

**T.C.**  
**MİLLÎ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ**  
**ALPARSLAN SAVUNMA BİLİMLERİ VE**  
**MİLLÎ GÜVENLİK ENSTİTÜSÜ**

**RÜZGAR TÜRBİNİ PARAZİTLERİ İÇERİSİNDE UÇAK**  
**TESPİTİ İÇİN BİR SINIFLANDIRMA ÇALIŞMASI**

**Umutcan SAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Askerî Elektronik Sistemler Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**Elektronik Harp Programı**

**Tez Danışmanı**

**Prof. Dr. Ali KARA**

**Mayıs 2025**

Danışmanım Prof. Dr. Ali KARA sorumluluğunda tarafımda hazırlanan “Rüzgar Türbini Parazitleri İçerisinde Uçak Tespiti İçin Bir Sınıflandırma Çalışması” başlıklı çalışmada veri toplama ve kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Umutcan SAN



*Aileme  
ve  
eşime*

# TEŞEKKÜR

---

Bu tez çalışmasının ortaya çıkmasında, akademik rehberliği, bilgeliği ve vizyoner yaklaşımıyla bana her zaman yol gösteren değerli danışmanım Prof. Dr. Ali KARA'ya en derin şükranlarımı sunarım. Kendisinden sadece akademik değil, bilimsel düşünme becerileri, sabır ve metodoloji anlamında da çok şey öğrendim. Tezimin şekillenmesinde ve bilimsel bir çerçeveye oturmasında verdiği destek, benim için yol gösterici bir pusula olmuştur.

Akademik sürecimin her anında destek ve güvenini hissettiğim, kıymetli hocam Dr. Osman KARABAYIR ve Dr. Öğr. Üyesi Ali ÖTER'e de içtenlikle teşekkür ederim. Kendisinin katkıları, bu tezin olgunlaşmasında kritik bir rol oynamış; bilimsel yaklaşımı, analitik bakış açısı ve teşvik edici tavrıyla bana yalnızca bir akademisyen değil, düşünsel anlamda da bir rehber olmuştur.

Mesleki yaşamımda duruşu, liderliği ve değerleriyle her zaman örnek aldığım; sadece bir komutan değil, aynı zamanda bir rol model olan Hv. Müh. Alb. Şansel GÜNEŞ'e de en içten minnet ve saygılarımı sunuyorum. Mesleğe ilk başladığımdan bu yana üzerimde emeği büyük olan kıymetli komutanımdan disiplin, sorumluluk duygusu ve profesyonel duruşun ne anlama geldiğini öğrendim. Zorlu tez sürecinde verdiği destek ve manevi varlığı, benim için çok kıymetli olmuştur.

Mesleğinde temayüz etmiş, bilgileri, deneyimleri ve örnek alınası duruşlarıyla bana teknik anlamda çok şey katan kıymetli büyüklerim Hv. Mu. Asb. Kd. Bçvş. Necdet CANER, Hv. Mu. Asb. Kd. Bçvş. Serdar SEÇER, Hv. Mu. Asb. Kd. Bçvş. Savaş DOĞAN ve Hv. Mu. Asb. Kd. Bçvş. İlhan AYDIN'a da ayrı ayrı teşekkür ederim. Her biriyle kurduğum mesleki temas, bana farklı bakış açıları, teknik bilgiler ve sahaya dair değerli tecrübeler kazandırdı. Onlardan öğrendiklerim, bu tez çalışmasına sadece içerik değil, aynı zamanda bir duruş kazandırmıştır.

Son olarak; bu yoğun süreç boyunca sabrını, sevgisini ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen can yoldaşım, sevgili eşim Kardelen SAN'a gönülden teşekkür ederim. Gösterdiği sonsuz anlayış ve fedakârlık, bu akademik yolculuğu benim için daha güçlü, daha anlamlı ve daha yaşanabilir kılmıştır.

Umutcan SAN

# İÇİNDEKİLER

<b>TEŞEKKÜR</b>	<b>iv</b>
<b>SİMGE LİSTESİ</b>	<b>vii</b>
<b>KISALTMA LİSTESİ</b>	<b>xi</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>xii</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>xiii</b>
<b>ÖZET</b>	<b>xiv</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xvi</b>
<b>1 GİRİŞ</b>	<b>1</b>
1.1 Rüzgar Türbinleri ve Yenilebilir Enerji .....	1
1.2 Radar Sistemleri ve Rüzgar Türbinlerinin Etkileşimi .....	2
1.3 Makine Öğrenimi ve Radar Hedef Sınıflandırması .....	2
1.4 Çalışmanın Amacı ve Katkıları .....	2
1.5 Tezin Yapısı .....	3
<b>2 RÜZGAR TÜRBİNİ</b>	<b>5</b>
2.1 Rüzgar Türbininin Saçılma ve Doppler Karakteristiği .....	5
2.2 Rüzgar Türbinlerinin Radarlara Olan Olumsuz Etkileri .....	7
2.2.1 Gölgeleme .....	7
2.2.2 Kargaşa .....	7
2.2.3 Hassasiyet Kaybı .....	8
2.3 Rüzgar Türbini Etkisi Azaltma Yöntemleri .....	9
2.3.1 Radar Soğurucu Malzeme .....	10
2.3.2 Şekillendirme .....	10
2.3.3 Türbin Yerleşimi .....	10
2.3.4 Radar Anten Ayarı ve Yönlendirme Stratejileri .....	11
2.3.5 Ek Radar Sistemleri .....	11
2.3.6 Radar Sinyal İşleme Teknikleri .....	11
2.3.7 Düzenleyici Kurumların Önlemleri ve Politikaları .....	13
2.4 Rüzgar Türbinlerinin Yerlerinin Radarda Tespit Edilmesi .....	14
2.5 Rüzgar Türbini Sinyal Modelleme Yaklaşımı .....	14
2.6 Radar Kesit Alanı Hesaplama Yöntemleri .....	15
2.6.1 Deneysel Ölçümlere Dayalı Modeller .....	15
2.6.2 Ölçeklendirilmiş Rüzgar Türbini Modelleri .....	16

2.6.3 Detaylı Elektromanyetik Hesaplama Yöntemleri.....	16
2.6.4 Basitleştirilmiş Radar Kesit Alanı Modelleri .....	18
2.6.5 Radar Kesit Alanı Hesaplamasında Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar ..	20
<b>3 RADAR SİSTEMİ</b>	<b>23</b>
3.1 Radar Parametreleri.....	23
3.2 Ham Veri Üretimi .....	24
3.2.1 LFM Sinyal Üretimi .....	24
3.2.2 Hedeften Gelen Radar Yankı Sinyalinin Modellenmesi .....	25
3.2.3 Hedef Yankı Sinyaline Gürültü ve Kargaşanın Eklenmesi .....	26
3.3 Hamming Pencereleme .....	27
3.4 Darbe Sıkıştırma .....	28
3.5 MTI .....	29
3.6 Fourier Dönüşümü .....	29
3.5 Darbe Birleştirme .....	30
3.6 CFAR ve Eşikleme.....	31
<b>4 UYGULAMA SENARYOLARI VE SINIFLANDIRMA SONUÇLARI</b>	<b>33</b>
4.1 Makine Öğrenimi .....	33
4.2 Değerlendirme Kriterleri.....	35
<b>5 TARTIŞMA VE SONUÇ</b>	<b>46</b>
5.1 Tartışma .....	46
5.2 Sonuç.....	47
<b>KAYNAKÇA</b>	<b>49</b>
<b>TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR</b>	<b>52</b>

## SİMGE LİSTESİ

---

$F_n$	Alicı Gürültü Katsayısı
$y_g[n]$	Alicıda Oluşan Toplam Sinyal
$p_a$	Anten Açıklık Katsayısı
$A$	Anten Yüzey Kesit Alanı
$G$	Anten Kazancı
$e^{-2aR_{max}}$	Atmosferik Zayıflama
$\delta[n]$	Ayrık Zamanlı Birim Darbe Fonksiyonu
$s[n]$	Ayrık Zamanlı Karmaşık LFM Sinyali
$B$	Bant Genişliği
$k$	Boltzman Sabiti
$CFAR[n]$	CFAR Filtresi
$y_{cfar}[n]$	CFAR Uygulanmış Sinyal
$\tau_o$	Chirp Süresi
$\mu$	Cıvıltı Oranını
$Y$	Çıktı Sınıfı
$\lambda$	Dalga Boyu
$n$	Darbe Birleştirme
$y(t)$	Darbe Birleştirme Sonucu Elde Edilen Sürekli Sinyal
$E_i(n)$	Darbe Birleştirme Verimliliği
$\tau$	Darbe Genişliği
$n$	Darbe İndeksi
$N$	Darbe Sayısı
$y_{ds}[n]$	Darbe Sıkıştırma Sonucu Elde Edilen Ayrık Sinyal
$y(t)$	Darbe Sıkıştırma Sonucu Elde Edilen Sürekli Sinyal
$T$	Darbe Süresi
$f_p$	Darbe Tekrarlama Frekansı
$f_d$	Doppler Frekansı
$f_{dmax}$	Maksimum Doppler Frekansı
$y(t)$	Entegre Edilmiş Toplam Enerji
$FFT$	Fast Fourier Transform
$y_f[n]$	Fourier Dönüşümü Uygulanmış Sinyal

$y_f^*[n]$	Fourier Dönüşümü Uygulanmış Sinyalin Eşleniği
$M$	GB Modelinde Kullanılan Toplam Zayıf Öğrenici Sayısı
$F_m(x)$	GB Modelinin $m$ . İterasyondaki Toplam Tahmin Fonksiyonu
$y_{fg}[n]$	Frekans Güç Spekturumu
$s^*[-n]$	Gönderilen Ayrık Zamanlı LFM Sinyalinin Eşlenik ve Zamanda Ters Hali
$s(t)$	Gönderilen LFM Sinyali
$h(t)$	Gönderilen Referans Sinyalin Eşlenik ve Zaman Tersine Alınmış Hali
$I(.)$	Gösterge Fonksiyonu
$w[n]$	Hamming Pencere Katsayıları
$h_f[n]$	Hamming Pencere Katsayıları
$x_h[n]$	Hamming Pencerelemiş Sinyali
$i$	Hedefi
$v$	Hedefin Hızı
$\sigma$	Hedefin Radar Kesit Alanı
$x(t)$	Hedekten Yansıyan Sürekli Sinyal
$c$	Işık hızı
$SNR_{(i)}$	$i$ -inci Hedefin SNR Değeri
$A_i$	$i$ -inci Hedefin SNR Tabanlı Genliği
$\tau_i$	$i$ -inci Hedeften Gelen Gecikmeyi
$f_{D_i}$	$i$ -inci Hedefin Doppler Frekansı
$v_i$	$i$ -inci Hedefin Hızı
$r_i$	$i$ -inci Hedefin Menzili
$l$	Kanat Uzunluğu
$r$	Kesik Koninin Alt ve Üst Kenar Uzunluğunun Aritmetik Ortalaması
$r_2$	Kesik Koninin Alt Yarıçapı
$r_1$	Kesik Koninin Üst Yarıçapı
$\alpha$	Kesik Koninin Yanal Alanının $z$ Ekseni ile Yaptığı Açısı
$y_{fg_k}[n]$	$k$ -inci Darbede $n$ -inci Menzil Hücrendeki Sinyal
$L$	Kulenin Yanal Yüzeyinin Uzunluğu
$H$	Kule Yüksekliği
$x_{[l,i]}$	$l$ 'inci Katmandaki $i$ 'inci Düğümün Aktivasyon Çıktısı
$\sigma_{[l,i]}$	$l$ 'inci Katmandaki $i$ 'inci Düğümün Aktivasyon Fonksiyonu
$b_{[l,i]}$	$l$ 'inci Katmandaki $i$ 'inci Düğümün Önyargı Terimini
$x_{[l-1,j]}$	$(l - 1)$ 'inci Katmandaki $j$ 'inci Düğümün Aktivasyon Çıktısı

$\omega_{[l-1,j],[l,i]}$	$(l - 1)$ 'inci Katmandaki $j$ 'inci Düğüm ile $l$ 'inci Katmandaki $i$ 'inci Düğüm Arasındaki Bağlantı Ağırlığı
$N_{[l-1]}$	$(l - 1)$ 'inci Katmandaki Toplam Nöron Sayısını
$h_m(x)$	$m$ -inci Adımda Oluşturulan Karar Ağacı Modeli
$w$	Maksimum Kanat Genişliği
$R_{max}$	Maksimum Radar Menzili
$N_r$	Menzil Hücresi İndeksi
$y_{ab}[n]$	Menzil Hücresi $n$ için Entegre Edilmiş Toplam Güç
$R$	Mesafeyi
$h_m[n]$	MTI Filtresinin Darbe Cevabı
$y_m[n]$	MTI Sonucu Elde Edilen Sinyal
$w[n]$	$n$ -ci Örnekteki Pencere Katsayısı
$H(x)$	Nihai Toplu Sınıflandırma Modeli
$\mu$	Ortalama
$P_{av}$	Ortalama İletim Gücü
$\gamma_m$	Öğrenme Oranı ile Ölçeklendirilmiş Model Katsayısı
$\Delta t$	Örnekleme Aralığı
$f_s$	Örnekleme Frekansı
$t_n$	Örnekleme Noktaları
$N_r$	Örnek İndeksi
$N$	Örnek Sayısı
$N$	Pencere Uzunluğu
$h[n]$	Pencerelenecek Sinyali
$\sigma$	Radar Kesit Alanı
$L_s$	Sistem Kaybı
$\sigma$	Standart Sapma
$T_o$	Standart Sıcaklığı
$s(t)$	Sürekli Zamanlı Karmaşık LFM Sinyali
$t$	Sürekli Zaman Değişkeni
$L_f(n_e)$	Swerling Hedef Modelinden Dolayı Dalgalanma Kaybı
$f_o$	Taşıyıcı Frekansı
$h_i$	Tek Bir Karar Ağacının Sınıflandırma Modeli
$\left(\frac{S}{N}\right)_1$	Tek Darbe Tespiti İçin Sinyal Gürültü Oranı
$N$	Toplam Darbe Sayısı

$f_w$	Türbinin Dakikadaki Dönüş Sayısı
$D_{nf}$	Uzak Alan Şartını Sağlayan Sınır Uzunluğu
$\sigma^2$	Varyans
$f(x)$	$x$ Noktasındaki Fonksiyon Değeri
$F^4$	Yayılim Faktörü
$t_1$	Zaman Gecikmesi
$a$	Zayıflatma Katsayısı
$\theta$	$z$ Ekseninden İtibaren Artan Şekilde Türbine Göre Radarın Bakış Açısı



# KISALTMA LİSTESİ

---

ATC	Air Traffic Control
CA-CFAR	Cell Averaging Constant False Alarm Rate
CAD	Computer-Aided Design
CFAR	Constant False Alarm Rate
CNR	Clutter-to-Noise Ratio
CUT	Cell Under Test
Eurocontrol	European Organization for the Safety of Air Navigation
FDTD	Finite-Difference Time-Domain
FEM	Finite Element Method
GB	Gradient Boosting
GTD	Geometrical Theory of Diffraction
GO	Geometric Optics
ICAO	International Civil Aviation Organization
LFM	Linear Frequency Modulation
LoS	Line of Sight
MDT	Moving Target Detection
ML	Machine Learning
MLP	Multi-Layer Perceptron
MoM	Method of Moments
MTI	Moving Target Indication
PEC	Perfect Electric Conductor
PO	Physical Optics
PRF	Pulse Repetition Frequency
RAM	Radar Absorbing Material
RF	Random Forest
RKA	Radar Kesit Alanı
SBR	Shooting and Bouncing Ray
SCR	Signal-to-Clutter Ratio
SNR	Signal-to-Noise Ratio
UTD	Uniform Theory of Diffraction

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Rüzgar türbininin yapısal bileşenleri.....	1
Şekil 1.2 Tez çalışmasının yapısının betimlenmesi.....	4
Şekil 2.1 Rüzgar türbinin dönüş hareketi. ....	5
Şekil 2.2 Hareket halindeki rüzgar türbinlerinden gelen yansımalar .....	7
Şekil 2.3 Rüzgar türbinleri sebebiyle radarda yaşanan hassasiyet kaybı. ....	8
Şekil 2.4 (a) Kule RKA'sının hesaplamasında kullanılan geometrik model, (b) Kanat RKA'sının hesaplanmasında kullanılan geometrik model. ....	20
Şekil 3.1 Radar sinyal işleme adımları. ....	23
Şekil 3.2 CA-CFAR yapısı. ....	31
Şekil 4.1 Simülasyon akış şeması.....	36
Şekil 4.2 Senaryo 1'in betimlenmiş hali.....	37
Şekil 4.3 Ham veri.....	37
Şekil 4.4 Darbe sıkıştırma .....	38
Şekil 4.5 MTL.....	38
Şekil 4.6 Darbe birleştirme.....	39
Şekil 4.7 Rüzgar türbinleri hesaba katıldığında CFAR ve eşikleme .....	39
Şekil 4.8 Rüzgar türbinleri hesaba katılmadığında CFAR ve eşikleme .....	40
Şekil 4.9 Senaryo 2'nin betimlenmiş hali.....	40
Şekil 4.10 Rüzgar türbinleri hesaba katıldığında CFAR ve eşikleme .....	41
Şekil 4.11 Rüzgar türbinleri hesaba katılmadığında CFAR ve eşikleme .....	41
Şekil 4.12 Senaryo 3.a kapsamında oluşturulan örnek bir sinyal.....	42
Şekil 4.13 Senaryo 3.b kapsamında oluşturulan örnek bir sinyal.....	42
Şekil 4.14 Senaryo 3.c kapsamında oluşturulan örnek bir sinyal.....	43
Şekil 4.15 Senaryo 3.a'nın betimlenmiş hali.....	43
Şekil 4.16 Senaryo 3.b'nin betimlenmiş hali.....	44
Şekil 4.17 Senaryo 3.c'nin betimlenmiş hali.....	44

## TABLO LİSTESİ

---

<b>Tablo 2.1</b> Başlıca ticari elektromanyetik simülasyon yazılım araçları. ....	<b>18</b>
<b>Tablo 3.1</b> Radar parametreleri.....	<b>23</b>
<b>Tablo 4.1</b> Simülasyonda kullanılan senaryolar. ....	<b>36</b>
<b>Tablo 4.2</b> Sınıflandırıcıların hiperparametre değerleri.....	<b>44</b>
<b>Tablo 4.3</b> Senaryo 3 kapsamındaki sınıflandırıcıların performans metrikleri. ....	<b>45</b>
<b>Tablo 5.1</b> İlgili çalışmaların özeti. ....	<b>46</b>



## Rüzgar Türbini Parazitleri İçerisinde Uçak Tespiti İçin Bir Sınıflandırma Çalışması

Umutcan SAN

Askerî Elektronik Sistemler Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Elektronik Harp Programı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ali KARA

Bu tez çalışmasında, rüzgar türbini yoğunluğunun yüksek olduğu ve rüzgar türbinleri ile uçak arasında belirgin Radar Kesit Alanı (RKA) farklarının bulunduğu radar gözlem sahalarında rüzgar türbini parazitleri içerisinde tespit edilemeyen hedefler için yeni bir sınıflandırma yaklaşımı geliştirilmiştir. Modern radar sistemleri, özellikle rüzgar türbinlerinin yoğun olduğu bölgelerde, türbinlerden kaynaklanan parazit sinyaller nedeniyle sahte hedefler algılayabilmekte ya da gerçek hedeflerin tespitinde hassasiyet kaybı yaşayabilmektedir. Bu durum, özellikle hava trafik yönetimi ve savunma amaçlı radar operasyonlarında ciddi güvenlik riskleri yaratabilmektedir. Çalışmada önerilen yaklaşım, radar menzil hücrelerindeki güç seviyelerinin analizine dayanmakta olup tespit sürecinden önce mevcut kargaşa arka plan bilgisini dikkate alarak “sadece rüzgar türbini” ve “rüzgar türbini ile uçak” sınıflarının ayırımını mümkün kılmaktadır. Bu amaçla Rassal Orman (RF), Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) ve Gradyan Artırma (GB) gibi yaygın ve güçlü makine öğrenmesi algoritmaları kullanılmış; yöntem, üç farklı senaryo üzerinden kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, rüzgar türbinleri ile farklı menzil hücrelerine düşen uçaklar yüksek doğrulukla (~%100) sınıflandırılırken, rüzgar türbinleri ile aynı menzil hücrelerine düşen uçakların sınıflandırma performansının

(~%50) oldukça düşük olduğu gözlemlenmiştir. Kullanılan üç sınıflandırıcıda benzer sonuçlar elde edilmekle beraber en yüksek doğruluk oranı RF ve GB sınıflandırıcılarında görülmüştür. Bu bulguların, Hava Trafik Kontrol (ATC) personeline, uçak kaza kırım olayı yaşanmamasına yönelik destekleyici ve daha etkili bilgiler sunması hedeflenmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Radar, rüzgar türbini, sınıflandırma.



