

**MAKİNE ÖĞRENME TABANLI TERS YAPAY AÇIKLIKLI  
RADAR TEKNİĞİ İLE KARMAŞIK HEDEFLERİN  
GÖRÜNTÜLENMESİ**

**IMAGING OF COMPLEX TARGETS BY MACHINE  
LEARNING BASED INVERSE SYNTHETIC APERTURE  
RADAR TECHNIQUE**

**GÜLCE EKEN**

**PROF. DR. ÖZLEM ÖZGÜN**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim - Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

olarak hazırlanmıştır

Haziran 2023

## ÖZET

# MAKİNE ÖĞRENME TABANLI TERS YAPAY AÇIKLIKLI RADAR TEKNİĞİ İLE KARMAŞIK HEDEFLERİN GÖRÜNTÜLENMESİ

**Gülce Eken**

**Yüksek Lisans, Elektrik-Elektronik Mühendisliği**

**Danışman: Prof. Dr. ÖZLEM ÖZGÜN**

**Haziran 2023, 90 sayfa**

Radar sistemleri ile karmaşık hedefler görüntülenirken, bu sistemler çevresel bir etken olan gürültüden oldukça etkilenir ve yüksek çözünürlüklü görüntüler veremez. Bu duruma bir çözüm sunmak amaçlı, iyi bir sinyal işleme tekniği olan Ters Yapay Açıklıklı Radar (TYAR) ve derin öğrenme tabanlı bir yapı olan Evrişimsel Sinir Ağları (ESA) bir arada kullanılmıştır. Bu sayede geleneksel TYAR görüntüleme yöntemlerinin sahip olduğu, zaman veri yetersizliği gibi problemlerin aşılması amaçlanmıştır. Elektromanyetik dalga ile aydınlatılan 7 farklı karmaşık hedeften X bandını (8-12 GHz) kapsayacak şekilde, farklı açı ve polarizasyonda toplam 400 adet geri saçılan elektrik alan bilgisi ANSYS HFSS programı kullanılarak toplanmıştır. Bu veriler MATLAB ile işlenerek hem saçılma merkezi ile TYAR görüntüleri oluşturulmuş, hem de menzil-Doppler yardımı ile ESA yapısı için giriş görüntü verisi olarak kullanılmıştır. ESA yapıları hem gürültü sorununu aşmak hem de çözünürlük iyileştirmek üzere eğitilmiştir. 21 katman ve 11 katmandan oluşan iki farklı ESA yapısı kurulmuş ve bunlar gürültü sorunu çözmek amaçlı karşılaştırılmıştır. Daha sonra saçılma merkezi çıkartılarak yeniden oluşturulan görüntüler ve çıkartılmamış halindeki görüntüler bu yapılar kullanılarak karşılaştırılmıştır. Son olarak bu görüntüler çözünürlük problemini çözmek için rasgele örneklenerek bozulmuş ve eğitim sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu

yapılan üç farklı test sonucunda ESA yapıları başarılı görüntü sonuçları vermiş ve gelecek çalışmalarda da az veri ile etkili sonuçlar alınabileceğini göstermiştir.

**Keywords:** TYAR, ESA, RKA, Radar Görüntüleme, MATLAB, ANSYS HFSS

## **ABSTRACT**

### **IMAGING OF COMPLEX TARGETS BY MACHINE LEARNING BASED INVERSE SYNTHETIC APERTURE RADAR TECHNIQUE**

**Gülce Eken**

**Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. ÖZLEM ÖZGÜN**

**Haziran 2023, 90 pages**

When imaging complex targets with radar systems, these systems are highly affected by environmental noise and cannot provide high resolution images. In order to provide a solution to this situation, a combination of Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR), which is a good signal processing technique, and Convolutional Neural Networks (CNN), a deep learning based structure, are used. In this way, it is aimed to overcome the problems of traditional TYAR imaging methods such as lack of time and data. A total of 400 backscattered electric field data is collected from 7 different complex targets illuminated by electromagnetic waves at different angles and polarizations covering the X band (8-12 GHz) using ANSYS HFSS software. These data are processed with MATLAB to create ISAR images with the scattering center and used as input image data for the CNN structure with the help of range-Doppler. The CNN structures are trained to overcome the noise problem and to improve the resolution. Two different CNN structures consisting of 21 layers and 11 layers are built and compared to solve the noise problem. Then, the reconstructed images with the scattering center and the unconstructed images are compared using these structures. Finally, these images are randomly sampled and distorted to solve the resolution problem and the training results are compared. As a result of these three different tests, CNN structures

yielded successful image results and demonstrated that effective results can be obtained with less data in future studies.

**Keywords:** ISAR, CNN, RCS, Radar Imaging, MATLAB, ANSYS HFSS

## TEŞEKKÜR

Tüm yüksek lisans hayatım boyunca bana destek veren ve tez sürecimin en başından en sonuna kadar bana yol gösteren Sayın Prof. Dr. Özlem ÖZGÜN'e bütün içtenliğimle teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Her an yanımda olan sevgili aileme, kız kardeşlerim Özge EKEN ve Sinem DEMİRCİ'ye, tüm bu süreçte bana en büyük manevi desteği veren sevgili nişanlım Utku DEMİRCİ'ye sonsuz teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
KISALTMALAR .....	xii
SÖZLÜK.....	xiii
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Literatür Taraması .....	2
1.2. Tez Akışı .....	9
2. TEORİ .....	12
2.1. Radar Temelleri .....	12
2.1.1. Radar Denklemi .....	13
2.1.2. Elektromanyetik Saçılma .....	15
2.1.3. Radar Kesit Alanı (RKA) .....	17
2.1.4. Radar Frekansları .....	18
2.2. Ters Yapay Açıklıklı Radar (TYAR).....	19
2.2.1. Ters Yapay Açıklıklı Radar Görüntüleme .....	20
2.2.1.1. Dar Bant- Dar Açılı Yaklaşımı ile 2 Boyutlu TYAR Görüntüleme .....	22
2.2.2. Saçılma Merkezi ve TYAR .....	26
2.3. Derin Öğrenme Tabanlı Ters Yapay Açıklıklı Görüntüleme .....	28
2.3.1. Evrişimsel Sinir Ağları .....	29
2.3.1.1. Evrişim Katmanı.....	30
2.3.1.2. En Büyükleri Biriktirme (Max-Pooling) Katmanı .....	31
2.3.1.3. Transpoz Evrişim Katmanı.....	32
2.3.1.4. Aktifleştirme Fonksiyonu Katmanı .....	32

2.3.1.5. Çıkış Katmanı .....	33
2.3.1.6. Evrişimsel Sinir Ağları Eğitimi .....	33
3. SAYISAL DENEYLER .....	37
3.1. Veri Üretimi .....	37
3.1.1. Karmaşık Hedeflerin SIY Yöntemi ile RKA Analizi .....	39
3.2. Ters Yapay Açıklıklı Görüntü Oluşturma .....	51
3.2.1. F-16 Hedefinin $\theta = 90^\circ$ , $\phi = 135^\circ$ için Oluşturulan Benzetim Sonuçları	55
3.2.2. F-22 Hedefinin $\theta = 90^\circ$ , $\phi = 15^\circ$ için Oluşturulan Benzetim Sonuçları .	57
3.2.3. F-117 Hedefinin $\theta = 90^\circ$ , $\phi = 150^\circ$ için Oluşturulan Benzetim Sonuçları	59
3.2.4. EuroFighter Typhoon Hedefinin $\theta = 90^\circ$ , $\phi = 30^\circ$ için Oluşturulan Benzetim Sonuçları .....	61
3.2.5. Akıncı Hedefinin $\theta = 90^\circ$ , $\phi = 270^\circ$ için Oluşturulan Benzetim Sonuçları .....	63
3.2.6. Bayraktar TB2 Hedefinin $\theta = 90^\circ$ , $\phi = 90^\circ$ için Oluşturulan Benzetim Sonuçları .....	65
3.3. Evrişimsel Sinir Ağı Yapısı .....	67
3.4. Sayısal Sonuçlar .....	70
3.4.1. 21 Katman ve 11 Katmandan Oluşan ESA Yapılarının Gürültü Sorunu Sayısal Sonuçları .....	71
3.4.2. Saçılma Merkezi Görüntüleri Gürültü Sorunu Sayısal Sonuçları .....	73
3.4.3. TYAR ve Saçılma Merkezi ile Oluşturulmuş TYAR Çözünürlük Problemi Sayısal Sonuçları .....	75
3.4.4. Saçılma Merkezlerine Gürültü Eklenerek Elde Edilen Gürültü Problemi Sayısal Sonuçları .....	78
4. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	80



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 IEEE Radar Frekans Bantları .....	18
Çizelge 3.1 RKA benzetim açısı parametreleri $f = 8 \text{ GHz}$ , $\theta = 90^\circ$ , HH ve VV polarizasyon .....	41
Çizelge 3.2 RKA benzetim açısı parametreleri $f = 10 \text{ GHz}$ , $\theta = 90^\circ$ , HH ve VV polarizasyon .....	43
Çizelge 3.3 RKA benzetim açısı parametreleri $f = 12 \text{ GHz}$ , $\theta = 90^\circ$ , HH ve VV polarizasyon .....	46
Çizelge 3.4 RKA benzetim için frekans parametreleri .....	51
Çizelge 3.5 TYAR görüntüleme parametreleri .....	52
Çizelge 3.6 TYAR Benzetim Parametreleri (F-16) .....	55
Çizelge 3.7 TYAR Benzetim Parametreleri (F-22) .....	58
Çizelge 3.8 TYAR Benzetim Parametreleri (F-117) .....	60
Çizelge 3.9 TYAR Benzetim Parametreleri (EuroFighter Typhoon) .....	62
Çizelge 3.10 TYAR Benzetim Parametreleri (Akıncı) .....	64
Çizelge 3.11 TYAR Benzetim Parametreleri (Bayraktar TB2) .....	66
Çizelge 3.12 11 ve 21 katman eğitiminin nümerik sonuçları, Gauss gürültü varyansı $= 0,2$ .....	71
Çizelge 3.13 Saçılma merkezi görüntüleri eğitimin nümerik sonuçları, Gauss gürültü varyansı $= 0,2$ .....	73
Çizelge 3.14 TYAR ve Saçılma merkezi çıkartılan TYAR görüntülerinin çözünürlük eğitimi nümerik sonuçları, Gauss gürültü varyansı $= 0,2$ .....	75
Çizelge 3.15 Saçılma Merkezlerine Gürültü Eklenerek Elde Edilen Gürültü Problemi Sayısal Sonuçları .....	78

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	Basit radar sistemi.....	13
Şekil 2.2	Monostatik radar sistemi.....	13
Şekil 2.3	Bistatik radar sistemi.....	13
Şekil 2.4	Mükemmel iletken yüzeyden elektromanyetik saçılma .....	16
Şekil 2.5	(a) YAR sistemi (b) TYAR sistemi .....	20
Şekil 2.6	Monostatik 2 boyutlu TYAR geometrisi .....	20
Şekil 2.7	Dar bant- dar açı yaklaşımı ile TYAR veri toplama .....	22
Şekil 2.8	Karmaşık hedefin saçılma merkezi görüntülemesi .....	27
Şekil 2.9	Genel ESA yapısı .....	30
Şekil 2.10	Evrişim katmanı (a): Evrişim katmanı (b): Sıfır doldurmasız evrişim (c): Sıfır doldurmalı evrişim (d) Sıfır doldurmalı evrişim, adım sayısı:2 .....	31
Şekil 2.11	Transpoz evrişim işlemi örneği .....	32
Şekil 3.1	Seken ışın yöntemi geometrisi .....	38
Şekil 3.2	RKA Bilgisi Toplanan Hedefler (a) F-16, (b) F-117, (c) F-22, (d) F-5, (e) EuroFighter Typhoon, (f) Akıncı, (g) TB2 .....	40
Şekil 3.3	Hedeflerin aydınlatılma açıları (a) F-16 $\theta = 90^\circ$ , $\phi = 135^\circ$ (b) F-22 $\theta = 90^\circ$ , $\phi = 15^\circ$ (c) F-117 $\theta = 90^\circ$ , $\phi = 150^\circ$ (d) EuroFighter Typhoon $\theta = 90^\circ$ , $\phi = 30^\circ$ (e) Akıncı $\theta = 90^\circ$ , $\phi = 270^\circ$ (f) TB2 $\theta = 90^\circ$ , $\phi = 90^\circ$ .....	54
Şekil 3.4	(a) F-16 hedefinin $\theta = 90^\circ$ , $\phi = 135^\circ$ 2B TYAR görüntüsü (b) Saçılma merkezleri ile yeniden oluşturulmuş 2B TYAR görüntü (c) 300 adet saçılma merkezinin yerleri (d) Saçılma merkezi genlikleri ...	57
Şekil 3.5	(a) F-22 hedefinin $\theta = 90^\circ$ , $\phi = 15^\circ$ 2B TYAR görüntüsü (b) Saçılma merkezleri ile yeniden oluşturulmuş 2B TYAR görüntü (c) 300 adet saçılma merkezinin yerleri (d) Saçılma merkezi genlikleri .....	59

Şekil 3.6	(a) F-117 hedefinin $\theta = 90^\circ, \phi = 150^\circ$ 2B TYAR görüntüsü (b) Saçılma merkezleri ile yeniden oluşturulmuş 2B TYAR görüntü (c) 300 adet saçılma merkezinin yerleri (d) Saçılma merkezi genlikleri ...	61
Şekil 3.7	(a) EuroFighter Typhoon hedefinin $\theta = 90^\circ, \phi = 30^\circ$ 2B TYAR görüntüsü (b) Saçılma merkezleri ile yeniden oluşturulmuş 2B TYAR görüntü (c) 300 adet saçılma merkezinin yerleri (d) Saçılma merkezi genlikleri .....	63
Şekil 3.8	(a) Akıncı $\theta = 90^\circ, \phi = 270^\circ$ 2B TYAR görüntüsü (b) Saçılma merkezleri ile yeniden oluşturulmuş 2B TYAR görüntü (c) 300 adet saçılma merkezinin yerleri (d) Saçılma merkezi genlikleri .....	65
Şekil 3.9	(a) Bayraktar TB2 $\theta = 90^\circ, \phi = 90^\circ$ 2B TYAR görüntüsü (b) Saçılma merkezleri ile yeniden oluşturulmuş 2B TYAR görüntü (c) 300 adet saçılma merkezinin yerleri (d) Saçılma merkezi genlikleri ...	67
Şekil 3.10	21 katmandan oluşan ESA yapısı .....	68
Şekil 3.11	11 katmandan oluşan ESA yapısı .....	69
Şekil 3.12	Akıncı hedefi, $\phi = 0^\circ$ (a) MATLAB ile elde edilen TYAR referans görüntü, (b) Sisteme verilen gürültülü görüntü (c) 21 katman mini-örnek:2 (d) 21 katman mini-örnek:4 (e) 21 katman mini-örnek:16 (f) 11 katman mini-örnek:2 (g) 11 katman mini-örnek:4 (h) 11 katman mini-örnek:16 .....	72
Şekil 3.13	F-5 hedefi, $\phi = 210^\circ$ (a) MATLAB ile elde edilen saçılma merkezi TYAR referans görüntü, (b) Sisteme verilen gürültülü görüntü (c) 21 katman mini-örnek:2 (d) 21 katman mini-örnek:4 (e) 21 katman mini-örnek:16 .....	74
Şekil 3.14	EuroFighter Typhoon hedefi, $\phi = 2^\circ$ (a) MATLAB ile elde edilen saçılma merkezi TYAR referans görüntü, (b) Sisteme verilen düşük çözünürlük ve gürültülü görüntü (c) 21 katman mini-örnek:2 (d) 21 katman mini-örnek:4 (e) 21 katman mini-örnek:16 .....	76

Şekil 3.15	EuroFighter Typhoon hedefi, $\phi = 2^\circ$ (a) MATLAB ile elde edilen saçılma merkezi TYAR referans görüntü, (b) Sisteme verilen düşük çözünürlük ve gürültülü görüntü (c) 21 katman mini-örnek:2 (d) 21 katman mini-örnek:4 (e) 21 katman mini-örnek:16 .....	77
Şekil 3.16	(a) EuroFighter hedefinin $\theta = 90^\circ, \phi = 2^\circ$ Saçılma merkezleri ile yeniden oluşturulmuş 2B TYAR görüntüsü (b) Saçılma merkezlerine gürültü eklenerek yeniden oluşturulmuş 2B TYAR görüntü (c) 21 katman mini-örnek:4 (d) 21 katman mini-örnek:16 .....	79

## KISALTMALAR

<b>TYAR</b>	: Ters Yapay Açıklıklı Radar
<b>RKA</b>	: Radar Kesit Alanı
<b>MoM</b>	: Moment Metodu
<b>FDM</b>	: Sonlu Farklar Yöntemi
<b>FEM</b>	: Sonlu Eleman Yöntemi
<b>FO</b>	: Fiziksel Optik
<b>GO</b>	: Geometrik Optik
<b>GTD</b>	: Geometrik Kırınım Teorisi
<b>PTD</b>	: Fiziksel Kırınım Teorisi
<b>SBR</b>	: Seken Işın Yöntemi
<b>IEEE</b>	: Uluslararası Elektrik-Elektronik Mühendisleri Birliği
<b>VHF</b>	: Çok Yüksek Frekans
<b>UHF</b>	: Ultra Yüksek Frekans
<b>FT</b>	: Fourier Transform
<b>IFT</b>	: Ters Fourier Transform
<b>IFFT</b>	: Ters Hızlı Fourier Dönüşümü
<b>DFFT</b>	: Ayrık Zamanlı Fourier Dönüşümü
<b>ESA</b>	: Evrişimsel Sinir Ağları
<b>RD</b>	: Menzil Doppler
<b>MSE</b>	: Ortalama Kare Hata
<b>MAE</b>	: Ortalama Mutlak Hata
<b>PSNR</b>	: Tepe Sinyal Gürültü Oranı

## SÖZLÜK

<b>Convolutional Neural Network</b>	: Evrişimsel Sinir Ağları
<b>Max Pooling</b>	: En Büyükleri Biriktirme
<b>Mini Batch</b>	: Mini-Örnek
<b>Convolution Layer</b>	: Evrişim Katmanı
<b>Transpose Convolution Layer</b>	: Transpoz Evrişim Katmanı
<b>Activation Function</b>	: Aktifleştirme Fonksiyonu
<b>Stride</b>	: Adım

# 1. GİRİŞ

Radar sistemleri, kısaltması Radyo Tespit ve Mesafe Belirleme (Radio Detection and Ranging (RADAR)) olan ve belirli bir mesafedeki hedefleri ve yerlerini tespit etme konusunda oldukça başarılı ölçümler yapabilen sistemlerdir. Bu başarılı ölçümlerin sebebi, sistemlerin mesafe bağımlılığı olmadan yalnızca bant genişliği, dalga boyu ve radar-hedef arasındaki göreceli harekete bağlı olmasıdır. Ayrıca radar sistemleri optik, kızılötesi gibi geleneksel görüntüleme yöntemlerinin aksine elektromanyetik dalgalar ile bulut sis gibi engelleri aşabildiği için tüm hava koşullarında çalışabilen sistemlerdir. Radar sistemleri, alıcı anten, verici anten, sinyal işleme bölümü ve görüntüleme ekranından oluşur. Belirli zaman aralıklarında elektromanyetik sinyaller gönderen radar sistemleri anten ışını içindeki alanı aydınlatır. Aydınlatılan bölgeden geri gelen sinyallerden hedef hakkında istenilen bilgiler elde edilir [1].

II. Dünya Savaşı sırasında gelişen bu sistemler, günümüzde havacılık, savunma sanayii, meteoroloji gibi çok çeşitli alanlarda farklı görevler için de geliştirilmiş olup yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde en karmaşık görevlerden biri olan hedef görüntüleme konusunda radar sistemleri etkin olarak kullanılmaya başlanmıştır. Elektromanyetik dalga ile aydınlatılan bir hedeften geri dönen sinyallerin toplanması ve işlenmesi yoluyla oluşturulan radar görüntüleri, menzil ve yanca olmak üzere iki eksen üzerinde oluşturulur. Menzil radarın görüş hattındaki boyutu iken, yanca bu hatta dik olan boyut olarak tanımlanır. Görüntünün kalitesi ise görüntü çözünürlüğü olarak tanımlanır ve iki saçıcı arasındaki çözülebilen en küçük mesafe olarak bilinir. Menzil çözünürlüğü sinyalin bant genişliği ile belirlenirken, yanca çözünürlük geniş anten açıklıkları ile mümkün olur. Bu sebeple Yapay Açıklıklı Radar (YAR) ve Ters Yapay Açıklıklı Radar (TYAR) görüntüleme sistemleri geliştirilmiştir. Hedefin hareketli radar sisteminin sabit olduğu sistemler TYAR sistemleridir ve sistemleri güçlü bir sinyal işleme tekniği olarak bilinir. Menzil-Doppler, parametrik ve parametrik olmayan tahmin algoritmaları, sıkıştırılmış algılama yöntemleri gibi geliştirilen birçok yöntem vardır. Bütün bu metotların ortak sorunu veri ve zamandır. Az veri ile etkili görüntü sonuçları almak adına günümüzde derin öğrenme yöntemleri hızla gelişmektedir.

Derin öğrenme yapılarından olan ve çok hızlı öğrenen yapılardan biri olan Evrişimsel Sinir Ağları (ESA), TYAR görüntü elde etme konusunda etkili olarak kullanılan bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır. Çok katmanlı evrişim yapıları sayesinde geriye dönük öğrenme işlemini gerçekleştiren bu sistemler ile çevresel etkenlerden biri olan gürültü probleminin sisteme öğretilerek ortadan kaldırılması, görüntü kalitesini artırmak adına çözünürlük problemlerinin üstesinden gelmesi sebebiyle tercih edilen yöntemlerden olmuştur [2].

Bu tez kapsamında gürültüden etkilenerek düşük kalitede TYAR görüntü veren radar sistemlerinin görüntülerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Bu doğrultuda derin öğrenme yapısı olan ESA yapıları kullanılmıştır. Bu amaç doğrultusunda öncelikle çeşitli karmaşık hedeflerden Radar Kesit Alanı (RKA) bilgisi ANSYS HFSS programı kullanılarak elde edilmiş ve bu veriler ESA yapıları için giriş verisi olmuştur. Bu veriler ile eğitilen ESA yapılarının sonuçlarında görüntü iyileştirmesi amaçlanmıştır.

## **1.1. Literatür Taraması**

Ters Yapay Açıklı Radar (TYAR) görüntünün oluşturulması için öncelikle hedef elektromanyetik dalga ile aydınlatılır daha sonra cisim üzerinden geri saçılan alan bilgisi toplanır. Cisimlerden geri saçılan alan bilgisi Radar Kesit Alanı (RKA) ile ifade edilir. RKA bilgisi elde etmek için Moment Metodu (MoM), Maxwell denklemlerini frekans ve zaman alanında çözen Sonlu Farklar Yöntemi (FDM) ve kısmi diferansiyel denklemlerle sınır değer problemler için kullanılan Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) gibi yöntemler düşük frekans durumlarında kullanılabilen nümerik yöntemlerdir. Uçak gemi gibi karmaşık yapıları ve yüksek frekans gerektiren durumları analiz etmek için bu yöntemler hesaplama yükü nedeniyle yetersiz kalmaktadır. Bu durumlar için Fiziksel Optik (PO), Geometrik Optik (GO), Geometrik Kırınım Teorisi (GTD), Fiziksel Kırınım Teorisi (PTD) ve Seken Işın Yöntemi (SBR) gibi yöntemler geliştirilmiştir [3].

Ters Yapay Açıklı Radar (TYAR) görüntü elde etme konusunda çeşitli yöntemler vardır. Bu yöntemlerden en temel olanı menzil-Doppler yöntemidir. Bu teknik, hedef üzerinde alınan referans noktasında her bir geri saçılan alanın nokta ve Doppler frekansının gözlem süresi boyunca sabit olduğu prensibine dayanır. Geri saçılan noktalar için Ters Hızlı



Fourier Dönüşümü (IFFT) uygulanarak TYAR görüntüsü elde edilir. Hedefin doğrusal yörüngede hareket ettiği ve açı değişiminin çok küçük olduğu durumlarda bu yöntem etkili olur. Bu yöntem ile hedefin hareketli olmadığı varsayıldığı için uzun menzillerde yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilmez [4]. Bu sorunu aşmak için geliştirilen algoritmalarından biri Geri Projeksiyon (Back Projection) algoritmasıdır. Bu yöntem, menzil görüntüsü elde etme konusunda menzil-Doppler ile aynı olsa da azimut açısında görüntü elde konusunda farklılık gösterir. Bu yöntemde zaman hizalaması ve piksel ile radar arasındaki menzildeki gecikmeyi hesaplamaya odaklanarak görüntüleme işlemini gerçekleştirilir [5]. Geri Projeksiyon algoritması, TYAR problemine IFFT ve Ayrık Zamanlı Fourier Dönüşümü (DTFT) yaklaşımları ile uygulandığında, yöntemin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. IFFT, giriş matrisinin her bir satırına uygulandığında hesaplama süresi hızlanırken, görüş açısı arttıkça daha iyi sonuçlar alındığı görülmüştür. DTFT uygulandığında ise hem Fourier dönüşümü hem de enterpolasyon yöntemleri kullanıldığı için hesaplama zamanının uzun olduğu, görüş açısı arttıkça FFT yöntemine göre daha iyi sonuçlar alındığı görülmüştür [6]. Hareketli karmaşık hedefler için geleneksel menzil-Doppler yöntemlerinde doğrudan Fourier Dönüşümü kullanmak yerine, Menzil Anlık Doppler (Range Instantaneous Doppler - RID) tabanlı yöntemler tercih edilmektedir. RID algoritmaları parametrik ve parametrik olmayan yaklaşımlar olarak iki grup altında toplanır [7]. Parametrik yaklaşımlarda her bir saçılan alanı tahmin etmek gerekir. Örneğin manevra yapan hedeflerde çapraz menzil ölçekleme ile daha iyi görüntü elde etmek için faz katsayıları tahminine ve saçıcı eşleştirmesine ihtiyaç vardır. Yapılan parametrik yaklaşımlı çalışmada hedefin ilk dönüş hızı tahmin edilerek RID yöntemi ile üretilen anlık TYAR görüntünün, parametreleri tahmin etmek için zaman ve rotasyon hızı arasında yaklaşık bir doğrusal ilişki elde edilerek, iyi bir görüntü elde edildiği ortaya konmuştur [8],[9]. Parametrik yaklaşımların dezavantajı hesaplama yükünün fazla olmasıdır. Parametrik olmayan yaklaşımlarda ise, Fourier Dönüşümü yerine zaman-frekans dönüşümünün yapıldığı Zaman-Frekans Tabanlı (Time-Frequency Domain - TFD) yöntemler kullanılır. Bu yöntemlerde hareket telafisi (motion compensation) algoritmalarını uygulamadan yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilir [10]. TFD yöntemi de lineer ve lineer olmayan yöntemler olarak ikiye ayrılır. Lineer olanlara örnek olarak; sinyalleri zaman alanında parçalara ayırarak Fourier dönüşümü uygulanan Kısa Zaman Fourier

