İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

142556

FİZİK OPTİK YÖNTEMİYLE RADAR KESİT ALANI HESABI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Tolga ÖZCAN
(504001400)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2003
Tezin Savunulduğu Tarih : 27 Mayıs 2003

Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr. Selçuk PAKER
Diğer Jüri Üyeleri Doç.Dr. Cevdet IŞIK
Yrd.Doç.Dr. Selçuk PAKER
Yrd.Doç.Dr. Tanju YELKENCİ (M.Ü.)

MAYIS 2003

ÖNSÖZ

Bu çalışmada ve öğrencilik hayatımda değerli yardımlarını hiçbir zaman benden esirgemeyen saygıdeğer hocam Yrd. Doç.Dr. Selçuk PAKER'e teşekkürlerimi sunuyorum.

Ayrıca sevgili dostlarım Dz.Ütğm.Ahmet ŞEN ve Dz.Ütğm.Ahmet DOĞANCI'ya yaptıkları katkılardan dolayı teşekkür ederim.

Son olarak hayat arkadaşım sevgili eşim Gökçe ÖZCAN'a ve her zaman değerli sevgilerini kalbimde hissettiğim sevgili aileme teşekkür ediyorum.

Mayıs 2003 Tolga ÖZCAN

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	**iv**
TABLO LİSTESİ	**v**
ŞEKİL LİSTESİ	**vi**
SEMBOL LİSTESİ	**viii**
ÖZET	**xii**
SUMMARY	**xv**
1. GİRİŞ	**1**
1.1. Radar Kesit Alanı Tanımı ve Hesaplama Teknikleri	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	2
2. RADAR KESİT ALANI	**4**
2.1. Radar Kesit Alanının Tanımı	4
2.2. Frekans Bölgesi	7
2.3. Saçılma Mekanizmaları	8
2.4. Hesaplama Yöntemleri	10
2.4.1. Mikrodalga Optik	10
2.4.2. Moment Yöntemi	11
2.4.3. Sonlu Farklar Yöntemi	11
2.4.4. Geometrik Optik Yöntemi	11
2.5. Fizik Optik Yöntemi	12
2.6. Basit Objelerin Radar Kesit Alanı	13
2.6.1. Küre	14
2.6.2. Elipsoid	15
2.6.3. Dairesel Düz Plaka	16
2.6.4. Kesik Koni	18
2.6.5. Silindir	20
2.6.6. Dikdörtgen Levha	22
2.6.7. Üçgen Levha	26
2.7. Kullanılan Matlab Kodunun Tanıtımı	27
3. SONUÇLAR	**32**
KAYNAKLAR	**35**
ÖZGEÇMİŞ	**36**

KISALTMALAR

RKA	:	Radar Kesit Alanı
RCS	:	Radar Cross Section
TM	:	Transverse Magnetic
TE	:	Transverse Electric
GO	:	Geometrik Optik
dBsm	:	Desibel Squaremeter

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1	Bazı yaygın hedefler için RKA değerleri	5
Tablo 2.2	Sonlu, sonsuz ve üçgen parçalara ayrılmış silindir yapılar için maksimum radar kesit alanı değerleri	32
Tablo 2.3	Değişik boy, yarıçap ve dalgaboyu değerlerine göre oluşturulan Tablo 2.2'nin grafiksel gösterilimi.	33

ŞEKİL LİSTESİ **Sayfa No**

Şekil 2.1.	: Bistatik ve Monostatik Radar	6
Şekil 2.2.	: Bir kürenin RKA'ı üç frekans bölgesi için gösterilimi	7
Şekil 2.3.	: Bir uçağı oluşturan basit ana şekiller	9
Şekil 2.4.	: Saçılma Mekanizmaları	10
Şekil 2.5.	: Mükemmel iletken bir elipsoidin geometrisi	15
Şekil 2.6.	: Elipsoid için RKA	16
Şekil 2.7.	: Mükemmel iletken birdairesel düz plakanın geometrisi	16
Şekil 2.8.	: Dairesel Düz Plaka için RKA	17
Şekil 2.9.	: Mükemmel iletken bir kesik koninin geometrisi	18
Şekil 2.10	: Kesik koninin Fizik optikle RKA	20
Şekil 2.11.	: Mükemmel iletken bir eliptik silindirin geometrisi	21
Şekil 2.12.	: Silindir için RKA	21
Şekil 2.13.	: Mükemmel iletken bir dikdörtgen levhanın geometrisi	22
Şekil 2.14.	: Dikdörtgen için dikey polarizasyonlu RKA	24
Şekil 2.15.	: Dikdörtgen için yatay polarizasyonlu RKA	24
Şekil 2.16	: Kenar uzunluğu 5λ olan bir karenin RKA	25
Şekil 2.17.	: Mükemmel iletken bir üçgen levhanın geometrisi	26
Şekil 2.18.	: Üçgen levha için RKA	27
Şekil 2.19	:Yeni bir modeli dizayn veya veri bankasındaki modellerin RKA'larının hesaplanma aşamalarının seçimi	28
Şekil 2.20	: Yeni oluşturulan modelin (x, y, z) koordinatlarının programa Girilmesi	28
Şekil 2.21	: (x, y, z) koordinatları girilen hedefin üçgen köşe numaralarının girilmesi	29
Şekil 2.22	: Oluşturulan hedefin program tarafından üçgensel gösterilimi	29
Şekil 2.23	: Oluşturulan cisimlerin RKA hesaplaması için uygun parametrelerim seçilmesi	30
Şekil 2.24	: Hesap edilen RKA'nın çizdirilmesi	30

SEMBOL LİSTESİ

σ	:	Radar Kesit Alanı
P_s	:	Saçılan güç yoğunluğu
P_i	:	Gelen güç yoğunluğu
E_s	:	Saçılan elektrik alan
E_i	:	Gelen elektrik alan
R	:	Mesafe
λ	:	Dalga boyu
$\vec{u}_i$	:	Aydınlatan alan doğrultusundaki birim vektör
$\vec{n}$	:	Aydınlatılan yüzeyin birim normali
$\vec{r}$	:	Gözlem noktasına (radar) ilişkin yer vektörü
k	:	Dalga sayısı
dS	:	Elementer yüzey parçası
j_n	:	n. dereceden küresel Bessel fonksiyonu
$h_n^{(1)}$	:	n. dereceden Hankel fonksiyonu

FİZİK OPTİK YÖNTEMLE RADAR KESİT ALANI HESABI

ÖZET

Radar kesit alanının hesaplanması, temel olarak hedeften dağılan elektrik alanın bulunması demektir. Gelen düzlemsel dalga tarafından hedefe endüklenen akım hesaplanabilirse, anten dizilerinde kullanılan aynı integraller dağılan bu elektrik alanın hesaplanmasında uygulanabilir.

Bu çalışmada da, öncelikle radar kesit alanı hakkında kısa bir tanımlama bilgisi verildikten sonra hesaplama yöntemleri üzerinde durulmuştur. Frekans ve zaman uzayında çözüm yapılabilen bu yöntemler, sıradan şekilli, üç boyutlu hedeflere uygulanabilen yöntemlerdir. Bunlar sırasıyla mikrodalga optik, moment metodu, sonlu farklar yöntemi ve fizik optik yöntemidir.

Yöntemler hakkında kısaca bilgi verildikten sonra, çalışmanın asıl ana hattını oluşturan fizik optik yöntemi ile ilgili Matlab uygulamalarına yer verilip sonuçlar değerlendirilmiştir.

Öncelikle basit yapıdaki geometrilerin fizik optik yöntemiyle radar kesit alanları incelenmiş, daha sonra bu basit şekillerden oluşan daha kompleks bir yapının fizik optik yöntemiyle radar kesit alanı hesaplattırılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Fizik optik yöntemini cismi üçgenlere ayırmak suretiyle inceleyerek bu şekilde modellemenin getirdiği kolaylıklar ve sonuçların doğruluğu tam sonuçlarla karşılaştırılarak üçgenleme metodunun kullanılabilirliği tartışılmıştır. Cismi daha fazla sayıda üçgenlere ayırdıkça hesabın tam sonuca yakınsadığı rahatlıkla gözlemlenmiştir. Bu şekilde bir platformun inşa aşamasından önce bu metodla radar kesit alanının kolaylıkla hesaplanarak çıkan sonuca göre dizaynına karar verilebilmesi veya halihazırdaki platformların radar kesit alanlarını optimum seviyede kullanabilmelerine olanak sağlanmış olur.

Fizik optik yöntemi, düzleme benzer yüzeyler için geçerli olduğundan hedef yüzeyinin modellenmesinde üçgen biçiminde düzlemsel elemanlar kullanılmıştır.

RKA hesaplamalarında, gemi ve benzeri hedeflerin dalga boyuna göre çok büyük eğrilik yarıçaplı yüzeylere sahip olmalarından dolayı fizik optik yöntemi kullanılır.

RADAR CROSS SECTION CALCULATİON WİTH PHYSİC OPTİC METHOD

SUMMARY

Radar cross section is a measure of power scattered in a given direction when a target is illuminated by an incident wave.

RCS has been defined to characterize the target characteristics and not the effects of transmitter power, receiver sensitivity, and the position of the transmitter or receiver distance. Another term for RCS is "echo area".

The definition of RCS can be stated as:

$$RCS = \frac{\text{Power reflected to receiver per unit solid angle}}{\text{Incident power density} / 4\pi} \qquad [m^2]$$

The IEEE dictionary of electrical and electronics terms [5] defines RCS as a measure of reflective strength of a target defined as 4π times the ratio of the power per unit solid angle scattered in a specified direction to the power per unit area in a plane wave incident on the scatterer from a specified direction. More precisely, the scattered power is measured approaches infinity:

$$\sigma = \lim_{R \to \infty} 4\pi R^2 \frac{\left|\vec{E}^{scat}\right|^2}{\left|\vec{E}^{inc}\right|^2} \qquad [m^2]$$

Where E^{scat} is the scattered electric field and E^{inc} is the incident at the target.

The unit of RCS most commonly used is decibels to relative to a square meter (dBm):

$$\sigma[dB\,m^2] = 10\ Log\ (\sigma[m^2])$$

The scattering characteristics of a target are strongly dependent on the frequency of the incident wave. There are three frequency regions in which the RCS of a target is distinctly different. They are referred to as the 1) low-frequency,2) resonance and 3) high-frequency regions.

- Low-frequency region. When the incident wavelength is much greater than the body size, scattering is called Rayleigh scattering.
- Resonance region. When the incident wavelength is on the order of the body size, the phase of the incident field changes significantly over the length of the scattering body. This is also called Mie region.

- High-frequency region. When the incident wavelength is much smaller than the body size. This is also called Optical region.

Before presenting the different RCS calculation methods, it is important to understand the signifance of RCS prediction. Most radar systems use RCS as a means of discrimination. Therefore, accurate prediction of target RCS is critical in order to design and develop robust discrimination algorithms. Additionally, measuring and identifying the scattering centers (sources) for a given target aid in developing RCS reduction techniques. Another reason of lesser importance is that RCS calculations require broad and extensive technical knowledge, thus many scientists and scholars find the subject challenging and intellectually motivating. Two categories of RCS prediction methods are available: exact and approximate.

Exact methods of RCS prediction are very complex even for simple shape objects. This is because they require solving either differential or integral equations that describe the scattered waves from an object under the proper set of boundary conditions. Such boundary conditions are governed by Maxwell's equations. Even when exact solutions are achievable, they are often difficult to interpret and to program using digital computers.

Due to the difficulties associated with the exact RCS prediction, approximate methods become the viable alternative. The majority of the approximate methods are valid in the optical region, and each has its own strengths and limitations. Most approximate methods can predict RCS within few dBs of the truth. In general, such a variation is quite acceptable by radar engineers and designers. Approximate methods are usually the main source for predicting RCS of complex and extended targets such as aircrafts, ships, and missiles. When experimental results are available, they can be used to validate and verify the approximations.

To predict the RCS of a target, several methods or approximations, have been devised such as, in high frequencies, optics region approximations. These approximations are widely being used because the targets, such as airplanes and ships, have to be treated in this region due to the large sizes of the targets with respect to the radar wavelength.

The classical solution techniques are not discussed in this study because most of them are limited to one- or two-dimensional structures or simple three-dimensional shapes. The methods of interest in this study are those that can be applied to arbitrary three-dimensional targets. The methods most commonly encountered are physical optics, microwave optics (ray tracing), the method of moments, and finite difference methods.

- Physical optics. One method of estimating the surface current induced on an arbitrary body is the physical optics (PO) approximation. On the portions of the body that are directly illuminated by the incident field, the induced current is simply proportional to the incident magnetic field intensity. On the shadowed portion of target, the current is set to zero. The current is then used in the radiation integrals to compute the scattered field far from the target.

  Physical optics is in a high-frequency approximation that gives best result for electrically large bodies. It is most accurate in the specular direction. Because PO abruptly sets the current to zero at a shadow boundary, the computed field values at the wide angles and in the shadow regions are in accurate. Furthermore, surface waves are not included. Physical optics can be used in either the time or frequency domains.

- Microwave optics. Ray-tracing methods that can be used to analyze electrically large targets of arbitrary shape are referred as microwave optics. The rules for ray-tracing in a simple medium (linear, homogeneous, and isotropic) are similar to reflection and refraction in optics. In addition, diffracted rays are allowed that originate from the scattering of the incident wave at edges, corners, and vertices. The formulas are derived on he basis of infinite frequency. This implies an electrically large target. Ray optics is frequently used in situations that severely violate this restriction and still yields surprisingly good results. The major disadvantage of ray tracing is the bookkeeping required for a complex target. It is used primarily in the frequency domain.

- Method of moments. The most common technique used to solve an integral equation is the method of moments (MM). Integral equations are so named because the unknown quantity is in the integrand. In electromagnetics, integral equations are derived from Maxwell's equations and the boundary conditions. The unknown quantity can be an electric or magnetic current (either volume or surface). The method of moments reduced the integral equations to a set of simultaneous linear equations that can be solved using standart matrix algebra. The size of the matrix involved depends on the size of the body; current computer capabilities allow bodies on the order of 10 or 20 wavelengths to be modeled.