## Classification for Aircraft Detection in Wind Turbine Clutter

Umutcan SAN

Military Electronic Systems Engineering Department

Electronic Warfare Program

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Ali KARA

In this thesis study, a novel classification approach is proposed to identify undetectable targets within wind turbine clutter in radar observation areas where wind turbine density is high and there exists a significant Radar Cross Section (RCS) difference between wind turbines and aircraft. Modern radar systems, particularly in regions with dense wind turbine installations, may suffer from the detection of false targets or reduced sensitivity to actual targets due to clutter signals generated by turbines. This situation poses serious safety risks, especially in air traffic management and defense-oriented radar operations. The proposed method is based on the analysis of power levels in radar range cells, enabling the discrimination between two target classes—“only wind turbine” and “wind turbine with aircraft”—prior to the detection stage by utilizing existing background clutter information. To achieve this, commonly used and robust machine learning algorithms such as Random Forest (RF), Multi-Layer Perceptron (MLP), and Gradient Boosting (GB) are employed. The applicability of the proposed classification approach is evaluated across three different scenarios. The results indicate that aircraft located in different range cells than wind turbines can be classified with near-perfect accuracy (~100%), while the classification performance drops significantly (~50%) for aircraft

located within the same range cells as wind turbines. Although all three classifiers yielded similar results, RF and GB provided the highest accuracy rates. These findings are intended to provide air traffic control personnel with supportive and more effective information to help prevent aircraft accidents.

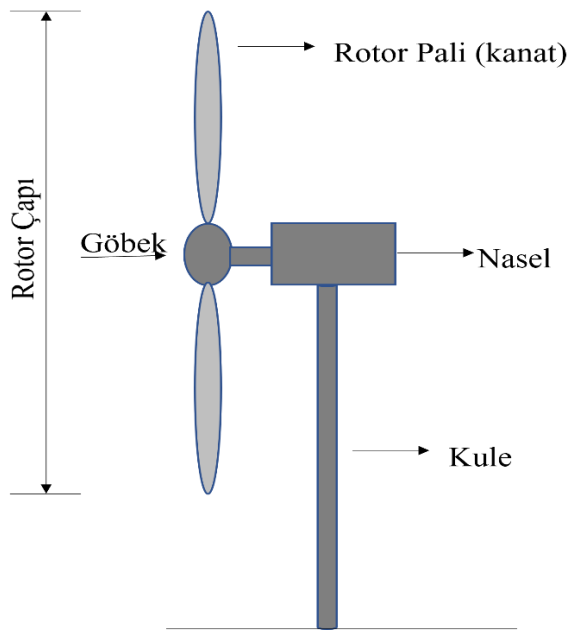
**Keywords:** Radar, wind turbine, classification.



## 1.1 Rüzgar Türbinleri ve Yenilebilir Enerji

Enerjiye olan küresel talep, sürdürülebilir kaynaklardan enerji üretimini zorunlu hale getirmiştir. Fosil yakıtların neden olduğu çevresel sorunlar ve sınırlı kaynaklar, yenilenebilir enerjiye olan yönelimi artırmıştır. Bu bağlamda, rüzgar enerjisi, temiz, sınırsız ve düşük işletme maliyetine sahip bir enerji kaynağı olarak büyük bir potansiyele sahiptir. Rüzgar enerjisinden elektrik üretmek için kullanılan rüzgar türbinleri, kinetik enerjiyi mekanik enerjiye, ardından elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Günümüzde rüzgar türbinleri, kara ve deniz üzerinde büyük ölçekli rüzgar çiftlikleri halinde kurularak enerji üretimine önemli katkılar sağlamaktadır.

Modern rüzgar türbinleri; kule, nasel, rotor (göbek ve kanatlar) ve jeneratör gibi temel bileşenlerden oluşmakta olup Şekil 1.1'de bu yapısal bileşenler gösterilmiştir. Rotor kanatları, rüzgar akımı ile dönerek mekanik enerji üretir, bu enerji nasel içerisindeki jeneratör aracılığıyla elektrik enerjisine çevrilir. Rüzgar türbinlerinin yüksek enerji verimliliği sağlaması için rüzgar yönüne hizalanması, kanat açılarının rüzgar hızına göre optimize edilmesi ve rotorun dinamik kontrol edilmesi gerekmektedir. Ancak, bu büyük ölçekli yapıların radar sistemleri ile etkileşimi, hava trafiği yönetimi ve askeri gözetleme sistemleri açısından önemli teknik sorunlara yol açmaktadır.



Şekil 1.1 Rüzgar türbininin yapısal bileşenleri.

## 1.2 Radar Sistemleri ve Rüzgar Türbinlerinin Etkileşimi

Radar sistemleri, elektromanyetik dalgalar kullanarak nesnelerin tespiti, konumlandırılması ve izlenmesi amacıyla yaygın olarak kullanılan teknolojilerdir. Özellikle hava trafik yönetimi, hava savunma, erken uyarı sistemleri, meteorolojik gözlemler ve denizcilik gibi kritik uygulama alanlarında önemli bir rol üstlenmektedir. Radar sistemleri çevreye elektromanyetik sinyaller göndererek, hedeflerden dönen yansımaları analiz eder ve bu yansımaların menzil, hız ve yön bilgilerini kullanarak hedefleri tespit eder. Ancak radarların performansı; elektromanyetik parazitler, sinyal gürültüsü, yansımalar ve yanlış hedef tespitleri gibi çeşitli nedenlerle olumsuz etkilenebilmektedir.

Bu bağlamda, özellikle büyük fiziksel boyutlara ve döner bileşenlere sahip olan modern rüzgar türbinleri, radar sistemleri için önemli bir parazit kaynağı haline gelmiştir. Rüzgar türbinleri; radar sinyallerinin fiziksel olarak engellenmesine, yüksek Radar Kesit Alanı (RKA) nedeniyle radarda daha belirgin hale gelmelerine ve dönen kanatların oluşturduğu Doppler saçılmaları ile sahte hedef sinyallerinin oluşmasına neden olabilmektedir. Bu etkiler, radar sistemlerinin gerçek hedefleri algılama kabiliyetini azaltmakta, sinyal karışıklığına yol açmakta ve hava sahasında güvenlik riskleri oluşturabilmektedir.

## 1.3 Makine Öğrenimi ve Radar Hedef Sınıflandırması

Makine öğrenimi (ML), büyük veri kümeleri üzerinden örüntüleri analiz eden ve belirli görevleri yerine getirmek için öğrenen algoritmalardan oluşur. Makine öğrenimi teknikleri, özellikle radar sinyal işleme, hedef tespiti ve yanlış alarm oranlarını azaltma konularında büyük bir potansiyele sahiptir.

Radar sistemlerinde Rassal Orman (RF), Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) ve Gradyan Artırma (GB) gibi makine öğrenimi yöntemleri kullanılarak rüzgar türbinleri ile gerçek hava hedeflerinin ayrıştırılması mümkün hale gelmiştir. Özellikle Doppler frekans bileşenleri, menzil hücrelerindeki güç seviyeleri ve sinyal işleme teknikleri kullanılarak radarın daha doğru hedef tespiti yapması sağlanabilir.

## 1.4 Çalışmanın Amacı ve Katkıları

Bu çalışma, rüzgar türbini yoğunluğunun yüksek olduğu ve rüzgar türbinleri ile uçak arasındaki RKA farkının büyük olduğu ortamlarda, iki boyutlu (menzil ve azimut) hava

trafik kontrol radar sistemlerinin hava hedeflerini doğru şekilde tespit etmesini sağlamak için yeni bir makine öğrenimi tabanlı hedef sınıflandırma yaklaşımı geliştirmeyi amaçlamaktadır.

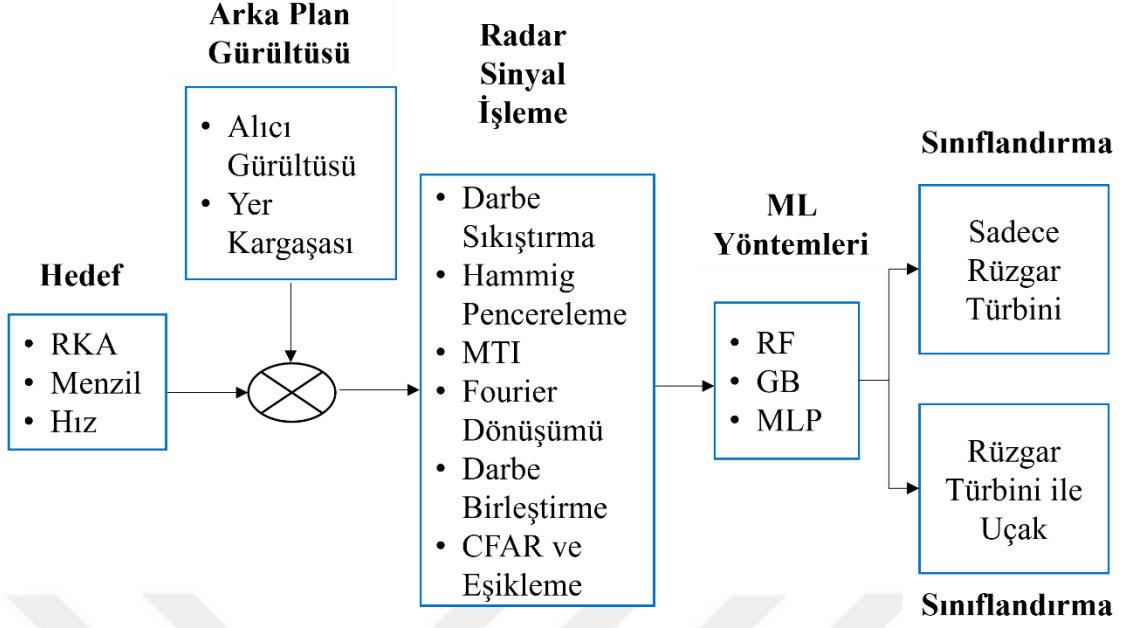
Önerilen yaklaşım, radar menzil hücrelerindeki güç seviyelerine dayalı olarak “sadece rüzgar türbini” ve “rüzgar türbini ile uçak” olmak üzere iki farklı hedef sınıfını ayırt etmeyi amaçlamaktadır. Bu doğrultuda, radar sinyal işleme teknikleri kullanılarak rüzgar türbinlerinden kaynaklanan yanlış hedeflerin etkisi analiz edilmiş, makine öğrenimi tabanlı sınıflandırma algoritmaları (RF, MLP, GB) ile rüzgar türbini parazitleri içerisindeki hedeflerin tespit performansı değerlendirilmiş ve üç farklı senaryo kapsamında sınıflandırıcıların başarımı karşılaştırılmıştır.

Çalışma kapsamında yapılan deneyler, rüzgar türbinleri ile farklı menzil hücrelerine düşen uçakların yaklaşık %100 doğruluk oranıyla sınıflandırılabilirdiğini, ancak rüzgar türbinleri ile aynı menzil hücrelerine düşen uçakların sınıflandırma başarısının yaklaşık %50 seviyesinde kaldığını ortaya koymuştur. Kullanılan üç sınıflandırıcıda benzer sonuçlar elde edilmiş olup en yüksek doğruluk oranı RF ve GB sınıflandırıcılarında gözlemlenmiştir.

Bu çalışma, hava trafik kontrol personeline uçak kazalarının önlenmesine yönelik destekleyici bilgiler sunmayı, radar sistemlerinin doğruluk oranını artırmayı ve rüzgar türbinlerinden kaynaklanan parazitleri en aza indirerek radar sistemlerinin güvenilirliğini artırmayı hedeflemektedir.

## **1.5 Tezin Yapısı**

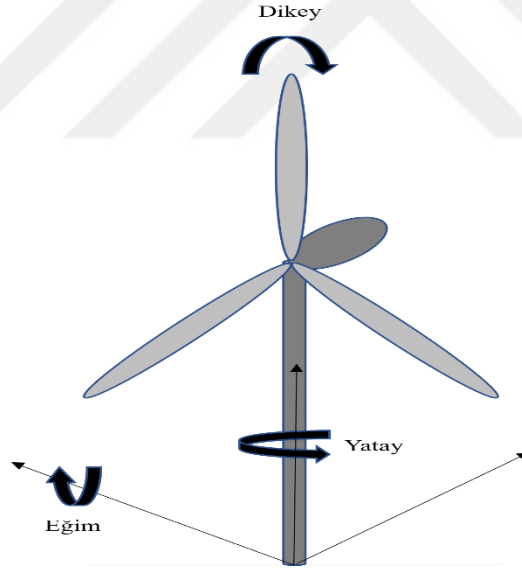
Tezin yapısı Şekil 1.2’de sunulmuş olup tezin diğer bölümleri şu şekilde oluşmaktadır: Bölüm 2’de, rüzgar türbinlerinin elektromanyetik saçılma özellikleri, RKA hesaplama yöntemleri ve sinyal modelleme yaklaşımları detaylı olarak incelenmiştir. Bölüm 3’te, radar sinyal işleme süreçleri ve simülasyonda kullanılan radar parametreleri tanıtılmıştır. Bölüm 4’te, sınıflandırma sürecinde kullanılan makine öğrenimi algoritmaları (RF, MLP, GB) ve model değerlendirme kriterleri açıklanmış, ayrıca geliştirilen yöntemin farklı senaryolarda uygulanmasıyla elde edilen sınıflandırma sonuçları karşılaştırılmış ve başarı oranları değerlendirilmiştir. Son olarak, Bölüm 5’de, bulgular tartışılmış, yöntemin güçlü ve zayıf yönleri ele alınmış ve gelecekteki çalışmalara yönelik öneriler sunulmuştur.



Şekil 1.2 Tez çalışmasının yapısının betimlenmesi.

### 2.1 Rüzgar Türbininin Saçılma ve Doppler Karakteristiği

Rüzgar türbinleri, rüzgar koşullarına en iyi şekilde uyum sağlamak ve maksimum enerji üretimini gerçekleştirmek için Şekil 2.1’de görüldüğü üzere üç eksende hareket edebilir. Yatay hareketi, türbinin gövde kısmının dikey eksende dönmesini ifade eder ve rüzgar yönüne hizalanmasını sağlar. Dikey hareketi, kanatların kendi eksenini etrafında döndürülmesiyle gerçekleşir ve rüzgar hızına bağlı olarak açılarının ayarlanmasına olanak tanır, böylece aşırı yüklenme önlenir ve enerji üretimi optimize edilir. Eğim hareketi ise, rotor düzleminin yukarı veya aşağı eğilmesini ifade eder ve genellikle rüzgarın düşey bileşenlerine karşı türbin performansını artırmak için kullanılır. Bu üç hareketin dinamik kontrolü, rüzgar türbinlerinin verimliliğini artırırken, mekanik gerilmeleri en aza indirerek sistemin uzun ömürlü olmasını sağlar.



Şekil 2.1 Rüzgar türbininin dönüş hareketi.

RKA, bir nesnenin radar sinyallerini ne kadar güçlü yansıttığını ifade eden bir büyüklüktür. Yüksek RKA değerine sahip hedefler radar sistemleri tarafından kolayca tespit edilebildiğinden, rüzgar türbinlerinin dönen kanatları sürekli değişen yönelimleri nedeniyle radar sinyallerinde düzensiz parlamalar oluşturarak tespit sürecinde radar performansını etkilemektedir [1]. Rüzgar türbininin RKA değeri, türbinin; materyali, boyutu, şekli, rotor pozisyonu ile radar frekansı, iletilen sinyalin türbine geldiği açı,

alıcısındaki gözlem açısı, anten polarizasyonu gibi birçok faktöre bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [2]. Yapılan elektromanyetik modelleme çalışmaları, radarların kullandığı S-bandı (2.7-2.9 GHz) ve L-bandı (1.3 GHz) frekanslarında, rüzgar türbinlerinin toplam RKA'sının 300.000 m<sup>2</sup>'ye kadar (54.78 dBm<sup>2</sup>) ulaşabileceğini ortaya koymuştur. Sadece türbin kanatlarının RKA değeri ise her biri için 30.000 m<sup>2</sup> (42.78 dBm<sup>2</sup>) seviyesinde olabilmektedir [1]. Rüzgar türbinlerinin sahip olduğu bu yüksek RKA değeri nedeniyle, radar sistemlerinin performansı, gürültü limitli ortamda Sinyal-Gürültü Oranı (SNR) ile değerlendirilirken, rüzgar türbinlerinin bulunduğu ortamlarda Sinyal-Kargaşa Oranı (SCR) dikkate alınarak analiz edilmektedir [2].

Doppler etkisi, hareketli bir nesnenin radar dalgalarıyla etkileşime girmesi sonucu frekansta meydana gelen kaymayı ifade eder. Sabit yansıma kule ve nesnel tarafından üretilirken, dinamik yansıma dönen kanatlar tarafından oluşturulur. Ancak, bu dinamik yansımayı nicelleştirmek oldukça zordur; çünkü kanatların aerodinamik şekli, iç yapısındaki metalik ve metalik olmayan malzemeler ve üç farklı hareket türü (dikey, yatay ve eğim) gibi birçok faktör bu yansımayı etkilemektedir. Ayrıca, dönen kanatlar, elektromanyetik dalgaların kuleye ulaşmasını periyodik olarak engelleyebilir ve bu engellemeler, kuleden saçılan sinyalin genliğinin değişmesine neden olabilir. Doppler etkisi, dönen kanatlar tarafından üretilmekte olup kanatların dönüş hızı rüzgar hızına bağlı olarak değişirken, yönelimi de rüzgar yönüne göre farklılık göstermektedir. Bunun yanı sıra, kanatların farklı bölümleri farklı radyal hızlara sahip olduğu için, radar sistemlerinde türbinlere ait geniş bir Doppler frekans spektrumu oluşabilir. Tüm bu faktörler, radar tarafından zamanla algılanan yansımanın miktarını değiştirerek karmaşık bir saçılma deseni oluşturmaktadır [3].

Bir kanat segmentinin maksimum Doppler frekans kayması  $f_{dmax}$ , şu şekilde yaklaşık olarak hesaplanabilir [2, 4]:

$$f_{dmax} = \left| \frac{4\pi r f_w}{\lambda} \right| \quad (2.1)$$

$r$  kanat uzunluğu,  $\lambda$  dalga boyu ve  $f_w$  türbinin dakikadaki dönüş sayısı şeklinde ifade edilir.

Radar sistemleri hareketli hedef tespiti yaptığından, rüzgar türbinlerinin dönen rotorları belirgin Doppler bileşenleri üretir. Bu bileşenlerin algılanma sıklığı, radar açısından kritik öneme sahiptir [5].

## 2.2 Rüzgar Türbinlerinin Radarlara Olan Olumsuz Etkileri

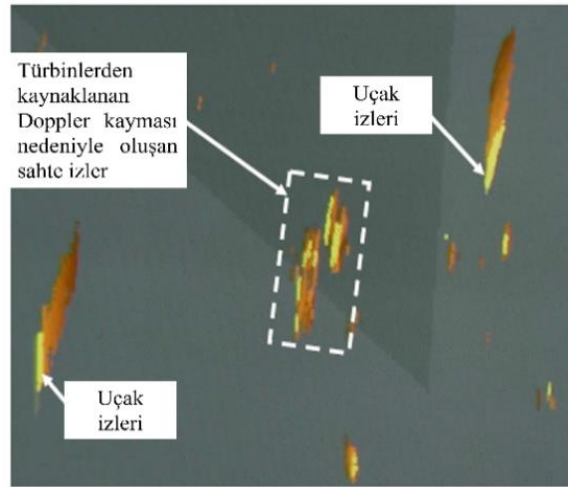
Rüzgar türbinlerinin radar sistemleri üzerindeki olumsuz etkileri gölgeleme, kargaşa ve hassasiyet kaybı olarak üç ana başlıkta incelenir. Bu etkiler, özellikle hava trafik kontrol ve hava savunma radarları için ciddi problemlere yol açabilir.

### 2.2.1 Gölgeleme

Rüzgar türbinleri, radar dalgalarının geçişini fiziksel olarak engelleyerek, türbinlerin arkasında veya yakınında bulunan hedeflerin algılanmasını zorlaştırır. Radar huzmesi, türbinlerin arkasında kırınım etkisiyle hızla yeniden şekillenir. Tek bir türbinin oluşturduğu radar gölge bölgesi genellikle kule çapına eşdeğer genişlikte olup kule arkasına doğru yalnızca birkaç yüz metre boyunca uzanır [6]. Bu etki tekil türbinler için nispeten küçük olsa da, geniş alanları kapsayan rüzgar çiftliklerinde gölge bölgesi 2-3 km derinliğe ulaşabilir [7].

### 2.2.2 Kargaşa

Radarin, asıl hedefler yerine rüzgar türbinlerinden gelen yansımaları algılaması, gereksiz sinyallerin oluşmasına neden olur. Türbinlerden kaynaklanan sabit ve dinamik yankılar, radar ekranında sahte hedefler gibi görünerek yanlış tespitlere yol açabilir. Türbin kanatları, Doppler frekansları üreterek Hareketli Hedef Belirleme (MTI) ve Hareketli Hedef Tespiti (MTD) radarlarında yanlış alarmlar ve istenmeyen sinyaller oluşturabilir. Rotor çapları 40 ila 126 metre arasında değişen ve dakikadaki dönüş sayısı 12-34 arası değişen türbin kanatlarının uç hızları 150 Knot'u aşabilmektedir. Bu hız, düşük hızlı bir hava aracı, örneğin bir Cessna uçağı ile karşılaştırılabilir [8].