Dönüşümü (Short Time Fourier Transform - STFT) verilebilir. STFT sabit bir çözünürlük ile sınırlandırılmışken, Sürekli Dalga Dönüşümü (Continuous Wavelet Transform - CWT) yöntemi çoklu çözünürlük elde edebilen bir zaman frekans yöntemidir. Bu yöntem de doğrusal yöntemler arasında gösterilir [11],[12]. Doğrusal yöntemlere bir başka örnek olarak Kısa Süreli Yinelemeli Uyarlamalı Yaklaşım (Short Time Iterative Adaptive Approach - STIAA) verilebilir. Belirli bir frekans aralığındaki hedef sinyalin kullanılarak yüksek çözünürlüklü zaman-frekans alanına dönüştürülmesi ve çapraz terim girişiminin engellenmesi yoluyla zaman-frekans çözünürlüğünün azaltılmasıyla daha yüksek çözünürlüklü bir görüntü elde edilir [13]. Doğrusal olmayan yöntemlerden biri WignerVille dağılımıdır (WVD). Bu yöntem zaman bağımlı bir otokorelasyon fonksiyonu ile kullanılır. Bu yöntem, çapraz terim girişiminden etkilenmesi sebebiyle genelde yetersiz kalmaktadır. Başka bir doğrusal olmayan yöntem ise Cohen'in Sınıf Üyesi (Cohen's Class Member) yöntemidir. Bu yöntemde fonksiyonlar zamana bağlı oto korelasyon fonksiyonu ile konvolüsyon işlemi ile elde edilir ve böylece zaman-frekans dağılımları oluşturulur. Bu yöntem, çapraz terim girişimini azaltmak için kullanılan yöntemlerden biridir [14]. Fourier Dönüşümü algoritmalarının yanı sıra parametrik spektral tahmin algoritmaları olarak adlandırılan MUSIC, CLEAN, RELAX gibi yöntemler de literatürde mevcuttur. Saçılan alan bilgisi elde edilerek, FFT metotlarının çözemediği çözünürlük sorunlarının aşılması amaçlanmaktadır [15]. RELAX algoritması, hareket telafisi (motion compensation) algoritmaları uygulandıktan sonra geri saçılan alan bilgisi Doğrusal Frekans Modülasyon (Linear Frequency Modulation - LFM) sinyal ile modellenir ve parametreler tahmin edilir. Görüntü elde etmek için ise RID tekniği kullanılır. Son adımda FFT tabanlı bir RID tekniği kullanıldığından limitli bir görüntü elde edilir [16]. Frekans konumlarını tahmin etme mantığına dayanan MUSIC algoritması, en küçük kare tekniği ile uygulandığında süper çözünürlüklü bir görüntü ortaya koyar. Bu metotta gelen yankı sinyalleri tutarlı (coherent) olmalıdır. Fakat TYAR görüntüde geri saçılan sinyaller tutarlı değildir (incoherent) [17]. CLEAN algoritması ise geri saçılan alan bilgisini çıkartmada ve görüntü oluşturma konusunda etkili yöntemlerden bir diğeridir. N'inci adımdaki artık görüntü ile (N-1)'inci adımdaki artık görüntüden en yüksek saçılma merkezinin çıkartılmış haline eşittir mantığına dayanır. Saçılma merkezleri çıkartıldıktan sonra FFT yardımı ile

yüksek çözünürlüklü görüntüler oluşturulabilir [18]. Parametrik algoritmalarda, tahmin edilecek saçılan alanların TYAR görüntü için belirlenmesi gerektiği ve bu durumun zaman açısından maliyetli olduğu ve yüksek çözünürlüklü görüntü elde etme konusunda sorunlara neden olabileceği göz önünde bulundurulduğunda, Sıkıştırılmış Algılama (SA) (compressed sensing) algoritması etkili bir alternatif yöntem olarak ortaya çıkmaktadır. Bu yöntem TYAR görüntüsünün Fourier alanındaki TYAR verilerinin seyrek bir temsili olduğu mantığına dayanır [19]. Bu seyrek görüntü yüksek sıkıştırma yöntemi ile zaman-frekans sözlüğü oluşturularak ağırlıklandırılmış bir  $l_1$  optimizasyon problemi çözülerek saçılma merkezlerinin genlik ve konum bilgileri bulunur. Bu çalışmada hem gecikme zamanı/menzil hem de Doppler/çapraz menzil alanında yüksek çözünürlük elde edildiği görülmüştür [20]. Başka bir çalışmada ise elde edilen sinyal sadece frekans/yavaş zaman alanında eksik veri olarak yorumlanmış ve SA süper-çözünmüş TYAR görüntüsünü yeniden yapılandırmak için kullanıldığında yüksek çözünürlüklü görüntü elde edilmiştir [21]. Parametrik spektral tahmin algoritmalarından olan MUSIC algoritması ile hata oranları karşılaştırıldığında Sıkıştırılmış Algılama yönteminin daha iyi sonuç verdiği görülmüştür [22]. Gerçek hayattaki gürültü etkilerini azaltmak için yetersiz kalan algoritmaların üstesinden gelmek amacıyla Sıkıştırılmış Algılama algoritmasına dayalı, seyrekliğe dayalı bir optimizasyon problemi çözme yaklaşımı olan Bayesian Sıkıştırılmış Algılama algoritmasıyla görüntüleme işlemi etkili bir şekilde geliştirilmiştir. Bu amaçla, faz ayarını gerçekleştirmek için iki aşamalı bir ön işleme adımı geliştirilmiştir Gerçek hayattaki gürültü etkilerini azaltmak için yetersiz kalan algoritmaların Sıkıştırılmış Algılama algoritma ile üstesinden gelmek amacıyla, seyrekliğe dayalı bir optimizasyon problemi çözme temeline dayalı Bayesian Sıkıştırılmış Algılama algoritması ile görüntülemenin etkili bir şekilde geliştirmek için faz ayarı için iki adımlı bir ön işleme geliştirilmiştir [23].  $l_0$  norm optimizasyonu kullanılarak oluşturulan Menzil-Doppler Sıkıştırılmış Algılama (Range Doppler Compressed Sensing - RD-CS) algoritması, TYAR görüntüyü uzaysal frekans alanına yansıtarak sinyali frekans/yavaş zaman alanında tahmin etmek için kullanılmış ve yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilmiştir optimizasyonu uygulanarak oluşturulan menzil-Doppler Sıkıştırılmış Algılama (RD-CS) algoritması ile TYAR görüntüyü uzaysal frekans alanına geri yansıtarak sinyali frekans/yavaş zaman alanında tahmin edilmiş ve iyi çözünürlüklü görüntüler elde edilmiştir

[24]. Yukarıda bahsedilen çalışmalara benzer şekilde Sıkıştırılmış Algılama yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışmada, sinyal-gürültü oranı ve görüntü kontrastı gibi metriklerle performans değerlendirmesi yapılmıştır. Eksik verilere uygulanan SA tabanlı algoritmanın, tam verilere uygulanan geleneksel menzil-Doppler yöntemine göre daha iyi bir performans sergilediği tespit edilmiştir [25]. Tüm bu çalışmaların ortak sonucu olarak, Sıkıştırılmış Algılama yöntemi kullanılarak sınırlı sıkıştırılmış veri ile depolama alanının azaltılabileceği ve iyi bir görüntü kalitesinin elde edilebileceği görülmektedir. Bu yöntemler, geleneksel menzil-Doppler ve parametrik spektral tahmin algoritmaları gibi yöntemlerle karşılaştırıldığında, görüntü kalitesi açısından olumlu sonuçlar ortaya koymaktadır [26]. Sıkıştırılmış Algılama yöntemleri birçok sorunu aşabilmiş olsa da zaman ve veri konusunda yetersiz kalmıştır. Özellikle gerçek hayat uygulamalarında Sıkıştırılmış Algılama yöntemlerinin yeterli olmadığı görülmüştür. Teknoloji ilerledikçe ve ihtiyaç arttıkça bu yetersizlikleri aşmak için ve daha iyi sonuçlar almak adına derin öğrenme metotları kullanılmaya başlanmıştır. TYAR görüntü için bütün metotlarda eksik olan ortak noktalardan biri de veri elde etme olduğu için derin öğrenme yöntemleri bu sorunu da aşmayı amaçlamaktadır.

Derin öğrenme yöntemleri, seyrek ters saçılma problemlerini çözmek için Yinelemeli Büzülme Eşikleme Algoritması (Iterative Shrinkage Thresholding Algorithm - ISTA) yardımı ile geliştirilmeye başlanmıştır. Daha sonra bu metot yaklaşık mesaj geçirme algoritması ile genişletilmiş ve çeşitli aktivasyon fonksiyonları kullanılarak kapsamlı bir çalışma yapılmıştır. Derin sinir ağlarının doğrusal olmayan eşmelere yaklaşma yeteneğinden yola çıkarak, görüntü oluşumunda derin öğrenmenin kullanımı faz belirsizliklerini ele almak ve yüksek kaliteli görüntü elde etmek için derin öğrenme ve yinelemeli büzülme eşikleme ağ mimarisi oluşturulmuştur [27]. Yinelemeli büzülme eşikleme algoritması Evrimsel Sinir Ağları (ESA) ile kullanıldığında, (CNN-ISTA) ağ parametreleri öğrenme yeteneğine sahip olduğu için manuel tanıma ihtiyaç duymadan yüksek çözünürlüklü görüntüler verdiği görülmüştür. Eğitim veri seti oluşturmak için menzil ( $N_r$ ) değeri 1024, çapraz-menizil ( $N_a$ ) is 2048 olarak seçilmiş, ölçüm matrisi  $\Phi = \mathcal{F}\mathcal{H}$  olarak tanımlanmıştır.  $\mathcal{F} \in C^{m \times n}$  Fourier dönüşüm matrisi ve  $\mathcal{H} \in C^{m \times n}$  örnekleme matrisidir. Sonuçları karşılaştırma ölçütü olarak tam veri RD görüntüleme sonucunu referans

alan bağıl kök ortalama kare hatası (Root Mean Square Error - RMSE), entropi (ENT) ve Tepe Sinyal Gürültü Oranı (Peak Signal to Noise Ratio - PSNR) kullanılmıştır [28]. Evrişimli Yinelemeli Büzülme Eşikleme Algoritması (Convolution Iterative Shrinkage Thresholding - CIST) yöntemini kullanıldığı bir başka çalışmada ise eşik değeri, adım boyutu gibi temel parametreler iteratif süreçler boyunca uçtan uca öğrenilmiştir. Evrişim katmanında doğrusal olmayan seyrek dönüşüm kullanılmış ve iterasyonlar yoluyla güncellenmiştir. Evrişim katmanında negatif sayıları da dahil eden zayıf doğrusal birim kullanılarak etkili sonuçlar elde edilmiştir. Bir önceki çalışmaya benzer şekilde elde edilen eğitim verileri normalize ortalama kare hata (Normalized Mean Square Error - NMSE), yanlış alarm (False Alarm - FA), görüntü entropisi (ENT), hedef-kargaşa oranı (Target-to-Clutter Ratio - TCR) ile test edilmiş ve sıkıştırılmış algılama (SA) yöntemleri ile bu sonuçlar karşılaştırılmıştır [29]. Evrişimsel Sinir Ağları yöntemlerinde yinelemeli algoritmalar etkili sonuçlar verse de hesaplama yükü getirdiği için, yinelemesiz yöntemler geliştirilmiştir. Bu yinelemesiz yapılar görüntülerdeki gürültü problemi [30], [31], ters evrişim problemi [32] gibi problemlerde etkili olarak kullanılmaktadır. Geliştirilen yapılardan biri paralel bir yapıya sahip olan U-net adı verilen sistemdir. Bu sistemler genişleyen yol ve daralan yol olmak üzere iki kısımdan oluşur. Bu yapılar ilk olarak biyomedikal görüntüler ile test edilmiş ve görüntü segmentasyonu alanında da Evrişimsel Sinir Ağlarının etkili olduğu görülmüştür [33]. Evrişimsel Sinir Ağı metotları görüntü sınıflandırma işlerinde yaygın olarak kullanılırken, U-net yapılarının gelişmesiyle görüntü iyileştirme, görüntü regresyonu gibi konularda da kullanılabileceği ortaya konmuştur. Yapılan çalışmada, U-net tabanlı geliştirilen ESA ile görüntü regresyonu alanında da kullanılabileceği gösterilmiştir [34]. U-net konusunda yapılan güncel çalışmalardan birinde, klasik yinelemeli yapılar yerine eşleşme fonksiyonu kullanılarak öğretim amaçlanmış ve bu ön bilgilere dayanarak doğrusal olmayan sıkıştırılmış algılama için U-net mimarisi kullanılmıştır. Bu mimarinin avantajı daha az eğitim verisine ihtiyaç duymasıdır. Ayrıca yüksek görüntü kalitesini bozan gürültü, yankı gibi problemleri ortadan kaldırabildiği görülmüştür. Bu çalışmada klasik mimariyi geliştirmek için giriş kanalı sayısı artırma, veriyi normalize etme, atlama bağlantıları gibi değişiklikler yapılmıştır. TYAR için giriş verisi ters Fourier dönüşümü ile elde edilerek bu veri ham veri olarak kullanılmıştır. Bu veriler, radardan geri saçılan yankı verileri olup bir azimut

açısında nokta saçıcının uzak alan geri saçılımını toplayarak elde edilmiştir. Sistemin performansı Tepe Sinyal Gürültü Oranı (PSNR), Ortalama Kare Hata (MSE) ve entropi değerleri ölçülerek test edilmiştir [35]. Bağlanım için geliştirilen bir ESA modelinde ise, 5 katmanlı bir yapı kullanılmış, bu yapı evrişim katmanları, en büyükleri biriktirme (max-pooling), kaydırma adımı (stride) ve tam evrişim katmanlarından kurulmuştur. Kurulan yapı bağlanım için eğitilmiş ve hem zaman hem görüntü açısından iyi sonuçlar elde edilmiştir [36]. Yüksek görüntü kalitesi elde etmek için kurulan ESA yapısında 20 katman kullanılmış, her bir katman 64 tane filtre ile tanımlanmış ve yapı ortalama kare hata (MSE) ile eğitilmiştir. Eğitilen yapı yüksek çözünürlüklü evrişimsel sinir ağı ile karşılaştırılmıştır. Katman sayısı arttıkça sonuçların piksel bazlı daha iyi çözünürlük sonuçları verdiği anlaşılmıştır [37]. Geliştirilen bir başka Evrişimsel Sinir Ağı çeşidi olarak kompleks değerli evrişimsel sinir ağları (complex-valued CNN) etkili yapılardır. Bu mimarinin avantajı çok katmanlı yapıya sahip olması ve doğrusal olmayan işleme ile hedef görüntüyü çıkartabilmesidir. Bu yapılar daha az veriye ihtiyaç duyması bir başka avantajıdır. Toplam üç ayrı katmandan oluşan CV-CNN yapısı kompleks evrişim katmanı, kompleks en büyükleri biriktirme ve kompleks dekonvolüsyon katmanlarını içerir. Giriş verisi olarak menzil-Doppler yöntemi ile elde edilmiş görüntüler kullanılmış hata ölçütü olarak yanlış alarm (FA), görüntü kontrastı (Image Contrast - IC), bağıl kök ortalama kare hatası (RMSE) gibi ölçütler değerlendirilmiştir [38]. Kompleks değerli evrişimsel sinir ağları metodunun test edildiği bir başka çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak, sigmoid adı verilen bir aktivasyon fonksiyonu kullanılmış ve çıkış katmanında farklı bir yapı kullanılmıştır. Eğitim verisi elde etmek için ise geri saçılan elektromanyetik saçılma denklemi kullanılmış, saçılma katsayılarının koordinatları standart karmaşık Gauss dağılımı kullanılarak rastgele üretilmiştir. Yapılan bu değişiklikler ile daha etkili TYAR sonuçları elde edilmiştir [39]. Tam Evrişimli Sinir Ağı (Fully Convolutional Neural Network-FCNN) mimarisi bir başka TYAR görüntü elde etme yöntemlerinden olup, etkili bir şekilde kullanılmaktadır. U-net yapısında olduğu gibi genişleyen ve daralan yol parçalarından oluşur. Oluşturulan FCNN çok aşamalı bir ayrıştırma ve çok kanallı filtreleme mimarisine sahiptir ve tam bağlı katmanları yoktur. Mevcut ESA tabanlı görüntüleme ağlarına kıyasla çok az sayıda eğitim örneği ile çalışması, bu sistemin en önemli avantajlarından biridir. Yapılan çalışmada giriş verisi olarak geleneksel menzil-Doppler

yöntemini kullanarak işleyerek bir başlangıç görüntüsü oluşturulmuş ve eğitim için toplam 700 veri kullanılmıştır. Bu sayı klasik metotlara kıyasla oldukça azdır. Sistemin verimliliği yanlış alarm (FA), görüntü kontrastı (IC), bağıl kök ortalama kare hatası (RMSE) değerleriyle ölçülmüştür [40]. CV-CNN yöntemlerinde her bir evrişim katmanında aynı ölçeklendirme yapılabilmesi sebebiyle, FCNN yapılarının soyut özellik çıkarma konusunda daha güçlü olduğu gözlemlenmiştir. ESA yapılarının kullanımı ve yaygınlaşmasındaki amaçlar, az veri kullanımı, daha iyi görüntü kalitesi ve hata oranlarını azaltarak sistemleri optimize etmektir. Bu tez kapsamında, bir başka ESA sistemi referans alınarak geliştirilmiştir. Giriş verisi olarak Fourier dönüşümü ile elde edilmiş menzil-Doppler yöntemi kullanılmıştır. Sistem, yanlış alarm (FA), görüntü kontrastı (IC) ve bağıl kök ortalama kare hatası (RMSE) kullanılarak test edilmiştir. Bu çalışma, az veri ile iyi sonuçlar elde edildiğini gösteren bir referans olarak kullanılmıştır [41].

## 1.2. Tez Akışı

Bölüm 1’de TYAR görüntüleme konusunda geliştirilen birçok yöntemden bahsedilmiştir. Bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajları incelenmiş ve en güncel olarak kullanılan yöntemlerin sonuçları incelenerek kapsamlı bir literatür araştırması sunulmuştur. Bölüm 2’de teori başlığı altında öncelikle radar temelleri ve hem monostatik hem bistatik radar sistemlerinin çalışma prensibi anlatılmıştır. Radar denklemi başlığında, radar denkleminin, radar çalışma prensibinin tüm matematiksel çıkarımından bahsedilmiş ve denklem detaylı olarak monostatik ve bistatik durumlar için incelenmiştir ve radar için maksimum menzil denklemi çıkartılmıştır. Radar çalışma prensibinden sonra bir başka önemli olgu olan elektromanyetik saçılma konusu anlatılmıştır. Fiziksel Optik (FO) yöntemine dayanarak bir yüzeyden geri saçılan elektromanyetik dalgaların elektrik alan denkleminin çıkarımı yapılmıştır. Bu olayın bir sonucu olarak çıkan Radar Kesit Alanı (RKA) konusundan ise bir sonraki bölümde denklemler aracılığı ile bahsedilmiştir. Burada bahsedilen RKA denklemleri radar görüntülemenin temelini oluşturmuştur. Daha sonra günümüzde kullanılan radar frekans bantları ve kullanım alanları verilmiştir. Tüm bu temel bilgiler sağlandıktan sonra Ters Yapay Açıklıklı Radar (TYAR) sistemlerinin gelişiminden ve nasıl görüntüleme

işlemini yapacağı konusundan bahsedilmiştir. Bu bölümde detaylı olarak matematiksel denklem çıkarımı yapılmış, dar bant dar açı yaklaşımı ile nasıl görüntüleme yapıldığı anlatılmıştır. TYAR görüntü için gereken tüm denklemler ve TYAR görüntülemenin detaylı aşamalarından burada bahsedilmiştir. Bir sonraki bölümde saçılma merkezleri çıkartılan bir hedefin nasıl TYAR görüntüsünün elde edileceği anlatılmış ve etkili yöntemlerden biri olan CLEAN algoritmasından bahsedilmiştir. Teori bölümünün son bölümünde ise derin öğrenme ile TYAR görüntüleme yönteminden bahsedilmiştir. Burada genel bir eğitim yapısı için çözülmesi gereken denklemler verilmiş ve Evrimsel Sinir Ağlarını oluşturan evrişim katmanı, en büyükleri biriktirme katmanı, transpoz evrişim katmanı, aktifleştirme fonksiyonu katmanı ve çıkış katmanının çalışma prensibi her katmanda nasıl bir işlem gerçekleştirildiği bilgilerine yer verilmiştir. Bu katmanları kullanarak oluşan ESA yapılarının eğitiminin nasıl yapıldığı ve eğitim sırasında kullanılan adam en iyileme algoritmasının matematiksel denklem çıkarımı ise bir sonraki bölümde aktarılmıştır. Bölüm 3'te sayısal deneyler genel başlığı altında öncelikle veri üretiminden bahsedilmiştir. ANSYS HFSS programında kullanılan Seken Işın Yönteminin matematiksel arka planı anlatılmış, daha sonra bu yöntem ile basit üç yüzlü ve küp cisimlerinin RKA analizi yapılmıştır. Daha sonra karmaşık cisimlerin RKA analizi yapılmış, hangi açı ve frekans aralığında RKA bilgilerinin toplandığı, hangi cisimlerin kullanıldığı bilgileri tablolar ile verilmiştir. Daha sonra bu verilerle TYAR görüntü oluşturma için kullanılmış olan parametreler verilmiş ve her bir cisim için farklı açı ve frekanslarda örnek benzetim sonuçları verilmiştir. Bu benzetim sonucu olarak hem RKA bilgi ile doğrudan elde edilen görüntü, hem CLEAN algoritması ile çıkartılan saçılma merkezi bilgisi sonucu yeniden oluşturulan görüntü, saçılma merkezi konumları ve genlikleri görselleri sunulmuştur. Daha sonraki bölümde çalışma kapsamında kullanılan ESA yapılarından bahsedilmiştir. Bu yapıların parametre bilgileri ve içerikleri verilmiştir. ESA eğitimlerinin MATLAB Deep Network Designer aracılığı ile yapıldığı, gürültü ve çözünürlük problemlerini çözmek için sisteme görüntülerin nasıl verildiği bu bölümde sunulmuştur. Son olarak bu bölümde elde edilen sayısal sonuçlar verilmiştir. Öncelikle çalışmada kullanılan 21 Katman ve 11 Katmandan oluşan ESA yapılarının gürültü sorunu sayısal sonuçları ve test edilmiş görsel sonuçları, saçılma merkezi ile elde edilen görüntülerin gürültü için sayısal sonuçları, daha sonra TYAR ve saçılma merkezi çıkartılmış TYAR

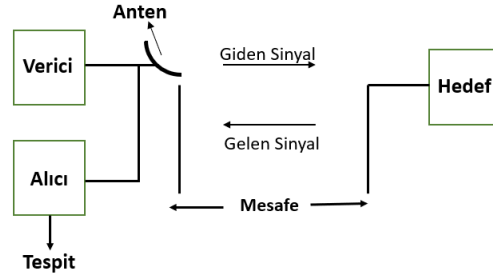


Çözünürlük problemi sayısal sonuçları ve test edilen hedeflerin görsel sonuçları sunulmuştur. Çalışmanın son bölümü olan bölüm 4'te, bölüm 3'te elde edilen sonuçlar amaç doğrultusunda yorumlanmıştır. Amaçlanan görüntü iyileştirme probleminin ESA yapılarının sonuçları değerlendirilmiştir. Son olarak, çalışmanın nasıl ilerletilebileceği hakkında fikirler sunularak tez çalışması sonlandırılmıştır.

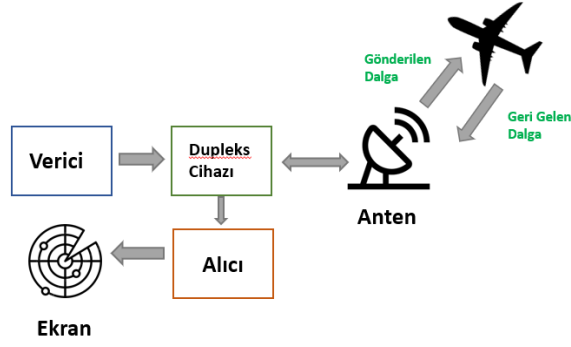
## 2. TEORİ

### 2.1. Radar Temelleri

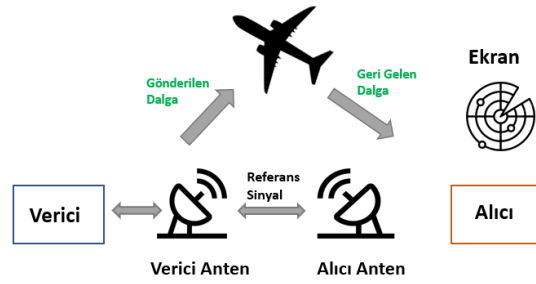
Radar sistemleri, nesnelere tespit etmek, görüntülemek ve yerlerini tayin edebilmek için kullanılan sistemlerdir. Çalışma prensibi, elektromanyetik dalgaları ortama ileterek geri yansıyan eko sinyali analiz etme yöntemine dayanır. Radar sistemleri en temel haliyle ürettiği elektromanyetik dalgayı ortama yayan verici anten ve hedefe çarpıp geri gelen bu dalgayı analiz etmek için alan bir alıcı antenden oluşur. Basit bir radar sistemi Şekil 2.1'de gösterildiği gibidir. Gönderilen sinyal hedefe çarpar ve bu sinyal tüm yönlere yeniden yayılır. Radarın tespit, görüntüleme gibi işlemlerini yapabilmesi için önemli olan bu geri yayılan sinyal enerjisidir. Alıcı anten sayesinde geri dönen enerjiyi toplar ve bir alıcıya gönderir, bu şekilde hedefi tespit etmek, konumunu belirlemek ve görece hızını çıkarmak için işlemler yapar. Alıcı antene geri yansıyan sinyal için geçen süre sayesinde hedefin mesafe ölçümü yapar. Hedefin yönünü tespit etmek için yönlü ve dar hüzmeli antenlerden geri yansıyan sinyalin ilgili alandaki açısına bakarak karar verirken, hız tespiti için ise gönderilen sinyal ile yansıyan sinyal arasındaki frekans farkı sayesinde hesaplama yapar. Radarlar için bir başka önemli parametre çözünürlüktür. Hedefin mesafe ölçümündeki çözünürlük bant genişliği ile ilintiliyken, yön ve açı için anten yönlülüğü ve hüzmelinin genişliği rol oynar. Hedef hareketli ise Doppler frekansı söz konusu olur ve çapraz çözünürlük de devreye girer. Radarlar monostatik ve bistatik olmak üzere iki farklı şekilde elektromanyetik dalgayı gönderme ve alma işlemini yapar. Şekil 2.2'de monostatik radar şeması gösterilmiştir. Monostatik radar biçiminde verici ve alıcı için tek bir anten kullanılır. Dupleks cihazı sayesinde ise sinyalin hangi bölüme iletileceğine karar verilir. Şekil 2.3'te gösterilen bistatik radar şemasında ise bu sistemde alıcı ve verici antenler ayrı ayrı konumlandırılmıştır. Bu düzenekte önce verici anten elektromanyetik dalga ile hedefi aydınlatır daha sonra hedefe çarpan bu dalga yansıtıcılık katsayısı ve hedef şekline bağlı olarak yansımalar yapar. Bu yansımaları alıcı anten toplar ve alıcıya iletir. Alıcı ve verici arasındaki referans işareti ile, hedeften geri gelen sinyal çarpılarak alıcı biriminde işlenir ve hedef hakkında istenilen verilere ulaşılır [42].



Şekil 2.1 Basit radar sistemi



Şekil 2.2 Monostatik radar sistemi



Şekil 2.3 Bistatik radar sistemi

### 2.1.1. Radar Denklemi

Radar denklemi, verici antenden gönderilen elektromanyetik dalganın gücü ile alıcı antene ulaşan dalganın gücü arasındaki ilişkiyi ortaya koyan denklemdir. Bistatik durum için radar denkleminin en genel hali Denklem 2.1 'de verilmiştir.

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

$P_r$ : Alıcı antenine gelen güç (Watts)

$P_t$ : Verici anteninden gönderilen güç (Watts)

$G_t$ : Verici antenin kazancı (dB)

$G_r$ : Alıcı anten kazancı (dB)

$\sigma$ : Radar Kesit Alanı ( $m^2$ )

$\lambda$ : Dalga Boyu (m)

$R_r$ : Hedef ile alıcı arasındaki mesafe (m)

$R_t$ : Hedef ile verici arasındaki mesafe (m)

Denklemdaki kısaltmalar yukarıda belirtildiği gibi ifade edilir. Verilen radar denklemine daha yakından bakılacak olursa üç parça halinde incelenebilir. Denklemin birinci bölümü olarak Denklem 2.2’de verilmiş olup bu denklem verici kazancı  $G_t$  olan bir antenden  $P_t$  gücü yayan radarın  $R_t$  mesafesindeki güç yoğunluğunu ifade eder.  $R_t$  mesafesi arttıkça enerji yoğunluğu mesafenin karesi oranında azaldığı da görülmektedir.

$$S_t = P_t \frac{G_t}{4\pi R_t^2} \quad (2.2)$$

Denklemin ikinci parçası Denklem 2.3’te verilmiştir. Bu denklem alıcı anten yönünden yansıyan güç yoğunluğu ifade eder. Bir önceki denkleme benzer şekilde  $R_r$  mesafesinin artışı enerji yoğunluğunun azalmasına neden olur. Denklem 2.2 ve Denklem 2.3’ün çarpılması ile radar antenine geri dönen birim alan başına düşen gücü ifade eder.

$$S_r = \frac{\sigma}{4\pi R_r^2} \quad (2.3)$$

Denklemin üçüncü ve son parçası ise Denklem 2.4’te verilmiştir. Bu denklemde alıcı antenin efektif alanı olarak tanımlanır. Bu alan elektromanyetik gücün ne kadarının alıcı anten tarafından verimli bir şekilde alınabildiğini ortaya koyar.

$$A_e = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \quad (2.4)$$

Sonuç olarak bu üç parçanın çarpılması radar denklemini oluşturur. Monostatik radar denklemi ise Denklem 2.5'te verildiği gibidir.

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \quad (2.5)$$

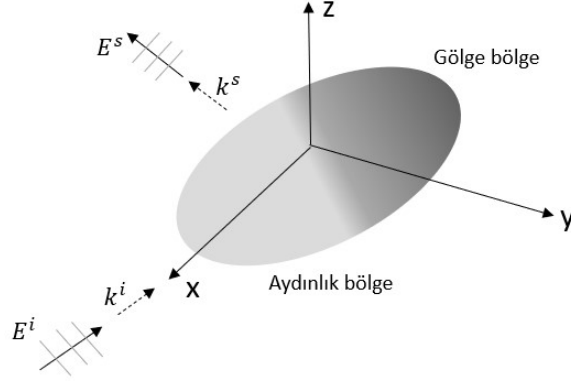
Monostatik durumda hedef nesne ile alıcı ve verici arasındaki mesafeler aynı olduğu ve anten kazançları aynı olduğu için denklem yukarıdaki duruma gelmektedir. Bu denklemden yola çıkarak eğer algılanan minimum sinyal gücü ve vericinin gücü biliniyorsa radarın maksimum menzili hesaplanır. Bu sonuç Denklem 2.6'da verilmiştir [43].

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{P_{r_{min}} (4\pi)^3}} \quad (2.6)$$

### 2.1.2. Elektromanyetik Saçılma

Radar sinyalleri elektromanyetik dalganın, dalga boyuna ve hedefin geometrisine göre farklı şekillerde saçılır. Örneğin dalganın dalga boyu saçıcın elektriksel boyutundan çok daha küçükse, bu dalga tıpkı ışığın yüzeyden yansımaya benzer veya dalga boyu görece daha yakınsa, saçılma yoğunluğu dalgalanabilir. Bu elektromanyetik saçılma radar görüntüleme teorisinin yapı taşıdır. Görüntüleme işlemi geri saçılan enerjinin analizinden ibarettir. TYAR görüntü elde etmenin de temelini oluşturacak mükemmel iletken yüzeyden (PEC) uzak alan elektromanyetik saçılma formülünü incelemek gerekir. Formül çıkarımı Şekil 2.4'te verilen nesne baz alınarak bahsedilecektir.

