_{2k-1} = \frac{z_{(m+1)_k} + z_{(m+1)_{k+1}} + z_{m_{k+1}}}{3} \quad (4.12)$$

$$Z_{2k} = \frac{z_{(m+1)_k} + z_{m_k} + z_{m_{k+1}}}{3} \quad (4.13)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada N , düzlem başına nokta sayısını vermektedir.

Şekil 4.3' te yüzey üzerinde bir üçgen parçası gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Yüzey üzerinde bir üçgen parça

Üçgen yüzeyin alanı,

$$Alan = \frac{1}{2} |\overrightarrow{AB} \times \overrightarrow{AC}| = \frac{1}{2} ab \sin \alpha \quad (4.14)$$

şeklinde elde edilir.

Şekilde a ve b üçgenin iki kenarıdır, $\hat{n}$ normal vektörü, üçgenin orta noktasındaki birim vektördür ve,

$$\hat{n} = \frac{\overrightarrow{AB} \times \overrightarrow{AC}}{|\overrightarrow{AB}| |\overrightarrow{AC}|} \quad (4.15)$$

olarak ifade edilir.

Fiziksel Optik yüzey integralinin hesaplanması için, Eş.4.8 ile Eş.4.13' te belirtilen üçgenlerin orta noktaları ve $\hat{n}$ her bir üçgen için belirlenir.

4.2. Fiziksel Optik Formülasyonu

Dalga boyuna göre büyük, iletken ve düzlemsel yüzeyler için FO yaklaşımı geçerlidir [16].

Fiziksel Optik, hedefi elektriksel bir büyüklük olarak kabul eden yüksek frekans yöntemidir.

Mükemmel iletken bir yüzeyde, kaynağın toplam elektromanyetik alanı, gelen alanlar (E^i, H^i) ve yüzeyden saçılan alanların (E^s, H^s) süperpozisyonu olarak ifade edilebilir. Saçılan alanlar, saçıcı yüzeyinde indüklenen gerçek akımlar boyunca ışıma integralleri cinsinden elde edilebilirler.

Fiziksel Optik yönteminde, saçıcı gövdenin yüzeyinde oluşan alanların her biri ayrı bir GO yüzey alanı olarak kabul edilir. Fiziksel Optik yöntemi, geometrik optik akımlarından verilen saçıcı yüzeyi üzerinde indüklenen yüzey akımlarının direkt olarak gelen alandan aydınlatıldığını, yüzeyin karanlık kısımlarında ise sıfır olduğunu farzeder [1]. Fiziksel Optikte, mükemmel bir iletken için yüzey akımı,

$$\bar{J}_{FO} = \begin{cases} 2\hat{n} \times \overline{H^i} \\ 0 \end{cases} \quad (4.16)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada $\hat{n}$, yüzeyden dışarı doğru olan birim normal vektörünü, $\overline{H^i}$ gelen manyetik alan vektörünü ifade eder. $2\hat{n} \times \overline{H^i}$ yüzey akım değeri aydınlık bölgede geçerli olmaktadır. Karanlık bölgede ise

yüzey akımı 0' dır. Bu durum ancak cisim boyutlarının dalga boylarından oldukça büyük olduğu koşullarda geçerli olur.

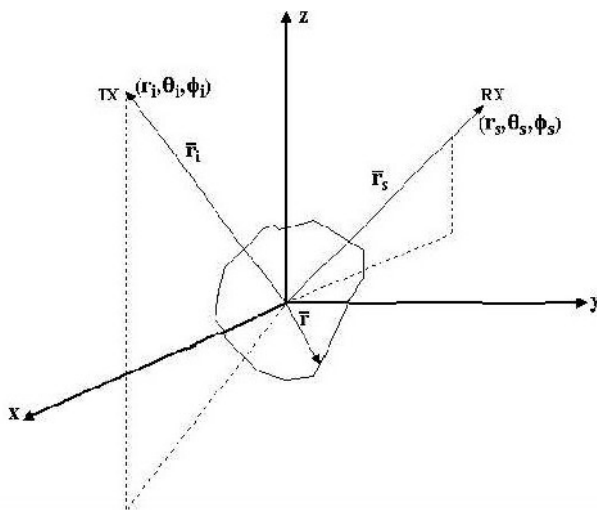
Bu indüklenen akım hesaplanırken, $\hat{n}$ saçılan alanı bulmak için ışıma integralinde kullanılır.

Eğer kaynağın hedefi aydınlatması yeterince uzak bir mesafede ise gelen alan düzlem dalga olarak alınabilir. Gelen elektrik alan şiddeti,

$$\vec{E}^i = (E_\theta^i \vec{\theta}^i + E_\phi^i \vec{\phi}^i) e^{jk\hat{r}_i \cdot \vec{r}} \quad (4.17)$$

ifadesi ile verilir. Burada (r_i, θ_i, ϕ_i) kaynağın küresel koordinatları ve $(\hat{r}_i, \hat{\theta}_i, \hat{\phi}_i)$ birim vektörleridir. Hedef yüzeyi üzerinde rastgele bir nokta (r, θ, ϕ) koordinatlarına atanmıştır. Böyle bir nokta, üçgenin ortası olarak kabul edilir. Bu koordinatların üçgenleme işleminden sonra bilindiği dikkate alınmalıdır.

Benzer şekilde, gözlem noktası (r_s, θ_s, ϕ_s) koordinatlarına ve $(\hat{r}_s, \hat{\theta}_s, \hat{\phi}_s)$ birim vektörlerine atanmıştır. Şekil 4.4' te bu parametreler gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Vektör tanımları [5]

Gelen manyetik alan şiddeti,

$$\begin{aligned}\overline{H}^i &= \frac{1}{\eta} \hat{k} \times \overline{E}^i \\ \overline{H}^i &= (E_\theta^i \hat{\theta}^i - E_\phi^i \hat{\phi}^i) \frac{e^{jk\hat{r}_i \cdot \bar{r}}}{\eta}\end{aligned}\quad (4.18)$$

şeklinde elde edilir. $\hat{k}$ propagasyon vektörü ve η serbest uzay empedansı, $\hat{r}_i$ kaynağın birim vektörü, $\bar{r}$ ise hedef üzerinde belirlenen noktanın birim vektörüdür.