Şekil 2.2 Hareket halindeki rüzgar türbinlerinden gelen yansımalar [7].

### 2.2.3 Hassasiyet Kaybı

Hassasiyet kaybı; rüzgar çiftliklerinin üzerinde ve çevresinde, menzil ve açıyı kapsayan bir bölgede istenen hava hedeflerinin tespit olasılığındaki azalmadır [1]. Türbinlerin dönen kanatları, radar sinyallerinde zamanla değişen Doppler bileşenleri oluşturarak hareketli hedeflerin ayırt edilmesini zorlaştırırken, geniş RKA değerleri nedeniyle radarın dinamik hedeflerden ziyade türbinleri algılamasına neden olabilir. Şekil 2.3'te beyaz kesikli daire ile gösterilen bölgede, rüzgar türbinlerinin yüksek RKA değerlerine sahip olması, eşik belirleme algoritmalarından biri olan Sabit Yanlış Alarm Oranı (CFAR) işleminde, bu bölgelerdeki yankıların yüksek genlikli olarak değerlendirilmesine neden olmaktadır. Bu durum, CFAR algoritmasının adaptif eşik seviyesini artırarak, düşük RKA'ya sahip küçük hedeflerin bu yüksek eşik seviyesinin altında kalmasına ve dolayısıyla tespit edilememesine yol açmaktadır. Bu etki, özellikle rüzgar türbini kümelerinin yoğun olduğu alanlarda gerçek hedeflerin radar tarafından algılanmasını zorlaştırmakta ve hava sahası güvenliği açısından ciddi bir zafiyet oluşturabilmektedir. Yani radar, düşük RKA'lı hava hedeflerini (dronlar, küçük uçaklar, helikopterler) yeterince iyi tespit edemez.



Şekil 2.3 Rüzgar türbinleri sebebiyle radarda yaşanan hassasiyet kaybı [1].

ATC radarları yalnızca 2D (menzil ve azimut) bilgisi sağladığından, rüzgar çiftliklerinden kaynaklanan yankılar tüm irtifa seviyelerini etkileyebilir. 3D radarlar yükseklik çözümü de yaptığından, özellikle düşük irtifa ışınları rüzgar çiftliklerinden etkilenerek alçak uçan hedeflerin algılanmasını zorlaştırabilir. Faz dizilimli radar sistemleri düşük irtifa ışınlarında daha fazla bozulmaya maruz kalırken, geniş ışın açıklığına sahip radarlar ise yüksek irtifalarda yan lob etkilerine karşı daha hassas hale gelebilir [1].

Rüzgar türbinlerinin güçlü yansımaları radar sistemlerinde çeşitli olumsuz etkilere neden olmaktadır. Türbinlerden kaynaklanan yankılar, ATC radar antenlerinin (ana lobu  $3^\circ$ ) yan loblarında bile algılanarak radarın ana ışınının her iki tarafında  $3^\circ$  azimut açısı gibi bir alanda yanlış tespitlere yol açabilir. Ayrıca, bu yansımalar radarın analog-dijital dönüştürücü biriminin dinamik aralığını aşarak alıcıda doygunluğa neden olabilir ve sinyallerin düzgün temsil edilmesini engelleyebilir. Modern ATC radar sistemlerinde kullanılan darbe sıkıştırma teknikleri, menzil yan loblarını artırarak  $\pm 15$  km'ye kadar duyarlılık kaybına yol açabilir. Bu etkiler, yüksek güçlü kısa darbeler gönderen eski nesil radar sistemlerinde daha az hissedilirken, modern katı hal radar teknolojilerinde darbe sıkıştırma nedeniyle daha belirgin hale gelmektedir [1].

ATC radarlarının düşük Darbe Tekrarlama Frekansı (PRF) değerleri, Doppler belirsizliklerini artırarak MTI ve MTD gibi algoritmaların rüzgar türbini yankılarını gerçek hedeflerden ayırt etmesini zorlaştırmaktadır. Türbinlerden kaynaklanan büyük yankılar, CFAR algılama algoritmalarında arka plan gürültü seviyesini yükselterek küçük hedeflerin tespit edilmesini güçleştirebilir [1].

Bununla birlikte, rüzgar türbinlerinden kaynaklanan yoğun yankılar radar izleme sistemini gereksiz izlerle doldurarak yanlış izlerin oluşmasına neden olabilir. Radar işlemcisinin aşırı yüklenmesi, yanlış hedeflerin takibine yol açarak hava sahası yönetimi ve hava trafik kontrol operasyonları açısından ciddi güvenlik riskleri doğurabilir. Özellikle rüzgar çiftliklerinin yoğun olduğu bölgelerde, radarın düşük RKA değerine sahip dronlar, küçük uçaklar ve helikopterler gibi hedefleri tespit etme kabiliyeti azalabilir.

### **2.3 Rüzgar Türbini Etkisi Azaltma Yöntemleri**

Rüzgar türbinlerinin radar sistemleri üzerindeki olumsuz etkilerini (gölgeleme, kargaşa, hassasiyet kaybı) azaltmak veya ortadan kaldırmak için çeşitli teknik ve operasyonel çözümler geliştirilmiştir. Mevcut olumsuz etki azaltma yöntemleri arasında, radar ve rüzgar türbini performansını ciddi şekilde düşürmeyecek, radarların mevcut tasarımlarında yüksek maliyetli modifikasyonlara ihtiyaç duymayacak çözümler ön plana çıkmaktadır. Bu bağlamda, sinyal işleme teknikleri ve hedef sınıflandırma algoritmaları dikkat çekmektedir. Özellikle, bu yöntemler sayesinde radarların etkinliği artırılmakta, rüzgar türbinlerinden kaynaklanan olumsuz etkiler en aza indirilmektedir. Bahse konu çözümler aşağıdaki başlıklar altında incelenebilir:

### **2.3.1 Radar Soğurucu Malzeme**

Rüzgar türbinlerinin radar sistemleri üzerindeki etkisini azaltmanın temel amacı, türbin bileşenlerinin radar dalgalarını yansıtmasını en aza indirerek RKA değerini düşürmektir. Bu bağlamda, türbin kanatları ve kulelerinde Radar Soğurucu Malzeme (RAM) kullanımı, yansımaları 15-20 dB kadar azaltma potansiyeline sahiptir. Ancak, RAM'in yüksek maliyeti, dayanıklılık sorunları ve kanatların yıldırım koruma sistemlerini olumsuz etkileme riski nedeniyle geniş çaplı uygulanması sınırlıdır. Bu kısıtlamaları en aza indirmek için, RAM uygulaması özellikle yüksek saçılma gösteren bölgelerde lokal olarak gerçekleştirilebilir [4]. Kısmi RAM uygulamasında özellikle rotor kanadının kök bölgesindeki RKA değerini azaltmak, radar ekranında görünme sıklığını önemli ölçüde düşürürken, rotor kanadının uç kısmındaki veya türbinin sabit kısımlarındaki RKA azaltma önlemleri beklenen seviyede etkili olmamaktadır.

### **2.3.2 Şekillendirme**

Rüzgar türbinlerinin radar sistemleri üzerindeki etkisini azaltmanın bir diğer yöntemi, fiziksel tasarımın optimize edilerek radar dalgalarının daha az yansıtılmasını sağlamaktır. Türbin kulelerinin konik yapıya dönüştürülmesi ve naselin eğimli, köşesiz yüzeylerle tasarlanması, radar yansımalarının belirli bir açısal bölgeye yönlendirilmesini sağlayarak saçılan enerjiyi önemli ölçüde azaltmaktadır. Yapılan çalışmalar, kule ve naseleli yüzeylerine uygulanan eğimlendirme teknikleri sayesinde radar yansımalarının yaklaşık 30 dB kadar düşürülebildiğini göstermektedir [2, 9].

Kanatların radar görünürlüğünü azaltmak için ise aerodinamik şekillendirme teknikleri kullanılabilir. Ancak, bu tür tasarım değişiklikleri türbinin aerodinamik verimliliğini olumsuz etkileyebileceğinden performans kaybına neden olabilir. Bununla birlikte, burun kapağı gibi bileşenler için ek şekillendirme tedbirleri gerekmemektedir [10].

### **2.3.3 Türbin Yerleşimi**

Rüzgar türbinlerinin radar sistemlerine olan etkisini minimize etmenin en etkili yöntemlerinden biri, türbinlerin stratejik bir şekilde konumlandırılmasıdır. Türbinlerin radar görüş hattından uzak alanlara yerleştirilmesi, radar sinyalleriyle doğrudan etkileşimini azaltarak istenmeyen yankıları düşürebilir. Bunun yanı sıra, türbinler arasındaki mesafenin artırılması ve türbinlerin radar dalgalarına düşük yansıtıcılık sunan açılarla hizalanması, türbinlerin birbirlerini gölgeleyecek şekilde dizilmesi, radar sistemleri üzerindeki kargaşa etkisini en aza indirmeye yardımcı olabilir [11].

### **2.3.4 Radar Anten Ayarı ve Yönlendirme Stratejileri**

Radar sistemlerinin rüzgar türbinlerinden kaynaklanan parazit sinyallerden etkilenmesini azaltmanın bir diğer yöntemi, anten yönlendirme tekniklerinin uygulanmasıdır. Bu teknik, radar anteninin fiziksel veya elektronik olarak eğimlendirilmesi yoluyla, türbinlerden gelen radar aydınlatmasını minimum seviyeye indirmeyi amaçlar. Antenin eğim açısının ayarlanması, türbinlerden kaynaklanan güçlü yansımaları azaltabilir, ancak türbinlerin RKA değerleri çok büyükse, daha büyük bir eğim açısı gerekecektir. Bu durum, özellikle uzun menzilde alçak irtifada uçan hedeflerin tespit performansını ciddi ölçüde düşürebilir ve radarın 360 derece taraması sırasında genel algılama kapasitesini olumsuz yönde etkileyebilir [12].

Özellikle 3D hava savunma radarları, elektronik hüzmeye eğimi teknolojisini kullanarak, türbinlerin yoğun olduğu bölgelerde sinyal hassasiyetini düşürerek parazit etkisini azaltabilir. Ancak bu yöntem, radarın belirli yönlerdeki tespit yeteneğini sınırlayabileceğinden, uygulanabilirliği operasyonel gereksinimlere bağlı olarak değerlendirilmelidir [12].

### **2.3.5 Ek Radar Sistemleri**

Rüzgar türbinlerinin radar sistemleri üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla boşluk doldurma radarları birlikte kullanılabilir. Boşluk doldurma radarları, türbinlerin neden olduğu kör bölgeleri kapatarak, radar kapsama alanındaki eksiklikleri gidermeye yardımcı olur. Özellikle alçak irtifadaki hedeflerin izlenmesi ve tespit edilmesi için stratejik konumlandırılmış ek radarlarla radar görünürlüğü artırılabilir. Ayrıca, farklı radar sistemlerinden gelen verilerin füzyonu sayesinde, radar görüntüleme doğruluğu artırılabilir ve rüzgar türbinlerinin neden olduğu olumsuz etkiler önemli ölçüde azaltılabilir.

### **2.3.6 Radar Sinyal İşleme Teknikleri**

Radar sistemlerinde rüzgar türbinlerinden kaynaklanan yankıları azaltmak ve gerçek hedef tespit performansını korumak amacıyla çeşitli standart ve gelişmiş teknikler uygulanmaktadır. Bu teknikler, radarın yanlış hedef tespitlerini bastırma ve gerçek hedefleri koruma yeteneklerine göre sınıflandırılabilir.

Standart teknikler, radarın menzil ve azimut hücreleri üzerinde kullanıcı tanımlı kısıtlamalar getirerek rüzgar türbini yankılarının etkisini azaltmayı amaçlamaktadır.

**Hassasiyet-Zaman Kontrolü:** Kullanıcı tarafından belirlenen menzil ve azimut bölgelerinde rüzgar türbini yankılarının zayıflatılmasını sağlar. Gerçek hava hedeflerinin tespit performansını doğrudan etkilemezken, yanlış hedeflerin bastırılmasında önemli oranda etkilidir [13].

**Menzil-Azimut Sınırlama Haritası:** Kullanıcı tanımlı menzil ve azimut hücrelerinde radarın belirli bölgelerdeki yankıları ve plotları engellemesini sağlar. Yanlış hedef tespitlerini büyük ölçüde bastırır da, bu yöntemin en büyük dezavantajı, aynı bölgede bulunan gerçek hava hedeflerinin tespit edilmesini de engelleyebilmesidir [13].

**İz İklendirme Engelleme:** Radarın belirlenen menzil ve azimut hücrelerinde yeni hedef izleri başlatmasını önleyerek yanlış izlerin oluşmasını engeller. Ancak bu teknik, engellenen bölgede gerçek hava hedeflerinin izlenmesini de sınırlandırdığı için kritik hava sahalarında dikkatli uygulanmalıdır [13].

**Hız Düzenlemesi:** Belirlenen menzil ve azimut hücrelerinde, radarın yalnızca belirli hız aralığındaki hedefleri izlemesine izin verir. Bu teknik yanlış hedeflerin tespit edilmesini önlemek için etkili bir yöntem olsa da, özellikle düşük hızda hareket eden hava hedeflerinin algılanmasını da kısıtlayabilir [13].

Gelişmiş teknikler, radar sisteminin sinyal işleme yeteneklerini optimize ederek rüzgar türbinlerinden gelen yankıları bastırırken, hava hedeflerinin tespit edilebilirliğini artırmayı amaçlamaktadır.

**Eşzamanlı Huzme İşleme:** Radar, bağımsız iki kanal üzerinden düşük ve yüksek irtifalarda iki farklı huzme kullanarak hedef tespiti yapar. Bu teknik, rüzgar türbinlerinin etkisini önemli ölçüde azaltırken, türbinlerin bulunduğu bölgelerde hava hedeflerinin tespitini iyileştirmektedir [13].

**Gelişmiş CFAR:** CFAR algoritmasını geliştirerek, radarın arka plan kargaşasını belirlerken rüzgar türbinlerinden kaynaklanan yüksek genlikli yankıları dikkate almamasını sağlar. Bu yöntem, türbin kaynaklı tespit gölgelemesi etkisini büyük oranda ortadan kaldırarak radarın küçük hedefleri daha iyi algılamasını sağlar [13].

**Her Bir Doppler Filtresi İçin Kargaşa Haritası Kullanılması:** Radar, her bir Doppler filtresi için bağımsız kargaşa haritaları oluşturarak rüzgar türbini yankılarının etkisini en aza indirir. Böylece, yanlış tespitlerin büyük oranda bastırılması sağlanır ve radarın gerçek hedefleri doğru bir şekilde izlemesi mümkün hale gelir [13, 14].

**Gelişmiş Huzme Yönetimi:** Daha dar huzme genişliği, radarın yan lob etkilerini azaltarak türbinlerden kaynaklanan yankıların bastırılmasını sağlar ve hava hedeflerinin ayrıştırılmasını kolaylaştırır [14].

**Yüksek Çözünürlüklü Menzil Ayrıştırması:** Menzil çözünürlüğü iyileştirilerek, radarın türbinler arasındaki hedefleri hassasiyetle tespit edebilmesi sağlanmıştır. Bu sayede, türbin yansımaları ile gerçek hava hedefleri arasındaki ayırım daha belirgin hale getirilmiştir [14].

**Yüksek Dinamik Aralık:** Dinamik aralık, radar sisteminin aynı anda hem güçlü hem de zayıf sinyalleri algılama yeteneğini ifade eder. Bu özelliğin artırılması, özellikle türbin yankıları ile düşük RKA'lı hedeflerin birlikte hassas bir şekilde işlenmesini mümkün kılar [14].

**Yan Lob Kontrolü:** Radar sistemlerinde yan lob seviyelerinin düşürülmesi, istenmeyen yönlerden gelen yankıların etkisini azaltarak sahte hedef oluşumunu engeller ve yanlış alarm oranlarını düşürür. Yan lob bastırma uygulamaları, özellikle karmaşık ve parazitli ortamlarda hedef tespit doğruluğunu artırmada önemli bir katkı sağlar [14].

**Gelişmiş Hedef İzleme Algoritmaları:** Türbin yankılarının yanlış izlemeye neden olmasını engellemek amacıyla durağan izleme teknikleri uygulanmıştır. Türbinler durağan izler olarak işaretlenmiş ve radar izleme sistemlerinde hedef sınıflandırma algoritmaları geliştirilmiştir. Böylece, radarın rüzgar türbinlerinden kaynaklanan yanlış izleri takip etmesi önlenmiş ve sahte iz oluşumu azaltılmıştır [13, 14].

### **2.3.7 Düzenleyici Kurumların Önlemleri ve Politikaları**

Bazı düzenleyici kurumlar, rüzgar çiftliklerinin radar sistemleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek ve en aza indirmek amacıyla belirli yönergeler sunmaktadır. Eurocontrol ve ICAO gibi uluslararası hava trafik yönetim otoriteleri, radar sistemlerinin görüş hattında rüzgar türbinlerinin bulunup bulunmadığını belirlemek için koruma bölgeleri ve etki değerlendirme kriterleri tanımlamıştır.

Benzer şekilde, Dünya Meteoroloji Örgütü gibi kuruluşlar, rüzgar türbinlerinin hava radarlarına en az 5 km mesafede konumlandırılmasını, ayrıca 20 km'ye kadar olan mesafelerde türbinlerin radar performansına etkisinin analiz edilmesini önermektedir. Bu tür kılavuzlar, genelleştirilmiş kurallardan ziyade, her bölgenin ve radar sisteminin kendine özgü koşullarına göre vaka bazlı detaylı değerlendirmelerin gerekliliğini vurgulamaktadır [15].

## **2.4 Rüzgar Türbinlerinin Yerlerinin Radarda Tespit Edilmesi**

Radar sistemleri üzerindeki rüzgar türbini kaynaklı parazitlerin azaltılabilmesi veya tamamen ortadan kaldırılabilmesi için en kritik adımlardan biri, türbinlerin konumlarının hassas bir şekilde belirlenmesidir. Türbin pozisyonlarının yanlış tespit edilmesi ya da hiç belirlenememesi durumunda, uygulanacak etki azaltma algoritmalarının etkinliği düşecek ve bu durum radar sisteminde ilave karmaşalara yol açabilecektir. Bu bağlamda, radar verileri ile türbinlerden kaynaklanan saçılma sinyalleri arasındaki spektral ve mekansal farklılıklardan yararlanılması, Doppler çözünürlüğünün artırılması ve türbinlere yerleştirilen transponderler ile türbin konum bilgilerinin doğrulanması [16] gibi yöntemler öne çıkmaktadır. Ayrıca, radarın belirli taramalarında elde edilen verinin genlik ortalamasına dayalı olarak dinamik bir kargaşa haritasının oluşturulması [17], derin öğrenme ve görüntü işleme tekniklerinin kullanımıyla radar verilerinden rüzgar türbini sinyallerinin ayrıştırılması ve hedef sınıflandırma yöntemleri aracılığıyla radar sinyallerinden türbin konumlarının belirlenmesi gibi yaklaşımlar, rüzgar türbinlerinden kaynaklanan radar performans bozulmalarını minimize etmek adına önemli çözümler sunmaktadır.

## **2.5 Rüzgar Türbini Sinyal Modelleme Yaklaşımı**

Rüzgar türbinlerinin radar sistemleri üzerindeki etkilerini analiz etmek ve uygun etki azaltma yöntemlerini belirlemek amacıyla, ölçüm verilerinin yanı sıra genellikle benzetim araçlarından yararlanılmaktadır. Gerçek saha ölçümleri, yüksek maliyet, zaman gereksinimi ve kontrol edilemeyen çevresel faktörler nedeniyle her zaman uygulanabilir değildir. Özellikle türbinlerin sayısı, konumları, rotor hareketleri ve radar parametreleri gibi birçok değişkenin etkili olduğu karmaşık senaryolar için, benzetim araçları daha esnek ve düşük maliyetli bir çözüm sunmaktadır. Bu kapsamda, bilgisayar tabanlı yazılım araçları geliştirilerek farklı operasyonel koşulları modellemek ve rüzgar türbinlerinin radar sistemleri üzerindeki etkilerini detaylı olarak incelemek mümkün hale gelmiştir.

Bu yazılımlar, rüzgar türbini sinyal modelleme yaklaşımları ile rüzgar türbinlerinden kaynaklanan radar ekolarını ve Doppler imzalarını modelleyerek, radar performansına olan etkilerini analiz edebilecek şekilde tasarlanmıştır. Gerçekçi saha senaryoları oluşturularak, türbinlerden kaynaklanan yansıma bileşenleri simüle edilebilir ve bu sayede türbinlerin radar sistemlerindeki yanlış alarm oranlarını artırma, hedef tespit hassasiyetini düşürme veya Doppler filtreleme süreçlerini olumsuz etkileme gibi

problemlere nasıl yol açtığı değerlendirilebilir. Ayrıca, bu modeller radar sistemlerine entegre edilerek, türbin kaynaklı sinyallerin ayrıştırılması ve etki azaltma algoritmalarının geliştirilmesine katkı sağlayabilir. Rüzgar türbini sinyal modelleme yaklaşımlarının etkin bir şekilde kullanılması, radar performansının korunmasına yönelik stratejik çözümler sunarken, hava sahası gözetleme ve hava trafik yönetimi sistemlerinin güvenilirliğini artırmaktadır [16, 17].