- Most MM formulations require a discretization (segmentation) of the body. Therefore, they are compatible with finite element methods used in structural engineering, and the two are frequently used in tandem during the design of a platform. The method of moments can be used to solve both time- and frequency-domain integral equations.

- Finite difference methods. Finite differences are used to approximate the differential operators in Maxwell's equations in either the time or frequency domain.As in the MM, the target must be discretized. Maxwell's equations and the boundary conditions are enforced on the surface of the target and at the boundaries of the discretization cells. This method has found extensive use in the computing the transient response of targets to various waveforms. Finite difference does not require the large matrices that the MM does because the solution is stepped in time throughout the scattering body.

In this study, firstly the approximation of the physical optics explained with the simple geometrical objects like sphere, ellipsoid, truncated cone, circular flat plate, cylinder, rectangular flat plate and triangular flat plate. After laying down these expressions, we formed a more complex object which is made of by these simple objects and then got the rcs solution of the total object.

The matlab programme which is used, is a simple RCS prediction code based on the physical optics approximation. Scattering objects are approximated by arrays of triangels (facets) and superposition is used to compute the total RCS of the object.

These four boundary conditions limited the study.

- The scattered field of each triangle is computed as if it were isolated and other triangles were not present

- Multiple reflections are not included

- Edge diffraction and surface waves are not included.
- Shadowing is only approximately included by considering a facet to be completely illuminated or completely shadowed by the incident wave (shadows on one part of the object cast by other parts of the object are not included.)

1.GİRİŞ

1.1 Radar Kesit Alanının Tanımı ve Hesaplama Yöntemleri

Bu çalışmada radar kesit alanı ile ilgili olarak genel olarak tanımlama bilgisi verildikten sonra hesaplama yöntemleri üzerinde kısaca durulmuş, bu yöntemler arasında optik bölgede dalga boyuna göre çok büyük cisimlerin radar kesit alanı hesaplamalarında gerçeğe en yakın sonucu veren fizik optik yaklaşımı üzerinde durulmuştur.

Radar kesit alanının hesaplanması temel olarak hedeften dağılan elektrik alanın bulunması demektir. Gelen düzlemsel dalga tarafından hedefe endüklenen akım hesaplanabilirse, anten dizilerinde kullanılan aynı integraller dağılan bu elektrik alanın hesaplanmasına uygulanabilir.

Hedefin uzak bölgelerinde, dağılan alanın mesafeye bağımlılığı R (radar ile hedef arası uzaklık) ile ters orantılı olarak değişir ve bu yüzden σ mesafeden bağımsızdır. Yine de, endüklenen akımın belirlenmesi zor bir problemdir. Çünkü, Maxwell denklemlerinin karmaşık sınır değerleri için çözülmesi gerekmektedir. Bir çok durumda sadece sayısal bir çözüm mümkündür.

Radar bilgisayarı tüm algılamaları inceler ve hedefleri hızları ve yörüngelerine göre ayıklayabilir. Yine de, bizim ilgilenmediğimiz düşük radar kesit alanına sahip hedefler de algılanabilir ve bu yüzden RKA hesaplamaları mühendislik açısından zor bir konudur.

Algılanmak istenen hedeflerin saçılma karakteristikleri, bir radarın çalışma frekansının seçimindeki etkenlerden sadece bir tanesidir. Diğerleri ise; Boyut kısıtlamaları, anten kazancı, demet genişliği, verici gücü, çevre gürültüsü, Doppler kayması ve atmosferik zayıflatmalardır.

Radar frekansları konusunda geleneksel bir sınırlama yoktur. Çalıştığı frekans ne olursa olsun, elektromagnetik enerji yayarak hedeflerden yansıyan elektromagnetik enerjiyi toplayan ve sınıflandırabilen cihazlar radar olarak adlandırılabilmektedir. Günümüzde birkaç megahertzden spektrumda ultraviole bölgelere kadar çalışan

radarlar bulunmaktadır. Temel çalışma prensipleri tüm frekanslarda aynı olmasına karşın pratikteki uygulamaları oldukça farklı olabilmektedir. Pratikte radarların çoğu mikrodalga frekanslarda çalışmasına karşın bu konuda da herhangi bir sınırlama yoktur.

Elektromagnetik saçılma ve radyasyon problemleri ya zaman uzayında (time domain-TD) veya frekans uzayında (frequency domain-FD) çözülebilir.

RKA hesabında kullanılan birçok yöntem vardır. Bunlardan bir veya iki boyutlu yapılar veya basit üç boyutlu şekiller için kullanılan yöntemlere burada yer verilmeyecektir.

Anlatılacak olan yöntemler, sıradan şekilli üç boyutlu hedeflere uygulanabilen yöntemlerdir. Bunlar sırasıyla mikrodalga optik,moment metodu, sonlu farklar yöntemi,geometrik optik ve fizik optik yöntemidir.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bölüm 2'de öncelikle radar kesit alanının tanımı yapıldıktan sonra, bir hedefin saçılma karakteristiği büyük ölçüde gelen dalganın frekansına bağlı olması gerçeğine dayanarak frekans bölgeleri hakkında da bilgi verilmiştir.

Radar kesit alanı hesaplamalarını daha iyi anlayabilmek için saçılma mekanizmalarına da bu bölümde kısaca değinilmiştir. Saçılma karakteristikleri; biyomedikal düzenlemeler, haberleşme sistemleri, askeri uygulamalar ve RKA hesaplanması gibi pek çok sahada uygulama alanı bulmuşlardır. Bu uygulamaların hepsinde de hedeflerin tanınması ve sınıflandırılması için saçılma karakteristiklerinden yararlanılmaktadır.

Bir hedefin radar kesit alanı hesaplamasında izlenecek yöntem, öcelikle kompleks yapıda olan hedefin hesaplanması daha kolay basit şekillere ayırmak ve bu basit şekillerin süperpozisyonuyla hedefin toplam radar kesit alanını hesaplamaktır.

Bu yüzden yine bu bölümde üzerinde çalışılacak olan fizik optik yöntemiyle ilgili tanım ve formulasyon verildikten sonra küre, silindir, kesik koni, dikdörtgen, üçgen gibi basit cisimlerin formulasyonları ve matlab kodunda uygulamaları verilmiştir.

Son olarak bu basit cisimlerin oluşturduğu daha kompleks bir hedefin fizik optik tabanlı bir matlab kodunda radar kesit alanı hesaplattırılarak sonuç bölümü

oluşturulmuştur. Çalışmanın amacı henüz dizayn aşamasındaki platformların radar kesit alanlarının kolaylıkla hesaplanarak platformun dizaynına katkı sağlamak veya halihazırda kullanılan platformların radar kesit alanlarını kolaylıkla ve gerçeğe yakın hesaplayarak bu parametrenin en uygun şekilde kullanılmasını sağlamak olarak belirtebiliriz.

2. RADAR KESİT ALANI

2.1 Radar Kesit Alanı Tanımı

Radar kesit alanı (RKA), tanım olarak, hedeflerin üzerine gelen elektromagnetik enerjiyi radar alıcısı yönünde yansıtma kabiliyetlerinin bir ölçüsüdür. Hedeften geri dönen enerji; aydınlatılan alanın dalga boyu, hedef geometrisi, hedefin konumu ve iletkenliği gibi birçok parametre ile değişir.

Bir radar vericisinden gönderilen işaret, hedef tarafından yansıtılarak tekrar radar alıcısına eriştiğinde işaretteki zayıflamalar radar uzaklık denkleminde göz önüne alınır ve hedefin yansıması tek bir σ fonksiyonuyla tanımlanır. Bu σ fonksiyonuna yansıtan hedefin Radar kesit alanı (RKA yada RSC : Radar Cross Section) denir.

RKA hedefin görünür kısmını tarif eder ve hedef tarafından ne kadar güç akısının tutulmuş olduğunu ve de ne kadarının radar alıcısına yansımış olduğunu ölçer. RKA hedefi karakterize etmede oldukça faydalıdır ve yaygın olarak kullanılır. Verici gücünden, alıcı duyarlılığından ve alıcı ile vericinin hedefe uzaklığından bağımsızdır.

Hedeflerin RKA değerleri kullanılan frekansa, hedef geometrisi ve hedefin elektriksel özelliklerine bağlıdır. RKA, radar alıcısına yansıyan ve hedefe gelen güç yoğunluklarının oranı olarak verilmektedir. Yani,

$$\sigma = \frac{\textit{Birim katı açıda radar alıcısına yansıyan güç}}{\textit{Hedefe gelen güç yoğunluğu} / 4\pi} \quad [\mathrm{m}^2] \qquad (2.1)$$

Elektrik ve elektronik terimlerin bulunduğu IEEE sözlüğü RKA'i aşağıdaki gibi formüle edilmektedir. $[\mathrm{m}^2]$

$$\sigma = \lim_{R \to \infty} 4\pi R^2 \frac{\left|\vec{P}_s\right|^2}{\left|\vec{P}_i\right|^2} \quad [\mathrm{m}^2] \qquad (2.2)$$

yada, saçılan P_s ve gelen güç yoğunlukları P_i yerine, alıcı yönünde saçılan ve hedefe gelen elektrik alanlar E_s ve E_i cinsinden

$$\sigma = \lim_{R \to \infty} 4\pi R^2 \frac{\left|\vec{E}_s\right|^2}{\left|\vec{E}_i\right|^2} \qquad [m^2] \tag{2.3}$$

de yazılabilir.

Radar kesit alanının hesaplanması temel olarak hedeften dağılan elektrik alanın bulunması demektir. Gelen düzlemsel dalga tarafından hedefe endüklenen akım hesaplanabilirse, anten dizilerinde kullanılan aynı integraller dağılan bu elektrik alanın hesaplanmasına uygulanabilir.

Hedefin uzak bölgelerinde, dağılan alanın mesafeye bağımlılığı R (radar ile hedef arası uzaklık) ile ters orantılı olarak değişir ve bu yüzden σ mesafeden bağımsızdır. Yine de, endüklenen akımın belirlenmesi zor bir problemdir. Çünkü, Maxwell denklemlerinin karmaşık sınır değerleri için çözülmesi gerekmektedir. Bir çok durumda sadece sayısal bir çözüm mümkündür.[1]

Radar kesit alanı birimi sıklıkla desibel [dB] metre kare [m^2] olarak kullanılır, yani [dB m^2];

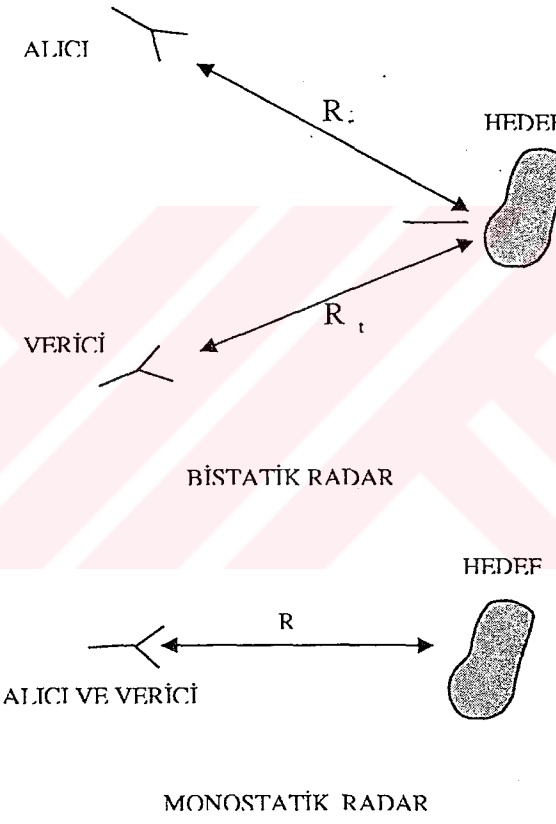
$$\sigma[dB\,m^2] = 10\,Log\,(\sigma[m^2]) \tag{2.4}$$

Tablo 2.1 Bazı yaygın hedefler için RKA değerleri

Hedef	RKA(ondalık ölçekte)	RKA(logaritmik ölçekte)
Kuş	0,001 m^2	-30 dB m^2
Cruise Füzesi	0,01 m^2	-20 dB m^2
İnsan Küçük Bot Küçük Uçak	1 m^2	0 dB m^2
Büyük Füze Savaş-Bombardıman Uçağı	10 m^2	10 dB m^2
Yoldaki Trafik Büyük Uçak	100 m^2	20 dB m^2
Tanker Büyük Yolcu Gemisi	1000 m^2	30 dB m^2

Tablo 2.1' de çeşitli hedefler için radar saçılma değerleri örnek olarak verilmiştir. Büyük yolcu uçakları için tipik radar kesit alanı değeri 20 $dB\,m^2$ ($100\,m^2$), kuşlar için ise sadece -30 $dB\,m^2$ ($0.001\,m^2$) dir. Modern radarlar kuş sürülerini ve hatta böcek topluluklarını dahi algılayabilmektedirler.

Radar bilgisayarı tüm algılamaları inceler ve hedefleri hızları ve yörüngelerine göre ayıklayabilir. Yine de, bizim ilgilenmediğimiz düşük radar kesit alanına sahip hedefler de algılanabilir ve bu yüzden RKA hesaplamaları mühendislik açısından zor bir konudur.