Saçılan alan için vektör potansiyeli ise,

$$\overline{A} = \frac{\mu}{4\pi r_s} e^{-jkr_s} \iint \overline{J} e^{-jk\hat{r}_s \cdot \bar{r}} ds \quad (4.19)$$

olarak yazılır.

Eğer gözlem noktası uzak alanda bulunuyorsa saçılan elektrik alan,

$$\begin{aligned}\overline{E}^s &= -j\omega \overline{A} \\ \overline{E}^s &= -\frac{j\omega\mu}{2\pi r_s} e^{-jkr_s} \iint \hat{n} \times \overline{H}_i e^{jk\hat{r}_s \cdot \bar{r}} ds\end{aligned}\quad (4.20)$$

şeklinde ifade edilir. Burada r_s gözlem noktasının küresel koordinatı, $\hat{r}_s$ gözlem noktasının birim vektörüdür. Eş.4.18 ve Eş.4.20 kullanılarak aşağıdaki ifadenin çözümü ile saçılan alan bulunur.

$$\overline{E}^s = \frac{e^{-jkr_s}}{r_s} (E_\theta^i \hat{\theta}_i - E_\phi^i \hat{\phi}_i) \times \left(\frac{j}{\lambda} \right) \iint \hat{n} e^{jk(\hat{r}_i + \hat{r}_s) \cdot \bar{r}} ds \quad (4.21)$$

Eş.4.21' in sağındaki terime eşit yeni bir vektör olan $\bar{S}$ tanımlanmaktadır.

$$\bar{S} = \left(\frac{j}{\lambda} \right) \iint \hat{n} e^{jk(\hat{r}_i + \hat{r}_s) \cdot \bar{r}} dS \quad (4.22)$$

Bu durumda saçılan alan aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\bar{E}^s = (E_\theta^s \hat{\theta}_s + E_\phi^s \hat{\phi}_s) \frac{e^{-jkr_s}}{r_s} \quad (4.23)$$

Eş.4.21, Eş.4.22 ve Eş.4.23' ün değerlendirilmesi ile saçılan elektrik alan bileşenleri,

$$\bar{E}_\theta^s = (E_\theta^i \hat{\phi}_i \times \hat{\theta}_s + E_\phi^i \hat{\theta}_s \times \hat{\theta}_i) \times \bar{S} \quad (4.24)$$

$$\bar{E}_\phi^s = (E_\theta^i \hat{\phi}_i \times \hat{\phi}_s + E_\phi^i \hat{\phi}_s \times \hat{\theta}_i) \times \bar{S} \quad (4.25)$$

eşitlikleri ile elde edilmektedir. Bu eşitliğin aşağıdaki biçimde tek matris eşitliğine çevrilebildiği görülür.

$$\begin{pmatrix} E_\theta^s \\ E_\phi^s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (\hat{\phi}_i \times \hat{\theta}_s) \times \bar{S} & (\hat{\theta}_s \times \hat{\theta}_i) \times \bar{S} \\ (\hat{\phi}_i \times \hat{\phi}_s) \times \bar{S} & (\hat{\phi}_s \times \hat{\theta}_i) \times \bar{S} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_\theta^i \\ E_\phi^i \end{pmatrix} \quad (4.26)$$

Eş.4.26' daki 2×2 matris saçılım matrisidir. Saçılım matrisinin bileşenlerini bulmak için sırasıyla kaynağın, gözlem noktasının ve hedef üzerinde belirlenen noktanın birim vektörleri $\hat{r}_i, \hat{r}_s, \hat{r}$ ve $\hat{n}$ değerleri ile Eş.4.22 çözülmelidir. Bu değerler, üçgenleme işleminden sonra kullanılabilir.

Eşitlik 4.22' de tanımlanan $\bar{S}$ her bir üçgen katkısının süperpozisyonundan bulunabilir. Tek bir üçgen yüzey için bu değer, $t=1:K$ için,

$$\overline{S}_t = \left(\frac{j}{\lambda} \right) \hat{n}_t e^{jk(\hat{r}_i + \hat{r}_s) \cdot \bar{r}_t} \Delta S_t \quad (4.27)$$

şeklinde ifade edilir. Burada K, yüzey üzerindeki aydınlatılmış üçgen yüzeylerin toplam sayısını belirtmektedir. ΔS_t ise t.üçgen yüzeyinin alanıdır.

Buradan $\overline{S}$,

$$\overline{S} = \left(\frac{j}{\lambda} \right) \sum_t \hat{n}_t e^{jk(\hat{r}_i + \hat{r}_s) \cdot \bar{r}_t} \Delta S_t \quad (4.28)$$

eşitliğine dönüşür.

$\overline{S}$ hesaplandığında ve Eş.4.21' deki ifade içerisinde yerine konulduğunda saçılan alan bulunmuş olur.

Burada sadece aydınlatılmış üçgen yüzeylerin Eş.4.27' deki toplama katkı yaptığı dikkate alınmalıdır. Üçgenlerin saçılan alanları toplanarak toplam saçılan alan elde edilir.

$$\overline{E}^s = E_\theta^s \hat{\theta}^s + E_\phi^s \hat{\phi}^s \quad (4.29)$$

Benzer şekilde gelen elektrik alan,

$$\overline{E}^i = E_\theta^i \hat{\theta}^i + E_\phi^i \hat{\phi}^i \quad (4.30)$$

olarak elde edilmişti. Elde edilen bu iki eşitlikten bilinen RCS formülü kullanılarak yatay ve dikey polarizasyonlar için hedefin radar kesit alanı Eş.4.31 ve Eş.4.32' den hesaplanır.

