

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MÜHİMMATLI ve MÜHİMMATSIZ RADAR HEDEFLERİNİN TAM DALGA  
RCS MODELLENMESİ ve ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Çağlayan DURLU**

**Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Harun Taha HAYVACI**

**NİSAN 2017**



Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....  
**Prof. Dr. Osman EROĞUL**  
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans/Doktora derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....  
**Doç. Dr. Tolga GİRİCİ**  
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 131211035 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Çağlayan DURLU**'nun ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**MÜHİMMATLI ve MÜHİMMATSIZ RADAR HEDEFLERİNİN TAM DALGA RCS MODELLENMESİ ve ANALİZİ**" başlıklı tezi **10 Nisan 2017** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı :** **Yrd. Doç. Dr. Harun Taha HAYVACI** .....  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Prof. Dr. Bülent TAVLI (Başkan)** .....  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

**Prof. Dr. Ali KARA** .....  
Atılım Üniversitesi



## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Çağlayan DURLU



## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MÜHİMMATLI VE MÜHİMMATSIZ RADAR HEDEFLERİNİN TAM DALGA

RCS MODELLENMESİ VE ANALİZİ

Çağlayan DURLU

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Harun Taha HAYVACI

Tarih: NİSAN 2017

Temel olarak bir radar sistemi, radyo frekansı ve elektromanyetik dalgaları istenilen bölgeye gönderen ve hedeflerden yansıyan elektromanyetik dalgaları alarak bölge hakkında tespit, takip, görüntüleme gibi fonksiyonları gerçekleştiren sistemlerdir. RKA, gönderilen bir elektromanyetik dalga tarafından bir hedef aydınlatıldığında verilen yönde geri saçılan gücün bir ölçütüdür. Radar Kesit Alanı sadece verici güç yoğunluğuna göre ne kadar gücün saçıldığını belirten hayali bir alan ifade etmektedir. Bu çalışmada, basit ve karmaşık yapıların Radar Kesit Alanı, Fiziksel Optik yöntemi yardımıyla Ansys HFSS programı kullanılarak hesaplanmıştır. İlk olarak, küp, üçgen, kare ve dairesel levha gibi basit hedefler daha sonra ise badem, konik küre gibi daha karmaşık hedefler Ansys HFSS’de modellenerek, Radar Kesit Alanlarının frekansa ve açığa bağlı değişimi sayısal ortamda incelenmiştir. İncelenen basit ve karmaşık modeller bir araya gelmesiyle oluşturulan kanatlı badem modeline, silindir ve koni kullanarak basit bir mühimmat modeli ana modele eklenmiştir. Eklenen mühimmatın, polarizasyon, frekans ve açığa bağlı olarak RKA’ya olan etkisini görmek için sayısal ortamda benzetim çalışmaları yapılmıştır. Son olarak MQ-1B insansız hava aracı ve AGM-114 mühimmatı üç boyutlu modellenmiş ve mühimmat sayısının, hedefe gelen

dalganın yönü, polarizasyon gibi parametrelere ek olarak düşük ve yüksek frekansların Radar Kesit Alanına olan etkisi incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Radar kesit alan analizi, İnsansız hava aracı, Sayısal modelleme, Benzetim.





## **ABSTRACT**

Master of Science

### **FULL WAVE RCS MODELING AND ANALYSIS OF ARMED AND UNARMED RADAR TARGETS**

Çağlayan DURLU

TOBB University of Economics and Technology  
Institute of Natural and Applied Sciences  
Electrical and Electronics Engineering Programme

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Harun Taha HAYVACI

Date: April 2017

Basically, a radar system is a system that transmits radio frequency and electromagnetic waves to desired regions and receives electromagnetic waves reflected from targets and performs functions such as detection, tracking and imaging about the region. The Radar Cross Sectional area (RCS) is a measure of the scattered power in given direction when a target is illuminated by a sending electromagnetic wave. Radar Cross Sectional area is an imaginary field that indicates how much power is radiate according to the transmitter power density. In this study, Radar Cross Sectional area value of the basic and complex geometries were calculated with the aid of the Physical Optics method in Ansys HFSS programme. First, basic targets such as cubes, triangles, squares and circular plates , then more complex targets such as almonds, conical spheres, etc. were modeled and frequency and angle dependent change of the Radar Cross Sectional area values have been examined in numerical environment. A simple ammunition model which is modeled by using cylinder and cone was added to the model of the winged almond created by combining the examined simple and complex models. In order to see the effect of this ammunition on the Radar Cross Sectional area depending on the polarization, frequency and angle, simulation studies have been done in numerical environment. Finally, MQ-1B

unmanned aerial vehicle and AGM-114 ammunition were modeled in three dimensions and the effect of the low and high frequencies in addition to parameters such as number of ammunition, direction of the incoming wave to target, polarization on the Radar Cross Sectional area was examined.

**Keywords:** Radar cross section analysis, Unmanned aerial vehicle , Numerical modelling, Simulation.



## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitiminin boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren ve sabır gösteren, karşılaştığım problemlerin çözümünde bilgi ve tecrübeleriyle katkıda bulunan, bana olan güveni ve inancıyla motivasyonumu arttıran, değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Harun Taha HAYVACI'ya çok teşekkür ederim.

Tez yazım aşamasında gösterdiği anlayış için patronum sayın O. Fikret KÜÇÜKDEVECİ'ye teşekkür ederim.

Hayatım boyunca sevgi ve desteklerini her zaman en derinden hissettiğim, sevgili annem Leyla DURLU, babam A. Mürsel DURLU ve kardeşim M. Armağan DURLU'ya teşekkür ederim.

Tez yazım aşamasında, varlığından güç aldığım, yaptığı afacanlıklarla bana moral veren yaramaz oğlum Toprak'a teşekkür ederim.

Beni tanıdığı andan itibaren her zaman yanımda olan, sevgisi ve inancıyla bana güç veren sevgili eşim Bahar'a, sonsuz teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>ix</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>x</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>xii</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>xiii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>xiv</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	2
1.2 Literatür Araştırması .....	2
<b>2. RADAR KAVRAMI ve GENEL TANIMI</b> .....	<b>5</b>
2.1 Radar Çalışma Prensibi .....	7
2.1.1 Mesafe.....	7
2.1.2 Doppler frekansı.....	7
2.2 Radarın Blok Diyagramı .....	8
2.3 Radar Denklemi.....	11
<b>3. RADAR KESİT ALANI</b> .....	<b>13</b>
3.1 Monostatik ve Bistatik Radar Saçılma Yüzeyleri .....	14
3.1.1 Monostatik saçılma yüzeyi .....	14
3.1.2 Bistatik saçılma yüzeyi .....	15
3.2 RKA'yı Etkileyen Parametreler .....	16
3.2.1 Dalga boyunun etkisi .....	16
3.2.2 Radar antenin hedefle yaptığı açı.....	17
3.2.3 Polarizasyonun etkisi .....	20
3.3 Uçan Karmaşık Hedeflerin Saçılım Türleri .....	22
3.4 RKA Analizinde Sayısal Yöntemler .....	23
3.4.1 Fiziksek optik yöntemi.....	24
<b>4. MÜHİMMATLI ve MÜHİMMATSIZ HEDEFLERİN RKA ANALİZİ</b> .....	<b>25</b>
4.1 Basit Hedeflerin Analizi .....	25
4.2 Karmaşık Hedeflerin Analizi.....	29
4.2.1 Badem modeli analizi .....	29
4.2.2 Konik küre analizi .....	32
4.2.3 Açık uçlu konik küre analizi .....	34
4.2.4 Kanatlı badem modelinin analizi .....	36
4.3 İnsansız Hava Araçlarının Analizi .....	41
4.3.1 Model tasarımı .....	41
4.3.2 Mühimmatlı ve mühimmatsız insansız hava araçlarının analizi.....	42
<b>5. SONUÇ</b> .....	<b>47</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>49</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>53</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2. 1: Radar frekans bantları.....	6
Şekil 2. 2: Radar anteninden hedefe gönderilen ve hedeften antene geri dönen dalga.	7
Şekil 2. 3: $v$ hızıyla hareketli hedef ve hedefe doğru $k$ yayılım vektörü ile ilerleyen düzlemsel dalga. ....	8
Şekil 2. 4: Radarın basit blog diyagramı.....	9
Şekil 2. 5: Vericiden antene, antenden alıcıya, radar işaretlerinin yönlendirilmesi...	10
Şekil 3. 1: Monostatik RKA.....	15
Şekil 3. 2: Bistatik RKA. ....	15
Şekil 3. 3: $\alpha$ yarıçaplı mükemmel iletken kürenin RKA'sının değişimi.....	16
Şekil 3. 4: Küçük iki yansıtıcı küre, gelen ve dönen ışınlar.....	18
Şekil 3. 5: İki yansıtıcı küreye ait $\sigma_{ef}$ 'in kutupsal eğrileri.....	20
Şekil 3. 6: Kutuplandırma örnekleri.....	21
Şekil 3. 7: $90^\circ$ faz kaydırıcı dalga kılavuzuyla sağ ve sol kutuplanma. ....	22
Şekil 3. 8: Basit geometrik yapılardan oluşmuş uçan hedef. ....	22
Şekil 3. 9: Engel üzerinde hareket eden EM dalga. ....	23
Şekil 3. 10: RKA'da kullanılan sayısal yöntemler.....	24
Şekil 4. 1: 3B Sayısal modellenen (a)küp, (b)kare, (c)dairesel, (d)silindir, (e)üçgen levha modellerinin 1 GHz monostatik RKA sonucu. ....	27
Şekil 4. 2: 1 GHz ve 2 GHz için (a)küp, (b)kare, (c)dairesel, (d)silindir, (e)üçgen levha modellerinin monostatik RKA sonucu.....	28
Şekil 4. 3: 3B Açık uçlu konik-küre modelinin (a)genel, (b)yandan, (c)açık kısım görünümü.....	34
Şekil 4. 4: 869 MHz'de Açık uçlu konik küre modelinin yatay (HH) ve dikey (VV) monostatik RKA sonuçları. ....	35
Şekil 4. 5: 9 GHz'de Açık uçlu konik küre modelinin yatay (HH) ve dikey (VV) monostatik RKA sonuçları. ....	35
Şekil 4. 6: Kanatlı badem ve mühimmat modeli (a)2 mühimmat için alttan bakış, (b)mühimmatsız durum için sağ alttan bakış, (c)toplam mühimmat için önden bakış, (d)basit modellenen mühimmata yandan bakış.....	36
Şekil 4. 7: 8 Mühimmatlı kanatlı badem modelinin 112620 üçgen elemanlı çözüm ağı (mesh) yapısı. ....	37
Şekil 4. 8: Kanatlı badem modelinin mühimmatlı ve mühimmatsız durumlardaki (a) $\theta = 90^\circ$ , (b) $\theta = 120^\circ$ , (c) $\theta = 150^\circ$ 1 GHz RKA sonuçları. ....	38
Şekil 4. 9: Kanatlı badem modelinin 9 GHz'deki mühimmatlı ve mühimmatsız durumlardaki (a) $\theta = 90^\circ$ , (b) $\theta = 120^\circ$ , (c) $\theta = 150^\circ$ RKA sonuçları.....	39
Şekil 4. 10: MQ-1B İHA modelinin (a)keşif uçuşu esnasında çekilmiş bir resim, (b)modellenmiş geometrinin alttan, (c)modellenmiş geometrinin genel görünüşü. ....	41

Şekil 4. 11: MQ-1B ve mühimmat modelinin (a)üstten, (b)alttan, (c)önden , (d)mühimmatın önden, (e)mühimmat ve fırlatma rampasının yandan görünüşü. ....	42
Şekil 4. 12: Ansys HFSS’de modellenen hedefin 1216356 elemanlı çözüm ağı (mesh) yapısı. ....	43
Şekil 4. 13: MQ-1B modelinin mühimmatlı ve mühimmatsız durumlardaki (a) $\theta = 90^\circ$ , (b) $\theta = 120^\circ$ , (c) $\theta = 150^\circ$ 1 GHz RKA sonuçları. ....	44
Şekil 4. 14: MQ-1B modelinin 1 GHz için (a)4 mühimmatlı ve mühimmatsız, (b)8 mühimmatlı ve mühimmatsız, (c)12 mühimmatlı ve mühimmatsız durumlardaki RKA sonucu.....	45
Şekil 4. 15: MQ-1B modelinin 9 GHz için (a)4 mühimmatlı ve mühimmatsız, (b)8 mühimmatlı ve mühimmatsız, (c)12 mühimmatlı ve mühimmatsız durumlardaki RKA sonucu.....	46





## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 3. 1. Bazı hedeflerin RKA değerleri. ....	14
Çizelge 4. 2: Basit ve düzgün yüzeyli cisimlerin 1 GHz ve 2 GHz maksimum RKA değerleri. ....	26





## KISALTMALAR

<b>RF</b>	: Radyo Frekansı
<b>EM</b>	: Elektromanyetik
<b>RCS</b>	: Radar Cross Section
<b>RKA</b>	: Radar Kesit Alanı
<b>FO</b>	: Fiziksel Optik
<b>İHA</b>	: İnsansız Hava Aracı
<b>GO</b>	: Geometrik Optik
<b>MLFMM</b> Yöntemi)	: Multi Level Fast Multipole Method (Çok Seviyeli Hızlı Çok Kutup
<b>MoM</b>	: Momentler Metodu
<b>MEC</b>	: Eşdeğer Akımlar Yöntemi
<b>FTDTD</b> Yöntemi)	: Finite Difference Time Domain (Zaman Uzayında Sonlu Farklar
<b>PSTD</b> Yöntemi)	: Pseudo Spectral Time Domain (Zaman Uzayı Sahte Spektral
<b>HH</b>	: Yatay-Yatay Polarizasyon
<b>VV</b>	: Dikey-Dikey Polarizasyon
<b>HF</b>	: High Frequency (Yüksek Frekans)
<b>VLF</b>	: Very Low Frequency (Çok Düşük Frekans)
<b>LF</b>	: Low Frequency (Düşük Frekans)
<b>VHF</b>	: Very High Frequency (Çok Yüksek Frekans)
<b>UHF</b>	: Ultra High Frequency (Ultra Yüksek Frekans)
<b>SHF</b>	: Super High Frequency (Süper Yüksek Frekans)
<b>EHF</b>	: Extremely High Frequency (Aşırı Yüksek Frekans)
<b>PEC</b>	: Perfect Electric Conductor (Mükemmel İletken)



## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
$m$	Metre
$c$	Işıkhızı
$f$	Frekans
$R$	Mesafe
$\Delta t$	Gidiş geliş süresi
$\Delta f$	Doppler frekansı
$-\vec{k}$	Yayılm vektörü
$\vec{v}$	Hız
$R_{maks}$	En büyük uzaklık
$P_r$	Alıcı gücü
$P_t$	Verici gücü
$\lambda$	Dalgaboyu
$G_t$	Verici gücü kazancı
$\sigma$	Radarkesitalanı
$A_r$	Alıcı antenin etkin yüzeyi
$S_{min}$	En küçük giriş yankı
$k$	Boltzmann sayısı
$B$	Alıcının frekans bandı
$T$	Alıcıdaki sıcaklık
$E_s$	Dağılan alan şiddeti
$E_0$	Gelen alan şiddeti
$(S/N)_{min}$	Minimum sinyal gürültü oranı
$l$	Uzaklık
$N_i$	Hedef atılların sayısı
$A$	Eşkanar üçgensel vhaalanı
$h$	Yükseklik
$b$	Kenar uzunluğu
$r$	Yarıçap



## 1. GİRİŞ

En önemli uygulaması radar olan uzaktan algılama ile, çok geniş bir frekans bölgesi içinde , türlü sebeplerle gözün göremediği şeyleri, uzaktan tespit etmek mümkündür. Mesala, gezegenlerin iç katmanlarının yapıları, bulutların veya sisin arkasındaki hedefler, karanlıktaki gizli hedefler, suyun altındaki buz ve kaya parçaları, rüzgarın yönü ve hızı, toprak altındaki maden yataklarının tespiti, bunlardan sadece bir kaçıdır.

Radar Kelimesi, İngilizce “Radio Detection and Ranging” kelimelerinden kısaltılarak oluşturulmuştur. Bu terim radyo dalgaları ile hedef tespit etmek ve menzil belirlemek anlamına gelir.

Radarın tarihteki ilk kullanılışı, Almanya’da Hulsmeyer’in 1903’te, radyo dalgaları ile gemileri tespit etmesi ile başlar. 1922’de, A.B.D Deniz Araştırma Laboratuvarı’nda (U.S.A.N.R.L), A.H. Taylor ve arkadaşları, gemi ve uçakları tespit etmek için radarı geliştirdiler. 1925’de Breit ve Tuve ilk darbe radarını, ve ilk iyonosfer yüksekliği ölçen cihazı yaptılar. 1934’de, U.S.A. N.R.L, darbe radarlarıyla hedefleri bulmayı denedi [1], [2].

Radarlar, vericilerinin ışınlandığı EM dalga biçimleri, bu dalgaların frekansları ve enerjisine göre, hedeflerin varlıklarını konumlarını çok uzaklardan doğru olarak belirlediği için, ikinci dünya savaşı ve sonrasında askeri amaçlarla kullanılmaya başlanmıştır. İkinci Dünya Savaşı’nda (1939-1945), darbe radarları, gemi ve uçakları tespit etmekte kullandığı gibi, uçakların kullandıkları radarlar da geliştirildi. Uçakta kullanılan ilk radar cihazı, uçağın zeminden yüksekliğini tespit eden altimetredir. Bununla beraber, radarlar gemi ve uçakların navigasyon sistemlerinde, hava durumları ve havaalanları gibi bir çok sivil amaçlarda da kullanılmaktadır.

Radar kesit alanı (RKA), radar tarafından iletilen elektromanyetik dalganın hedefi aydınlattığında geri saçılan güçtür. Hedef üzerindeki geri saçılan gücün verici güç yoğunluğuna oranı olarak ifade edilebilir [2]. RKA, geri saçılan güç verici güç yoğunluğuna göre normalize edildiğinden, verici gücü, kaynak-hedef arası uzaklık vb. parametreler RKA’yı etkilemez. RKA hedefin fiziksel alanı ile direkt olarak ilişkili

değildir. Genel olarak fiziksel anlamda daha büyük hedefler daha büyük RKA değerlerine sahip olmakla beraber RKA sadece verici güç yoğunluğuna göre ne kadar gücün saçıldığını belirten hayali bir alanı ifade etmektedir. Radar kesit alanı, cisimlerin elektromanyetik saçılım durumlarını gösteren ve hedeflerin radarda tespit edilebilme teknolojisinde oldukça önemli bir parametredir.

## **1.1 Tezin Amacı**

Milli savunma kapsamında ülke sınırlarımızın havadan, karadan ve denizden olası tehditlere karşı sürekli olarak gözlenmesi ve kontrol edilmesi gerekmektedir. Radarlar, elektronik gözetleme sistemlerinin en temel birimleridir. Uçak, helikopter, ve gemi gibi büyük geometrik yapılarda olduğu gibi, insansız hava aracı (İHA), drone ve füze gibi daha küçük geometrik yapıların radar kesit alanlarının hesaplanması askeri açıdan stratejik bir öneme sahiptir. Bu hesaplamaların yapılması için yankısız odalar (anechoic chamber) kurarak söz konusu ölçümler deneysel ortamda yapılmaktadır [3], [4]. Ancak RKA'sı hesaplanacak hedef büyüdükçe, odaların ve test ekipmanlarının maliyeti artmaktadır. Bu nedenle, alternatif olarak, RKA ölçümleri için sayısal elektromanyetik (EM) çözüm teknikleri kullanılmaktadır. Bu çalışmanın amacı İHA'ların RKA'larının doğru hesaplanması, mühimmatlı ve mühimmatsız İHA'larda, RKA'daki farklılıkların belirlenmesi; farklı hedef malzemelerinde, farklı frekanslarda, radar aydınlatma yönü ve radar polarizasyonlarında RKA'ların karşılaştırılarak incelenmesi ve minimum RKA için gerekli koşulların belirlenmesidir.