Şekil 2.1.Bistatik ve Monostatik Radar

RKA, Bistatik RKA ve Monostatik RKA olmak üzere iki farklı terimle ifade edilir. Radar terminolojisindeki RKA, verici ile alıcı konumlarının farklı olması durumunda kullanılır. Yani hedef üzerine elektromagnetik dalganın gönderiliş yeri ile, saçılan alanın ölçülme yeri farklıdır.[2]

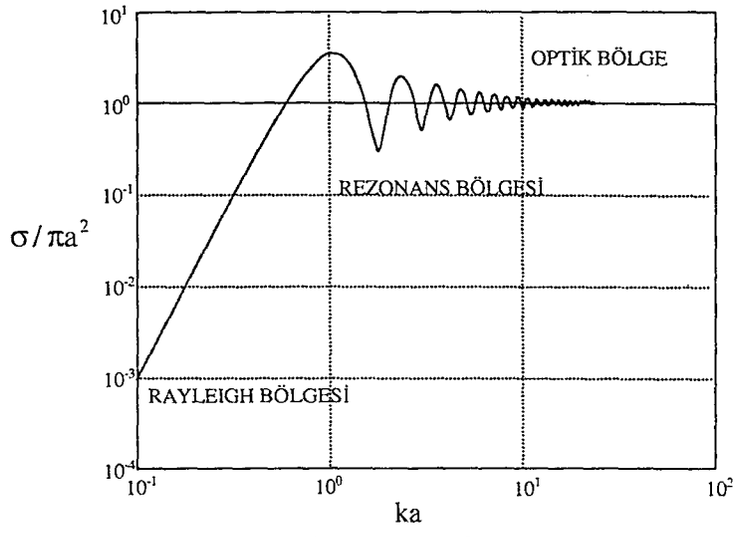
Monostatik RKA' de ise verici ile alıcı konumları aynıdır. Radarların çoğunluğu, monostatik radardır. Bu nedenle RKA denildiğinde genellikle monostatik RKA anlaşılır. Bu çalışmada da hesaplar monostatik radarlar için yapılmıştır. Şekil 2.1'de monostatik ve bistatik radar gösterilmiştir.

2.2 Frekans Bölgesi

Bir hedefin saçılma karakteristiği büyük ölçüde gelen dalganın frekansına bağlıdır. Buradaki değişimden dolayı hedeflerin boyutlarına göre 3 frekans bölgesi tanımlanmıştır. Bunlar:

1. *Yüksek Frekans Bölgesi (Optik Bölge)* : Hedef boyu >> λ, Bu bölgede hedefin boyutları kullanılan radarın dalga boyundan oldukça büyüktür. Bu yüzden gemi, uçak vb. gibi büyük ve karmaşık cisimlerden saçılmalarının incelenmesi bu bölge içinde yapılmaktadır. RKA kabaca hedefin alanıyla aynı büyüklüktedir. Bu bölge Optik Bölge olarak anılır çünkü RKA optik değere yaklaşır. Bu bölgede hedefe parça parça bakılır.

2. Rezonans Bölgesi : Hedef boyu ≈ λ, bu bölgede hedefin boyutları yaklaşık olarak dalga boyu civarında değişmektedir. Dalga boyundaki değişikliklere bağlı olarak RKA geniş bir alanda değer alır. Bu değer optik değerden büyük yada küçük olabilir. Bu bölge *Rezonans Bölgesi* yada *Mie Bölgesi* adını alır.



Şekil 2.2.Bir kürenin RKA üç frekans bölgesi için gösterilimi

3. *Alçak Frekans Bölgesi (Rayleigh Bölgesi)* : Hedef boyu $<< \lambda$, Hedef boyutu dalga boyundan çok küçük ise bu bölge *Rayleigh Bölgesi* olarak anılır. Bu bölgede hedef noktasal hedef olarak davranır.

Burada a yarıçap, $k=2\pi/\lambda$ dalga sayısı olmak üzere, $ka < 0.5$ için çizgi yaklaşık olarak lineerdir fakat 0.5'in üzerinde salınım yapmaya başlar. Bu bölge rezonans bölgesidir. Bu salınım yaklaşık $ka = 10$ gibi yüksek değerlerde son bulur.

Algılanmak istenen hedeflerin saçılma karakteristikleri, bir radarın çalışma frekansının seçimindeki etkenlerden sadece bir tanesidir. Diğerleri ise; Boyut kısıtlamaları, anten kazancı, demet genişliği, verici gücü, çevre gürültüsü, Doppler kayması ve atmosferik zayıflatmalardır.[2-3]

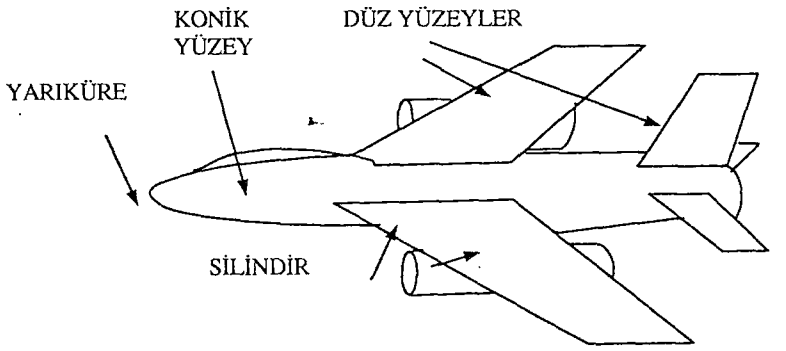
Radar frekansları konusunda geleneksel bir sınırlama yoktur. Çalıştığı frekans ne olursa olsun, elektromagnetik enerji yayarak hedeflerden yansıyan elektromagnetik enerjiyi toplayan ve sınıflandırabilen cihazlar radar olarak adlandırılabilmektedir. Günümüzde birkaç megahertzden spektrumda ultraviole bölgelere kadar çalışan radarlar bulunmaktadır. Temel çalışma prensipleri tüm frekanslarda aynı olmasına karşın pratikteki uygulamaları oldukça farklı olabilmektedir. Pratikte radarların çoğu mikrodalga frekanslarda çalışmasına karşın bu konuda da herhangi bir sınırlama yoktur.

2.3 Saçılma Mekanizmaları

Saçılma karakteristikleri; biyomedikal düzenlemeler, haberleşme sistemleri, askeri uygulamalar ve RKA hesaplanması gibi pek çok sahada uygulama alanı bulmuşlardır. Bu uygulamaların hepsinde de hedeflerin tanınması ve sınıflandırılması için saçılma karakteristiklerinden yararlanılmaktadır.

RKA hesaplamalarında öncelikle, levha, küre, silindir ve tel gibi temel şekiller ele alınır. Kompleks yapılarda ise hedef olabildiğince bu temel şekillerden oluşan alt bölgelere ayrılır. Bu sayede bütününde karmaşık bir yapıya sahip olan uçak, gemi vs. gibi gerçek hedeflerin RKA tahmini daha gerçekçi bir şekilde yapılabilir. Aşağıdaki Şekil 2.3'de bir savaş uçağı için bu indirgeme gösterilmiştir. Elbette temel şekillerden oluşan bu alt bölgeler tek tek ele alındığında RKA hesaplaması kolay olmaktadır. Fakat, bu alt bölgelerden olan saçılmaların birbirleriyle olan etkileşimleri, ardışıl yansımalar ve hedeflerin geometrilerinden kaynaklanan

hesaplama zorlukları gibi nedenler bizleri farklı hedefler için farklı frekans bölgelerinde farklı hesaplama yöntemlerini kullanmaya zorlamaktadır.



Şekil 2.3 Bir uçağı oluşturan basit ana şekiller

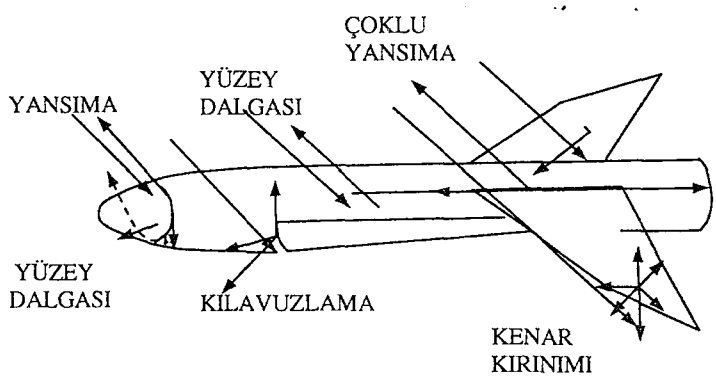
RKA hesaplamalarında aşağıdaki saçılma mekanizmaları göz önüne alınmaktadır. Hedef geometrilerine göre bu saçılma mekanizmalarının etkinliği de değişebilmektedir. Şekil 2.4'de bir roket üzerinde bu mekanizmalar gösterilmiştir.[1]

1 Yansıma: Bu saçılma mekanizması, RKA'nı en yüksek düzeyde etkileyen mekanizmadır. Yüzeylerin eğrilik yarıçaplarının gelen dalga boyuna göre çok büyük olduğu durumlarda geçerli olur. Işınlar Snell yasalarına uyarlar. Fakat çok yüzeyli yapılarda çoklu yansımaların oluşabileceği ve gelen düzlem dalganın çok farklı şekilde yansıyabileceği durumların olması kaçınılmazdır.

2 Kırınım: Uç ve kenar gibi süreksizlik gösteren yüzeylerden olan saçılmalardır. Bu tür geometrilerde temel ışın-optik yöntemler yerine kırınım teorilerini içeren geometrik kırınım teorisi veya fiziksel kırınım teorisi kullanılır.

3 Yüzey dalgaları: Yüzey dalgası terimi pek çok dalga biçimini içeren ve bir gövde boyunca yol alan akımı ifade eder. Yüzey dalgaları, iç bükey yüzeylerde yüzeyi yalayarak gelen dalgalardır. Bu dalgalar dış bükey yüzeylerde zayıflayarak yol alırlar ki, buna da sürünen dalga denir.

4 Kılavuzlama: Dalga kılavuzu olarak da adlandırılan bu tür saçılmalar dalga kısmen kapalı bir yüzeye hapsedildiğinde oluşur. Örnek olarak jetlerin hava giriş ağzı verilebilir.



Şekil 2.4 Saçılma Mekanizmaları

2.4 Hesaplama Yöntemleri

Elektromagnetik saçılma ve radyasyon problemleri ya zaman uzayında (time domain-TD) veya frekans uzayında (frequency domain-FD) çözülebilir.

RKA hesabında kullanılan birçok yöntem vardır. Bunlardan bir veya iki boyutlu yapılar veya basit üç boyutlu şekiller için kullanılan yöntemlere burada yer verilmeyecektir.

Anlatılacak olan yöntemler, sıradan şekilli üç boyutlu hedeflere uygulanabilen yöntemlerdir. Bunlar sırasıyla mikrodalga optik,moment metodu, sonlu farklar yöntemi,geometrik optik ve fizik optik yöntemidir.[1-7]

2.4.1 Mikrodalga Optik

Bu yöntem, sıradan şekilli boyut olarak büyük hedeflerin analiz edilmesinde kullanılır. Basit ortamlarda (lineer, homojen, izotropik) mikrodalga yöntemi için kurallar, optikteki yansıma ve kırılma kuralları ile benzerlik gösterir.

Bunlara ek olarak kenar ve köşelerdeki gelen dalganın saçılmasından oluşan kırılmış ışınlara da müsaade edilir.

Formüller sonsuz frekans ($\lambda \to 0$) temelinden türetilmiştir. Bu yöntem, frekans uzayında kullanılır.[2]

2.4.2 Moment Yöntemi

Bir integral denklemi çözebilmek için kullanılan en yaygın teknik, moment yöntemidir. Elektromagnetik denklemler Maxwell denklemlerinden ve sınır koşullarından türetilmiştir. Moment yöntemi integral denklemlerini standart matrisler ile çözülebilsin diye bir dizi lineer denklemlerin çözümüne indirger.

Matrisin büyüklüğü hedefin büyüklüğüne bağlıdır ve şu anki bilgisayar olanakları 10 veya 20 misli dalga boyu büyüklüğündeki hedefler için geçerlidir.

Çoğu moment yöntemi formülleri hedefi parçalara ayırmayı gerektirir. Bundan dolayı yapı mühendisliğinde kullanılan sonlu elemanlar yöntemi ile uyumludur.
Bu yöntem hem zaman hem de frekans uzayındaki çözümler için geçerlidir. Gemi boyutları dalga boyuna göre çok büyük olduğu için gemi RKA hesabında bu yöntemin kullanılması pratik olarak imkansızdır.[2]

2.4.3 Sonlu Farklar Yöntemi

Sonlu farklar, Maxwell denklemlerindeki türev operatörlerini zaman veya frekans uzayında hesaplamak için kullanılır.

Moment yönteminde olduğu gibi hedef parçalara ayrılmalıdır. Maxwell denklemleri ve sınır koşuları parçalanmış hücre sınır koşullarında ve hedefin yüzeyinde uygulanır.

Sonlu farklar yönteminde moment yönteminde olduğu gibi büyük matrisler gerekli değildir.[2-7]

2.4.4 Geometrik Optik Yöntemi

Geometrik optikte, saçılan alanın hesaplanmasında elektromanyetik enerjinin izlediği yollar ışınlarla modellenir. Bu yollar, direkt, yansımış ve kırınıma uğramış terimler içerebilirler. Yaygın kullanımı ile (üniform olmayan) geometrik optik, direkt yollardan başka yansıyan ışın yollarını içerir, kırınım terimlerini içermez. Homojen bir ortamda, enerji ışın yolu boyunca düz bir hatta ilerler. Bu ışın yollarına normal olan yüzeyler eşfaz yüzeyler olarak adlandırılır.

Bir düzlem dalga küre yüzeyi üzerine düşürüldüğünde, verici doğrultusunda geriye saçılan alan bulunarak kürenin RKA hesaplanabilir. Bunun için speküler noktadan yansıyan tek bir ışın bizim için yeterli olacaktır.