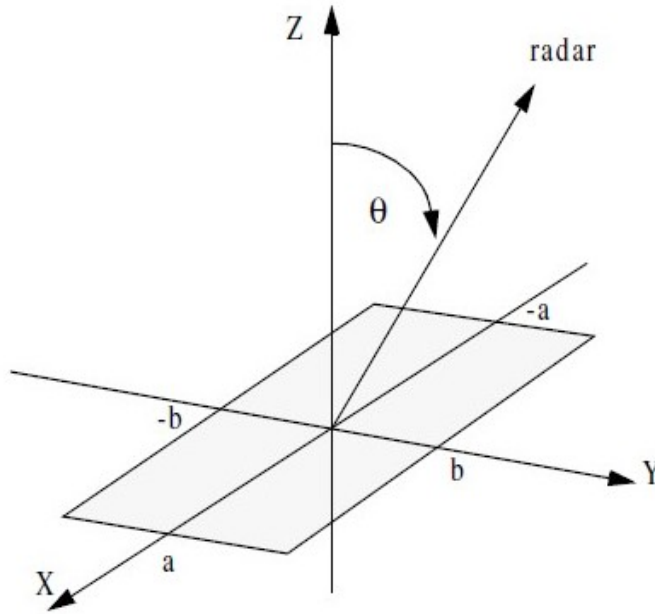
$$\sigma_{\theta\theta} = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{\left| \overline{E}_\theta^s \right|^2}{\left| \overline{E}_\theta^i \right|^2} \quad (4.31)$$

$$\sigma_{\phi\phi} = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{\left| \overline{E}_\phi^s \right|^2}{\left| \overline{E}_\phi^i \right|^2} \quad (4.32)$$

5. İNCELENEN RADAR HEDEFİ

5.1. Dikdörtgen Düzlemsel Yüzey

Şekil 5.1’ de x-y düzleminde ince mükemmel iletken bir dikdörtgen düzlem verilmektedir.



Şekil 5.1. Dikdörtgen düzlem

Bu mükemmel iletken dikdörtgen düzlemin x eksenindeki uzunluğu $2a$, y eksenindeki genişliği $2b$ ’ dir.

x-z düzleminde lineer polarize olmuş gelen dalga için dikey radar kesit alanı,

$$\sigma_V = \frac{b^2}{\pi} \left| \sigma_{1V} - \sigma_{2V} \left[\frac{1}{\cos \theta} + \frac{\sigma_{2V}}{4} (\sigma_{3V} + \sigma_{4V}) \right] \sigma_{5V}^{-1} \right|^2 \quad (5.1)$$

şeklinde ifade edilir [8].

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ için,}$$

$$\sigma_{1V} = \cos(ka \sin \theta) - j \frac{\sin(ka \sin \theta)}{\sin \theta} \quad (5.2)$$

$$\sigma_{2V} = \frac{e^{j(ka - \pi/4)}}{\sqrt{2\pi}(ka)^{3/2}} \quad (5.3)$$

$$\sigma_{3V} = \frac{(1 + \sin \theta)e^{-jka \sin \theta}}{(1 - \sin \theta)^2} \quad (5.4)$$

$$\sigma_{4V} = \frac{(1 - \sin \theta)e^{jka \sin \theta}}{(1 + \sin \theta)^2} \quad (5.5)$$

$$\sigma_{5V} = 1 - \frac{e^{j(2ka - \pi/2)}}{8\pi(ka)^3} \quad (5.6)$$

olarak elde edilir.

Lineer polarize olmuş gelen dalga için yatay radar kesit alanı ise,

$$\sigma_H = \frac{b^2}{\pi} \left| \sigma_{1H} - \sigma_{2H} \left[\frac{1}{\cos \theta} - \frac{\sigma_{2H}}{4} (\sigma_{3H} + \sigma_{4H}) \right] \sigma_{5H}^{-1} \right|^2 \quad (5.7)$$

şeklinde ifade edilir ve burada,

$$\sigma_{1H} = \cos(ka \sin \theta) + j \frac{\sin(ka \sin \theta)}{\sin \theta} \quad (5.8)$$

$$\sigma_{2H} = \frac{4e^{j(ka + \pi/4)}}{\sqrt{2\pi}(ka)^{1/2}} \quad (5.9)$$

$$\sigma_{3H} = \frac{e^{-jka \sin \theta}}{1 - \sin \theta} \quad (5.10)$$

$$\sigma_{4H} = \frac{e^{jka \sin \theta}}{1 + \sin \theta} \quad (5.11)$$

$$\sigma_{5H} = 1 - \frac{e^{j(2ka + \pi/2)}}{2\pi ka} \quad (5.12)$$

olmaktadır.

Fiziksel Optik yaklaşımının mükemmel iletken dikdörtgen yüzey için radar kesit alanı ifadesi [10],

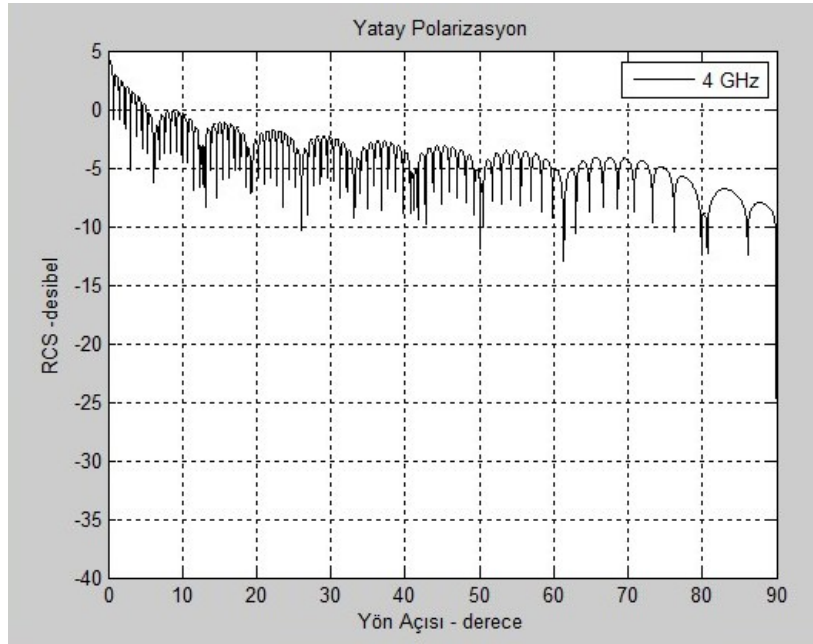
$$\sigma_{FO} = \frac{4\pi a^2 b^2}{\lambda^2} (\cos \theta)^2 \left(\frac{\sin(ka \sin \theta \cos \phi)}{ka \sin \theta \cos \phi} \frac{\sin(kb \sin \theta \sin \phi)}{kb \sin \theta \sin \phi} \right)^2 \quad (5.13)$$

şeklindedir.

