

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK
LİSANS PROGRAMI**

**BAĞLANTILI BİLEŞEN ETİKETLEME TABANLI KÜMELEME İLE
RADAR SİNYALLERİNİN AYRIŞTIRILMASI**

HAZIRLAYAN

NESLİHAN FİŞNE

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA - 2022

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK
LİSANS PROGRAMI**

**BAĞLANTILI BİLEŞEN ETİKETLEME TABANLI KÜMELEME İLE
RADAR SİNYALLERİNİN AYRIŞTIRILMASI**

HAZIRLAYAN

NESLİHAN FİŞNE

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. AHMET GÜNGÖR PAKFİLİZ

ANKARA – 2022

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik-Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Neslihan FİŞNE tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 31/03/2022

Tez Adı: Bağlantılı Bileşen Etiketleme Tabanlı Kümeleme İle Radar Sinyallerinin Ayırıştırılması

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı- Soyadı, Kurumu)

İmza

Prof. Dr. Sedat NAZLIBİLEK, Başkent Üniversitesi

.....

Doç. Dr. Ahmet Güngör PAKFİLİZ, Başkent Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi Gökhan SOYSAL, Ankara Üniversitesi

.....

ONAY

Prof. Dr. Faruk Elaldı
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih: / / 2022

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS / DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 02/04/ 2022

Öğrencinin Adı, Soyadı: Neslihan Fişne

Öğrencinin Numarası: 21820254

Anabilim Dalı: Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Programı: Tezli Yüksek Lisans

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı: Doç. Dr. Ahmet Güngör Pakfiliz

Tez Başlığı: Bağlantılı Bileşen Etiketleme tabanlı Kümeleme ile Radar Sinyallerinin
Ayrıştırılması

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 66 sayfalık kısmına ilişkin, 02 / 04 / 2022 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %4'tür. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:.....

ONAY

Tarih: ... / ... / 20...

Doç. Dr. Ahmet Güngör Pakfiliz

TEŞEKKÜR

Öncelikle tez danışmanım Doç. Dr. Ahmet Güngör PAKFİLİZ' e kıymetli tavsiye ve rehberliklerinden ötürü, lisansüstü derslerde ve tez çalışmamda bilgi ve deneyimlerini aktardığı, anlayışı ve tüm destekleri için saygılarımı ve desteklerimi sunarım. Ayrıca tez çalışmalarındaki gözden geçirme ve değerli tavsiyelerinden dolayı tez jüri üyesi hocalarım Prof. Dr. Sedat NAZLIBİLEK ve Dr. Öğr. Üyesi Gökhan SOYSAL' a teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca desteklerini hissettiğim, varlıkları ile bana güç veren sevgili aileme, tez çalışmam boyunca da yanımda olan annem Aynur BOYACI ve babam Kibar BOYACI' ya teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca beni destekleyen, bana güvenen, üzerimde emeği olan herkese, geniş aileme teşekkür ederim.

Son olarak lisansüstü eğitime beni teşvik eden, her zaman olduğu gibi bu süreçte de yanımda olan ve tez çalışmamda beni destekleyen eşim Alparslan ve biricik kızımız Aybüke' ye teşekkür ederim.

ÖZET

Neslihan FİŞNE

BAĞLANTILI BİLEŞEN ETİKETLEME TABANLI KÜMELEME İLE RADAR SİNYALLERİNİN AYRIŞTIRILMASI

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

2022

Bu tez çalışmasında, sinyal ayrıştırma işlemi için önerilen yenilikçi bir kümeleme sayesinde radar ikaz alıcısında darbeli ve sürekli dalga sinyallerinin verimli ve yüksek-doğrulukta ayrıştırma amaçlanmıştır. Askeri hava platformları tehdit radar sinyallerini tespit etmek için radar ikaz alıcı mimarilerine sahiptir. Muharebe sırasında askeri uçaklar için tehdit radar kaynaklarının sınıflandırılması ve kabiliyetlerinin belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu kapsamda, darbe ve Frekans Modüllü Sürekli Dalga (FMSD) radar sinyallerinin ayrıştırılmasından önce verimli kümeleme için bilgisayarlı görü tabanlı bağlantılı bileşen etiketleme yöntemini içeren yenilikçi bir yöntem önerilmiştir. Bağlantılı bileşen etiketleme ile kümeleme sırasında sinyal ayrıştırma girdileri olan geliş zamanı, geliş açısı, radyo frekansı ve darbe genişliği parametreleri ile çözüm sunulur. Kümeleme sonrasında her bir küme içinde darbe radar sinyalleri için Darbe Tekrarlama Aralığı (DTA) bilgisi çıkarılırken FMSD sinyalleri için frekans değeri, bant genişliği, süpürme süresi ve tarama yönü parametreleri kestirilmektedir. Benzetim test sonuçlarına göre önerilen kümeleme yöntemi hiyerarşik kümeleme yöntemine göre daha hızlı ve doğruluk kaybı olmaksızın performans sağlamaktadır. Ayrıca, FMSD sinyal parametreleri düşük hata oranıyla tahmin edilirken, sabit ve aşamalı DTA bilgileri yüksek başarımla çıkarılmaktadır.

ANAHTAR KELİMELELER: Sinyal Ayrıştırma, Bağlantılı Bileşen Etiketleme, Radar İkaz Alıcısı, Elektronik Harp.

ABSTRACT

Neslihan FİŞNE

DEINTERLEAVING OF RADAR SIGNALS WITH CONNECTED COMPONENT LABELING BASED CLUSTERING

Başkent University Institute of Science and Engineering

Department of Electrical and Electronics Engineering

2022

This thesis aims to deinterleave pulsed and continuous wave signals efficiently and accurately with the proposed innovative clustering for the signal deinterleaving process, in the radar warning receiver. Military airborne platforms have radar warning receiver architectures to detect threat radar signals. It is essential to classify and determine the capabilities of threat radar sources for military aircraft during combat. In this scope, an innovative method is proposed that includes a computer vision-based connected component labeling method for efficient clustering of pulse and Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) radar signals. During clustering, it is represented solution with the signal separation inputs such as the time of arrival, the angle of arrival, the radio frequency, and the pulse width parameters. After clustering, inside each cluster, the radio frequency, bandwidth, sweep time, and chirp direction parameters are estimated for FMCW signals while Pulse Repetition Interval (PRI) information is extracted for pulse radar signals. The deinterleaving tests have been comparatively realized with simulations by using various radar signal sets. According to simulation test results, our proposed clustering method provides faster and higher accuracy performance when compared to the hierarchical clustering method. In addition, fixed and staggered PRI information is extracted with high performance, while FMCW signal parameters are estimated with a low error rate.