## **1.2 Literatür Araştırması**

Radar kesit alanı (RKA), hedeflerin üzerlerine gelen elektromanyetik (EM) enerjiyi yansıtması ile ilgili bir büyüklüktür. Hedefin bulunduğu yere göre verici ve alıcı antenlerinin aynı veya farklı konumlarda olması durumuna göre, monostatik ve bistatik RKA tanımlanır [5]. Radar antenine ulaşan EM dalgalar radar sistemi tarafından işlenir ve hedefe ait boyut, hız, şekil gibi parametrelerin tespit edilmesi sağlanır [6]. RKA, hedefin tespit edilme mesafesinin kısaltılması, hedefin olduğundan daha küçük gösterilmesi ve hedefe ait parametreler kestirimin zorlaştırılması gibi benzeri amaçlar için kullanılabilir [7]. İkinci dünya savaşıyla beraber hedeflerin RKA değerlerinin hesaplanmasında birçok yöntem önerilmiştir [8]. RKA analizinde doğru sonuçların elde edilmesi, yüksek hesaplama sürelerine ve güçlü işlemci kapasitesine



bağlıdır. Yüksek hız ve yüksek kapasiteye sahip kişisel bilgisayarların gelişimi, karmaşık hedeflerin RKA hesaplamalarında daha doğru hesaplamaların elde edilebildiği bir sürece gelmiştir [9]. Analitik çözümleme yöntemlerinin alternatifi olarak genellikle kullanılan yaklaşık hesaplama yöntemlerinden bazıları Geometrik Optik (GO), Fiziksel Optik (FO), Çok Seviyeli Hızlı Çok Kutup Yöntemi (MLFMM), Momentler Metodu (MoM), ve Eşdeğer Akımlar Yöntemi (MEC)'dir [10]. Hedeften yansıyan ve saçılan dalgaları hesaplayabilmek için uygun sınır koşullarında diferansiyel ve integral denklemlerin kullanılması gerekmektedir [11], [12]. Birçok elektromanyetik problemlerde ise karmaşık geometrilerin oldukça yüksek frekanslarda modellenebilmeleri gerekebilir. Diğer yandan sürekli artan frekansla birlikte düşük frekans teknikleriyle çözümü gerçekleştirebilmek için geometrilerin daha çok parçaya bölünmesi gerekmekte ve bunun sonucunda ise problemdeki bilinmeyen sayısı artmaktadır. Özellikle, son yıllarda bulunan bazı yöntemler bu konuda gelişme sağlamış olmasına rağmen, dalga boyuna göre çok büyük olan cisimlerin çözülmesinde maliyet etkin çözümler aranmaktadır [13]. Elektromanyetik teorideki Radar Kesit Alanı (RKA) hesaplamaları ve ışınım (radyasyon) problemlerinin çözümünde değişik sayısal yöntemler kullanılabilir. Bu yöntemlerden tam dalga çözümüne dayanan Zaman Uzayında Sonlu Farklar Yöntemi (Finite Difference Time Domain - FDTD) [14], Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method - FEM) [15] ve Moment Yöntemi (Method of Moments - MoM) [16] dalga boyuna göre fazla büyük olmayan yapılar için çok iyi sonuçlar verirken, çok yüksek sayılı bilinmeyenli problemlerde momentler metodu (MoM) gibi yöntemlerin kullanılmasını zorlaşmaktadır. Dalga boyuna göre çok büyük cisimlerden saçılma ve ışınım analizini, bu yöntemler ve bu yöntemlerden türeyen Zaman Uzayı Sahte Spektral Yöntemi (Pseudo Spectral Time Domain - PSTD) [17] gibi diğer yöntemler ile de incelemek mümkün değildir. Yüksek frekans bölgesi problemi olarak adlandırılan dalga boyuna göre çok büyük cisimler ile ilgili elektromanyetik problemlerin çözülmesi hala önemli bir konudur. Bu nedenle, yüksek frekans yöntemleri olarak adlandırılan Fiziksel Optik (FO) ve Geometrik Optik (GO) günümüzde popülerliğini sürdürmektedir. Bu yüksek frekans yöntemlerinden GO, etkiyen, yansıyan ve kırılan dalga yayılımını tanımlayan yaklaşık bir tekniktir [18] ve ışın kavramı üzerine kuruludur [19]. Bu yöntemde, hedeften saçılan alan iyi bir yakınsama ile bulunabilir [20]. FO, kırınım teorisi ve tam dalga çözümlerle kullanılabilirdiğinden, dalga boyuna göre daha büyük cisimlerden saçılma ve ışınma analizlerinde önemli bir rol oynamaktadır [21]. Bilgisayar ortamında

gerçekleştirilen, FO yönteminin ele alış biçimindeki ana fikir, üzerinde yüzey akımları oluşan yüzeyin üzerinden alınan integralin doğru olarak hesaplanmasıdır. Hızlı değişen bir integranta sahip bu yüzey integralinin veya indirgenmiş halinin hesaplanması frekans uzayında olmuştur. Bazı şartlar altında, bu yüzey integralinin çizgisel integrale dönüştüğü gösterilebilir [22], [23]. 1975 yılında Gordon tarafından düz poligonal yüzeylerde FO integralinin kapalı biçimdeki ifadesi üzerinde durulmuştur [24]. Aynı şekilde düz poligonlar için FO integralinin hem frekans uzayı hem de zaman uzayındaki kapalı biçimdeki ifadeleri anlatılmıştır [25]. RKA hesaplamalarında öncelikle, levha, küre, silindir ve tel gibi temel şekiller ele alınıp, karmaşık yapılarda ise, hedef olabildiğince bu temel şekillerden oluşan alt bölgelere ayrılır. Bu sayede, bütününde karmaşık bir yapıya sahip olan uçak, tank vs. gibi gerçek hedeflerin RKA tahmini daha gerçekçi bir şekilde yapılabilir [6], [7]. CST Microwave Studio yazılımı kullanılarak, mükemmel iletken küre ve düz plaka gibi basit basit geometrik şekillerin ve uçağın boş uzay alanında etkisine alarak RKA'nın nasıl değiştiği incelenmiştir [26]. Bir başka çalışmada ise, B-2 gizli bombardıman uçağı modelinin RKA parametreleri, CADRCS yazılım ile simule edilmiş, uçak ve füze modelinin mükemmel iletken yüzeye sahip, sapma ve eksenleri etrafında dönen simülasyon sonuçları sunulmuş ve modelin yüzey radar emici malzeme (RAM) ile kaplandığında simülasyon sonuçları karşılaştırılarak, RKA'nın azaltılması üzerinde çalışılmıştır [27] [28]. Diğer bir çalışmada ise, 1 GHz çalışma frekansında insansız hava aracının (İHA) geri saçılma alanı hesaplamasında GTD, GO ve PO yöntemleri kullanılmıştır. Hesaplanan Sonuç Feko, analiz programı sonucu ile karşılaştırılmış ve hedefin RKA'sını hesaplamak için birinci dereceden kırınım alan hesaplamasının yeterli olacağı üzerinde durulmuştur [29]. Ling ve arkadaşları İHA'ların RKA hesaplamalarında PEC ve dielektrik malzemelerin RKA'ya olan etkisini incelenmiştir [30]. Obelleiro ve arkadaşları ise, MLFMM (Multi Level Fast Multipole Method) ve PO ( Physical optics) çözücülerini kullanarak, İHA modelinin 1GHz ve 3 GHz 'de monostatik ve bistatik RKA'larını, yatay-yatay (HH) ve dikey-dikey (VV)polarizasyonda incelenmiştir [31].

## 2. RADAR KAVRAMI ve GENEL TANIMI

Temel olarak radar sistemi radio frekansı (RF) elektromanyetik (EM) dalgaları ilgilenilen bölgeye gönderen ve hedeflerden yansıyan EM dalgaları olarak hedef ve bölge hakkında tespit, takip, görüntüleme gibi fonksiyonları gerçekleştirebilen bir sistemdir [2].

Radar tekniği, elektromanyetik (EM) enerji dalgalarıyla ışınlandırılan cisimlerden yansıyan elektromagnetik enerjinin radarda ortak bir zaman başlangıcına göre ölçülmesine dayanır. Yansıyan enerji dalgalarının ölçülmesiyle yansıtıcı cisim, belirli bir koordinat sistemine göre konumu, varsa hızı ve ivmesi ölçülebildiği gibi karakteristik özellikleri de belli bir oranda belirlenebilir.

Radar alıcısına gelen sinyal hedeften yansıyan sinyaller olmasının yanında istenmeyen sinyaller (parazit yansımalar) de içerebilir. Hedeften yansıyan sinyaller menzil ve hedef hızı hakkında bilgiler içermektedir.

EM dalgaların 100 km'lik dalga boyu ( $f = 3 \text{ kHz}$ ) ile,  $10^{-12} \text{ m}$ 'lik dalga boyu ( $f = 3 \cdot 10^{20} \text{ Hz}$ ) arasındaki bölgesi, aktif ve pasif uzaktan algılama sistemlerinde kullanılan pek çok bandı içerir. Dalga boyu 100 km ile 1 mm arasında olan dalgalar, çeşitli radar tipleri için uygun frekans bölgelerini kapsar. 10  $\mu\text{m}$  ile 0.3  $\mu\text{m}$  arasındaki dalga boylarını radarlar kullanır. Dalga boyu  $10^{-9} \text{ m}$  ile  $10^{-12} \text{ m}$  arasında olan gama ışınları ise, nem tarafından emilme özelliğinde oldukları için, nemin varlığının tespit edilmesinde kullanılırlar.

Dalga boyları  $\lambda = 100 \text{ km}$  ( $f = 3 \text{ kHz}$ ) ile  $\lambda = 10 \text{ km}$  ( $f = 30 \text{ kHz}$ ) arası olan çok alçak frekanslar (VLF) bölgesinde; denizcilerin konum tespit etmekte kullanılan radarlar çalışır.

$\lambda = 10 \text{ km}$  ( $f = 30 \text{ kHz}$ ) ile,  $\lambda = 1 \text{ km}$  ( $f = 300 \text{ kHz}$ ) arası olan alçak frekanslar (LF) bölgesinde; konum tespit etme radarı çalışır.

$\lambda = 20 \text{ km}$  ( $f = 15 \text{ kHz}$ ) ile  $\lambda = 200 \text{ m}$  ( $f = 1.5 \text{ MHz}$ ) arasında ise, ufuk ötesi yüzey dalgası (OTHgw) bölgesinde; deniz üzerinde ve ufkun arkasında bulunan hedeflerin tespitinde kullanılan radarlar çalışır.

$\lambda = 100 \text{ m}$  ( $f = 3 \text{ MHz}$ ) ile  $\lambda = 10 \text{ m}$  ( $f = 30 \text{ MHz}$ ) arasındakiki yüksek frekanslar (HF) bölgesinde; ufuk ötesi gök dalgası (OTHsw) radarlarını alan ve ufuk ötesindeki hedefleri araştıran radarlar çalışır.

$\lambda = 10 \text{ m}$  ( $f = 30 \text{ MHz}$ ) ile ( $f = 300 \text{ MHz}$ ) arasındakiki çok yüksek frekanslar (VHF) bölgesinde; bazı uzaktan algılama radarları çalışır.

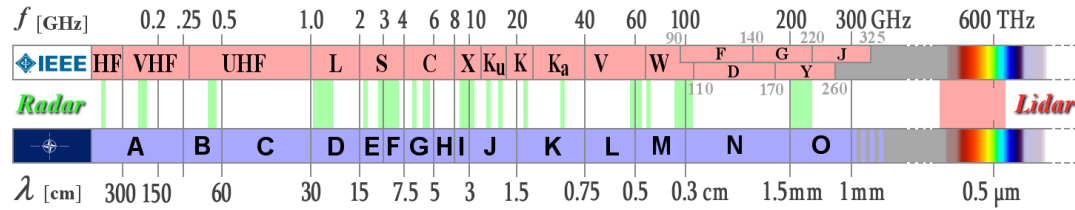
$\lambda = 50 \text{ m}$  ( $f = 6 \text{ MHz}$ ) ile  $\lambda = 0.5 \text{ m}$  ( $f = 600 \text{ MHz}$ ) arasındakiki bölge; toprak araştırma radarlarının kullandıkları bölgedir.

$\lambda = 1 \text{ m}$  ( $f = 300 \text{ MHz}$ ) ile  $\lambda = 10 \text{ cm}$  ( $f = 3 \text{ GHz}$ ) arasındakiki ultra yüksek frekanslar (UHF) bölgesinde; uçakları tespit radarları çalışır.

$\lambda = 10 \text{ cm}$  ( $f = 3 \text{ GHz}$ ) ile  $\lambda = 1 \text{ cm}$  ( $f = 30 \text{ GHz}$ ) arasındakiki süper yüksek frekanslar (SHF) bölgesinde; uzaktan algılama radarları çalışır.

$\lambda = 1 \text{ cm}$  ( $f = 30 \text{ GHz}$ ) ile  $\lambda = 1 \text{ mm}$  ( $f = 300 \text{ GHz}$ ) arasındakiki son derece yüksek frekanslar (EHF) bölgesinde; bazı askeri amaçlı radarlar ve meteoroloji radarları çalışır.

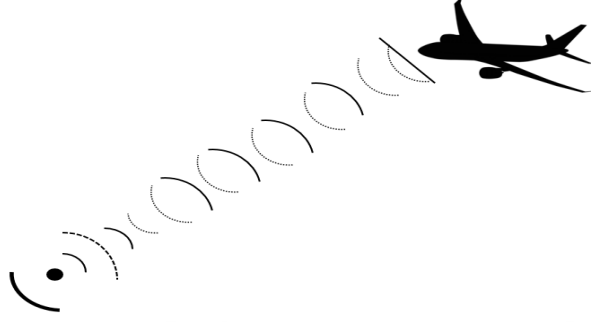
Özet olarak, radar vericilerinin frekansları, kullanma yerlerine göre, MHz'den GHz ve hatta mor ötesi (ultraviolet) (Laser Radar) frekans bandlarına kadar ulaşır. Şekil 2.1'de radar sistemlerinde frekans band ayrımını göstermektedir [32].



Şekil 2. 1: Radar frekans bantları.

## 2.1 Radar Çalışma Prensibi

Radarın çalışma prensibi kısaca şöyledir: Bir verici antenden, çok kısa bir zaman süresince, bir elektromanyetik dalga, belli bir doğrultuya gönderilir. Bu dalga, tespit edilmesi istenen bir hedefe çarpınca, yansır ve hedefe geri döner (Şekil 2.2).



Şekil 2. 2: Radar anteninden hedefe gönderilen ve hedeften antene geri dönen dalga.

### 2.1.1 Mesafe

Şekil 2.2’de de görüldüğü gibi, dalganın antenden çıkış ve antene dönüş yolu, gidiş geliş süresi ile orantılıdır. Ortamdaki dalga yayılma hızı  $c$  ve gidiş geliş süresi  $\Delta t$  ise, antenin hedefle arasındaki mesafe  $R$  olmak üzere,

$$2R = c \cdot \Delta t \quad (2.1)$$

$$R = c \cdot \frac{\Delta t}{2} \quad (2.2)$$

olur.  $R$  büyüklüğüne hedef menzili denir.

### 2.1.2 Doppler frekansı

Hedef, bir  $\vec{v}$  hızı ile hareketli ise, hedefe doğru ilerleyen düzlemsel dalganın  $\vec{k}$  yayılım vektörüne bağlı olarak (Şekil 2.3), hedef üzerinde indüklenen akımların dalga frekansı, gelen dalganın frekansına göre,

$$\Delta f_1 = -\vec{v}\vec{k} / \left[ 2\pi(1 - |\vec{v}|^2/c^2)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.3)$$

kadar doppler frekans kaymasına uğrar.

Hedefte indüklenen akımların uzaya yayınlayacağı yansımış dalga  $-\vec{k}$  ile ortama açılacaktır ve bu ortam, hedefe göre,  $-\vec{v}$  ile hareket etmektedir. Buna göre, ortama açılarak geri dönen dalga da bir Doppler kaymasına uğrar. Bu frekans kayması,

$$\Delta f_2 = (-\vec{v})(-\vec{k}) / \left[ 2\pi(1 - |\vec{v}|^2/c^2)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.4)$$

sonuç olarak, geri dönen dalgada, toplam,

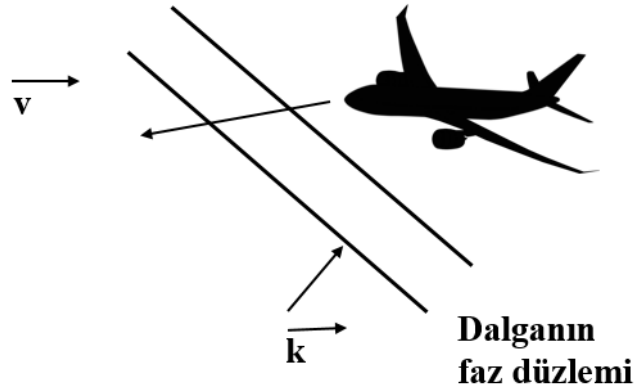
$$\Delta f = \Delta f_1 + \Delta f_2 \quad (2.5)$$

$$\Delta f = -\vec{v}\vec{k} / \left[ \pi(1 - |\vec{v}|^2/c^2)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.6)$$

Frekans kayması oluşur. Genellikle, hedefin hızı ışığın yayılma hızından çok küçük, bu oranın karesi de 1'in yanında ihmal edilebilir. Böylece,

$$\Delta f \approx -\vec{v}\vec{k}/\pi \quad (2.7)$$

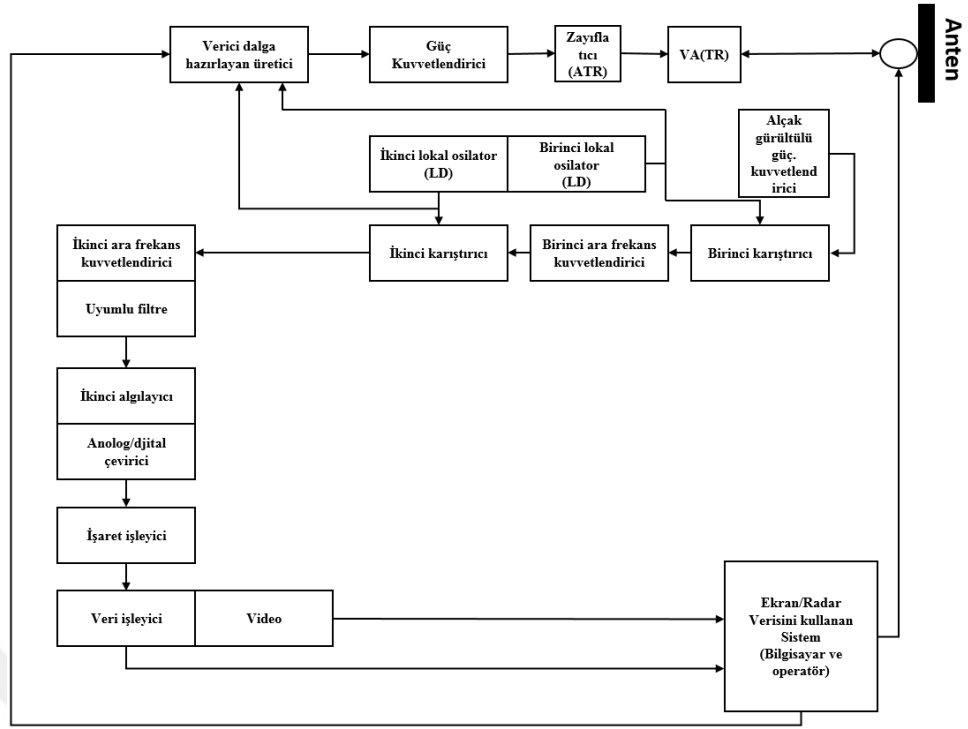
(2.7)'ye göre ,  $\Delta f$  pozitif ise, hedefin radara yaklaşmakta olduğu; negatif ise uzaklaşmakta olduğu anlaşılır. Ayrıca, hedefin hız vektörünün, hedefin konum vektörü üzerindeki izdüşümü de belirlenmiş olur.



Şekil 2. 3:  $\vec{v}$  hızıyla hareketli hedef ve hedefe doğru  $\vec{k}$  yayılım vektörü ile ilerleyen düzlemsel dalga.

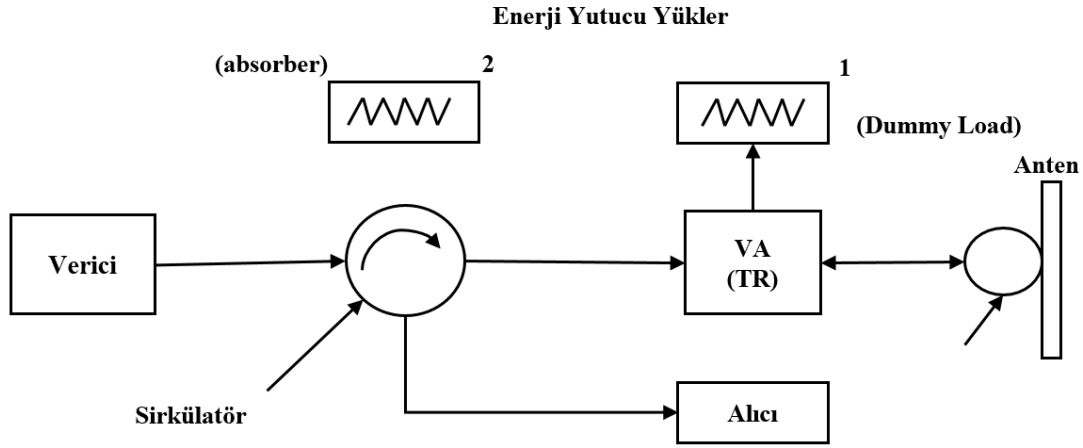
## 2.2 Radarın Blok Diyagramı

Radar işaretleri, verici dalga biçimini hazırlayan yüksek frekans üreticisinden güç kuvvetlendiricisine verilir. Güç kuvvetlendiricisinde kuvvetlendirilen elektromanyetik (EM) dalga enerjisi ikileyici (duplexer) yolu ile antene iletilir ve anten üzerinden de operasyon bölgesinde istenilen yönde ışınlandırılır.



Şekil 2. 4: Radarın basit blok diyagramı.

Radar işaretleri, nano ( $10^{-9}$ ) saniye veya mikro ( $10^{-6}$ ) saniye uzunluğunda, modülasyonlu veya modülasyonsuz belli veya rastgele zaman aralıkları ile tekrarlanan darbeler biçimindedir. Radarın verici ve alıcı işlemi aynı anda olmadığından kullanılan ikileyici, hızlı açılan ve kapanan dalga yönlendirici anahtar olarak, kuvvetlendirilmiş, EM enerji darbelerini antene iletir ve alıcı zaman aralığında antende toplanan radar radar işaretlerini alıcıya iletir. Böylece hem verici hem de alıcı için bir tek anten kullanılmış olur. İkileyici sayesinde alıcının ilk karıştırıcısı vericinin kuvvetli radar işaretlerinden korunmuş olur. Zayıflatıcı (ATR), örneğin sirkülatör, verici işaretlerini hemen hemen zayıflatmadan geçirdiği halde, geri yansıyan verici işaretlerini geçirmez ve devreye bağlanan bir yükte (dummy load) toplar.