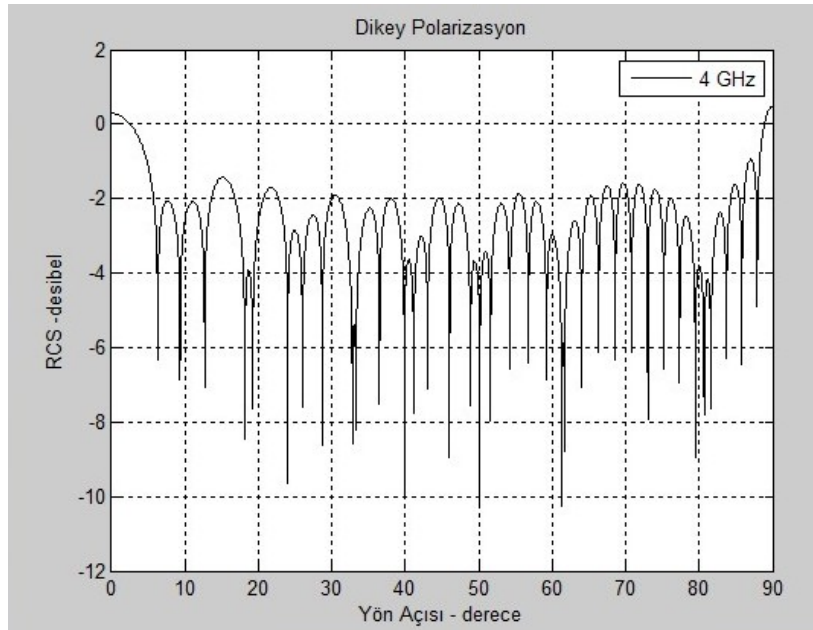
Mükemmel iletken dikdörtgen düzlemsel yüzeyin uzunluğu $2a$ ve genişliği $2b$ olmak üzere çeşitli frekanslarda yatay ve dikey radar kesit alanları Matlab' da geliştirilen programlar ile hesaplanmış ve çizdirilmiştir.

5.2. Matlab Sonuçları

Dikdörtgen yüzey için RCS sonuçları Şekil 5.3 - Şekil 5.13' te gösterilmiştir.



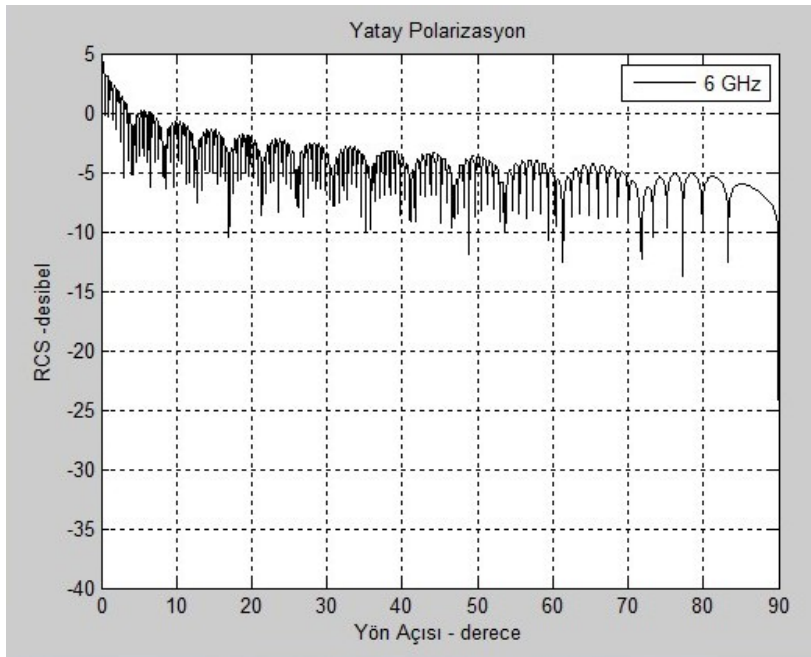
Şekil 5.2. Dikdörtgenin RCS' si Uzunluk:3 Genişlik=1 Frekans:4 GHz



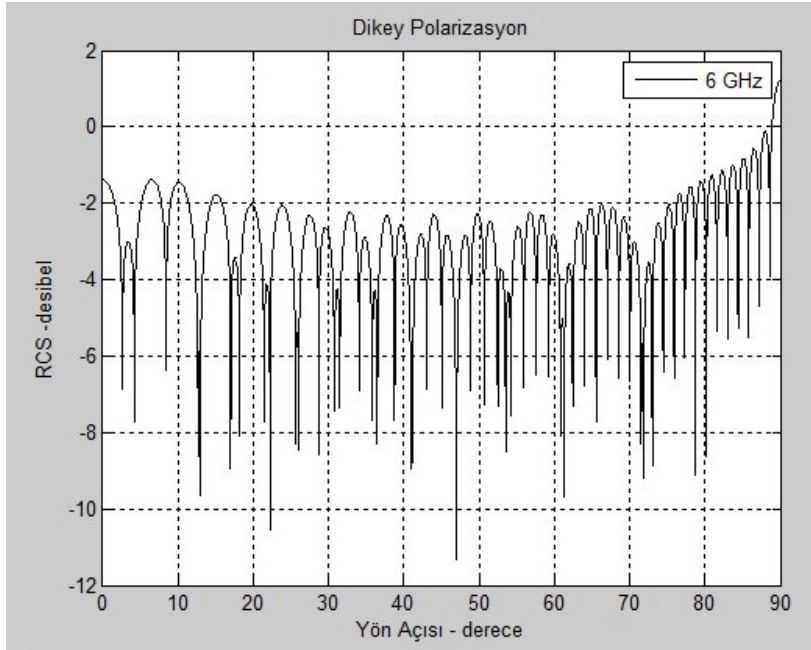
Şekil 5.3. Dikdörtgenin RCS' si Uzunluk:3 Genişlik=1 Frekans:4 GHz

Şekil 5.2 ve Şekil 5.3' te uzunluğu 3 m ve genişliği 1 m olan mükemmel iletken dikdörtgen düzlemsel yüzeyin 4 GHz' de radar kesit alanı yatay ve dikey polarizasyonda görülmektedir.