Radar sistemlerinde Lineer Frekans Modülasyonu (LFM veya cıvıltı) sinyali, geniş bant sayesinde yüksek çözünürlük sağlarken, uzun mesafelerde hedef tespitini mümkün kılan, Doppler etkilerine karşı toleranslı ve gelişmiş sinyal algılama kabiliyetine sahip olması nedeniyle özellikle radar sistemlerinde tercih edilir. Bu sinyal rüzgar türbininden kaynaklanan ekoların modellenmesi için kullanılan temel sinyal türlerinden birisidir.

## **2.6 Radar Kesit Alanı Hesaplama Yöntemleri**

Rüzgar türbinlerinin RKA hesaplanması, hava trafik yönetimi, radar sistemlerinin doğruluğu ve elektromanyetik uyumluluk açısından kritik bir gerekliliktir. Bu hesaplamalar, farklı radar sistemleri ile türbinler arasındaki etkileşimleri anlamaya ve olası olumsuz etkileri azaltmaya yönelik önemli bilgiler sağlar. Rüzgar türbinlerinin RKA'sı, kanatlar, kule ve nasele gibi farklı yapısal bileşenlerin toplam radar yansıtma etkilerini içerir. Ancak, türbinlerin büyüklüğü, geometrisi ve hareketli parçaları nedeniyle RKA hesaplama süreci oldukça karmaşıktır. RKA hesaplamasında kullanılan başlıca yöntemler ve uygulama alanları şu şekildedir:

### **2.6.1 Deneysel Ölçümlere Dayalı Modeller**

Deneysel ölçümlere dayalı modeller, rüzgar türbinlerinin RKA ve Doppler karakteristiklerini belirlemek için gerçek radar verilerinden elde edilen ölçümlere dayanır. Bu yöntem, türbinlerin elektromanyetik saçılım özelliklerini doğrudan gözlemleyerek, teorik ve simülasyon tabanlı modellemelerle doğrulama yapılmasını sağlar.

Gerçek saha ölçümleri, rüzgar türbinlerinin radar sistemleri üzerindeki etkilerini değerlendirirken, çevresel faktörler ve radar sisteminin teknik özellikleri gibi değişkenleri de içermektedir. Bu nedenle, farklı radar bantlarında (L, S, X vb.), farklı açılardan ve çeşitli operasyonel koşullarda yapılan deneysel ölçümler, rüzgar türbinlerinden kaynaklanan radar yankılarının gerçekçi bir şekilde modellenmesine katkı sağlar.

Deneysel ölçümlere dayalı modeller, belirli türbin konfigürasyonları için elde edilen verileri temel alarak RKA tahmini yapar ve bu sayede radar sistemlerinin performans analizinde kritik bir rol oynar. Elde edilen ölçümler, radarın türbin yankılarını nasıl algıladığını anlamaya yardımcı olurken, radar sinyal işleme ve hedef ayırt etme algoritmalarının iyileştirilmesi için de kullanılabilir.

### **2.6.2 Ölçeklendirilmiş Rüzgar Türbini Modelleri**

Rüzgar türbinlerinin radar sistemleriyle etkileşimini analiz etmek amacıyla kullanılan saha ölçümleri, türbinlerin dinamik hareketlerinin kontrol edilememesi gibi zorluklar içermektedir. Buna karşın, laboratuvar ortamında gerçekleştirilen ölçümler, hem türbin modeli hem de radar ve elektromanyetik ortam üzerinde tam kontrol sağlayarak daha güvenilir ve tekrarlanabilir veriler sunmaktadır. Bu kapsamda, rüzgar türbini-radar etkileşiminin detaylı şekilde incelenmesi için yankısız odalarda ölçeklendirilmiş rüzgar türbini modelleriyle deneyler gerçekleştirilmektedir.

Benzerlik teorisine göre, ölçeklendirilmiş bir model, tam boyutlu bir rüzgar türbininin geometrik ve elektromanyetik özelliklerini koruyarak belirli radar imzalarını yansıtabilmektedir. Yapılan çalışmalar, ölçeklendirilmiş laboratuvar ölçümlerinin, elektromanyetik simülasyon sonuçları ve tam boyutlu türbin radar ölçümleri ile benzer spektrogramlar ürettiğini göstermektedir [18]. Bu yöntem, rüzgar türbinlerinin radar sistemlerine olan etkilerini anlamak ve radar performansını optimize etmeye yönelik stratejiler geliştirmek için önemli bir araç olarak değerlendirilmektedir.

### **2.6.3 Detaylı Elektromanyetik Hesaplama Yöntemleri**

Rüzgar türbinlerinin radar sistemleri üzerindeki elektromanyetik etkilerini yüksek doğrulukla analiz edebilmek için çeşitli hesaplama yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler, türbinlerin detaylı yapısını ve elektromanyetik saçılım özelliklerini hesaplamak amacıyla geliştirilmiştir. Genellikle Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) modelleri baz alınarak türbin geometrileri oluşturulmaktadır. Ancak, türbin üreticileri tarafından bu veriler genellikle gizli tutulduğundan, detaylı CAD modellerine erişim sınırlıdır. Ayrıca, elde edilen modellerin her farklı yan açı ve kanat hareketi için yeniden düzenlenmesi gerektiğinden, analizin karmaşıklığı artmaktadır [19].

RKA hesaplamalarında, Maxwell denklemlerinin türevleri veya yüksek frekans yaklaşımlarına dayalı sayısal çözümler kullanılmaktadır. Elektromanyetik saçılım analizinde yaygın olarak kullanılan bazı temel yöntemler şunlardır:

**Moment Yöntemi (MoM):** Frekans alanında integral denklemlerini çözerek türbin üzerindeki akımları ve saçılma mekanizmalarını detaylı şekilde hesaplar. Yüksek doğruluk sunmasına rağmen, büyük nesnelere için yüksek bellek ve işlem gücü gerektirmesi nedeniyle pratik uygulanabilirliği sınırlıdır [2, 20].

**Sonlu Farklar Zaman Bölgesi Yöntemi (FDTD):** Diferansiyel denklemleri zaman alanında çözen bu yöntem, büyük denklem sistemlerini doğrudan çözmeyi gerektirmez. Ancak, uzun işlem süreleri gerektirdiğinden hesaplama maliyetleri yüksektir [2].

**Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM):** Hem zaman hem de frekans alanlarında uygulanabilir ve karmaşık geometriler üzerinde yüksek hassasiyetle analiz yapabilir. Ancak, hesaplama süresi görece uzundur ve büyük yapılar için kaynak gereksinimi yüksektir [2].

**Geometrik Optik (GO):** Işın izleme tekniklerini kullanarak büyük nesnelere saçılma analizini yapar. [2, 20].

**Fiziksel Optik (PO):** Aydınlatılan yüzeylerdeki akımları hesaplayarak saçılan alanı belirler, ancak gölgeli bölgelerde doğruluk kayıpları yaşanabilir [2, 20].

**Hibrit Yöntemler:** Geometrik ve fiziksel optik yöntemlerin kombinasyonu ile daha kapsamlı analizler yapılabilir. Örneğin, Işın Gönderme ve Sekme (SBR) yöntemi, ışınları takip ederek yansıma ve gölgelenme efektlerini hesaplar [2].

**Geometrik Kırınım Teorisi / Üniform Kırınım Teorisi (GTD/UTD):** Merkezi işlem birimi ve bellek kullanımında en verimli yöntemlerden biridir. Özellikle büyük nesnelere için hızlı analiz imkanı sunmasına rağmen, türbin kanatları gibi karmaşık geometrilere her zaman tam uyum sağlamayabilir. Ancak, basit ve hızlı analizler için oldukça etkilidir [20].

Bu yöntemler, rüzgar türbinlerinin radar sistemlerine olan etkilerini daha iyi anlamak, radar performansını optimize etmek ve türbin kaynaklı parazitleri azaltmaya yönelik stratejiler geliştirmek için kullanılmaktadır. Çalışmanın amacına bağlı olarak, yüksek doğruluk gerektiren analizlerde MoM ve FEM, büyük ölçekli yapıların değerlendirilmesinde GO ve PO, hızlı ancak yeterli hassasiyet sağlayan hesaplamalar için ise GTD/UTD gibi yöntemler tercih edilmektedir [2, 20].

Bu kapsamda başlıca ticari elektromanyetik simülasyon yazılım araçları Tablo 2.1’de sunulmuştur.

**Tablo 2.1** Başlıca ticari elektromanyetik simülasyon yazılım araçları.

Adı	Tedarikçi	Sayısal Yöntem
High Frequency Structure Simulator	ANSYS	Mom, FEM, PO
CST Studio Suite	DS SIMULIA	MoM, FEM, SBR
FEKO	ALTAIR	MoM, FEM, PO, GO, UTD
XGtd, XFDTD	REMCON	MoM, PO, GO, UTD

#### 2.6.4 Basitleştirilmiş Radar Kesit Alanı Modelleri

Rüzgar türbinlerinin radar sistemlerine olan etkisi, fiziksel, operasyonel ve hareket parametrelerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Türbinlerin yerleşimi, rotor hareketi, anlık oryantasyonu ve fiziksel boyutları gibi birçok değişken, radar sinyallerinin saçılmasını doğrudan etkilemektedir. Bu faktörler, türbin kaynaklı yankıları analiz etmeyi zorlaştırırken, radar sistemlerinin algılama yeteneğini de önemli ölçüde sınırlandırmaktadır.

Radar-türbin etkileşiminin değerlendirilmesi için saha ölçümleri yapılabilse de, ölçüm süreçlerinin yüksek maliyeti, zaman gereksinimi ve çevresel değişkenlerin kontrol edilememesi gibi nedenler, alternatif yöntemlerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, türbin etkilerini analiz etmek için elektromanyetik benzetim araçları yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, detaylı benzetim modelleri yüksek hesaplama maliyetine ve uzun işlem sürelerine neden olduğundan, daha hızlı ve düşük maliyetli analizler yapabilmek amacıyla basitleştirilmiş RKA hesaplama yaklaşımları geliştirilmiştir.

Bu modeller, rüzgar türbinlerinden saçılan radar sinyallerinin özelliklerini belirlemek için kullanılan kanonik şekillere dayalı analitik yaklaşımlar ile türbinin farklı bileşenlerinin (kule, kanatlar, nasele) bireysel RKA katkılarını ayrı ayrı hesaplayarak toplam RKA değerini tahmin eder. Kanatlar ve kule gibi yapılar genellikle üçgen yüzeyler, silindirler gibi basit geometrik formlarla temsil edilir. Bu yaklaşım, karmaşık sayısal çözümler

gerektiren yöntemlere kıyasla daha düşük hesaplama maliyetine sahiptir ve türbinin farklı açılardaki radar yansımalarının hızlı bir şekilde değerlendirilmesini sağlar [19].

Analitik saçılma modelleri, sayısal yöntemlere kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır. Özellikle türbinin farklı geniş yan açılardaki etkileri değerlendirmek, rotor kanatlarının dönüş hareketlerini modellemek ve büyük ölçekli rüzgar çiftlikleri için genişletilebilir çözümler üretmek açısından daha esnek bir yapıdadır. Ayrıca, bu modeller sayesinde türbinlerden dönen yankı sinyallerinin genliği analiz edilerek radar sinyal işleme süreçleri optimize edilebilir. Bu süreçte düşük RKA'lı hedeflerin tespit performansındaki değişimler değerlendirilerek radar zafiyet analizi yapılabilir.

Bu tür basitleştirilmiş modeller, radar sistemleri için rüzgar türbinlerini eleme veya tespit etme stratejilerinin geliştirilmesine olanak tanırken, radar performansını artırmaya yönelik yeni filtreleme ve sinyal işleme tekniklerinin uygulanmasına da katkı sağlamaktadır.

Literatürde bir çok basitleştirilmiş RKA hesaplama modeli sunulmuş olup [21] numaralı çalışmada radar ile rüzgar türbinleri arasındaki mesafenin uzak alan koşullarını sağlamadığı durumların yaygın olarak gözlemlendiği belirtilmektedir. Bu nedenle, rüzgar türbininin RKA'sı, yakın alan koşulları ve en kötü senaryo dikkate alınarak modellenmiştir. Şekil 2.4 (a)'da gösterildiği üzere rüzgar türbininin kulesi, kesik koni şeklinde modellenmiş olup kule boyutları ve radarın bakış açısına bağlı olarak RKA değerinin eşitlik (2.2) ile hesaplanabileceği ifade edilmektedir.

$$\sigma_{kule} = 10 \log_{10} \left[ \frac{2\pi r D_{nf}^2}{\lambda} \sin(\alpha + \theta) \left\{ \frac{\sin\left(\frac{2\pi D_{nf}}{\lambda} \cos(\alpha + \theta)\right)}{\frac{2\pi D_{nf}}{\lambda} \cos(\alpha + \theta)} \right\}^2 \right] \text{ (dBsm)} \quad (2.2)$$

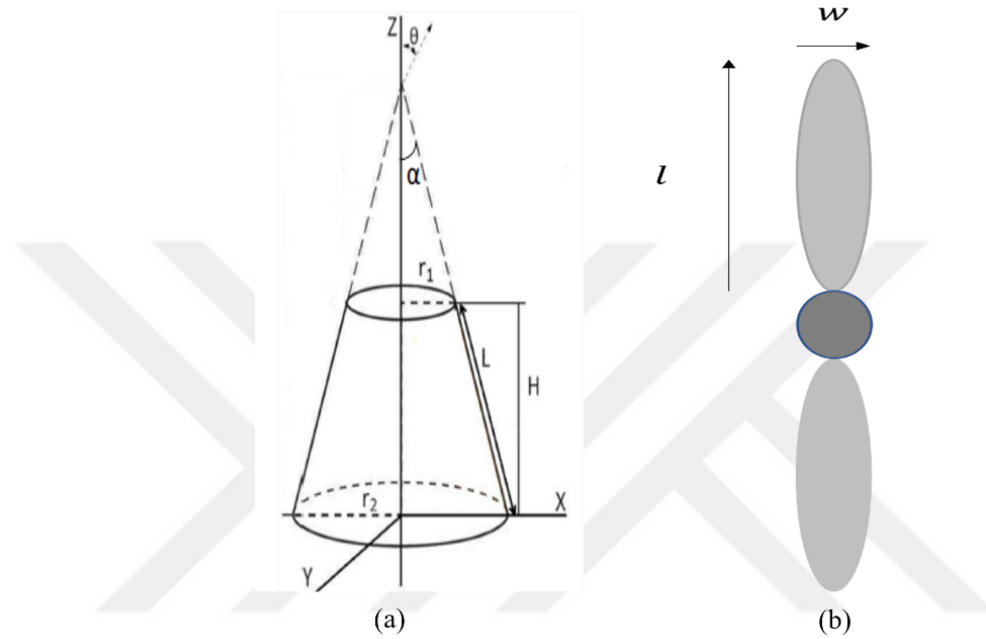
Burada,  $D_{nf} = \sqrt{\frac{\lambda R}{2}}$  uzak alan şartını sağlayan sınır uzunluğunu,  $\lambda$  dalga boyunu,  $R$  mesafeyi,  $\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{r_2 - r_1}{H}\right)$  kesik koninin yanal alanının z eksenine yaptığı açısı,  $H$  kule yüksekliğini,  $r_2$  kesik koninin alt yarıçapını,  $r_1$  kesik koninin üst yarıçapını,  $r = \frac{r_1 + r_2}{2}$  kesik koninin alt ve üst yarıçaplarının aritmetik ortalamasını,  $\theta$  ise z ekseninden itibaren artan şekilde türbine göre radarın bakış açısını temsil etmektedir.

Rüzgar türbini kanatlarından oluşacak saçılmalara ilişkin bir hesaplama modeli geliştirmek amacıyla, kanat ve kule için gözlemlenecek maksimum RKA değerleri arasındaki farkın, kanat ve kule arasındaki yüzey alanı farkına endeksli olacağı kabulü

yapılmıştır. Bu kabul ışığında, rüzgar türbini pallerinin RKA değerlerinin eşitlik (2.3) ile hesaplanabileceği belirtilmektedir [21].

$$\sigma_{paller,dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{2\pi r D_n f^2}{\lambda} \right) - 10 \log_{10} \left( \frac{4H(r_1+r_2)}{wl} \right) \text{ (dBsm)} \quad (2.3)$$

Şekil 2.4 (b)'de gösterildiği üzere  $w$  maksimum kanat genişliğini  $l$  ise kanat uzunluğunu temsil etmektedir.



**Şekil 2.4** (a) Kule RKA'sının hesaplamasında kullanılan geometrik model [21], (b) Kanat RKA'sının hesaplanmasında kullanılan geometrik model.

Bu çalışma kapsamında rüzgar türbinlerinin büyük boyutları ve anlık oryantasyona bağlı olarak zamanla değişen RKA karakteristikleri nedeniyle, simülasyonlarda en kötü senaryoya göre basitleştirilmiş RKA hesaplama modeli olan (2.2) eşitliği kullanılmıştır.

### 2.6.5 Radar Kesit Alanı Hesaplamasında Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar

Rüzgar türbinlerinin radar sistemleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek için yapılan RKA hesaplamalarında, elektromanyetik dalgaların türbin bileşenleriyle etkileşimini doğru bir şekilde modellemek kritik öneme sahiptir. RKA hesaplama süreci; malzeme özelliklerinin belirlenmesi, elektromanyetik dalgaların uygulanması, nümerik hesaplamalar, yakın ve uzak alan etkileri, toplam RKA hesaplaması ve yer yüzeyi etkilerinin değerlendirilmesi gibi temel aşamalardan oluşmaktadır.

### **2.6.5.1 Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi**

Rüzgar türbinlerini oluşturan bileşenlerin elektromanyetik özellikleri, RKA hesaplamalarında temel bir faktördür. Türbin kuleleri genellikle metalden (çelik veya alüminyum) yapıldığından yüksek yansıtıcılık gösterirken, kanatlar çoğunlukla fiberglas takviyeli plastik veya karbon fiber gibi kompozit malzemelerden üretildiği için daha düşük RKA değerlerine sahiptir. Ancak, kanat malzemesinin kalınlığı ve bileşimi, radar sinyallerini ne kadar yansıttığını doğrudan etkileyebilir. Tam Mükemmel Elektriksel İletken (PEC) olarak kabul edilen modeller, türbinin elektromanyetik yansıtıcılığını en üst seviyede varsayar, ancak gerçek sistemlerde dielektrik özellikleri de dikkate alınmalıdır [8, 19].

### **2.6.5.2 Elektromanyetik Dalga Özelliklerinin Seçimi**

Radar dalgalarının frekansı, dalga boyu ve polarizasyonu, türbinle etkileşimini belirleyen önemli parametrelerdir. RKA hesaplamalarında, dalgalar düzlemsel dalga olarak modele uygulanır ve türbinin farklı açılardaki yansıtma özellikleri analiz edilir. Radar frekansı arttıkça, türbin bileşenlerinin detaylı geometrik özellikleri daha fazla etkili olurken, düşük frekanslarda saçılma büyük ölçüde türbinin genel boyutuna bağlıdır.

### **2.6.5.3 Yakın Alan ve Uzak Alan Etkisi**

RKA, uzak alan koşullarında tanımlanan bir parametre olup türbin gibi büyük nesnelere için hesaplamalar genellikle uzak alan varsayımıyla yapılır. Ancak, rüzgar türbinleri yer yüzeyine yakın konumlandığı için yakın alan etkileri de dikkate alınmalıdır. Türbinin radar dalgalarını doğrudan yansıtmasının yanı sıra, yakın çevresindeki elektromanyetik etkileşimler ve radar huzmesindeki kırınım etkileri de RKA değerini değiştirebilir.

### **2.6.5.4 Yer Yüzeyi Etkileri**

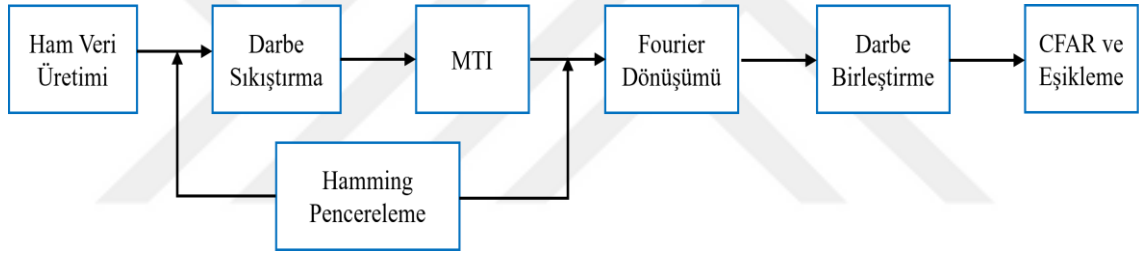
Rüzgar türbinlerinin yer yüzeyine yakın olması, radar sinyallerinde ek yansımalar ve kırınım etkileri oluşturur. Zemin, radar dalgalarının ikincil yansımalar oluşturmaya neden olur ve bu da toplam RKA değerine katkıda bulunur. Türbin kanatları, döndükçe zemin yüzeyine göre değişken açılarda konumlandığından, türbinlerden saçılan radar sinyallerinde periyodik olarak "kanat parlaması" olarak bilinen güçlü yankılar gözlemlenebilir. Özellikle türbinlerin bulunduğu bölgelerde, radarın doğrudan görebildiği ve göremediği alanlar arasında çoklu yansıma etkileri oluşabilir ve bu durum radar performansında ciddi bozulmalara neden olabilir [22].