Şekil 2. 5: Vericiden antene, antenden alıcıya, radar işaretlerinin yönlendirilmesi.

Şekil 2.5’de alıcı ve verici arasındaki sirkülötör, dalga yönlendirici anahtar ve EM enerji yutucu yüklerin basit bir devresini göstermektedir.

Radara kendi iç deneme çalışması durumunda vericinin çıkışı kısa bir süre için VA(TR) dalga yönlendirici anahtar üzerinden 1 numaralı (dummy) yüküne bağlanır. 2 numaralı enerji yutucu (Absorber) antene kadar olan bağlantılarda olabilecek empedans uyumsuzlukları yüzünden ışınlanmayanı fakat geri yansıyan küçük EM enerji yutar.

Kuvvetli radar işaretleriyle ışınlandırılan cisimler veya hedeflerden yansıyan radar antenine ulaşabilen radar işaretleri anten tarafından toplanıp Şekil 2.4’de görüldüğü gibi alıcı ve radar işaret işleyicisi tarafından algılanıp kesin olarak ayırt edilir. Radara veri işleyicisi, ayırt edilen bu radar işaretlerini uygun bir biçimde daha da işleyerek radar işaretlerinin yankılayan cisim veya hedefin şimdiki ve yakın gelecekteki konumunu, hızını, ivmesini ve diğer özelliklerini, belirli bir koordinat sistemine göre belirleyen ve dijital kelimeler olarak taşıyan hava aracının genel aviyoniğine iletir. Radara veri işleyicisi, ayrıca, yankılayan cismin veya hedefin o andaki konumuna ait olan video işaretini de ayırarak ekranda görüntülenmek üzere radar aviyonik sistemine verir.





Eşitlik (2.11) için, nokta hedefler için en basit ana radar denklemi olarak en çok kullanılır. Bu denklemden doğanın EM enerjisi etkisi, sistem kayıpları ihmal edilmiştir. Ek olarak,  $S_{\min}$  alıcının tanımlayabildiği minimum yankı işaret gücüdür.

Isısal gürültü gücü, k.T.B bağıntısıyla verilir.

k: Boltzman sayısı ( $1.38 \times 10^{-23} \text{ W} / (\text{Hz}^\circ\text{K})$ )

B: Alıcının frekans bandı genişliği

T: Alıcıdaki sıcaklık

Isısal gürültü gücü, k.T.B alıcının gürültü sayısı  $F_n$  ile çarpılırsa alıcının gürültü gücü, N bulunmuş olur. Eğer radar yankı işareti veya kısaca radar işareti, yalnız alıcının ısısal gürültüsü N ile karışmış ise, algılanması yapılabilen en küçük, radar işareti  $S_{\min}$

$$S_{\min} = kT_0 B F_n \frac{S}{N} \quad (2.13)$$

olarak yazılabilir.

Alıcı, uyumlu filtreli (matched filter) ise radar işaretinin dalga biçimine bağlı olmaksızın işaret veya güç oranı, alıcının çıkışında, ideal olarak  $(2E/N_0)$  maksimum değerine ulaşır.

Eğer ısısal gürültü gücü çok geniş bir frekans bandı boyunca sabit ise buna beyaz gürültü (White noise) denir. Alıcının algılama eşiği önündeki filtrenin frekans band genişliği B, alıcı band genişliği olup  $B = 1 / \tau$  varsayılmıştır. Buna göre,

$$S_{\min} = kT_0 F_n (E / N_0) / \tau \quad (2.14)$$

olur.  $S_{\min}$  (2.9) verilen eşitlikte yerine yazıldığında,

$$R_{\max}^4 = \frac{E_t G_t A_r \sigma}{(4\pi)^2 kT_0 F_n (E / N_0)} \quad (2.15)$$

olarak bulunur.

$$E_t = P_t \tau \quad (2.16)$$

(2.16)'daki ifade verici dalga biçiminin enerjisidir.

### 3. RADAR KESİT ALANI

Radar verici yada verici-alıcı anteninden gönderilen EM dalga hedefe ulaştığında, hedef yüzeyinde oluşan akım, hedeften her yöne bu dalgaların yansımalarını sağlar. Radar tarafından işlenen EM dalgaları hedefe ait bazı parametreleri tespit eder. Bu parametrelerden bazıları hedefin büyüklüğü, fiziksel yapısı ve hedefi meydana getiren maddenin özellikleridir. Hedefin sahip olduğu bu parametrelerin toplamı, RKA olarak adlandırılan radar parametresiyle ifade edilebilir [2].

Bir radar alıcısının girişine gelen işaret şiddetinin kestiriminde ışınlandırılan dalga, ışınlandıran kaynaklardan çıkıp, uzaktaki bir engel tarafından yansıyan bir dalga olarak geri dağıldığında, işaret şiddetindeki zayıflama hesaba katılmalıdır. Bu etkiler, radar uzaklık denkleminde dikkate alınır ve engelin yansıtması, tek bir  $\sigma$  fonksiyonla tanımlanır. Bu  $\sigma$  fonksiyonuna yansıtan engelin radar kesiti (RKA) denir.

RKA, hedefin radardaki görünürlük yada radar sinyallerinin yansıtma miktarı olup, aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$RKA = \frac{\text{Hedekten Saçılan Güç}}{\text{Hedefe m}^2 \text{ Başına Gelen Güç}} \quad (3.1)$$

Matematiksel olarak RKA:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \left| \frac{E_s}{E_0} \right|^2 \quad (3.2)$$

$E_s$ : Dağılan (scattered) alan şiddeti

$E_0$ : Gelen alan şiddeti (incident field strength)

R:  $E_s$ 'nin ölçüldüğü dağıtıcıdan radara olan uzaklık

şeklinde ifade edilir.

Dağılan alan R ile terst orantılı olarak değiştiğinden, RKA, uzaklıktan bağımsız bir fonksiyondur.

RKA'nın birimi  $m^2$  olmakla beraber, RKA hedefin fiziksel alanı ile doğrudan ilişkili değildir. Genel olarak fiziksel anlamda daha büyük hedefler daha büyük RKA değerlerine sahip olmakla beraber RKA sadece verici güç yoğunluğuna göre ne kadar gücün saçıldığı belirtilen hayali bir alanı ifade etmektedir.

RKA değerleri  $10^{-5} m^2$  (örn: Böcekler) den  $10^6 m^2$  (örn: Büyük gemiler) ye kadar değişebildiğinden genellikle logaritmik olarak aşağıdaki gibi ifade edilir. Çizelge 3.1'de X-bandında ki bazı hedeflerin RKA değerleri ait örnekler bulunmaktadır [2].

$$\sigma(dBsm) = 10 \log_{10} \left( \frac{\sigma_{lin}}{\sigma_{ref} = 1 m^2} \right) = 10 \log_{10} \quad (3.3)$$

Çizelge 3. 1. Bazı hedeflerin RKA değerleri.

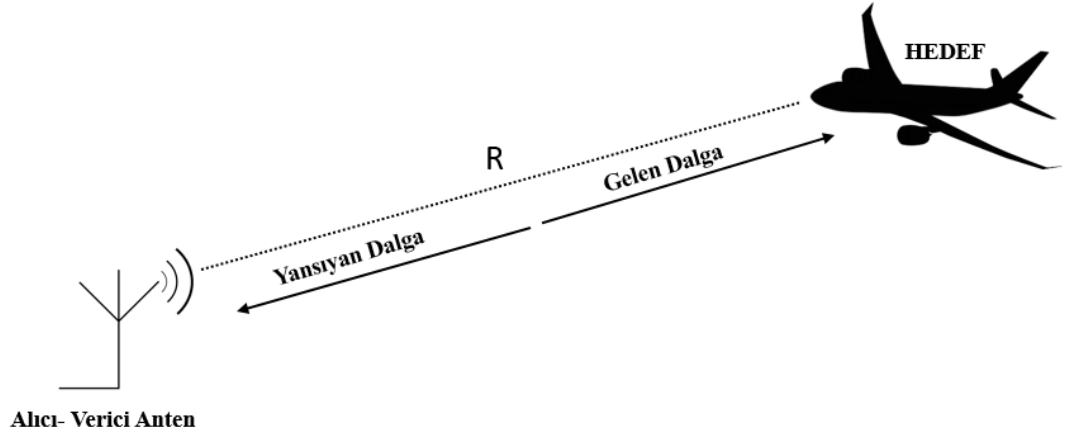
Hedefler	$\sigma [m^2]$	$\sigma [dB]$
Gelişmiş Hayalet Uçaklar	0.000001	-60
Böcek	0.00001	-50
Kuş	0.01	-20
İnsan	1	0
Yelkenli	10	10
Yolcu Uçakları	40	16
Otomobil	100	20
Kamyon	200	23

### 3.1 Monostatik ve Bistatik Radar Saçılma Yüzeyleri

Hedefe göre, alıcı verici antenlerin buldukları konumlara RKA, monostatik RKA ve bistatik RKA olarak 2 farklı şekilde tanımlanabilir.

#### 3.1.1 Monostatik saçılma yüzeyi

Hedefe göre, alıcı (Receiver) ve verici (Transmitter) anteni ayrı olup aynı yerde yada alıcı ve verici anteni aynı olan durumlar için monostatik RKA kullanılır. Şekil 3.1'de monostatik radar terminolojisi gösterilmiştir.

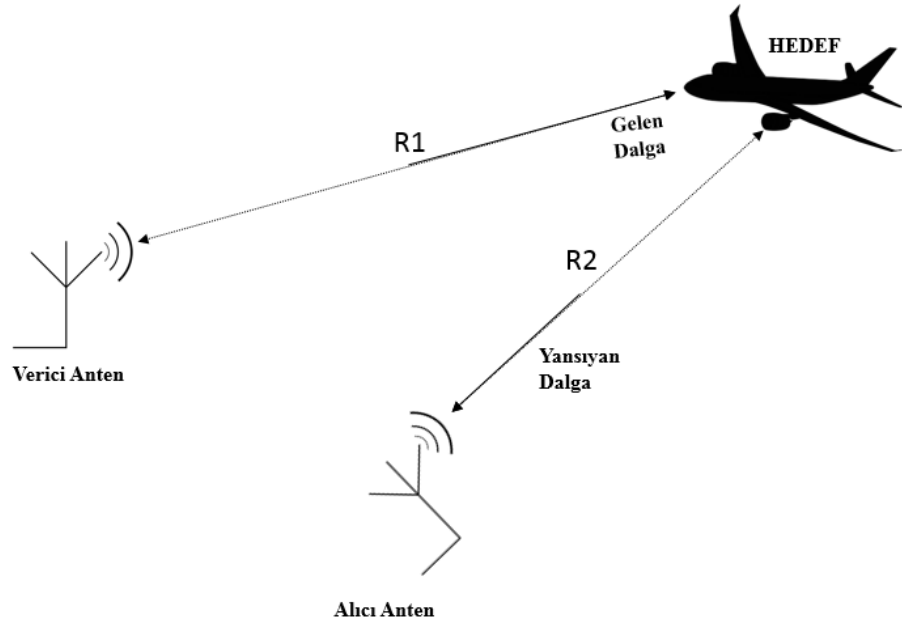


Şekil 3. 1: Monostatik RKA.

Günümüzde birçok radar sistemi monostatik radardır. Bu yüzden RKA test ve benzetim çalışmalarında monostatik RKA üzerinde çalışmalar yapılmaktadır.

### 3.1.2 Bistatik saçılma yüzeyi

Hedefe göre, alıcı ve verici anten sistemleri farklı yerlerdeki durumları için Bistatik RKA kullanılır. Şekil 3.2’de bistatik radar terminolojisi gösterilmiştir.



Şekil 3. 2: Bistatik RKA.

Bistatik RKA durumunda, genel olarak RKA:

$$P_r = \frac{\sigma P_t G_t G_r \lambda^2 e N_i}{(4\pi)^3 R_1^2 R_2^2 L_T} \quad (3.4)$$

şeklindedir.

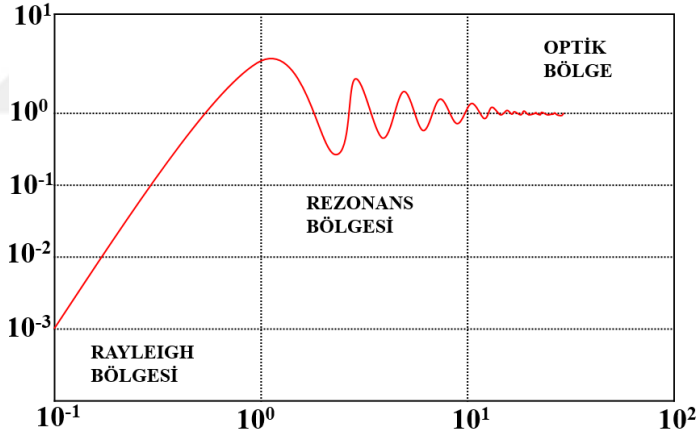
Eşitlik (3.4)'de diğer denklemlerden farklı, bistatik radar sistemlerde verici ve alıcı anten düzeneklerinin farklı konumlarda bulunmasından dolayı, verici antenden hedefe gelen ve hedeften alıcı antene iletilen sinyalin mesafelerinin tanımlanmış olmasıdır.

### 3.2 RKA'yı Etkileyen Parametreler

RKA'yı bir çok parametre etkiler. En temel parametreler ise, dalga boyu ve radar anten demetinin hedefle yaptığı açıdır. Bu açı, tarama süresi içinde veya bir taramadan sonra ikinci bir taramada değişeceğine göre, zaman da bir parametre olur. Ayrıca, radar demetinin polarizasyon şekli, hedefi kaplayan malzemenin iletkenlik ve dielektrik sabitleri de RKA'nın değerini etkileyen önemli parametrelerdir.

#### 3.2.1 Dalga boyunun etkisi

Yarıçapı  $\alpha$  olan, küresel bir mükemmel iletken bir saçıcının, düzlemsel dalgayı farklı  $\lambda$  dalga boylarında nasıl yansıtacağı Şekil 3.3'deki eğrilerden görülmektedir.



Şekil 3. 3:  $\alpha$  yarıçaplı mükemmel iletken kürenin RKA'sının değişimi.

Bu eğride  $2\pi\alpha/a$  ne kadar küçükse,  $\sigma/(\pi\alpha^2)$ 'nin mertebesi de o kadar küçük olmaktadır.

$$\frac{2\pi\alpha}{\lambda} < 0.3 \text{ için } \sigma < 0.1. \pi\alpha^2 \text{ dir.}$$

$$\frac{2\pi\alpha}{\lambda} < 0.2 \text{ için } \sigma < 0.01. \pi\alpha^2 \text{ dir.}$$

Eğrinin bu bölgesine “Rayleigh Bölgesi” denir.  $2\pi\alpha/\lambda$ 'nın 1 ile 10 arasında değerler aldığı bölgede  $\sigma$ , ortalaması  $2\pi\alpha^2$  olmak üzere, bu değer altında ve üstünde salınımlar gösterir. Eğrinin bu bölgesi “Mie Bölgesi” veya “Rezonans Bölgesi” denir.

$2\pi\alpha/\lambda$ 'nın 10 ve daha yüksek değerler aldığı “Optik Bölge”de ise bu salınımların genliği gittikçe küçülür. Bu eğriden aşağıdaki sonuçlar çıkmaktadır:

Rayleigh Bölgesi, yağmur, kar, sis, bulut gibi küçük zerreciklerle dolu ortamlardan geğen radar ışınının, saçılımın uğramaması için uygundur. Bu zerrecikler için  $\alpha$  yarıçapının maksimum 3 mm olduğu düşünülse  $2\pi\alpha/\lambda < 0.2$  için  $\lambda > 10$  cm gerekir ve bu parçacıklar için, 10 cm dalga boyunda  $\sigma/(\pi\alpha^2)$ ; 0.01'den az olur.  $\alpha$ 'nın 2 mm olması halinde , yine 10 cm dalga boyunda  $\sigma/(\pi\alpha^2)$ ; 0.003'ten küçüktür. Buna karşılık, bir meteoroloji radarının, küçük zerrelerden saçılan işaretleri alması için, milimetrik dalga boylarının kullanılması uygundur. Atmosferdeki aerosol taneciklerinin tespiti için ise,  $\mu m$  mertebesi dalga boyunda optik ışınları kullanan radarlar çalıştırılır. Gerek aerosol radarlarında, gerek toprak içinde hedef arayan radarlarda, ortamın zayıflatması da gözönünde tutularak, hedefi, rezonans bölgesinde, yani  $0.5 < 2\pi\alpha/\lambda_0 < 4$ 'ü sağlayan ortam içindeki  $\lambda_0$  dalga boyunun  $1.75\alpha < \lambda_0 < 12.56\alpha$  bölgesinde tutulması gerekir.

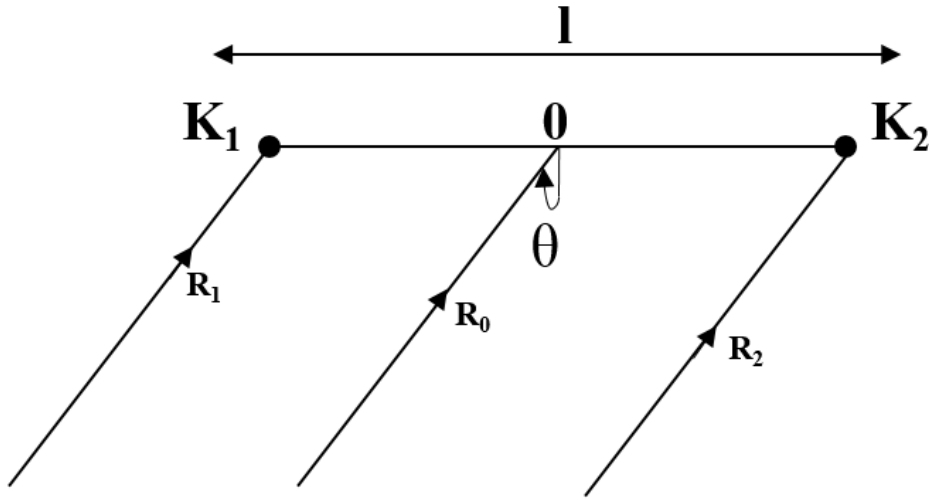
Diğer yandan  $2\pi\alpha/\lambda$  oranı; 0.6'dan büyükken,  $\sigma$ 'nın  $\pi\alpha^2$ 'ye oranı 1 değer civarında bulunmaktadır. Bu,  $\lambda$ 'nın 10  $\alpha$  değerinden küçük olması demektir.  $\alpha$ , hedefteki herhangi bir eğrilik yarıçaplarından biri olarak düşünülebilir. Hedefin radar kesiti hakkında kesin bir bilgi edinmek için ise  $2\pi\alpha/\lambda$ 'nın 10'dan büyük, yani  $\lambda$ 'nın 0.6  $\alpha$ 'dan küçük olması gerekir.  $\alpha$ , hedefteki herhangi bir eğrilik yarıçapı olabileceğinden,  $\lambda$ 'nın küçülmesi derecesinde hassasiyet artar.

### 3.2.2 Radar antenin hedefle yaptığı açı

Radar anten demetinin hedefle yaptığı açı  $\sigma$  radar kesitinin değeri üzerinde etkisi büyüktür. Örnek olarak, uzunca bir koninin ucuna bakınca minimum  $\sigma$ , tam ana doğrusuna dik olacak şekilde yandan bakınca maksimum  $\sigma$ , tabanına bakınca ise ortalama bir  $\sigma$  değeri ortaya çıkar. Bu değerlerin hesaplanmasında, ana doğruya dik gelen ışına ait elektrik alan vektörünün polarizasyonu , elde edilecek  $\sigma$  değeri üzerinde rol oynayacaktır.

Saçıcının farklı noktalarında yansıyan ışınların fazları da önemlidir. Bunlar radar alıcısına da eş fazlı olarak gelirlerse maksimum işaret oluştururlar. Zıt fazlı gelirlerse çok küçük yada bazı durumlarda hiç işaret oluşmaz. Buna göre de, birinci halde büyük

bir  $\sigma$  ikinci halde çok küçük bir  $\sigma$  var demektir. Şekil 3.4'de de görüldüğü gibi  $K_1$  ve  $K_2$  küreleri birbirlerinden  $l$  kadar uzakta ve  $K_1$  ve  $K_2$ 'nin orta noktası  $0$ 'dır.



Şekil 3. 4: Küçük iki yansıtıcı küre, gelen ve dönen ışınlar.