KEYWORDS: Signal Deinterleaving, Connected Component Labeling, Radar Warning Receiver, Electronic Warfare.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Motivasyon.....	1
1.2. Ana Katkılar	2
1.3. Beklenen Kazanımlar	2
1.4. Tezin Organizasyonu	3
2. RADAR SİNYALLERİNİN AYRIŞTIRILMASI	4
2.1. Radar Sinyalleri	4
2.1.1. Darbeli Radar Sinyalleri.....	5
2.1.1.1. Sabit DTA	5
2.1.1.2. Basamaklı (Staggered) DTA	6
2.1.1.3. Titreşimli DTA	7
2.1.2. FMSD Radar Sinyalleri	7
2.2. Radar İkaz Alıcı Mimarisi ve Sinyal Ayrıştırma Bloğu	8
2.2.1. Üst Üste Darbe Gelme Durumu ve Çözüm Önerileri	11
2.2.2. FMSD Sinyalleri için Tanımlayıcı Kelime Üretimi.....	12
2.3. Kümeleme Yöntemleri.....	12
2.3.1. Uzaklık Tabanlı Kümeleme.....	14
2.3.2. K-Ortalama Kümeleme	14

2.4. Sinyal Ayrıştırma Yaklaşımları.....	15
2.4.1. Ardışık Türev Histogram Yöntemi (SDIF).....	15
2.4.2. Kümülatif Türev Histogram Yöntemi (CDIF)	16
2.4.3. DTA Dönüşüm Yöntemi	17
3. LİTERATÜR İNCELEMELERİ	18
3.1. Elektronik Harp Kavramı ve Bileşenleri	18
3.2. Darbeli Radar Sinyal Ayrıştırılması için Literatür İncelemeleri	21
3.3. FMSD Radar Sinyal Parametre Çıkarım için Literatür İncelemeleri.....	24
3.4. Radar Sinyallerinin Kümelenmesi için Literatür İncelemeleri	27
4. ÖNERİLEN RADAR SİNYAL AYRIŞTIRMA YÖNTEMLERİ.....	28
4.1. Bağlantılı Bileşen Kümeleme tabanlı Kümeleme	28
4.1.1. Darbe Radar Sinyalleri için 3B Kümeleme	31
4.1.2. FMSD Radar Sinyalleri için 2B Kümeleme.....	34
4.2. Ardışık Türev Histogram tabanlı DTA Ayrıştırma.....	36
4.3. Zaman-Frekans Analizi ile FMSD Radar Sinyal Parametre Çıkarımı	40
5. VERİ SETLERİ, BENZETİM ÇALIŞMALARI VE SONUÇLAR.....	42
5.1. Veri Setleri.....	42
5.1.1. Darbeli Radar Veri Seti	43
5.1.2. FMSD Radar Veri Seti.....	48
5.2. Darbeli Radar Sinyal Ayrıştırması Benzetimleri.....	49
5.2.1. Senaryo 1 (Tüm DTA Sinyalleri)	49
5.2.2. Senaryo 2 (Sadece Sabit DTA Sinyalleri).....	52
5.2.3. Senaryo 3 (Sadece 2-Basamaklı DTA Sinyalleri)	53
5.2.4. Senaryo 4 (Sadece 3-Basamaklı DTA Sinyalleri)	54
5.2.5. Senaryo 5 (Sadece Basamaklı DTA Sinyalleri)	55
5.2.6. Senaryo 6 (Sabit ve 2-Basamaklı DTA Sinyalleri)	57
5.2.7. Senaryo 7 (Sabit ve 3-Basamaklı DTA Sinyalleri)	58
5.3. FMSD Radar Sinyal Ayrıştırması Benzetimleri	59
5.3.1. 2B Kümeleme Benzetimi.....	59

5.3.2. Bant Genişliği Parametre Kestirim Testleri	60
5.3.3. Merkez Frekansı Parametre Kestirim Testleri	61
5.3.4. Süpürme Süresi Parametre Kestirim Testleri	63
5.3.5. Salınım Yönü Parametre Kestirim Testleri	64
5.4. Sonuçlar ve Tartışma	64
5.4.1. Hiyerarşık Kümeleme	65
5.4.2. Karşılaştırma	67
6. DEğERLENDİRMELELER	68
7. KAYNAKLAR	71



TABLÖLER LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Darbe Tanımlayıcı Kelime Tablosu	10
Tablo 2.2. Sinyal Kelime Tablosu	12
Tablo 5.1. Radar Frekans Aralığı ve Kullanım Alanları	43
Tablo 5.2. S-Bant Darbeli Radar Veri Seti	45
Tablo 5.3. C-Bant Darbeli Radar Veri Seti	45
Tablo 5.4. X-Bant Darbeli Radar Veri Seti	46
Tablo 5.5. Ku-Bant Darbeli Radar Veri Seti	46
Tablo 5.6. DTA Çıkarım Konfigürasyon Parametreleri	47
Tablo 5.7. FMSD Radar Sinyalleri Veri Seti (Aşağı (A), Yukarı (Y))	48
Tablo 5.8. Tüm DTA Ayırıştırma Girdi Değerleri	50
Tablo 5.9. Tüm DTA Radar Sinyalleri Ayırıştırma Sonuçları	51
Tablo 5.10. Sabit DTA Ayırıştırma Girdi Değerleri	52
Tablo 5.11. Senaryo 1'deki DTA Ayırıştırma Girdi Değerleri	52
Tablo 5.12. 2-Basamaklı DTA Ayırıştırma Girdi Değerleri.....	53
Tablo 5.13. 2-Basamaklı DTA Ayırıştırma Sonuçları.....	54
Tablo 5.14. 3-Basamaklı DTA Ayırıştırma Girdi Değerleri.....	54
Tablo 5.15. 3-Basamaklı DTA Ayırıştırma Sonuçları.....	55
Tablo 5.16. Basamaklı DTA Ayırıştırma Girdi Değerleri.....	56
Tablo 5.17. Basamaklı DTA Ayırıştırma Sonuçları	56
Tablo 5.18. Sabit ve 2-Basamaklı DTA Ayırıştırma Girdi Değerleri.....	57
Tablo 5.19. Sabit ve 2-Basamaklı DTA Ayırıştırma Sonuçları.....	57
Tablo 5.20. Sabit ve 3-Basamaklı DTA Ayırıştırma Girdi Değerleri.....	58
Tablo 5.21. Sabit ve 3-Basamaklı DTA Ayırıştırma Sonuçları.....	59
Tablo 5.22. Bant Genişliği Parametresi Kestirim Sonuçları	61
Tablo 5.23. Merkez Frekansı Parametresi Kestirim Sonuçları.....	62
Tablo 5.24. Süpürme Süresi Parametre Kestirim Sonuçları	63
Tablo 5.25. Salınım Yönü Parametre Kestirim Sonuçları	64
Tablo 5.26. Hiyerarşik Kümeleme (HK) ile BBE Kümeleme Başarım Karşılaştırması	67