### **2.6.5.5 Toplam Radar Kesit Alanı Hesaplaması**

Rüzgar türbinleri; kule, nasele ve kanatlar olmak üzere üç ana bileşenden oluşur ve her bir bileşenin bireysel RKA değeri vardır. Toplam RKA hesaplanırken, faz uyumsuzlukları ve girişim etkileri hesaba katılmalıdır. Örneğin, kanatlar dönme hareketi yaptıkça radar sinyalleri üzerindeki yansıtma paternleri değişebilir ve zaman içinde farklı RKA profilleri oluşturabilir.



Bu çalışmada radarın verici, alıcı ve anten birimlerine ait donanımsal detaylara girilmemiş; yalnızca alıcı birimindeki dijital sinyal işleme adımlarına odaklanılmıştır. Alıcıda kullanılan radar sinyal işleme adımları Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Radar sinyal işleme süreci, hedeflerden alınan ham I/Q veriler üzerinde gerçekleştirilir. İlk olarak darbe sıkıştırma ile menzil çözünürlüğü artırılır; ardından 3 darbe iptal ediciye sahip MTI filtresi ile sabit hedefler bastırılarak hareketli hedefler öne çıkarılır. 256 uzunlukta hızlı Fourier dönüşümü kullanılarak doppler frekans bileşenleri elde edilir ve hedeflerin hız bilgisi çıkarılır. 20 bağımsız darbe birleştirme ile SNR artırılarak güçlendirilir. CFAR algoritması ile uyarlanabilir eşikler belirlenir ve eşikleme sonucunda hedefler tespit edilir. Hamming pencereleme yöntemi ile yan lobları bastırılarak, işlenecek sinyalin hem zaman hem de frekans alanında daha temiz bir yapıya kavuşması sağlanır.



Şekil 3.1 Radar sinyal işleme adımları.

### 3.1 Radar Parametreleri

Bu çalışmada seçilen radar parametreleri Tablo 3.1’de sunulmuştur.

Tablo 3.1 Radar parametreleri.

Simülasyon Parametreleri	Değer	Birim
Taşıyıcı Frekansı	3	GHz
Chirp Bant Genişliği	1	MHz
Darbe Süresi	90	$\mu s$
Örnekleme Frekansı	2	MHz
Darbe Tekrarlama Frekansı	1250	Hz
Birleştirilmiş Darbe Sayısı	20	-
MTI Filtre Tipi	3 Darbe İptal	-
FFT Uzunluğu	256	-
CFAR Pencere Boyutu	23	-
CFAR Koruma Hücresi	4	-
CFAR Referans Hücresi	18	-

## 3.2 Ham Veri Üretimi

Bu çalışmada kullanılan ATC radar verileri, gerçek ortamdan toplanmak yerine, fiziksel parametrelere dayalı olarak MATLAB ortamında geliştirilmiş hazır bir kod altyapısı kullanılarak yapay olarak üretilmiştir. Simülasyon süreci MATLAB üzerinde gerçekleştirildiği için, tüm işlemler ayrık zamanlı sinyaller üzerinden yürütülmüştür.

Simülasyonda ham radar verisinin oluşturulmasında; gönderilen LFM sinyalin, hedeften yansıdıktan sonra alınan yankısının menzil gecikmesi, Doppler frekansı, taşıyıcı frekans ve hedef SNR değeri gibi fiziksel büyüklüklerle modellenmesi esas alınmıştır. Gerçekçi bir radar ortamı elde edebilmek amacıyla, geri dönen sinyale beyaz Gauss alıcı gürültüsü ile birlikte log-normal dağılımlı yüzey kargaşası eklenmiş ve böylece zorlu çevresel koşullar altında sistem performansının test edilebilmesi sağlanmıştır.

### 3.2.1 LFM Sinyal Üretimi

Gerçek radar vericisinin ürettiği modüle edilmiş karmaşık LFM sinyali aşağıdaki gibi tanımlanır [23]:

$$s(t) = \text{Rect}\left(\frac{t}{T}\right) \cdot e^{j2\pi(f_0 t + \frac{\mu}{2} t^2)} \quad (3.1)$$

Burada  $s(t)$  sürekli zamanlı karmaşık LFM sinyalini,  $T$  darbe süresini,  $t$  sürekli zaman değişkenini,  $f_0$  taşıyıcı frekansını,  $\mu = \frac{B}{T}$  civıltı oranını (frekans değişim hızını),  $B$  bant genişliğini,  $\text{Rect}\left(\frac{t}{T}\right)$  sinyalin sadece  $-\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2}$  aralığında var olduğunu ifade eder.

Bu çalışmada ayrık zamanlı LFM sinyali şu şekilde elde edilmiştir:

$$s[n] = \exp\left(j\pi \frac{W}{T} \left(t_n - \frac{T}{2}\right)^2\right) \quad (3.2)$$

Burada  $s[n]$  ayrık zamanlı karmaşık LFM sinyalini,  $W$  bant genişliğini,  $T$  darbe süresini,  $t_n = n \cdot \frac{1}{f_s}$  örnekleme noktalarını,  $f_s$  örnekleme frekansını,  $N = T \cdot f_s$  örnek sayısını,  $n = 0, 1, \dots, N - 1$  örnek indeksleri ifade eder.

Simülasyon ortamında kullanılan sinyal, taşıyıcı frekans içermemektedir. Bunun sebebi, radar alıcılarında taşıyıcı frekansın karıştırıcı devrelerle ortadan kaldırılarak sinyalin temelbanda (sıfır frekansa) indirilmesidir. Bu sayede sayısal işlem (örneğin FFT, darbe sıkıştırma) daha düşük örnekleme frekanslarında ve daha az hesaplama yüküyle yapılabilir.

Teorik formülasyonlarda görülen dikdörtgen pencere (*Rect*) fonksiyonu sinyalin zamanla sınırlı olduğunu gösterir. Ancak simülasyon ortamında sinyalin üretimi zaten belirli bir süreye göre örneklendiği için ayrıca (*Rect*) fonksiyonu kullanmaya gerek kalmamıştır.

### 3.2.2 Hedeften Gelen Radar Yankı Sinyalinin Modellenmesi

Simülasyon ortamında kullanılan hedef konumları, hızları ve SNR değerleri kullanıcı tarafından doğrudan tanımlanmıştır. Bu yaklaşım sayesinde farklı senaryolar oluşturularak radar performansı esnek bir şekilde değerlendirilebilmiştir. Simülasyon kapsamında radar tarafından 20 darbelik bir gönderim gerçekleştirilmiştir.

Simülasyon sonucunda, alıcıda oluşacak SNR değerleri kullanıcı tarafından doğrudan tanımlanmıştır. Bu yaklaşım, farklı SNR seviyelerinde radar sistem performansının analiz edilebilmesine olanak sağlamıştır. Bu nedenle, SNR hesaplamalarında hedeflerin menziline ve RKA değerlerine dayalı klasik radar denkleminde dayanan bir modelleme yerine, senaryo kontrollü olarak yapılandırılmıştır.

Bununla birlikte (3.3) eşitliğindeki SNR değerinin değişmesine neden olan parametrelere bakıldığında  $e^{-2aR_{max}}$  atmosferik zayıflama ve  $F^4$  yayılım faktörü etkileri simülasyonda dikkate alınmamıştır [24].

$$R_{max}^4 = \frac{P_{av} G A p_a \sigma E_i(n) F^4 e^{-2aR_{max}}}{(4\pi)^2 k T_o F_n(B\tau) f_p \left(\frac{S}{N}\right)_1 L_f(n_e) L_s} \quad (3.3)$$

Burada ayrıca  $R_{max}$  maksimum radar menziline,  $P_{av}$  ortalama iletim gücünü,  $G$  anten kazancını,  $A$  anten alanını,  $p_a$  anten açıklık katsayısını,  $\sigma$  RKA'yı,  $n$  darbe birleştirme sayısını,  $E_i(n)$  darbe birleştirme verimliliğini,  $a$  zayıflama katsayısını,  $k$  Boltzman sabitini,  $T_o$  standart sıcaklığını,  $F_n$  alıcı gürültü katsayısını,  $B$  alıcı bantgenişliğini,  $\tau$  darbe genişliğini,  $f_p$  darbe tekrarlama frekansını,  $\left(\frac{S}{N}\right)_1$  tek darbe tespiti için sinyal gürültü oranını,  $L_f(n_e)$  Swerling hedef modelinden dolayı dalgalanma kaybını,  $L_s$  ise sistem kaybını ifade eder.

Radar sistemine geri dönen yansıma sinyali, hedefin menzili, hızı ve taşıyıcı frekansı gibi parametrelere bağlı olarak modellenmiştir. Elde edilen bu sinyal, bu çalışmada ayrık zamanlı olarak işlenmiş ve aşağıdaki eşitlikle ifade edilmiştir:

$$y[N_r, n] = A_i \cdot e^{-j2\pi f_0 \tau_i} \cdot e^{j2\pi f_{D_i} n \Delta t} \cdot e^{j\pi \mu (n \Delta t - \tau)^2} \quad (3.4)$$

Burada  $A_i = 10^{\frac{SNR(i)}{20}}$  i-nci hedefin SNR tabanlı genliğini,  $SNR(i)$  i-nci hedefin SNR değerini,  $f_0$  taşıyıcı frekansı,  $\tau_i = \frac{2r_i}{c+v_i}$  i-nci hedeften gelen gecikmeyi,  $r_i$  i-nci hedefin menzilini,  $v_i$  i-nci hedefin hızını,  $c$  ışık hızını, bir hedefin Doppler frekansı  $f_d = \frac{2vf_0}{c}$  olup  $v$  hedefin hızını,  $f_{D_i} = \frac{2v_i f_0}{c}$  i-nci hedefin Doppler frekansını,  $\mu = \frac{B}{T}$  civıltı oranını,  $B$  bant genişliğini,  $T$  darbe süresini,  $\Delta t$  örnekleme aralığını,  $N_r$  örnek (menzil hücresi) indeksini,  $n$  darbe indeksini,  $i$  hedefi ifade eder.

Simülasyonlarda, radar ile rüzgar türbinleri arasında görüş hattı olduğu varsayılmış ve tüm rüzgar türbini segmentlerinin aynı çözünürlük hücresine nokta hedef olarak yerleştiği kabul edilmiştir.

### 3.2.3 Hedef Yankı Sinyaline Gürültü ve Kargaşanın Eklenmesi

Radar sistemlerinde alıcı gürültüsü genellikle bant sınırlı beyaz Gauss dağılımı (3.5) eşitliğiyle modellenmektedir [23].

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.5)$$

Burada  $f(x)$   $x$  noktasındaki fonksiyon değeri,  $\mu$  ortalama,  $\sigma$  standart sapma,  $\sigma^2$  varyans şeklinde ifade edilir.

Kargaşa, radar sinyallerinin istenmeyen nesnelere yansımaları sonucu oluşan parazit sinyaller olup yüzey kargaşası ve hacimsel kargaşası olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Yüzey kargaşası, ağaçlar, bitki örtüsü, yer şekilleri, yapay yapılar ve deniz yüzeyi (deniz kargaşası) gibi nesnelere kaynaklanırken, hacimsel kargaşa genellikle yağmur, kar, kuş sürüleri ve atmosferik partiküllerden kaynaklanmaktadır [23]. Radar sistemlerinin kargaşa altındaki performansını değerlendirmek için geri saçılma katsayısının doğru bir şekilde tahmin edilmesi veya ölçülmesi kritik öneme sahiptir. Bir çözünürlük hücresinde veya hacim hücresinde yer alan kargaşa, rastgele faz ve genliklere sahip çok sayıda saçıcıdan oluştuğundan, geri saçılma katsayısı genellikle olasılık dağılım fonksiyonları kullanılarak istatistiksel olarak modellenmektedir [23]. Yüzey kargaşasının modellenmesinde en yaygın kullanılan olasılık dağılımı log-normal dağılımdır, çünkü birçok küçük saçıcıdan gelen sinyallerin çarpma etkisiyle değişmesi log-normal dağılımın

karakteristiğine uygundur [23]. Log-normal dağılım, Gauss rastgele değişkenlerin logaritmasının normal dağılım göstermesi durumunda elde edilen bir dağılımdır.

Bu çalışmada, alıcı gürültüsü sıfır ortalama ve birim varyansa sahip karmaşık Gauss modeli ile modellenirken, radar sinyallerindeki yüzey kargaşasının gerçekçi bir şekilde modellenmesi amacıyla log-normal dağılım kullanılmıştır.

Log-normal dağılım oluşturmak amacıyla ilk olarak, Gauss rastgele değişkenler üretilmiş ve radar sistemlerinde dB üzerinden çalışıldığı için log-normal dönüşüm uygulanarak yüzey kargaşasının güç seviyeleri oluşturulmuştur.

Burada  $Y$  normal dağılıma sahipse log normal dönüşüm sonucu  $X$  elde edilir. Ardından, rastgele faz bileşenleri eklenerek, kargaşanın radar sinyalinde gözlenen Doppler etkisine uygun hale gelmesi sağlanmıştır. Daha sonra, kargaşanın güç spektrumu Gauss şeklinde zorlanmış ve Fourier dönüşümü kullanılarak spektral korelasyon eklenmiştir, böylece radarın gerçek dünyada algıladığı spektral özellikler korunmuştur.

Simülasyonda, hem tüm sinyal boyunca hem de ilk menzil hücresinde Kargaşa-Gürültü Oranı (CNR) değeri 20 dB olarak belirlenmiştir. Daha sonra, kargaşa sinyali ilk menzil hücresinden itibaren menzile bağlı olarak  $R^2$  oranında azaltılmış, böylece gerçek radar ortamında kargaşanın menzil boyunca değişimini yansıtacak şekilde ölçeklendirilmiştir.

Son olarak, alıcı gürültüsü ve kargaşa sinyali radar sinyaline eklenerek simülasyonun gerçekçilik düzeyi artırılmış; bu sayede radarın kargaşa altındaki performansı ve hedef tespit yeteneği analiz edilmiştir. Bu çalışmada alıcıda oluşan toplam sinyal  $y_g[n]$  şeklinde ifade edilmiştir.

### 3.3 Hamming Pencereleme

Radar ve genel sinyal işleme uygulamalarında kullanılan bir ağırlıklandırma tekniğidir. Temel amacı, sonlu uzunluktaki sinyallerin uç noktalarında oluşabilecek yan lobları bastırarak, işlenecek sinyalin hem zaman hem de frekans alanında daha temiz bir yapıya kavuşmasını sağlamaktır. Hamming penceresinin matematiksel ifadesi şu şekilde ifade edilir:

$$w[n] = 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) \quad 0 \leq n \leq N - 1 \quad (3.6)$$

Burada  $w[n]$  n-ci örnekteki pencere katsayısını,  $N$  pencere uzunluğunu ifade eder.

Uygulamada sinyal, eşitlik (3.7) ile ağırlıklandırılır.

$$x_h[n] = h[n]w[n] \quad (3.7)$$

Burada  $x_h[n]$  Hamming pencerelemiş sinyalini,  $h[n]$  pencerelenecek sinyalini,  $h[n] = s^*[-n]$ ,  $s^*[-n]$  ise gönderilen ayrık zamanlı LFM sinyalinin eşlenik ve zamanda tersi alınmış halini,  $w[n]$  Hamming pencere katsayılarını ifade eder. Burada pencere boyutu, pencerelenecek sinyalin matris boyutu kadardır. Bu çalışmada darbe sıkıştırma aşamasından önce LFM sinyaline pencereleme yapılmıştır. Bu, menzil doğrultusunda ortaya çıkabilecek yan lobların bastırılmasını sağlamıştır. Ayrıca Doppler frekans analizi öncesinde yavaş zaman (darbe) eksenindeki sinyale uygulanmıştır. Bu işlem, Doppler spektrumundaki yan lobların azaltılmasını ve hedeflerin daha net ayrılmasını sağlamıştır.

### 3.4 Darbe Sıkıştırma

Radar darbe sıkıştırması, genellikle bir eşleşmiş filtre kullanılarak gerçekleştirilen bir işlemdir. Bu işlem, radar tarafından alınan sinyalin darbe genişliğini azaltarak daha iyi menzil çözünürlüğü ve SNR sağlar. Bu işlem, oluşturulan radar ham verilerinin hızlı zaman boyutunda yürütülür. Beyaz gürültü varsayımı altında, sürekli zamanlı filtre çıkışı şu şekilde ifade edilir [25]:

$$y(t) = x(t) * h(t) \quad (3.8)$$

$y(t)$  darbe sıkıştırma sonucu elde edilen sinyalini,  $x(t)$  hedeften yansıyan sinyalini,  $*$  konvolüsyon işlemi ve  $h(t) = a \cdot s^*(T_p - t)$  gönderilen LFM sinyalini eşlenik ve zaman tersi alınmış halini,  $s(t)$  gönderilen LFM sinyalini,  $s^*$  karmaşık eşleniği ifade eder. Burada  $a$  eşlenik filtre çıkışının genliğini belirleyen bir katsayı olup SNR açısından önemsiz kabul edildiğinden çoğu analizde ihmal edilmektedir. Nedensellik koşullarını karşılamak için  $T_p$ 'nin giriş sinyalinin süresinden uzun olması gerekir [25].

Bu çalışmadaki ayrık zamanlı filtre çıkışı şu şekilde ifade edilir.

$$y_{ds}[n] = y_g[n] * x_h[n] \quad (3.9)$$

Burada  $y_{ds}[n]$  darbe sıkıştırma sonucu elde edilen sinyalini,  $y_g[n]$  alıcıda oluşan toplam sinyalini (hedef+gürültü),  $x_h[n]$  Hamming pencerelemiş sinyalini ifade eder.

### 3.5 MTI

Radar sistemlerinde sabit arka plan yansımalarını engelleyerek hareketli hedefleri saptamak için kullanılan bir tekniktir. Bu operasyon çoğunlukla darbe iptal edici filtreler kullanılarak yavaş zaman boyutunda gerçekleştirilir. Bu çalışmada üç darbeli iptal edici kullanılmıştır. Darbe iptal edici yapılar düşük geçişli filtre olarak işlev görür ve sıfır-doppler ve çevresindeki frekans bölgelerini iptal eder. Kullanılan filtrenin ayrık zamanlı darbe cevabı şu şekilde ifade edilir [23]:

$$h_m[n] = \delta[n] - 2\delta[n - 1] + \delta[n - 2] \quad (3.10)$$

Burada  $h_m[n]$  MTI filtresinin darbe cevabını,  $\delta[n]$  ayrık zamanlı birim darbe fonksiyonunu,  $n$  darbe indeksini ifade ederken bu yapı filtre olarak uygulandığında bu çalışmadaki çıkış sinyali şu şekilde ifade edilir:

$$y_m[n] = y_{ds}[n] * h_m[n] \quad (3.11)$$

$y_m[n]$  MTI sonucu elde edilen sinyali,  $y_{ds}[n]$  darbe sıkıştırma sonucu elde edilen sinyali, \* konvolüsyon işlemi,  $h_m[n] = [1 - 2 \ 1]$  matrisini ifade eder.

### 3.6 Fourier Dönüşümü

Fourier dönüşümü, zaman domaindeki sinyallerin frekans domainine dönüştürülmesini sağlayan temel bir matematiksel araçtır. Radar sistemlerinde, alınan sinyallerin analiz edilmesi ve işlenmesi için yaygın olarak kullanılan bu dönüşüm, özellikle menzil, hız ve yön belirleme gibi kritik bilgilerin çıkarılmasında önemli bir rol oynar. Fourier dönüşümünün farklı boyutlardaki (1D, 2D, 3D) versiyonları, radar sinyal işleme sürecinde çeşitli amaçlarla uygulanmaktadır.

1D Fourier Dönüşümü, sinyalin yalnızca tek bir ekseninde frekans bileşenlerine ayrılmasıdır. Radar sistemlerinde genellikle yavaş zaman (darbe sayısı) ekseninde uygulanarak hedefin doppler frekansı, yani hız bilgisi elde edilir. Alternatif olarak, hızlı zaman ekseninde uygulanırsa menzil frekansı analizi yapılabilir [26].

2D Fourier dönüşümü, sinyalin hem hızlı zaman hem yavaş zaman eksenlerinde frekans bileşenlerine ayrılmasıdır. Radar uygulamalarında bu dönüşümle, aynı anda hem menzil (hızlı zaman) hem de hız (yavaş zaman) bilgisi elde edilir [26].

3D Fourier dönüşümü, üç boyutta (örneğin hızlı zaman, yavaş zaman ve faz açısı) uygulanarak hedefin üç boyutlu konum ve hareket bilgilerinin analiz edilmesine olanak tanır. Bu dönüşüm genellikle faz dizili vb. radar (phased-array radar) sistemlerinde kullanılmaktadır.