$K_1$  ve  $K_2$ 'yi birleştiren doğru parçasının orta dikisi ve gelen düzlemsel dalganın propagasyon vektörü arasında  $\theta$  açısı vardır. Radar anteninden,  $K_1$  küresi,  $R_1$  kadar uzakta;  $K_2$  küresi,  $R_2$  kadar uzakta,  $0$ 'da  $R_0$  kadar uzakta olsun.

$$R_1 = R_0 - (l/2) \cdot \sin \theta \quad (3.5)$$

$$R_2 = R_0 + (l/2) \cdot \sin \theta \quad (3.6)$$

Radar anteninden gelen ve  $K_1$ 'den yansıtılarak antene geri dönen 1 ışının toplam yolu  $2R_1$ 'dir. Antenden gelip  $K_2$ 'den yansıtılarak geri dönen 2 ışının toplam yolu da  $2R_2$ 'dir. Bunların faz terimleri de aşağıdaki gibidir.

$$e^{-j2kR_1} = e^{-j2kR_0} e^{jkl \sin \theta} \quad (3.7)$$

$$e^{-j2kR_2} = e^{-j2kR_0} e^{-jkl \sin \theta} \quad (3.8)$$

Radarlardan  $R$  kadar uzak bir yansıtıcının radar kesiti  $S$  olsun. Alıcıda indüklenen gerilim:

$$V = Ae^{-j2kR + j\omega t} \sqrt{S} \quad (3.9)$$

Olarak ifade edilebilir. Kürelerden birinin radar kesiti  $\sigma_0$  olduğunda, kürelerin alıcıda indükleyeceği gerilim:

$K_1$ 'in göndereceği yankı, alıcıda



$$V_1 = \sqrt{\sigma_0} A e^{-j2kR_1 + j\omega t} \quad (3.10)$$

$K_2$ 'nin gönderdiği yankı ise alıcıda

$$V_2 = \sqrt{\sigma_0} A e^{-j2kR_2 + j\omega t} \quad (3.11)$$

Olduğundan, (3)'deki bağıntılarını kullanarak ve  $k = 2\pi/\lambda$  yazarak

$$V_{\text{top}} = V_1 + V_2 = A\sqrt{\sigma_0} e^{-j4\pi R_0/\lambda + j\omega t} [e^{j(2\pi l/\lambda) \sin \theta}] \quad (3.12)$$

$$V_{\text{top}} = A e^{-j4\pi R_0/\lambda + j\omega t} \cdot 2\sqrt{\sigma_0} \cdot \cos[(2\pi l/\lambda) \sin \theta] \quad (3.13)$$

Olur. Radar kesiti  $\sigma_{ef}$  için

$$2\sqrt{\sigma_0} |\cos[(2\pi l/\lambda) \sin \theta]| = \sqrt{\sigma_{ef}} \quad (3.14)$$

buluruz. Buradan da

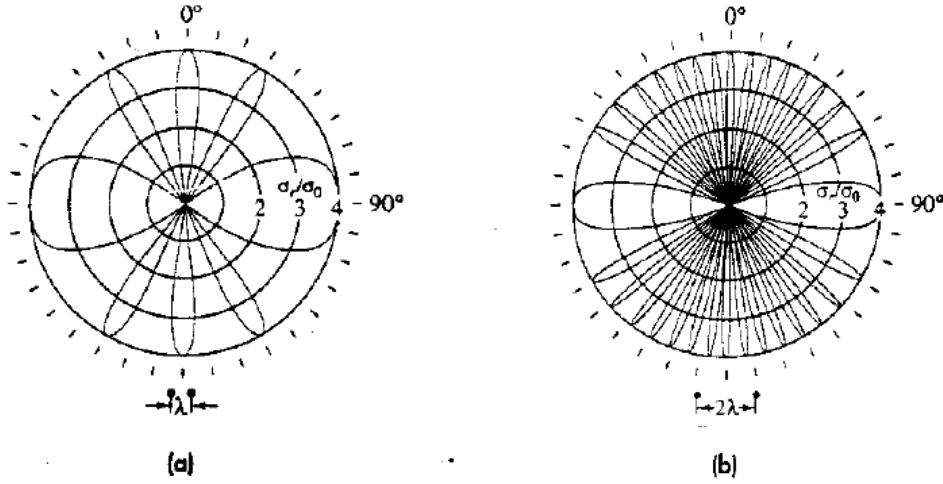
$$\sigma_{ef} = 4\sigma_0 \cos^2 \left[ \left( \frac{2\pi l}{\lambda} \right) \sin \theta \right] \quad (3.15)$$

bulunur. (3.15)'den,

$$0 \leq \sigma_{ef} \leq 4\sigma_0 \quad (3.16)$$

olduğunu,  $\sigma_{ef}$ 'in  $\theta$  açısına bağlı olduğunu, bu bağılılığın ise  $l/\lambda$  ile değiştiğini görürüz.  $l/\lambda$  çok büyükse bu değişim,  $\theta$ 'nın küçük farklılıklarında bile kendini gösterir (Şekil 3.5). Bir uçakta da birbirine göre simetrik pek çok nokta bulunduğundan, uçağın radar kesitinin, ışının geliş açısına bağılılığın Şekil 2.5(b)'deki gibi olacağı, fakat uçak halinde oluşacak şekilli dilimlerin çok daha sık olacağı anlaşılır.  $\sigma$ 'nın bu büyük ölçüdeki değişimleri, darbe biriktirmenin önemini daha da artırır.

Şekil 3.5'den görüldüğü gibi,  $l/\lambda$  oranı büyüdükçe, yani  $\lambda$  küçüldükçe, hedefin kaçırılacağı açısal aralıklar daralmaktadır [2].



Şekil 3. 5: İki yansıtıcı küreye ait  $\sigma_{ef}$ 'in kutupsal eğrileri.

### 3.2.3 Polarizasyonun etkisi

EM dalgalar, elektrik ve manyetik alan şiddetlerinin değiştiği düzlemler birbirini dik kesen düzlemlerdir. Birbirini dik kesen bu düzlemlere ait ara kesit (cross section) doğrusu ile dalgaların ilerleme doğrultusu birbiriyle çakışır. Elektrik ve manyetik alan şiddetleri dalgaların ilerleme yönüne dik olarak değişir. Radar tarafından hedefe gönderilen EM dalgaları zamanla uyumluluk gösterir.

Eşit frekanslı ve eşit ilerleme yönüne sahip iki düzlemsel dalga, eliptik kutuplandırılmış bir EM dalga oluşturabilir. Aynı frekans ve ilerleme yönündeki bu dalgalar, farklı kutuplu olduklarında ve faz farkı oluştuğunda bu durum gerçekleşir. Örnek olarak,  $E_1$  genliğindeki x doğrultusunda kutuplandırılmış düzlemsel dalga ile  $E_2$  genliğindeki y doğrultusunda kutuplandırılmış  $\psi$  fazlı düzlemsel dalganın toplamıdır:

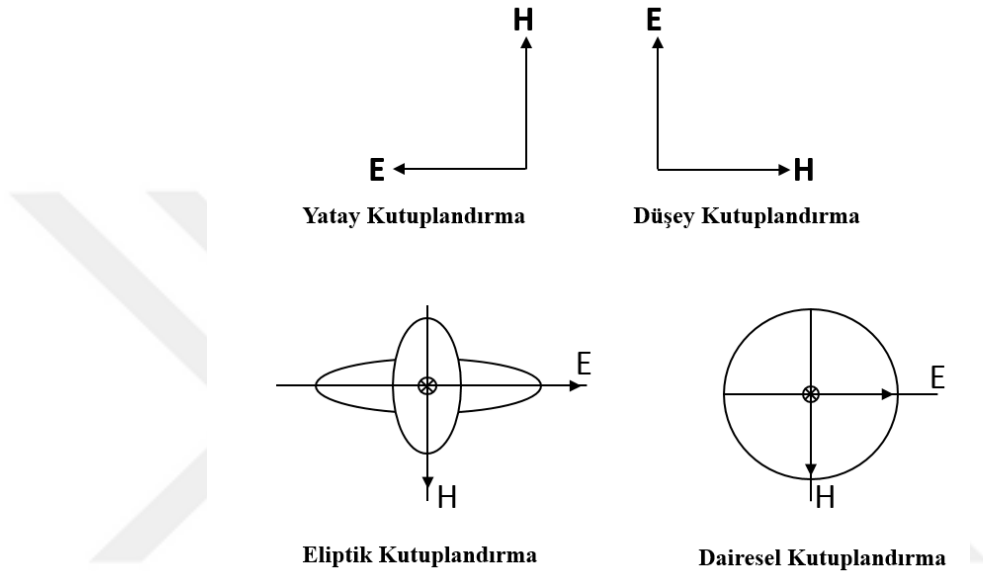
$$E_x = E_1 \cos(\omega t - kR) \quad (3.16)$$

$$E_y = E_2 \cos(\omega t - kR + \psi) \quad (3.17)$$

Eşitlik (3.16) ve (3.17) de verilen parametrik denklemler, elipsin xy düzlemindeki matematiksel ifadesidir. Yukarıdaki iki eşitliğin vektörel toplamı, elipsi, sabit mesafe ve değişken zaman için yada değişmeyen zaman ve değişen mesafe için takip eden bir vektördür. Sonuç olarak, elektrik alan zamanda dönerek, doğrusal kutuplandırma oluşur:

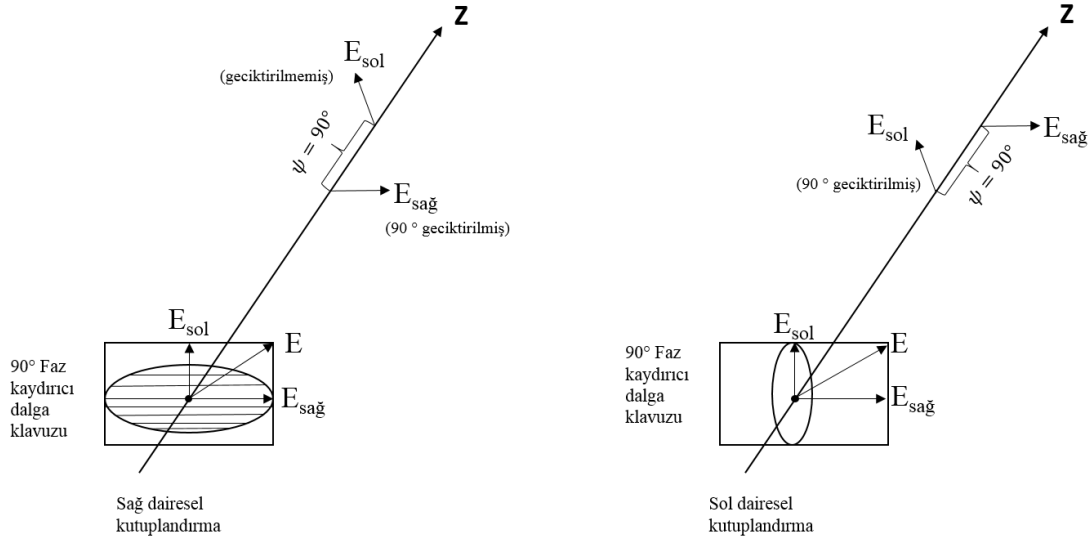
$$E_1 = E_2 \text{ ve } \psi = \mp \pi/2 \quad (3.18)$$

Eşitlik (3.18), dairesel kutuplanmadır. Faz farkının işareti, dairesel kutuplandırmanın yönünü tayin eder. Artı işaretli bir faz kayması sağ dairesel kutuplandırmayı, eksi işaretli bir faz kayması ise sol dairesel kutuplandırmayı oluşturur. Sağ kutuplandırma saat yönünde (clockwise), sol kutuplandırma ise, saat yönüne ters yönde (counterclockwise) döner. Heliktik ve spiral antenlerle dairesel kutuplandırılmış EM dalga oluşturulabilir. Oluşturulan dairesel kutuplandırmalar Şekil 3.6'da gösterilmektedir [33].



Şekil 3. 6: Kutuplandırma örnekleri.

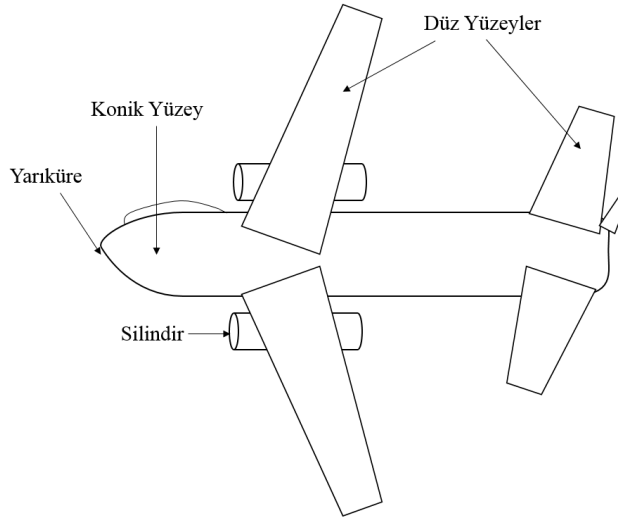
Yatay ve düşey kutuplandırılmış, aralarında  $90^\circ$  faz farkı olan bileşenler dairesel kutuplanmış EM dalgaları meydana getirir. Yatay ve düşey bileşenlerin aynı genlikte olmasının nedeni aralarında  $90^\circ$  lik faz farkı olmasıdır.



Şekil 3. 7: 90° faz kaydırıcı dalga kılavuzuyla sağ ve sol kutuplanma.

### 3.3 Uçan Karmaşık Hedeflerin Saçılım Türleri

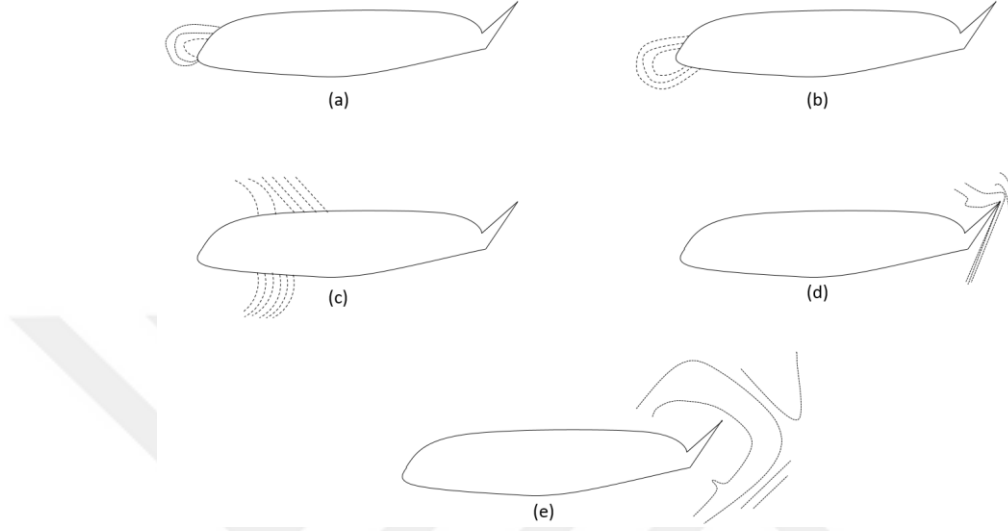
Karmaşık bir geometrik yapıya sahip uçak, aslında küre, konik yüzey, silindir, badem ve düz yüzeyler gibi basit şekillerin birleşimidir [34]. Dolayısıyla karmaşık bir uçağın RKA bilgisi aslında basit şekillerin RKA'ların toplamıdır (Şekil 3.8).



Şekil 3. 8: Basit geometrik yapılardan oluşmuş uçan hedef.

RKA hesaplamalarında yansıma, kırınım, yüzey dalgalar ve kılavuzlanma gibi saçılma türleri dikkate alınmalıdır. Bu türler Şekil 3.9'da bir uçan hedef üzerinde gösterilmiştir.

Şekil 3.9’da görüldüğü gibi, bir EM darbe hedefin burnuna çarpınca, enerjinin büyük bir kısmı kuyruğa doğru yol alır. Ama Şekil 3.9(b)’den görüldüğü gibi, az bir enerji işaret kaynağına doğru geri döner. Güdülen askeri hedef, enerjinin geri dönecek parçasının ya yüzey tarafından yutulmasıdır yada yönünün radar alcısından uzağa dönmesini sağlamaktır [35].

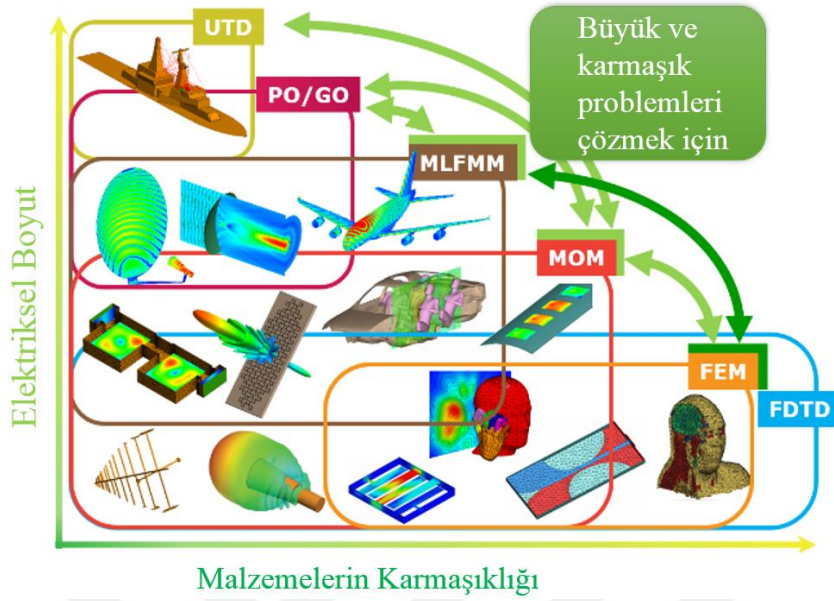


Şekil 3. 9: Engel üzerinde hareket eden EM dalgası.

### 3.4 RKA Analizinde Sayısal Yöntemler

Helikopter, uçak, gemi, iha gibi karmaşık ve büyük hedeflerin RKA’larının hesaplanması askeri açıdan stratejik öneme sahiptir. Basit cisimlerin analitik olarak RKA’larının hesaplanması bile oldukça zor iken, daha karmaşık yapıların RKA’larının doğru hesaplanamaması, bu karmaşık ve büyük hedeflerin boyutları büyüdükçe; test odalarının ve test ekipmanlarının maliyeti artmaktadır. Bu nedenle, alternatif olarak, RKA ölçüm ve hesaplamaları için sayısal elektromanyetik çözüm teknikleri kullanılmaktadır. Hedeften saçılan dalgaların hesaplanabilmesi için doğru sınır koşullarında diferansiyel ve integral denklemlerin çözülmesi gerekmektedir [7, 8]. Bu yüzden, doğru sonuçların elde edilmesi, zamana ve yüksek işlemci ve belleklere sahip bilgisayarlara bağlıdır. Analitik hesaplama yöntemlerinin alternatifi olarak sıklıkla kullanılan sayısal hesaplama yöntemlerinden bazıları: Geometrik Optik (GO), Fiziksel Optik (FO), Çok Seviyeli Hızlı Çok Kutup Yöntemi (MLFMM), Momentler Metodu (MoM), ve Eşdeğer Akımlar Yöntemi (MEC)’dir [10] (Şekil 3.10). Bu tekniklerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Çözülecek geometrinin karmaşıklığı

ve elektriksel büyüklüğü gibi parametreler, hangi yöntemin kullanılacağına önemli bir etkidir [36].



Şekil 3. 6: RKA'da kullanılan sayısal yöntemler.

### 3.4.1 Fiziksel optik yöntemi

Fiziksel optik yöntemi (FO), hedefin gövdesine gelen EM ışınlar tarafından indüklenen yüzey akımını hesaplar. Hedefin yüzeyindeki akımın indüklenmesi radardan yayılan enerjinin hedefe çarpmasıyla meydana gelir. İndüklenen bu akım elektromanyetik enerjiyi her yöne yayar. Gelen alan tarafından gövdenin doğrudan aydınlatılan kısımlarında indüklenen akım gelen manyetik alan şiddeti ile orantılıdır. Ancak hedefin gölgelenmiş bölgelerinde akım yoktur. Böylelikle yaklaşık akım değeri şu şekildedir:

$$J_s \approx \begin{cases} 2\hat{n} \times \vec{H}_i, & \text{aydınlık kısımlar için} \\ 0, & \text{gölge kısımlar için} \end{cases} \quad (3.19)$$

Burada  $\vec{H}_i$  ile ifade edilen yüzeydeki gelen manyetik alan şiddeti,  $\hat{n}$  ise yüzeye dik birim vektörüdür. Eşitlik (3.19)'da hesaplanan akım, hedeften saçılan uzak alan hesabının ışınım integrallerinde kullanılır [37]. Fiziksel optik (FO) metodu yüksek frekanslarda oldukça etkilidir. Aynı zamanda en iyi sonucu elektriksel uzunluğu fazla ( $L \geq 10\lambda$ ) olan fiziksel yapılarda verir. Geniş açılardan ve gölge olan bölümlerin alan hesapları hatalıdır. Bunun nedeni ise, gölge bölgelerde akım aniden sıfıra çekilir.

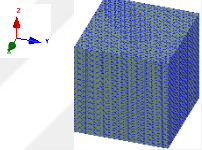
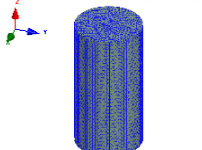
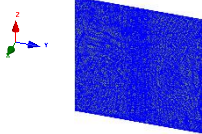
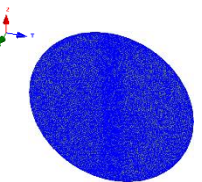
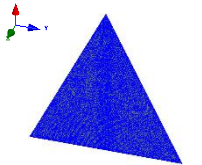
#### **4. MÜHİMMATLI ve MÜHİMMATSIZ HEDEFLERİN RKA ANALİZİ**

Bu bölüm, mühimmatlı ve mühimmatsız radar hedeflerinin Radar Kesit Alanı ile ilgili çalışmaları kapsar.

##### **4.1 Basit Hedeflerin Analizi**

Bu kısımda basit ve düzgün şekilli cisimlerin RKA davranışları incelenecektir. Çizelge 4.1’de simetrik ve düzgün yüzeyle mükemmel iletken (PEC) malzemeli basit cisimlerin, etkin yansıtma yüzeyleri hesaplanarak, 1 GHz ve 2 GHz için maksimum RKA değerleri verilmiştir.