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Darbe Sinyali Yapısı	5
Şekil 2.2. Sabit DTA İçeren Radar Sinyali.....	6
Şekil 2.3. Basamaklı DTA İçeren Radar Sinyali	6
Şekil 2.4.FMSD Sinyalinin Gösterimi.....	7
Şekil 2.5.Radar İkaz Alıcı Sinyal İşleme Mimarisi	9
Şekil 2.6.Üst Üste Darbe Gelme Durumu (PoP)	11
Şekil 2.7.DTK Listesinden Kümeleme İşlemi.....	13
Şekil 2.8. Üç Adet Küme İçeren Bir Gruplama İşlemi.....	13
Şekil 2.9. Ardışık Türev Histogram DTA Ayırıştırma Yöntemi	16
Şekil 2.10. Kümülatif Türev Histogram DTA Ayırıştırma Yöntemi	16
Şekil 4.1. 4 ve 8-Bağlantılı Komşuluk Durumları.....	28
Şekil 4.2. İkili İmge Örneği	29
Şekil 4.3. 8-Bağlantılı Komşuluk ile Bağlantılı Bileşen Etiketleme Yöntemi	29
Şekil 4.4. 4-Bağlantılı Komşuluk ile Bağlantılı Bileşen Etiketleme Yöntemi	30
Şekil 4.5. RF-GA-DG Eksenli 3B Uzayda Komşuluk Gösterimi.	32
Şekil 4.6. 3B Kümeleme tabanlı DTK Darbe Analiz Akışı.....	33
Şekil 4.7. 2B Kümeleme tabanlı FMSD Sinyal Analiz Akışı	35
Şekil 4.8. Paralel Sinyal Ayırıştırma İşlem Akışı.....	36
Şekil 4.9. Ardışık Türev Histogram ile DTA Ayırıştırma İşlem Akışı	37
Şekil 4.10. DTA Ayırıştırma İşleminin Deneysel Gösterimi a) Sabit ve 2-Basamaklı DTA Radar Sinyalleri Geliş Zamanı Vektörleri b) Ardışık Türev TOA Vektörleri c) Ardışık Türev Histogram Vektörleri ve Eşik İşlemi	38
Şekil 4.11. DTA Ayırıştırmada Ardışık Analiz Güncelleme İşlemi.....	39
Şekil 4.12. FMSD Sinyal Parametre Çıkarım İşlem Akışı.....	41
Şekil 5.1. Tüm DTA Sinyalleri için 3B Kümeleme	51
Şekil 5.2. Sabit DTA Radar Sinyalleri 3B Kümeleme	53
Şekil 5.3. 2-Basamaklı DTA Sinyalleri için 3B Kümeleme.....	54
Şekil 5.4. 3-Basamaklı DTA Sinyalleri için 3B Kümeleme.....	55
Şekil 5.5. Basamaklı DTA Sinyalleri için 3B Kümeleme	56
Şekil 5.6. Sabit ve 2-Basamaklı DTA için 3B Kümeleme	58
Şekil 5.7. Sabit ve 3-Basamaklı DTA için 3B Kümeleme	59

Şekil 5.8. FMSD Radar Sinyalleri için 2B Kümeleme.....	60
Şekil 5.9. Bant Genişliği Kestirim Doğruluk Başarımları.....	61
Şekil 5.10. Merkez Frekans Kestirim Doğruluk Başarımları	62
Şekil 5.11. Süpürme Süresi Kestirim Başarımları.....	63
Şekil 5.12. 7 Adet DTA Ayrıştırma Senaryosu için Hiyerarşik Kümeleme Sonuçları	66



SİMGELER VE KISALTMALAR

ED	Elektronik Destek
RIA	Radar İkaz Alıcısı
PoP	Pulse on Pulse
DTA	Darbe Tekrarlama Aralığı
FMDS	Frekans Modüllü Sürekli Dalga
BBE	Bağlantılı Bileşen Etiketleme
RF	Radyo Frekansı
DG	Darbe Genişliği
DTK	Darbe Tanımlayıcı Kelime
KSFD	Kısa Süreli Fourier Dönüşümü
DTF	Darbe Tekrarlama Frekansı
BBE	Bağlı Bileşen Etiketleme

1. GİRİŞ

Bu bölümde tez çalışmasının radar sinyallerinin ayrıştırma işleminde hangi çözümleri gerçekleştirdiği, katkıları ve içerik organizasyonu anlatılmıştır.

1.1. Motivasyon

Radar sistemleri hem askeri hem de sivil alanda gözetleme, keşif, görüntüleme ve güvenlik amaçlı ihtiyaçlar için sıkça kullanılmaktadır. Hareketli bir nesneyi tespit etme, alan/bölge görüntüleme ve nesne takibi gibi temel yeteneklere sahip radar sistemlerinin yayınladığı sinyaller askeri amaçlı durumlarda algılanarak tehdit unsurların belirlenmesi sağlanmaktadır. Bu bağlamda, Elektronik Destek (Electronic Support, ES) Sistemleri sayesinde yayın kaynaklarından alıcıya ulaşan sinyaller algılanarak sinyal bilgileri elde edilmektedir.

Bu tez çalışmasında, askeri uçaklarda yer alan Kendini Koruma sistemlerindeki Elektronik Destek (ED) Sistemi olan Radar İkaz Alıcısı (RİA) tarafından algılanan radar sinyallerinin ayrıştırılması incelenmektedir. Radar sinyal ayrıştırmada çoklu radar sinyalinin oluşturduğu Darbe üzerinde Darbe (Pulse on Pulse, PoP) problemine çözüm sunmak motivasyonu ile verimli ve yüksek başarımlı kümeleme yöntemi çalışılmıştır. Kümeleme için bilgisayarlı görü tabanlı yaklaşımların kullanımı ile gruplama yapılarak PoP problemine çözüm sunulmaktadır.

Kümeleme sonrası her bir radar sinyal grubu için sinyal bilgi çıkarım işlemleri gerçekleştirilmektedir. Darbe radar sinyalleri için Darbe Tekrarlama Aralığı (DTA) bilgisi çıkarılırken, Frekans Modüllü Sürekli Dalga (FMSD) radar sinyalleri için bant genişliği, radyo frekansı, tarama süresi (sweep time) ve salınım yönü (chirp direction) parametreleri tahmin edilmektedir.

Radar sinyal ayrıştırılması 3 temel işlem adımı ile görevin sürekliliği sağlanarak yapılmaktadır. Adımlar sırası ile şu şekildedir:

- Bağlantılı Bileşen Etiketleme (BBE) tabanlı kümeleme ile radar sinyallerinin gruptama,
- Kümeleme sonucu her bir grup sinyalleri için bilgi çıkarımı,
- Analiz pencereleri arasındaki devamlılığı sağlamak adına güncelleme işlemleri.

Radar sinyal ayrıştırma problemi için bu işlemler ile tasarlanan çözüm yaklaşımı tezin ana motivasyonunu oluşturmaktadır.

1.2. Ana Katkılar

Tez çalışmasının temel amacı, hava platformunda kullanılan bir radar ikaz alıcısına ulaşan radar sinyallerini verimli ve doğruluk kaybı olmadan ayrıştırarak sinyal ayrıştırma işlemini yüksek başarımla gerçekleştirmektedir. Muharebe sırasında çok sayıda radar yayın kaynağının olması varsayımıyla, ayrıştırma işlemi zorlaşmaktadır. Bu bağlamda, ayrıştırma problemi için geliştirilen çözümler literatüre katkı sunulmuştur. Tez çalışmasının iki temel katkısı maddeler halinde belirtilmektedir:

1. Bilgisayarlı görü alanında bölge tespiti gibi problemler için çözüm sunan bağlantılı bileşen etiketleme ile verimli ve hızlı bir çözüm ile kümeleme işlemi gerçekleştirilmiştir.
2. Darbe radar sinyallerinin ayrıştırılmasının yanı sıra FMSD radar sinyalleri için paralel bir işlem adımıyla kümeleme ve parametre çıkarım işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Temel katkılar dışında, tez çalışmasında hiyerarşik kümeleme ile aynı doğruluk başarımları ile çalışan bağlantılı bileşen etiketleme tabanlı kümeleme sayesinde hiyerarşik kümelemeye göre daha hızlı sonuç alınarak RİA sistemlerine katkı sunulmaktadır.