Bu çalışmada 1D Fourier dönüşümü uygulanmıştır. Yavaş zaman ekseninde gerçekleştirilen dönüşüm ile hedefin Doppler frekansı, yani hız bilgisi elde edilmiştir. Bu çalışmada Fourier dönüşümü eşitlik (3.12) ile elde edilmiştir.

$$y_f[n] = FFT(y_m[n]h_f[n]) \quad (3.12)$$

Burada  $y_f[n]$  Fourier dönüşümü uygulanmış sinyali,  $FFT$  Fourier dönüşümünü,  $y_m[n]$  MTI sonucu elde edilen sinyali,  $h_f[n]$  Hamming pencere katsayılarını ifade eder. Ayrıca darbe birleştirme adımında, sinyalin güç değerlerinin toplanması amacıyla eşitlik (3.13) kullanılmıştır.

$$y_{fg}[n] = y_f[n]y_f^*[n] \quad (3.13)$$

Burada  $y_{fg}[n]$  frekans güç spektrumunu,  $y_f[n]$  Fourier dönüşümü uygulanmış sinyali  $y_f^*[n]$  Fourier dönüşümü uygulanmış sinyalinin eşleniğini ifade eder.

### 3.7 Darbe Birleştirme

Radar sistemlerinde zayıf hedeflerden gelen sinyalleri güçlendirmek ve SNR'yi artırmak için kullanılan bir tekniktir. Radar, genellikle hedeflerden gelen yansımaları tespit etmek için birden fazla darbe gönderir ve alır. Bu darbelerden elde edilen sinyallerin birleştirilmesi (entegrasyonu), rastgele gürültünün etkisini azaltırken hedef sinyali güçlendirmeye yardımcı olur.

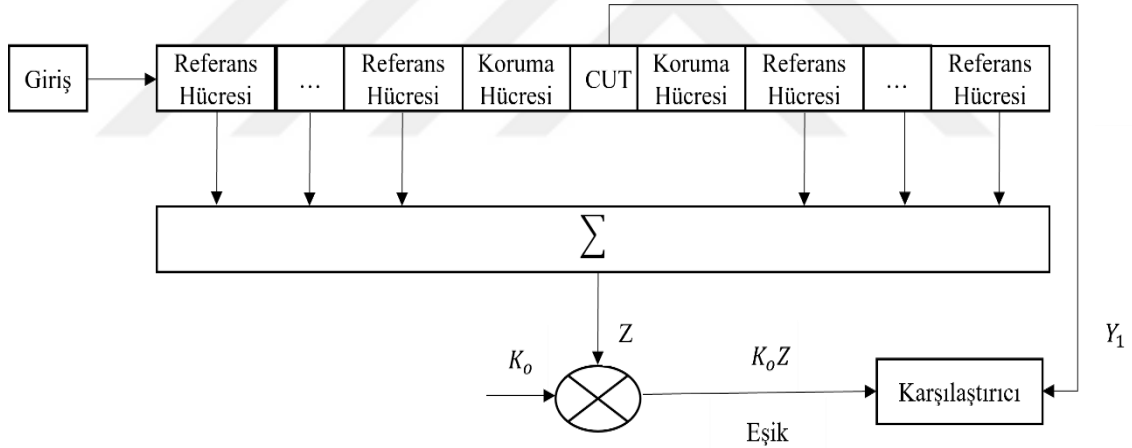
Bu çalışmada bağımsız darbe birleştirme kullanılmış olup radar tarafından alınan ardışık yankıların faz bilgisi dikkate alınmadan sadece Doppler ekseninde güçleri toplanmıştır. Bu işlemin çıkışı şu şekilde ifade edilir:

$$y_{db}[n] = \sum_{k=1}^N y_{fg_k}[n] \quad (3.14)$$

$y_{fg_k}[n]$   $k$ -inci darbeye  $n$ -inci menzil hücresindeki sinyali,  $N$  toplam darbe sayısını,  $y_{db}[n]$  ise menzil hücresi  $n$  için entegre edilmiş toplam güç çıktısını ifade eder.

### 3.8 CFAR ve Eşikleme

Radar, arka plan gürültüsü ve sinyal gücü sürekli değişen ortamlarda çalıştığı için, sabit bir eşik değeri kullanmak yanlış alarm oranlarını artırabilir veya zayıf hedeflerin algılanmasını zorlaştırabilir. Hücre Ortalama Sabit Yanlış Alarm Oranı (CA-CFAR), her çözünürlük hücresi için çevresel gürültü seviyesine bağlı olarak eşik değerini dinamik bir şekilde belirleyerek sabit yanlış alarm oranı sağlamayı amaçlar. Şekil 3.2'de bir CA-CFAR yapısının 1D formu gösterilmiştir. Tespit eşiği, Test Altındaki Hücresinin (CUT) (Radarın belirli bir mesafedeki bir hedefin varlığını belirlemek için incelediği hücredir.) yanındaki referans hücrelerdeki (arka plan gürültü seviyesini tahmin etmek için kullanılır.) ortalama gücü  $Z$  kullanılarak değerlendirilir. Tespit sürecinde yanlış alarmları düzenlemek için kullanılan marj, şekilde  $K_o$  ile belirtilmiştir. Şekilde gösterilen koruma hücreleri, test altındaki hedef sinyalinin bu hücrelere sızıntı yapması ihtimali dikkate alınarak ortalama müdahale değerlendirmesinden hariç tutulmuştur. Eğer  $Y_1 \geq K_o Z$  ise hedef var olarak işaretlenmektedir [23].



Şekil 3.2 CA-CFAR yapısı.

Uygulamada radar sinyali üzerinde kayan bir pencere kullanılır. Bu pencere, referans hücrelerin yerini belirler ve bu hücrelerin ortalamasını alır. Bunun için genellikle konvolüsyon işlemi kullanılır.

$$y_{cfar}[n] = y_{db}[n] * CFAR[n] \quad (3.15)$$

Burada  $y_{cfar}[n]$  CFAR uygulanmış sinyali,  $y_{db}[n]$  darbe birleştirme uygulanmış sinyali,  $CFAR[n]$  CFAR filtresini (Bu çalışmada kullanılan CFAR penceresi  $1 \times 23$  boyutundadır. 1–9 ve 15–23 aralığındaki hücreler, ortalama güç hesaplamasında

kullanılmak üzere 1/18 değerini alırken; 10–14 aralığındaki hücreler ise test ve koruma hücreleri olduğundan, hedef sinyalinin eğiği etkilememesi amacıyla 0 değerine sahiptir.) temsil eder.

Bu alışma kapsamında, Doppler-filtresi uygulanmış menzil eksenindeki sinyaller üzerine 1D CA-CFAR algoritması uygulanmıştır. Bu işlemde, her çözünürlük hücresi için çevresindeki referans hücrelerden ortalama gürültü seviyesi hesaplanmış, bu değerin üzerine sabit yanlış alarm oranına göre belirlenen eğik katsayısı uygulanarak adaptif bir tespit eğiği oluşturulmuştur. Eğik değeri ile ölçülen sinyal karşılaştırılmış ve eğik üzeri değerler hedef olarak işaretlenmiştir.



### 4.1 Makine Öğrenimi

Büyük veri setlerinden anlamlı bilgiler çıkararak tahmin ve sınıflandırma yapmayı amaçlayan bir disiplindir. Sınıflandırma problemleri, genellikle denetimli öğrenme teknikleriyle çözülür. En yaygın kullanılan yöntemler arasında RF, GB ve yapay sinir ağları olarak bilinen MLP yer almaktadır. Bu yöntemler tıp, finans, güvenlik ve pazarlama gibi birçok alanda kullanılmaktadır. ML tabanlı sınıflandırma, büyük veri çağında önemli bir rol oynamakta ve karar destek sistemlerinden otomatik süreçlere kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Model seçiminde dikkatli olunmalı, farklı algoritmaların performansı karşılaştırılmalı ve en iyi sonuçları elde etmek için sürekli iyileştirme çalışmaları yapılmalıdır. Bu çalışmada kullanılan ML modelleri aşağıda kısaca tanıtılmıştır.

**Rassal Orman (RF):** Çok sayıda karar ağacını bir araya getirerek çalışan sınıflandırma ve regresyon için kullanılan bir topluluk öğrenme yöntemidir. Her bir karar ağacı farklı rastgele örnekler ve özelliklerle eğitilir. Sınıflandırma sırasında, her karar ağacı bağımsız bir tahmin yapar ve en fazla oyu alan sınıf nihai tahmin olarak belirlenir. Çoğunluk oylama formülü kullanılarak, her ağacın tahmin ettiği sınıf hesaplanır ve en fazla destek alan sınıf nihai karar olarak atanır.  $K$  tur eğitim sonucunda, bir sınıflandırma modeli dizisi  $\{h_1(X), h_2(X), \dots, h_k(X)\}$  elde edilir ve bu modeller bir çok sınıflı sınıflandırma sistemi oluşturmak için birleştirilir. Sistemin nihai sınıflandırma sonucu, basit çoğunluk oylama yöntemi kullanılarak belirlenir. Son sınıflandırma kararı şu şekilde ifade edilir [27]:

$$H(x) = \arg \max_Y \sum_{i=1}^K I(h_i(x) = Y) \quad (4.1)$$

Burada  $H(x)$  nihai toplu sınıflandırma modeli,  $h_i$  tek bir karar ağacının sınıflandırma modeli,  $Y$  çıktı sınıfı,  $I(.)$  gösterge fonksiyonu olup karar ağaçlarının belirli bir sınıfı seçtiğini ifade eder.

**Gradyan Artırma (GB):** Karar ağaçlarını aşamalı olarak eğiten bir öğrenme yöntemidir. Her yeni ağaç, bir önceki ağaçların yaptığı hataları düzelterek şekilde optimize edilir. Bu süreç, modelin her iterasyonda daha doğru tahminler yapmasını sağlar.

GB, kayıp fonksiyonunu minimize etmek için Gradyan İnişi yöntemini kullanır. Modelin hata oranını azaltmak amacıyla, bir önceki karar ağacının hataları analiz edilir ve yeni model, bu hataların negatif gradyanına yönlendirilerek güncellenir. Böylece, modelin doğruluğu her adımda iyileşir.

Artırma tekniği, her yeni modelin hata azaltmaya odaklanan bir düzeltme modeli gibi çalışmasını sağlar. Aşamalı ekleme yöntemi sayesinde model giderek daha güçlü hale gelir. Ancak, aşırı öğrenmeyi önlemek için model belirli bir hata eşiğine ulaştığında eğitim süreci durdurulur. Bu yaklaşım, modelin genelleme yeteneğini artırarak bilinmeyen verilere karşı daha başarılı tahminler yapmasını sağlar.

GB'nin en önemli avantajlarından biri, uygulanabilirliğinin kolay ve aynı zamanda güçlü bir model olmasıdır. Aykırı değerlere karşı dayanıklı olup karmaşık ve farklı türde verilerle etkili bir şekilde çalışabilir. Bu özellikleri sayesinde, geniş bir kullanım alanına sahip olup özellikle büyük veri setleri üzerinde başarılı sonuçlar elde edebilir.

GB'nin nasıl çalıştığını ve modelin nasıl oluşturulduğunu açıklayan genel matematiksel ifadesi şu şekilde tanımlanır [28]:

$$F_m(x) = \sum_{m=0}^M \gamma_m h_m(x) \quad (4.2)$$

Burada  $F_m(x)$  GB modelinin  $m$ . iterasyondaki toplam tahmin fonksiyonu,  $M$  GB modelinde kullanılan toplam zayıf öğrenici sayısı,  $h_m(x)$  m-inci adımda oluşturulan karar ağacı modeli,  $\gamma_m$  öğrenme oranı ile ölçeklendirilmiş model katsayısıdır.

**Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP):** Bir tür yapay sinir ağı modelidir. Yapay sinir ağları, geçmişte meydana gelen eğilimlere dayalı tahmin araçlarıdır. Girdi verilerini işleyerek, ağırlıklar ve aktivasyon fonksiyonları yardımıyla doğrusal olmayan ilişkileri öğrenir ve özellikle derin öğrenme uygulamalarında yaygın olarak kullanılır.

MLP'nin temel çalışma prensibi, ileri yayılım süreci ve katmanlar arasındaki bilgi akışının matematiksel ifadesi şu şekilde tanımlanır [29]:

$$x_{[l,i]} = \sigma_{[l,i]} \left( \sum_{j=1}^{N_{[l-1]}} \omega_{[l-1,j],[l,i]} x_{[l-1,j]} + b_{[l,i]} \right) \quad (4.3)$$

Burada  $x_{[l,i]}$   $l$ 'inci katmandaki  $i$ 'inci düğümün aktivasyon çıktısını,  $\sigma_{[l,i]}$   $l$ 'inci katmandaki  $i$ 'inci düğümün aktivasyon fonksiyonu,  $N_{[l-1]}$   $(l - 1)$ 'inci katmandaki toplam nöron sayısını,  $\omega_{[l-1,j],[l,i]}$   $(l - 1)$ 'inci katmandaki  $j$ 'inci düğüm ile  $l$ 'inci katmandaki  $i$ 'inci düğüm arasındaki bağlantı ağırlığını,  $x_{[l-1,j]}$   $(l - 1)$ 'inci katmandaki  $j$ 'inci düğümün aktivasyon çıktısı,  $b_{[l,i]}$   $l$ 'inci katmandaki  $i$ 'inci düğümün önyargı terimini ifade eder.

## 4.2 Değerlendirme Kriterleri

Makine öğreniminde kullanılan performans ölçütleri, bir modelin sınıflandırma başarısını değerlendirmek için önemli metriklerdir. Denklemlerde TP (doğru pozitif), FP (yanlış pozitif), TN (doğru negatif), FN (yanlış negatif) şeklinde kullanılmıştır [30].

**Doğruluk:** Modelin doğru tahmin ettiği örneklerin, tüm örnekler içerisindeki oranını ifade eder. Tüm sınıflar için genel başarıyı ölçer.

$$\text{Doğruluk} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (4.4)$$

**Kesinlik:** Modelin pozitif olarak tahmin ettiği verilerin gerçekten pozitif olup olmadığını ölçer. Yanlış pozitiflerin etkisini değerlendirir.

$$\text{Kesinlik} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (4.5)$$

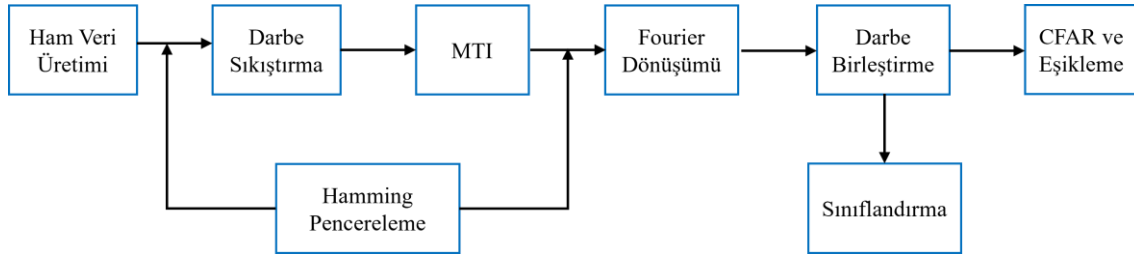
**Duyarlılık:** Modelin gerçek pozitifleri ne kadar doğru tespit ettiğini gösterir.

$$\text{Duyarlılık} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (4.6)$$

**F1-Skoru:** Kesinlik ve duyarlılık arasındaki dengeyi ölçen bir metriktir. Özellikle sınıflar arasında dengesizlik olduğunda (örneğin, bir sınıf diğerine göre çok fazla örneğe sahipse) tercih edilir.

$$F1 - \text{Score} = 2x \frac{\text{Kesinlik} \times \text{Duyarlılık}}{\text{Kesinlik} + \text{Duyarlılık}} \quad (4.7)$$

Şekil 4.1’de görülen simülasyon konsepti, radar sinyal işleme adımları ve hedef sınıflandırma olmak üzere iki ana birimden oluşmaktadır.



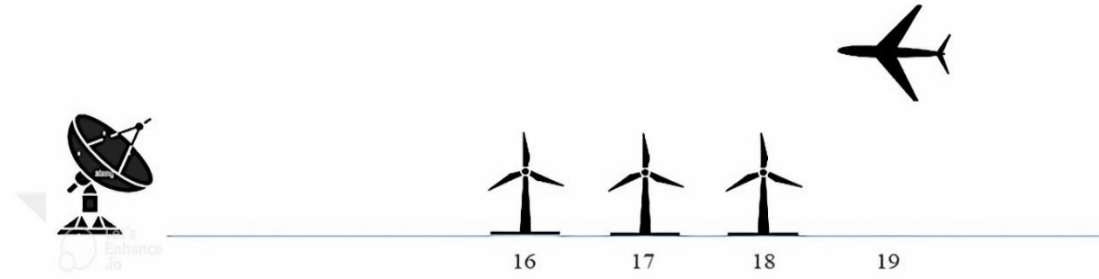
Şekil 4.1 Simülasyon akış şeması.

Bu çalışma kapsamında oluşturulan senaryoların özeti Tablo 4.1’de sunulmuştur.

Tablo 4.1 Simülasyonda kullanılan senaryolar.

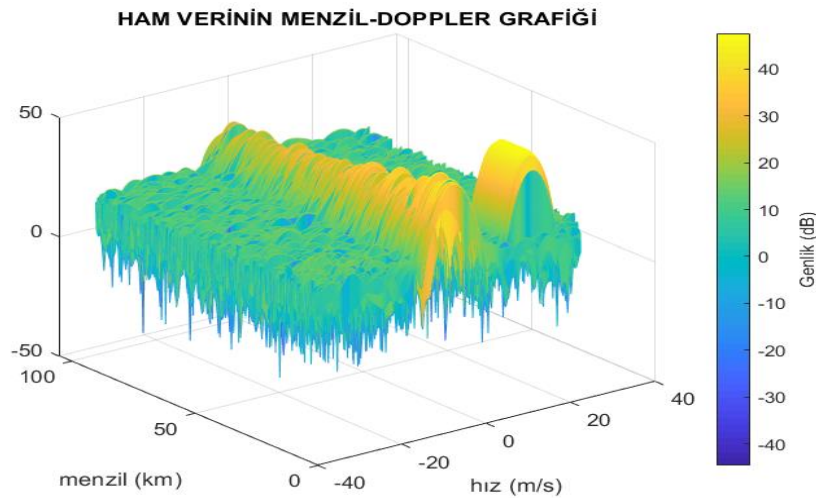
Senaryo	Senaryo Tanımı ve Parametreleri	Yöntem
1	16-18 km arasında 3 rüzgar türbini, 19 km'de 1 uçak bulunmaktadır. Her senaryo çalıştırıldığında, her bir rüzgar türbini ile uçak arasındaki RKA farkı rastgele atanarak ~20 dB aralığında olacak şekilde ayarlanmaktadır.	CFAR
2	16-20 km arasında 9 rüzgar türbini, 28 km'de 1 uçak bulunmaktadır. Her senaryo çalıştırıldığında, her bir rüzgar türbini ile uçak arasındaki RKA farkı rastgele atanarak 30-40 dB aralığında olacak şekilde ayarlanmaktadır.	CFAR
3.a	16-20 km arasında 9 rüzgar türbini, 16-30 km arasında 1 uçak yer almaktadır. Her senaryo çalıştırıldığında, uçağın konumu rastgele belirlenmekte ve her bir rüzgar türbini ile uçak arasındaki RKA farkı rastgele atanarak 30-40 dB aralığında olacak şekilde ayarlanmaktadır.	Sınıflandırma
3.b	16-20 km arasında yer alan 9 rüzgar türbini ile aynı menzil hücrelerine karşılık gelecek şekilde, aynı mesafelerde 1 uçak yer almaktadır. Her senaryo çalıştırıldığında, uçağın konumu rastgele belirlenmekte ve her bir rüzgar türbini ile uçak arasındaki RKA farkı rastgele atanarak 30-40 dB aralığında olacak şekilde ayarlanmaktadır.	Sınıflandırma
3.c	16-20 km arasında 9 rüzgar türbini, 23-30 km arasında yani farklı menzil hücrelerinde 1 uçak yer almaktadır. Her senaryo çalıştırıldığında, uçağın konumu rastgele belirlenmekte ve her bir rüzgar türbini ile uçak arasındaki RKA farkı rastgele atanarak 30-40 dB aralığında olacak şekilde ayarlanmaktadır.	Sınıflandırma

**Senaryo 1:** Rüzgar türbini yoğunluğunun yüksek olduğu ve rüzgar türbinleri ile uçak arasındaki RKA farkının büyük olduğu bir ortamda, 16, 17, 18 km’de (193, 207, 220 menzil hücresi) 3 rüzgar türbini ile 19 km’de 1 uçak bulunduğu; türbinler ile uçak arasındaki RKA farkının yaklaşık 20 dB olduğu varsayılmıştır. İlgili senaryo Şekil 4.2’de gösterilmektedir. Senaryo 2’de yapılacak çalışmaya altyapı hazırlaması amacıyla bu senaryo özelinde önerilen CFAR aşaması ve yalnızca bu senaryo için radar sinyal işleme sonuçları sunulmuştur.