Fiziksel optik (FO) teorisine göre cisim üzerinde indüklenen akım Denklem 2.7'de verildiği gibi ifade edilir.



Şekil 2.4 Mükemmel iletken yüzeyden elektromanyetik saçılma

$$J_s(\mathbf{r}') = \begin{cases} 2\hat{\mathbf{n}}(\mathbf{r}') \times \mathbf{H}^i(\mathbf{r}'), & \text{aydınlık bölge} \\ 0, & \text{gölge bölge} \end{cases} \quad (2.7)$$

Denklem 2.7’de ifade edilen  $\hat{\mathbf{n}}(\mathbf{r}')$  aydınlık bölgenin dışı doğru olan birim vektörünü,  $\mathbf{r}'$  vektörü orijinden cismin aydınlatılmış bölgesindeki herhangi bir noktaya kadar olan pozisyon vektörünü temsil eder. Herhangi bir  $\mathbf{r}$  gözlem vektörü boyunca uzak alan bölgesinde saçılan elektrik alan Denklem 2.8’de verilmiştir.

$$\mathbf{E}^s(\mathbf{r}) = \frac{-j\omega\mu}{4\pi r} \exp(-jk_o r) \iint_{S_{\text{aydınlık}}} \mathbf{J}_s(\mathbf{r}') \exp(j\mathbf{k}^s \cdot \mathbf{r}') ds' \quad (2.8)$$

Bu denklemde  $\mathbf{k}^s$  saçılan alan yönündeki dalga sayısı vektörüdür. Denklem 2.7, Denklem 2.8’in içine yerleştirilecek olursa, Denklem 2.9’da gösterildiği gibi fiziksel optik yaklaşımına göre gelen elektrik alan cinsinden saçılan alan denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilir [44]:

$$\mathbf{E}^s(\mathbf{r}) = -\frac{jk_o E_o}{4\pi r} \exp(-jk_o r) \iint_{S_{\text{aydınlık}}} 2\hat{\mathbf{n}}(\mathbf{r}') \times \left( \hat{\mathbf{k}}^i \times \hat{\mathbf{u}} \right) \exp\left(j(\mathbf{k}^s - \mathbf{k}^i) \cdot \mathbf{r}'\right) ds' \quad (2.9)$$

TYAR görüntünün temelini oluşturacak bu denklem Bölüm 2.2.1’de detaylı olarak açıklanacaktır.

### 2.1.3. Radar Kesit Alanı (RKA)

Radar tarafından bir hedefin tespit edilerek görüntülenebilmesi ve takip edilebilmesi, elektromanyetik dalgalar aracılığı ile aydınlatıldığı durumda bu dalgaların ne kadarının radara geri dönebildiği ile ilgilidir. Hedefin tespit edilip edilememesi durumu Radar Kesit Alanı (RKA) kavramıyla doğrudan ilintilidir. Elektromanyetik bir dalga ile aydınlatılan hedeften belirli bir yönde saçılan gücün ölçüsü RKA olarak adlandırılır ve alan ölçüsü ile karakterize edilir. Hedefe gönderilen düzlem dalga polarizasyonu yatay (Horizontal) veya dikey (Vertical) olarak seçilebilir. RKA değerleri HH (yatay-yatay), VV (dikey-dikey), HV (yatay-dikey) veya VH (dikey-yatay) olarak alınabilir. Burada ilk harf iletilen sinyalin polarizasyonunu, ikinci harf ise geri alınan sinyalin polarizasyon bilgisini ifade eder. Radar Kesit Alanı formülü Denklem 2.10'da verilmiştir.

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E^s|^2}{|E^i|^2} \quad (2.10)$$

$E^s$ : Saçılan alan şiddeti

$E^i$ : Gelen alan şiddeti

$R$ : Saçıcı ile radar arasındaki mesafe

Radar Kesit Alanı (RKA)  $m^2$  cinsinden ifade edildiği gibi genellikle logaritmik olarak gösterilir. Logaritmik çevrimin nasıl yapıldığı Denklem 2.11'de gösterilmiştir.

$$\sigma (dBsm) = 10 \log_{10} \left( \frac{\sigma}{\sigma_{ref} = 1m^2} \right) \quad (2.11)$$

Bir cismin radar kesit alanı; geometrisine, cisim yapılıırken kullanılan malzemenin elektromanyetik özelliklerine ve verici radarda kullanılan sinyalin dalga boyuna göre değişim gösterir. Ayrıca uçak gemi gibi karmaşık yapılarda kenarlar ve köşe bölgelerde cisimlerin radar kesit alanlarını hesaplamak zorlaşmaktadır. Radar kesit alanı radar tarafından kullanılan frekansa göre değişiklik gösterirken, radarın görüş ve bakış açısına göre de değişiklik gösterir. Bu durum farklı RKA sonuçları oluşturur. Bir hedefin monostatik TYAR

görüntülerini elde etmek için bu RKA ölçümleri analiz edilirse, temelde elde edilen şey o hedefin TYAR görüntüsü olur. RKA ve TYAR arasındaki ilişki oldukça önem taşımaktadır [44].

#### 2.1.4. Radar Frekansları

Radar sistemleri, çeşitli frekans bantlarında kullanılarak farklı görevleri ortaya koymak için kullanılırlar. Çizelge 2.1’de IEEE tarafından verilen çalışma frekansları ve uygulama alanlarını içeren liste verilmiştir [43].

Çizelge 2.1 IEEE Radar Frekans Bantları

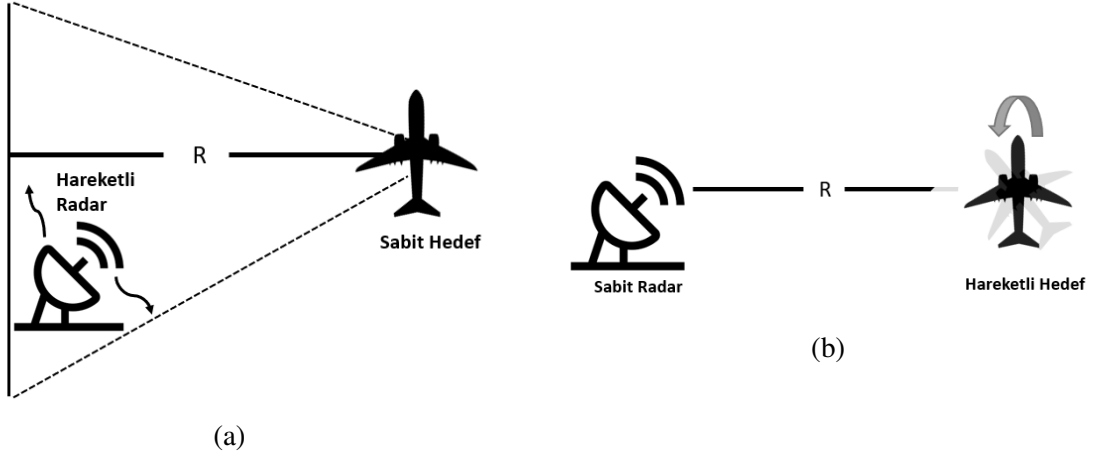
<b>Bant</b>	<b>Nominal Frekans Bandı</b>	<b>Uygulama alanı</b>
VHF	30-300 MHz	Düşük görünürlükteki hava hedeflerinin tespiti
UHF	300-1000 MHz	Uzun menzilli tespit radarları
L	1-2 GHz	Hava tespit radarları tarafından kullanılma, Hava trafiği kontrol
S	2-4 GHz	Hava tespit fonksiyonu, Terminal hava trafik kontrol radarları
C	4-8 GHz	Tespit ve takip fonksiyonu, Navigasyon radarı
X	8-12 GHz	Takip fonksiyonu, Güdüm radarları, YAR/TYAR
Ku	12-18 GHz	Takip fonksiyonu
K	18-27 GHz	Çok kısa menzilli uygulamalar için
Ka	27-40 GHz	Hava alanlarında trafiği gözetleme
V	40-75 GHz	Bina içi uygulamalar
W	75-110 GHz	Bina içi uygulamalar



## 2.2. Ters Yapay Açıklıklı Radar (TYAR)

Radar, tespit ve takip gibi amaçlar için yaygın olarak kullanılırken, radar görüntüleme de önemli yeni bir alan olarak gelişmeye başlamıştır. Radar temel olarak bir elektromanyetik dalgayı yüksek güçte iletme, iletilen bu dalgayı tekrar tespit edebilme ve tespit edilen bu dalgadan bilgi ayıklama ve yorumlama işlemlerini yapabilme kapasitesine sahip olmalıdır. Bahsedilen ilk iki problem günümüzde gerekli donanımsal kapasiteyle aşılabılırken, bilgi çıkartma problemi matematiksel bir alt yapı gerektirdiği için zorluğunu korumaktadır. Radar görüntüleme bu matematiksel zorluğu içeren bir radar fonksiyonu olması sebebiyle oldukça önemli bir alandır. Radar görüntüleme temel prensip, bir hedeften geri saçılan alanların bu hedefin ilgili koordinat bileşenlerine ayrılması mantığına dayanır. Bu prensiple elde edilen radar görüntüsü, hedef uzayını geri saçılan alan katsayılarının dizisi olarak değerlendirilir [45]. 1940'ların sonunda gelişmeye başlayan görüntüleme yöntemlerinden biri, yüksek menzilli çözünürlük (High Range Resolution, HRR) yöntemidir. Bu yöntemde kısa bir radar darbesinin karmaşık bir hedeften geri dönmesi sonucunda elde edilen sinyallerin üst üste binmesi ile tek boyutlu bir görüntü oluşturulmaktadır. Bir başka görüntüleme metodunda ise, dar bir hüzmeye oluşturan anten kullanarak görüntüleme alanını tarayarak ve gönderilen her bir darbenin gecikmesi ile geri gelen dalganın yoğunluğunu çizerek görüntü elde edilir. Bu yöntem Gerçek-Açıklıklı Görüntüleme (Real-Aperture Imaging) adı verilmiştir [46].

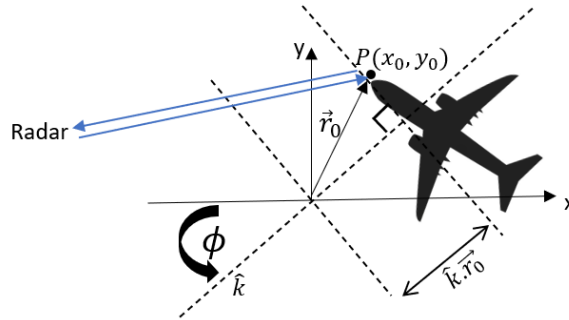
Temeli bahsedilen yöntemlerle atılan radar görüntüleme için daha sonra Yapay Açıklıklı Radar (YAR) ve Ters Yapay Açıklıklı Radar (TYAR) geliştirilmiştir. Bu görüntüleme radarlarında, radar huzmesinin taradığı alanın radar kesit alanını çıkartan sistemleri sayesinde görüntüleme işlemi gerçekleştirilir ve sanal ve yüksek çözünürlüklü görüntü oluşturulur. YAR sistemlerinde radar hareketli hedef sabit olarak kabul edilirken, TYAR sistemlerinde hedef hareketli radar sabittir. Bu iki sistemin genel yapısı Şekil 2.5 (a) ve (b)'de gösterilmiştir.



Şekil 2.5 (a) YAR sistemi (b) TYAR sistemi

### 2.2.1. Ters Yapay Açıklıklı Radar Görüntüleme

Radar görüntüleme için Ters Yapay Açıklıklı Radar (TYAR) sistemleri güçlü bir sinyal işleme tekniği olarak kullanılmaktadır. Bu sinyal işleme tekniği, hareketli hedeflerin menzil (range) ve yanca (cross-range) uzaylarını görüntüleyebilme imkânı sunar. TYAR sistemi 2 boyutlu (2B) görüntü elde etmek için önce elektromanyetik dalgaları uygun ve yüksek bant genişliğinde hedefe gönderir. TYAR sistemlerinde genel olarak doğrusal frekans modülasyonu (LFM) veya frekans modülasyonlu sürekli dalga (FMCW) tercih edilir. Geri saçılan alan bilgisi kaydedilir ve buradan gerekli bilgiler çıkartılarak zamana ve darbe sayısına bağlı biri görüntü fonksiyonu elde edilir. Şekil 2.6'da monostatik 2 boyutlu TYAR görüntüleme geometri yapısı verilmiştir.



Şekil 2.6 Monostatik 2 boyutlu TYAR geometrisi

$P(x_0, y_0)$  nokta saçıcı için faz merkezi olarak orijin alındığında ve  $\phi$  (phi) azimut açısından geri saçılan elektrik alan Denklem 2.12'de gösterildiği gibi yazılır:

$$E^s(k, \phi) \cong A_0 \exp \left( -j2 \vec{k} \cdot \vec{r}_0 \right) \quad (2.12)$$

Bu denklemde  $A_0$  geri saçılan alanın genlik bilgisi,  $\vec{k}$  yayılma yönündeki vektör dalga sayısı,  $\vec{r}_0$  orijinden P nokta saçıcısına giden vektördür. Denklemdeki 2 sayısı, dalga aynı yönde gidip geldiği için kullanılmaktadır.  $\vec{k}$  vektörü  $x$ - $y$  düzleminde varsayılmaktadır ve Denklem 2.13'te ifade edildiği gibi  $x$  ve  $y$  yönlerinde ifade edilir.

$$\vec{k} = k\hat{k} = k(\hat{x} \cos \phi + \hat{y} \sin \phi) \quad (2.13)$$

$\vec{k}$ , dalga vektörü,  $\hat{x}$  ve  $\hat{y}$  vektörleri ise  $x$  ve  $y$  yönlerindeki birim vektörlerdir. Denklem 2.12'de bulunan faz terimi Denklem 2.14'te verildiği gibi yazılır.

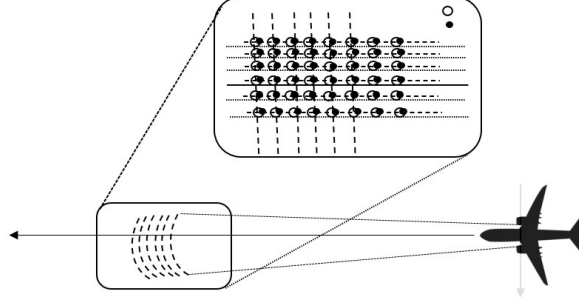
$$\begin{aligned} \vec{k} \cdot \vec{r}_0 &= k(\hat{x} \cos \phi + \hat{y} \sin \phi) \cdot (\hat{x}x_0 + \hat{y}y_0) \\ &= k \cos \phi x_0 + k \sin \phi y_0 \\ &= k_x x_0 + k_y y_0 \end{aligned} \quad (2.14)$$

Denklem 2.14'te verilen  $\vec{k} \cdot \vec{r}_0$  faz terimi tekrar Denklem 2.12'ye yerleştirilirse, saçılan alan bilgisi Denklem 2.15'te verildiği gibi ortaya çıkar.

$$E^s(k, \phi) = A_0 \exp(-j2k \cos \phi x_0) \exp(-j2k \sin \phi y_0) \quad (2.15)$$

Faz  $2k \cos \phi - x$  ve  $2k \sin \phi - y$  arasındaki Fourier ilişkisi kullanılarak 2 boyutlu Ters Fourier Dönüşümü sayesinde TYAR görüntüsü elde edilir.

**2.2.1.1. Dar Bant- Dar Açı Yaklaşımı ile 2 Boyutlu TYAR Görüntüleme** TYAR görüntü elde etmek için pratikte sıklıkla kullanılan ve daha iyi sonuçlar veren “dar bant ve dar açı” yaklaşımı kullanılmaktadır. Bu tekniği anlatan bir görsel Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.7 Dar bant- dar açı yaklaşımı ile TYAR veri toplama

Bu yaklaşım için kullanılan varsayımlar Denklem 2.16’da verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 k &\cong k_c = \frac{2\pi f_c}{c} \\
 \cos \phi &\cong 1 \\
 \sin \phi &\cong \phi
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

Bu varsayımlardan birincisi, bant genişliğinin merkez frekansın onda birinden daha az olması durumunun yeterince küçük olduğu varsayıldığı için yapılmış, ikinci ve üçüncü varsayımlar ise bakılan açının yeterince dar olması sebebiyle yapılmıştır. Bu durumda Denklem 2.15, Denklem 2.17 formatında yazılır.

$$\begin{aligned}
 E^s(k, \phi) &= A_0 \exp(-j2kx_0) \exp(-j2k_c \phi y_0) \\
 &= A_0 \exp\left(-j2\pi \left(\frac{2f}{c}\right) x_0\right) \exp\left(-j2\pi \left(\frac{k_c \phi}{\pi}\right) y_0\right) \\
 &= A_0 \exp(-j2\pi \alpha x_0) \exp(-j2\pi \gamma y_0)
 \end{aligned}
 \tag{2.17}$$

Elde edilen saçılan alan bilgisinin ters Fourier dönüşümü ile TYAR görüntü denklemi, Denklem 2.18'deki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned}
\mathcal{F}_{\alpha,\gamma}^{-1} \{E^s(k, \phi)\} &= A_o \mathcal{F}_{\alpha}^{-1} \{\exp(-j2\pi\alpha x_o)\} \mathcal{F}_{\gamma}^{-1} \{\exp(-j2\pi\gamma y_o)\} \\
E^s(x, y) &= A_o \left[ \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-j2\pi\alpha x_o) \exp(j2\pi\alpha x) d\alpha \right] \\
&\quad \cdot \left[ \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-j2\pi\gamma y_o) \exp(j2\pi\gamma y) d\gamma \right] \\
&= A_o \delta(x - x_o, y - y_o)
\end{aligned} \tag{2.18}$$

Bu denklemde  $\delta$  darbe (impulse) fonksiyonu temsil eder ve P nokta saçıcının  $P(x_o, y_o)$  noktasında bulunan darbe fonksiyonu gibi davranır. Hedeften geri saçılan elektrik alan, hedef üzerindeki saçılma merkezlerinden sonlu sayıda ve tek noktalı saçıcıdan gelen tüm saçılmaların toplamı olarak Denklem 2.19'deki gibi yazılır.

$$E^s(k, \phi) \cong \sum_{i=1}^K A_i \exp(-j2\vec{k} \cdot \vec{r}_i) \tag{2.19}$$

$A_i$  geri saçılan elektrik alanın karmaşık sayıdan oluşan genliğini,  $\vec{r}_i$  ise  $i$ . noktada bulunan saçılan alanın yer değiştirme vektörünü temsil eder. 2 boyutlu ters Fourier dönüşümü uygulanan geri saçılan alan integrali Denklem 2.20 deki gibi ifade edilir.

$$TYAR(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E^s(k, \phi) \exp(j2\pi\alpha x) \exp(j2\pi\gamma y) d\alpha d\gamma \tag{2.20}$$

Denklem 2.19, Denklem 2.20'ye yerleştirilirse, Denklem 2.21 ortaya çıkar ve TYAR görüntüsü  $K$  tane saçılan alanın toplamı olarak ifade edilir.

$$\begin{aligned}
\text{TYAR}(x, y) &\cong \iint_{-\infty}^{\infty} \sum_{i=1}^K A_i \exp(-j2\vec{\mathbf{k}} \cdot \vec{\mathbf{r}}_i) \exp(j2\pi\alpha x) \exp(j2\pi\gamma y) d\alpha d\gamma \\
&= \sum_{i=1}^K A_i \iint_{-\infty}^{\infty} (-j2\vec{\mathbf{k}} \cdot \vec{\mathbf{r}}_i) \exp(j2\pi\alpha x) \exp(j2\pi\gamma y) d\alpha d\gamma \\
&\cong \sum_{i=1}^K A_i \int_{-\infty}^{\infty} \exp(j2\pi\alpha(x - x_i)) \exp(j2\pi\gamma(y - y_i)) d\alpha d\gamma \\
&= \sum_{i=1}^K A_i \delta(x - x_i, y - y_i)
\end{aligned} \tag{2.21}$$

Gerçek hayat durumlarında sınırlı bir bant aralığı ( $B$ ) ve sınırlı bakış açısında ( $\Omega$ ) bilgiler toplanacağı için, TYAR görüntüleme işlemi, darbe fonksiyonundan *sinc* fonksiyonuna doğru bir bozulma yaşar. Bu durum Denklem 2.22'deki haliyle ifade edilir.

$$\text{TYAR}(x, y) = \sum_{i=1}^K A_i \text{sinc}\left(\frac{2B}{c}(x - x_i)\right) \text{sinc}\left(\frac{2f_c}{c}\Omega(y - y_i)\right) \tag{2.22}$$

TYAR'ın kalitesini belirleyen en önemli parametreler menzil (range) ve yanca (cross-range) çözünürlükleridir. Denklem 2.22 'de bulunan ilk *sinc* terimi menzil çözünürlük hesaplaması için kullanılırken, ikinci terim ise yanca çözünürlüğünü belirlemek için kullanılır. Menzil ( $\Delta x$ ) ve yanca ( $\Delta y$ ) çözünürlük formülleri Denklem 2.23'te sırasıyla verilmiştir.

$$\begin{aligned}
\Delta x &= \frac{c}{2B} \\
\Delta y &= \frac{c}{2f_c\Omega} = \frac{\lambda_c}{2\Omega}
\end{aligned} \tag{2.23}$$

Denklem 2.23'ten anlaşılacağı üzere yüksek frekans bant genişliği ve yüksek açı bant genişliği daha iyi çözünürlük sağlamaktadır.

Menzil ve yanca çözünürlüklerinin örnekleme noktalarının sayısının seçimi, yani TYAR görüntü penceresinin genişliğinin ne kadar olacağına karar verilmesi bir başka önemli noktadır. Frekans bant genişliğinin  $N_x$  kere, açısal açıklığın ise  $N_y$  kere örneklendiği kabul edilirse, görüntü alanındaki boyutlar Denklem 2.24 te verildiği gibi olur.

$$\begin{aligned} X_{\max} &= N_x \Delta x \\ &= \frac{N_x c}{2B} \end{aligned} \quad (2.24)$$

$$\begin{aligned} Y_{\max} &= N_y \Delta y \\ &= \frac{N_y \lambda_c}{2\Omega} \end{aligned}$$

Başarılı bir ters yapay açıklıklı radar görüntü elde etme süreci 4 adımda özetlenebilir:

**Birinci adım:** Denklem 2.24'te verilen menzil için  $X_{\max}$ , yanca için  $Y_{\max}$  görüntü boyutlarının hedefe uygun olarak seçilmesi gerekir. Bu değerler, hedefin boyutlarını kapsayacak şekilde seçilmelidir. Değerler seçildikten sonra çözünürlük değerlerine karar verilmelidir. Bu değerler sayesinde hedefi görüntülerken kaç adet piksel olacağı ( $N_x, N_y$ ) hesaplanır.

**İkinci adım:** TYAR görüntü için boyutlar belirlendikten sonra, frekans çözünürlüğü,  $\Delta f$ , açı çözünürlüğü,  $\Delta \phi$ , Denklem 2.24'teki frekans-menzil ve açı-yanca arasındaki Fourier ilişkileri kullanılarak belirlenir. İlgili formüller Denklem 2.25 teki gibi verilir.

$$\Delta f = \frac{B}{N_x} = \frac{c/2}{X_{\max}} \quad (2.25)$$

$$\Delta \phi = \frac{\Omega}{N_y} = \frac{\lambda_c/2}{Y_{\max}}$$

**Üçüncü adım:** Çoklu frekans ve farklı bakış açıları için, merkez frekansı  $f_c$  ve radar bakış merkez açısı  $\phi_c$  kabul edilirse, geri saçılan elektrik alanı Denklem 2.26'da verildiği gibi çoklu frekanslar ve açılar için toplanır:

$$\mathbf{f} = \left[ \left( f_c - \frac{N_x \Delta f}{2} \right) \left( f_c - \left( \frac{N_x}{2} - 1 \right) \Delta f \right) \cdots (f_c) \cdots \left( f_c + \left( \frac{N_x}{2} - 1 \right) \Delta f \right) \right]_{1 \times N_x}$$

$$\boldsymbol{\phi} = \left[ \left( \phi_c - \frac{N_y \Delta \phi}{2} \right) \left( \phi_c - \left( \frac{N_y}{2} - 1 \right) \Delta \phi \right) \cdots (\phi_c) \cdots \left( \phi_c + \left( \frac{N_y}{2} - 1 \right) \Delta \phi \right) \right]_{1 \times N_y}$$
(2.26)

**Dördüncü adım:** TYAR görüntüsü,  $E^s(f, \phi)$ 'nin 2 boyutlu ters Fourier dönüşümü alınarak elde edilir.

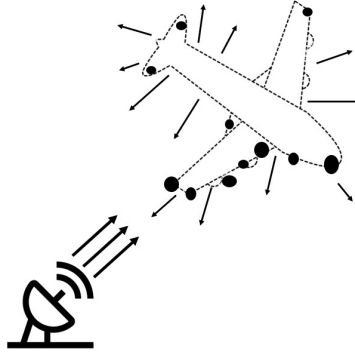
### 2.2.2. Saçılma Merkezi ve TYAR

Saçılma merkezi yaklaşımı, TYAR görüntü elde etme konusunda oldukça iyi yöntemlerden biridir. Bir hedef elektromanyetik dalga ile aydınlatıldıktan sonra, bazı bölgelerden gözlem noktasına doğru lokalize olan bir enerji döner. Bu yoğun enerjinin olduğu bölgelere, saçılma merkezi adı verilir. Saçılma merkezi modelinin kullanılması birçok yönden avantaj sağlar. Örneğin elektromanyetik saçılımın daha seyrek bir temsili elde edilebilir. Veri seti daha küçük olacağı için, görüntü yapılandırma daha hızlı yapılabilir. Köşe yansıtıcı tipine sahip yapılar, düzlemsel yüzeyler, saçılma merkezleri olarak kabul edilebilecek güçlü saçılma sağlayabilir. Hedef üzerindeki saçılma merkezleri Şekil 2.8'deki gibi gösterilebilir. Hedef üzerinde bulunan sonlu sayıdaki nokta saçıcıdan geri saçılan alan bilgisi elde ediliyormuş gibi düşünülür.

Sonlu sayıdaki geri saçılan alan bilgisi Denklem 2.27'de gösterildiği gibidir.

$$\begin{aligned} E^s(k, \phi) &\cong \sum_{i=1}^N A_n \exp \left( -j2 \vec{\mathbf{k}} \cdot \vec{\mathbf{r}}_n \right) \\ &= \sum_{i=1}^N A_n \exp \left( -j2 (k_x x_n + k_y y_n) \right) \\ &= \sum_{i=1}^N A_n \exp \left( -j2k (\cos \phi x_n + \sin \phi y_n) \right) \end{aligned} \quad (2.27)$$





Şekil 2.8 Karmaşık hedefin saçılma merkezi görüntülemesi

Denklem 2.27’de  $E^s(k, \phi)$  farklı açı ve frekanslarda geri toplanan elektrik alanı,  $A_n$  karmaşık genliği,  $\vec{r}_n$  ise  $n$ . saçılma merkezinin konum yer değiştirme vektörünü temsil eder.

Saçılma merkezi modeli, görüntü alanında uygulamaya oldukça elverişlidir. Görüntüleme işlemini yaparken sistemin nokta kaynaktan geri saçılan alan bilgisi yani sistemin tepkisi nokta yayılma fonksiyonu ile ifade edilir. TYAR görüntü için bu Denklem 2.21’de görüleceği gibi, darbe fonksiyonudur ve bu durum Denklem 2.28’deki gibi nokta yayılma fonksiyonu ile gösterilebilir.

$$\text{TYAR}(x, y) \cong \sum_{i=1}^N A_n h(x - x_n, y - y_n) \quad (2.28)$$

Bu denklemde  $A_n$  karmaşık genliği,  $(x_n, y_n)$   $n$ . saçılma merkezinin konumunu,  $h(x, y)$  nokta yayılma fonksiyonu ifade eder. Nokta yayılma fonksiyonu ise Denklem 2.29’ da gösterilmiştir.

$$h(x, y) = \left( \exp(j2k_{xc}x) \frac{\text{BW}_{k_x}}{\pi} \text{sinc} \left( \frac{\text{BW}_{k_x}}{\pi} x \right) \right) \cdot \left( \exp(j2k_{yc}y) \frac{\text{BW}_{k_y}}{\pi} \text{sinc} \left( \frac{\text{BW}_{k_y}}{\pi} y \right) \right) \quad (2.29)$$

Nokta yayılma fonksiyonunda  $(\text{BW}_{k_x}, \text{BW}_{k_y})$   $k_x$  ve  $k_y$  ’deki bant genişliğini,  $k_{xc}$  ve  $k_{yc}$  ise  $x$  ve  $y$  yönlerindeki merkez uzaysal frekansları temsil eder. Saçılma merkezi modeli bu şekilde tanımlanır [47].

Saçılma merkezi bilgisini çıkartmak için ise farklı yöntemler vardır. Bunlardan biri bu tez kapsamında da kullanılan "CLEAN" algoritmasıdır. Bu algoritma, görüntüdeki en yüksek noktaları ardışık olarak seçen ve bunların ilgili noktadaki saçılma merkezi olduğunu varsayan nokta yayılma fonksiyonunu görüntüden çıkararak tekrarlayan bir yöntemdir. Çalışma prensibi Denklem 2.30'da gösterildiği gibidir.

$$\begin{bmatrix} 2 \text{ B artık} \\ \text{görüntü} \end{bmatrix}^n = \begin{bmatrix} 2 \text{ B artık} \\ \text{görüntü} \end{bmatrix}^{n-1} - A_n h(x - x_n, y - y_n) \quad (2.30)$$

Bu denklemden yola çıkarak  $n$ . adımdaki 2 boyutlu artık görüntü,  $(n-1)$ .adımdaki 2 boyutlu artık görüntü ile  $n$ . adım için artık görüntüye karşılık gelen nokta yayılım fonksiyonu arasındaki farka eşit olduğu söylenir. Bu işlem, artık görüntüdeki maksimum güç tanımlanan bir eşik değerine ulaşıncaya kadar yinelemeli olarak devam eder [48].