Yarıçapı a olan bir kürenin RKA;

$$\sigma = \lim_{\lambda \to \infty} 4\pi\lambda^2 \left[\frac{a/2}{a/2+\lambda} \right]^2 = \pi a^2 \qquad (2.4)$$

olarak ifade edilir. Kürenin yarıçapı büyüdükçe, RKA değeri gerçek değere daha çok yaklaşmaktadır. Bu yüzden, geometrik optik yöntemi hedef yüzeylerinin dalga boyuna göre oldukça büyük olduğu problemlerde başarılı olmaktadır. Ayrıca (2.4) denkleminden görüleceği üzere RKA değeri frekanstan bağımsızdır. GO yöntemini, kaynak ve yansıma noktalarının sabit olduğu problemlere uyguladığımızda gözlem noktası tarafımızdan yansıma kurallarına göre belirlenmek zorundadır. Bu nedenle geometrik optik yönteminde yansıyan alan hakkında sadece tek bir doğrultuda (speküler doğrultulu) bilgi toplanabilir. Ancak gerçek hedeflerde yansımalar çok farklı açısal bölgelerde gerçekleşebilir. Speküler doğrultuda olmayan yansımalarında elde edilebilmesi için, öncelikle yansıtıcı yüzeylerdeki akımın ne olduğu belirlenmeli ve bu akımların toplamından da yansıyan alanın tamamı bulunmaya çalışılmalıdır. İşte bu fizik optik yöntemidir.[2]

2.5 Fizik Optik Yöntemi

Eğrilik yarıçapları dalga boyuna göre çok büyük olduğu ve kenar etkilerinin ihmal edilebileceği durumlarda, gerçeğe yakın sonuçlar veren bir yöntemdir. Gemi RKA'ı hesabı için en uygun yöntem budur.

Kenar etkileri ihmal edilmediği durumlarda, düzeltme terimleri de çözüme eklenmelidir. Hesaplarda, yüzey süreksizliklerinden kaynaklanan kırınım bileşenleri, sürünen dalga katkıları vb. ikincil etkileri içeren terimler göz önüne alınmamıştır.

Fizik Optik yöntemde, gelen alanın genliği 1 seçildiğinde monostatik RKA aşağıdaki bağıntı ile belirlenir.[1-2]

$$\sigma = \frac{k^2}{\pi} \left| \int_S (\vec{n}.\vec{u}_i).e^{-j2k.\vec{r}.\vec{u}_i}.dS \right|^2 \qquad (2.5)$$

Bu bağıntıda;

$\vec{u}_i$: Aydınlatan alan doğrultusundaki birim vektör

$\vec{n}$: Aydınlatılan yüzeyin birim normali

$\vec{r}$: Gözlem noktasına (radar) ilişkin yer vektörü

k : Dalga sayısı

dS : Elementer yüzey parçası

olarak tanımlanır.

Hedefin S yüzeyi, ΔS büyüklüğünde alt yüzeylere ayrıldığında, N yüzey sayısı ve $\vec{n}_1$ her bir yüzeye ilişkin birim vektör olmak üzere, monostatik RKA (2.6) bağıntısı ile belirlenir.

$$\sigma = \frac{k^2}{\pi} \left| \sum_{l=1}^{N} \int_{\Delta S_l} (\vec{n}_l.\vec{u}_i).e^{-j2k.\vec{r}.\vec{u}_i}.dS_l \right|^2 \qquad (2.6)$$

Algoritmada yüzeyler üçgen düzlem parçalarına ayrılmış ve her bir üçgen düzlem için fizik optik yaklaşıklığı ile saçılmalar hesaplandıktan sonra (2.6) bağıntısı kullanılarak, hedefin toplam RKA elde edilmiştir.

2.6 Basit Objelerin Radar Kesit Alanı

Bu bölümde, temel basit şekilli objelerin radar kesit alan örnekleri sunulacaktır. Mükemmel iletken küre hariç tüm objeler için yalnızca optik bölge yaklaşımları ele alınmıştır. Radar tasarımcısı ve RKA mühendisleri, mükemmel iletken küreyi test edilebilecek en basit hedef olarak kabul ederler. Ama bu hedef için yapılan kesin çözümün kompleksliği optik bölge yaklaşımı ile karşılaştırılamayacak kadar büyüktür. Burada sunulacak olan tüm formulasyonlar, (θ,φ) yönünde uzak alan çalışan bir radar için geri saçılan RKA'nı fizik optik yaklaşımı ile kestirmektedir.[4]

2.6.1 Küre

Simetriye bağlı olarak, mükemmel iletken bir küreden geri saçılan dalgalar gelen dalgalarla aynı polarizasyona sahiptir. Bu da çapraz polarizasyonlu dalgaların pratikte sıfır olduğu anlamına gelir. Örneğin, eğer gelen dalga sola dairesel polarizeli ise geri saçılan dalga da sola polarizeli olacaktır. [4]

Mükemmel iletken bir kürenin normalize edilmiş geri saçılan radar kesit alanı aşağıda formulasyonu verildiği gibi bir Mie serisidir.

$$\frac{\sigma}{\pi r^2} = \left(\frac{j}{kr}\right)\sum_{n=1}^{\infty}(-1)^n(2n+1)\left[\left(\frac{krj_{n-1}(kr) - nj_n(kr)}{krh_{n-1}^{(1)}(kr) - nh_n^{(1)}(kr)}\right) - \left(\frac{j_n(kr)}{h_n^{(1)}(kr)}\right)\right] \qquad (2.7)$$

r : kürenin yarıçapı

j_n : n. dereceden küresel Bessel fonksiyonu

$h_n^{(1)}$: n. dereceden Hankel fonksiyonu

Şekil 2.2 'de üç bölge belirtilmiştir. İlk olarak optik bölgeyi ele alalım ki bu dalga boyuna göre çok büyük bir küreye aittir. Bu durumda,

$$\sigma = \pi r^2 \qquad r >> \lambda \qquad (2.8)$$

İkinci olarak dalga boyuna göre daha küçük bir küreye ait olan Rayleigh bölgesi gelir. Bu durumda,

$$\sigma = 9\pi r^2 (kr)^4 \qquad r << \lambda \qquad (2.9)$$

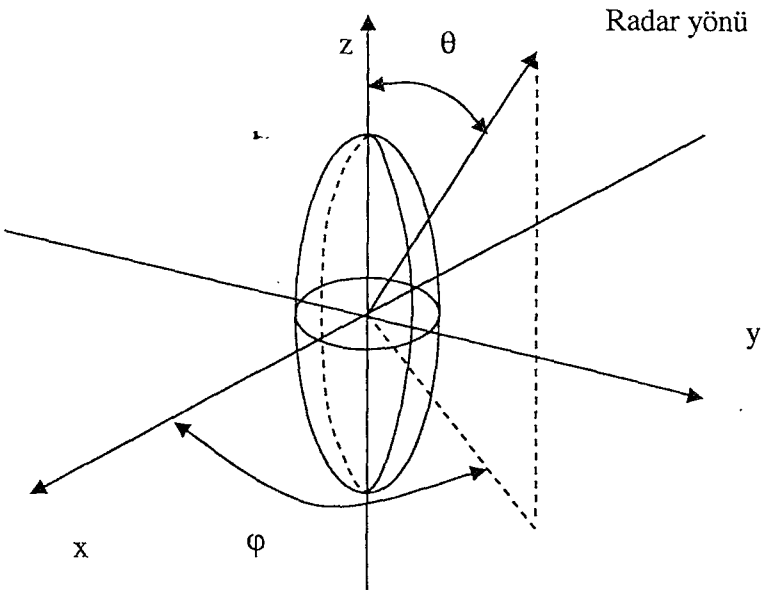
şeklinde gösterilir.

Optik bölgeyle Rayleigh bölgesi arası ise kürenin boyutu dalga boyuyla hemen hemen aynıdır ve doğada Şekil 2.2'de görüldüğü gibi rezonans halindedir. Bu bölgeye bundan dolayı rezonans veya Mie bölgesi adı verilir.

Mükemmel iletken bir kürenin geri saçılan RKA optik bölgede sabittir. Bu yüzden radar tasarımcıları kesit alanları belli küreleri radar sistemlerini kalibre etmekte kullanırlar. Küreler bu amaçla doppler değişimini de elimine etmek için hızı bilinen bir uçağın arkasına yedeklenerek ölçüm yapılır.

2.6.2 Elipsoid

(0,0,0) noktasına merkezlenmiş bir elipsoid Şekil 2.5'de gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Elipsoid

Elipsoid için genel olarak kabul edilmiş geri saçılan radar kesit alanı yaklaşımı;

$$\sigma = \frac{\pi a^2 b^2 c^2}{(a^2(\sin\theta)^2(\cos\varphi)^2 + b^2(\sin\theta)^2(\sin\varphi)^2 + c^2(\cos\theta)^2)^2} \qquad (2.10)$$

a=b olduğu zaman, elipsoid simetrik olur ve RKA φ 'dan bağımsız hale gelir. (2.11) denklemi

$$\sigma = \frac{\pi b^4 c^2}{(a^2(\sin\theta)^2 + c^2(\cos\theta)^2)^2} \qquad (2.11)$$

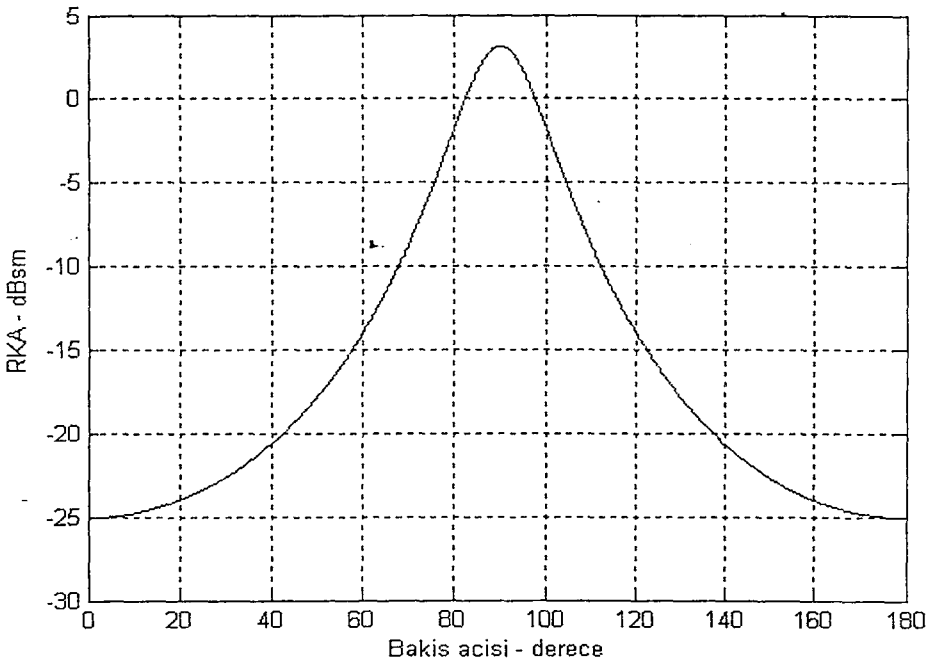
denklemine indirgenir.

a=b=c durumunda ise

$$\sigma = \pi c^2 \qquad (2.12)$$

şeklinde sadeleşir.[4]

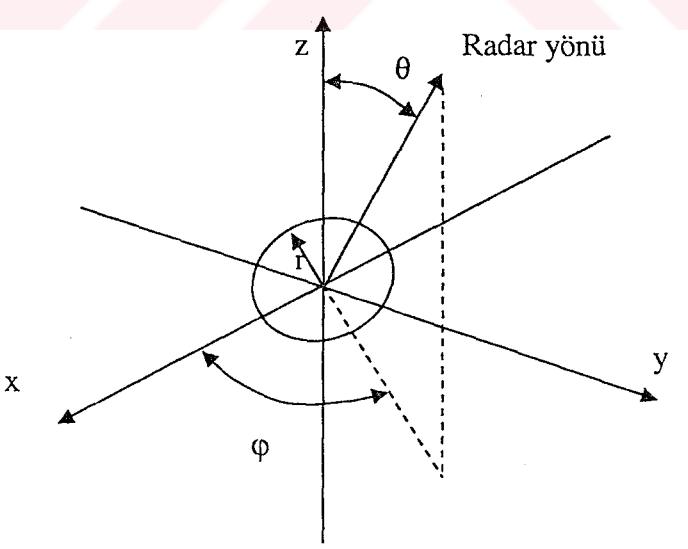
Aynı zamanda bu son denklem bir kürenin geri saçılan radar kesit alanını da tanımlar. Şekil 2.6'de denklem (2.10) ve (2.11) kullanılarak oluşturulan plot gösterilmektedir.



Şekil 2.6 Elipsoid için RKA, bakış açısı, $\varphi = 45°$

2.6.3 Dairesel Düz Plaka

Dairesel simetriden dolayı Şekil 2.6 da da görüldüğü gibi, dairesel düz bir plakanın geri saçılan RKA φ'den bağımsızdır. RKA sadece görüş açısına bağlıdır. [4]



Şekil 2.7 Dairesel Düz Plaka

0° görüş açısı için dairesel düz bir plakanın geri saçılan RKA,

$$\sigma = \frac{4\pi^3 r^4}{\lambda^2} \qquad \theta = 0^\circ \tag{2.13}$$

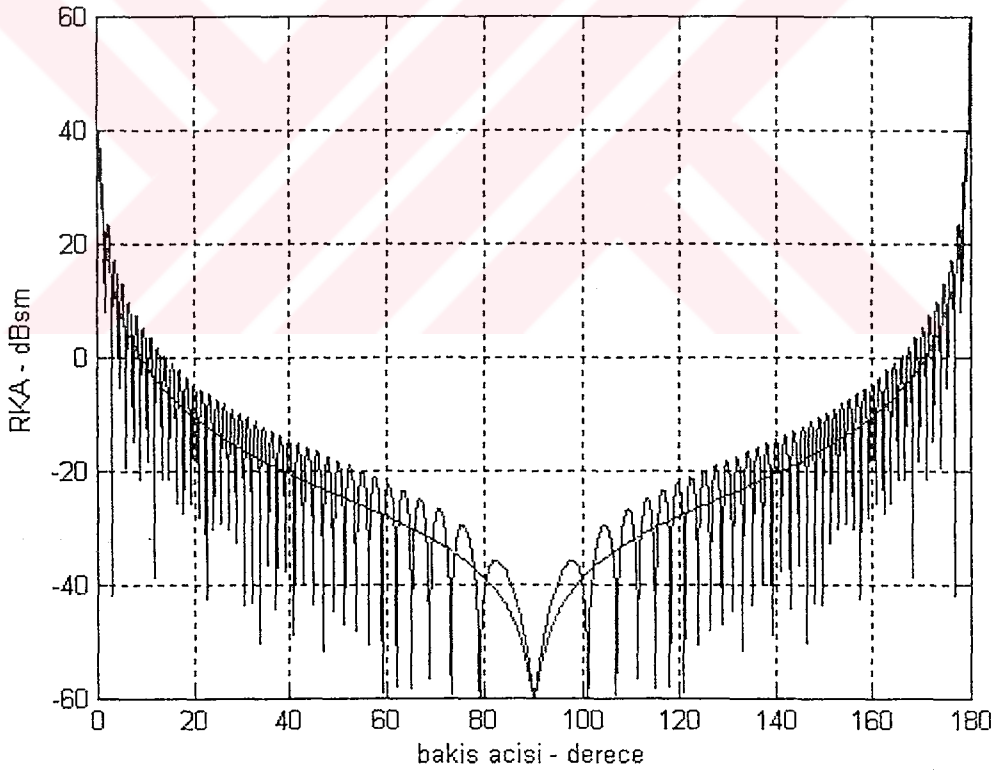
Normalin dışındaki görüş açıları için ise herhangi bir lineer polarizeli dalga için iki yaklaşım vardır.

$$\sigma = \frac{\lambda r}{8\pi \sin\theta (\tan(\theta))^2} \tag{2.14}$$

$$\sigma = \pi k^2 r^4 \left(\frac{2 j_1(2kr\sin\theta)}{2kr\sin\theta} \right)^2 (\cos\theta)^2 \tag{2.15}$$

$j_1(\beta)$: β 'da yuvarlanmış 1.dereceden küresel Bessel fonksiyonu.