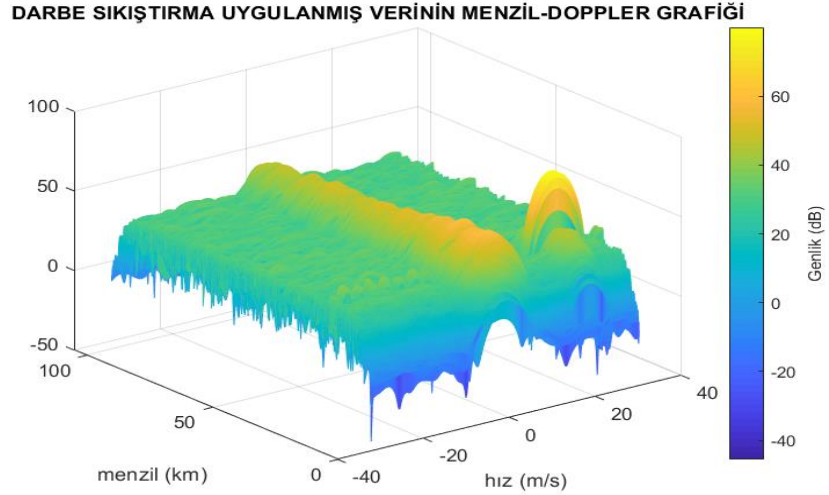
**Şekil 4.2** Senaryo 1’in betimlenmiş hali.

Senaryo 1 kapsamında oluşturulan 1 (bir) veriye ait sinyal işleme adımlarının sonuçları aşağıda sunulmuştur. Şekil 4.3, hedeflerden yansıyan ancak henüz hiçbir işleme tabi tutulmamış ham radar verisini göstermektedir. Bu aşamada LFM darbesi gönderilmiş; hedef konumları, Doppler frekansları ve SNR değerleri gibi fiziksel parametrelere göre yansıyan sinyaller modellenmiştir. Buna ek olarak, yüzey kaynaklı kargaşa ve alıcı termal gürültüsü eklenmiştir. Elde edilen grafik, menzil-hız düzleminde sinyal genliklerini görselleştirerek hedef sinyallerinin parazit ile iç içe olduğu ham durumu yansıtmaktadır.



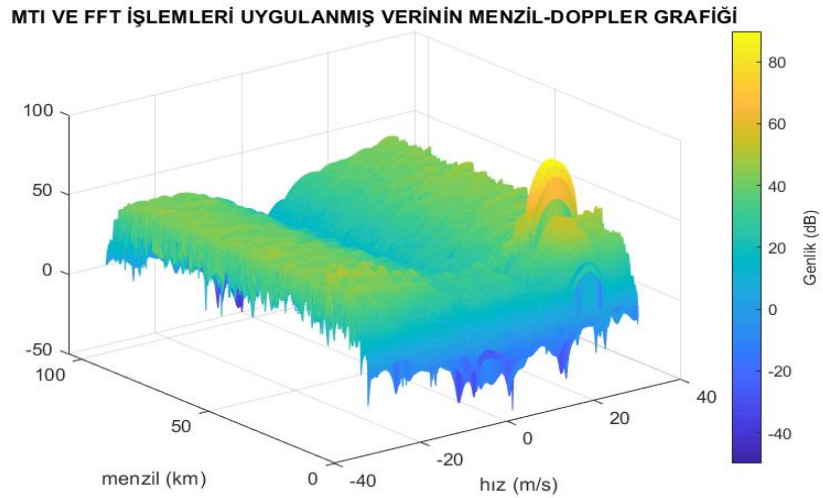
**Şekil 4.3** Ham veri.

Şekil 4.4’de görüldüğü üzere, sinyallere darbe sıkıştırma işlemi uygulanmıştır. Darbe sıkıştırma ile gerçekleştirilen bu işlem, yankıların zamansal olarak daralmasını sağlayarak menzil çözünürlüğünü artırır. Grafikte, hedef yankılarının daha dar bir menzil aralığında ve daha yüksek genlikte gözlemlendiği, dolayısıyla arka plan paraziti içinden daha kolay ayırt edilebildiği görülmektedir.



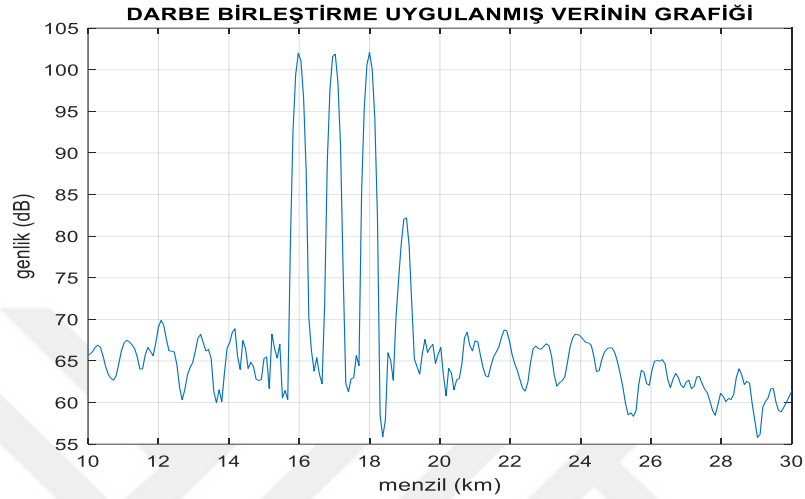
**Şekil 4.4** Darbe sıkıştırma.

Şekil 4.5’de darbe sıkıştırılmış veriye, MTI filtresi ve ardından Doppler ekseninde FFT uygulanmıştır. MTI işlemi sabit hedefleri bastırır ve yalnızca hareketli hedefleri ön plana çıkarır. FFT işlemi ile yavaş zaman ekseninde frekans çözümü yapılmış ve hedeflerin hızları Doppler frekansı üzerinden ayrıştırılmıştır. Bu sayede hem menzil hem de hız ekseninde hedef ayırımı sağlanmıştır.



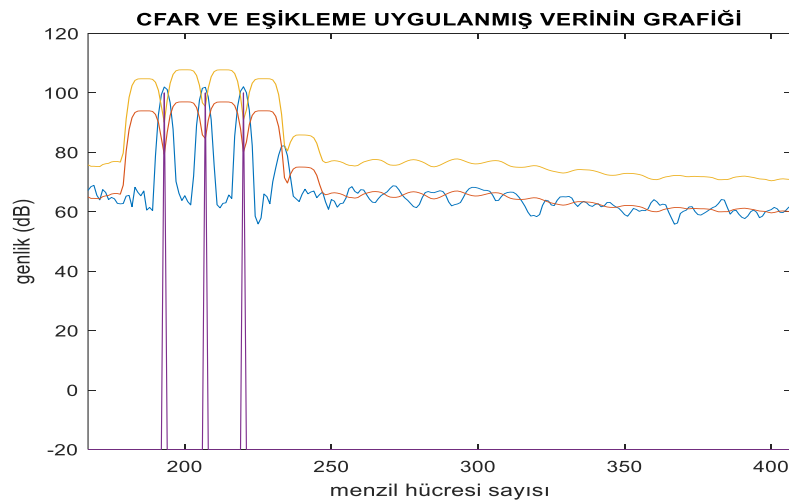
**Şekil 4.5** MTI.

Şekil 4.6’da, nonkoherent darbe birleştirme uygulanmış verilere ait grafik sunulmaktadır. Güç değerleri üzerinden gerçekleştirilen bu işlem, SNR’yi artırarak hedef yankılarını belirginleştirmiştir. Çalışmada görsellik amacıyla menzil ekseni [10 30] km ve menzil hücresi [167 407 (14 ve 32 km’ye denk gelen menzil hücreleri)] aralığında sınırlandırılmış; ancak işlenen veri seti tüm menzil ekseni ve hücrelerini kapsamaktadır.



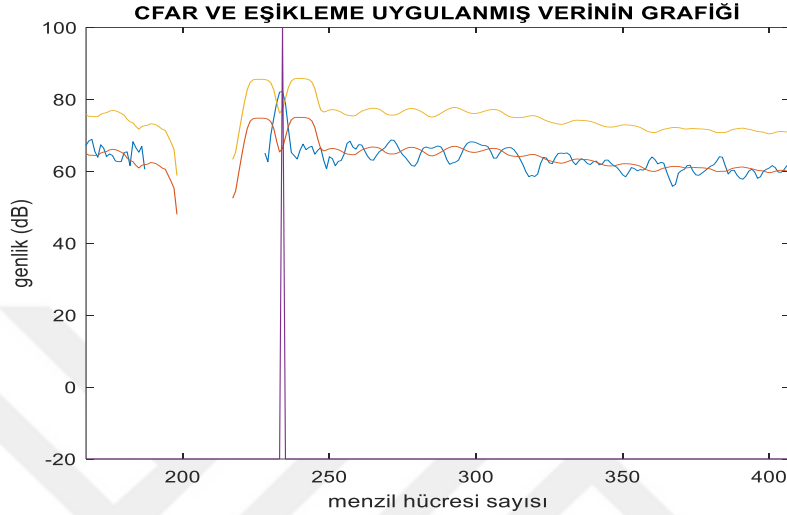
Şekil 4.6 Darbe birleştirme.

Şekil 4.7, CFAR ve eşikleme algoritmasının uygulanmış hâlini göstermektedir. Burada CA-CFAR algoritması kullanılarak her menzil hücresi için adaptif eşik değerleri hesaplanmış, ardından bu eşik ile hedef tespiti gerçekleştirilmiştir. Grafikte, sinyal genliği ile birlikte eşik seviyesi ve tespit edilen hedefler birlikte gösterilmiştir. Ancak bu aşamada, rüzgar türbinlerinin bulunduğu bölgelerdeki birkaç hücrenin eşik seviyesini yükseltmesi nedeniyle uçak tespiti yapılamamıştır.



Şekil 4.7 Rüzgar türbinleri hesaba katıldığında CFAR ve eşikleme.

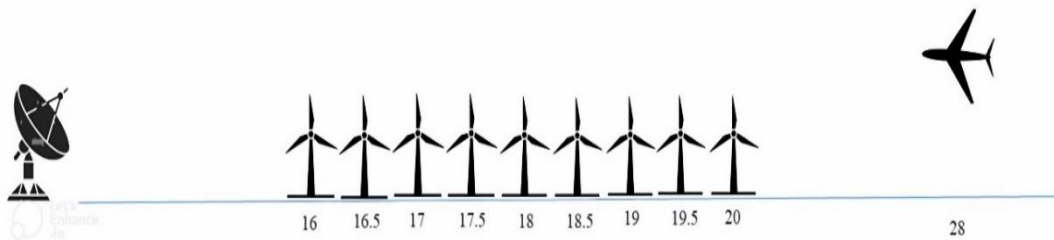
Şekil 4.8’de ise önerilen geliştirilmiş CFAR yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemde, eşik hesaplaması sırasında yalnızca türbin hücreleri değil, bunların önündeki ve arkasındaki beşer menzil hücresi (toplamda yaklaşık 800 metre) de hesaplama dışı bırakılmıştır. Böylece, özellikle rüzgar türbini yoğunluğunun düşük olduğu ve RKA farkının küçük olduğu durumlarda uçak hedeflerinin başarıyla tespit edildiği gözlemlenmiştir.



**Şekil 4.8** Rüzgar türbinleri hesaba katılmadığında CFAR ve eşikleme.

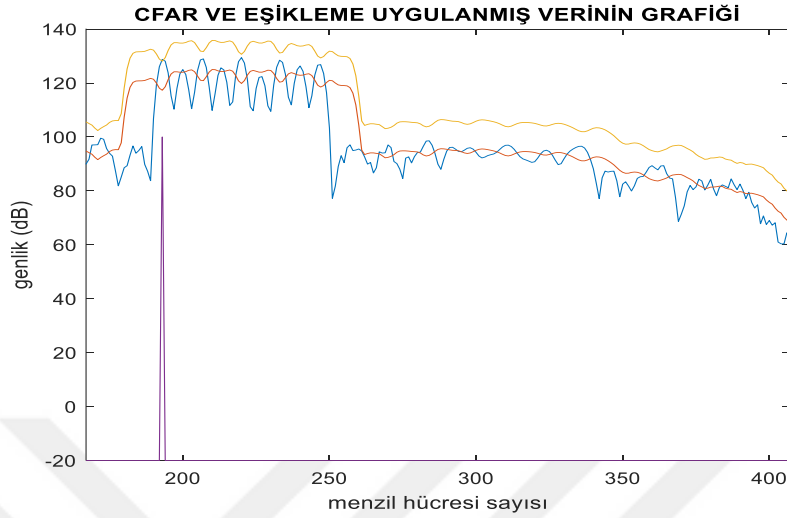
Rüzgar türbini yoğunluğunun yüksek olduğu ve rüzgar türbinleri ile uçak arasındaki RKA farkının büyük olduğu bir ortamda önerilen CFAR yönteminin etkinliğinin incelenmesi amacıyla Senaryo 2 ele alınmıştır.

**Senaryo 2:** Gerçek sahada karşılaşılan rüzgar türbini yoğunluğunun yüksek olduğu ve rüzgar türbinleri ile uçak arasındaki RKA farkının büyük olduğu bir ortamda, 16, 16.5, 17, 17.5, 18, 18.5, 19, 19.5 ve 20 km’de (193, 200, 207, 213, 220, 227, 233, 240, 247 mesafe hücreleri) 9 rüzgar türbini ile 28 km’de (353 mesafe hücresi) bir uçak bulunduğu; türbinler ile uçak arasındaki RKA farkının 30-40 dB arasında değiştiği varsayılmıştır. İlgili senaryo Şekil 4.9’da gösterilmektedir. Bu senaryo altında uçak, 16-30 km aralığında tespit edilememiştir.



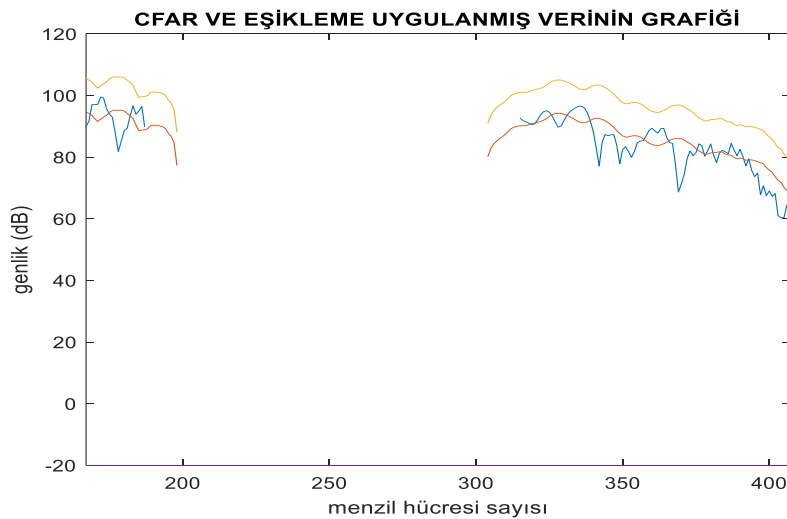
**Şekil 4.9** Senaryo 2’nin betimlenmiş hali.

Rüzgar türbini yoğunluğunun yüksek olduğu ve rüzgar türbinleri ile uçak arasındaki RKA farkının büyük olduğu ortamlarda, CFAR eşliğinin yükselmesi ve türbinlerin birbirine yakın konumlanması nedeniyle Şekil 4.10'da yalnızca bir türbin tespit edilmiştir.



Şekil 4.10 Rüzgar türbinleri hesaba katıldığında CFAR ve eşikleme.

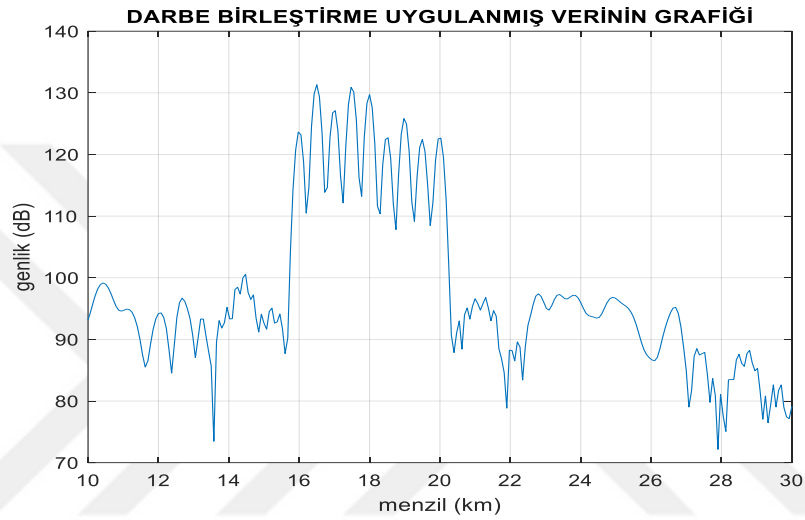
Önerilen yöntemde, radarın 25 km'ye kadar olan bölgedeki hücreleri ihmal edilse bile, gerçek hava hedefine ait izlerin tespit edilemediği Şekil 4.11'de gözlemlenmiştir. Bu durum, yüksek RKA ve yoğun türbin etkilerinin, hedef tespiti üzerinde olumsuz bir etki yarattığını göstermektedir.



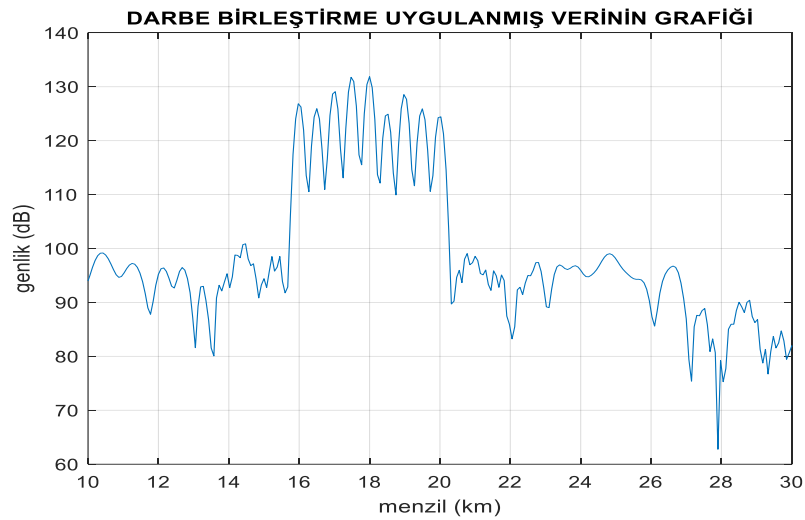
Şekil 4.11 Rüzgar türbinleri hesaba katılmadığında CFAR ve eşikleme.

Senaryo 2 kapsamında uçakların tespit edilememesi, ATC personeline destek için makine öğrenimi tabanlı sınıflandırma çalışmalarının önemini ortaya koymuştur. Bu doğrultuda, sınıflandırma yönteminin etkinliğini değerlendirmek üzere Senaryo 3 ele alınmıştır.

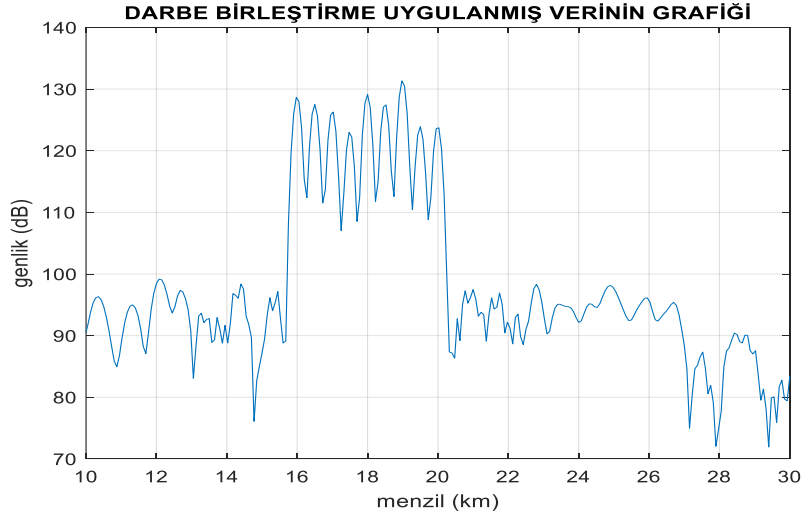
**Senaryo 3:** Bu çalışma özelinde rüzgar türbini ile aynı ve farklı menzil hücrelerine düşen uçakların sınıflandırma performansındaki farklılıkları incelemek amacıyla 3 farklı senaryo (Senaryo 3.a, 3.b ve 3.c) üzerinden detaylı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu senaryolardaki veri seti, %70'i eğitim ve %30'u test olmak üzere ayarlanmıştır. Örnek bir veriye ait görseller, aşağıda sunulmuştur. Bu veri seti radar sinyal işleme adımlarından biri olan darbe birleştirme işlemi sonrasında elde edilen sinyallerin güç değerleri temel alınarak 800 farklı durumu temsil edecek şekilde oluşturulmuştur. Bu veri setleriyle MATLAB üzerinden 3 farklı ML yöntemi ile sınıflandırma yapılmıştır.