### 2.3. Derin Öğrenme Tabanlı Ters Yapay Açıklıklı Görüntüleme

Derin öğrenme, makine öğrenmesi yöntemlerinin alt kümesidir. Yapay sinir ağları yöntemlerini kullanır ve çok katmanlı mimari yapısı sayesinde çok fazla veri ile eğitilir. Her bir katmanda öğrenme işlemi gerçekleştirilir. Bir önceki katmandan gelen bilgi ile karşılaştırma yaparak öğrenme işlemini yapar. Derin öğrenme yöntemleri sayesinde yüksek çözünürlüklü radar görüntüleri elde edilir. Yapının girişine düşük çözünürlüklü ve gürültü içeren görüntüler verilir, çıkışında ise yapılan eğitim ile yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilir [49].

Derin öğrenme yapıları, öğrenmek için eğitim verilerini ve istenen çıktıları kullanır. Daha sonra, yeni veriler verildiğinde, verilerin boyutuyla iyi ölçeklenebilen tahminler üretmek için öğrenilen eşlemeyi kullanır. Bu öğrenme işlemi denetimli öğrenme ve denetimsiz öğrenme olmak üzere 2 şekilde yapılır. Denetimli öğrenmede, her bir giriş verisi  $x_i$  ile gösterilir ve buna karşılık gelen ilgili çıktı  $y_i$ 'ye birebir eşleme işlemi yaparak sistemin öğrenmesi için kullanılır. Küme eğitim veri kümesi olarak gösterilen  $\mathbb{D}$  kümesi, Denklem 2.31'deki gibi ifade edilir.

$$\mathbb{D} = \{(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i), i = 1, \dots, N\} \quad (2.31)$$

$N$  veri setindeki toplam eleman sayısını,  $(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i)$  ise giriş-çıkış veri örnek çiftlerini temsil etmektedir. Öğrenme işlemi için iki fonksiyon belirlenmesi gerekir. Birinci fonksiyon karar fonksiyonudur. Bu fonksiyon ile bilinmeyen  $\theta$  parametreleri ile tanımlanmış ve  $\mathbf{x}$  girdisini  $\hat{\mathbf{y}}$  tahmini bir çıktıya eşleyen bir modele ihtiyaç vardır. Bu model Denklem 2.32'de olduğu gibi gösterilebilir.

$$\hat{\mathbf{y}} = f_{\theta}(\mathbf{x}) \quad (2.32)$$

Bu fonksiyon ile eğitim veri kümesi,  $\mathbb{D}$ , kullanılarak eşleme fonksiyonu olan  $f_{\theta}(\mathbf{x})$  yani  $\theta$  parametrelerini bulmak amaçlanmaktadır. İkinci fonksiyon ise kayıp fonksiyonudur. Kayıp fonksiyonu  $l(\hat{\mathbf{y}}, \mathbf{y}_i) \in \mathbb{R}$ , tahmin edilen çıktı  $\hat{\mathbf{y}}$  ile ilgili girdi  $\mathbf{x}_i$  için etiketlenmiş beklenen çıktı  $\mathbf{y}_i$  arasındaki mesafeyi ölçer. Bu iki fonksiyona karar verildikten sonra, denetimli öğrenmenin amacı eğitim veri kümesinde bulunan toplam kaybı en aza indiren  $\theta$  parametresini Denklem 2.33'te belirtildiği gibi bulmaktır.

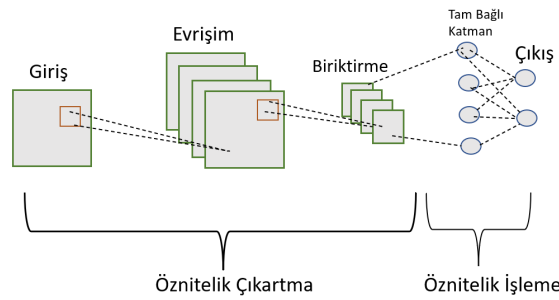
$$\theta^* = \underset{\theta}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^N l(f_{\theta}(\mathbf{x}_i), \mathbf{y}_i) \quad (2.33)$$

Denetimli öğrenme yöntemleri hedef tanıma, sınıflandırma, bağlanım ve arıtma konularında oldukça etkilidir ve evrışimsel sinir ağları bu yöntemle işlemektedir [50].

### 2.3.1. Evrışimsel Sinir Ağları

Derin öğrenme yöntemleri arasında en yaygın ve etkili olanı Evrışimsel Sinir Ağları'dır. Bu yapılar, beyin görsel sisteminden ilham alınarak geliştirilmiş ve ağırlık paylaşımı tekniğini başarılı bir şekilde kullanarak eğitilebilir en iyi yapı olmuştur. Evrışimsel sinir ağlarında, her katmandaki durumlar uzaysal bir ağ yapısına göre düzenlenir. Bu uzaysal ilişkiler bir katmandan diğerine aktarılır. Her bir öznelik değeri bir önceki katmandaki küçük bir yerel uzaysal bölgeye dayandığı için bu uzaysal ilişkiler bir katmandan diğerine aktarılır.

Hücreleri arasındaki bu uzaysal ilişkileri korumak önemlidir, çünkü evrişim işlemi ve bir sonraki katmana dönüşüm kritik olarak bu ilişkilere bağlıdır. Evrişimsel ağıdaki her katman, yüksekliği, genişliği ve derinliği olan 3 boyutlu bir yapıdır. Evrişimsel sinir ağındaki bir katmanın derinliği giriş görüntüsündeki birincil renk kanallarının (mavi, yeşil ve kırmızı) sayısı veya gizli katmanlardaki öznitelik haritalarının sayısı gibi her katmandaki kanal sayısını ifade eder. Tipik bir ESA yapısı, evrişim, biriktirme ve aktifleştirme fonksiyonundan oluşur. Genel bir ESA yapısı Şekil 2.9’da gösterilmiştir [51].

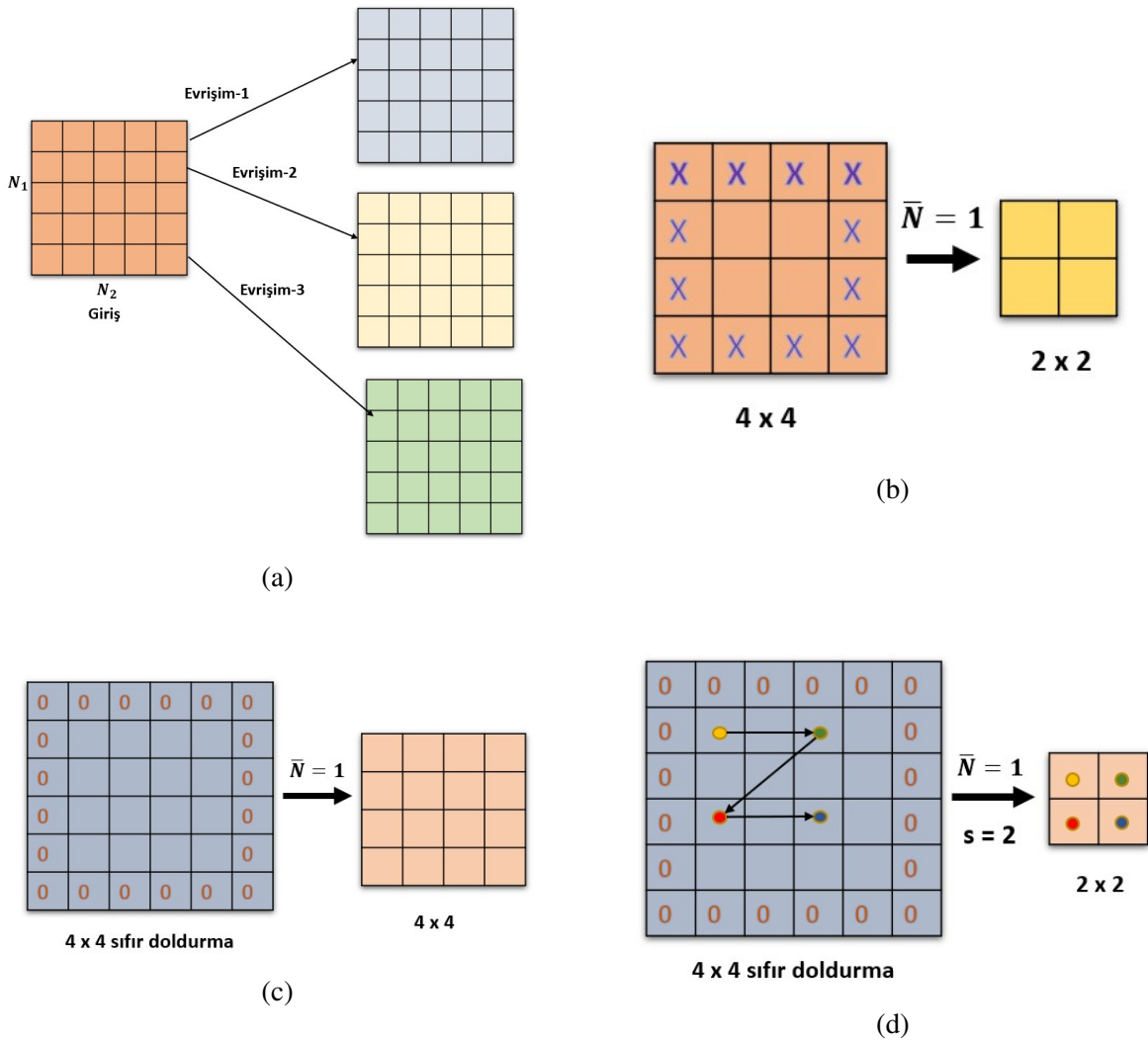


Şekil 2.9 Genel ESA yapısı

**2.3.1.1. Evrişim Katmanı** Evrişimsel sinir ağında parametreler, filtre olarak bilinen 3 boyutlu yapı kümeleri halindedir. Filtre genellikle uzaysal boyutları açısından filtrenin uygulandığı katmanın boyutlarından çok daha küçüktür. Bir evrişim katmanı, giriş görüntülerinin alt bölgelerine veya bir önceki katmanın çıkışlarına bağlanan nöronlardan oluşur. Katman, bir görüntüyü tararken bu bölgeler tarafından bulunan öznitelikleri öğrenir. Her bir evrişim katmanının filtre boyutu ve filtre değerleri vardır. Filtre boyutu ile bölgenin boyutunu belirtirken, görüntüdeki bir bölgeye uygulanan ağırlık sayısına filtre denir. Ayrıca, bir filtrenin derinliği her zaman uygulandığı katmanın derinliği ile aynıdır. Örneğin  $N_1 \times N_2$  boyutlarında bir görüntü olsun. Bir evrişim katmanında, her biri farklı bir görüntü oluşturacak olan birden fazla evrişim Şekil 2.10 (a)’da gösterildiği gibi olur. Bu katmanın eğitilebilir parametreleri her bir evrişim/ çekirdeğinin ağırlıklarıdır. Çekirdeklerin genişliğinin her yönde  $\bar{N}$  olduğu ve  $P$  filtre bulunduğu varsayılırsa, eğitilebilir ağırlıkların sayısı  $P \times (2\bar{N} + 1)^2$  olacaktır. Şekil 2.10 (b)’de görüldüğü gibi, görüntü üzerindeki sınır piksellere filtre işlemi uygulanmaz. Bu durumda görüntü boyutu  $(N_1 - \bar{N} + 1) \times$

$(N_2 - \bar{N} + 1)$  şeklinde ifade edilir. Filtre uygulanamayan bölgeleri tamamlamak için 2.10 (c)'de gösterildiği sıfır-doldurma yöntemi kullanılır ve çıkış görüntüsü giriş görüntüsüyle aynı boyuta getirilir.

Evrişim katmanının bir başka özelliği ise adımlamadır. Görüntü üzerinde hareket ettikçe filtrenin kaydırılacağı piksel sayısını belirler. 2.10 (d)'de gösterildiği gibi adımlama ( $S$ ) 2 seçilirse, çıkış görüntüsünün boyutu her yönde  $S$  kadar azalır.

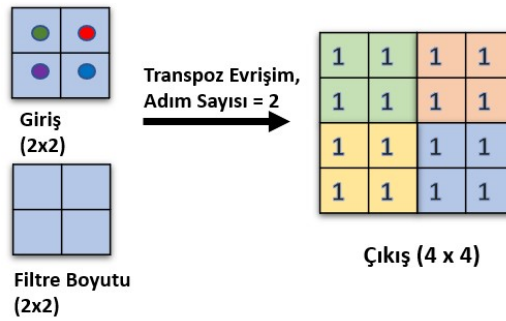


Şekil 2.10 Evrişim katmanı (a): Evrişim katmanı (b): Sıfır doldurmasız evrişim (c): Sıfır doldurmalı evrişim (d) Sıfır doldurmalı evrişim, adım sayısı:2

**2.3.1.2. En Büyükleri Biriktirme (Max-Pooling) Katmanı** En büyükleri biriktirme katmanı görüntü boyutu küçültmek için kullanılır. Örneğin  $N_1 \times N_2$  boyutlarındaki bir

görüntüye  $S \times S$  biriktirme işlemi uygulanırsa, yeni görüntünün boyutu  $\frac{N_1}{S} \times \frac{N_2}{S}$  olur. Burada  $S$  adımlama sayısıdır. Bu işlem sayesinde, eğitilen yapının küçük değişikliklere karşı duyarlı olması sağlanır.

**2.3.1.3. Transpoz Evrişim Katmanı** Evrişim katmanı ve en büyükleri biriktirme katmanları görüntü boyutlarını azaltabilirken, görüntü boyutlarını arttırmak için transpoz evrişim katmanı kullanılır. Şekil 2.11’de gösterildiği gibi 2x2 giriş verisi ve 2x2 filtre boyutu seçilirse çıkış verisi şekildeki gibi olur.



Şekil 2.11 Transpoz evrişim işlemi örneği

Transpoz evrişim katmanları, öğrenilebilir parametreler aracılığıyla yukarı ölçeklendirme için tercih edilen bir katmandır.

**2.3.1.4. Aktifleştirme Fonksiyonu Katmanı** Genellikle evrişimsel katmandan sonra bu katman kullanılır. Ağ yapısındaki evrişimsel katman gibi yapılar doğrusal olmadıkları için, hesaplamalar yapıldıktan sonra değerler aktifleştirme fonksiyonundan geçirilir. Lineer aktifleştirme, sigmoid aktifleştirme, Tanh aktifleştirme ve Doğrultulmuş Lineer (ReLU) gibi birçok aktifleştirme fonksiyonu çeşidi vardır. Bunlardan en yaygın kullanılanı ReLU fonksiyonudur. Bu fonksiyon Denklem 2.34’te gösterilmiştir.

$$f(x) = \begin{cases} x, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (2.34)$$

Bu fonksiyon sürekli olup, türevi  $x=0$  noktasındaki sıçraması ile parçalı sabittir. İkinci türevi ise  $x=0$ 'da bir darbe fonksiyondur. Aktifleştirme fonksiyonları boyut değişikliği yaratmaz.

**2.3.1.5. Çıkış Katmanı** ESA yapısının giriş katmanında  $N_1 \times N_2 \times C$  boyutlarında bir giriş verisi olduğu varsayılır ve  $P$  filtresi uygulanırsa, çıkışta  $M_1 \times M_2 \times P$  boyutunda bir veri elde edilir.  $C$  burada giriş görüntüsündeki kanal sayısını temsil eder. Çıkış görüntüsünün hem uzamsal çözünürlüğü hem de kanal sayısı giriş görüntüsünden farklı olabilir. Katmandaki tek bir evrişim  $k = 2\bar{N} + 1$  genişliğinde bir filtre kullanıyorsa, filtre  $k \times k \times C$  şeklinde olacak ve giriş görüntüsünün  $C$  giriş kanallarının her biri için  $k \times k$  ağırlıklara sahip olacaktır. Bu durumda her bir evrişim,  $M_1 \times M_2 \times 1$  şeklinde bir çıktı görüntüsü vermek için giriş üzerinde etki edecektir. Her bir evrişim katmanının çıktısı bir araya getirildiğinde Denklem 2.35'teki gibi ifade edilir.

$$\bar{U}[i, j, k] = \sum_{m=-\bar{N}}^{\bar{N}} \sum_{n=-\bar{N}}^{\bar{N}} \sum_{c=1}^C g_k[m, n, c] U[i+m, j+n, c], 1 \leq i \leq M_1, 1 \leq j \leq M_2, 1 \leq k \leq P \quad (2.35)$$

Bu denklemde  $g_k$ , katmandaki  $k$ . evrişim katmanının filtresidir. Eğitilebilir toplam parametre sayısı ise Denklem 2.36'da verildiği gibi hesaplanır.

$$(2\bar{N} + 1) \times (2\bar{N} + 1) \times P \times C \quad (2.36)$$

Bir ESA yapısında kullanılan tüm katmanlar bu şekildedir [52].

**2.3.1.6. Evrişimsel Sinir Ağları Eğitimi** Evrişimsel Sinir Ağları eğitilirken öncelikle ağırlık ve sapma parametreleri belirlenir. Eğitim sürecinde görüntüler katmanlar boyunca iletilir ve ağ her bir görüntü için yeni bir çıktı üretir. Ayrıca her adımda bir hata fonksiyonu hesaplanır. Geri yayılım aşamasında, istenen doğru görüntülerle ağın elde ettiği çıktılar karşılaştırılır ve bu bilgiye dayanarak sistem parametreleri güncellenir. Eğitim veri seti Denklem 2.31'deki gibi ifade edilir ve hedef fonksiyon  $f : \mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{y}}$  olarak tanımlanır. ESA

fonksiyonu ise Denklem 2.37 ile ifade edilir.

$$\mathcal{F}(\mathbf{x}; \boldsymbol{\theta}, \Theta) \quad (2.37)$$

Burada  $\boldsymbol{\theta}$  önceden tanımlanmış ağ parametrelerini,  $\Theta$  hiper parametreleri temsil etmektedir. ESA yapılarının hiper parametreleri; filtre boyutları ve sayıları, biriktirme katmanı sayıları, mini-örnek sayısı, öğrenme oranı (learning rate), aktifleştirme fonksiyonu, sistemin en iyileme fonksiyonu gibi parametrelerdir. Mini-örnek sayısı, veri setinin parçalara ayrılarak öğrenme işleminin bu gruplarla gerçekleştirilmesine yardımcı olan bir parametredir. Bu, sistemin her bir iterasyonda aynı anda kaç giriş verisini işleyeceğini belirtir. Genellikle veri sayısına göre 2 ve katları olarak belirlenir. Mini-örnek sayısı, eğitim turu sayısı ile belirlenen bir süre boyunca tekrarlanır. Parametrelerin güncellenmesi için geri yayılım yöntemi kullanılır ve bu işlem türev olarak gerçekleştirilir. Elde edilen fark, öğrenme oranı parametresiyle çarpılır. Sonuç, ağırlık değerlerinden çıkarılarak yeni bir ağırlık değeri hesaplanır. Öğrenme oranı genellikle 0,01 veya 0,001 gibi değerler olarak seçilir. ESA eğitimi, eğitim aşaması, doğrulama aşaması ve test aşamasından oluşur. Eğitim aşamasında sabit  $\Theta$  parametreleri için en iyi  $\boldsymbol{\theta}$  değeri bulunur. Doğrulama aşamasında ise, en iyi  $\Theta$  değerleri bulunur. Test için ise ağırlık performansı, sistemin daha önce görmediği veriler üzerinde değerlendirilir. Bu algoritmalarından en popüler olanı *adam* iyileme yöntemidir. *Adam* yöntemi, Denklem 2.33'teki eşitliğin çözüm yöntemidir. Bu yöntem, toplu örnek güncellemesini ve  $\beta_1$  ve  $\beta_2$  adında iki hiperparametre ile sabit bir öğrenme oranı olan  $\eta'$  kullanır. Bu hiperparametrelerle birlikte birinci ve ikinci momentlerin sapmalı tahminleri olan ortalama  $m(n)$  ve merkezlenmemiş varyans  $v(n)$ , Denklem 2.38'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$\begin{aligned} m(n) &= \beta_1 m(n-1) + (1 - \beta_1) \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{\partial \varepsilon(k)}{\partial w(k)} \\ v(n) &= \beta_2 v(n-1) + (1 - \beta_2) \left( \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{\partial \varepsilon(k)}{\partial w(k)} \right)^2 \end{aligned} \quad (2.38)$$

$m(n)$  ve  $v(n)$ , sıfırlardan oluşan bir vektör olarak başlatılır. Bu da sıfıra doğru yanlı



bir tahmine yol açar. Bir sonraki adımda, bu yanlış tahminler aşağıda Denklem 2.39’da gösterildiği şekilde yansız tahmine dönüştürülür.

$$\begin{aligned}\hat{m}(n) &= \frac{m(n)}{1 - \beta_1^n} \\ \hat{v}(n) &= \frac{v(n)}{1 - \beta_2^n}\end{aligned}\tag{2.39}$$

Bu değerler ve öğrenme oranı  $\eta$  ile, gerçek ağırlık güncellemesi için nihai formül Denklem 2.40 gösterilir.

$$w(n) = w(n-1) - \eta \frac{\hat{m}(n)}{\sqrt{v(\hat{n}) + \varepsilon}}\tag{2.40}$$

Burada  $\varepsilon$  çok küçük bir sabittir. Test edilen makine öğrenimi problemleri için varsayılan değerler genellikle  $\eta = 0.001$ ,  $\beta_1 = 0.9$ ,  $\beta_2 = 0.999$  ve  $\varepsilon = 10^{-8}$  olarak kullanılır [53].

ESA yapılarının performans değerlendirmesi için amaca uygun olarak kullanılan farklı yöntemler vardır. Bu yöntemler, hiper parametreleri ayarlayarak öğrenilen modelde iyileştirmeler yapılabilmesi için geri bildirim sağlar. Performans değerlendirmesi sayesinde farklı modellerle elde edilen sonuçlar arasında ayırım yapılabilir. Örneğin ağ, sınıflandırma işlemi için eğitilecekse doğruluk, hata matrisi,  $F_1$ -skor gibi değerlerle daha doğru analiz yapılırken, sürekli bir çıktı tahmini yapan bağlanım problemlerinde ortalama kare hata ve ortalama mutlak hata ölçütleri ve tepe sinyal-gürültü oranı kullanılmaktadır. Ortalama kare hata hesaplama yöntemi Denklem 2.41’de verildiği gibidir.

$$\text{MSE} = \sum_{i=1}^R \frac{(t_i - y_i)^2}{R}\tag{2.41}$$

Burada  $R$  yanıt sayısı,  $t_i$  hedef çıktı ve  $y_i$  ağın  $i$  yanıt için tahminidir.  $l_2$  normu olarak da bilinen bu hata türü, tahmin ile gerçek arasındaki farkın karesinin alınıp toplanmış ortalamasıdır. Bu model, performansını tüm veri kümesi üzerinden değerlendirir. Bu hata modeliyle büyük hatalar açıkça vurgulanır.

Ortalama mutlak hata ise,  $Y$  tahminleri ve  $T$  eğitim hedefleri için Denklem 2.42'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left( \frac{1}{R} \sum_{i=1}^R |Y - T| \right) \quad (2.42)$$

Bu denklemde  $N$  gözlem sayısı ve  $R$  yanıt sayısıdır.  $l_1$  normu olarak bilinen bu modelde tahmin ile gerçek arasındaki negatif olmayan fark hesaplanır. Mutlak hata, analiz edilen verilerle aynı ölçüm birimindedir ve tüm tek hatalara aynı ağırlıkları verir ve aynı ölçek üzerinde kalır. Bu şekilde daha küçük piksel hatalarını ölçer. Karesel hata ile mutlak hata arasındaki temel fark, karesel hatanın büyük hataları mutlak hatadan daha büyük ölçüde cezalandırmasıdır. Bu, hataların sadece farkını hesaplamak yerine karesi alınarak bulunduğu için gerçekleşir. Çünkü hatalar sadece farkı hesaplamak yerine karesi alınarak bulunur. Tepe sinyal-gürültü oranı ise sinyalin maksimum gücü ile kalitesi gürültü ile bozulmuş sinyalin gücü arasındaki oranı desibel cinsinden Denklem 2.43'te olduğu gibi hesaplar.

$$PSNR = 10 \log_{10} \left( \text{tepe değeri}^2 / MSE \right) \quad (2.43)$$

Tepe değeri olarak gösterilen değer, örneğin 8-bit değere sahip bir görüntü ise 255 olarak belirlenir. Bu çalışma kapsamında, gürültülü ve dağınık ham radar görüntülerinin iyileştirilmesi amacıyla gürültü giderme problemi bir bağlanım yapısı olarak ele alınmıştır. Sistemdeki hata performansı değerlendirmeleri, ortalama kare hata, ortalama mutlak hata ve tepe sinyal-gürültü oranı gibi ölçütlere göre değerlendirilmiştir [54].

### 3. SAYISAL DENEYLER

#### 3.1. Veri Üretimi

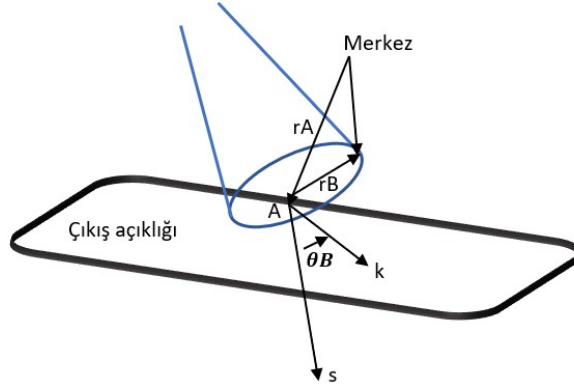
TYAR açıklıklı görüntü iyileştirme için ESA yapıları belirli bir sayıda ham veriye ihtiyaç duyar. Bu veriler ANSYS HFSS benzetim programı kullanılarak üretilmiştir. ANSYS HFSS yüksek frekanslı elektromanyetik alan modellemesi için kullanılan bir programdır. Radar kesit alanı bilgisi elde etmek için, içerisinde birden çok yüksek frekans yöntemi bulunmaktadır. Bunlardan biri Seken Işın Yöntemi (SIY) olup, RKA için oldukça etkili bir yöntemdir. Bu yöntem geometrik optik (GO) tabanlı olup, üç aşamada saçılma analizi yapar. Önce aydınlatma kaynağının özellikleri doğrultusunda ışınlar belirlenir. Daha sonra bu ışınlar takip edilerek Snell kanunları ve Fresnel yansımaya katsayıları kullanılarak cisim ile olan etkileşim hesaplanır. Son olarak her bir ışının geri saçılan alana olan katkısı bulunur. Bu kısımda ışın-tüp integrasyonu için Huygens prensipleri kullanılır. Geometrik optik yönteminde, elektrik alan Denklem 3.1'de gösterildiği gibi ifade edilir.

$$\mathbf{E}_i(\bar{x}_{i+1}, \bar{y}_{i+1}, \bar{z}_{i+1}) = (DF)_i \cdot (\bar{\Gamma})_i \cdot \mathbf{E}_i(\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i) \cdot e^{-j \left( k_0 \left[ (x_{i+1}-x_i)^2 + (y_{i+1}-y_i)^2 + (z_{i+1}-z_i)^2 \right]^{1/2} \right)} \quad (3.1)$$

Burada  $\mathbf{E}_i(\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i)$  noktasına gelen elektrik alanı ifade eder.  $\bar{\Gamma}_i$   $i$ . yansımaya bölgelerindeki düzlemsel yansımaya katsayılarını temsil ederken,  $(DF)_i$   $(i + 1)$ . yansımadan,  $i$ . yansımadan sonra türevsel ışının tüpünün dağılmasını hesaplamak için kullanılan bir ıraksama faktörüdür. Bu ıraksama faktörü eğri yüzeyler için hesaplanırken düzgün yüzeyler için 1 değerini alır.

Elektrik alan takip aşaması da yukarıda belirtildiği gibi yapıldıktan sonra, RKA hesabı için hedef Huygens yüzeyiyle kaplanmış gibi düşünülür ve ışın tüp integrasyonu, A noktasını kesen bir ışın tüpü olarak gösterildiği Şekil 3.1'deki geometriye göre gerçekleştirilir.

Bir uzak alan  $(r, \theta, \phi)$  noktası için ışın tüpün geri saçılan (back-scattered) elektrik alanı Denklem 3.2'de olduğu gibi ifade edilir.