Şekil 2.8'da denklem (2.14) ve (2.15) için çizdirilen plot gösterilmektedir.



Şekil 2.8 Dairesel düz bir plaka için RKA, r = 0.25 m

2.6.4 Kesik Koni

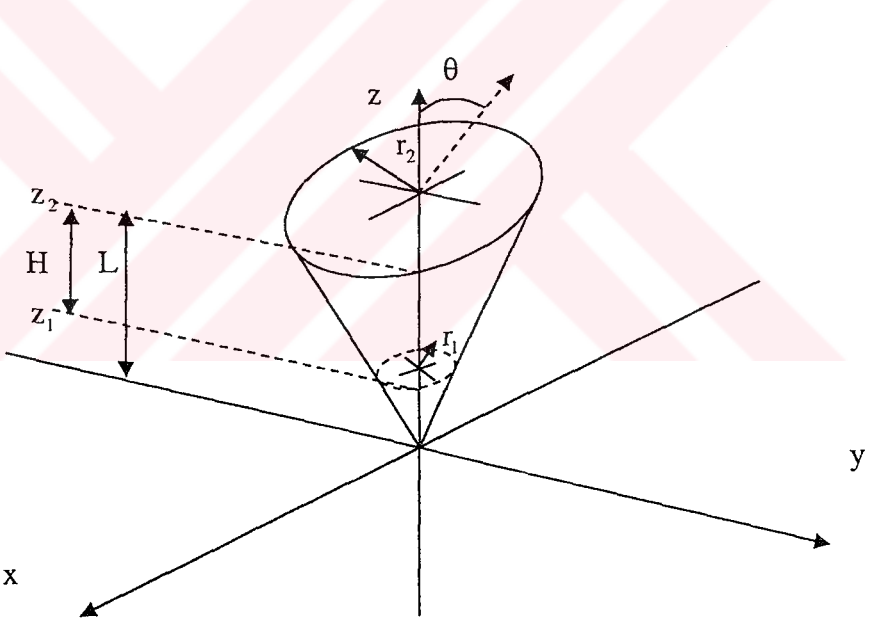
Normal geliş açısında, lineer polarizeli gelen bir dalga için kesik bir koninin geri saçılan RKA için bir yaklaşım,

$$\sigma_{\theta_n} = \frac{8\pi(z_2^{3/2} - z_1^{3/2})}{9\lambda \sin\theta_n} \tan\alpha(\sin\theta_n - \cos\theta_n \tan\alpha)^2 \qquad (2.16)$$

Yarım koni açısı α,

$$\tan\alpha = \frac{(r_2 - r_1)}{H} = \frac{r_2}{L} \qquad (2.17)$$

θ_n : normal görüş açısı



Şekil 2.9 Kesik Koni

Kesik bir koni, koninin dar bölgesi tarafına yerleştirilmiş bir radar tarafından aydınlatıldığında

$$\theta_n = 90^\circ - \alpha \qquad (2.18)$$

Tam tersi olarak normal açıda ise

$$\theta_n = 90^\circ + \alpha \tag{2.19}$$

Trigonometrik özelliklerden faydalanarak denklem 2.17' i ,

$$\sigma_{\theta_n} = \frac{8\pi(z_2^{3/2} - z_1^{3/2})^2}{9\lambda} \frac{\sin\alpha}{(\cos\alpha)^4} \tag{2.20}$$

Normalin dışındaki görüş açıları için ise RKA yaklaşımı,

$$\sigma = \frac{\lambda z \tan\alpha}{8\pi \sin\theta} \left(\frac{\sin\theta - \cos\theta \tan\alpha}{\sin\theta \tan\alpha + \cos\theta} \right)^2 \tag{2.21}$$

z : radarın koninin dar veya geniş ağzına yakın olmasına bağlı olarak z_1 veya z_2 olabilir.

Yine trigonometrik özelliklerden faydalanarak radarın koniyi geniş ağzı tarafından başlayarak aydınlattığını düşünürsek denklem (2.21)'yi,

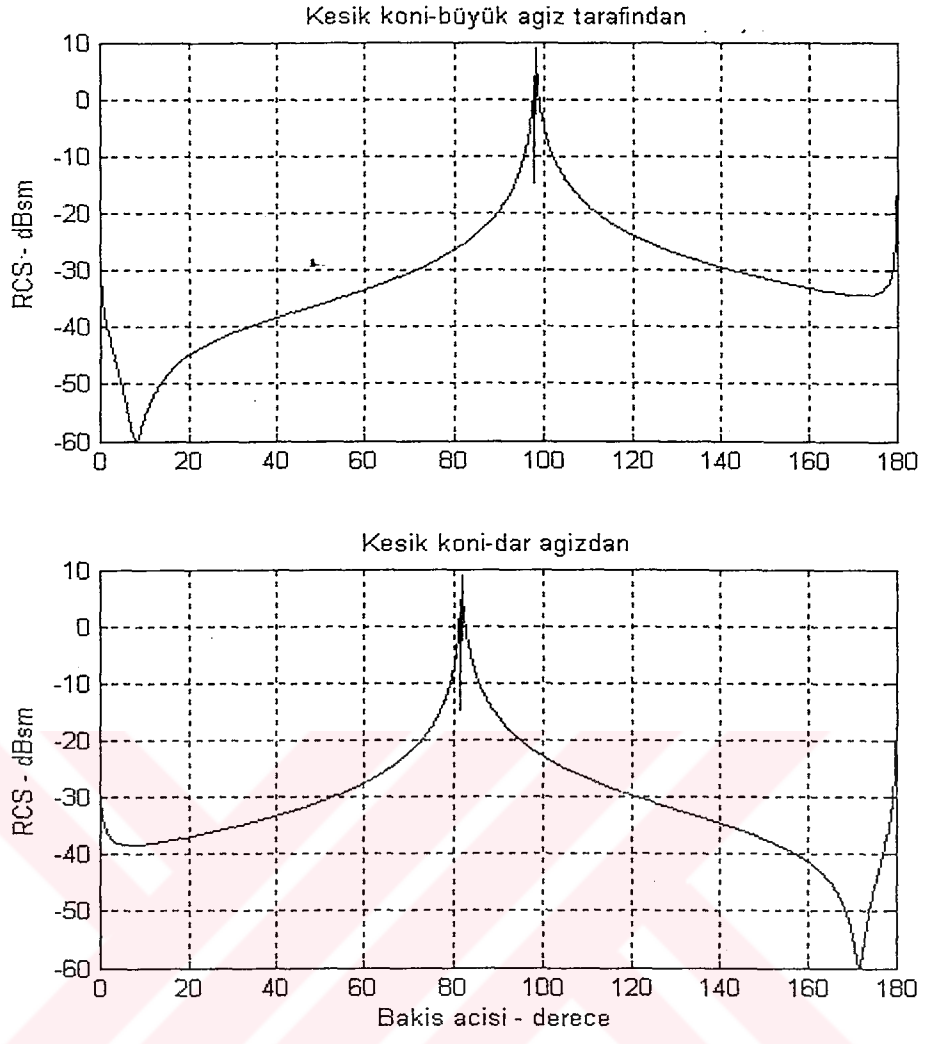
$$\sigma = \frac{\lambda z \tan\alpha}{8\pi \sin\theta} (\tan(\theta - \alpha))^2 \tag{2.22}$$

denklemine indirgeyebiliriz.

Radarın koniyi dar ağız tarafından aydınlattığı durumunu ele aldığımızda ise,

$$\sigma = \frac{\lambda z \tan\alpha}{8\pi \sin\theta} (\tan(\theta + \alpha))^2 \tag{2.23}$$

denklemine indirgeyebiliriz.



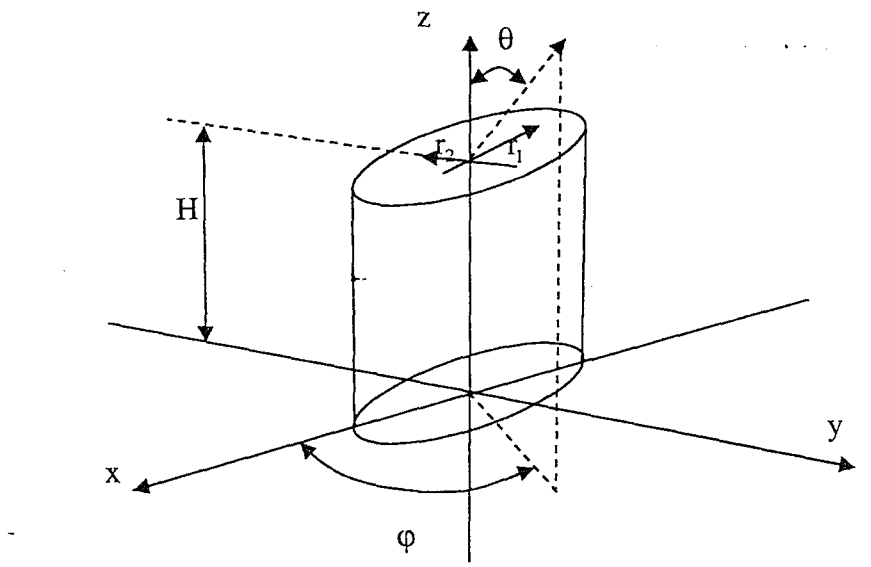
Şekil 2.10 Kesik koninin Fizik optikle RKA

2.6.5 Silindir

Silindir geometrisini ele aldığımızda iki farklı yapı söz konusudur. Birincisi, eliptik silindir, ikincisi ise dairesel silindirdir. Eliptik silindir için normal ve normal olmayan geri saçılan radar kesit alanı ifadeleri sırasıyla,

$$\sigma_{\theta_n} = \frac{2\pi H^2 r_2^{\,2} r_1^2}{\lambda(r_1^2(\cos\varphi)^2 + r_2^2(\sin\varphi)^2)^{1.5}} \tag{2.24}$$

$$\sigma = \frac{\lambda r_2^2 r_1^2 \sin\theta}{8\pi(\cos\theta)^2(r_1^2(\cos\varphi)^2 + r_2^2(\sin\varphi)^2)^{1.5}} \tag{2.25}$$



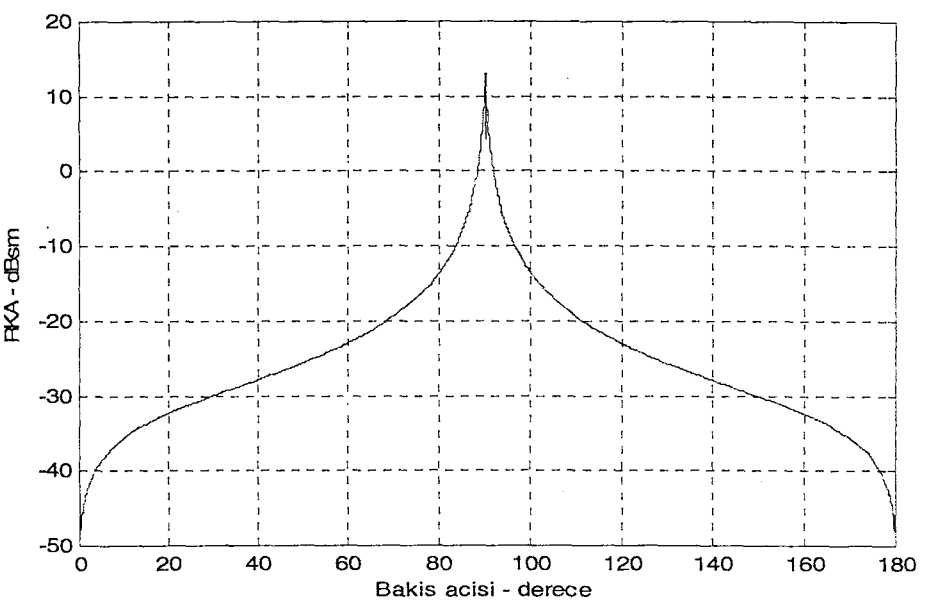
Şekil 2.11 Eliptik Silindir

Yarıçapı r olan dairesel bir silindir için denklemleri simetriden dolayı sırasıyla

$$\sigma_{\theta_n} = \frac{2\pi H^2 r}{\lambda} \tag{2.26}$$

$$\sigma = \frac{\lambda r \sin\theta}{8\pi(\cos\theta)^2} \tag{2.27}$$

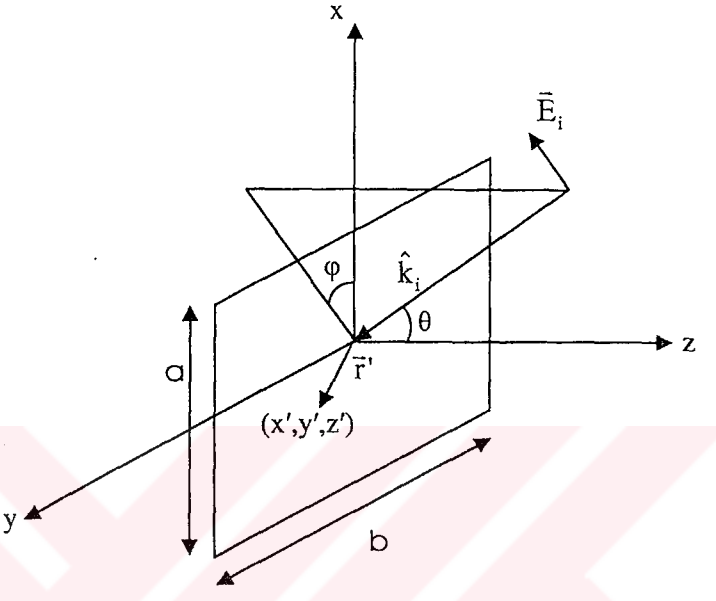
denklemlerine indirgenir. Şekil 2.12'de denklem (2.28) ve (2.29) için çizdirilen plot gösterilmektedir.