1.3. Beklenen Kazanımlar

Önerilen yöntem sayesinde hava platformlarında kullanılan RİA sistemlerinde çalışabilecek güvenilir ve hızlı bir sinyal kümeleme yöntemi ile ayrıştırma işlem kabiliyetinin hızı

artırılmaktadır. Ayrıca paralel bir süreçle muharebe sahasında karşılaşılabilecek tehdit sinyaller için tanıma kabiliyeti iyileştirilmektedir. Tez çalışması bilişsel elektronik harp teknolojilerinin odak konularına girmekte olup ayrıştırma işlemi sonucu elde edilen bilgiler Önerilen yöntem sayesinde hava platformlarında kullanılan RİA sistemlerinde çalışabilecek güvenilir ve hızlı bir sinyal kümeleme yöntemi ile ayrıştırma işlem kabiliyetinin hızı artırılmaktadır. Ayrıca paralel bir süreçle muharebe sahasında karşılaşılabilecek tehdit sinyaller için tanıma kabiliyeti iyileştirilmektedir. Tez çalışması bilişsel elektronik harbin RİA'ların tehdit belirme sürecinde etkin olarak kullanılmasına imkân sağlayabileceği değerlendirilmektedir.

1.4. Tezin Organizasyonu

Tez çalışmasının organizasyonu maddeler halinde aşağıda sırasıyla belirtilmektedir:

- İkinci bölümde, radar sinyallerinin özellikleri tanımlanırken, kümeleme yaklaşımları ve sinyal ayrıştırma işlemlerine ait bilgiler verilmektedir.
- Üçüncü bölümde, radar sinyallerinin ayrıştırılması hakkındaki akademik çalışmaların detayları ve literatürdeki ilgili çalışmalar anlatılmaktadır.
- Dördüncü bölümde, bu tez çalışmasında önerdiğimiz bağlantılı bileşen etiketleme tabanlı kümeleme yöntemi ve sinyal ayrıştırma adımları anlatılmaktadır.
- Beşinci bölümde ise sentetik radar veri setleri ile benzetimler gerçekleştirilerek test sonuçları incelemekte ve hiyerarşik kümeleme ile karşılaştırmalar yapılmaktadır.
- Son bölümde ise tez çalışmasının sonuçları, karşılaşılan zorluklar ve gelecek çalışmalar değerlendirilmektedir.

2. RADAR SİNYALLERİNİN AYRIŞTIRILMASI

Bu bölümde radar ikaz alıcısına gelen radar sinyallerini tanımlayarak, radar ikaz alıcı sistemindeki ayrıştırma mimari akışından bahsedilmektedir. Ardından radar sinyal ayrıştırmada kullanılan kümeleme yöntemlerini ve sinyallere ait bilgilerin çıkarımı için gerçekleşen sinyal ayrıştırma yaklaşımları anlatılmaktadır.

2.1. Radar Sinyalleri

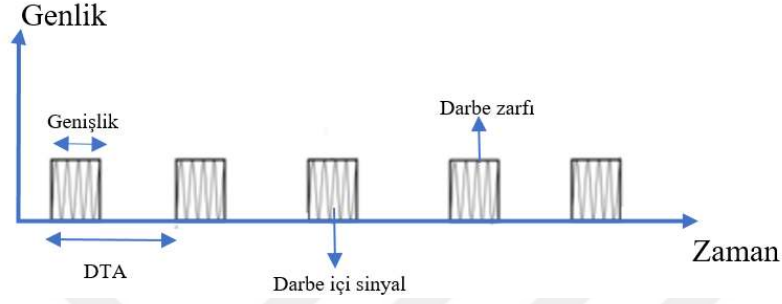
Radar kelimesi, Türkçesi Radyo hedef algılama ve menzil tayini” olan İngilizcede “Radio Detection and Ranging” kelimelerinin kısaltması olarak türetilmiştir. Bir radar sisteminde Hedef algılama ve menzil tayini elektromanyetik dalganın yayılarak bir nesneye çarpması ve geri dönmesinden faydalanılarak sağlanmaktadır. Radar sistemler kullanım ihtiyacına göre farklı modülasyon ve tasarım yapılarına göre şekillenmektedir. Sadece hız ölçümünde kullanılan sürekli dalga (continuous wave) radarlarında gönderilen sinyal ile alınan sinyal arasındaki frekans farkından hedefin Doppler hız bilgisine ulaşılır [1].

Sürekli dalga sinyali içeren radarlarda hem hız hem de mesafe bilgisini tespit edilmek istenirse gönderim sinyali modüle edilerek zaman gecikmesi hesaplanmaktadır. Zaman gecikmesi bilgisinden hedefe ait mesafe bilgisi çıkartılmaktadır. Darbeli radarlar ile uzun menzilli, yüksek hızlı hedef ölçümü ve kısa süreli darbeli yayınlar ile hedef unsurlar tespit ve takip edilebilmektedir [1].

Radar sistemleri sivil, havacılık, askeri birçok alanda yer almaktadır. Elektronik harp faaliyetlerinde hava savunma top ve füze sistemleri, hava platformlu atış kontrol sistemleri sınır ve sahil gözetleme ile hava keşif gözetleme sistemlerinde kullanılan radar sistemleri büyük önem taşımaktadır. Hava platformunda kullanılan elektronik destek (ED) sistemlerine aynı anda darbeli, sürekli dalga ve bunların kombinasyonunu kullanan radar sinyalleri ulaşabilmektedir.

2.1.1. Darbeli Radar Sinyalleri

Darbe radar sinyallere sahip yayıcılar, yüksek frekans ve güçte periyodik olarak darbe genişliği süresince yayın yapar ve hedeflerden gelecek yankıları dinler. Darbe Tekrarlama Aralığı (DTA) süresi bir darbe uzunluğunu ifade etmektedir [2]. Şekil 2.1.'de örnek bir darbeleri sinyal yapısı yer almaktadır.