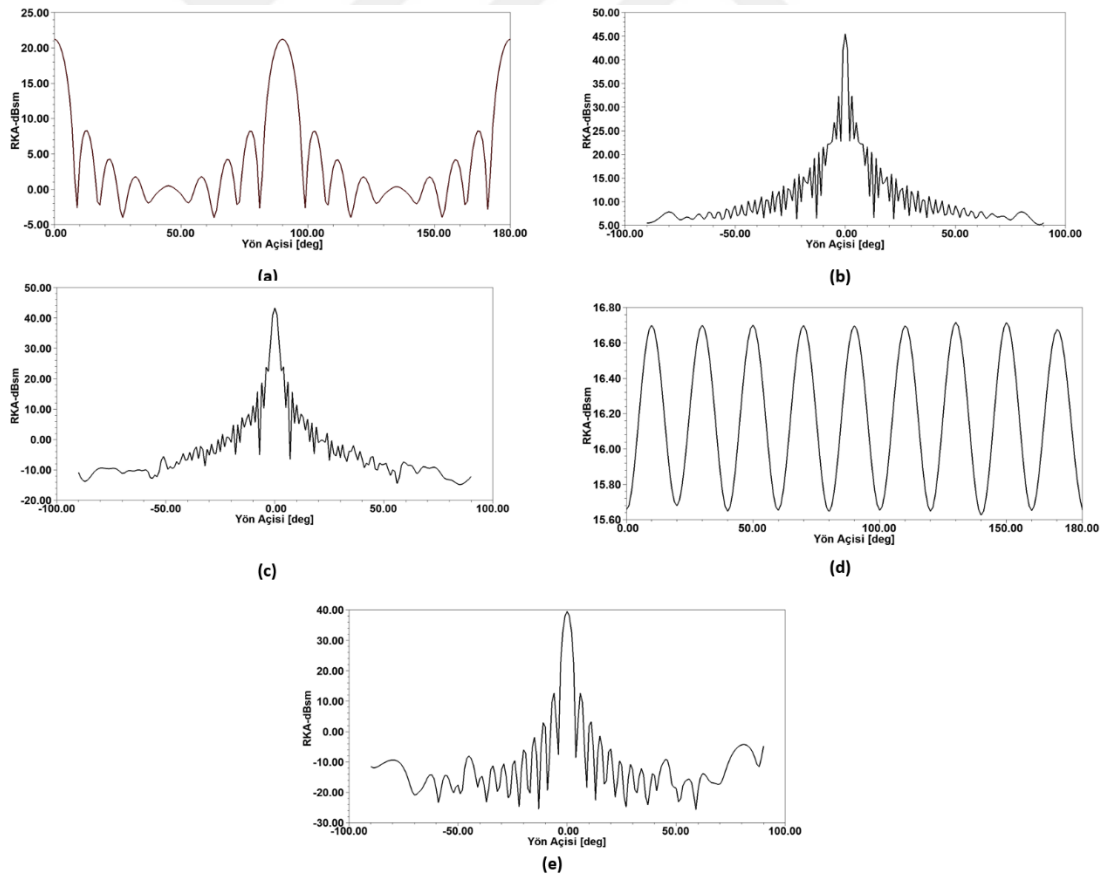
Çizelge 4. 2: Basit ve düzgün yüzeyli cisimlerin 1 GHz ve 2 GHz maksimum RKA değerleri.

Hedef	Geometri	$\sigma_{Maks}$	$f = 1 \text{ GHz}$	$f = 2 \text{ GHz}$
Küp		$\sigma_{Maks} = \frac{4 \cdot \pi \cdot w^2 \cdot h^2}{\lambda^2}$	$\sigma_{Maks} = 21.4 \text{ dBsm}$	$\sigma_{Maks} = 27.47 \text{ dBsm}$
Silindir		$\sigma_{Maks} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot h^2}{\lambda}$	$\sigma_{Maks} = 16.22 \text{ dBsm}$	$\sigma_{Maks} = 19.23 \text{ dBsm}$
Kare Levha		$\sigma_{Maks} = \frac{4 \cdot \pi \cdot b^2 \cdot h^2}{\lambda^2}$	$\sigma_{Maks} = 45.5 \text{ dBsm}$	$\sigma_{Maks} = 52.6 \text{ dBsm}$
Dairesel Levha		$\sigma_{Maks} = \frac{4 \cdot \pi^3 \cdot r^4}{\lambda^2}$	$\sigma_{Maks} = 43.4 \text{ dBsm}$	$\sigma_{Maks} = 49.45 \text{ dBsm}$
Üçgen Levha		$\sigma_{Maks} = \frac{4 \cdot \pi \cdot A^2}{\lambda^2}$	$\sigma_{Maks} = 43.4 \text{ dBsm}$	$\sigma_{Maks} = 45.5 \text{ dBsm}$



Çizelge 4.1’de küpün 1 kenarının uzunluğu 1 m, silindir yarıçapı 0.5 m, yüksekliği ise 2 m’dir. Kare ve üçgen levhaların kenarlarının uzunluğu ise 4 m olup, dairesel düzlemin yarıçapı 2 m’dir. Yukarıda etkin yansıtma yüzeleri matematiksel olarak hesaplanan basit cisimlerin RKA’sı cisimlerin fiziksel boyutlarının dalga boyuna olan oranına bağlıdır [38].

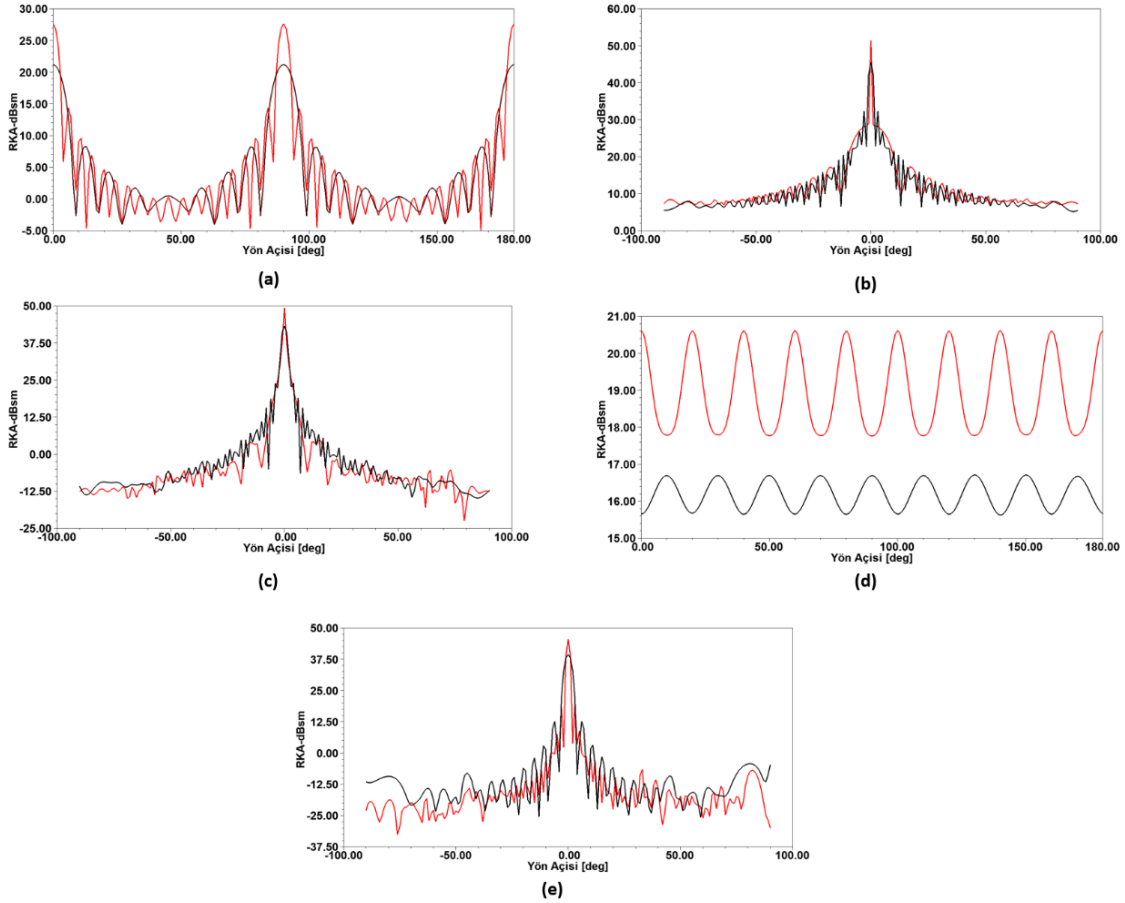
Yukarıda 1 GHz için hesaplanan maksimum RKA değerleri yalnız basit yüzeylerde ve bu yüzeylere dik gelen EM dalgalar için hesaplanabilir. Yapılan hesaplamalarda, hedefin radar kaynağına çok uzakta olduğu kabul edilir ve buna göre çözüm yapılır. Çizelge 4.1’de bulunan basit cisimler sayısal ortamda gerçekçi bir şekilde modellenerek uzak alan RKA hesaplamalarında FO yöntemi kullanılmıştır. küp ve silindir için xy düzleminde, 0’dan 180°, kare, dairesel ve üçgen levha için xy düzleminde, 0’dan 90° dereceye kadar 1° çözünürlükle, toplam 180 eş parçaya bölünerek düzlem dalga yollanmıştır. Yansıyan dalganın bileşenini almak için kutupsal koordinatlarda sonuç alınmıştır (Şekil 4.1).



Şekil 4. 1: 3B Sayısal modellenen (a)küp, (b)kare, (c)dairese, (d)silindir, (e)üçgen levha modellerinin 1 GHz monostatik RKA sonucu.

Dairesel ve üçgen levha gibi 2 boyutlu cisimlerin monostatik RKA hesaplamalarında ise hedefe önden bakacak şekilde ( $\theta = -90^\circ, 90^\circ$ ) düzlem dalgalar gönderilmiştir.

Şekil 4.1'e göre XY düzleminde,  $\theta = 0^\circ, \theta = 90^\circ, \theta = 180^\circ$  açılarında maksimum RKA değeri küp için, yaklaşık 21.2 dBsm,  $\theta = 0^\circ$  olduğunda maksimum RKA değeri kare, daireSEL ve üçgen levha için, sırasıyla, 45.5 dBsm, 43.3 dBsm ve 39.5 dBsm olarak elde edilmiştir. Kare levhanın yüzey alanı diğer cisimlere göre daha fazla olduğundan dolayı RKA değeri diğer cisimlerden daha yüksektir. Matematiksel hesaplanmış ve Çizelge 4.1'de verilmiş basit cisimlerin RKA sonuçları ile Şekil 4.1'de sayısal hesaplanmış RKA sonuçlarının birbirine çok yakın çıktığı görülmüştür. Şekil 4.2'de frekans değeri 2 katına çıkarılarak aynı sınırlar altında tekrar çözülmüştür.



Şekil 4. 2: 1 GHz ve 2 GHz için (a)küp, (b)kare, (c)daireSEL, (d)silindir, (e)üçgen levha modellerinin monostatik RKA sonucu.

Şekil 4.2'ye göre XY düzleminde,  $\theta = 0^\circ, \theta = 90^\circ, \theta = 180^\circ$  açılarında maksimum RKA değeri küp için, yaklaşık 27.6 dBsm,  $\theta = 0^\circ$  olduğunda maksimum RKA değeri kare, daireSEL ve üçgen levha için, sırasıyla, 51.3 dBsm, 49.3 dBsm ve 45.6 dBsm

olarak elde edilmiştir. Kare, dairesel ve üçgen levhaların, frekans değeri arttıkça maksimum RKA değerinin tüm basit cisimler için arttığı gözlenmiştir.

## 4.2 Karmaşık Hedeflerin Analizi

Bölüm 3’de anlatıldığı gibi uçağın ana gövde geometrisinin genellikle silindir, badem, konik küre ve açık uçlu konik küre olarak modellendiği gözlemlenmiştir . Bu kısımda, farklı katmanlı badem, konik küre, açık uçlu (boşluklu) konik küre modelleri incelenmiştir.

### 4.2.1 Badem modeli analizi

NASA tarafından RKA ölçümlerinde kullanılan badem modelinin [39], matematiksel tanımı aşağıda verilmiştir:

$$-0.41667 < t < 0 \text{ ve } -\pi < \psi < \pi \quad (4.1)$$

$$x = dt \text{ inç} \quad (4.2)$$

$$y = 0.19333d \sqrt{1 - \left(\frac{t}{0.416667}\right)^2} \cos \psi \quad (4.3)$$

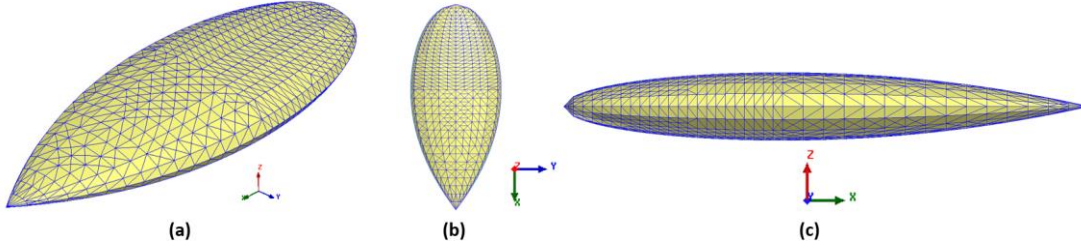
$$z = 0.06444d \sqrt{1 - \left(\frac{t}{0.416667}\right)^2} \sin \psi \quad (4.4)$$

$$0 < t < 0.5833 \text{ ve } -\pi < \psi < \pi \quad (4.5)$$

$$y = 4.83345d \left[ \sqrt{1 - \left(\frac{t}{2.08335}\right)^2} - 0.96 \right] \cos \psi \quad (4.6)$$

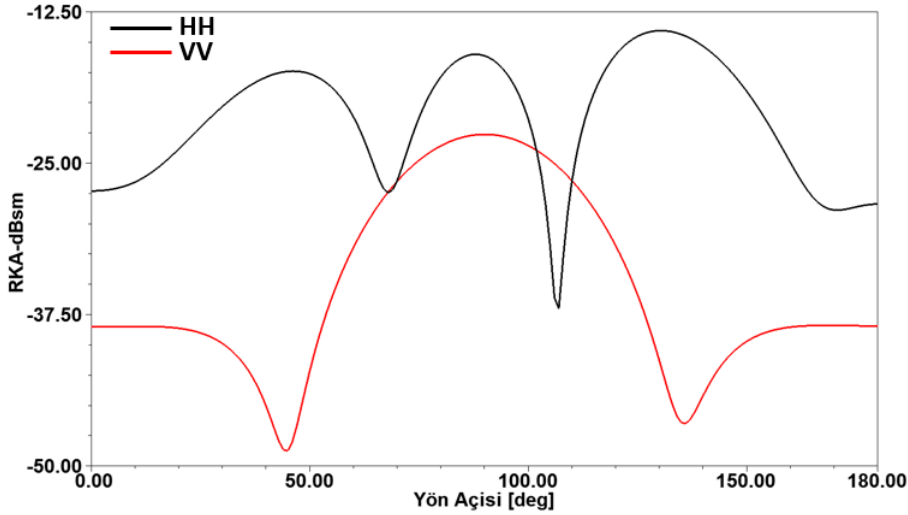
$$z = 1.61115d \left[ \sqrt{1 - \left(\frac{t}{2.08335}\right)^2} - 0.96 \right] \sin \psi \quad (4.6)$$

Burada  $d= 9.936$  inç'tir. Badem modelinin toplam uzunluğu  $9.936$  inç olup, sayısal modellenen 3B badem Şekil 4.3’de gösterilmiştir.



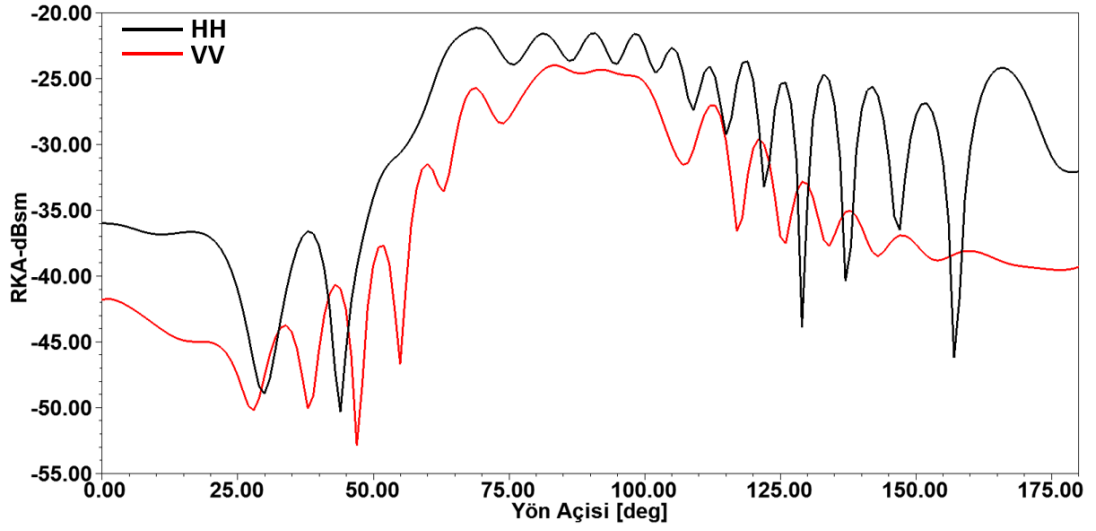
Şekil 4. 3: 3B Badem modelinin (a)genel, (b)önden, (c)yandan görünümü.

Şekil 4.4’de 1.19 GHz’de badem modeli yaklaşık 1 dalgaboyu (0.25 m) uzunluğunda olup, yatay (HH) ve dikey (VV) polarizasyonlar azimuth (yön) açısının bir fonksiyonu olan dBsm cinsinden gösterilmiştir. Görüş (elevation) açısı  $0^\circ$  ve hedefe yandan bakacak ( $\phi = 0^\circ, 180^\circ$ ) şekilde ölçülmüştür. Yön açısının ( $\phi = 0^\circ$ ) olduğu yerde düzlemsel dalganın hedefe geldiği yer, bademin uç, sivri kısmıdır.

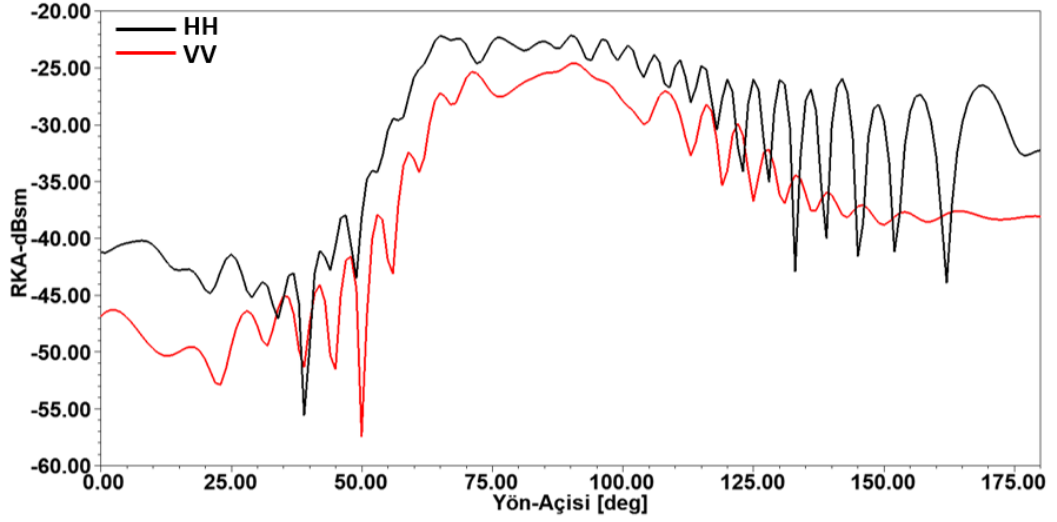


Şekil 4. 4: 1.19 GHz’de badem modelinin yatay (HH) ve dikey (VV) RKA sonuçları.

Şekil 4.5’de 7 GHz için, Şekil 4.6’da ise 9.92 GHz için monostatik RKA sonuçları sunulmuştur.



Şekil 4. 5: 7 GHz’de badem modelinin yatay (HH) ve dikey (VV) RKA sonuçları.



Şekil 4. 6: 9.92 GHz’de badem modelinin yatay (HH) ve dikey (VV) RKA sonuçları.

Frekans arttıkça, yatay (HH) ve dikey (VV) polarizasyon için de RKA değerlerinin  $\phi = 0^\circ$ ’de azaldığı görülmektedir. Dikey (VV) polarizasyon değerindeki düşük oranı yatay (YY) polarizasyona göre çok daha azdır. Gelen düzlemsel dalgaların hedefin geniş yüzeyine yaklaştıkça  $\phi = 120^\circ$  ve sonrasında RKA salınım eğrilerinin frekans arttıkça sıklaştığı görülmektedir.