Şekil 3.1 Seken ışın yöntemi geometrisi

$$\vec{E}^{bs} = \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \left[ \hat{\theta}^i A_\theta + \hat{\phi}^i A_\phi \right] \quad (3.2)$$

Çoklu yansımalarından sonra, en son ayrılan saçılma noktasındaki alan Denklem 3.3'te olduğu gibidir.  $H_{ap}$  açıklık bölgesindeki manyetik alanı,  $E_{ap}$  ise o bölgedeki elektrik alanı temsil eder [55].

$$\begin{bmatrix} A_\theta \\ A_\phi \end{bmatrix} = \left( \frac{jk}{2\pi} \right) \iint_{\text{tube}} e^{jk \cdot r'} \left\{ \begin{bmatrix} -\hat{\phi} \\ \hat{\theta} \end{bmatrix} \times \mathbf{E}_{ap}(\mathbf{r}') f_e + Z_0 \begin{bmatrix} \hat{\theta} \\ \hat{\phi} \end{bmatrix} \times \mathbf{H}_{ap}(\mathbf{r}') f_h \right\} \cdot \hat{n} dx' dy' \quad (3.3)$$

Burada

$$\vec{r} = \vec{r}_A + \vec{r}'$$

$$\vec{r}_A = x_A \hat{x} + y_A \hat{y} + z_A \hat{z}$$

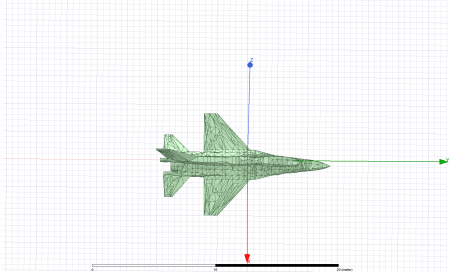
$$\vec{r}' = x \hat{x} + y \hat{y} + z \hat{z}$$

$$\vec{n} = n_x \hat{x} + n_y \hat{y} + n_z \hat{z} = \frac{x_a}{a} \hat{x} + \frac{y_a}{a} \hat{y} + \frac{z_a}{a} \hat{z}$$

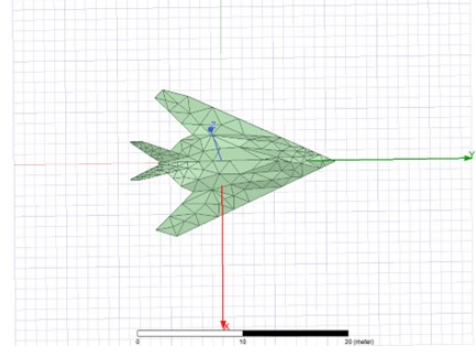
ile ifade edilir. ANSYS HFSS benzetim programı yukarıda bahsedilen yöntemi kullanarak RKA analizini yapmaktadır.

### **3.1.1. Karmaşık Hedeflerin SIY Yöntemi ile RKA Analizi**

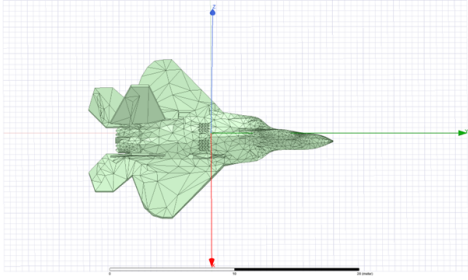
Bu bölümde hedeflerden toplanan RKA bilgilerinin hangi açı, frekans ve polarizasyon elde edildiği bilgileri verilecektir. Veri üretiminde kullanılan hedefler Şekil 3.3'te gösterildiği gibidir.



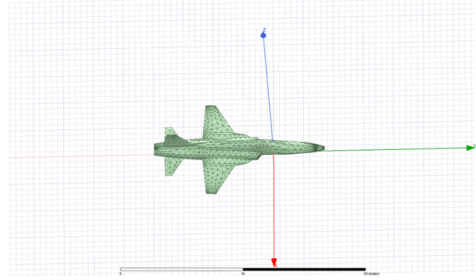
(a)



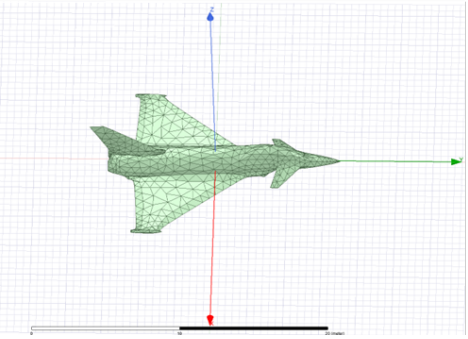
(b)



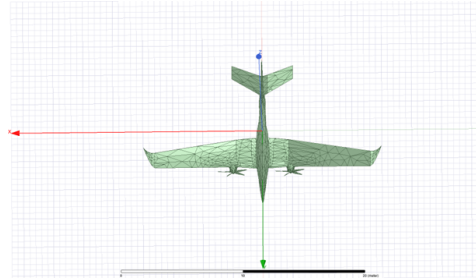
(c)



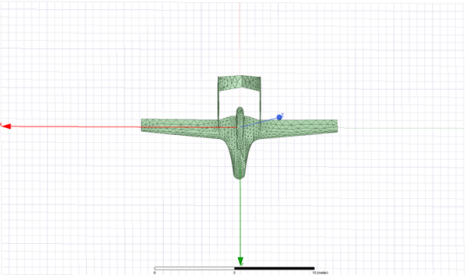
(d)



(e)



(f)



(g)

Şekil 3.2 RKA Bilgisi Toplanan Hedefler (a) F-16, (b) F-117, (c) F-22, (d) F-5, (e) EuroFighter Typhoon, (f) Akıncı, (g) TB2

Kullanılan bütün hedefler bilgisayar destekli tasarım için kullanılan STL dosyası formatındadır. Bu dosya formatında 3 boyutlu nesnelerin yüzey geometrisi üçgen yüzeylere bölünerek oluşturulur. Bu üçgen yüzeylerin sayısı, nesnenin boyutu ve karmaşıklığıyla doğru orantılı şekilde artar. Şekil 3.3'te verilen F-16 uçağı 3243 adet, F-117 hedefi 396 adet, F-22 hedefi 2893 adet, F-5 hedefi 3743 adet, EuroFighter Typhoon için 2659 adet, Akıncı için 2908 adet, TB2 için ise 4931 adet üçgen yüzey kullanılarak oluşturulmuştur. Tüm cisimler düzgün yüzeyli mükemmel iletken malzemeli (PEC) olarak tanımlanmıştır. Bu sayede geri saçılan alanlar daha güçlü bir şekilde saçılması sağlanmıştır. RKA analizi için çözüm yöntemi SIY olarak seçilmiş ve her cisim düzlem dalga ile  $0^{\circ}$ - $270^{\circ}$  aralığını tarayacak şekilde hem HH hem VV polarizasyonla aydınlatılmıştır. Aydınlatma açıları TYAR görüntü için dar açı-dar bant yaklaşımını sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Bütün aydınlatma açı ve frekans parametreleri Çizelge 3.1- 3.4'te gösterildiği gibidir.

Çizelge 3.1 RKA benzetim açı parametreleri  $f = 8$  GHz,  $\theta = 90^{\circ}$ , HH ve VV polarizasyon

Bakış Açısı $\phi$ ve Merkez Frekans	Hedef	Min. Yatay Bakış Açısı $\phi$	Max. Yatay Bakış Açısı $\phi$	$\Delta\phi$ (deg)
$0^{\circ}$ , 8 GHz	F-117	$-3,864^{\circ}$	$3,864^{\circ}$	$0,0644^{\circ}$
	F-22	$-3,767^{\circ}$	$3,767^{\circ}$	$0,0628^{\circ}$
$15^{\circ}$ , 8 GHz	F-117	$11,136^{\circ}$	$18,864^{\circ}$	$0,0644^{\circ}$
	F-22	$11,233^{\circ}$	$18,767^{\circ}$	$0,0628^{\circ}$
$30^{\circ}$ , 8 GHz	F-117	$26,136^{\circ}$	$33,864^{\circ}$	$0,0644^{\circ}$
	F-22	$26,233^{\circ}$	$33,767^{\circ}$	$0,0628^{\circ}$
$45^{\circ}$ , 8 GHz	F-117	$41,136^{\circ}$	$48,864^{\circ}$	$0,0644^{\circ}$
	F-22	$41,233^{\circ}$	$48,767^{\circ}$	$0,0628^{\circ}$
$60^{\circ}$ , 8 GHz	F-117	$56,136^{\circ}$	$63,864^{\circ}$	$0,0644^{\circ}$
	F-22	$56,233^{\circ}$	$63,767^{\circ}$	$0,0628^{\circ}$
$75^{\circ}$ , 8 GHz	F-117	$71,136^{\circ}$	$78,864^{\circ}$	$0,0644^{\circ}$
	F-22	$71,233^{\circ}$	$78,767^{\circ}$	$0,0628^{\circ}$

Çizelge 3.1 – Devam

<b>Bakış Açısı <math>\phi</math> ve Merkez Frekans</b>	<b>Hedef</b>	<b>Min. Yatay Bakış Açısı <math>\phi</math></b>	<b>Max. Yatay Bakış Açısı <math>\phi</math></b>	<b><math>\Delta\phi</math> (deg)</b>
90°, 8 GHz	F-117	86,136°	93,864°	0,0644°
	F-22	86,233°	93,767°	0,0628°
105°, 8 GHz	F-117	101,136°	108,864°	0,0644°
	F-22	101,233°	108,767°	0,0628°
120°, 8 GHz	F-117	116,136°	123,864°	0,0644°
	F-22	116,233°	123,767°	0,0628°
135°, 8 GHz	F-117	131,136°	138,864°	0,0644°
	F-22	131,233°	138,767°	0,0628°
150°, 8 GHz	F-117	146,136°	153,864°	0,0644°
	F-22	146,233°	153,767°	0,0628°
170°, 8 GHz	F-117	166,136°	173,864°	0,0644°
	F-22	166,233°	173,767°	0,0628°
210°, 8 GHz	F-117	206,136°	213,864°	0,0644°
	F-22	206,233°	213,767°	0,0628°
250°, 8 GHz	F-117	246,136°	253,864°	0,0644°
	F-22	246,233°	253,767°	0,0628°
270°, 8 GHz	F-117	266,136°	273,864°	0,0644°
	F-22	266,233°	273,767°	0,0628°



Çizelge 3.2 RKA benzetim açı parametreleri  $f = 10\text{GHz}$ ,  $\theta = 90^\circ$ , HH ve VV polarizasyon

Bakış Açısı $\phi$ ve Merkez Frekans	Hedef	Min. Yatay Bakış Açısı $\phi$	Max. Yatay Bakış Açısı $\phi$	$\Delta\phi(\text{deg})$
0°, 10 GHz	F-16	-4,142°	4,142°	0,069°
	F-117	-3,092°	3,092°	0,0515°
	F-22	-3,013°	3,013°	0,0502°
	F-5	-4,255°	4,255°	0,0709°
	Euro Fighter	-3,452°	3,452°	0,0575°
15°, 10 GHz	F-16	10,858°	19,142°	0,069°
	F-117	11,908°	18,092°	0,0515°
	F-22	11,987°	18,013°	0,0502°
	F-5	10,745°	19,255°	0,0709°
	Euro Fighter	11,548°	18,452°	0,0575°
30°, 10 GHz	F-16	25,858°	34,142°	0,069°
	F-117	26,908°	33,092°	0,0515°
	F-22	26,987°	33,013°	0,0502°
	F-5	25,745°	34,255°	0,0709°
	Euro Fighter	26,548°	33,452°	0,0575°
45°, 10 GHz	F-16	40,858°	49,142°	0,069°
	F-117	41,908°	48,092°	0,0515°
	F-22	41,987°	48,013°	0,0502°
	F-5	40,745°	49,255°	0,0709°
	Euro Fighter	41,548°	48,452°	0,0575°
60°, 10 GHz	F-16	55,858°	64,142°	0,069°
	F-117	56,908°	63,0927°	0,0515°
	F-22	56,987°	63,013°	0,0502°
	F-5	55,745°	64,255°	0,0709°

Çizelge 3.2 – Devam

<b>Bakış Açısı <math>\phi</math> ve Merkez Frekans</b>	<b>Hedef</b>	<b>Min. Yatay Bakış Açısı <math>\phi</math></b>	<b>Max. Yatay Bakış Açısı <math>\phi</math></b>	<b><math>\Delta\phi</math>(deg)</b>
	Euro Fighter	56,548°	63,452°	0,0575°
75°, 10 GHz	F-16	70,8583°	79,142°	0,069°
	F-117	71,908°	78,092°	0,0515°
	F-22	71,987°	78,013°	0,0502°
	F-5	70,745°	79,255°	0,0709°
	Euro Fighter	71,548°	78,452°	0,075°
90°, 10 GHz	F-16	85,858°	94,142°	0,069°
	F-117	86,908°	93,092°	0,0515°
	F-22	86,987°	93,013°	0,0502°
	F-5	85,754°	94,255°	0,0709°
	Euro Fighter	86,548°	93,452°	0,0575°
105°, 10 GHz	F-16	100,858°	109,142°	0,069°
	F-117	101,908°	108,092°	0,0515°
	F-22	101,987°	108,013°	0,0502°
	F-5	100,745°	109,255°	0,0709°
	Euro Fighter	101,548°	108,452°	0,0575°
120°, 10 GHz	F-16	115,858°	124,142°	0,069°
	F-117	116,908°	123,092°	0,0515°
	F-22	116,987°	123,013°	0,0502°
	F-5	115,745°	124,255°	0,0709°
	Euro Fighter	116,548°	123,452°	0,0575°
135°, 10 GHz	F-16	130,858°	139,142°	0,069°
	F-117	131,908°	138,092°	0,0515°
	F-22	131,987°	138,013°	0,0502°

Çizelge 3.2 – Devam

<b>Bakış Açısı <math>\phi</math> ve Merkez Frekans</b>	<b>Hedef</b>	<b>Min. Yatay Bakış Açısı <math>\phi</math></b>	<b>Max. Yatay Bakış Açısı <math>\phi</math></b>	<b><math>\Delta\phi</math>(deg)</b>
	F-5	130,745°	139,255°	0,0709°
	Euro Fighter	131,548°	138,452°	0,0575°
150°, 10 GHz	F-16	145,858°	154,142°	0,069°
	F-117	146,908°	153,092°	0,0515°
	F-22	146,987°	153,013°	0,0502°
	F-5	145,745°	154,255°	0,0709°
	Euro Fighter	146,548°	153,452°	0,0575°
170°, 10 GHz	F-16	165,858°	174,142°	0,069°
	F-117	166,908°	173,092°	0,0515°
	F-22	166,987°	173,013°	0,0502°
	F-5	165,754°	174,255°	0,0709°
	Euro Fighter	166,548°	173,452°	0,0575°
210°, 10 GHz	F-16	205,858°	214,142°	0,069°
	F-117	206,908°	213,092°	0,0515°
	F-22	206,987°	213,013°	0,0502°
	F-5	205,745°	214,255°	0,0709°
	Euro Fighter	206,548°	213,452°	0,0575°
210°, 10 GHz	F-16	205,858°	214,142°	0,069°
	F-117	206,908°	213,092°	0,0515°
	F-22	206,987°	213,013°	0,0502°
	F-5	205,745°	214,255°	0,0709°
	Euro Fighter	206,548°	213,452°	0,0575°
250°, 10 GHz	F-16	245,858°	254,142°	0,069°
	F-117	246,908°	253,092°	0,0515°

Çizelge 3.2 – Devam

<b>Bakış Açısı <math>\phi</math> ve Merkez Frekans</b>	<b>Hedef</b>	<b>Min. Yatay Bakış Açısı <math>\phi</math></b>	<b>Max. Yatay Bakış Açısı <math>\phi</math></b>	<b><math>\Delta\phi</math>(deg)</b>
	F-22	246,987°	253,013°	0,0502°
	F-5	245,745°	254,255°	0,0709°
	Euro Fighter	246,548°	253,452°	0,0575°
270°, 10 GHz	F-16	265,858°	274,142°	0,069°
	F-117	266,908°	273,092°	0,0515°
	F-22	266,987°	273,013°	0,0502°
	F-5	265,745°	274,255°	0,0709°
	Euro Fighter	266,548°	273,452°	0,0575°

Çizelge 3.3 RKA benzetim açısı parametreleri  $f = 12\text{GHz}$ ,  $\theta = 90^\circ$ , HH ve VV polarizasyon

<b>Bakış Açısı <math>\phi</math> ve Merkez Frekans</b>	<b>Hedef</b>	<b>Min. Yatay Bakış Açısı <math>\phi</math></b>	<b>Max. Yatay Bakış Açısı <math>\phi</math></b>	<b><math>\Delta\phi</math>(deg)</b>
0°, 12 GHz	F-16	-3,452°	3,452°	0,0575°
	F-117	-2,576°	2,576°	0,0429°
	F-22	-2,511°	2,511°	0,0419°
	F-5	-3,546°	3,546°	0,0591°
	Euro Fighter	-2,876°	2,876°	0,0479°
	Akıncı	-1,79°	1,79°	0,0298°
	TB2	-3,44°	3,44°	0,0573°
15°, 12 GHz	F-16	11,548°	18,452°	0,0575°
	F-117	12,424°	17,576°	0,0429°
	F-22	12,489°	17,511°	0,0419°
	F-5	11,454°	18,546°	0,0591°
	Euro Fighter	12,124°	17,876°	0,0479°

Çizelge 3.3 – Devam

Bakış Açısı $\phi$ ve Merkez Frekans	Hedef	Min. Yatay Bakış Açısı $\phi$	Max. Yatay Bakış Açısı $\phi$	$\Delta\phi$ (deg)
	Akıncı	13,210°	16,790°	0,0298°
	TB2	11,560°	18,44°	0,0573°
30°, 12 GHz	F-16	26,548°	33,452°	0,0573°
	F-117	27,424°	32,576°	0,0429°
	F-22	27,489°	32,511°	0,0419°
	F-5	26,454°	33,546°	0,0591°
	Euro Fighter	27,124°	32,876°	0,0479°
	Akıncı	28,210°	31,790°	0,0298°
	TB2	26,560°	33,440°	0,0573°
45°, 12 GHz	F-16	41,548°	48,452°	0,0575°
	F-117	42,424°	47,576°	0,0575°
	F-22	42,489°	47,511°	0,0419°
	F-5	41,454°	48,546°	0,0591°
	Euro Fighter	42,124°	47,876°	0,0479°
	Akıncı	43,210°	46,790°	0,0298°
	TB2	41,560°	48,440°	0,0573°
60°, 12 GHz	F-16	56,548°	63,452°	0,0575°
	F-117	57,424°	62,576°	0,0429°
	F-22	57,489°	62,511°	0,0419°
	F-5	56,454°	62,546°	0,0591°
	Euro Fighter	57,124°	62,876°	0,0479°
	Akıncı	58,210°	61,790°	0,0298°
	TB2	56,560°	63,440°	0,0573°
75°, 12 GHz	F-16	71,548°	48,452°	0,0575°
	F-117	72,424°	77,476°	0,0429°

Çizelge 3.3 – Devam

<b>Bakış Açısı <math>\phi</math> ve Merkez Frekans</b>	<b>Hedef</b>	<b>Min. Yatay Bakış Açısı <math>\phi</math></b>	<b>Max. Yatay Bakış Açısı <math>\phi</math></b>	<b><math>\Delta\phi</math>(deg)</b>
	F-22	72,489°	77,511°	0,0419°
	F-5	71,454°	78,546°	0,0591°
	Euro Fighter	72,124°	77,876°	0,0479°
	Akıncı	73,210°	76,790°	0,0298°
	TB2	76,560°	78,440°	0,0573°
90°, 12 GHz	F-16	86,548°	93,452°	0,0575°
	F-117	87,424°	92,576°	0,0429°
	F-22	87,489°	92,511°	0,0419°
	F-5	86,454°	93,546°	0,0591°
	Euro Fighter	87,124°	92,876°	0,0479°
	Akıncı	88,210°	91,790°	0,0298°
	TB2	86,560°	93,440°	0,0573°
105°, 12 GHz	F-16	101,548°	109,452°	0,0575°
	F-117	102,424°	107,576°	0,0429°
	F-22	103,489°	107,511°	0,0419°
	F-5	101,454°	108,546°	0,0591°
	Euro Fighter	102,124°	107,876°	0,0479°
	Akıncı	103,210°	106,790°	0,0298°
	TB2	101,560°	108,440°	0,0573°
120°, 12 GHz	F-16	116,548°	123,452°	0,0575°
	F-117	117,424°	122,576°	0,0429°
	F-22	117,489°	122,511°	0,0419°
	F-5	116,454°	123,546°	0,0591°
	Euro Fighter	117,124°	122,876°	0,0479°
	Akıncı	118,210°	121,790°	0,0298°

Çizelge 3.3 – Devam

<b>Bakış Açısı <math>\phi</math> ve Merkez Frekans</b>	<b>Hedef</b>	<b>Min. Yatay Bakış Açısı <math>\phi</math></b>	<b>Max. Yatay Bakış Açısı <math>\phi</math></b>	<b><math>\Delta\phi</math>(deg)</b>
	TB2	116,560°	123,440°	0,0573°
135°, 12 GHz	F-16	131,548°	138,452°	0,0575°
	F-117	133,424°	137,576°	0,0429°
	F-22	132,489°	137,511°	0,0419°
	F-5	131,454°	138,546°	0,0591°
	Euro Fighter	132,124°	137,876°	0,0479°
	Akıncı	133,210°	136,790°	0,0298°
	TB2	131,560°	138,440°	0,0573°
150°, 12 GHz	F-16	146,548°	153,452°	0,0575°
	F-117	147,424°	152,576°	0,0429°
	F-22	147,489°	152,511°	0,0419°
	F-5	146,454°	153,546°	0,0591°
	Euro Fighter	147,124°	152,876°	0,0479°
	Akıncı	148,210°	151,790°	0,0298°
	TB2	146,560°	153,440°	0,0573°
170°, 12 GHz	F-16	166,548°	173,452°	0,0575°
	F-117	167,424°	172,576°	0,0429°
	F-22	167,489°	172,511°	0,0419°
	F-5	166,454°	173,546°	0,0591°
	Euro Fighter	167,124°	172,876°	0,0479°
	Akıncı	168,210°	171,790°	0,0298°
	TB2	166,560°	173,440°	0,0573°
210°, 12 GHz	F-16	206,548°	213,452°	0,0575°
	F-117	207,424°	212,576°	0,0429°
	F-22	207,489°	212,511°	0,0419°

210°, 12 GHz

Çizelge 3.3 – Devam

<b>Bakış Açısı <math>\phi</math> ve Merkez Frekans</b>	<b>Hedef</b>	<b>Min. Yatay Bakış Açısı <math>\phi</math></b>	<b>Max. Yatay Bakış Açısı <math>\phi</math></b>	<b><math>\Delta\phi</math>(deg)</b>
	F-5	206,454°	213,546°	0,0591°
	Euro Fighter	207,124°	212,876°	0,0479°
	Akıncı	208,210°	211,790°	0,0298°
	TB2	206,560°	213,44°	0,0573°
250°, 12 GHz	F-16	246,548°	253,452°	0,0575°
	F-117	247,424°	252,576°	0,0429°
	F-22	247,489°	252,511°	0,0419°
	F-5	246,454°	253,546°	0,0591°
	Euro Fighter	247,124°	252,876°	0,0479°
	Akıncı	248,210°	251,790°	0,0298°
	TB2	246,560°	253,44°	0,0573°
270°, 12 GHz	F-16	266,548°	273,452°	0,0575°
	F-117	267,424°	272,576°	0,0429°
	F-22	267,489°	272,511°	0,0419°
	F-5	266,454°	273,546°	0,0591°
	Euro Fighter	267,124°	272,876°	0,0479°
	Akıncı	268,210°	271,790°	0,0298°
	TB2	266,560°	273,44°	0,0573°



Çizelge 3.4 RKA benzetim için frekans parametreleri

Merkez Frekans Değeri	Hedef	En Küçük Frekans (GHz)	En Küçük Frekans (GHz)	En Küçük Frekans (GHz)
8 GHz	F-117	7,45	8,54	6,0901 MHz
	F-22	-2,511°	2,511°	0,0419°
10 GHz	F-16	9,28	10,71	7,8989 MHz
	F-117	9,45	10,54	6,0901 MHz
	F-22	9,42	10,57	6,397 MHz
	F-5	9,31	10,68	7,6243 MHz
	Euro Fighter	9,32	10,67	7,5211 MHz
12 GHz	F-16	9,28	10,71	7,8989 MHz
	F-117	9,45	10,54	6,0901 MHz
	F-22	9,42	10,57	6,397 MHz
	F-5	9,31	10,68	7,6243 MHz
	Euro Fighter	9,32	10,67	7,5211 MHz
	Akıncı	11,16	12,83	9,2593 MHz
	TB2	11,14	12,85	9,4697 MHz

### 3.2. Ters Yapay Açıklıklı Görüntü Oluşturma

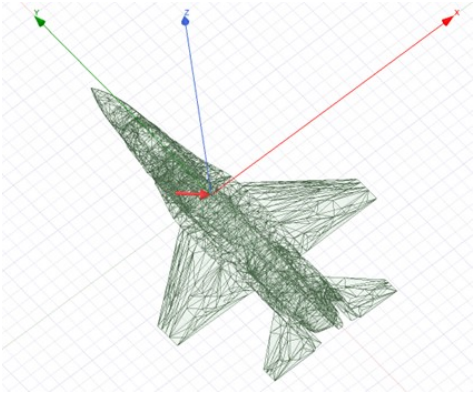
Bu bölümde hedeflere ait hem TYAR görüntüleri ve saçılma merkezi analizleri verilmiştir.

Çizelge 3.5 TYAR görüntüleme parametreleri

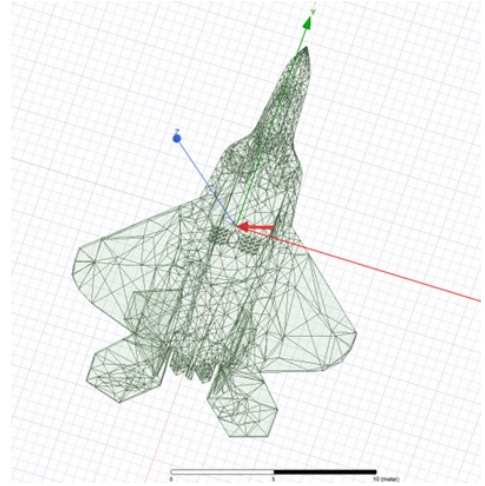
<b>Hedef</b>	<b>Boyutlar</b>	<b>Menzil Çözünürlük <math>\Delta x</math></b>	<b>Yanca Çözünürlük <math>\Delta y</math></b>	<b>Menzil Genişlik <math>X_{max}</math></b>	<b>Yanca Genişlik <math>Y_{max}</math></b>
F-16	X=15m Y=9,45m Z=5,108m	0,1055 m	0,10375 m	18,99 m	12,45 m
F-117	X=20,08m Y=13,2m Z=3,78m	0,1369 m	0,139 m	24,63 m	16,68 m
F-22	X=18,9m Y=13,56m Z=5,08m	0,13027 m	0,1426 m	23,4489 m	17,112 m
F-5	X=14,681m Y=8,128m Z=4,06m	0,1093 m	0,1010 m	19,674 m	12,12 m
EuroFighter	X=15,96m Y=10,95m Z=5,28m	0,1108 m	0,1245 m	19,944 m	14,94 m
Akıncı	X=12,2m Y=20m Z=4,1m	0,09 m	0,2 m	16,2 m	24 m
TB2	X=12m Y=6,5m Z=2,2m	0,088 m	0,10411 m	15,84 m	12,492 m

Dar açı-dar bant yöntemine göre belirlenen TYAR görüntüleme parametreleri Çizelge

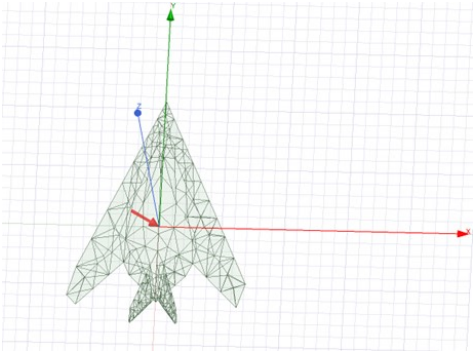
3.5'te verildiği gibidir. Her bir hedefin aydınlatılma açısı Şekil 3.3'te 3 boyutlu olarak gösterilmiştir. Her bir şekil üzerindeki kırmızı ok gelen dalgayı ifade etmektedir. Bölüm 2.2.1'de verilen tasarım aşamalarına uygun şekilde menzil ve yanca genişlik ve çözünürlük değerleri seçilmiştir. Tasarımın etkin kullanımını göstermek adına aşağıda hedeflerin görüntüsünün oluşturulmasına ilişkin bazı örnek sonuçlar gösterilmiş ve daha önce bahsedildiği gibi sıfır doldurma yöntemi ile 4 kat daha boyutu artırılan görüntünün Ters Fourier Dönüşümü alınarak MATLAB yardımı ile TYAR görüntüleri oluşturulmuştur. Aynı zamanda saçılma merkezi bilgisi çıkartılarak TYAR görüntü oluşturma konusunda Bölüm 2.2.2'de bahsedilen CLEAN algoritması ile hedeflerin TYAR görüntüleri oluşturulmuş ve bu bölümde sunulmuştur.