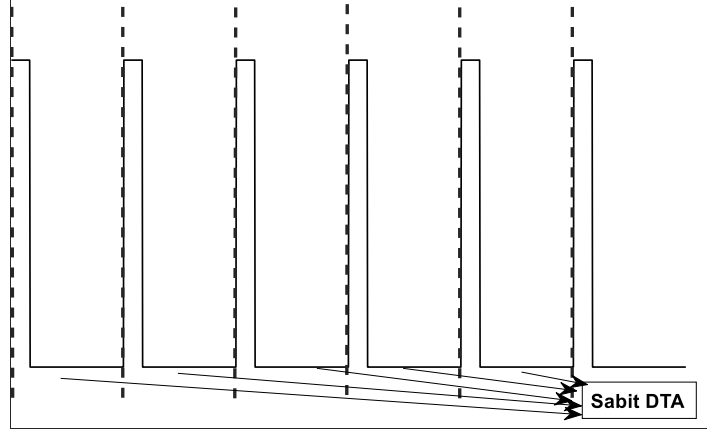
Şekil 2.1. Darbe Sinyali Yapısı

Gönderilen bir darbe işaretinin yükselen kenarından, gönderilen ikinci işaretin yükselen kenarına kadar geçen süreye yani art arda iki darbenin başlangıçları arasındaki süreye Darbe Tekrarlama Aralığı (Pulse Repetition Interval, PRI) denir. Darbeli radar sinyalleri DTA tipine göre kategorize olup sıkça kullanılan DTA çeşitleri aşağıda maddeler halinde belirtilmektedir:

- Sabit DTA
- Basamaklı (Staggered) DTA
- Titreşimli (Jittered) DTA

2.1.1.1. Sabit DTA

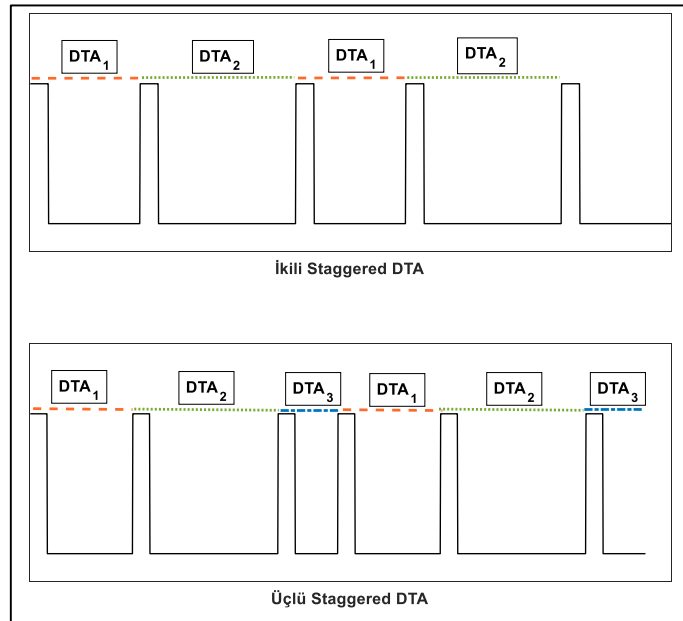
Darbe sinyalleri aynı periyodik sürede üretiliyorsa darbe radar sinyalleri sabit DTA yapısına sahiptir. Sabit DTA yapısı ile sistem karmaşıklığı sabit hale getirilmektedir. Fakat bu durum ED sistemlerindeki radar sinyal çözümlemesini kolaylaştıracağından operasyonel radar sistemlerinde sabit DTA az tercih edilmektedir [1]. Şekil 2.2.'de sabit DTA örneği içeren bir radar sinyal seti gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Sabit DTA İçeren Radar Sinyali

2.1.1.2. Basamaklı (Staggered) DTA

Darbe sinyalleri birden fazla DTA değerleri periyodik olarak aşamalı bir şekilde üretildiği durumda sinyal basamaklı özelliğe sahip olmaktadır. Basamaklı darbe sinyalleri ile menzil belirsizliğinin değeri artırılarak radar sistemine uzun menzilde tespit yapma imkânı kazandırılmaktadır [2]. Sabit DTA sinyaline göre ED sistemleri tarafından çözülmesi zorlaşmaktadır. Sistem karmaşıklığını da önemli bir ölçüde artırmadığından çoğu darbe radarlarında kullanılan DTA yapısıdır [1]. Şekil 2.3.'te ikili ve üçlü basamaklı DTA yapısına sahip darbe sinyalleri gösterilmektedir.



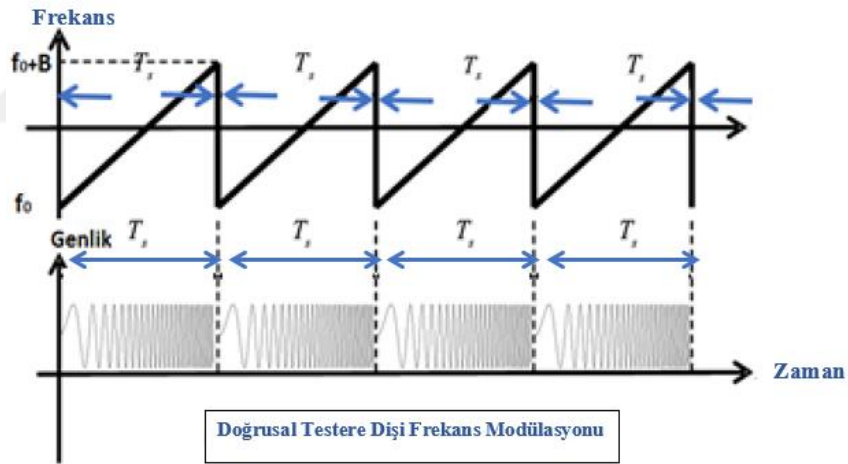
Şekil 2.3. Basamaklı DTA İçeren Radar Sinyali

2.1.1.3. Titreşimli DTA

Ardışık olarak DTA değişimi içeren titreşimli DTA sinyalinde bir önceki DTA değerinin belirli bir yakınlığında değer almaktadır. %5 ve %10 DTA değişimi içeren radar sinyallerinin ED sistemlerinden algılanması oldukça zorlaşmaktadır [3]. Fakat titreşimli DTA yapısı da sistem karmaşıklığını artırdığı için diğer DTA yapılarına göre az tercih edilmektedir [1]. Tez çalışmasında titreşimli DTA sinyallerinin ayrıştırılması kapsam dışında tutulmuştur.

2.1.2. FMSD Radar Sinyalleri

Sürekli dalga sinyalleri frekans modülasyonu ile kombine edilerek gönderilen sinyalin radara yansımalarıyla arada geçen zaman gecikmesi ölçülerek radar sistemine mesafe ölçümü yeteneği kazandırılır [4]. FMSD radarda frekans zamanla değiştiğinden frekans ekseninde salınım olmaktadır. Şekil 2.4.'te FMSD sinyali periyodik bir sinyal ile açıklanmaktadır.



Şekil 2.4.FMSD Sinyalinin Gösterimi

Doğrusal FMSD sinyal yapısında başlangıç bir frekans değerinden bant genişliği aralığında frekans değerleri değişkenlik göstermektedir. Şekil 2.4.'te f_0 başlangıç frekans değerini, B modülasyon bant genişliğini, T_s değeri ise salınım süresini göstermektedir. Frekans değişim yönü yukarı yönlü olacağı gibi, aşağı yönlü de olmaktadır. Denklem (1)'de zamana bağlı frekans değişim fonksiyonu tanımlanmaktadır. t Değeri anlık zaman değerini temsil ederken değişim eğimi α ile gösterilmektedir.

$$f(t) = f_0(t) + \alpha t, \quad \alpha = B/T_s \quad (1)$$

Doğrusal FMSD sinyallerinin yanı sıra Frekans Kayma Anahtarlama (Frequency Shift Keying, FSK) modülasyonu ile FMSD radar sinyalleri oluşturulmaktadır [4]. Tez çalışmasında sadece Doğrusal FMSD radar sinyalleri ile ilgilenilmektedir.