#### 4.2.2 Konik küre analizi

Konik küre aynı zamanda yüksek frekanslı bir RKA hedefidir. Koni küresinin yarım açısı  $7^\circ$ , yarıçapı 2.947 inç ve koni kısmının uzunluğu ise 23.821 inç'tir. Konin yan kısmı, eklemde düzgün bir geçiş ve minimum kırınım sağlamak için küreye teğettir. Şekil 4.7'de gösterilen konik-küre modelinin matematiksel tanımı ise aşağıda verilmiştir [40].

$$-23.821 \text{ inç} < t < 0 \text{ inç ve } -\pi < \psi < \pi, \quad (4.7)$$

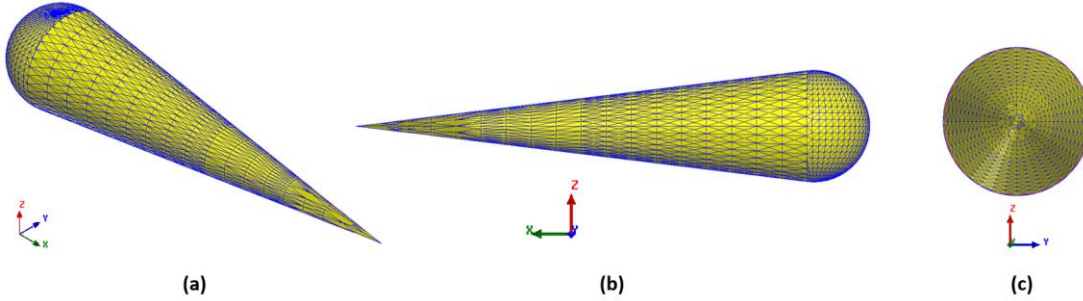
$$y = 0.87145(x + 23.821) \cos \psi \quad (4.8)$$

$$z = 0.87145(x + 23.821) \sin \psi \quad (4.9)$$

$$0 \text{ inç} < x < 3.306 \text{ inç } -\pi < \psi < \pi, \quad (4.10)$$

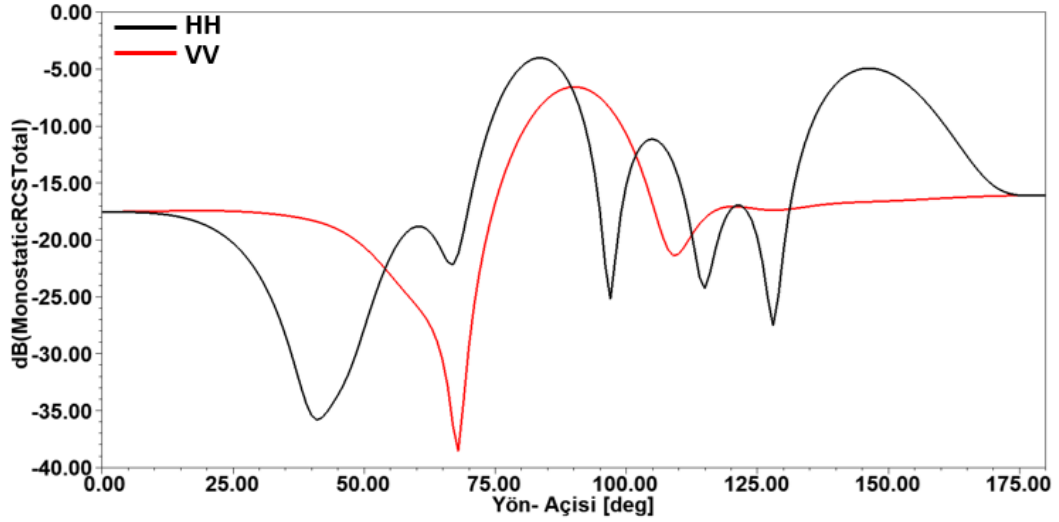
$$y = 2.947 \sqrt{1 - \left(\frac{x - 0.359}{2.947}\right)^2} \cos \psi \quad (4.11)$$

$$z = 2.947 \sqrt{1 - \left(\frac{x - 0.359}{2.947}\right)^2} \sin \psi \quad (4.12)$$



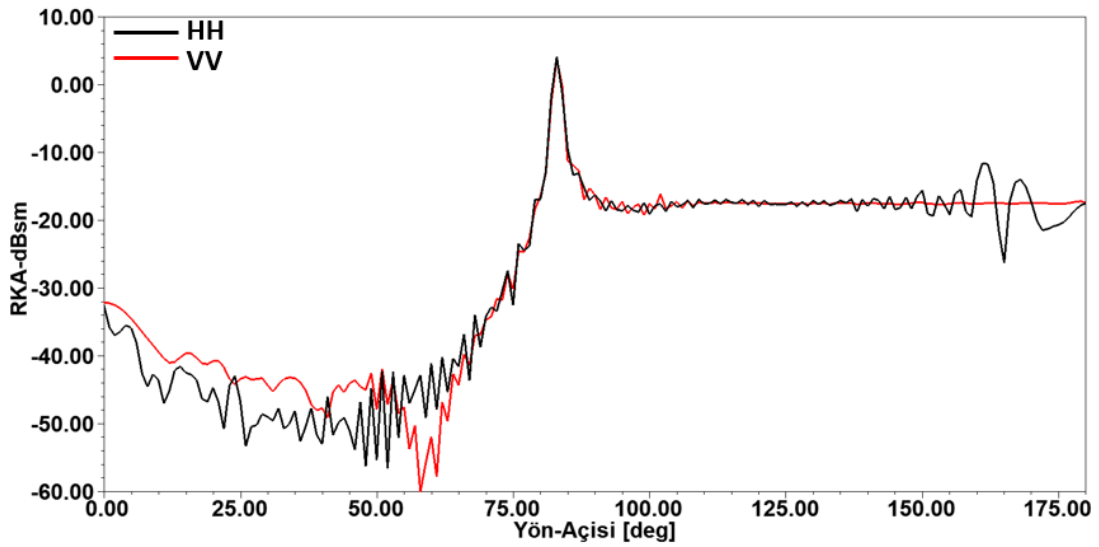
Şekil 4. 7: 3B Konik-küre modelinin (a)genel, (b)yandan, (c)arkadan görünümü.

Şekil 4.8'de 869 MHz'de konik küre modeli yaklaşık 2 dalgaboyu (0.5 m) uzunluğunda olup, yatay (HH) ve dikey (VV) polarizasyonlar azimuth (yön) açısının bir fonksiyonu olan dBsm cinsinden gösterilmiştir. Görüş (elevation) açısı  $0^\circ$  ve hedefe yandan bakacak ( $\phi = 0^\circ, 180^\circ$ ) şekilde ölçülmüştür. Yön açısının ( $\phi = 0^\circ$ ) olduğu yerde düzlemsel dalga'nın hedefe geldiği yer, konik kürenin uç, sivri kısmıdır.



Şekil 4. 8: 869 MHz’de Konik küre modelinin yatay (HH) ve dikey (VV) monostatik RKA sonuçları.

Şekil 4.9’de 9 GHz için, monostatik RKA sonuçları sunulmuştur. 9 GHz’de konik küre modeli yaklaşık 7 dalga boyu uzunluğundadır.



Şekil 4. 9: 9 GHz’de Konik küre modelinin yatay (HH) ve dikey (VV) monostatik RKA sonuçları.

Frekans arttıkça, yatay (HH) ve dikey (VV) polarizasyon için de RKA değerlerinin  $\phi = 0^\circ$ ’de azaldığı görülmekte ama,  $\phi = 90^\circ$  olduğunda yatay (HH) ve dikey (VV) polarizasyon için RKA değerinin arttığı görülmektedir. Bu artışın nedeninin  $\phi = 90^\circ$ ’de düzlem dalgaların hedefin yüzey alanını genişlediği alana yani hedefin küresel bölgesine gelmesinden kaynaklanmaktadır. Yüksek frekansta, gelen düzlemsel dalgaların  $\phi = 100^\circ$  ve sonrasında yatay ve dikey polarizasyon RKA değişim

değerlerinin birbirine yaklaştığı aralarındaki farkın azaldığı ve RKA salınım eğrilerinin sıklaşarak bir doğru gibi görülmektedir.

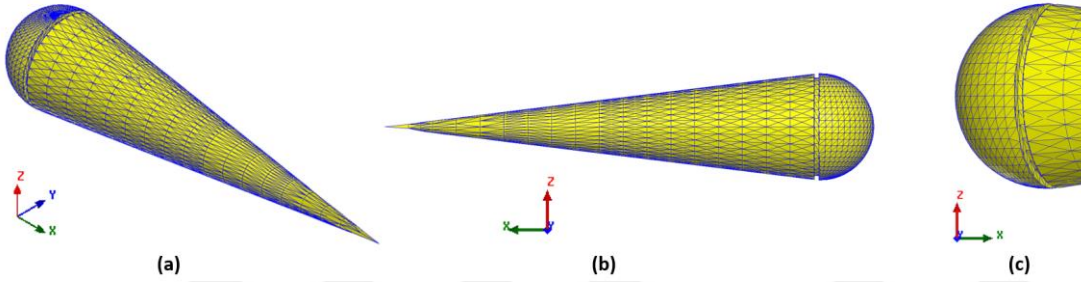
### 4.2.3 Açık uçlu konik küre analizi

Açık uçlu konik küre hedefi, konik küre hedefine oldukça benzemektedir. Aralarındaki fark, küre eklemının yanında bir boşluk olmasıdır. Bu boşluk 0.25 inç derinliğinde ve genişliğindedir. Şekil 4.10'da gösterilen konik-küre modelinin matematiksel tanımı ise aşağıda verilmiştir [40]:

$$0 \text{ inç} < x < 0.25 \text{ inç ve } -\pi < \psi < \pi, \quad (4.13)$$

$$y = 2.697 \cos \psi \quad (4.14)$$

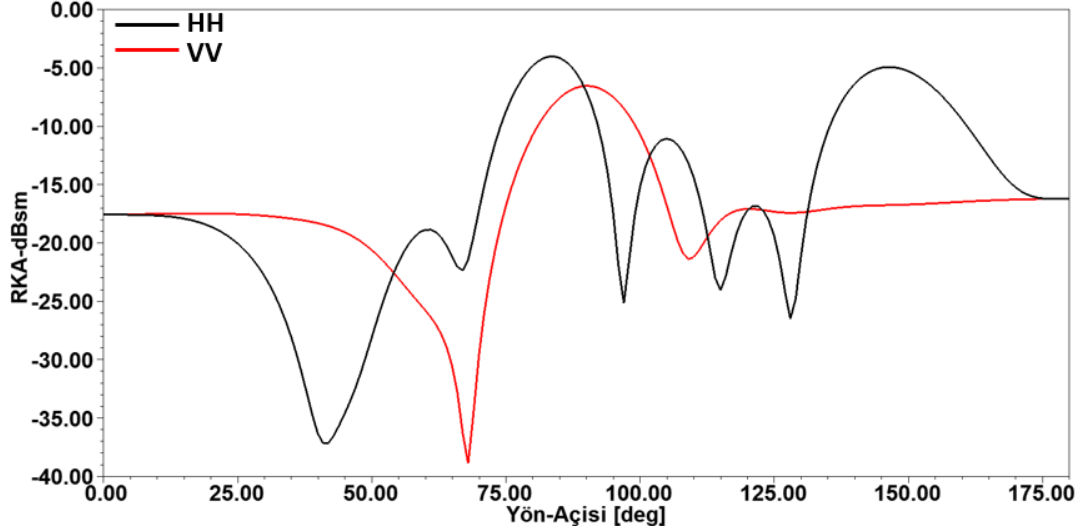
$$z = 2.697 \sin \psi \quad (4.15)$$



Şekil 4. 10: 3B Açık uçlu konik-küre modelinin (a)genel, (b)yandan, (c)açık kısım görünümü.

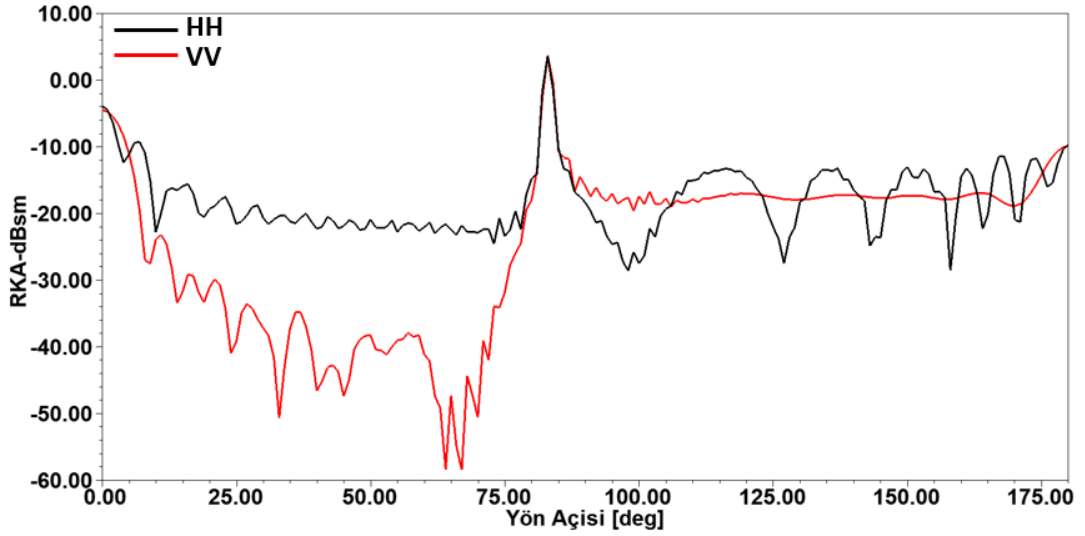
Şekil 4.11'de 869 MHz'de açık uçlu konik küre modeli yaklaşık 2 dalgaboyu (0.5 m) uzunluğunda, açık uçlu kısım (boşluk) 1/50 dalga boyunda ve pek görünmez olup, yatay (HH) ve dikey (VV) polarizasyonlar azimuth (yön) açısının bir fonksiyonu olan dBsm cinsinden gösterilmiştir. Görüş (elevation) açısı  $0^\circ$  ve hedefe yandan bakacak ( $\phi = 0^\circ, 180^\circ$ ) şekilde ölçülmüştür. Yön açısının ( $\phi = 0^\circ$ ) olduğu yerde düzlemsel dalganın hedefe geldiği yer, konik kürenin uç sivri kısmıdır.





Şekil 4. 11: 869 MHz’de Açık uçlu konik küre modelinin yatay (HH) ve dikey (VV) monostatik RKA sonuçları.

Şekil 4.12’de 9 GHz için, monostatik RKA sonuçları sunulmuştur. 9 GHz’de konik küre modeli yaklaşık 7 dalga boyu uzunluğundadır.



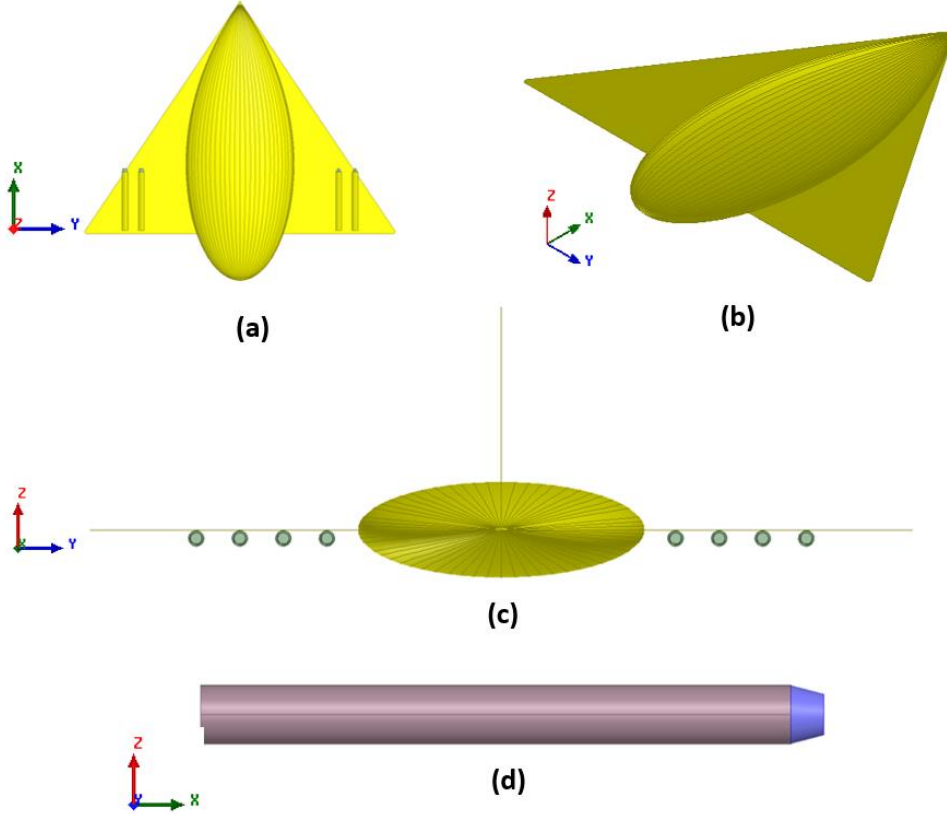
Şekil 4. 12: 9 GHz’de Açık uçlu konik küre modelinin yatay (HH) ve dikey (VV) monostatik RKA sonuçları.

Frekans arttıkça, yatay (HH) ve dikey (VV) polarizasyon için de RKA değerlerinin  $\phi = 0^\circ$ ’de arttığı görülmekte ama,  $\phi = 90^\circ$  olduğunda yatay (HH) ve dikey (VV) polarizasyon için RKA değerinin çok fazla değişmediği görülmektedir. Konik küre modelinin düşük frekansta açık uç, boşluk kısmının yatay yada dikey polarizasyonda RKA üzerinde bir etkisinin olmadığı farkedilmiştir. Frekans yükseldikçe, gelen düzlemsel dalgaların  $\phi = 100^\circ$  ve sonrasında yatay ve dikey polarizasyon RKA

salınım değerlerinin birbirine yaklaştığı ancak boşluksuz konik küre modeli kadar birbirlerine yaklaşmadığı görülmüştür.

#### 4.2.4 Kanatlı badem modelinin analizi

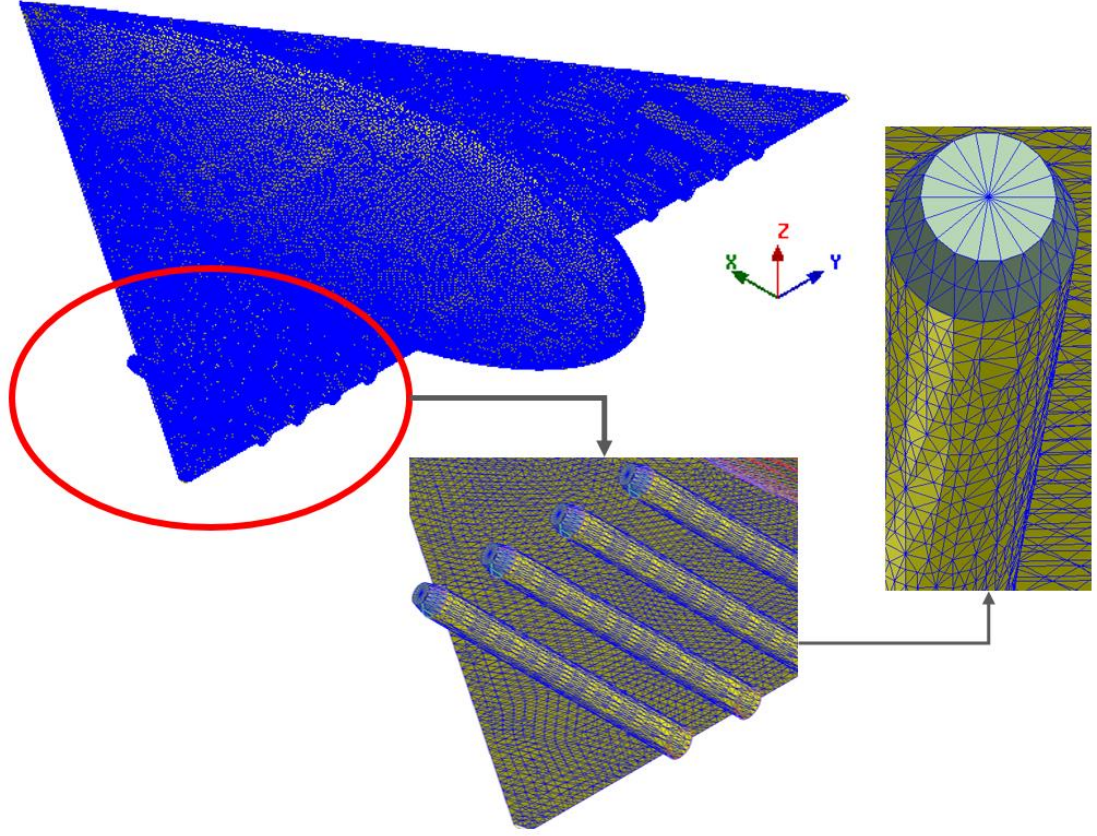
Bu kısımda, bir önceki bölümde anlatılan badem modelinin uçan hedefe benzemesi için, üçgen yapılar eklenerek mühimmatsız (keşif) İHA, silindir ve koni geometrileri eklenerek de 3B mühimmat modeli (keşif ve taaruz) oluşturulmuştur (Şekil 4.13).



Şekil 4. 13: Kanatlı badem ve mühimmat modeli (a)2 mühimmat için alttan bakış, (b)mühimmatsız durum için sağ alttan bakış, (c)toplam mühimmat için önden bakış, (d)basit modellenen mühimmata yandan bakış.