Yatay polarizasyonda incelenen hedefin yön açısı 0 derece iken RCS değeri yaklaşık 4 dB ve 90 dereceye yaklaştığında -25 dB değerini almıştır. Dikey polarizasyonda ise yön açısı 0 derece iken RCS değeri yaklaşık 0.2 dB ve 90 derecede yaklaşık 0.5 dB değerindedir.



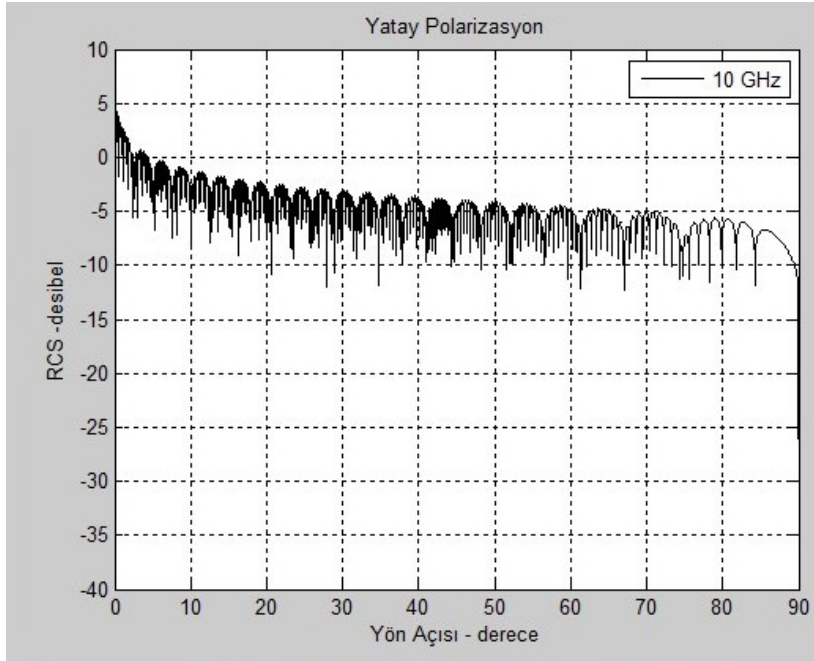
Şekil 5.4. Dikdörtgenin RCS' si Uzunluk:3 Genişlik=1 Frekans:6 GHz



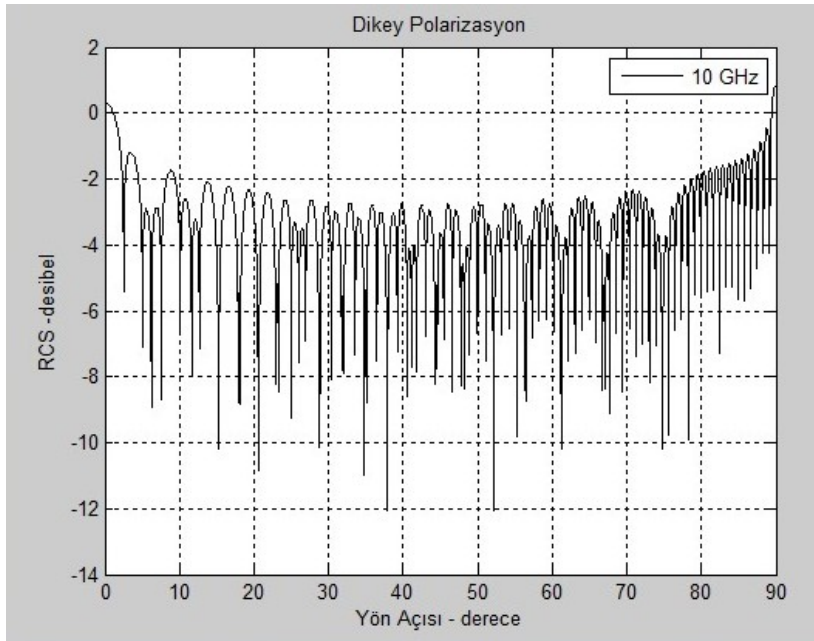
Şekil 5.5. Dikdörtgenin RCS' si Uzunluk:3 Genişlik=1 Frekans:6 GHz

Şekil 5.4 ve Şekil 5.5' te uzunluğu 3 m, genişliği 1 m olan dikdörtgen düzlemsel yüzey için 6 GHz' de radar kesit alanı sonucu görülmektedir.

Radar kesit alanı yatay polarizasyonda 0 derecede yaklaşık 5 dB olarak gözlenmektedir. 90 derecede ise yaklaşık -25 dB değerini almıştır. Dikey polarizasyonda ise yön açısı 0 derece iken RCS değeri yaklaşık -1.2 dB ve 90 derecede yaklaşık 1 dB değerindedir.