2.2. Radar İkaz Alıcı Mimarisi ve Sinyal Ayırıştırma Bloğu

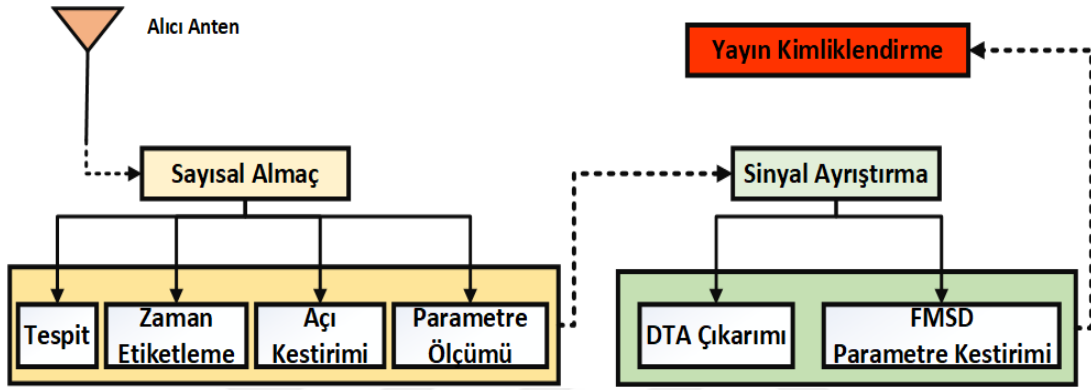
Elektronik harp destek sistemleri, diğer bir deyişle ED mimarileri, ortamdaki Radyo Frekansı (RF) sinyalleri alıcı anten sayesinde alıp örnekleyerek muharebe içerisindeki unsurlara ait bilgileri çözümlemektedir [5]. RF yayın kaynağının yapısına göre çeşitlenen ED sistemlerinde radar ve haberleşme yayın kaynaklarına göre sistem mimarisi değişkenlik göstermektedir.

Bir ED sistemi olan ve uçan platformlarda yer alan Radar İkaz Alıcı (RIA) mimarisinde pasif radar kabiliyetleri gerçekleştirilerek muharip uçak, nakliye uçakları, helikopterler ve insansız hava araçları (İHA) gibi platformların muharebe gücünü artırmaktadır[3]. RIA sistemlerinde sinyal ayırıştırma işlemi öncesi almaç alt mimarisinde RF/sayısal sinyal işleme blokları yer almaktadır. Sayısal sinyal işleme blokları içerisinde aşağıdaki adımlar gerçekleştirilerek sinyal ayırıştırma işlemlerinin girdisi oluşturulur:

- Frekans spektrum tarama ve sinyal tespiti,
- Tespit sinyalinin geliş açısı kestirimi,
- Tespit sinyalinin zaman etiketlenmesi,
- Tespit sinyalinin genlik ölçümü,
- Darbeli radar sinyali tespitinde darbe genişliği ölçümü yapılır.

Gerçekleştirilen bu adımlar sonucunda sinyal ayırıştırma blokları çalıştırılır. Sinyal ayırıştırma sırasında yapılan kümeleme ve analizler sonucunda kritik parametreler çıkarılarak sinyal ayırıştırma sonrası tehdit unsur kimliklendirme adımları için gerekli yayın bilgileri

hazırlanmakta olup tehdit girdi tablosu oluşturulur [6]. Yayın kimliklendirme aşamasında kendine özgü parametreleri belirlenen sinyallerin bilgileri veri tabanında bulunan bilgiler ile karşılaştırılır. Karşılaştırma sonucu veri tabanında mevcut bir yayıcı ile eşleşen sinyal tanımlanır. Mevcut bir yayıcı ile bilgileri örtüşmeyen sinyal yeni bir yayın kaynağı olarak kayıt edilir. Radar ikaz alıcısında gerçekleşen temel işlem blokları arasındaki geçişi anlatan akış şeması Şekil 2.5.'te gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Radar İkaz Alıcı Sinyal İşleme Mimarisi

Şekil 2.5.'te gösterilen akış şemasından sinyal ayrıştırma bloğuna gelen parametreler bir girdi tablosu halinde gelmektedir. Birden fazla radar sinyalinden oluşan darbe dizininden tüm sinyalleri doğru bir şekilde ayrıştırma işlemi bu temel parametreler ile sağlanmaktadır. Darbe radar sinyalleri için Darbe Tanımlayıcı Kelime (DTK, Pulse Descriptor Word (PDW)) olarak adlandırılan parametreler:

- Darbe Geliş Zamanı (Time of Arrival, TOA)
- Radyo Frekansı (Radio Frequency, RF)
- Darbe Genişliği (Pulse Width, PW)
- Darbe Geliş Açısı (Angle of Arrival, AOA)
- Darbe Genliği (Pulse Amplitude, PA)

Bu parametreler tek bir darbe dizini için tespit edilmektedir ve yayın kaynağını tanımlamak için çok önemli olan DTA bilgisi bu parametreler ile elde edilir.

DTK tablosunu oluşturan tespit parametreleri belirli bir analiz süresi boyutunda sinyal ayrıştırma bloğuna iletilmektedir [7]. Tablo 2.1.'de örnek bir DTK tablosu gösterilmektedir.

Tablo 2.1.Darbe Tanımlayıcı Kelime Tablosu

DTK	Geliş Zamanı (ns)	Radyo Frekansı (GHz)	Geliş Açısı (Derece)	Darbe Genişliği (us)	Sinyal Gücü (dBm)
1	100	9.1	37.8	1	-41.3
2	300	10.2	45.9	2	-51.6
3	20100	9.1	37.7	1	-41.2
4	34700	10.2	45.8	2	-51.5
...	...	...	...	...	...
N-1	157900	10.2	45.8	2	-51.5
N	178400	10.2	46	2	-51.6

DTK parametreleri aşağıda kısaca anlatılmaktadır:

- **Darbe Geliş Zamanı** (Time of Arrival, TOA) : Geliş zamanı, darbenin alıcıya ulaştığı zamandır. İki ardışık radar darbesinden elde edilen DTA parametresi darbe geliş zamanı ile doğrudan ilişkilidir.
- **Radyo Frekansı** (Radio Frequency ,RF) : Sinyalin frekansı, bir radarın tanımlanması için önemli bir parametredir. Radarlar farklı frekans aralıklarında bulunabilmektedir. ED sistemini ilgilendiren çoğu radar, 0,4 ile 18 GHz arasında çalışırken; 9 GHz ile 10 GHz arası RF bandında yoğunluk fazladır.[7]
- **Darbe Genişliği** (Pulse Width, PW) : Darbe genişliği, bir darbe zarfının yükselen genlik kenarı ile azalan genlik kenarı arasındaki süredir.
- **Darbe Geliş Açısı** (Angle of Arrival, AOA) : Bir radardan alınan darbelerin yönüne göre konum bilgisi veren parametredir. Radarın konumunu değiştirme hızı darbe geliş hızına göre

daha yavaş olacağından bir radar sisteminden gelen tüm darbeler aynı yönden alınacaktır [8].