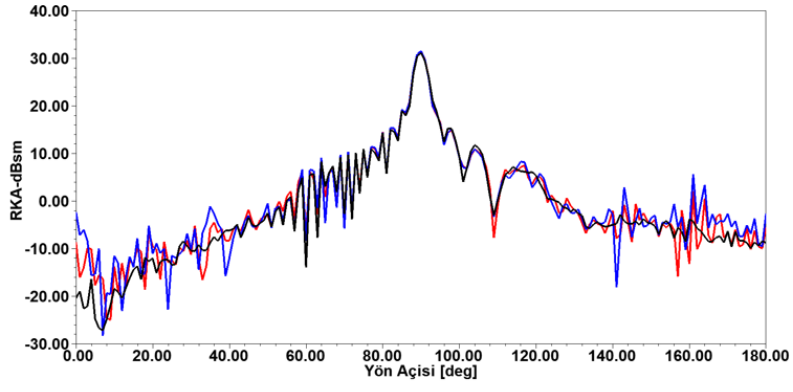
Şekil 4.13’de verilen kanatlı badem modelinin kanat açıklığı 9 m, uzunluğu ise 7 m’dir. Mühimmat olarak birçok savaş uçağı ve İHA’larda kullanılan AGM-114 mühimmatı bu kısım için ilk olarak basit modellenmiştir. Sayısal modellenen sadeleştirilmiş modelin toplam uzunluğu 1.59 m, silindir yapının çapı ise 0.13 m’dir [41].

Sayısal modellenen mükemmel iletken uçan hedefin, benzetim çalışmalarında dikey (VV) polarizasyonda düzlemsel dalga modellenmiştir. Hedefin çözüm ağ yapısı Şekil 4.14’de gösterilmiştir.

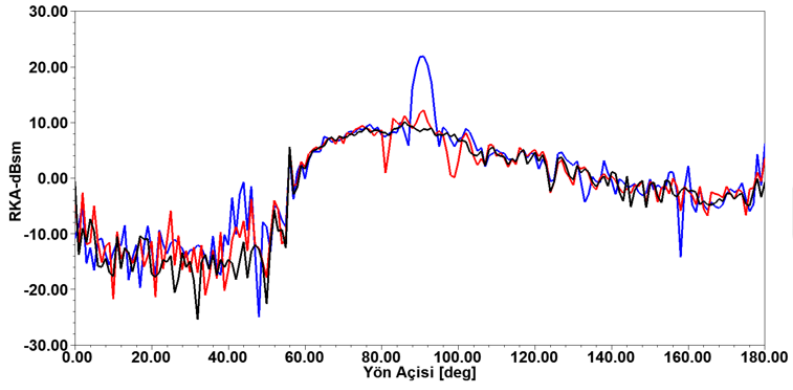


Şekil 4. 14: 8 Mühimmatlı kanatlı badem modelinin 112620 üçgen elemanlı çözüm ağı (mesh) yapısı.

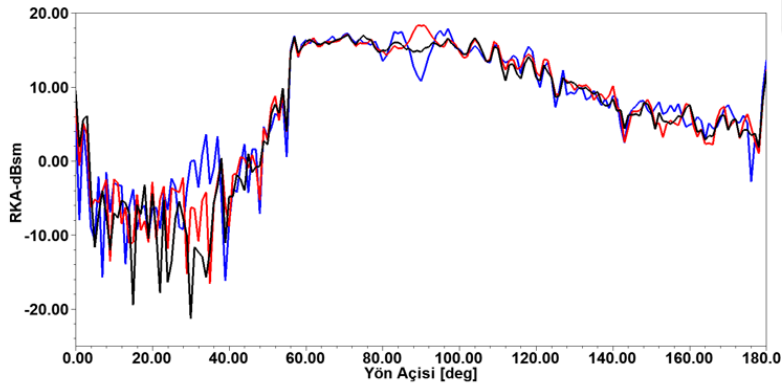
Hedefe, yandan bakacak şekilde birer derecelik aralıklarla düzlemsel dalga yollanmıştır. Monostatik RKA için,  $\theta = 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$  ve  $\varphi = 0^\circ - 180^\circ$  arasında değişen 180 adet düzlem dalga çözülmüştür. Polarizasyon  $\theta$  yönündedir, hedef dikey monostatik RKA için hesaplanmıştır.



(a)

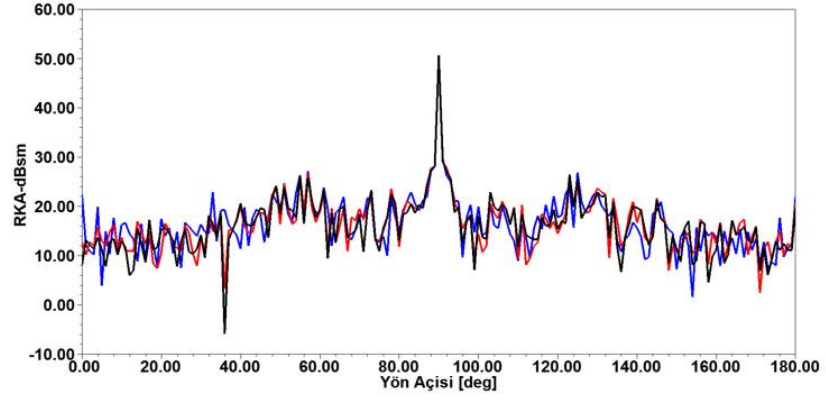


(b)

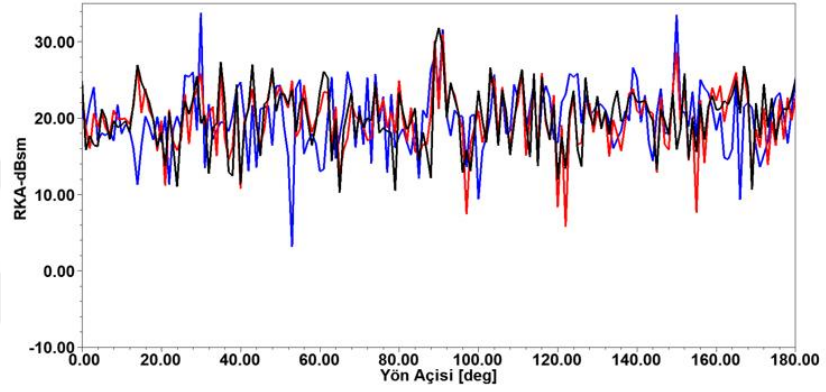


(c)

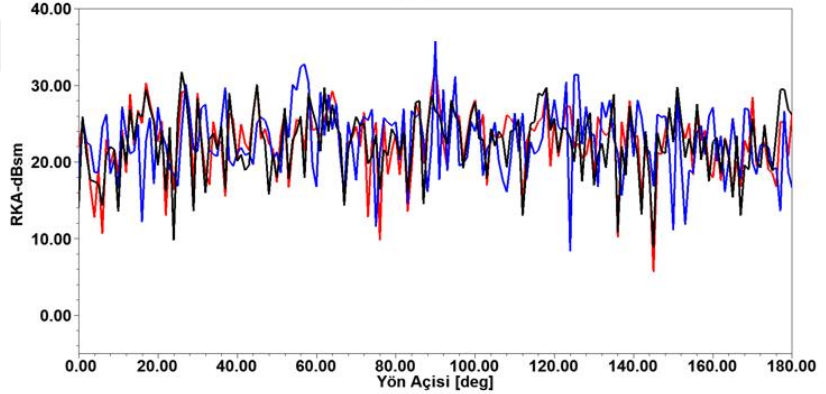
Şekil 4. 15: Kanatlı badem modelinin mühimmatlı ve mühimmatsız durumlardaki (a) $\theta = 90^\circ$ , (b) $\theta = 120^\circ$ , (c) $\theta = 150^\circ$  1 GHz RKA sonuçları.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4. 16: Kanatlı badem modelinin 9 GHz’deki mühimmatlı ve mühimmatsız durumlardaki (a) $\theta = 90^\circ$ , (b) $\theta = 120^\circ$ , (c) $\theta = 150^\circ$  RKA sonuçları.

Hedefin kaynağın uzak alan bölgesinde olduğu kabul edilmektedir. Bu yüzden, Ansys HFSS’de RKA problemi için anten modellenmesine gerek yoktur. Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da siyah renk hedefte mühimmat olmadığı durumu, kırmızı renk hedefte toplam 4 adet mühimmat olduğu durumu, mavi renk ise hedefte toplam 8 adet mühimmat olduğu durumları temsil etmektedir.

Benzetim çalışmalarında tüm geometriler için  $\varphi = 0^\circ - 180^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$ ,  $\theta = 120^\circ$ ,  $\theta = 150^\circ$  için düzlem dalga uyarımı yapılmıştır.

Frekans arttıkça, mühimmat ve mühimmatsız kanatlı badem modeli için de genel anlamda RKA'nın arttığını söyleyebiliriz. Bu artış mühimmat sayısı ile doğrudan orantılıdır.

Şekil 4.15 (b)'de  $\theta = 120^\circ$  ve  $\phi = 90^\circ$  olduğu açıda, 8 mühimmatlı hedefin RKA değerinin diğer  $\theta$  açılara göre daha net arttığı görülmektedir. Bu artışın etkisinin frekans arttıkça azaldığı görülmüştür.

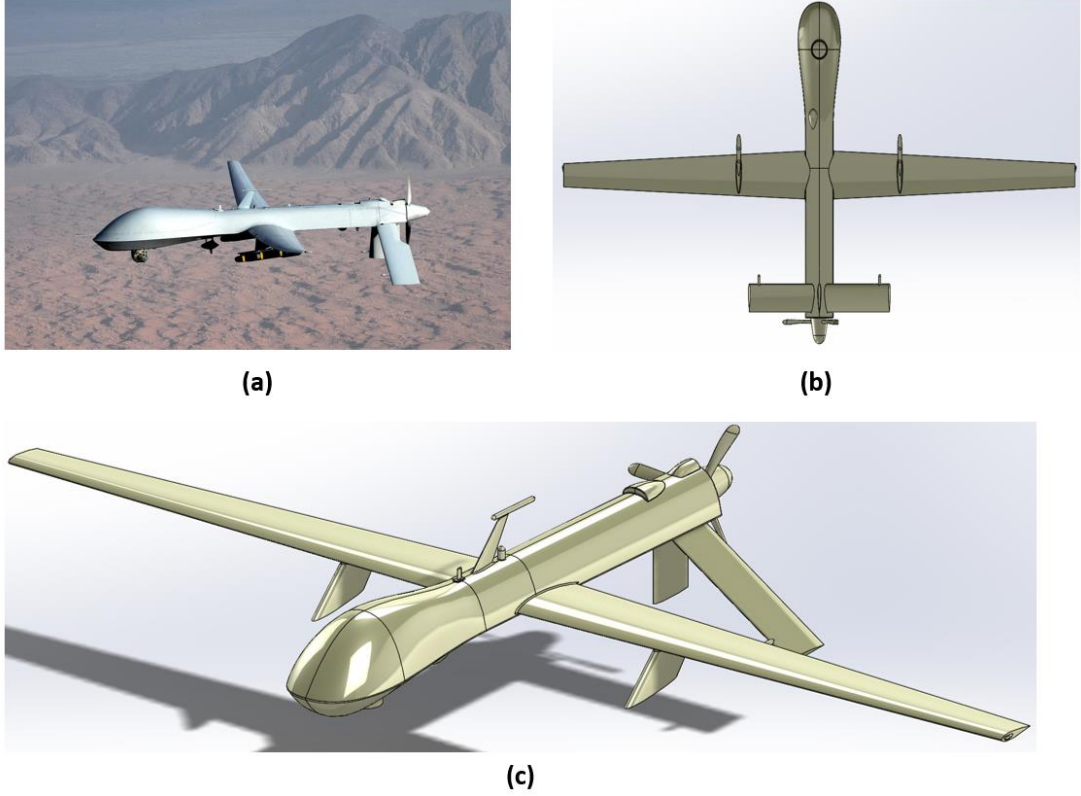
Şekil 4.15 (a)'de  $\theta = 90^\circ$  ve  $\phi = 90^\circ$  olduğu açıda, mühimmatlı ve mühimmatsız hedefin RKA değerlerinin birbirlerine yakın çıkmasının nedeni hedefe gelen düzensel dalganın dik bir şekilde geldiğinden dolayı mühimmatların yüzey alanlarının farkının sonuca yansımamasından kaynaklanmaktadır. Bu açı arttıkça, Şekil 4.15 (b) ve Şekil 4.15 (c)'de görüldüğü gibi mühimmatın etkisi düşük frekansta da belli olmaktadır.

Şekil 4.16 (b) ve (c)'de görüldüğü gibi yüksek frekansta  $\theta$ 'nın artışının RKA salınım eğrilerinin birbirlerine yaklaştığı görülmektedir. Bunun sonucunda, mühimmatlı ve mühimmatsız durumun  $\phi = 90^\circ$ 'de hedefin RKA'sına olan etkisi daha net görülmektedir.

### 4.3 İnsansız Hava Araçlarının Analizi

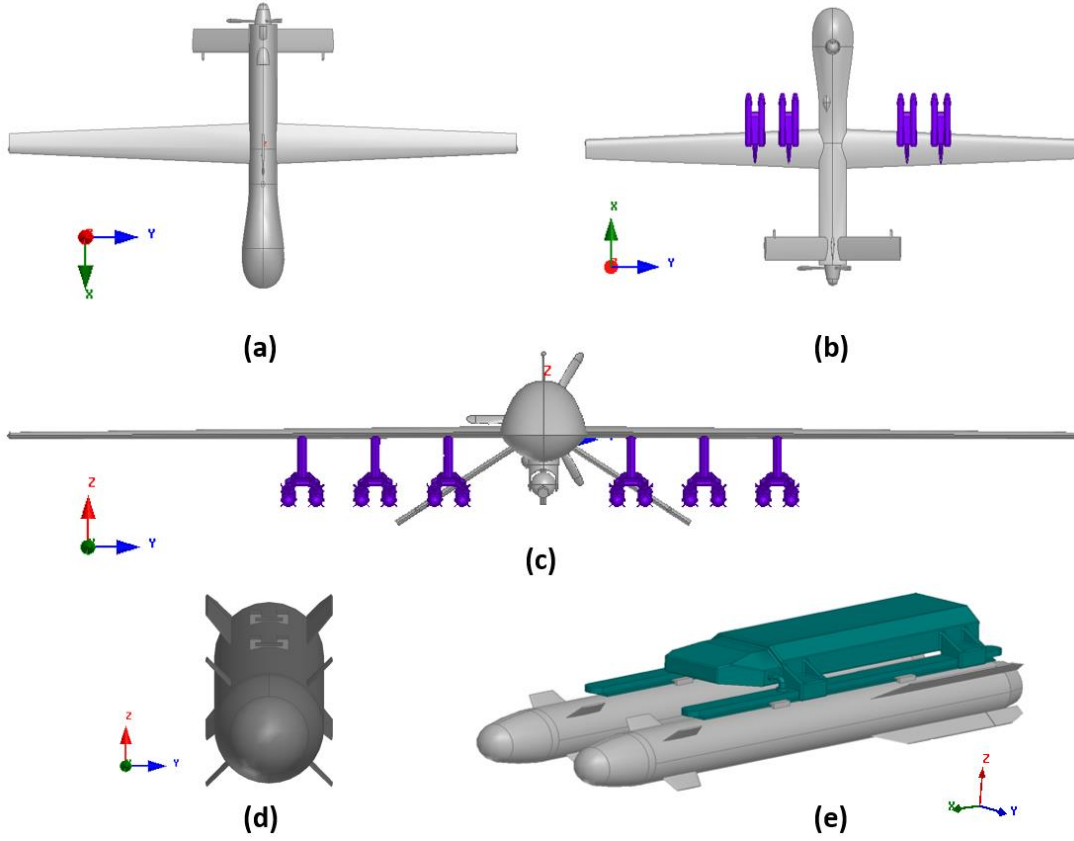
#### 4.3.1 Model tasarımı

İlk uçuşunu 1994 yılında yapmış [42], ABD, Birleşik Krallık, İtalya ve ülkemizin de envanterinde bulunan MQ-1B insansız hava aracı (İHA), sayısal ortamda 3B modellenmiştir (Şekil 4.17). MQ-1B modelinin seçilmesinde, bu modelin tasarım özelliklerinin açık kaynak şeklinde ulaşılabilmesi önemli rol oynamaktadır [43].



Şekil 4. 17: MQ-1B İHA modelinin (a)keşif uçuşu esnasında çekilmiş bir resim, (b)modellenmiş geometrinin alttan, (c)modellenmiş geometrinin genel görünüşü.

Şekil 4.18’de benzetim çalışmaları için kullanılan MQ-1B ve muhimmat (AGM-114 ve fırlatma rampası) modellerinin ana hat geometrisinin son halini göstermektedir.



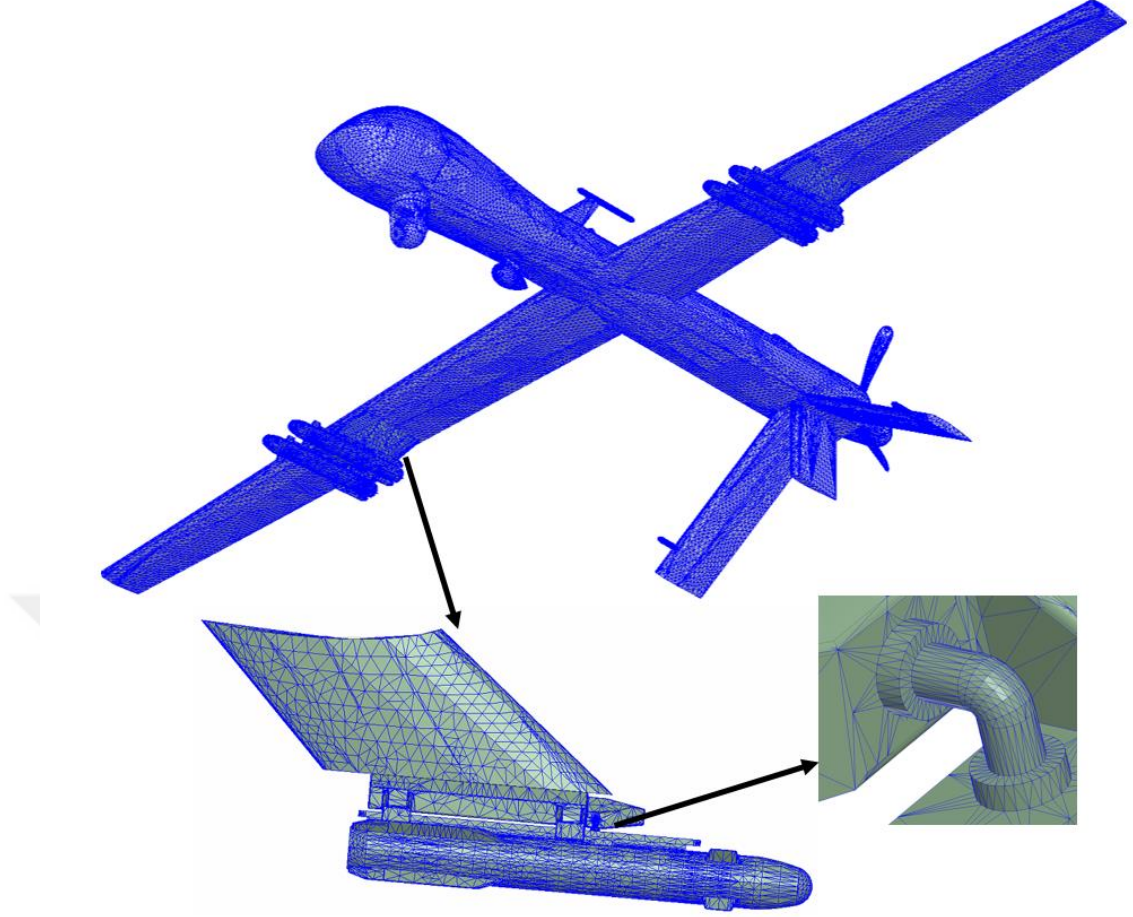
Şekil 4. 18: MQ-1B ve mühimmat modelinin (a)üstten, (b)alttan, (c)önden , (d)mühimmatın önden, (e)mühimmat ve fırlatma rampasının yandan görünüşü.

MQ-1B'nin kanat açıklığı 14.58 m, uzunluğu 8.2 m ve geri çekilen iniş takımı ile birlikte toplam yüksekliği 1.17 m'dir [43]. AGM-114'ün toplam uzunluğu 1.59 m, silindirik gövdenin çapı 0.13m'dir [41]. Önceki kısımlarda olduğu gibi, hedefin kaynağın uzak alan bölgesinde olduğu kabul edildiği için RKA çözümlerinde anten modellenmesine ihtiyaç duyulmaz.

#### 4.3.2 Mühimmatlı ve mühimmatsız insansız hava araçlarının analizi

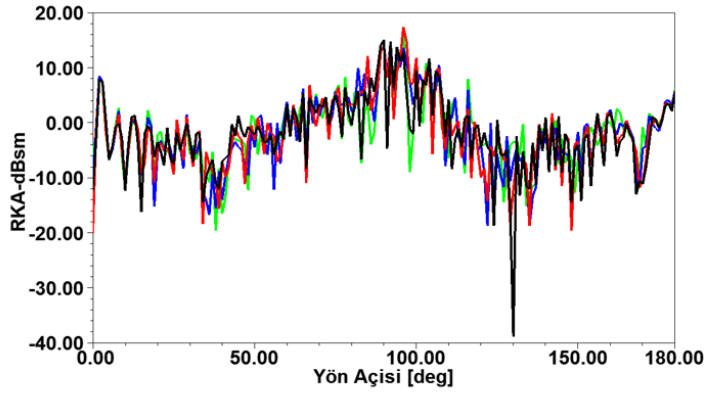
Sayısal modellenen mükemmel iletken İHA modelinin, benzetim çalışmalarında dikey (VV) polarizasyonda düzlemsel dalga modellenmiştir. Hedefin çözüm ağ (mesh) yapısı Şekil 4.19'da gösterilmiştir.