Şekil 5.6. Dikdörtgenin RCS' si Uzunluk:3 Genişlik=1 Frekans:10 GHz

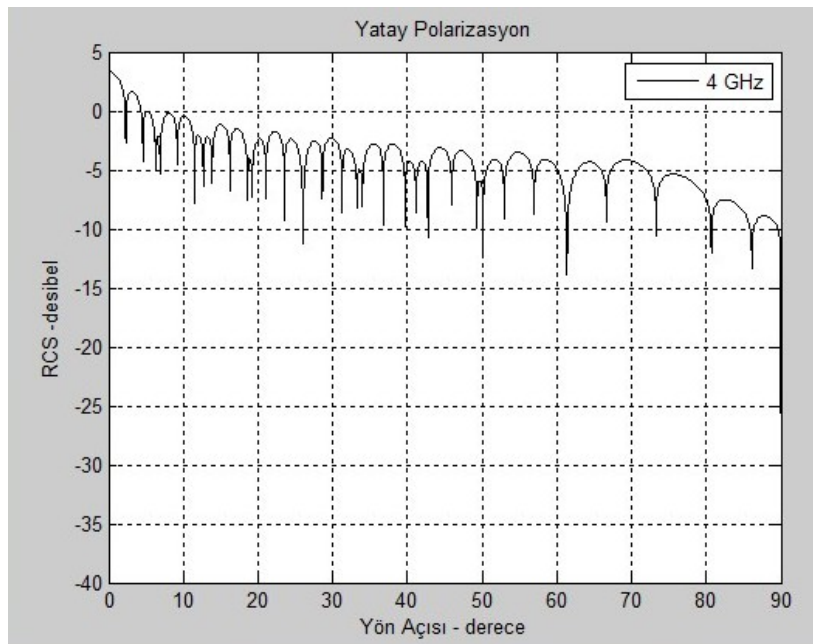


Şekil 5.7. Dikdörtgenin RCS' si Uzunluk:3 Genişlik=1 Frekans:10 GHz

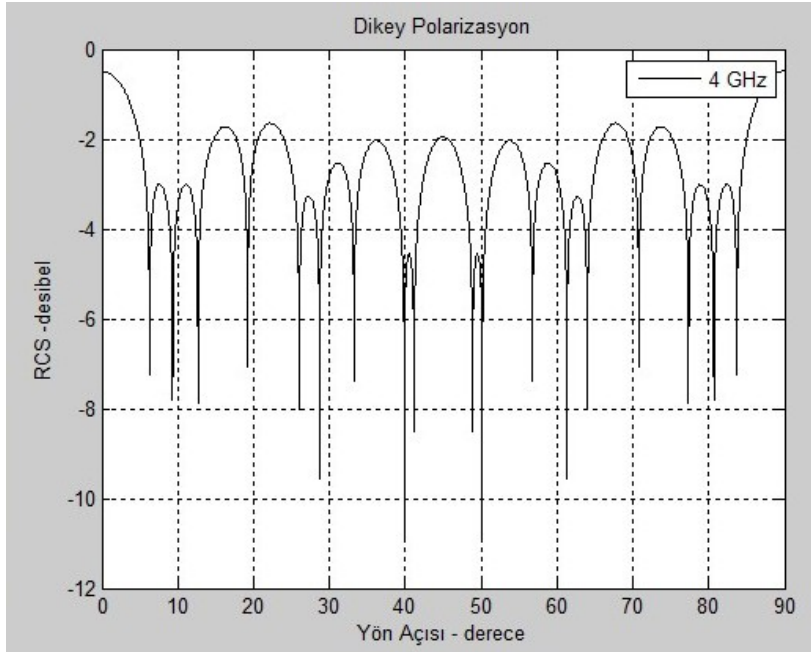
Şekil 5.6 ve Şekil 5.7' de uzunluğu 3 m ve genişliği 1 m olan dikdörtgen yüzeyin 10 GHz'de radar kesit alanı yatay ve dikey polarizasyon için hesaplanmıştır.

Radar kesit alanı yatay polarizasyonda 0 derecede yaklaşık 5 dB olarak gözlenmektedir. 90 derecede yaklaşık -26 dB değerini almıştır. Dikey polarizasyonda, yön açısı 0 derece iken RCS değeri yaklaşık 0.2 dB ve 90 derecede yaklaşık 1 dB değerindedir.

Uzunluğu ve genişliği sabit olan dikdörtgen yüzeyde frekans artırıldığında RCS eğrisinin yön açısına göre sıklığının arttığı gözlenmiştir.



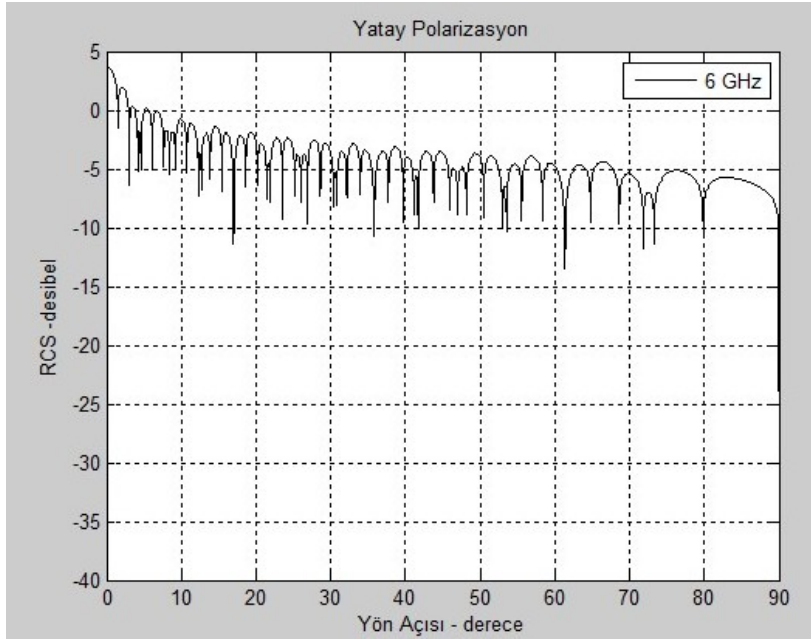
Şekil 5.8. Dikdörtgenin RCS' si Uzunluk:1 Genişlik=1 Frekans:4 GHz



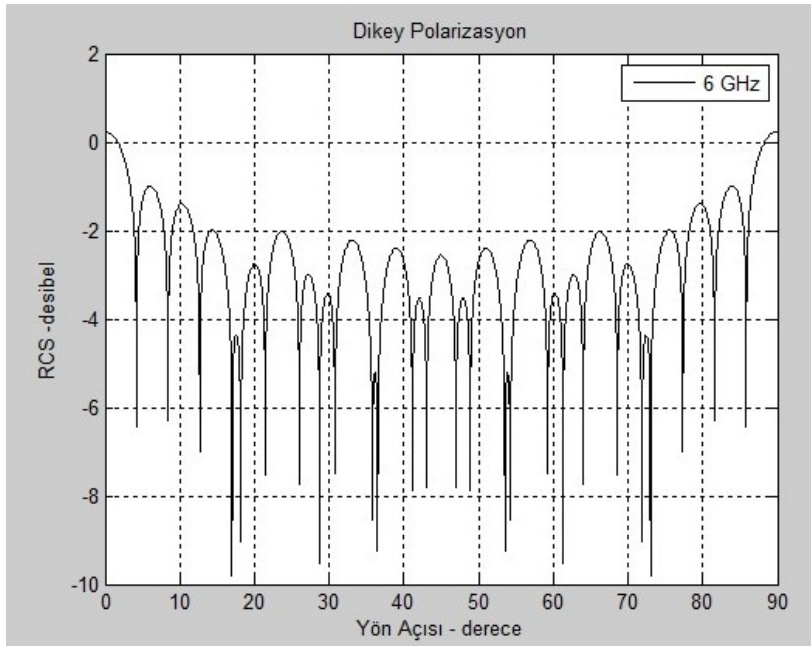
Şekil 5.9. Dikdörtgenin RCS' si Uzunluk:1 Genişlik=1 Frekans:4 GHz

Şekil 5.8 ve Şekil 5.9' da uzunluk 1 m ve genişliği 1 m olan dikdörtgen yüzeyin 4 GHz'de radar kesit alanı yatay ve dikey polarizasyon için hesaplanmıştır.