Şekil 2.12 Silindir için RKA, r = 0.125 m, H = 1 m, frekans = 9.5 GHz

2.6.6 Dikdörtgen Levha

Şekil 2.13'de gösterildiği gibi kenar uzunlukları a ve b olan bir dikdörtgen levhayı ele alalım. Rasgele polarizasyonlu bir düzlem dalgayla bu cismi (θ,Φ) geliş açılarıyla aydınlatalım.Dalga polarizasyonu $E_{0\theta}$ ve $E_{0\phi}$ sabitleriyle (2.28) denklemiyle belirlensin. [1-4]



Şekil 2.13 Kenar uzunlukları 5λ olan bir kare levhanın monostatik saçılım paterni.

$$\vec{E}_i = (E_{0\theta}\hat{\theta} + E_{0\phi}\hat{\phi})e^{-j\vec{k}_i.\vec{r}} \tag{2.28}$$

Eğer dalga merkeze doğru geliyorsa, $\hat{k}_i = -\hat{r}$, ve bu dalga bir düzlem dalga olduğu için magnetik alan yoğunluğu;

$$\vec{H}_i = \frac{-\hat{r}\times\vec{E}_i}{\eta} = -(E_{0\theta}\hat{\phi} - E_{0\phi}\hat{\theta})\frac{e^{-j\hat{k}_i.\hat{r}}}{\eta} \tag{2.29}$$

Dalganın empedansı η olan bir ortamda yayıldığı kabul edilmiştir.

Plaka üzerindeki akım yaklaşık olarak

$$\vec{J}_s \approx -2\hat{z}\times(E_{0\theta}\hat{\phi} - E_{0\phi}\hat{\theta})\frac{e^{-j\hat{k}_i.\hat{r}}}{\eta} \tag{2.30}$$

bağıntısı ile hesaplanır.[ ]

Levhanın alanını, A=ab, şeklinde hesaba katarak radar kesit alanı hesabı;

$$\sigma = \lim_{r\to\infty} 4\pi r^2 \frac{\left|\vec{E}_s\right|^2}{\left|\vec{E}_i\right|^2} = \lim_{r\to\infty} 4\pi r^2 \frac{\left|\vec{E}(r,\theta,\phi\right|^2}{\left|E_{0\theta}\right|^2} \tag{2.31}$$

olarak ifade edilir.

$$\sigma_{\theta\theta}(\theta,\phi) = 4\pi r^2 \left[\frac{A^2k^2}{4\pi^2 r^2}\cos^2\theta\right] \sin c^2(kau)\sin c^2(kbv) \tag{2.32}$$

Genellikle plotlamada frekanstan bağımsız σ/λ^2 birimi tercih edilir. Şekil 2.13'deki gibi mükemmel iletken 2a ve 2b ebatlarında bir dikdörtgen levhayı ele aldığımızda, x-z düzleminde lineer polarizeli bir dalga için dikey ve yatay RKA,

$$\sigma_D = \frac{b^2}{\pi}\left|\sigma_{1D} - \sigma_{2D}\left[\frac{1}{\cos\theta} + \frac{\sigma_{2D}}{4}(\sigma_{3D}+\sigma_{4D})\right]\sigma_{5D}^{-1}\right|^2 \tag{2.33}$$

$$\sigma_Y = \frac{b^2}{\pi}\left|\sigma_{1Y} - \sigma_{2Y}\left[\frac{1}{\cos\theta} - \frac{\sigma_{2Y}}{4}(\sigma_{3Y}+\sigma_{4Y})\right]\sigma_{5Y}^{-1}\right|^2 \tag{2.34}$$

$$\sigma_{1D} = \cos(ka\sin\theta) - j\frac{\sin(ka\sin\theta)}{\sin\theta} = (\sigma_{1Y})^* \tag{2.35}$$

$$\sigma_{2D} = \frac{e^{j(ka-\pi/4)}}{\sqrt{2\pi}(ka)^{3/2}} \qquad \sigma_{2Y} = \frac{4e^{j(ka+\pi/4)}}{\sqrt{2\pi}(ka)^{1/2}} \tag{2.36}$$

$$\sigma_{3D} = \frac{(1+\sin\theta)e^{-jka\sin\theta}}{(1-\sin\theta)^2} \qquad \sigma_{3Y} = \frac{e^{-jka\sin\theta}}{(1-\sin\theta)} \tag{2.37}$$

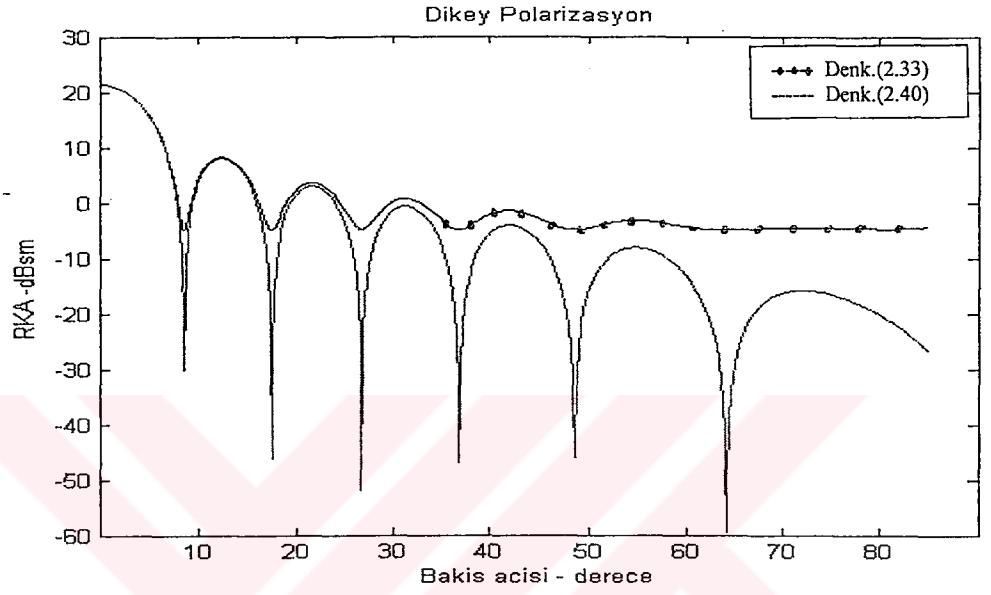
$$\sigma_{4D} = \frac{(1-\sin\theta)e^{jka\sin\theta}}{(1+\sin\theta)^2} \qquad \sigma_{4Y} = \frac{e^{jka\sin\theta}}{(1+\sin\theta)} \tag{2.38}$$

$$\sigma_{5D} = 1 - \frac{e^{j(2ka-\pi/2)}}{8\pi(ka)^3} \qquad \sigma_{5Y} = 1 - \frac{e^{j(2ka+\pi/2)}}{2\pi(ka)} \tag{2.39}$$

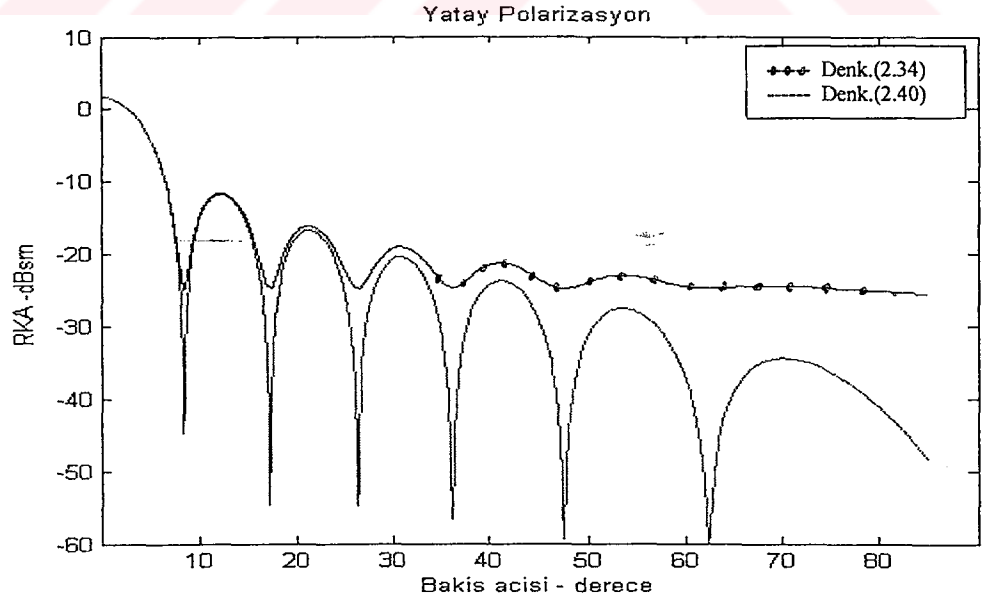
(2.33) ve (2.34) denklemleri $0^\circ \le \theta \le 80^\circ$ koşulundaki bakış açılarında gerçeklenir ve doğruya yakın bir sonuç verir. Herhangi bir θ, φ açısı için RKA ise,

$$\sigma = \frac{4\pi a^2 b^2}{\lambda^2}\left(\frac{\sin(ak\sin\theta\cos\varphi)}{ak\sin\theta\cos\varphi}\frac{\sin(bk\sin\theta\sin\varphi}{bk\sin\theta\sin\varphi}\right)^2(\cos\theta)^2 \qquad (2.40)$$

kestirilebilir. (2.40) denklemi polarizasyondan bağımsızdır ve $\theta \le 20^\circ$ koşullu bakış açılarında çalışır.

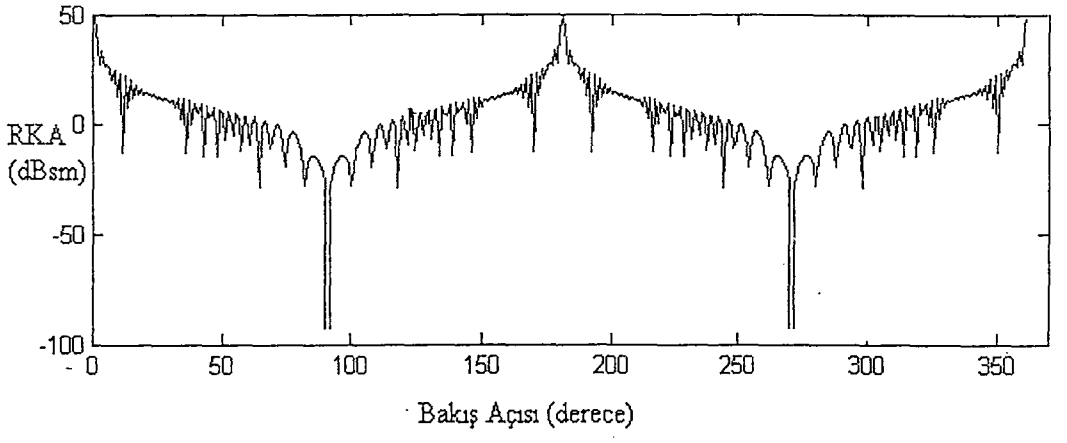


Şekil 2.14 Mükemmel iletken bir dikdörtgen levha için dikey polarizasyonlu RKA



Şekil 2.15 Mükemmel iletken bir dikdörtgen levha için dikey polarizasyonlu RKA

Şekil (2.14) ve (2.15), dikey ve yatay polarizasyonlarda (2.33), (2.34) ve (2.40) denklemlerinin a=b=1 m ve frekansın 1 GHz değeri için gerçekleştirilmiş plotlarıdır.



Şekil 2.16 Kenar uzunluğu 5λ olan bir karenin RKA

2.32 bağıntısı ile ifade edilen RKA Matlab kodunda programlandığında elde ettiğimiz Şekil 2.16'deki plotla Fizik Optik Yaklaşımının ve saçılımının karakteristiklerini genel olarak ifade edecek olursak;

1) σ değeri maksimum değerini θ=0'da alır ve

$$\sigma_{max} = \frac{4\pi A^2}{\lambda^2} \tag{2.41}$$

değerindedir.

2) Saçılım paterni aynı alana sahip bir dikdörtgenin radyasyon dağılımıyla açıya göre aynı fonksiyonel bağlantıya sahiptir.Yalnızca argümandaki 2 faktörü hariç.Örneğin;

$$\text{sinc}(kau/2) \tag{2.42}$$

ifadesi dikdörtgen levhadan ışınım ifade ederken f

$$\text{sinc}(kau) \tag{2.43}$$

ifadesi saçılımı ifade eder.

$$k=(2\pi)/\lambda=(2\pi f)/c, \tag{2.44}$$

olduğundan saçılım dağılımı ebatları 2a olan daha büyük bir levhanın ışınım dağılımına benzer.