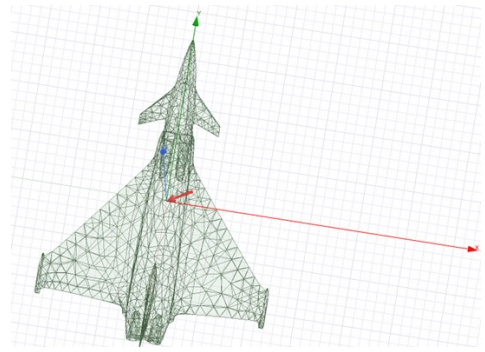
(a)



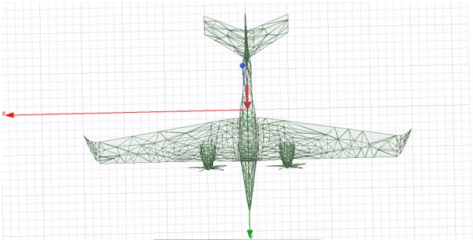
(b)



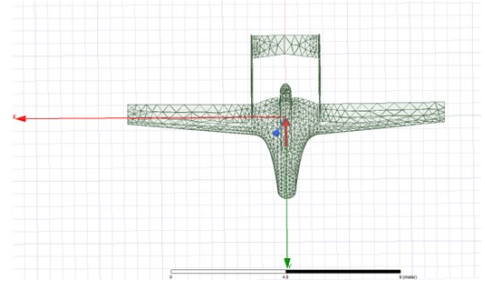
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 3.3 Hedeflerin aydınlatılma açıları (a) F-16  $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 135^\circ$  (b) F-22  $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 15^\circ$  (c) F-117  $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 150^\circ$  (d) EuroFighter Typhoon  $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 30^\circ$  (e) Akıncı  $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 270^\circ$  (f) TB2  $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 90^\circ$

### 3.2.1. F-16 Hedefinin $\theta = 90^\circ$ , $\phi = 135^\circ$ için Oluşturulan Benzetim Sonuçları

Merkez  $\phi$  bakış açısı  $135^\circ$  olan düzlem dalga ile aydınlatılan F-16 uçağının TYAR görüntüsü için kullanılan benzetim parametreleri Çizelge 3.6’te sunulmuştur.

Çizelge 3.6 TYAR Benzetim Parametreleri (F-16)

Frekans	[9,28-10,71] GHz (180 nokta)
Bakış Açısı	$\theta=90^\circ$ $\phi=130,858^\circ - 139,142^\circ$ (120 nokta)
Menzil ve Yanca Bant Genişlikleri	Xmax=18,99m Ymax =12,45m
Polarizasyon	VV
Frekans Çözünürlüğü ( $\Delta f$ )	7,8989 MHz
Açı Çözünürlüğü ( $\Delta \phi$ )	0,069°

Menzil  $X_{\max}$ , yanca için  $Y_{\max}$  değerlerinin görüntü boyutları Çizelge 3.6’te verildiği gibi seçildikten sonra, frekans çözünürlüğü  $\Delta f$  ve açı çözünürlüğü  $\Delta \phi$  Denklem 2.25 ’te verildiği gibi hesaplanırsa, frekans çözünürlüğü 7,8989 MHz, açı çözünürlüğü ise  $0,01204^\circ$  olarak bulunur.

Bu durumda frekans bant genişliği, B ve açısal genişlik,  $\Omega$ , aşağıdaki gibi hesaplanır.

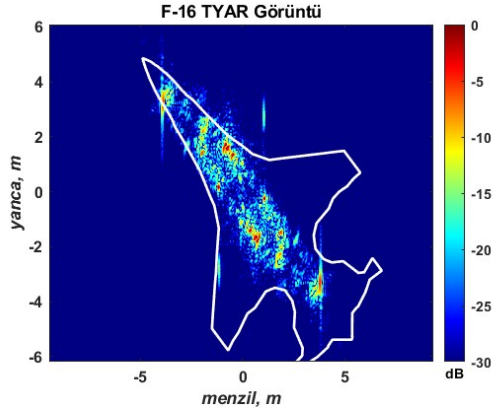
$$B = \Delta f N_x = (7,89 \text{ MHz})(180) = 1421,8 \text{ MHz}$$

$$\Omega = \Delta \phi N_y = (0,069^\circ)(120) = 8,2837^\circ$$

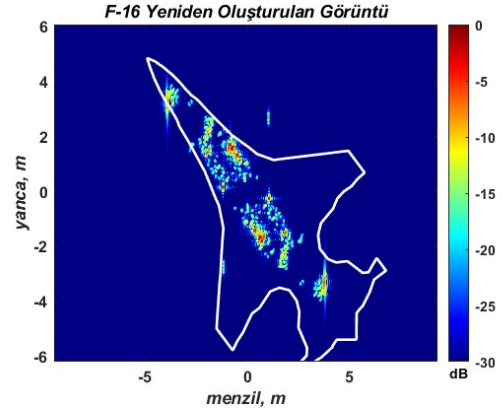
Dar bant yaklaşımını sağlamak için, bant genişliğinin merkez frekans değerinin yaklaşık onda biri kadar küçük olması gerekmektedir. Sonuçlardan da görüleceği üzere merkez frekansı 10GHz olan hedef için bant genişliği 1421,8 MHz olarak bulunmuş ve 7,03 kat daha az olduğu görülmüştür.

Dar açı yaklaşımı için ise  $\phi$  açısı  $130,858^\circ$  (2,283 rad) –  $139,142^\circ$  (2,428 rad) derece aralığını taramakta olup, bu açılarda tüm azimut açıları  $\sin \phi \cong \phi$  yaklaşımını sağlamaktadır.

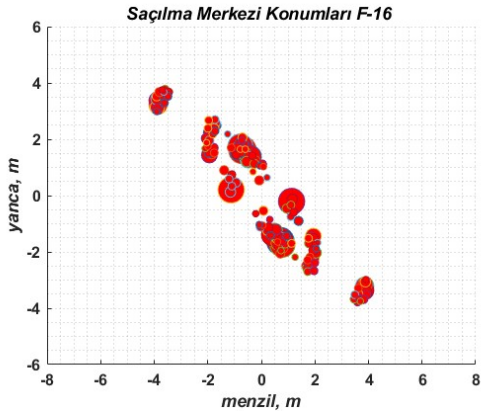
Bu parametreler kullanılarak toplam 180x120 boyutunda geri saçılan elektrik alan bilgisi elde edilmiş ve görüntülerin kalitesini artırmak amacıyla sıfır doldurma yöntemiyle boyutları 4 katına çıkarılmıştır. Sonuç olarak, 720x480 boyutunda TYAR görüntüsü MATLAB kullanılarak Ters Fourier Dönüşümü ile elde edilmiştir. Bu görüntü Şekil 3.4 (a)'da gösterilmiştir. Aynı açı ve frekans aralığında, saçılma merkezi analizi için CLEAN algoritması kullanılarak 300 adet saçılma merkezi çıkarılmış ve yeniden oluşturulan görüntü Şekil 3.4 (b)'de gösterilmiştir. Şekil 3.4 (c)'de saçılma merkezlerinin menzil ve yanca konumları, Şekil 3.4 (d)'de ise saçılma merkezlerinin genlikleri görülmektedir.



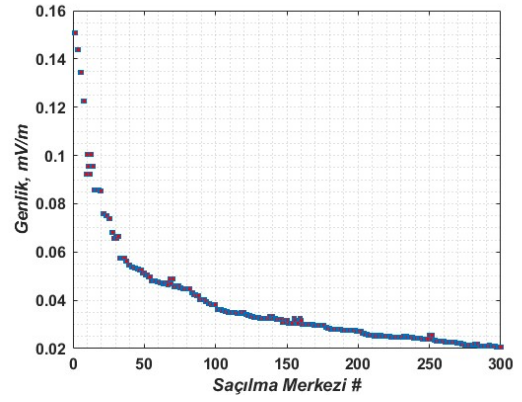
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.4 (a) F-16 hedefinin  $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 135^\circ$  2B TYAR görüntüsü (b) Saçılma merkezleri ile yeniden oluşturulmuş 2B TYAR görüntü (c) 300 adet saçılma merkezinin yerleri (d) Saçılma merkezi genlikleri

### 3.2.2. F-22 Hedefinin $\theta = 90^\circ$ , $\phi = 15^\circ$ için Oluşturulan Benzetim Sonuçları

Merkez  $\phi$  bakış açısı  $15^\circ$  olan düzlem dalga ile aydınlatılan F-22 uçağının TYAR görüntüsü için kullanılan benzetim parametreleri Çizgelge 3.7’te verilmiştir.

Tabloda verilen değerler doğrultusunda frekans bant genişliği, B ve açısal genişlik,  $\Omega$ , hesabı aşağıdaki gibi yapılmıştır.

$$B = \Delta f N_x = (6,397 \text{ MHz})(180) = 1151,46 \text{ MHz}$$

$$\Omega = \Delta \phi N_y = (0,0628^\circ)(120) = 7,536^\circ$$

Çizelge 3.7 TYAR Benzetim Parametreleri (F-22)

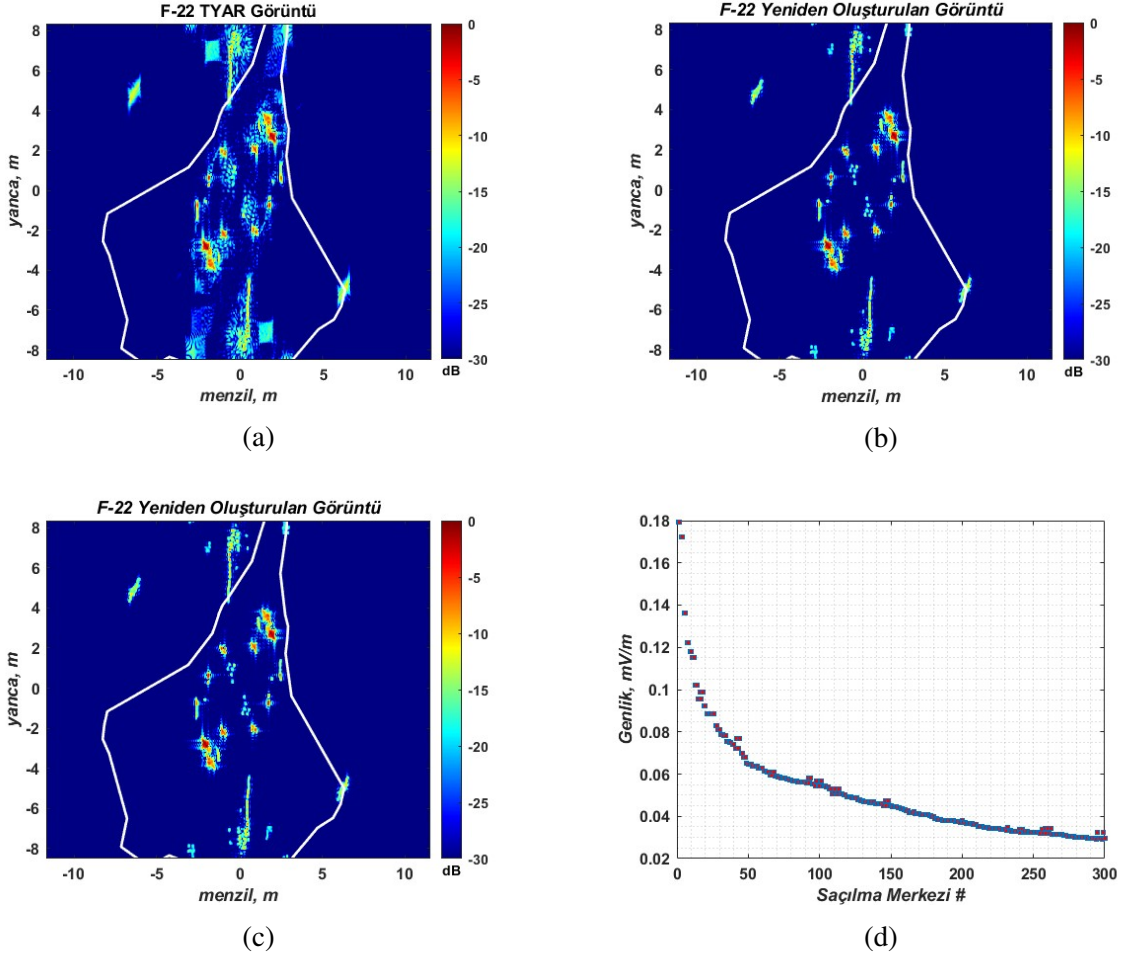
Frekans	[7,42-8,57] GHz (180 nokta)
Bakış Açısı	$\theta=90^\circ$ $\phi=11,233^\circ - 18,767^\circ$ (120 nokta)
Menzil ve Yanca Bant Genişlikleri	Xmax=23,448m Ymax =17,112m
Polarizasyon	HH
Frekans Çözünürlüğü ( $\Delta f$ )	6,397 MHz
Açı Çözünürlüğü ( $\Delta \phi$ )	0,0628°

Dar bant yaklaşımını sağlamak için, sonuçlardan da görüleceği üzere merkez frekansı 8 GHz olan hedef için bant genişliği 1151,46 MHz olarak bulunmuş ve 6,95 kat daha az olduğu görülmüştür.

Dar açı yaklaşımı için ise  $\phi$  açısı  $11,233^\circ$ (0,196 rad) –  $18,767^\circ$ (0,327 rad) derece aralığını taramakta olup, bu açılarda tüm azimut açıları  $\sin \phi \cong \phi$  yaklaşımını sağlamaktadır.

Seçilen parametreler kullanılarak 180x120 boyutunda geri saçılan elektrik alan bilgisi toplanmıştır. Ardından, görüntü kalitesini artırmak için *sıfır doldurma* yöntemiyle verilerin boyutu 4 katına çıkarılarak 720x480 boyutunda Ters Fourier Dönüşümü ile TYAR görüntüsü elde edilmiştir. Bu görüntü Şekil 3.5 (a)'da gösterilmektedir. CLEAN algoritması kullanılarak 300 adet saçılma merkezi bilgisi çıkarılmış ve görüntü yeniden oluşturulmuştur, bu sonuç Şekil 3.5 (b)'de gösterilmektedir. Şekil 3.5 (c)'de saçılma merkezlerinin menzil-yanca konumları, Şekil 3.5(d)'de ise saçılma merkezlerinin genlikleri görülebilir.





Şekil 3.5 (a) F-22 hedefinin  $\theta = 90^\circ, \phi = 15^\circ$  2B TYAR görüntüsü (b) Saçılma merkezleri ile yeniden oluşturulmuş 2B TYAR görüntü (c) 300 adet saçılma merkezinin yerleri (d) Saçılma merkezi genlikleri

### 3.2.3. F-117 Hedefinin $\theta = 90^\circ, \phi = 150^\circ$ için Oluşturulan Benzetim Sonuçları

Merkez  $\phi$  bakış açısı  $150^\circ$  olan düzlem dalga ile aydınlatılan F-117 uçağının TYAR görüntüsü için kullanılan benzetim parametreleri Çizelge 3.8’de verilmiştir.

Tabloda verilen değerler ile frekans bant genişliği, B ve açisal genişlik,  $\Omega$ , hesaplanacak olursa;

Çizelge 3.8 TYAR Benzetim Parametreleri (F-117)

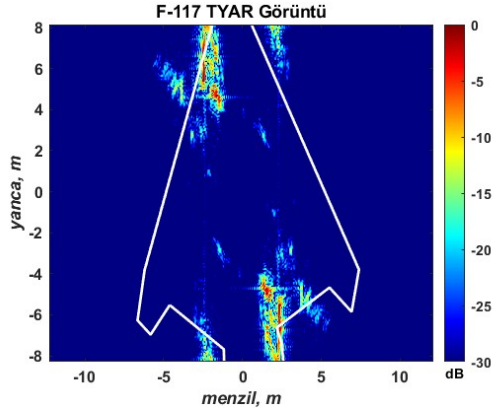
Frekans	[9,45-10,54] GHz (180 nokta)
Bakış Açısı	$\theta=90^\circ$ $\phi=146,908^\circ - 153,092^\circ$ (120 nokta)
Menzil ve Yanca Bant Genişlikleri	Xmax=24,63m Ymax =16,68m
Polarizasyon	HH
Frekans Çözünürlüğü ( $\Delta f$ )	6,0901 MHz
Açı Çözünürlüğü ( $\Delta \phi$ )	0,0515°

$$B = \Delta f N_x = (6,0901 \text{ MHz})(180) = 1096,224 \text{ MHz}$$

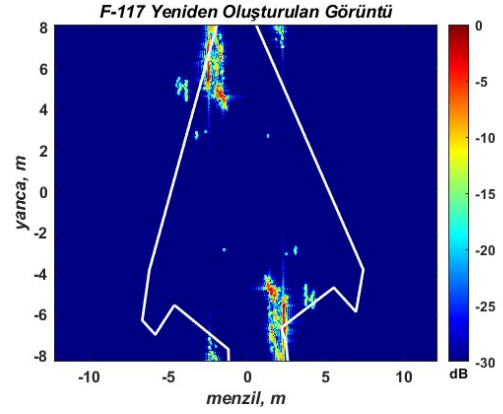
$$\Omega = \Delta \phi N_y = (0,0515^\circ)(120) = 6,183^\circ$$

olarak bulunur Dar bant yaklaşımını sağlamak için, sonuçlardan da görüleceği üzere merkez frekansı 10 GHz olan hedef için bant genişliği 1096,224 MHz olarak bulunmuş ve 9,12 kat daha az olduğu görülmüştür. Dar açı yaklaşımı için ise  $\phi$  açısı  $146,908^\circ(2,564 \text{ rad}) - 153,092^\circ(2,671 \text{ rad})$  derece aralığını taramakta olup, bu açılarda tüm azimut açıları  $\sin \phi \cong \phi$  yaklaşımını sağlamıştır.

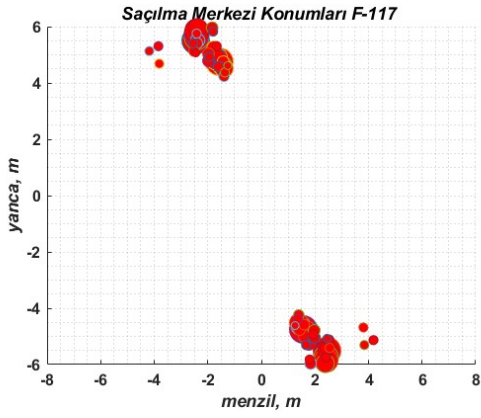
Parametreler kullanılarak geri saçılan elektrik alan bilgisi toplanmış ve Ters Fourier Dönüşümü ile elde edilen 2 boyutlu TYAR görüntüsü Şekil 3.6(a)'da gösterilmektedir. CLEAN algoritması kullanılarak 300 adet saçılma merkezi bilgisi çıkarılmış ve yeniden oluşturulan görüntü Şekil 3.6(b)'de sunulmaktadır. Şekil 3.6 (c)'de saçılma merkezlerinin menzil-yanca konumları, Şekil 3.6 (d)'de ise saçılma merkezlerinin genlikleri görülmektedir. Kanat bölgesinin köşe uçlarında saçılma merkezlerinin yoğunlaştığı görülmüştür.



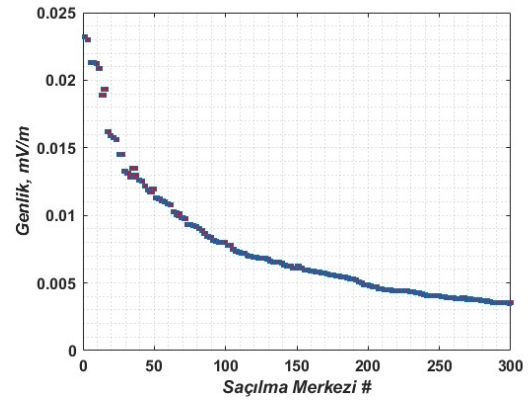
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.6 (a) F-117 hedefinin  $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 150^\circ$  2B TYAR görüntüsü (b) Saçılma merkezleri ile yeniden oluşturulmuş 2B TYAR görüntü (c) 300 adet saçılma merkezinin yerleri (d) Saçılma merkezi genlikleri

### 3.2.4. EuroFighter Typhoon Hedefinin $\theta = 90^\circ$ , $\phi = 30^\circ$ için Oluşturulan Benzetim Sonuçları

Merkez  $\phi$  bakış açısı  $30^\circ$  olan düzlem dalga ile aydınlatılan EuroFighter Typhoon uçağının TYAR görüntüsü için kullanılan benzetim parametreleri Çizelge 3.9'da verilmiştir.

Tabloda verilen değerler ile frekans bant genişliği, B ve açisal genişlik,  $\Omega$ , hesaplanacak olursa;

Çizelge 3.9 TYAR Benzetim Parametreleri (EuroFighter Typhoon)

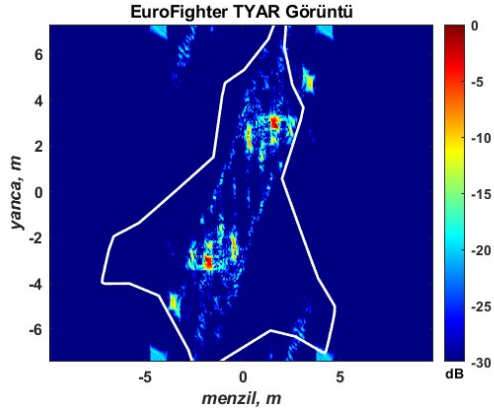
Frekans	[9,32-10,67] GHz (180 nokta)
Bakış Açısı	$\theta=90^\circ$ $\phi=26,548^\circ - 33,542^\circ$ (120 nokta)
Menzil ve Yanca Bant Genişlikleri	Xmax=19,944m Ymax =14,94m
Polarizasyon	HH
Frekans Çözünürlüğü ( $\Delta f$ )	7,5211 MHz
Açı Çözünürlüğü ( $\Delta \phi$ )	0,0575°

$$B = \Delta f N_x = (7,5211 \text{ MHz})(180) = 1353,798 \text{ MHz}$$

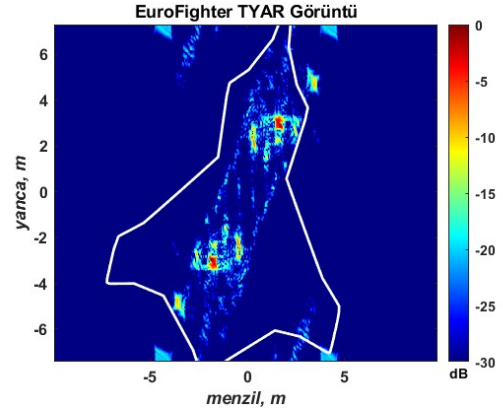
$$\Omega = \Delta \phi N_y = (0,0575^\circ)(120) = 6,9031^\circ$$

olarak bulunur. Dar bant yaklaşımını sağlamak için, sonuçlardan da görüleceği üzere merkez frekansı 10 GHz olan hedef için bant genişliği 1353,798 MHz olarak bulunmuş ve 7,38 kat daha az olduğu görülmüştür. Dar açı yaklaşımı için ise  $\phi$  açısı  $26,548^\circ$  (0,463 rad) –  $33,542^\circ$  (0,585 rad) derece aralığını taramakta olup, bu açılarda tüm azimut açıları  $\sin \phi \cong \phi$  yaklaşımını sağlamıştır.

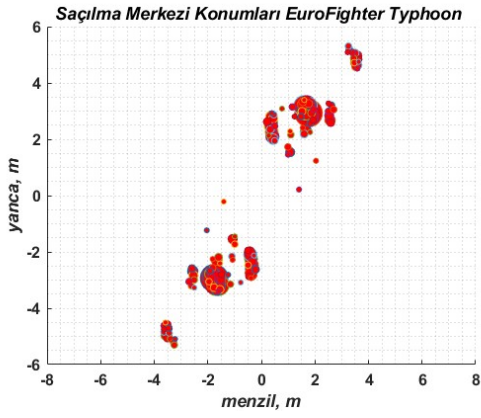
Geri saçılan elektrik alan bilgisi toplanmış ve Ters Fourier Dönüşümü ile elde edilen 2 boyutlu TYAR görüntüsü Şekil 3.16(a)'da gösterilmiştir. Aynı açı ve frekans aralığında CLEAN algoritması kullanılarak 300 adet saçılma merkezi çıkarılmış ve yeniden oluşturulan görüntü Şekil 3.16(b)'de sunulmaktadır. Şekil 3.16(c)'de saçılma merkezlerinin menzil-yanca konumları, Şekil 3.16(d)'de ise saçılma merkezlerinin genlikleri görülmektedir.



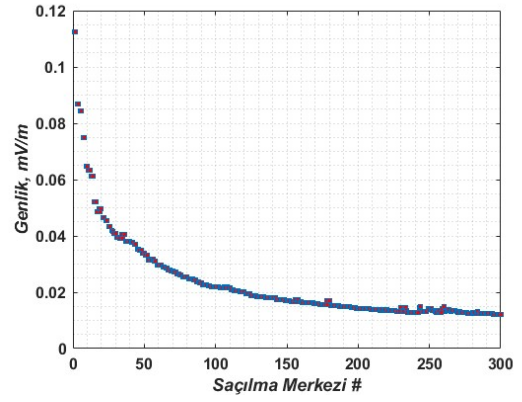
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.7 (a) EuroFighter Typhoon hedefinin  $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 30^\circ$  2B TYAR görüntüsü (b) Saçılma merkezleri ile yeniden oluşturulmuş 2B TYAR görüntü (c) 300 adet saçılma merkezinin yerleri (d) Saçılma merkezi genlikleri

### 3.2.5. Akıncı Hedefinin $\theta = 90^\circ$ , $\phi = 270^\circ$ için Oluşturulan Benzetim Sonuçları

Merkez  $\phi$  bakış açısı  $270^\circ$  olan düzlem dalga ile aydınlatılan Akıncı uçağının TYAR görüntüsü için kullanılan benzetim parametreleri Çizelge 3.10'de verilmiştir.

Tabloda verilen değerler ile frekans bant genişliği, B ve açılal genişlik,  $\Omega$ , değerleri aşağıdaki gibidir.

Çizelge 3.10 TYAR Benzetim Parametreleri (Akıncı)

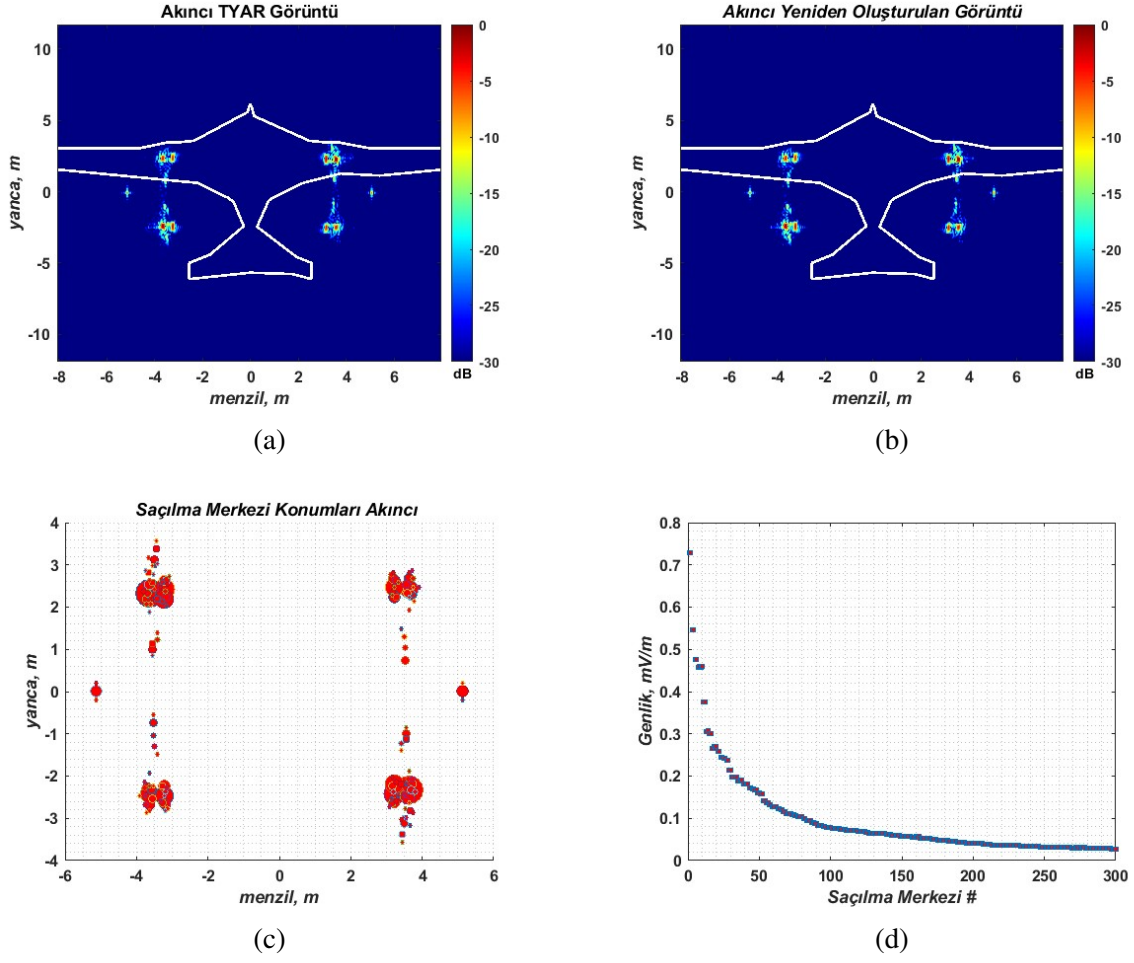
Frekans	[11,16-12,83] GHz (180 nokta)
Bakış Açısı	$\theta=90^\circ$ $\phi=268,210^\circ - 271,790^\circ$ (120 nokta)
Menzil ve Yanca Bant Genişlikleri	$X_{\max}=16,2\text{m}$ $Y_{\max}=24\text{m}$
Polarizasyon	VV
Frekans Çözünürlüğü ( $\Delta f$ )	9,2593 MHz
Açı Çözünürlüğü ( $\Delta \phi$ )	0,0298°

$$B = \Delta f N_x = (9,2593 \text{ MHz})(180) = 1666,7 \text{ MHz}$$

$$\Omega = \Delta \phi N_y = (0,0298^\circ)(120) = 3,581^\circ$$

Dar bant yaklaşımını sağlamak için, merkez frekansı 12 GHz olan hedef için bant genişliği 1666,7 MHz olarak bulunmuş ve 7,19 kat daha az olduğu görülmüştür. Dar açı yaklaşımı için ise  $\phi$  açısı  $268,210^\circ(4,681 \text{ rad}) - 271,790^\circ(4,743 \text{ rad})$  derece aralığını taramakta olup, bu açılarda tüm azimut açıları  $\sin \phi \cong \phi$  yaklaşımını sağlamaktadır.