Radar kesit alanı yatay polarizasyonda 0 derecede yaklaşık 3 dB olarak gözlenmektedir. 90 derecede ise yaklaşık -26 dB değerini almıştır. Dikey polarizasyonda ise yön açısı 0 derece iken RCS değeri yaklaşık -0.5 dB ve 90 derecede de yaklaşık aynı değerdedir.



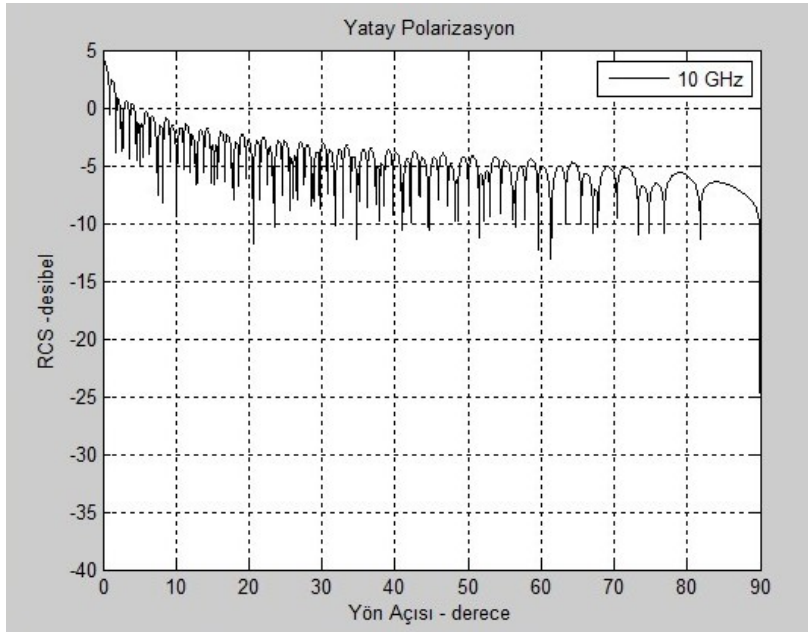
Şekil 5.10. Dikdörtgenin RCS' si Uzunluk:1 Genişlik=1 Frekans:6 GHz



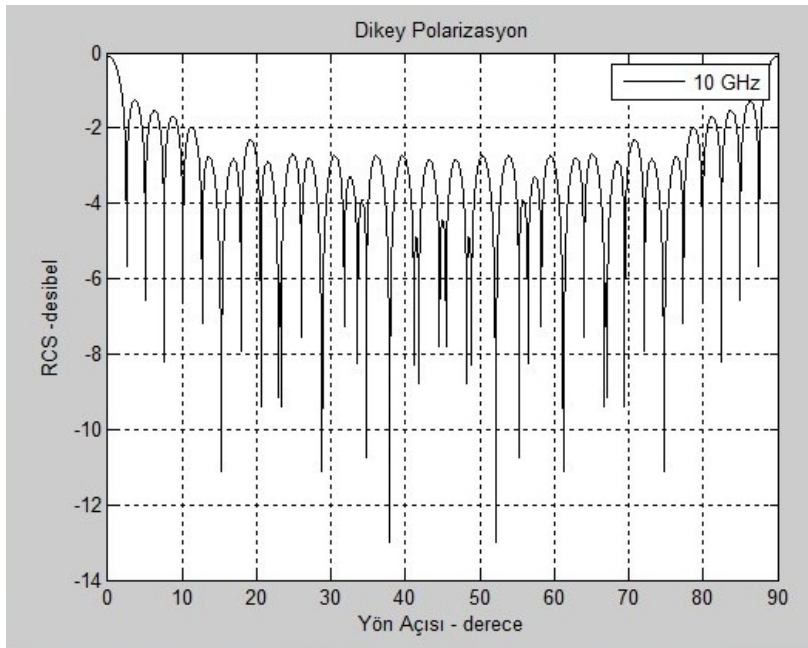
Şekil 5.11. Dikdörtgenin RCS' si Uzunluk:1 Genişlik=1 Frekans:6 GHz

Şekil 5.10 ve Şekil 5.11' de uzunluğu 1 m ve genişliği 1 m olan dikdörtgen yüzeyin 6 GHz'de radar kesit alanı yatay ve dikey polarizasyon için hesaplanmıştır.

RCS, yatay polarizasyonda 0 derecede yaklaşık 5 dB, 90 derecede ise yaklaşık -24 dB olarak gözlenmektedir. Dikey polarizasyonda 0 derece iken RCS değeri yaklaşık 0.2 dB ve 90 derecede yaklaşık 0.3 dB değerindedir.



Şekil 5.12. Dikdörtgenin RCS' si Uzunluk:1 Genişlik=1 Frekans:10 GHz



Şekil 5.13. Dikdörtgenin RCS' si Uzunluk:1 Genişlik=1 Frekans:10 GHz

Şekil 5.12 ve Şekil 5.13' te uzunluk 1 m ve genişliği 1 m olan dikdörtgen yüzeyin 10 GHz'de radar kesit alanı yatay ve dikey polarizasyon için hesaplanmıştır.

Radar kesit alanı yatay polarizasyonda 0 derecede yaklaşık 5 dB olarak gözlenmektedir. 90 derecede ise yaklaşık -24 dB değerini almıştır. Dikey polarizasyonda ise yön açısı 0 derece iken RCS değeri yaklaşık 0 dB ve 90 derecede yaklaşık aynı değerdedir.

Dikdörtgen düzlemsel yüzeyin uzunluğu üç kat azaltılıp diğer değerler sabit tutulduğunda, RCS eğrisinin daha da sıklaştığı, fakat belirli açılardaki değerlerin değişmediği görülmüştür.