**Şekil 4.12** Senaryo 3.a kapsamında oluşturulan örnek bir sinyal.

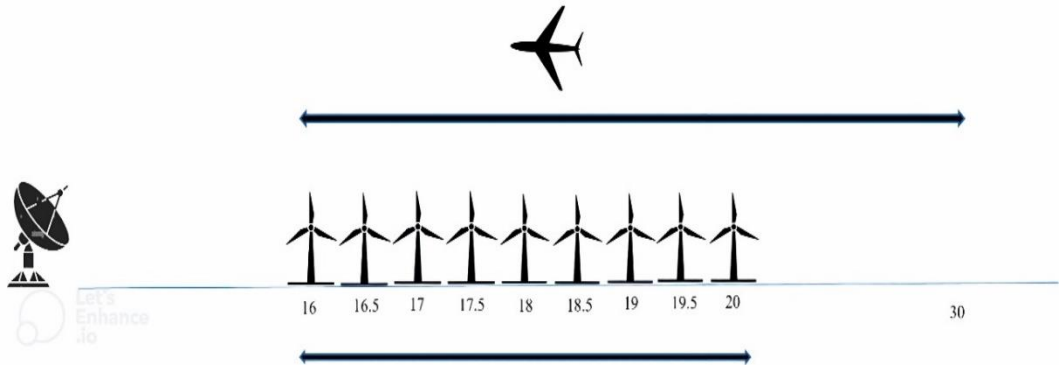


**Şekil 4.13** Senaryo 3.b kapsamında oluşturulan örnek bir sinyal.



**Şekil 4.14** Senaryo 3.c kapsamında oluşturulan örnek bir sinyal.

**Senaryo 3.a:** İlgili senaryo Şekil 4.15’de gösterildiği üzere, 16-20 km menzil aralığında 9 rüzgar türbini ve 16-30 km aralığında farklı mesafelerde konumlandırılmış 1 uçak içeren yapı temel alınarak oluşturulmuştur. Bu senaryoya göre, eğitim verisi amacıyla 350 adet farklı sinyal üretilmiştir. Sınıflandırıcıların hiperparametreleri, bu 350 adet sinyal üzerinden uygulanan çapraz doğrulama yöntemiyle belirlenmiŐ; ardından en uygun parametrelerle sınıflandırıcılar yeniden tüm eğitim verisi (350 sinyal) kullanılarak eĐitilmiŐ ve sonrasında farklı 150 adet test verisi üzerinde performansları değerlendirilmiştir.



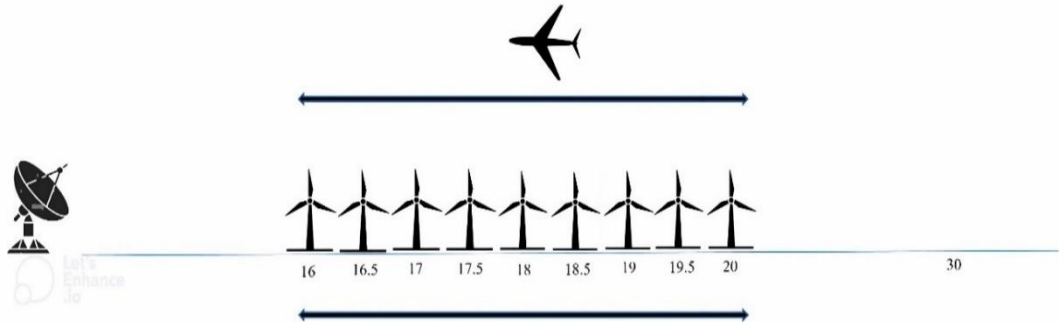
**Şekil 4.15** Senaryo 3.a’nın betimlenmiş hali.

Sınıflandırıcıların hiperparametre değerleri Tablo 4.2’de sunulmuştur.

**Tablo 4.2** Sınıflandırıcıların hiperparametre değerleri.

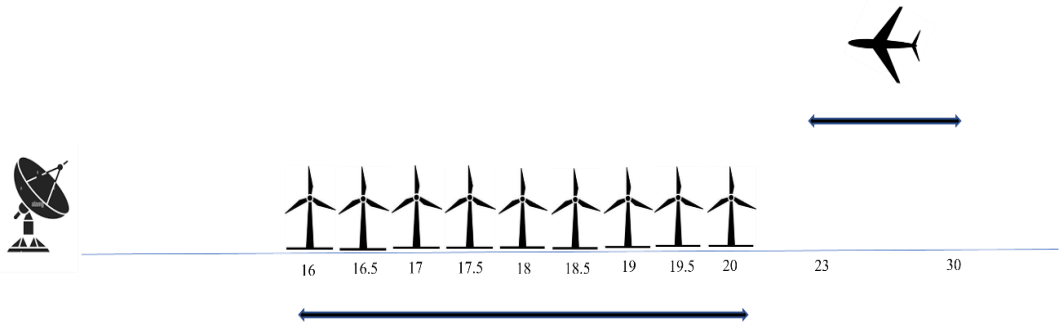
Modeller	En İyi Parametreler
RF	NumTrees=100, MinLeafSize=1, MaxNumSplits=200
MLP	HiddenLayerSize= 24, LearningRate=11
GB	NumLearningCycles=50, MinLeafSize=5, MaxNumSplits=29

**Senaryo 3.b:** İlgili senaryo Şekil 4.16’da gösterildiği üzere, 16-20 km menzil aralığında 9 rüzgar türbini ve aynı menzil aralığında (aynı menzil hücrelerinde) farklı mesafelerde konumlandırılmış 1 uçak içeren yapı temel alınarak oluşturulmuştur. Bu senaryoya göre, test amacıyla 150 adet farklı radar sinyali üretilmiştir. Senaryo 3.a kapsamında eğitilen sınıflandırıcıların performansı, bu test verileri üzerinde değerlendirilmiştir.



**Şekil 4.16** Senaryo 3.b’nin betimlenmiş hali.

**Senaryo 3.c:** İlgili senaryo Şekil 4.17’de gösterildiği üzere, 16-20 km menzil aralığında 9 rüzgar türbini ve 23-30 km (farklı menzil hücrelerinde) aralığında farklı mesafelerde konuşlandırılmış 1 uçak içeren yapı temel alınarak oluşturulmuştur. Bu senaryoya göre, test amacıyla 150 adet farklı radar sinyali üretilmiştir. Senaryo 3.a kapsamında eğitilen sınıflandırıcıların performansı, bu test verileri üzerinde değerlendirilmiştir.



**Şekil 4.17** Senaryo 3.c’nin betimlenmiş hali.

Senaryo 3 kapsamındaki sınıflandırıcıların performans metrikleri Tablo 4.3’de sunulmuştur.

**Tablo 4.3** Senaryo 3 kapsamındaki sınıflandırıcıların performans metrikleri.

Senaryolar	Modeller	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F1-Score
Senaryo 3.a	RF	0.5067	1	0.0133	0.0263
	MLP	0.50667	0.51515	0.22667	0.31481
	GB	0.51333	1	0.026667	0.051948
Senaryo 3.b	RF	0.5067	1	0.0133	0.0263
	MLP	0.5	0.5	0.21333	0.29907
	GB	0.54667	0.64	0.21333	0.32
Senaryo 3.c	RF	1	1	1	1
	MLP	0.89333	0.82418	1	0.90361
	GB	1	1	1	1

Model performansı senaryoya göre büyük farklılık göstermektedir.

Senaryo 3.a ve 3.b’de tüm modellerin düşük performans göstermesi, rüzgar türbinlerinin uçaklara kıyasla daha büyük boyutlara sahip olması ve anlık oryantasyona bağlı olarak zamanla değişen yüksek RKA (30-40 dB) karakteristikleri sergilemesi nedeniyle, ilgili senaryoların veri açısından zorluk içerebileceğini düşündürmektedir.

Senaryo 3.c’de uygulanan modeller mükemmel performans sergilemiştir; bu durum, veri kümesinde sınıflar arasında belirgin ayrımlar bulunduğunu ve modelin bu senaryoda daha başarılı çalıştığını göstermektedir. Ancak RF ve GB modellerinde elde edilen bu yüksek başarı, yalnızca model performansına değil, aynı zamanda veri kümesinin sınırlı esnekliğe ve belirli yapısal kısıtlamalara sahip olmasına da bağlı olabilir. Bu nedenle, veri kümesinin çeşitliliği ve genellenebilirliği açısından ayrıca değerlendirilmesi gerektiği düşünülmektedir.

GB modeli genel olarak MLP ve RF’ye kıyasla daha iyi doğruluk sağlamıştır, ancak modelin başarısı senaryoya bağlı olarak değişmektedir. RF modeli, Senaryo 3.c dışında diğer senaryolarda zayıf bir performans sergilemiştir. MLP, Senaryo 3.a ve 3.b’de düşük performans gösterse de Senaryo 3.c’de en yüksek doğruluk oranına ulaşmıştır.

## 5.1 Tartışma

Radar sistemlerinde rüzgar türbini kaynaklı parazitlerin giderilmesi ve hava hedeflerinin doğru sınıflandırılması, literatürde farklı yaklaşımlar ile ele alınmıştır. Bu çalışmada önerilen yöntem, diğer çalışmalardaki yöntemlerle kıyaslanmış olup ilgili çalışmaların özeti Tablo 5.1’de sunulmuştur.

**Tablo 5.1** İlgili çalışmaların özeti.

Makale	Etki Giderme yöntemi	Başarım/Sonuç	Senaryo/Tartışma
<b>Önerilen Yöntem</b>	Radar menzil hücrelerindeki güç seviyelerine dayalı arka plan hedef sınıflandırması	RF, MLP ve GB sınıflandırıcıları ile rüzgar türbinleri ile farklı menzil hücrelerine düşen uçaklar yüksek doğrulukla (~%100) sınıflandırılırken, rüzgar türbinleri ile aynı menzil hücrelerine düşen uçakların sınıflandırma performansının (~%50) oldukça düşük olduğu gözlemlenmiştir	Rüzgar türbini yoğunluğunun ve RKA farkının görece yüksek olduğu bir ortamda
[31]	Mikro-doppler tabanlı arka plan hedef sınıflandırması	Bayes ile %91.2 ve PNN ile %94.9 doğrulukla sınıflandırmanın mümkün olduğu görülmüş	Hedeflerin geri dönüş sinyalleri ayrı ayrı incelenip sınıflandırma yapılmış
[17]	CFAR aşaması rüzgar türbinlerinin bulunduğu menzil hücrelerindeki güç seviyelerinin eşik hesabına dahil edilmemesi	Türbinlerin dinamik bir gürültü haritasına dayalı olarak eşik hesabına dahil edilmediğinde, çoklu yansımada dahil güzel sonuçlar vermiş	Rüzgar türbini yoğunluğunun ve RKA farkının görece az olduğu ortamda rüzgar türbinlerin yaklaşık 1 deniz mili önünde ve arkasındaki hedefin tespiti

**Tablo 5.1** İlgili çalışmaların özeti (devamı).

[32]	Mikro-doppler verilerinin Rayleigh dağılımındaki sapmaların ölçülmesi üzerine arka plan hedef sınıflandırması	Orta ve düşük çözünürlüklü radar sistemlerinde, istatistiksel yaklaşımlar sayesinde, yoğun parazit alanlarında bile hedef sınıflandırması %75.8 doğruluk ile yapılmış	Hedeflerin geri dönüş sinyalleri ayrı ayrı incelenip sınıflandırma yapılmış
[33]	Kısa Zaman Fourier Dönüşüm tabanlı arka plan hedef sınıflandırması	Rüzgar türbini karmaşasında "hedef var" ve "hedef yok" durumlarının ayırımı %95 başarı oranıyla sınıflandırılmış	Basitleştirilmiş bir sinyal ve radar modeli seçilerek, rastgele belirlenen parametre konfigürasyonlarına dayalı veri setleri oluşturulmuş

Başarım açısından kıyaslandığında bu çalışmada önerilen yöntem, belirli durumlarda yüksek doğruluk sağlasa da, rüzgar türbinleri ile aynı menzil hücrelerinde bulunan uçaklar için sınıflandırma başarımı düşmektedir. Diğer çalışmalar, özellikle mikro-Doppler ve Kısa Zaman Fourier Dönüşüm tabanlı yaklaşımlar, bu tür durumlarda daha yüksek başarı elde edebilmiştir.

Senaryo ve uygulanabilirlik açısından kıyaslandığında bu çalışmada önerilen yöntem, yüksek RKA farkı ve türbin yoğunluğu içeren karmaşık bir senaryoda test edilmiştir, bu da yöntemin zorlu koşullarda nasıl performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Diğer çalışmalar genellikle daha sadeleştirilmiş senaryolar kullanmış, bu da karşılaştırmalı değerlendirmede önemli bir fark yaratmaktadır.

## 5.2 Sonuç

Radar menzil hücrelerindeki güç seviyelerine dayalı olarak gerçekleştirilen sınıflandırma sürecinde, uçakların rüzgar türbinlerinden farklı menzil hücrelerine düştüğü durumlarda “sadece rüzgar türbini” ve “rüzgar türbini ile uçak” sınıfları yüksek doğrulukla ayırt edilebilmiştir. Ancak, aynı menzil hücrelerine düşen uçak ve türbin durumunda sınıflandırma performansı oldukça düşük kalmıştır.

Bu nedenle, gelecekteki çalışmalarda senaryoların çeşitlendirilmesi ve veri setinin büyütülmesi hedeflenmektedir. Daha fazla hedef-türbin kombinasyonunun ve farklı

geometrik yerleşimlerin modellenmesiyle sınıflandırma algoritmalarının genelleme yeteneğinin artırılması planlanmaktadır. Ayrıca, sınıflandırma yaklaşımının performansını daha da iyileştirmek amacıyla hedefin hızı, hareket vektörü, ivmesi, frekans imzası, irtifası, zamanla değişen radar kesit alanı ve polarizasyon bilgisi gibi ek özelliklerin de veri füzyonu teknikleriyle sisteme entegre edilmesi öngörülmektedir. Bu iyileştirme ile özellikle yoğun hava trafiğine sahip bölgelerde, hava trafik kontrolörlerinin uçakları daha güvenli ve etkin şekilde yönlendirebilmesi hedeflenmektedir.



- [1] C. Jackson, "Windfarm characteristics and their effect on radar systems," in *IET International Conference on Radar Systems 2007*, 2007: IET.
- [2] C. Ton, "Radar cross section (RCS) simulation for wind turbines," 2013.
- [3] F. Darcy and D. de la Vega, "A methodology for calculating the interference of wind farm on weather radar," in *2009 Loughborough Antennas & Propagation Conference*, 2009: IEEE, pp. 665-667.
- [4] L. Rashid and A. Brown, "Radar cross-section analysis of wind turbine blades with radar absorbing materials," in *2011 8th European Radar Conference*, 2011: IEEE, pp. 97-100.
- [5] A. Frye, C. Neumann, and A. Müller, "The compatibility of wind turbines with radars," *Annual Report*, 2008.
- [6] E. Aarholt and C. A. Jackson, "Wind farm gapfiller concept solution," in *The 7th European Radar Conference*, 2010: IEEE, pp. 236-239.
- [7] Air Warfare Centre RAF Lincoln, "The Effects of Wind Turbine Farms on ATC Radar," Air Warfare Centre Raf Lincoln (United Kingdom), Lincoln, United Kingdom, ADA467441, May 2005 2005.
- [8] R. R. Ohs, G. J. Skidmore, and G. Bedrosian, "Modeling the effects of wind turbines on radar returns," in *2010-MILCOM 2010 Military Communications Conference*, 2010: IEEE, pp. 272-276.
- [9] J. Pinto, J. Matthews, and G. Sarno, "Stealth technology for wind turbines," *IET radar, sonar & navigation*, vol. 4, no. 1, pp. 126-133, 2010.
- [10] J. Pinto, J. Matthews, and C. Sarno, "Radar signature reduction of wind turbines through the application of stealth technology," in *2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation*, 2009: IEEE, pp. 3886-3890.
- [11] L. Claudepierre, R. Douvenot, A. Chabory, and C. Morlaas, "Assessment of the shadowing effect between windturbines," in *2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2015: IEEE, pp. 1-4.
- [12] C. Jackson and M. Butler, "Options for mitigation of the effects of wind farms on radar systems," in *IET International Conference on Radar Systems 2007*, 2007: IET.
- [13] L. Sergey, O. Hubbard, Z. Ding, H. Ghadaki, J. Wang, and T. Ponsford, "Advanced mitigating techniques to remove the effects of wind turbines and wind farms on primary surveillance radars," in *2008 IEEE radar conference*, 2008: IEEE, pp. 1-6.
- [14] A. Thomsen *et al.*, "Air traffic control at wind farms with TERMA SCANTER 4000/5000," in *2011 IEEE RadarCon (RADAR)*, 2011: IEEE, pp. 247-252.
- [15] D. De la Vega, J. C. Matthews, L. Norin, and I. Angulo, "Mitigation techniques to reduce the impact of wind turbines on radar services," *Energies*, vol. 6, no. 6, pp. 2859-2873, 2013.

- [16] O. Karabayir, S. M. Yucedag, A. F. Coskun, O. M. Yucedag, H. A. Serim, and S. Kent, "Wind turbine signal modelling approach for pulse Doppler radars and applications," *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 9, no. 3, pp. 276-284, 2015.
- [17] s. Jia, s. Wu, and s. Wang, "Recognition and supression of wind farm clutter via dynamic clutter map," in *2012 IEEE 11th International Conference on Signal Processing*, 2012, vol. 3: IEEE, pp. 1949-1952.
- [18] F. Kong, Y. Zhang, R. Palmer, and Y. Bai, "Wind turbine radar signature characterization by laboratory measurements," in *2011 IEEE RadarCon (RADAR)*, 2011: IEEE, pp. 162-166.
- [19] O. M. Yucedag, S. M. Yucedag, and H. A. Serim, "Radar cross section calculation of a wind turbine modeled by PEC canonical structures," in *2013 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 2013: IEEE, pp. 562-565.
- [20] M. J. Algar, A. Somolinos, J. Moreno, I. González, and F. Cátedra, "Overview of some numerical techniques for the analysis of the electromagnetic scattering by wind turbines," in *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2016: IEEE, pp. 1-5.
- [21] D. de la Vega, D. Jenn, I. Angulo, and D. Guerra, "Simplified characterization of Radar Cross Section of wind turbines in the air surveillance radars band," in *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2016: IEEE, pp. 1-5.
- [22] A. Naqvi, N. Whiteloni, and H. Ling, "Doppler features from wind turbine scattering in the presence of ground," in *Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, 2012: IEEE, pp. 1-2.
- [23] B. R. Mahafza, *Radar systems analysis and design using MATLAB*. Chapman and Hall/CRC, 2005.
- [24] M. I. Skolnik, *Introduction to radar systems*. McGraw-hill New York, 1980.
- [25] O. KARABAYIR, "Investigation of wind turbine effects on radar performance " Ph.D. THESIS, Department of Electronics and Communications Engineering Telecommunications Engineering Programme, Istanbul Technical University, 2016.
- [26] A. H. Özcan, S. Baykut, D. S. Şahinkaya, and İ. K. Yalçın, "Micro-doppler effect analysis of single bird and bird flock for linear FMCW radar," in *2012 20th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 2012: IEEE, pp. 1-4.
- [27] D. Yuan, J. Huang, X. Yang, and J. Cui, "Improved random forest classification approach based on hybrid clustering selection," in *2020 Chinese Automation Congress (CAC)*, 2020: IEEE, pp. 1559-1563.
- [28] M. Massaoudi, A. Darwish, S. S. Refaat, H. Abu-Rub, and H. A. Toliyat, "UHF partial discharge localization in gas-insulated switchgears: Gradient boosting based approach," in *2020 IEEE Kansas Power and Energy Conference (KPEC)*, 2020: IEEE, pp. 1-5.

- [29] S. S. Tabib and A. A. Jalali, "Modelling and prediction of internet time-delay by feed-forward multi-layer perceptron neural network," in *Tenth International Conference on Computer Modeling and Simulation (uksim 2008)*, 2008: IEEE, pp. 611-616.
- [30] A. Vırt and A. Öter, "Kardiyovasküler Hastalıkların Derin Öğrenme Algoritmaları İle Tanısı," *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, vol. 12, no. 4, pp. 902-912, 2024.
- [31] O. Karabayır, S. M. Yücedağ, O. M. Yücedağ, A. F. Coşkun, and H. A. Serim, "Micro-Doppler-based classification study on the detections of aerial targets and wind turbines," in *2016 17th International Radar Symposium (IRS)*, 2016: IEEE, pp. 1-4.
- [32] C. Neumann and H. Senkowski, "Automatic Target Recognition for short time observation radars," in *2013 14th International Radar Symposium (IRS)*, 2013, vol. 2: IEEE, pp. 592-596.
- [33] M. Dietlein and T. Mahr, "Classification of Targets and Wind Turbine Clutter in Pulse-Doppler Radar Spectra Using a Group of Neural Networks," in *2019 20th International Radar Symposium (IRS)*, 2019: IEEE, pp. 1-10.

## TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

---

### **Makale**

U.San, A.Öter ve A.Kara, "Radar Menzil Hücrelerindeki Güç Seviyelerini Kullanarak Rüzgar Türbini Paraziti İçerisindeki Hedeflerin Sınıflandırılması," *Savunma Bilimleri Dergisi*, basımda.