Şekil 3.8(a)'da, geri saçılan elektrik alan bilgisine Ters Fourier Dönüşümü uygulanarak elde edilen 2 boyutlu TYAR görüntüsü sunulmuştur. 300 adet saçılma merkezi bilgisi çıkarılmış ve yeniden oluşturulan görüntü Şekil 3.8(b)'de gösterilmektedir. Şekil 3.8(c)'de, çıkarılan saçılma merkezlerinin menzil-yanca konumları, Şekil 3.8(d)'de ise saçılma merkezlerinin genlikleri görülmektedir. Arka kuyruk bölgesinden aydınlatılan Akıncı hedefine ait saçılma merkezlerinin kuyruk köşelerinde yoğunlaştığı görülmüştür.



Şekil 3.8 (a) Akıncı  $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 270^\circ$  2B TYAR görüntüsü (b) Saçılma merkezleri ile yeniden oluşturulmuş 2B TYAR görüntü (c) 300 adet saçılma merkezinin yerleri (d) Saçılma merkezi genlikleri

### 3.2.6. Bayraktar TB2 Hedefinin $\theta = 90^\circ$ , $\phi = 90^\circ$ için Oluşturulan Benzetim Sonuçları

Merkez  $\phi$  bakış açısı  $90^\circ$  olan düzlem dalgı ile aydınlatılan Akıncı uçağının TYAR görüntüsü için kullanılan benzetim parametreleri Çizelge 3.11 'de verilmiştir.

Tabloda verilen değerler ile frekans bant genişliği, B ve açısıl genişlik,  $\Omega$ , değerleri aşağıdaki gibidir.

Çizelge 3.11 TYAR Benzetim Parametreleri (Bayraktar TB2)

Frekans	[11,14-12,85] GHz (180 nokta)
Bakış Açısı	$\theta=90^\circ$ $\phi=86,569^\circ - 93,440^\circ$ (120 nokta)
Menzil ve Yanca Bant Genişlikleri	Xmax=15,84m Ymax =12,492m
Polarizasyon	HH
Frekans Çözünürlüğü ( $\Delta f$ )	9,4697 MHz
Açı Çözünürlüğü ( $\Delta \phi$ )	0,0573°

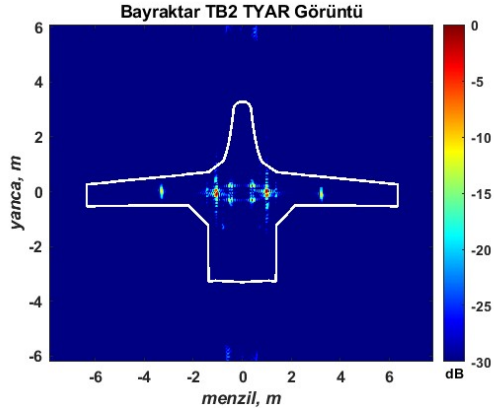
$$B = \Delta f N_x = (9,4697 \text{ MHz})(180) = 1704,5 \text{ MHz}$$

$$\Omega = \Delta \phi N_y = (0,0573^\circ)(120) = 6,8799^\circ$$

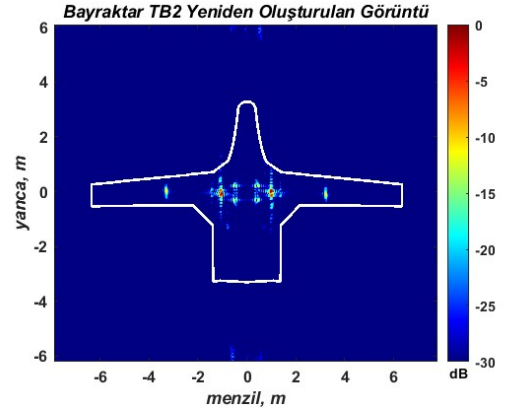
Dar bant yaklaşımını sağlamak için, merkez frekansı 12 GHz olan hedef için bant genişliği 1704,5 MHz olarak bulunmuş ve 7,04 kat daha az olduğu görülmüştür. Dar açı yaklaşımı için ise  $\phi$  açısı  $86,560^\circ(1,51 \text{ rad}) - 93,440^\circ(0,519 \text{ rad})$  derece aralığını taramakta olup, bu açılarda tüm azimut açıları  $\sin \phi \cong \phi$  yaklaşımını sağlamaktadır.

Şekil 3.9(a)'da, geri saçılan elektrik alan bilgisi toplanarak 2 boyutlu TYAR görüntüsü elde edilmiştir. Saçılma merkezleri kullanılarak görüntü tekrar oluşturulmuş ve Şekil 3.9(b)'de gösterilmiştir. Şekil 3.9(c)'de, çıkarılan saçılma merkezlerinin menzil-yanca konumları, Şekil 3.9(d)'de ise saçılma merkezlerinin genlikleri görülmektedir. Kanat bölgesinden aydınlatılan hedefin saçılma merkezlerinin kanat uç bölgelerinde yoğunlaştığı görülmüştür.

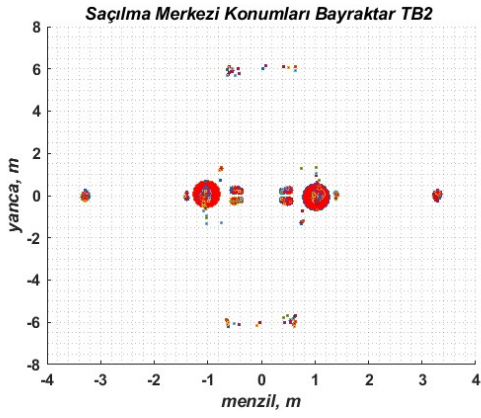




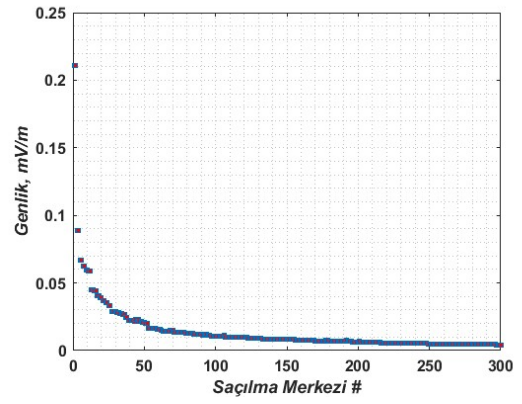
(a)



(b)



(c)

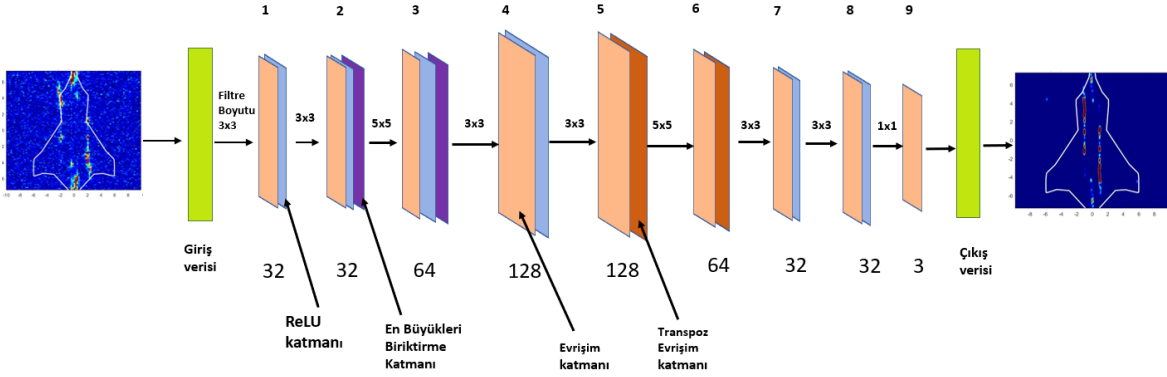


(d)

Şekil 3.9 (a) Bayraktar TB2  $\theta = 90^\circ, \phi = 90^\circ$  2B TYAR görüntüsü (b) Saçılma merkezleri ile yeniden oluşturulmuş 2B TYAR görüntü (c) 300 adet saçılma merkezinin yerleri (d) Saçılma merkezi genlikleri

### 3.3. Evrişimsel Sinir Ağı Yapısı

Bu bölümde, çalışma kapsamında TYAR görüntü eğitimi için kullanılan ESA yapısı ve bu yapıya ait eğitim parametrelerinden bahsedilmiştir. Yapılan çalışmada 2 farklı ESA yapısı kurulmuştur. Bunlardan biri 21 katmandan oluşan Şekil 3.10'de gösterildiği gibidir.

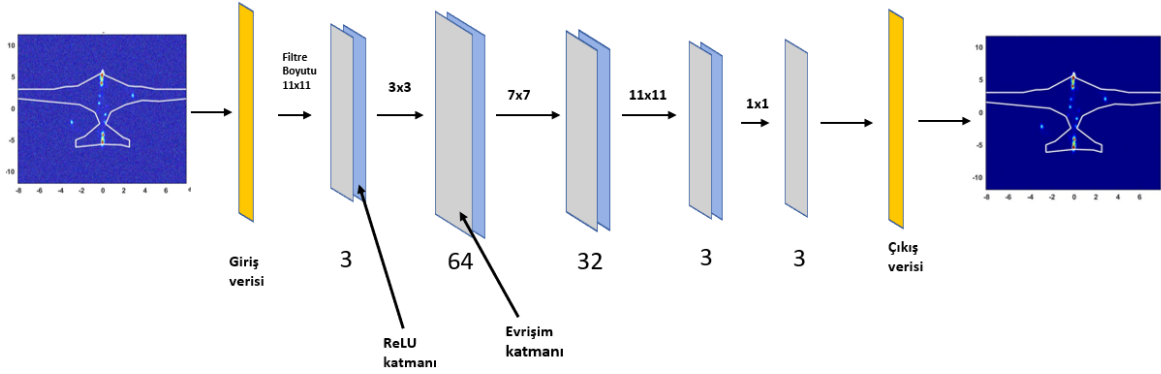


Şekil 3.10 21 katmandan oluşan ESA yapısı

Oluşturulan bu yapıda 7 adet evrişim ve 2 adet transpoz evrişim katmanı kullanılmıştır. Bu evrişim katmanları ile sistem öğrenme işlemini gerçekleştirmektedir. Evrişim katmanlarında bulunan filtre sayısı ve filtre boyutu ile bu katmanlarda öğrenme işlemi gerçekleştirilir. Her bir katmanda öğrenilen parametre sayısı  $[(\text{Filtre Boyutu} \times \text{Önceki Katmana Ait Filtre Sayısı}) + 1] \times \text{Katmana Ait Filtre Sayısı}$  şeklinde bulunur. ESA yapısındaki katmanların filtre sayısı ve boyutları Şekil 3.10 üzerinde verilmiştir. 2 adet en büyükleri biriktirme katmanı evrişim katmanlarından sonra kullanılmıştır. Bu katmanlar görüntü boyutunu küçültmek amacıyla kullanılmıştır. Bu katmanın biriktirme sayısı  $2 \times 2$ , adımlama sayısı 2 olarak seçilmiştir. Yaygın olarak kullanılan aktifleştirme fonksiyonlarından olan Doğrultulmuş Lineer (ReLU) her bir evrişim katmanından sonra tercih edilmiştir. En büyükleri biriktirme katmanında boyutu küçültülen görüntüler transpoz evrişim katmanı kullanılarak tekrar yukarı ölçeklenmiştir. Bu katmanların adımlama sayısı 2 olarak belirlenmiştir. Çıkış bölümünde ise bağlanım katmanı kullanılmıştır. Bu bağlanım katmanı ile parametre tahmini yapar ve çıktı olarak sayısal yeni değerler oluşturur. Böylece daha iyi görüntü kalitesi ve gürültü problemi gibi sorunları aşar.

Çalışmada eğitilen bir başka ESA yapısı Şekil 3.11’de gösterilmiştir. 11 katmandan oluşan evrişim ağlarının filtre boyutu sayısı  $11 \times 11$ ,  $3 \times 3$ ,  $7 \times 7$ ,  $11 \times 11$  ve  $1 \times 1$  olarak alınmış, bunlara karşılık gelen filtre boyutları 3, 64, 32, 3 ve 3 olarak seçilmiştir.

Her iki yapı için elde edilen 400 verinin %80’i eğitim verisi, %10’u doğrulama verisi ve %10’u test verisi olarak ayrılmıştır. Bu yapılar farklı amaçlarla eğitilmiştir. İlk amaç, gürültü



Şekil 3.11 11 katmandan oluşan ESA yapısı

sorununu gidermektir, ikinci amaç ise bozuk görünen verileri daha yüksek çözünürlükle görüntülemektir. Gürültüyle ilgili eğitimlerde, kullanılan tüm verilere ESA yapılarına giriş verisi olarak girmeden önce farklı varyans seviyelerinde Gauss gürültüleri eklenmiştir. Görüntü giriş verisinden görüntü çıkış verisine bağlanım eğitimi yapabilmek için sistem çift halinde Gauss gürültüyle bozulmuş görüntü ve ilgili hedef görüntüsü çiftleri olarak kullanılmıştır. Görüntüler arasındaki fark, ESA yapısının öğrenme sürecini oluşturmuştur. Daha iyi çözünürlüklü görüntü elde etmek için, tüm veriler önce rasgele olarak aşağı ölçeklenmiş ve orijinal TYAR görüntüsü ile çift olarak ESA yapısında eğitim amacıyla kullanılmıştır. Eğitimler, MATLAB Deep Network Designer aracılığıyla gerçekleştirilmiş ve hata kaybı oranları elde edilmiştir. Bu hatalar, kurulan modelin beklenen sonuçları ne kadar iyi tahmin edeceğini göstermektedir. Hata oranları, ESA yapısının son katmanı olan bağlanım katmanında tanımlanan ortalama kare hata ve ortalama mutlak hata ölçütleriyle hesaplanır. Ortalama kare hata, piksel bazında daha büyük hataları ölçerken, ortalama mutlak hata daha küçük bölgelerdeki hataları ölçer. Sistemin bu hata oranlarıyla ne kadar iyi sonuçlar vereceğini test etmek için, sistem tarafından daha önce görülmeyen test verileri kullanılır. Test verileri ve eğitilen yapı tarafından tahmin edilen veriler arasındaki fark alınarak ve sistem tarafından eğitilen hata oranı kullanılarak test verilerinin hata oranları ölçülür. Sonuç olarak, eğitim hata oranı ve test sonucu hata oranı olmak üzere 2 farklı hata parametresi ortaya çıkar. Sistemi test etmek için tepe sinyal-gürültü oranı da kullanılmış ve referans görüntüler ile ESA yapısından eğitilen görüntüler arasındaki fark PSNR ile ölçülür. Yüksek PSNR değeri, daha iyi görüntü kalitesini gösterir.

### 3.4. Sayısal Sonuçlar

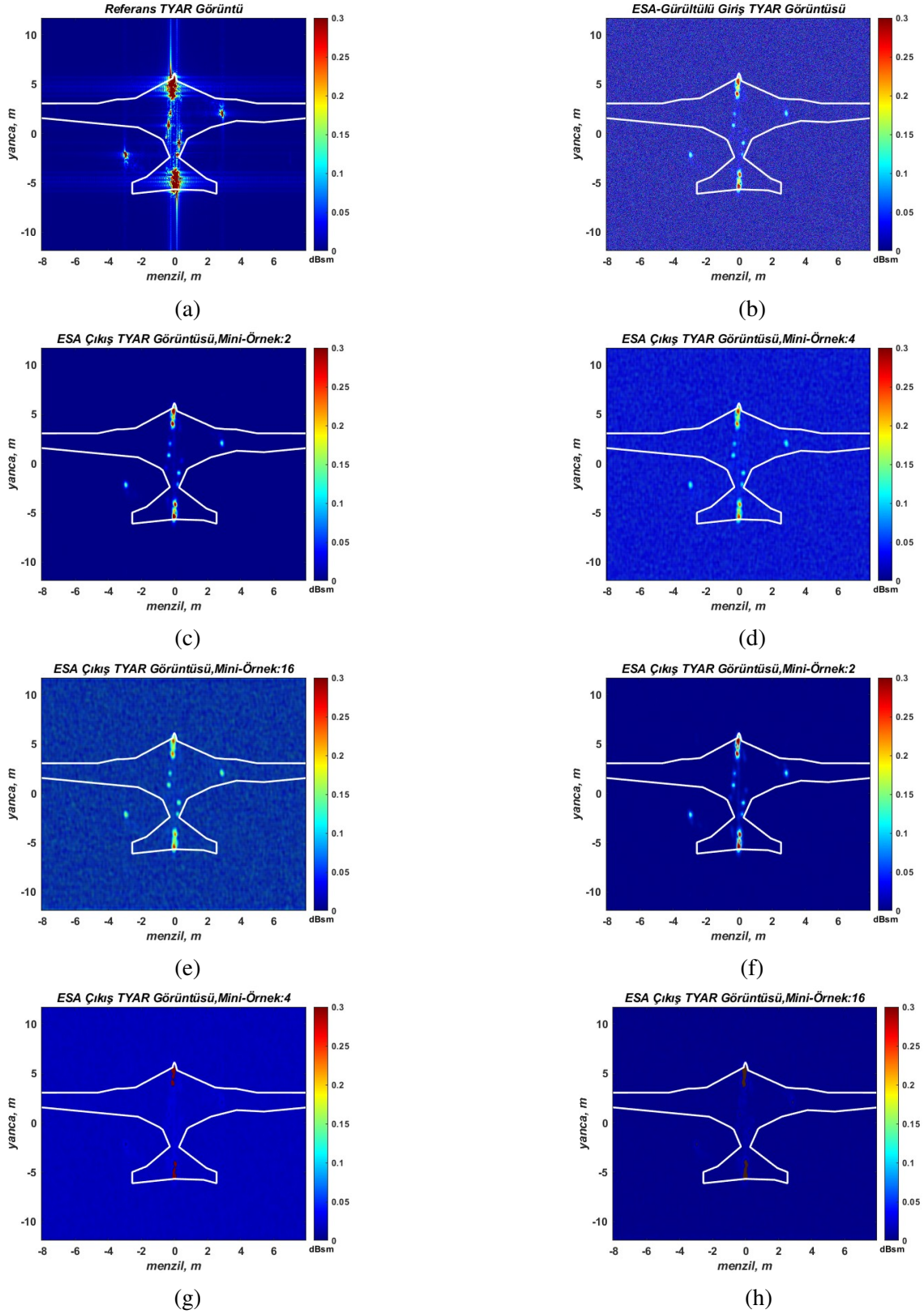
Eğitim hiper parametreleri olarak mini-örnek sayısı 2,4 ve 16 olarak seçilmiş, eğitim turu sayısı 30 olarak belirlenmiştir. En iyileme algoritması olarak Adam algoritması 0,001 öğrenim oranı ile kullanılmıştır. Bu eğitim parametreleri 21 katmanlı ve 11 katmanlı ESA yapılarının eğitiminde kullanılmıştır. Bu yapılarda saçılma merkezi çıkartılmadan önce elde edilen TYAR görüntüleri eğitim görüntüsü olarak kullanılmış ve eğitim yapılmıştır. Saçılma merkezi çıkartılarak elde edilen TYAR görüntüleri ise 21 katmanlı yapıda saçılma merkezi çıkartılmadan önceki görüntüyle karşılaştırılarak sunulmuştur. Yapıların performans değerlendirmeleri daha önce Bölüm 2.3.1’de bahsedilen ortalama kare hata, ortalama mutlak tepe sinyal-gürültü oranına göre yapılmıştır. Test için kullanılan görüntüler ESA yapılarının daha önce görmediği verilerden seçilmiş ve performans değerlendirmesinde kullanılmıştır. Eğitimler MATLAB Deep Network Designer uygulaması ile yapılmıştır. Her bir eğitim, NVIDIA GeForce GTX kullanılarak yapılmış ve mini-örnek sayısına göre yaklaşık 1-3 saat aralığında sürmüştür.

### 3.4.1. 21 Katman ve 11 Katmandan Oluşan ESA Yapılarının Gürültü Sorunu Sayısal Sonuçları

Bu bölümde 11 ve 21 katmandan oluşan iki farklı ESA yapısı gürültü problemini çözmek için test edilmiş nümerik sonuçlar Çizelge 3.12’de verilmiştir. Test amacıyla  $\phi = 0^\circ$ ’lik açıyla taranan Akıncı hedefi için eğitimlere bağlı sonuçlar Şekil 3.12’de verilmiştir.

Çizelge 3.12 11 ve 21 katman eğitimin nümerik sonuçları, Gauss gürültü varyans = 0,2

Mini-Örnek Sayısı	ESA Yapısı	Eğitim Hata Oranı	MSE	MAE	PSNR
2	11 Katman [41]	0,8315	0,1059	0,3988	19,1820
	21 Katman	0,3802	0,0954	0,2692	19,1617
4	11 Katman [41]	2,6773	0,1943	0,3987	17,1257
	21 Katman	1,6400	0,0867	0,2474	18,0217
16	11 Katman [41]	9,1345	0,1674	0,3987	16,2574
	21 Katman	4,733	0,0902	0,2839	19,3386



Şekil 3.12 Akıncı hedefi,  $\phi = 0^\circ$  (a) MATLAB ile elde edilen TYAR referans görüntü, (b) Sisteme verilen gürültülü görüntü (c) 21 katman mini-örnek:2 (d) 21 katman mini-örnek:4 (e) 21 katman mini-örnek:16 (f) 11 katman mini-örnek:2 (g) 11 katman mini-örnek:4 (h) 11 katman mini-örnek:16

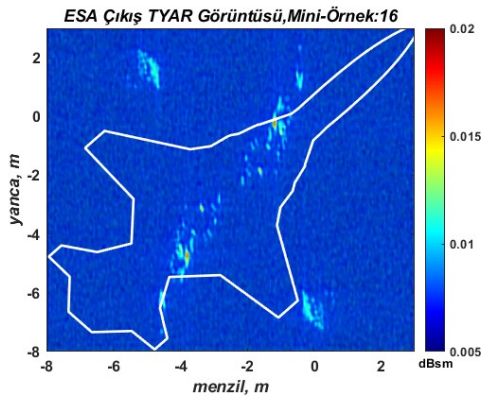
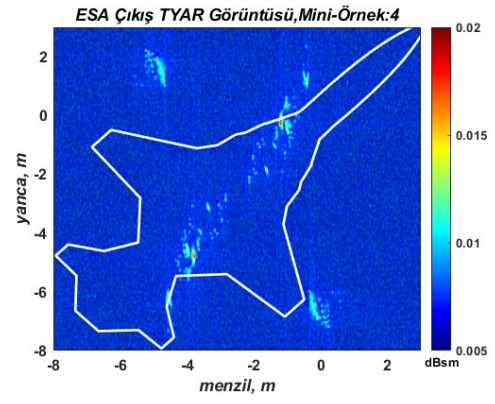
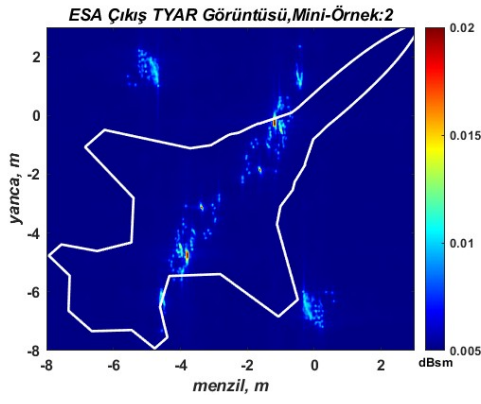
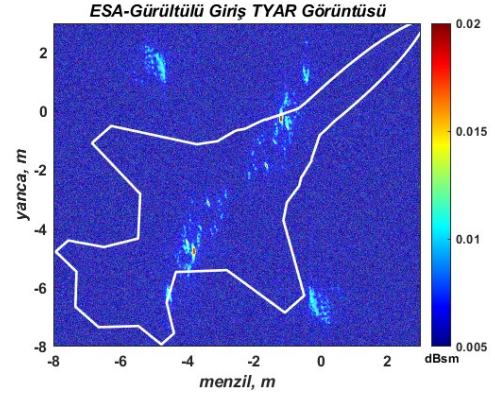
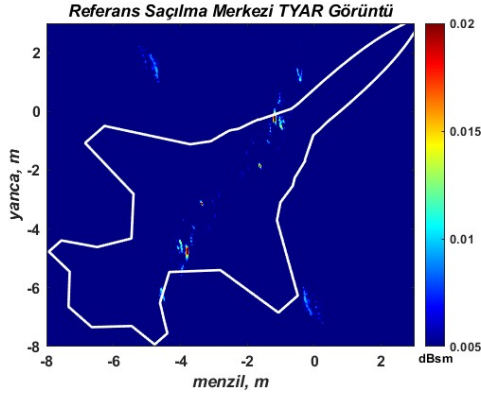
### 3.4.2. Saçılma Merkezi Görüntüleri Gürültü Sorunu Sayısal Sonuçları

Bu bölümde, saçılma merkezleri çıkarılarak yeniden oluşturulan TYAR görüntülerin gürültü problemini çözmek için 21 katmanlı ESA yapısıyla test edilmiş olan nümerik sonuçlar Çizelge 3.13'te sunulmuştur. Test amacıyla  $\phi = 210^\circ$ 'lik açıyla taranan F-5 hedefi için eğitimlere bağlı sonuçlar Şekil 3.13'de verilmiştir.

Çizelge 3.13 Saçılma merkezi görüntüleri eğitim nümerik sonuçları, Gauss gürültü varyans = 0,2

Mini-Örnek Sayısı	ESA Yapısı	Eğitim Hata Oranı	MSE	MAE	PSNR
2	21 Katman	5,1036	0,2021	0,2742	21,0672
4	21 Katman	7,5470	0,2839	0,2696	14,9583
16	21 Katman	14,5672	0,3432	0,3122	14,7903





Şekil 3.13 F-5 hedefi,  $\phi = 210^\circ$  (a) MATLAB ile elde edilen saçılma merkezi TYAR referans görüntü, (b) Sisteme verilen gürültülü görüntü (c) 21 katman mini-örnek:2 (d) 21 katman mini-örnek:4 (e) 21 katman mini-örnek:16

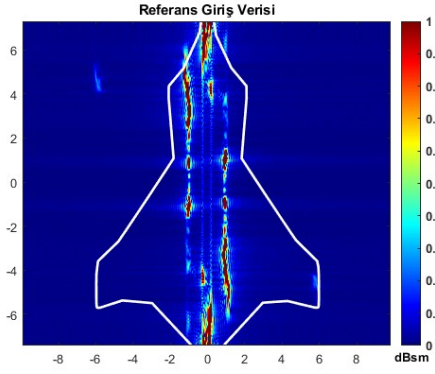


### 3.4.3. TYAR ve Saçılma Merkezi ile Oluşturulmuş TYAR Çözünürlük Problemi Sayısal Sonuçları

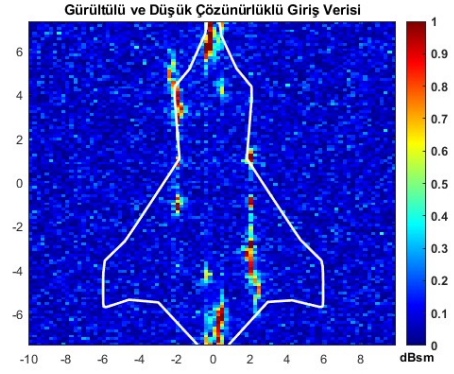
Bu bölümde saçılma merkezleri çıkarılarak tekrar oluşturulan TYAR görüntülerinin ve orijinal TYAR görüntülerinin çözünürlük problemini çözmek amacıyla 21 katmanlı ESA yapısıyla test edilmiş nümerik sonuçları Çizelge 3.14'te sunulmuştur. Test amacıyla  $\phi = 2^\circ$ 'lik açıyla taranan Eurofighter Typhoon hedefi için eğitimlere bağlı görüntü sonuçları Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'te verilmiştir. Şekil 3.14'te saçılma merkezi oluşturulmadan önceki görüntüler giriş verisi olarak kullanılırken, Şekil 3.15'te saçılma merkezi oluşturulduktan sonraki görüntüler giriş verisi olarak kullanılmıştır. Aynı açı, frekans ve polarizasyon verilerine sahip EuroFighter Typhoon hedefi ile de iki durum için test edilmiştir.