6. SONUÇ

Bu çalışmada, radar ve radar sistemleri kısaca tanıtılmıştır. Çalışma konusu olan Radar Kesit Alanı tanımlanmış ve özellikleri belirtilmiştir. Radar Kesit Alanı tahmin yöntemlerine değinilmiş ve yüksek frekans yöntemlerinden Fiziksel Optik yöntemi kapsamlı olarak açıklanmıştır.

Optik bölgede incelenen hedef parçalara ayrılmıştır. Optik bölgede kullanılan Fiziksel Optik yöntemi ile cisim üçgen yüzeylere ayrılmış ve tek tek yüzey alanlarının hesabı ve bu değerlerin süperpozisyonu ile toplam radar kesit alanı değeri elde edilmiştir.

Fiziksel Optik yöntemi, RCS hesabı için kullanışlı bir yöntem olmakla birlikte, bu yöntemde daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi, yüzey süreksizliklerinden kaynaklanan terimlerin ihmal edilmesi gerekmektedir. Bu da elde edilen sonuçlarda küçük miktarda hataya neden olmaktadır.

Ancak, Geometrik Optik (GO) için düz bir levhadan saçılma sadece tek bir doğrultuda olurken, Fiziksel Optik' te akımlar aynı gelen alan için saçılan alanı her doğrultuda oluşturmaktadır. Kısaca, Fiziksel Optik yüzeylerden saçılan alanın hesaplanmasında iyi bir yöntemdir.

Yüksek frekans radar kesit alanı hesaplamalarında Fiziksel Optik yöntemi uçak, gemi gibi geniş hedefler için iyi sonuçlar vermektedir.

Bu çalışmada düz üçgen plaka modeli kullanarak Fiziksel Optik yaklaşımına göre saçılan alanın analitik olarak bulunabileceği gösterilmiştir. Bu durum hedefin üçgen yüzeylere istenilen boyutta bölünebilmesi için imkan sağlamaktadır. Üçgenleme metodu düzgün yüzeylerde kullanışlıdır. Dairesel hatlara sahip nesnelerin üçgen modellerinde üçgenler büyüdükçe nesne gerçek formundan uzaklaşmaktadır. Dolayısıyla dairesel hatlara sahip

nesnelerin üçgen modellerinin plaka boyutları büyüdükçe sonuç değişebilmektedir.

İncelenecek hedefin üçgenlere bölünmesi Autocad, CAD gibi programlarla modellenerek yapılabilmektedir.

Fiziksel Optik formülasyonundaki kabul edilen kısıtlamalar ile, her bir üçgen izole edilerek tüm parçaların süperpozisyonu ile radar kesit alanı hesaplanmıştır. Çoklu yansımalar, kenar kırınımları ve yüzey dalgaları gibi saçılma mekanizmaları hesaba dahil edilmemiştir. Bu kısıtlamalara rağmen üçgenleme metodu ile hesaplama yapmanın tatmin edici sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Knott, E. F., Shaeffer, J. F, "Radar Cross Section", 2nd edition, **Artech House**, Norwood, MA, 197-208 (1993).
2. Jenn, D.C., "Radar and Laser Cross Section Engineering", Chapter 4., **AIAA Education Series**, 294-296 (1995).
3. Ergin, A.A., Akgün, S., "Cisimlerden Yüzey Dalgası Yansıması İçin Radar Kesit Alanı Hesapları", **TÜBİTAK-MAM Bilişim Teknolojileri Araştırma Enstitüsü**, Kocaeli, 1-2 (2001).
4. Çiber, B., "FDTD ve MOM Sayısal Yöntemleriyle Radar Saçılma Yüzeyi Modelleme ve Azaltma Teknikleri", **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 3-4 (2001).
5. Chatzigeorgiadis, F., "Development of Code for a Physical Optics Radar Cross Section Prediction and Analysis Application", **Naval Postgraduate School**, California, 15-16 (2004).
6. Faros, N. I., "Radar Cross Section Synthesis For Planar Resistive Surfaces", **Naval Postgraduate School**, California, 12-14 (1994).
7. Ergin, A. A., "Görünmezlik Teknolojileri: Radar Kesit Alanı Nedir? ", **IDEF' 07 Savunma ve Havacılık**, 120:2-4 (2007).
8. Mahafza, B.R., "Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB", Chapter 2., **Chapman & Hall/ CRC**, 72-75 (2000).
9. Şafak, M., "Radar Saçılma Merkezlerinin Belirlenmesi", **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 9-10 (1998).
10. Ross, R. A., "Radar Cross Section of Rectangular Flat Plate as a function of Aspect Angle", **IEEE Trans.**, 8(14):320-321 (1966).
11. Pathak, P.H., "Techniques for High Frequency Problems", Antenna Handbook Volume I, Chapter 4, **Van Nostrand Reinhold**, New York, 120-124 (1993).
12. White, M.O., "Radar Cross Section: Measurement, Prediction and Control", **Electronics & Communication Engineering Journal**, August, 169-170 (1998).
13. Moller, T., "A Fast Triangle-Triangle Intersection Test", **Journal of Graphics Tools**, 2(2):1-3 (1997).

14. Stein, V., "Application of Equivalent Edge Currents to Correct the Backscattered Physical Optics Field of Flat Plates", ***Applied Computational Electromagnetics Society Journal***, 5(1):43-44 (1992).
15. Öztürk, A. K., "Implementation of Physical Theory of Diffraction For Radar Cross Section Calculations", ***Bilkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 13-14 (2002).
16. Knott, E., "A progression of High-Frequency RCS Prediction Techniques", ***IEEE***, 73(2):5-9 (1998).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ANT, İdil
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 06.08.1984 İskenderun
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (312) 863 46 80
 e-mail : idalant@yahoo.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/ Elektrik Elektronik Mühendisliği	2010
Lisans	Kırıkkale Üniversitesi/ Elektrik Elektronik Mühendisliği	2006
Lise	Çağrıbey Anadolu Lisesi	2002

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2010	MKE BARUTSAN Roket ve Patlayıcı Fabrikası	Ar-Ge Mühendisi
2009-2009	TEMSAN Genel Müdürlüğü	Proje Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Yüzme, Sinema, Puzzle