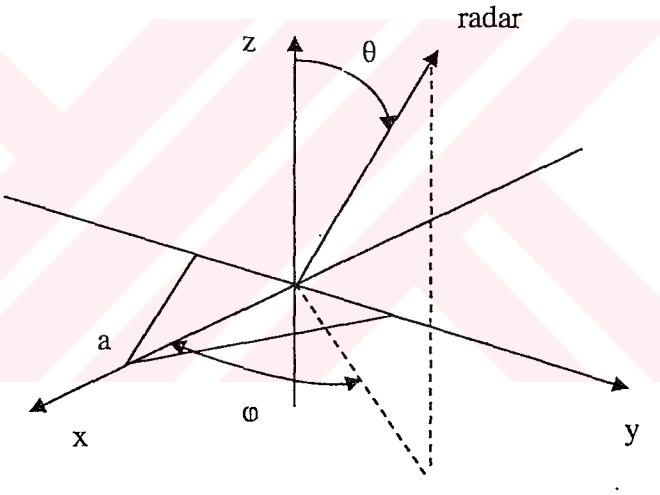
3) Saçılım paterni cos(u) ve cos (v) yönlerinde ayrıştırılabilir. Bu, levha kenarlarının kartezyen koordinatlara uygun olmasından dolayı tercih edilir.

4)Saçılan alanın fazı RKA'ni etkilemez. Böylelikle saçınım hesabında kullanılan faz referansı rasgeledir ve genellikle e^{-jkr} terimi düşer.

Köşeli düzgün yüzeyler ele alındığında TM ve TE gibi polarizasyon dizaynları sıklıkla kullanılır. Örneğin, TM_z, θ polarizeli bir dalgadır çünkü magnetik alan vektörü z-ekseni boyunca bir düzlem üzerindedir. Diğer yandan TE_z Φ polarizeli bir dalgadır ve magnetik alanı z-ekseni boyunca bir düzlem içerisindedir.[1]

2.6.7 Üçgen Levha

Şekil 2.17 deki gibi eşkenar bir üçgeni ele aldığımızda, küçük bakış açılarından (>30°) kestirilen RKA;



Şekil 2.17. Mükemmel iletken eşkenar üçgen levha

$$\sigma = \frac{4\pi A^2}{\lambda^2}(\cos\theta)^2\sigma_0 \tag{2.45}$$

$$\sigma_0 = \frac{\left[(\sin\alpha)^2 - (\sin(\beta/2))^2\right]^2 + \sigma_{01}}{\alpha^2 - (\beta/2)^2} \tag{2.46}$$

$$\sigma_{01} = 0.25(\sin\varphi)^2\left[(2a/b)\cos\varphi\sin\beta - \sin\varphi\sin 2\alpha\right]^2 \tag{2.47}$$

bağıntıları ile formüle edilebilir.

$$\alpha = ka\sin\theta\cos\varphi$$

$$\beta = kb\sin\theta\sin\varphi$$

$$A = ab/2$$

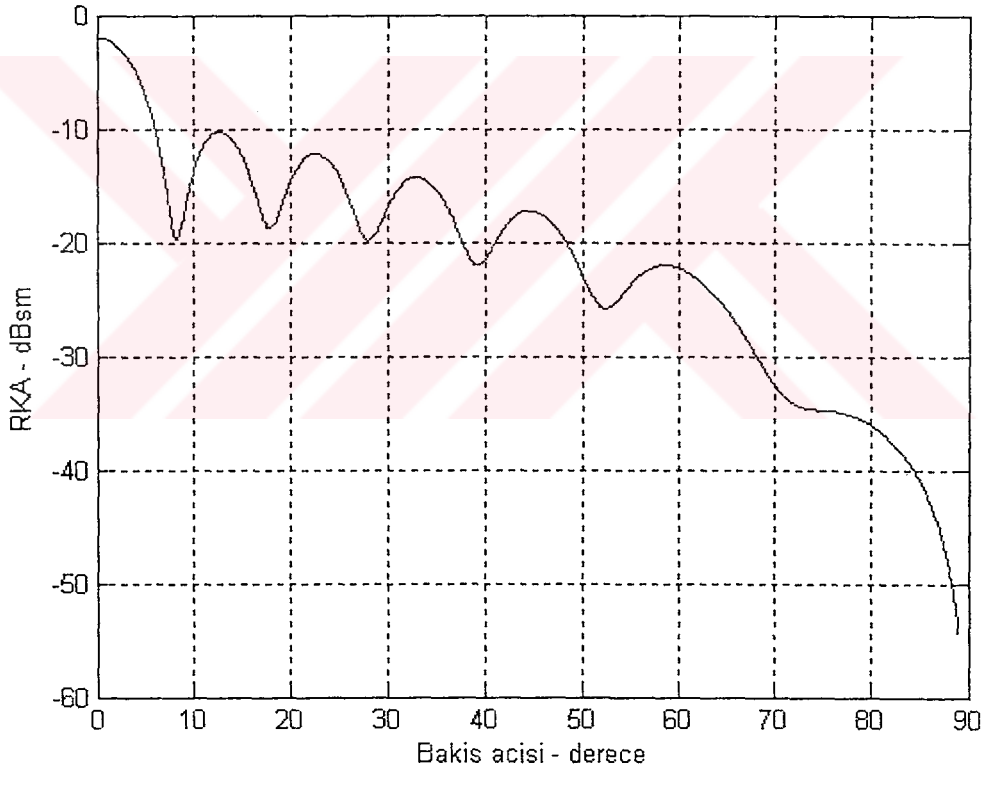
Bu denklemler $\varphi = 0$ düzleminden gelen dalgalar için

$$\sigma = \frac{4\pi A^2}{\lambda^2}(\cos\theta)^2\left[\frac{(\sin\alpha)^4}{\alpha^4} + \frac{(\sin 2\alpha - 2\alpha)^2}{4\alpha^4}\right] \tag{2.48}$$

ve $\varphi = \pi/2$ düzleminden gelen dalga için,

$$\sigma = \frac{4\pi A^2}{\lambda^2}(\cos\theta)^2\left[\frac{(\sin(\beta/2))^4}{(\beta/2)^4}\right] \tag{2.49}$$

denklemlerine indirgenir. Şekil 2.18'de mükemmel iletken bir üçgen levha için RKA denklem (2.40)'la matlab kodunda çalıştırılarak plotlanmıştır.



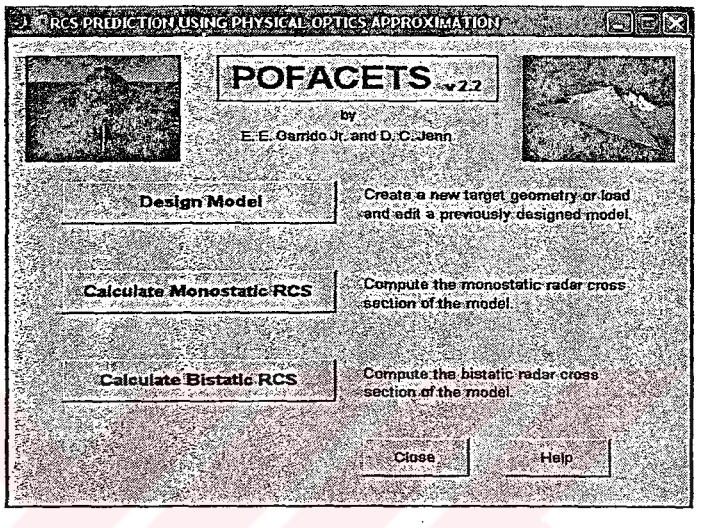
Şekil 2.18 Üçgen levha için RKA

2.7 Kullanılan Matlab Kodunun Tanıtımı

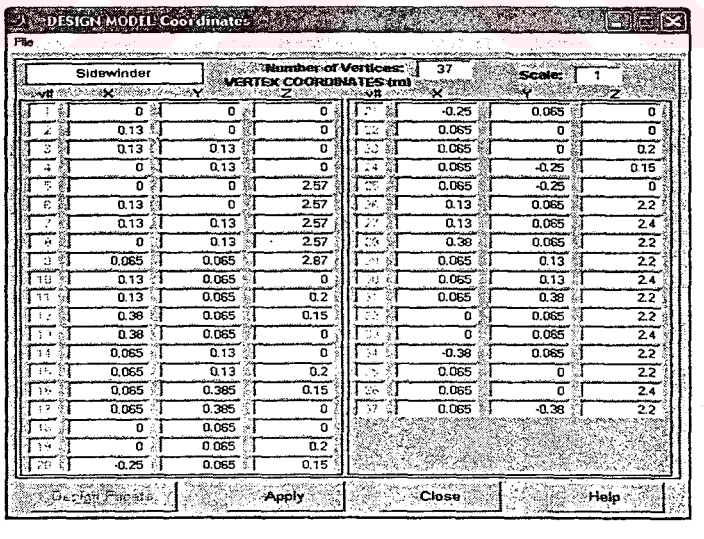
- Veri Dizilerinin Hazırlanması

Bu bölümde radar kesit alanı hesaplanacak hedefin geometrik yapısı programa (x,y,z) koordinatları verilerek tanıtılır. (x,y,z) koordinatlarını alan program hedefi

facet denilen üçgen bölgelere ayırmak için belirli bir kural dahilinde üçgen köşe numaralarını ister. Böylece hedef üçgen parçalara bölünerek hesaba hazır hale getirilir. Matlab komut penceresinde "pofacets" komutunu yazdığımızda karşımıza Şekil 2.19'de görülen pencere çıkar. Bu aşamada ya hesaplamak istediğimiz hedefi dizayn eder ve sisteme tanıtırız veya programın içerisinde bulunan çeşitli yapıdaki hedeflerin monostatik ve bistatik RKA'larını hesaplatırız.



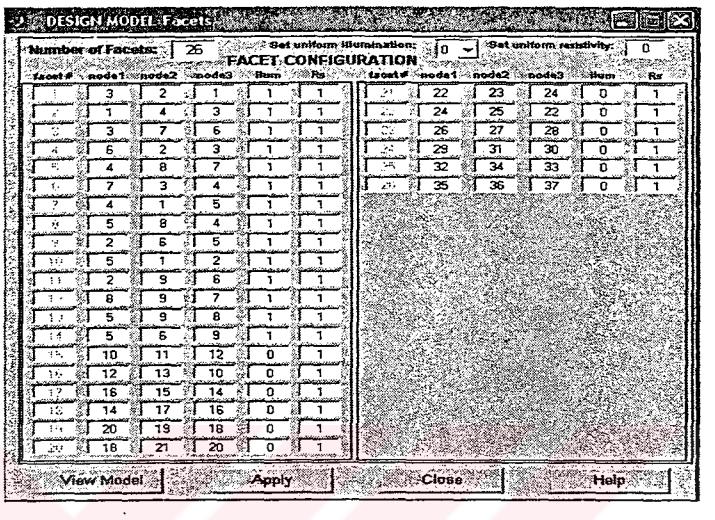
Şekil 2.19 Yeni bir modeli dizayn veya veri bankasındaki modellerin RKA'larının hesaplanma aşamalarının seçimi



Şekil 2.20 Yeni oluşturulan modelin (x, y, z) koordinatlarının programa girilmesi

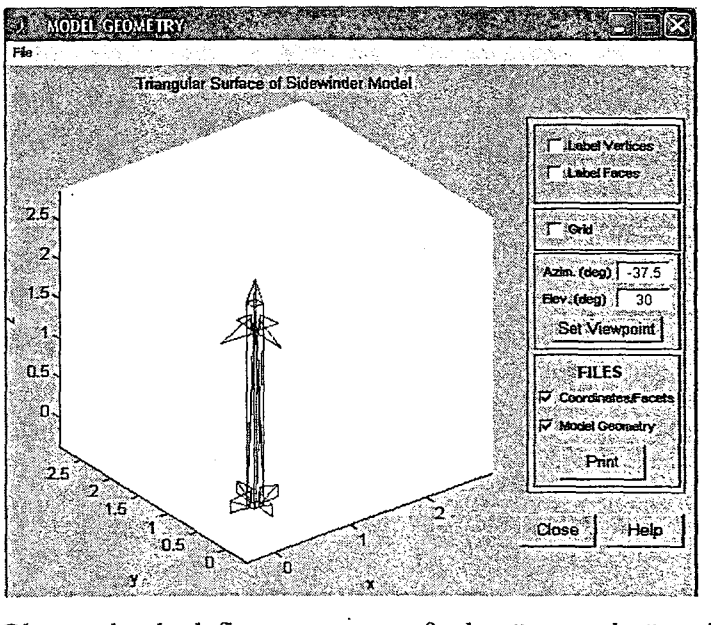
Eğer yeni bir modeli dizaynı seçersek karşımıza modelimizin (x, y, z) koordinatlarını gireceğimiz Şekil 2.20'de görülen pencere çıkar.

Eğer modelimizin (x, y, z) noktalarını doğru girersek bu sefer karşımıza modelimizin üçgen parçalarına ait köşe numaralarını girdiğimiz Şekil 2.21'de görülen pencere çıkar. Bu numaralama belirli bir sistem dahilinde yapılır. Ayrıca her bir üçgene ait o üçgenin çift veya tek taraflı aydınlanmasını belirleyen "illumination" ve iletkenliğini belirleyen "resistivity" sütunları doldurulur.