Çizelge 3.14 TYAR ve Saçılma merkezi çıkartılan TYAR görüntülerin çözünürlük eğitimi nümerik sonuçları, Gauss gürültü varyansı = 0,2

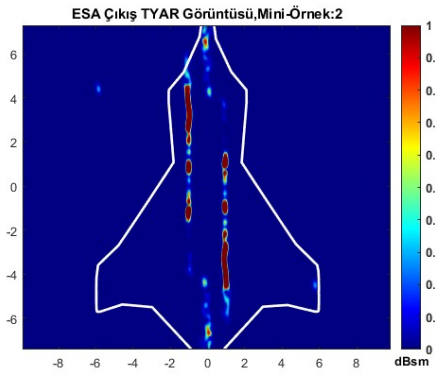
Mini-Örnek Sayısı	ESA Yapısı	Eğitim Hata Oranı	MSE	MAE	PSNR
2	21 Katman-TYAR	0,8315	0,2980	0,2731	19,6934
	21Katman-SM TYAR	4,1026	0,0954	0,0869	15,6890
4	21 Katman-TYAR	1,9899	0,4149	0,4028	19,6934
	21Katman-SM TYAR	5,2448	0,8267	0,7464	13,9101
16	21 Katman-TYAR	4,7333	0,5765	0,4699	17,2374
	21Katman-SM TYAR	11,2019	0,9072	0,8122	13,7615



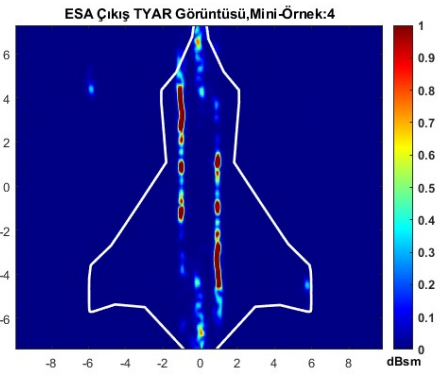
(a)



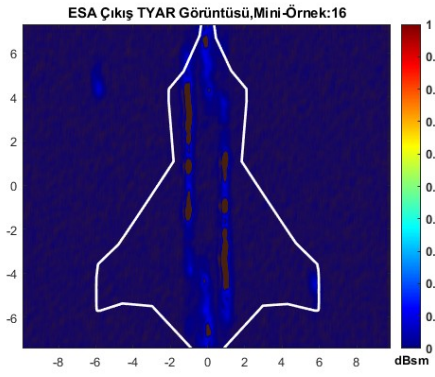
(b)



(c)

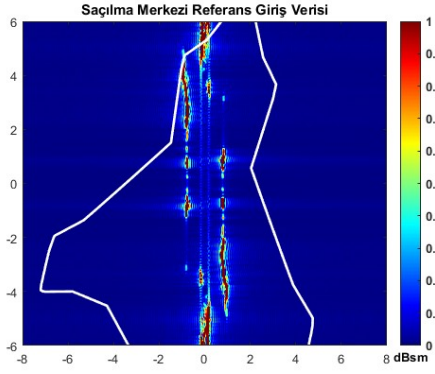


(d)

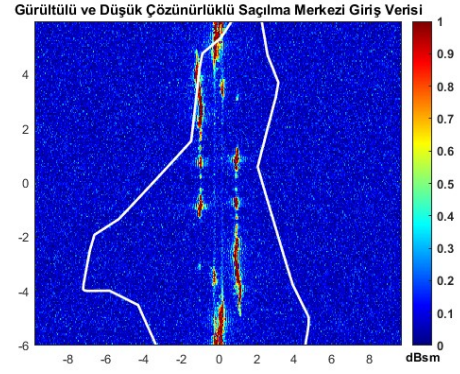


(e)

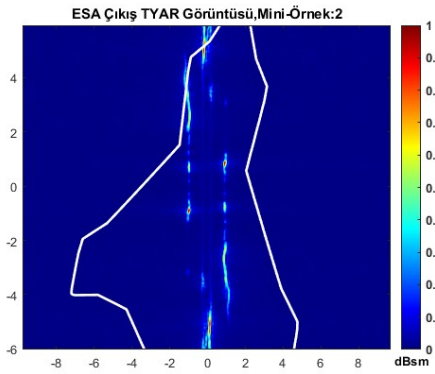
Şekil 3.14 EuroFighter Typhoon hedefi,  $\phi = 2^\circ$  (a) MATLAB ile elde edilen saçılma merkezi TYAR referans görüntü, (b) Sisteme verilen düşük çözünürlük ve gürültülü görüntü (c) 21 katman mini-örnek:2 (d) 21 katman mini-örnek:4 (e) 21 katman mini-örnek:16



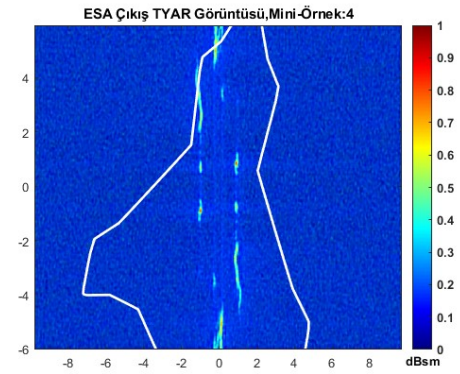
(a)



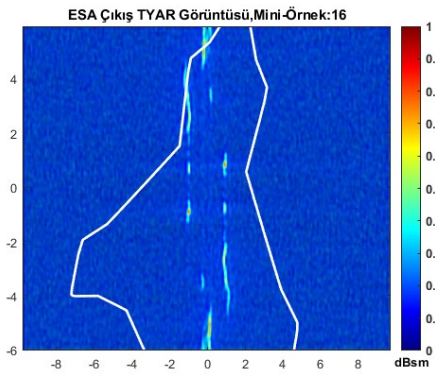
(b)



(c)



(d)



(e)

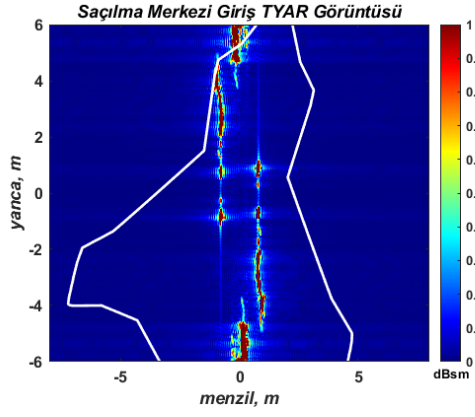
Şekil 3.15 EuroFighter Typhoon hedefi,  $\phi = 2^\circ$  (a) MATLAB ile elde edilen saçılma merkezi TYAR referans görüntü, (b) Sisteme verilen düşük çözünürlük ve gürültülü görüntü (c) 21 katman mini-örnek:2 (d) 21 katman mini-örnek:4 (e) 21 katman mini-örnek:16

### 3.4.4. Saçılma Merkezlerine Gürültü Eklenecek Elde Edilen Gürültü Problemi Sayısal Sonuçları

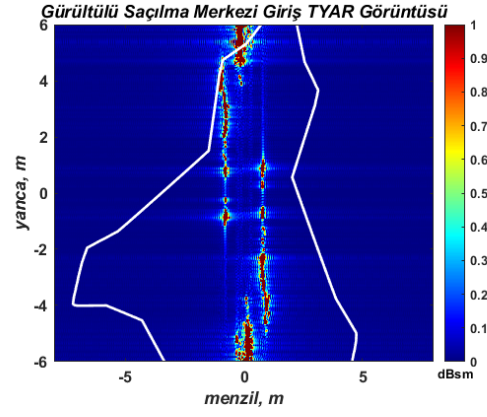
Bu bölümde saçılma merkezleri çıkartıldıktan sonra, bu noktalara gürültü eklenerek görüntüler doğrudan bozulmuş ve saçılma merkezleri ile tekrar oluşturulan TYAR görüntüler gürültü problemini aşmak adına referans olarak alınmıştır. Bu doğrultuda 21 katmanlı ESA yapısıyla test edilmiş nümerik sonuçları Çizelge 3.15'te sunulmuştur. Test amacıyla  $\phi = 2^\circ$ 'lik açıyla taranan Eurofighter Typhoon hedefi için eğitimlere bağlı görüntü sonuçları Şekil 3.16'da verilmiştir. Şekil 3.16 (a)'da saçılma merkezleri ile yeniden oluşturulmuş 2B TYAR görüntüsü verilirken, Şekil 3.16 (b)'da saçılma merkezlerine gürültü eklendikten sonraki TYAR görüntüsü verilmektedir.

Çizelge 3.15 Saçılma Merkezlerine Gürültü Eklenecek Elde Edilen Gürültü Problemi Sayısal Sonuçları

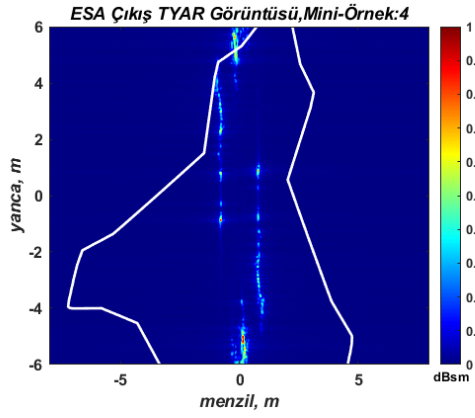
Mini-Örnek Sayısı	ESA Yapısı	Eğitim Hata Oranı	MSE	MAE	PSNR
4	21 Katman	4,8231	2,2940	1,2281	14,6124
16	21 Katman	6,9821	4,4248	2,4118	13,6528



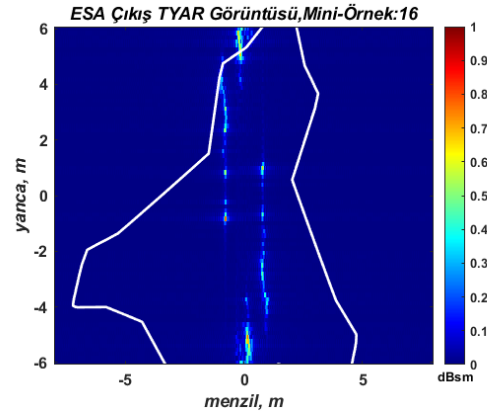
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.16 (a) EuroFighter hedefinin  $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 2^\circ$  Saçılma merkezleri ile yeniden oluşturulmuş 2B TYAR görüntüsü (b) Saçılma merkezlerine gürültü eklenerek yeniden oluşturulmuş 2B TYAR görüntü (c) 21 katman mini-örnek:4 (d) 21 katman mini-örnek:16

## 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında gerçek hayat durumlarında radar sistemlerinin görüntüleme görevi sırasında gürültü ve düşük çözünürlük sorunlarından etkilenmesine çözüm geliştirilmesi hedeflenmiştir. Radar sistemleri için etkili bir görüntüleme tekniği olan ters yapay açıklıklı radar yöntemi ve derin öğrenme yöntemlerinden olan evrimsel sinir ağları metodu bir arada kullanılarak bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemde ANSYS HFSS programı ile karmaşık hedeflerden RKA bilgileri toplanmış ve MATLAB ile hem TYAR görüntüleri hem de saçılma merkezi çıkarılarak yeniden oluşturulan TYAR görüntüleri ESA yapılarına giriş verisi olarak kullanılmak üzere oluşturulmuştur. Bölüm 3.4'te farklı senaryolar hem gürültü hem çözünürlük probleminin üstesinden gelmek için ESA yapıları eğitilerek denenmiş ve sonuçlar elde edilmiştir. Öncelikle gürültü problemini test etmek için, sırasıyla 11 ve 21 katmandan oluşan iki farklı ESA yapısı kurulmuştur. Bu yapılarda doğrudan TYAR görüntülere Gauss gürültü eklenerek ve eklenmeden önceki görüntüler çift halinde sisteme verilerek sistemin öğrenmesi sağlanmıştır. ESA yapısının her bir iterasyonda kaç veri işleyeceğini belirleyen mini-örnek parametresi, sırasıyla 2, 4 ve 16 olarak test edilmiş ve mini-örnek sayısının artmasıyla birlikte eğitim hata oranı, ortalama kare hata ve ortalama mutlak hata değerlerinin arttığı Çizelge 3.12 üzerinden gözlemlenmiştir. Bu artışın sebebi, GPU belleği kapasitesi ve veri sayısı ile ilişkilendirilebilir. 400 adet veriyle eğitim gerçekleştirildiğinden, sistemin daha küçük mini-örnek sayılarına daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Aynı zamanda 11 ve 21 katman sistemleri karşılaştırıldığında ise, katman sayısının arttıkça sistemin daha iyi öğrendiğini ve gürültü problemini daha iyi çözdüğü görülmüştür. Şekil 3.12(b)'de gürültülü TYAR görüntüsü ile bu iki sistemin Şekil 3.12(c)-(h)'de verilen görüntü olarak sonuçlarına bakıldığında ise  $\phi = 0^\circ$  açısı ile taranan Akıncı hedefinin kuyruk ve kanat bölgesindeki baskın bölgeler görülmektedir. 21 katmanlı sistemde, bu görüntünün üstüne eklenen Gauss gürültü sonucunda ise 2 mini-örnek sayısı ile yapılan eğitimde gürültü görüntüden tamamen silinirken, 4 ve 16 mini-örnek sayısı kullanıldığında yapı çözünürlüğü bozmadan gürültüyü silmiştir. 11 katmanlı yapıda ise 2 mini örnek sayısı benzer şekilde iyi sonuç verse de 4 ve 16 için görüntü kalitesi

bozulmaktadır. PSNR hesabı için referans TYAR görüntüsü Şekil 3.12 (a)'da verilmiştir. Yüksek PSNR değerinin olması daha iyi görüntü kalitesi anlamına gelir ve hata oranı arttıkça beklendiği şekilde PSNR değeri düşmüştür. Saçılma merkezleri çıkarılarak oluşturulan TYAR görüntüleri 21 katmanlı yapı kullanılarak eğitilmiş ve benzer şekilde test edilmiştir. Test sonuçları Çizelge 3.13'te verilmiştir. Bir önceki durumdaki gibi mini-örnek sayısı arttıkça hata oranı artmış ve buna paralel olarak görüntü kalitesi değişmiştir. Mini-örnek sayısının 2 olduğu durumda gürültü görüntüden temizlenmiştir. Mini-örnek sayısının 16 olarak test edildiği senaryoda çözünürlük bozulmadan sistem çalışmıştır. Görüntü karşılaştırması Şekil 3.13 (c)- (e)'de oldukça net şekilde görülmektedir. PSNR hesabı için referans saçılma merkezi TYAR görüntüsü Şekil 3.13(a)'da verilmiştir. Referans olarak belirlenen görüntüyle elde edilen görüntüler PSNR açısından karşılaştırıldığında ise mini-örnek 2 olan durumda PSNR değeri 21,0672 olarak bulunmuş, dolayısıyla görüntünün kalitesinin arttığı ortaya çıkmıştır. Çözünürlük problemini çözmek için ise 21 katmanlı yapı TYAR ve saçılma merkezi çıkarılmış TYAR görüntüler ile ayrı ayrı test edilmiştir. Çözünürlük problemi için menzil ekseninde rastgele aşağı ölçeklenerek bozulan veriler ile hem TYAR görüntüler hem de saçılma merkezi çıkartılmış görüntüler eğitim sürecine sokulmuştur. Bu karşılaştırmanın sonuçları ise Çizelge 3.14'te verilmiştir. Mini-örnek sayısının 2 olduğu durumda her iki karşılaştırma için de hem hata oranları diğer durumlara göre düşük, hem de görüntü olarak çözünürlüğü yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 3.14 (a) ve Şekil 3.15 (a)'da ulaşılması hedeflenen orijinal görüntüler verilmiştir. Şekil 3.14 (b) ve Şekil 3.15 (b)'de ise menzil yönünde rastgele ölçeklenmiş görüntüler verilmiştir. Şekil 3.14 (c)'de verilen eğitim sonucu görüntüsü Şekil 3.14 (a)'da verilen görüntü ile karşılaştırıldığında, ulaşılması hedeflenen referans görüntüye daha yüksek çözünürlüklü görüntü ile ulaşıldığı görülmektedir. Örneğin 3.14 (a)'da görüntüde net olmayan pikseller bulunurken, eğitim sonrasında bu piksellerin yok olduğunu sadece cismin noktalarının kaldığı görülmektedir. Benzer şekilde saçılma merkezi görüntüleri için de Şekil 3.15 (b)'de düşük çözünürlüklü verilen görüntü ve mini-örnek 2 sonucunda elde edilen Şekil 3.15 (c)'de verilen görüntülerin, Şekil 3.15 (a)'da verilen referans görüntüye ulaştığı söylenir. Her iki durumda da Şekil 3.14 (d) ve Şekil 3.15(d)'de gösterilen mini-örnek sayısının 4 iken görüntüler referans görüntüye oldukça yaklaşmış ve başarılı sonuçlar ortaya koymuştur.

Kullanılan veri sayısı sebebiyle mini-örnek 16 sonucunun Şekil 3.14 (e) ve Şekil 3.15 (e)'deki görüntünün diğer görüntüler kadar iyi olmadığı görülmüştür. Her iki durum için de PSNR değerleri için Şekil 3.14 (a) ve Şekil 3.15 (a)'da verilen referans değerleri kullanılmış ve mini-örnek sayısı ne kadar az ise PSNR değerinin o kadar yüksek yani görüntünün o kadar iyi olduğu sonucu görülmüştür. Yapılan başka bir testte ise, saçılma merkezleri çıkartıldıktan sonra, bu noktalara gürültü eklenerek görüntüler doğrudan bozulmuş ve saçılma merkezleri ile tekrar oluşturulan TYAR görüntüler gürültü problemini aşmak adına referans olarak alınmıştır. Test amacıyla  $\phi = 2^\circ$ 'lik açıyla taranan Eurofighter Typhoon hedefi için eğitimlere bağlı görüntü sonuçları Şekil 3.16'da gösterilmiştir. Şekil 3.16 (c)' ve (d)de mini-örnek 4 ve mini-örnek 16 ile test edilen görüntü sonuçları verilmiştir. Mini-örnek sayısının 4 olduğu durumda görüntü daha iyi sonuç vermiştir. Fakat saçılma merkezlerine doğrudan gürültü eklendiğinde elde edilen görüntü sonuçları yapılan diğer testlere göre daha yetersiz kalmıştır.

Tez kapsamında radar sistemlerinin görüntüleme konusunda yaşadığı problemlerden olan gürültü ve çözünürlük konularına ESA yapıları kullanılarak daha az veri ile daha kısa zamanda etkili sonuçlar verdiği görülmüştür. Saçılma merkezi kullanılarak oluşturulan veriler ile eğitilen yapılarda, eğitim süresinin daha kısa olduğu ve bu durumun zaman açısından avantaj sağladığı görülmüştür.

Radar ile görüntüleme konusunda, gelecekte derin öğrenme yapılarının oldukça yaygınlaşacağı açıkça görülmektedir. Özellikle evrimsel sinir ağlarının çoklu katman yapıları sayesinde etkili radar görüntüler elde etmek mümkündür. Az miktarda veri sayısı ve geleneksel yöntemlere kıyasla çok daha kısa sürelerde yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilebilmesi bu yapıların en büyük avantajıdır. Bu avantajları göz önünde bulundurularak, daha derin katmanlı yapılara kurularak veya öğrenilen parametre sayıları artırılarak sürenin azaltılması yönünde çalışmalar yapılabilir.



## REFERANSLAR

- [1] David K Barton. *Radar system analysis and modeling*. Artech House, **2004**.
- [2] Marco Martorella, John Homer, James Palmer, Victor Chen, Fabrizio Berizzi, Brad Littleton, and Dennis Longstaff. *Inverse synthetic aperture radar*, **2006**.
- [3] Bassem R Mahafza. *Radar systems analysis and design using MATLAB*. CRC press, **2022**. ISBN 1000528782.
- [4] Yingbo Hua, Farhan A Baqai, Yan Zhu, and David J Heilbronn. Imaging of point scatterers from step-frequency isar data. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 29(1):195–205, **1993**.
- [5] Yong Wang, Rui Cao, and Xin Huang. Isar imaging of target in the terahertz band via the back-projection algorithm combined with the motion compensation. In *2019 6th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)*, pages 1–4. IEEE, **2019**.
- [6] Alper Tufan. *Comparative evaluation of ISAR processing algorithms*. Master's thesis, Middle East Technical University, **2012**.
- [7] Dong Li, Hongqing Liu, Xiaogang Gui, and Xinzheng Zhang. An efficient isar imaging method for maneuvering target based on synchrosqueezing transform. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 15:1317–1320, **2016**. ISSN 1536-1225. doi:10.1109/lawp.2015.2506878.
- [8] Yong Wang, Xin Huang, and Qingxiang Zhang. Rotation parameters estimation and cross-range scaling research for range instantaneous doppler isar images. *IEEE Sensors Journal*, 20:7010–7020, **2020**. ISSN 1530-437X.
- [9] Yong Wang, Zhuo Xu, Qiuchen Liu, and Xiaofei Lu. Novel approach for isar cross-range scaling of maneuvering target. *IEEE Sensors Journal*, 19(22):10409–10418, **2019**.

- [10] Victor C Chen. Time-frequency based radar image formation. volume 1, pages 1–4. IEEE, **2004**. ISBN 0780385543.
- [11] F Berizzi, E D Mese, M Diani, and M Martorella. High-resolution isar imaging of maneuvering targets by means of the range instantaneous doppler technique: modeling and performance analysis. *IEEE Transactions on Image Processing*, 10:1880–1890, **2001**. ISSN 1057-7149. doi:10.1109/83.974573.
- [12] Ayoub Karine, Abdelmalek Toumi, Ali Khenchaf, and Mohammed El Hassouni. Target recognition in isar images based on relative phases of complex wavelet coefficients and sparse classification. pages 1–5. IEEE, **2018**. ISBN 1538652390.
- [13] Penghui Huang, Muyang Zhan, Zhiwei Yang, Xingzhao Liu, Guisheng Liao, Zhiling Liu, and Wentao Du. High-resolution isar imaging for maneuvering targets based on iterative adaptive processing. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 7:1093–1108, **2021**. ISSN 2333-9403.
- [14] Victor C Chen and Hao Ling. *Time-frequency transforms for radar imaging and signal analysis*. Artech house, **2002**. ISBN 1580535496.
- [15] A Karakasiliotis and P Frangos. Comparison of several spectral estimation methods for application to isar imaging. pages 1058–1067. **2004**.
- [16] Yong Wang and Qiuchen Liu. Super-resolution sparse aperture isar imaging of maneuvering target via the relax algorithm. *IEEE Sensors Journal*, 18:8726–8738, **2018**. ISSN 1530-437X.
- [17] Qiuchen Liu, Aijun Liu, Yong Wang, and Hongzhi Li. A super-resolution sparse aperture isar sensors imaging algorithm via the music technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57:7119–7134, **2019**. ISSN 0196-2892.
- [18] Tri-Tan Cao and Luke Rosenberg. An improved clean algorithm for isar. pages 1–6. IEEE, **2022**. ISBN 1728153689.

- [19] A Bacci, E Giusti, D Cataldo, S Tomei, and M Martorella. Isar resolution enhancement via compressive sensing: A comparison with state of the art sr techniques. pages 227–231. IEEE, **2016**. ISBN 1509029206.
- [20] Lei Zhang, Mengdao Xing, Cheng-Wei Qiu, Jun Li, Jialian Sheng, Yachao Li, and Zheng Bao. Resolution enhancement for inversed synthetic aperture radar imaging under low snr via improved compressive sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48:3824–3838, **2010**. ISSN 0196-2892.
- [21] Elisa Giusti, Davide Cataldo, Alessio Bacci, Sonia Tomei, and Marco Martorella. Isar image resolution enhancement: Compressive sensing versus state-of-the-art super-resolution techniques. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 54:1983–1997, **2018**. ISSN 0018-9251.
- [22] José M Muñoz-Ferreras and Félix Pérez-Martínez. Superresolution versus motion compensation-based techniques for radar imaging defense applications. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2010:1–9, **2010**.
- [23] Lei Zhang, Zhi-Jun Qiao, Meng-Dao Xing, Jian-Lian Sheng, Rui Guo, and Zheng Bao. High-resolution isar imaging by exploiting sparse apertures. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 60:997–1008, **2011**. ISSN 0018-926X.
- [24] Elisa Giusti, Qiu Wei, Alessio Bacci, Sonia Tomei, and Marco Martorella. Super resolution isar imaging via compressing sensing. pages 1–4. VDE, **2014**. ISBN 3800736071.
- [25] E Giusti, A Bacci, S Tomei, and M Martorella. Compressive sensing based isar: Performance evaluation. pages 398–403. IEEE, **2015**. ISBN 3954048531.
- [26] Sonia Tomei, Alessio Bacci, Elisa Giusti, Marco Martorella, and Fabrizio Berizzi. Compressive sensing-based inverse synthetic radar imaging imaging from incomplete data. *IET Radar, Sonar Navigation*, 10:386–397, **2016**. ISSN 1751-8784.

- [27] Eric Mason, Bariscan Yonel, and Birsen Yazici. Deep learning for sar image formation. volume 10201, pages 11–21. SPIE, **2017**.
- [28] Jiadian Liang, Shunjun Wei, Mou Wang, Hao Su, Shi Jun, and Xiaoling Zhang. Isar compressive sensing imaging using convolution neural network with interpretable optimization. pages 2483–2486. IEEE, **2020**. ISBN 1728163749.
- [29] Shunjun Wei, Jiadian Liang, Mou Wang, Xiangfeng Zeng, Jun Shi, and Xiaoling Zhang. Cist: An improved isar imaging method using convolution neural network. *Remote Sensing*, 12:2641, **2020**. ISSN 2072-4292.
- [30] Ademola E Ilesanmi and Taiwo O Ilesanmi. Methods for image denoising using convolutional neural network: a review. *Complex & Intelligent Systems*, 7(5):2179–2198, **2021**.
- [31] Junyuan Xie, Linli Xu, and Enhong Chen. Image denoising and inpainting with deep neural networks. *Advances in neural information processing systems*, 25, **2012**.
- [32] Li Xu, Jimmy S Ren, Ce Liu, and Jiaya Jia. Deep convolutional neural network for image deconvolution. *Advances in neural information processing systems*, 27, **2014**.
- [33] Olaf Ronneberger, Philipp Fischer, and Thomas Brox. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention–MICCAI 2015: 18th International Conference, Munich, Germany, October 5-9, 2015, Proceedings, Part III 18*, pages 234–241. Springer, **2015**.
- [34] Kyong Hwan Jin, Michael T McCann, Emmanuel Froustey, and Michael Unser. Deep convolutional neural network for inverse problems in imaging. *IEEE Transactions on Image Processing*, 26:4509–4522, **2017**. ISSN 1057-7149.

- [35] Ting Yang, Hongyin Shi, Manyun Lang, and Jianwen Guo. Isar imaging enhancement: Exploiting deep convolutional neural network for signal reconstruction. *International Journal of Remote Sensing*, 41:9447–9468, **2020**. ISSN 0143-1161.
- [36] Shun Miao, Z Jane Wang, and Rui Liao. A cnn regression approach for real-time 2d/3d registration. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 35:1352–1363, **2016**. ISSN 0278-0062. doi:10.1109/tmi.2016.2521800.
- [37] Jiwon Kim, Jung Kwon Lee, and Kyoung Mu Lee. Accurate image super-resolution using very deep convolutional networks. pages 1646–1654. **2016**.
- [38] ChangYu Hu, Ling Wang, Ze Li, Lingling Sun, and Otmar Loffeld. Inverse synthetic aperture radar imaging using complex-value deep neural network. *The Journal of Engineering*, 2019(20):7096–7099, **2019**.
- [39] Jingkun Gao, Bin Deng, Yuliang Qin, Hongqiang Wang, and Xiang Li. Enhanced radar imaging using a complex-valued convolutional neural network. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 16:35–39, **2018**. ISSN 1545-598X.
- [40] Changyu Hu, Ling Wang, Ze Li, and Daiyin Zhu. Inverse synthetic aperture radar imaging using a fully convolutional neural network. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 17:1203–1207, **2019**. ISSN 1545-598X.
- [41] C Hu, L Wang, Z Li, and O Loffeld. A novel inverse synthetic aperture radar imaging method using convolutional neural networks. In *Proc. 5th Int. Workshop Compressed Sens. Theory Appl. Radar, Sonar Remote Sens.(CoSeRa)*, pages 1–5. **2018**.
- [42] M. I. Skolnik. *Introduction to radar systems 2nd edition*. **1980**.
- [43] Merrill I Skolnik. *Radar handbook*. McGraw-Hill Education, **2008**.

- [44] Jerry Eaves and Edward Reedy. *Principles of modern radar*. Springer Science & Business Media, **2012**.
- [45] Dean L Mensa. Radar imaging. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 4:148–163, **1992**. ISSN 0899-9457.
- [46] Margaret Cheney and Brett Borden. *Fundamentals of radar imaging*. SIAM, **2009**. ISBN 0898716772.
- [47] Caner Ozdemir. *Inverse synthetic aperture radar imaging with MATLAB algorithms*, volume 210. John Wiley & Sons, **2012**.
- [48] A Segalovitz and B Roy Frieden. A clean'-type deconvolution algorithm. *Astronomy and Astrophysics*, 70:335, **1978**.
- [49] Zhihao Wang, Jian Chen, and Steven C H Hoi. Deep learning for image super-resolution: A survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 43:3365–3387, **2021**. ISSN 0162-8828. doi:10.1109/tpami.2020.2982166.
- [50] S Z Gurbuz. *Deep Neural Network Design for Radar Applications*. Institution of Engineering and Technology, **2020**. ISBN 9781785618529.
- [51] Charu C Aggarwal. Neural networks and deep learning. *Springer*, 10:3, **2018**.
- [52] Deep Ray, Orazio Pinti, and Assad A Oberai. Deep learning and computational physics (lecture notes). *arXiv preprint arXiv:2301.00942*, **2023**.
- [53] Diederik P Kingma and Jimmy Ba. Adam: A method for stochastic optimization. *arXiv preprint arXiv:1412.6980*, **2014**.
- [54] Fırat Artuğer and Fatih Özkaynak. Görüntü sıkıştırma algoritmalarının performans analizi İçin değerlendirme rehberi. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 8:102–110, **2022**. ISSN 2149-0910.

- [55] H Ling, R C Chou, and S W Lee. Shooting and bouncing rays: calculating the rcs of an arbitrarily shaped cavity. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 37:194–205, **1989**. ISSN 0018-926X. doi:10.1109/8.18706.