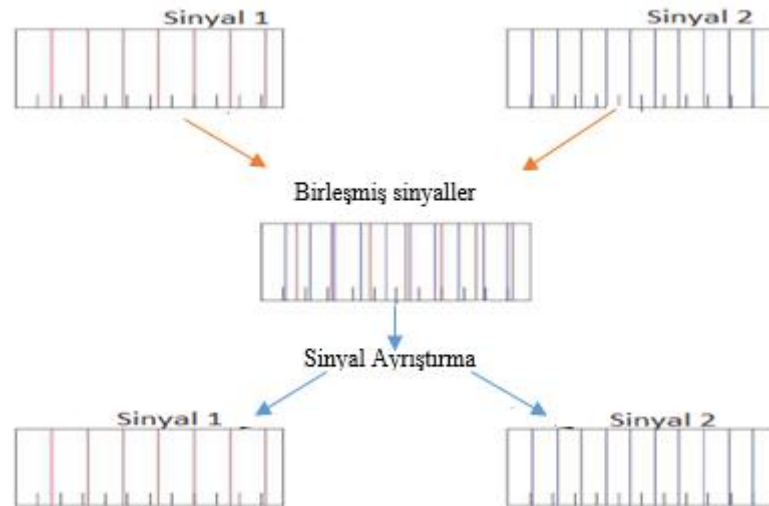
Bundan dolayı darbe geliş açısı sinyal ayrıştırma için oldukça önemli bir parametredir.

- **Darbe Genliği** (Pulse Amplitude,PA) : Darbe genliği, ölçülen darbenin zarflarından elde edilen ortalama genlik değeridir.

2.2.1. Üst Üste Darbe Gelme Durumu ve Çözüm Önerileri

Tablo 2.1.'de örnek bir DTK tablosu içerisinde iki adet radar yayına ait darbe tanımlamaları yer almaktadır. Muharebe ortamında yayın sayısı daha fazla olacağı için DTK tablosundaki çeşitlilik artacağından sinyal ayrıştırma işlemi zorlaşır. Sinyal ayrıştırma sırasında DTK tablosunu geliş zamanı ekseninde dizildiğinde PoP durumu gerçekleştiğinden kümeleme ve çözümleme çalışmalarının yüksek başarımla yapılması gerekmektedir [3].

Radar ikaz alıcısında darbe sinyalleri ayrıştırılırken zaman eksenindeki sinyal durumu çizdirilerek kümeleme öncesi problem tanımlanmaktadır. Şekil 2.6.'da darbelerin üst üste binme durumu görülmektedir. Üst üste binen darbeler Şekil 2.6.'da da gösterildiği üzere ancak bir kümeleme işlemi ile ayrıştırılarak DTA bilgileri çıkarılabilmektedir.



Şekil 2.6.Üst Üste Darbe Gelme Durumu (PoP)

2.2.2. FMSD Sinyalleri için Tanımlayıcı Kelime Üretimi

Tez çalışmasında darbeli radar sinyallerinin yanı sıra FMSD radar sinyallerin ayrıştırılması ile de ilgilenilmektedir. Sayısal almaç bloğunda tespit sonrası FMSD radar sinyallerine ait geliş zamanı, radyo frekansı ve geliş açısı parametreleri ile sinyal tanımlayıcı kelimeler üretilir.

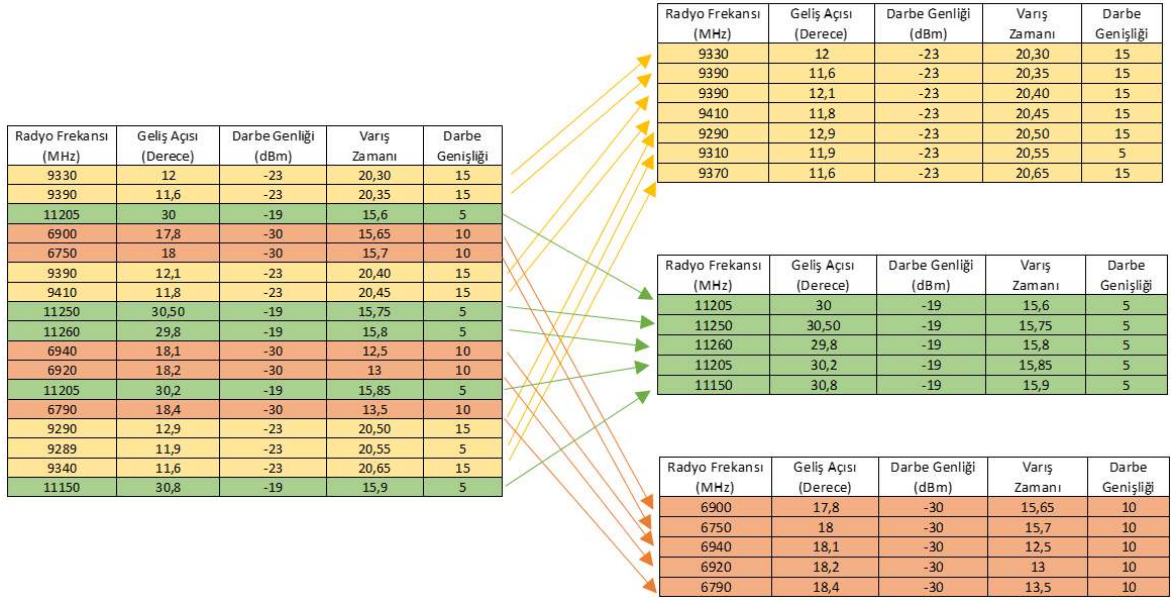
Sinyal tanımlayıcı kelime tablosu sinyal ayrıştırılmasında FMSD sinyallerinin kümelenmesinde ve parametre kestiriminde önemli bir girdi olmaktadır. FMSD sinyalleri için örnek bir sinyal tanımlayıcı kelime listesi Tablo 2.2.'de gösterilmektedir.

Tablo 2.2.Sinyal Kelime Tablosu

Sinyal Tanımlayıcı Kelime	Geliş Zamanı (ns)	Radyo Frekansı (GHz)	Geliş Açısı (Derece)
1	100	9.7	51.3
2	300	10.1	45.9
3	1100	9.15	51.35
4	2500	10.1	45.85
...	...	...	...
N-1	12300	10.12	45.8
N	21900	10.14	46

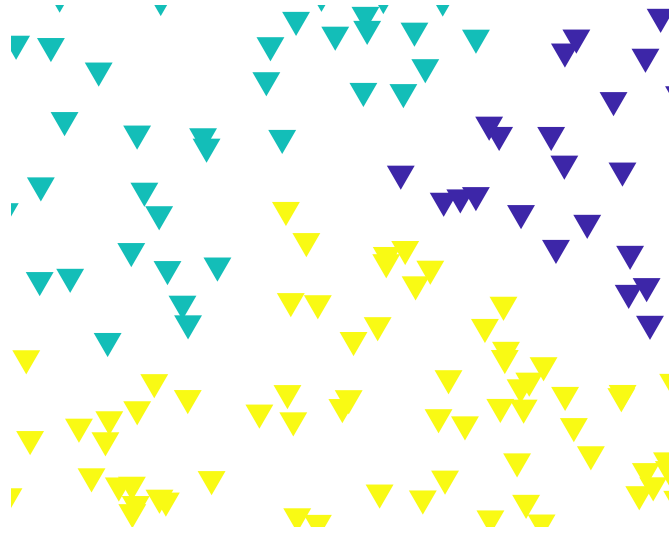
2.3. Kümeleme Yöntemleri

Sinyal ayrıştırma bloğuna gelen sinyaller gruplandıktan sonra periyodiklik analizine dayanarak DTA ve parametre bilgileri çıkarılmaktadır. Gruplama işlemi, başka bir deyişle kümeleme işlemi, parametre çıkarımından önce yapılması gereken kritik bir işlemdir. Kümelemede aynı örüntüye sahip sinyaller bir araya getirilmektedir. DTK listesindeki aynı özellikte sinyaller bir öbek içinde toplandıktan sonra her bir öbekte DTA ayrıştırması yapılmaktadır [8]. Şekil 2.7.'de DTK listesinden yapılan örnek bir kümeleme gösterilmektedir.