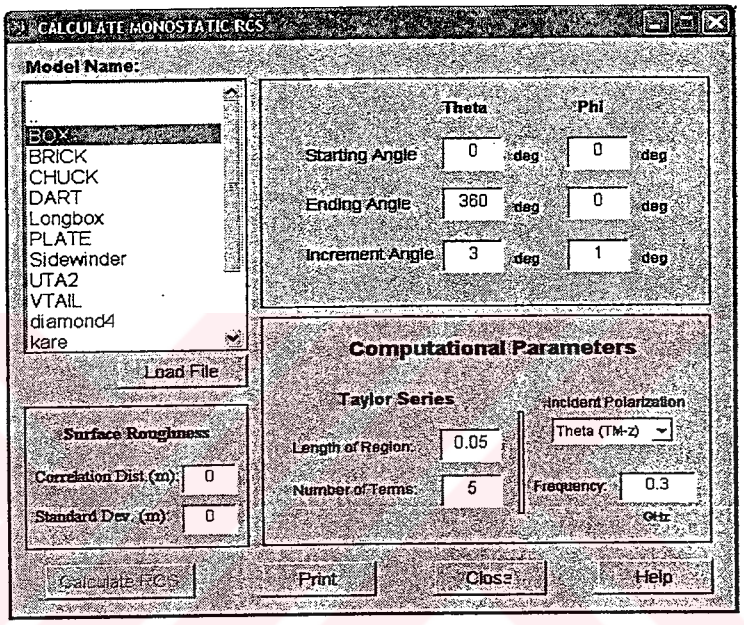
Şekil 2.21 (x, y, z) koordinatları girilen hedefin üçgen köşe numaralarının girilmesi

Bu işlemlerin tamamlanmasının ardından program otomatik olarak Şekil 2.22'de görülen pencerede oluşturduğumuz hedefi üçgenlere ayrılmış olarak sunar.

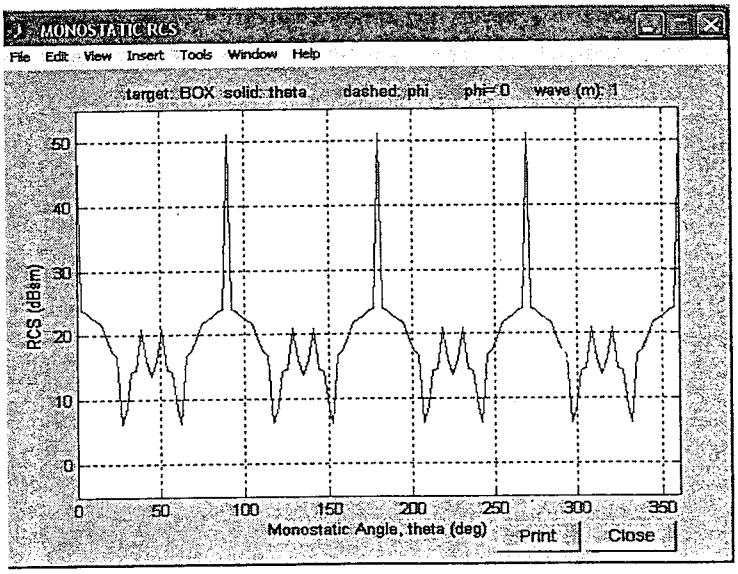


Şekil 2.22 Oluşturulan hedefin program tarafından üçgensel gösterilimi

Modelimizi sisteme tanıttıktan sonra programın veri bankasına kaydedilen modelimizi seçerek programa yükleriz. Şekil 2.23'de görülen pencerede modelimizi hangi açıdan kaçar derecelik adımlarla aydınlatacağımızı, polarizasyon şeklimizi, çalışma frekansımızı, yüzey yapısına bağlı olarak korelasyon mesafesi ve standart sapma parametrelerini sisteme girerek RKA 'nı hesaplatırız. Kullanılan bilgisayarın kapasitesi, seçilen modelin kompleksliği, açı adımlarının sıklığı hesap zamanını etkileyen faktörlerdir.



Şekil 2.23 Oluşturulan cisimlerin RKA hesaplaması için uygun parametrelerim seçilmesi



Şekil 2.24 Hesap edilen RKA'nın çizdirilmesi

- Üçgenleme yönteminin avantajları

Hedefin tanımlanan yüzeyleri, üçgenleme ile daha küçük alt yüzeylere ayrılır. Üçgen yüzey elemanlarının kullanılması iki önemli avantaj sağlar. Birincisi; üçgen düzlemlerde fizik optik saçılmanın analitik olarak ifade edilebilmesi, ikincisi ise, yüzeylerin daha az hata ile modellenebilmesidir. Elde edilen her üçgen düzlem yüzey, birer saçıcı olarak kabul edilir.

- Sıralama

Oluşturulan üçgen elemanlar belirli bir referansa göre dizilir.

- Saçılma hesabı

Her üçgen için girilen verilere göre RKA hesabı yapılır. Hesabedilen üçgen ağırlık merkezleri saçılmanın merkezi olarak kabul edilir.

- Gölgeleme

Bütün yapı bir gölgeleme algoritmasına tabi tutularak, o bakış açısı altında görünmeyen (gölgelenen) saçılma merkezlerinin etkileri yok edilir.

- Toplam RKA

Gölgeleme işlemi sonrası kalan saçılma merkezlerinin RKA'ları, fazları ile birlikte toplanarak, yapının o bakış açısındaki toplam RKA olarak elde edilir.

SONUÇLAR

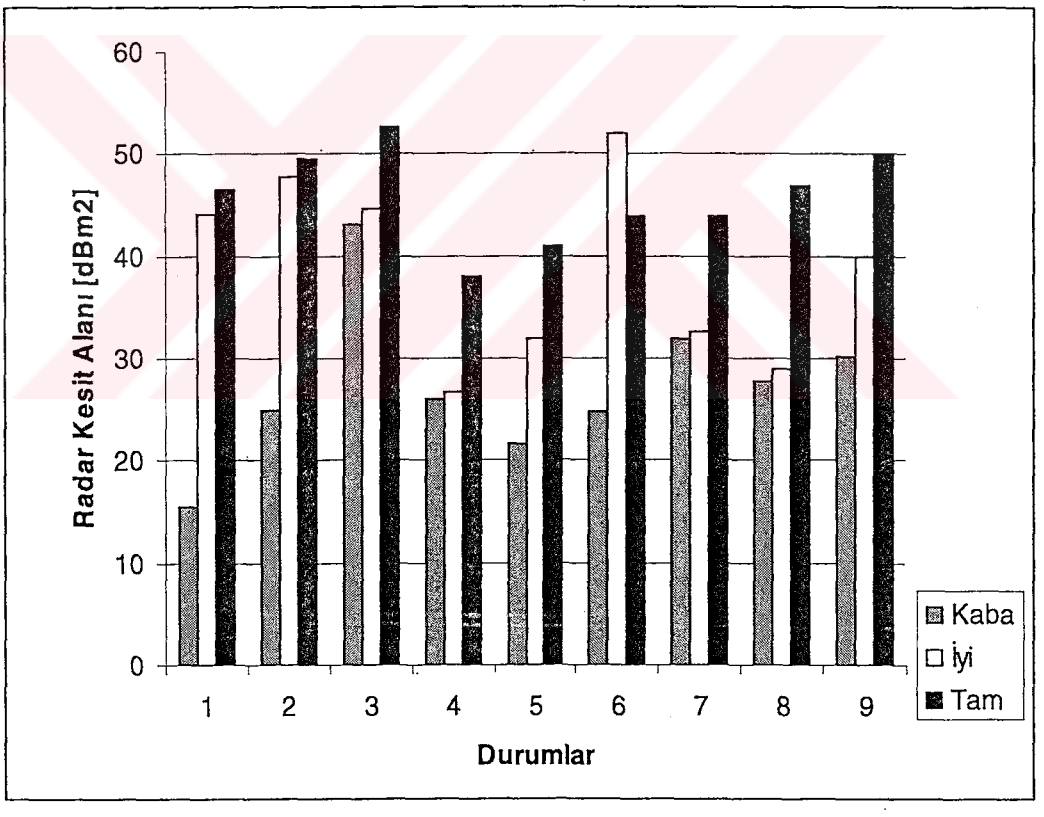
Bu bölümde üç değişik silindir yapının matlab kodunda radar kesit alanları hesaplattırılıp, Tablo 2.2 oluşturulmuştur.

Cisim Yapısı	boy / yarıçap	Yarıçap / dalgaboyu	Max. RCS [dBsm]
Sonsuz Silindir	0	1	58
Sonsuz Silindir	0	1/2	61
Sonsuz Silindir	0	1/4	64
Silindir	3	1	46.6
Silindir	3	1/2	49.6
Silindir	3	1/4	52.6
Silindir	10	1	38
Silindir	10	1/2	41
Silindir	10	1/4	44
Silindir	20	1	44
Silindir	20	1/2	47
Silindir	20	1/4	50
Kaba Silindir	3	1	15.5
Kaba Silindir	3	1/2	25
Kaba Silindir	3	1/4	43
Kaba Silindir	10	1	26
Kaba Silindir	10	1/2	21.7
Kaba Silindir	10	1/4	24.8
Kaba Silindir	20	1	32
Kaba Silindir	20	1/2	27.8
Kaba Silindir	20	1/4	30.1
İyi Silindir	3	1	44.1
İyi Silindir	3	1/2	47.8
İyi Silindir	3	1/4	44.6
İyi Silindir	10	1	26.6
İyi Silindir	10	1/2	32
İyi Silindir	10	1/4	51.9
İyi Silindir	20	1	32.6
İyi Silindir	20	1/2	29
İyi Silindir	20	1/4	40

Tablo 2.2 Çeşitli silindir yapıların farklı boy, yarıçap, dalga boyu kriterlerine göre maksimum radar kesit alanları

Tablo 2.2' de görüldüğü üzere sırasıyla sonsuz silindir, sonlu silindir ve üçgen parçalara (facets) bölünmüş silindir yapılar boy / yarıçap, yarıçap / dalga boyu kriterlerine göre incelenerek karşılaştırılmıştır.Karşılaştırmanın amacı bir cismi üçgenlere ayırarak yapılan ölçümün gerçek değerlere ne derece yaklaşabildiğini görebilmektir.

Ölçüm yapılan silindirlerin yarıçapları 1metrede sabitlenmiş, boyları 3,10 ve 20 oranını sağlayacak şekilde değerlendirilmiştir. Dalgaboyları ise yine yarıçap 1 metrede sabitlenerek 300 MHz, 15 MHz ve 75 MHz değerlerinde ölçüm yapılarak tabloya işlenmiştir. Üçgen parçalara ayrılarak ölçümü yapılan silinirler ise iki kısma ayrılmışlardır. Kaba silindir, boyu 16 parçaya bölünmüş ve bu parçaların her biri 34 üçgene bölünerek elde edilmiştir. İyi silindir ise bu değerler sırasıyla 48 ve 100'dür.



Tablo 2.3 Değişik boy, yarıçap ve dalgaboyu değerlerine göre oluşturulan Tablo 2.2'nin grafiksel gösterilimi.

Tabloda silindir adı altında gösterilen değerler matlab kodunda "cylinder_rcs" komutuyla elde edilen değerlerdir. Bu komutun yazılımı da fizik optik metodu kullanılarak hazırlanmıştır.Sonuç olarak bu komutla RKA ölçülen silindir mükemmel iletken bir silindiri temsil eder.

Diğer taraftan bizim kullandığımız simulasyonda oluşturduğumuz silindir yapı ise yine aynı boyutlarda ama üçgen parçalardan oluşturulan bir silindirdir. Bu yapı da mükemmel iletkendir. Silindiri ne kadar çok üçgen parçalara ayırırsak o kadar mükemmel yapıya yaklaşır ve dolayısıyla RKA değeri de gerçeğe yakın sonuç verir düşüncesiyle, çalışmayı iki kısma ayrıldı. 4800 üçgen parçadan oluşan ve iyi silindir olarak adlandırdığımız yapı ve 544 parçadan oluşan kaba silindir olarak adlandırdığımız yapı. Tabloyu ortaya koyduğumuzda ortaya çıkan sonuçları değerlendirdiğimizde, İyi silindirin RKA'ları kötü silindire oranla mükemmel silindir değerlerine daha çok yaklaştığı gözlemlenmiştir.Tablo 2.3'de ise Tablo 2.2'deki değerlerin grafik olarak gösterilimi sunulmuştur. İyi silindir yapının tam yapıya daha çok yaklaştığı açıkça görülmektedir.

Bu da RKA hesaplamalarında cismi üçgenlere ayırarak ölçüm yapmanın uygulama alanında büyük kolaylık sağladığı anlamına geliyor. Böylelikle herhangi bir platformun (gemi, uçak gibi) dizayn aşamasında bu metodla radar kesit alanının hesaplanmasının ne derece gerçeğe yakın sonuç verdiği bulunmuştur.

KAYNAKLAR

[1] **Jenn, David,** 1995. Radar and Laser Cross Section Engineering, AIAA Education Series

[2] **Nathanson, Fred E.,** 1991. Radar Design Principles Second Edition, McGrawHill, Inc., Singapore.

[3] **Skolnik, Merril I.,** 1981. Introduction To Radar Systems McGraw-Hill Inc., International Student Edition .

[4] **Jeffreys, H. and Bullen, K.E.**, 2001. Radar Systems and Analysis and Design Using Matlab

[5] **Barrick,D.E.**, 1972. First-Order Theory and Analysis of MF/HF/VHF Scatter From The Sea. IEEE Trans vol. AP-20,pp.2-10,

[6] **Evanzia, W.J.**, 1966. Faster Lighter 3-D Radars İn Sight for tactical Warfare, Electronics, vol.39,pp.80-87

[7] **Senior, T. B.A.,** 1965, ,A Survey of Analytical Techniques for Cross-section Estimation, Proc. IEEE, vol.53,no.8, pp.822-833.

ÖZGEÇMİŞ

Tolga ÖZCAN 1975 yılında Ankara'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Samsun'da tamamladıktan sonra 1990 yılında Deniz Lisesi Komutanlığı'nda askeri öğrenci olarak öğrenimine devam etti. 1997 yılında Deniz Harp Okulu'ndan Teğmen rütbesiyle mezun oldu. Dört senelik yüksek öğrenimini Elektronik/Haberleşme ana bilim dalı altında İletişim Mühendisliği eğitimi alarak tamamladı. 1998 yılında Denizaltı Özel İhtisas kursunu tamamlayarak TCG Atılay'da göreve başladı. Bu tarihten İstanbul Teknik Üniversitesi Elektronik/Haberleşme bölümünde yüksek lisans eğitimine başlayana kadar denizatlılarda çeşitli görevleri icra etti. 2002 yılında Gökçe hanımla evlendi. İngilizce bilmektedir.