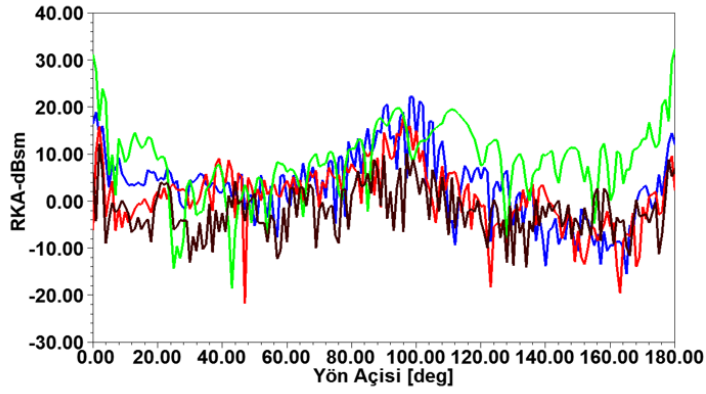


Şekil 4. 19: Ansys HFSS’de modellenen hedefin 1216356 elemanlı çözüm ağı (mesh) yapısı.

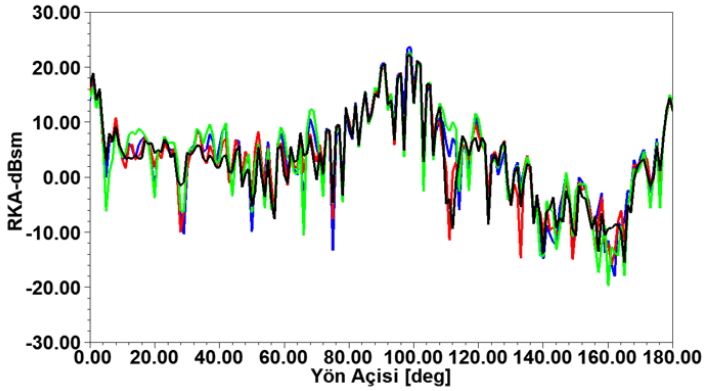
Hedefe, yandan bakacak şekilde birer derecelik aralıklarla düzlemsel dalga yollanmıştır. Monostatik RKA için,  $\theta = 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$  ve  $\varphi = 0^\circ - 180^\circ$  arasında değişen 180 adet düzlem dalga çözülmüştür. Polarizasyon  $\theta$  yönündedir, hedef dikey monostatik RKA için 1 GHz için hesaplanmıştır.



(a)



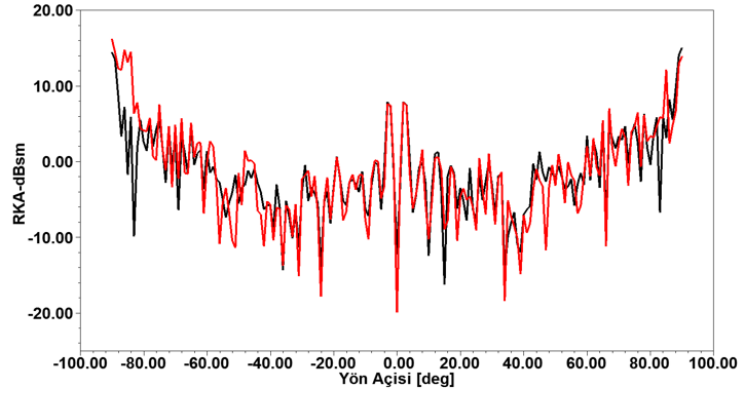
(b)



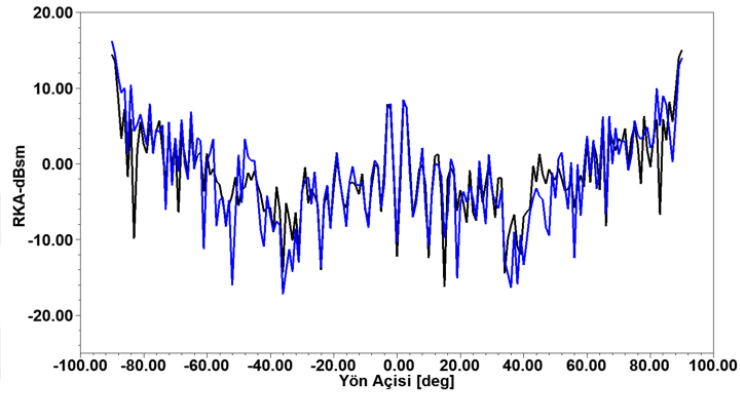
(c)

Şekil 4. 20: MQ-1B modelinin mühimmatlı ve mühimmatsız durumlardaki (a) $\theta = 90^\circ$ , (b) $\theta = 120^\circ$ , (c) $\theta = 150^\circ$  1 GHz RKA sonuçları.

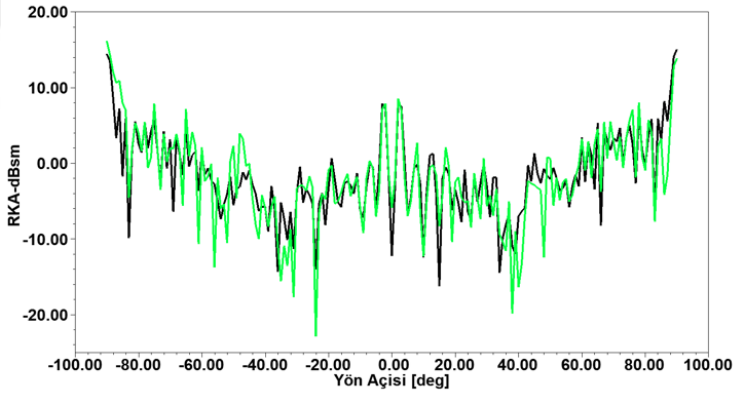
Şekil 4.21’de ise hedefe, önden bakacak şekilde birer derecelik aralıklarla düzlemsel dalga yollanmıştır. Monostatik RKA için,  $\theta = 90^\circ$  ve  $\varphi = -90^\circ, 90^\circ$  arasında değişen 180 adet düzlem dalga çözülmüştür. Hedef dikey monostatik RKA için 1 GHz için hesaplanmıştır.



(a)



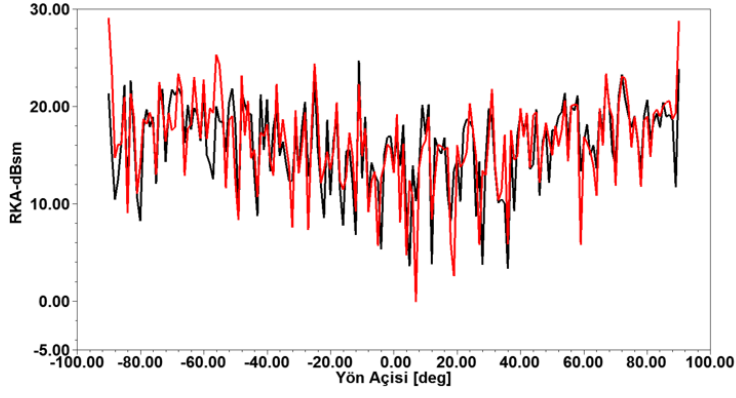
(b)



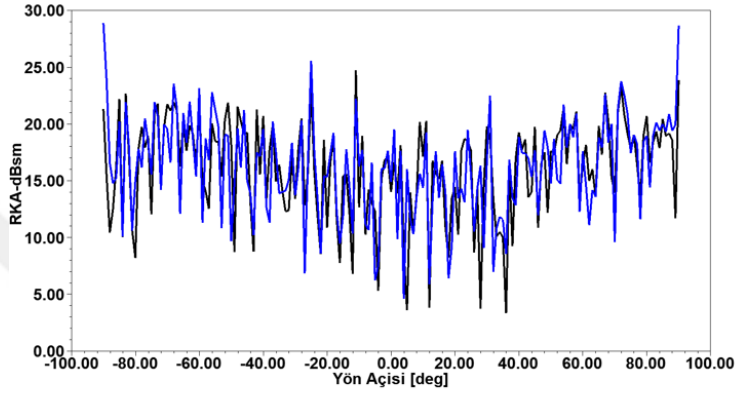
(c)

Şekil 4. 21: MQ-1B modelinin 1 GHz için (a)4 mühimmatlı ve mühimmatsız ,(b) 8 mühimmatlı ve mühimmatsız, (c)12 mühimmatlı ve mühimmatsız durumlardaki RKA sonucu.

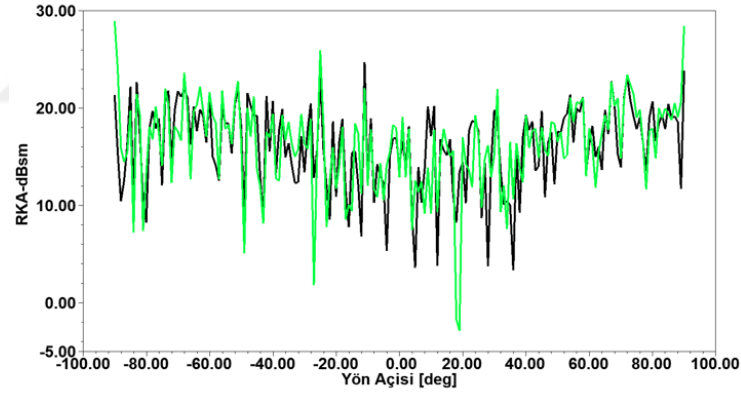
Şekil 4.22’de ise hedefe, önden bakacak şekilde birer derecelik aralıklarla düzlemsel dalga yollanmıştır. Monostatik RKA için,  $\theta = 90^\circ$  ve  $\varphi = -90^\circ, 90^\circ$  arasında değişen 180 adet düzlem dalga çözülmüştür. Hedef dikey monostatik RKA için 9 GHz için hesaplanmıştır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4. 22: MQ-1B modelinin 9 GHz için (a)4 mühimmatlı ve mühimmatsız ,(b)8 mühimmatlı ve mühimmatsız, (c)12 mühimmatlı ve mühimmatsız durumlardaki RKA sonucu.

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada ilk olarak genel radar terminolojisi incelendi, bu çalışmanın da konusu olan Radar Kesit Alanı, radar saçılma yüzeyleri, Radar Kesit Alanını etkileyen parametreler, karmaşık hedeflerin saçılım türleri anlatılmış ve özellikleri belirtilmiştir. Radar Kesit Alanı analizinde kullanılan sayısal yöntemlere değinilmiş ve bu yöntemlerden olan Fiziksel Optik yöntemi açıklanmıştır.

Fiziksel Optik yöntemi, Radar Kesit Alanı incelenecek hedefi üçgen parçacıklara böler. Bölünmüş üçgen yüzeylerden yansıyan ve saçılan alanları birleştirilerek, Radar Kesit Alanı değeri elde edilmiştir. Fiziksel Optik yöntemi, özellikle Yüksek Frekans bölgesinde uçak, tank, gemi gibi büyük hedeflerin yüzeylerinden saçılan alanların hesabında kullanılan bir yöntemdir.

Bu çalışmada dairesel, kare, üçgen levha gibi basit hedefler Fiziksel Optik yöntemine göre düzgün ve pürüzsüz yüzeylerden saçılan alanların analitik olarak çözülebileceği gösterilmiştir. Analitik olarak doğru hesaplanmış sonuçlarla, Fiziksel Optik çözücüsü kullanarak Ansys HFSS'de sayısal hesaplanan sonuçlar karşılaştırılmış ve sonuçların birbirine çok yakın çıktığı gözlenmiştir.

Daha karmaşık ve analitik olarak hesaplanması çok zor olan, badem, konik küre gibi daha karmaşık hedefler Ansys HFSS'de sayısal ortamda üç boyutlu modellenerek, Radar Kesit Alanlarının, frekansa, polarizasyona ve açığa bağlı değişimi incelenmiştir.

Oldukça karmaşık gözükten uçak ve insansız hava araçları gibi radar hedefleri silindir, koni, üçgen, badem, ve dikdörtgen yüzeyler gibi basit yapıların bir araya gelmesiyle oluşur. İncelenen basit ve karmaşık modeller bir araya getirilerek oluşturulan kanatlı badem modeli ve mühimmat üç boyutlu modellenmiştir. Ansys HFSS yardımıyla, mühimmatın farklı frekans, polarizasyon ve açığa bağlı olarak Radar Kesit Alanına olan etkisini görmek için sayısal ortamda benzetim çalışmaları yapılmıştır.

MQ-1B insansız hava aracı ve AGM-114 mühimmatı üç boyutlu gerçeğe oldukça yakın modellenmiş ve mühimmat sayısının, hedefe gelen dalganın yönü, polarizasyon ve farklı frekansların Radar Kesit Alanına olan etkisi Sayısal ortamda incelenmiştir.

Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de de görüldüğü gibi frekans değeri yükseldikçe maksimum Radar Kesit Alanı değerlerinde artış gözlenmektedir. Mühimmat sayısının artışının Radar Kesit Alanına olan etkisi ise düşük frekanslarda daha net gözükmemektedir.



## KAYNAKLAR

- [1] **URL-1** [https://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_radar](https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_radar) Alındığı tarih: 06.03.2016.
- [2] **Merrill, I. S.**, (2001). Introduction to radar systems. *Mc Grow-Hill*.
- [3] **Dybdal, R. B.**, (1987). Radar cross section measurements. *Proceedings of the IEEE*, 75(4), 498-516.
- [4] **Blacksmith, P., Hiatt, R. E., & Mack, R. B.**, (1965). Introduction to radar cross-section measurements. *Proceedings of the IEEE*, 53(8), 901-920.
- [5] **Knott, E. F., Shaeffer, J. F., & Tuley, M. T.**, (1985). Radar Cross Section. Dedham, Ma: Artech House.
- [6] **Knott, E. F.**, (2012). *Radar cross section measurements*. Springer Science & Business Media.
- [7] **Knott, E. F., Shaeffer, J. F., & Tuley, M. T.**, (2004). Radar Cross Section. The SciTech Radar and Defense Series. *SciTech Publishing Inc*, 7(1), 83.
- [8] **Jenn, D. C.**, (1995). Radar and laser cross section engineering (Book). *Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 1995*.
- [9] **Ulusik, C., Cakir, G., Cakir, M., & Sevgi, L.**, (2008). Radar cross section (RCS) modeling and simulation, part 1: a tutorial review of definitions, strategies, and canonical examples. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 50(1).
- [10] **Mafhaza, B. R., & Elsherbeni, A. Z.**, (2004). MATLAB Simulation for Radar System Design.
- [11] **Stupfel, B.**, (2015). Implementation of High-Order Impedance Boundary Conditions in Some Integral Equation Formulations. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63(4), 1658-1668.
- [12] **Gorji, A. B., Janalizadeh, R. C., & Zakeri, B.**, (2013). RCS computation of a relatively small complex structure by asymptotic analysis. In *Electromagnetic Theory (EMTS), Proceedings of 2013 URSI International Symposium on* (pp. 1066-1069). IEEE.
- [13] **Song, J., Lu, C. C., & Chew, W. C.**, (1997). Multilevel fast multipole algorithm for electromagnetic scattering by large complex objects. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 45(10), 1488-1493.
- [14] **Taflove, A., & Umashankar, K. R.**, (1990). The finite-difference time-domain method for numerical modeling of electromagnetic wave interactions. *Electromagnetics*, 10(1-2), 105-126.

- [15] Yuan, X., Lynch, D. R., & Strohbehn, J. W., (1990). Coupling of finite element and moment methods for electromagnetic scattering from inhomogeneous objects. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 38(3), 386-393.
- [16] Harrington, R. F., & Harrington, J. L., (1996). *Field computation by moment methods*. Oxford University Press.
- [17] Liu, Q. H., (1997). The PSTD algorithm: A time-domain method requiring only two cells per wavelength. *Microwave and optical technology letters*, 15(3), 158-165.
- [18] Keller, J. B., & Keller, H. B., (1950). Determination of reflected and transmitted fields by geometrical optics. *JOSA*, 40(1), 48-52.
- [19] Deschamps, G. A., (1972). Ray techniques in electromagnetics. *Proceedings of the IEEE*, 60(9), 1022-1035.
- [20] Ling, H., Chou, R. C., & Lee, S. W., (1989). Shooting and bouncing rays: Calculating the RCS of an arbitrarily shaped cavity. *IEEE Transactions on Antennas and propagation*, 37(2), 194-205.
- [21] Obelleiro, F., Taboada, J. M., Landesa, L., & Castro, I. T., (2002). Synthesis of array antennas onboard complex platforms considering coupling effects by means of a hybrid MM-PO technique. *Microwave and Optical Technology Letters*, 33(3), 207-212.
- [22] Klement, D., Preissner, J., & Stein, V., (1988). Special problems in applying the physical optics method for backscatter computations of complicated objects. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 36(2), 228-237.
- [23] Johansen, P. M., & Breinbjerg, O., (1995). An exact line integral representation of the physical optics scattered field: The case of a perfectly conducting polyhedral structure illuminated by electric Hertzian dipoles. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 43(7), 689-696.
- [24] Gordon, W. B., (1975). Far-field approximations to the Kirchoff-Helmholtz representations of scattered fields. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 23(4), 590-592.
- [25] Bölükbaş, D., & Ergin, A. A., (2005). A radon transform interpretation of the physical optics integral. *Microwave and optical technology letters*, 44(3), 284-288.
- [26] Alves, R. R., Dias, M. H., & Santos, J. C., (2013). Radar cross section of simple objects in the presence of an infinite conducting plane. In *Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC), 2013 SBMO/IEEE MTT-S International* (pp. 1-4). IEEE.
- [27] Alves, M. A., Port, R. J., & Rezende, M. C., (2007). Simulations of the radar cross section of a stealth aircraft. In *Microwave and Optoelectronics Conference, 2007. IMOC 2007. SBMO/IEEE MTT-S International* (pp. 409-412). IEEE.



- [28] **Alves, M. A., Peixoto, G. G., & Rezende, M. C.,** (2007). Simulations of the radar cross section of a generic air-to-air missile coated with radar absorbing materials. In *Microwave and Optoelectronics Conference, 2007. IMOC 2007. SBMO/IEEE MTT-S International* (pp. 603-606). IEEE.
- [29] **Altın, N., & Yazgan, E.,** (2009) The calculation of back scattering field of unmanned air vehicle. In: *Progress in Electromagnetics Research Symposium on*, (pp. 23-27).
- [30] **Ryapolov, I., Sukharevsky, O., & Vasilets, V.,** (2014). Radar cross-section calculation for unmanned aerial vehicle. In *Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET), 2014 International Conference on* (pp. 258-261). IEEE.
- [31] **URL-2** <http://www.efieldsolutions.com/> Alındığı tarih: 19.04.2016.
- [32] **URL-3** <http://www.radartutorial.eu/index.tr.html> Alındığı tarih: 03.05.2016.
- [33] **Eaves, J., & Reedy, E.,** (2012). *Principles of modern radar*. Springer Science & Business Media.
- [34] **Bechtel, M. E.,** (1965). Application of geometric diffraction theory to scattering from cones and disks. *Proceedings of the IEEE*, 53(8), 877-882.
- [35] **Skolnik, M.,** (2008). Radar handbook 3rd Ed.
- [36] **URL-4** [https://www.feko.info/product-detail/numerical\\_methods](https://www.feko.info/product-detail/numerical_methods) Alındığı tarih: 21.03.2017.
- [37] **Waddell, R. C.,** (1995). *Radar cross section synthesis of doubly curved surfaces* (Doctoral dissertation, Monterey, California. Naval Postgraduate School).
- [38] **Greenwood, A.,** (2001). *Electromagnetic code consortium benchmarks* (No. AFRL-DE-TR-2001-1086). Air Force Research Lab Kirtland AFB Nmdirected Energy Directorate.
- [39] **Dominek AK, Shamanski H, Wood R, Barger R.,** (1986) A useful test body. In: Proceedings of antenna measurement techniques association, Ottawa, Canada.
- [40] **Woo, A. C., Wang, H. T., Schuh, M. J., & Sanders, M. L.,** (1993). EM programmer's notebook-benchmark radar targets for the validation of computational electromagnetics programs. *IEEE. Antennas and Propagation Magazine*, 35(1), 84-89.
- [41] **URL-5** <http://www.army-technology.com/projects/hellfire-ii-missile/> Alındığı tarih: 12.11.2016.
- [42] **URL-6** [https://tr.wikipedia.org/wiki/MQ-1\\_Predator](https://tr.wikipedia.org/wiki/MQ-1_Predator) Alındığı tarih: 02.10.2016.
- [43] **Martin LC.,** (209) Airfield Planning and Design, Criteria for Unmanned Aircraft Systems (UAS), Engineering Technical Letter (ETL) 09-1, Department of the Air force.



## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Çağlayan Durlu  
**Uyruğu** : T. C  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 02.10.1989 ÇANKAYA  
**E-posta** : cdurlu@etu.edu.tr

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, Atılım Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2015-...	Kardinero Medikal Sistemler A.Ş.	AR-GE Mühendisi
2013-2015	Anova Proje ve Mühendislik A.Ş	Proje Mühendisi

### YABANCI DİL: İngilizce

### TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Durlu. Ç.,& Hayvacı H.**, 2016. Badem Modeli RKA Analizi, *SAVTEK'2016: 8. Savunma Teknolojileri Konferansı*, Ekim 12-14, Ankara, Türkiye.
- **Durlu. Ç.,& Hayvacı H.**, (2017). Monostatic RCS Analysis for Urmad and Unarmed UAV. In *Antennas and Propagation (APSURSI), 2017 IEEE International Symposium on* (pp.?-?).IEEE