Şekil 2.7.DTK Listesinden Kümeleme İşlemi

Kümeleme işleminde öznitelik parametreleri üzerinden yakınlık/uzaklık belirlenerek bir küme çevresinde yakın sinyaller toplanır. Toplanan sinyallerin yakınlık açısından bir ortalama değeri ve standart sapması hesaplanarak henüz kümelenmeyen sinyallerin en yakın kümeye toplanması sağlanmaktadır. Örnek kümeleme sonucu Şekil 2.8.'de gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Üç Adet Küme İçeren Bir Gruplama İşlemi

Kümeleme yöntemleri kendi içinde çeşitlenerek iç içe girmiş verilerin başarılı bir şekilde öbeklenmesini hedeflemektedir. Uzaklık tabanlı kümeleme ve K-ortalama kümeleme gibi temel iki kümeleme yaklaşımı dışında en yakın komşuluk tabanlı kümeleme [9], gizli

Markov modeli (Hidden Markov Model, HMM) tabanlı kümeleme [10] ve makine öğrenmesi tabanlı kümeleme yöntemleri [11], [12] bulunmaktadır.

2.3.1. Uzaklık Tabanlı Kümeleme

Kümeleme işlemlerinde en temel yaklaşım olan parametre uzaklığına bağlı olarak kümelenebilen sinyal veya veri en yakın kümeye toplanarak kümenin ortalama değeri ve standart sapması güncellenmektedir. Uzaklık tabanlı kümeleme sıkça kullanılan iki uzaklık fonksiyonları maddeler halinde sırasıyla açıklanmaktadır:

- Öklid (Euclidean) Uzaklık: İki vektör arasındaki ya da değer arasındaki uzaklık parametre ağırlığına göre hesaplanarak bulunmaktadır [13].
- Minkowski Uzaklık: Öklid uzaklığının genel halidir. Çeşitli kuvvet farkı ile uzaklık bulunarak spesifik kuvvetler için uzaklık tanımları yapılmaktadır [14].

2.3.2. K-Ortalama Kümeleme

En sık kullanılan kümeleme algoritmalarından biri olan K-ortalama kümeleme yöntemi ile N adet veri K adet kümeye bölünmektedir. Bu yöntemde temel amaç küme içi maksimum benzerlik sağlayarak kümeler arasındaki benzerliğin minimize edilmesidir [15]. Yöntem karesel hatayı en küçük yapacak K adet kümeyi tespit etmektedir. Problem zor olmasına rağmen algoritma yinelemeli bir yaklaşımla gerçekleştirilmektedir. K-ortalama algoritması 4 temel aşama içermektedir:

- Küme (grup) merkezlerinin oluşturulması,
- Merkez dışındaki nesnelerin uzaklık değerlerine göre gruplanması,
- Yapılan her gruplama sonrası merkezlerin güncellenmesi,
- Kümeleme kararlı hale gelene kadar gruplama ve güncellemeler devam edilmektedir.

K-ortalama kümeleme algoritması ile gruplama yapılırken küme sayısı arttıkça hesaplama yükü de artmaktadır. Makine öğrenmesi tabanlı sınıflandırma ve anomali tespitinde K-ortalama tabanlı kümeleme kullanılmaktadır.

Sinyal ayrıştırma işlemleri kümeleme işleminden sonra her bir küme içerisinde detaylı analizler sonucu gerçekleştirilmektedir. Bu nedenden ötürü kümeleme işleminin başarımı sinyal ayrıştırma sonucunu doğrudan etkilemektedir.

2.4. Sinyal Ayrıştırma Yaklaşımları

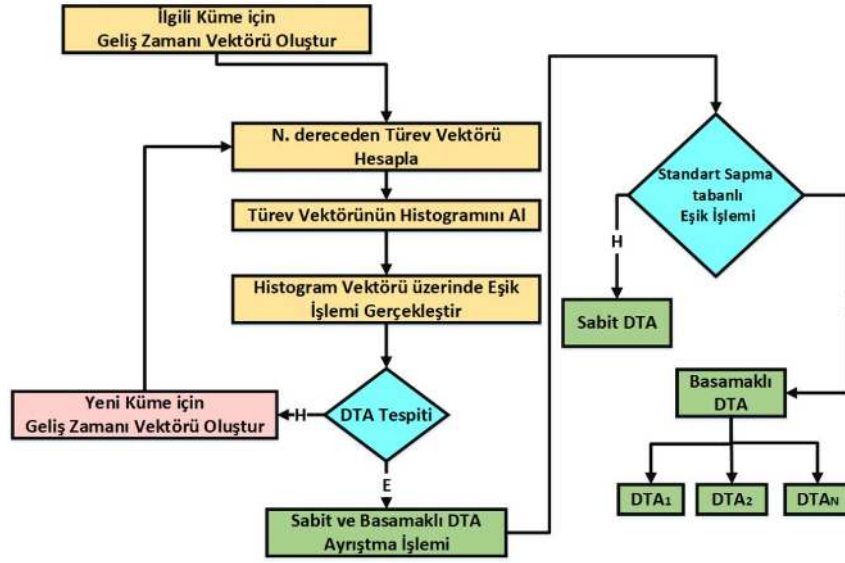
Radar ikaz alıcısında sinyal ayrıştırma işlemleri için analizler yapılırken DTA değeri, DTA tipi ve darbe üstündeki modülasyon (MoP) gibi parametreler çıkarılmaktadır [16]. Küme içerisinde benzerlik barındıran sinyal ve veriler periyodiklik analizine göre sonuçlar vermektedir. Veri analizinde sıkça kullanılan histogram yöntemleri DTA ayrıştırmasında da kullanılmaktadır.

Bu bölümde darbe radar sinyallerinin ayrıştırma işleminde sıkça kullanılan histogram tabanlı yöntemler ve DTA dönüşüm yöntemi anlatılmaktadır.

2.4.1. Ardışık Türev Histogram Yöntemi (SDIF)

Bu yöntem ile geliş zamanı vektörleri üzerinde ardışık türevler alınarak fark histogramlar çıkarılır. Sabit DTA durumunda tek bir histogram büyüklüğü beklenmektedir. Fakat staggered DTA durumlarını kontrol etmek için ikinci ve üçüncü türevlerde alınarak histogram eşikleme gerçekleştirilir. Eşik yukarısında kalan değer veya değerler DTA sonucu alınarak ayrıştırma tamamlanmış olmaktadır.

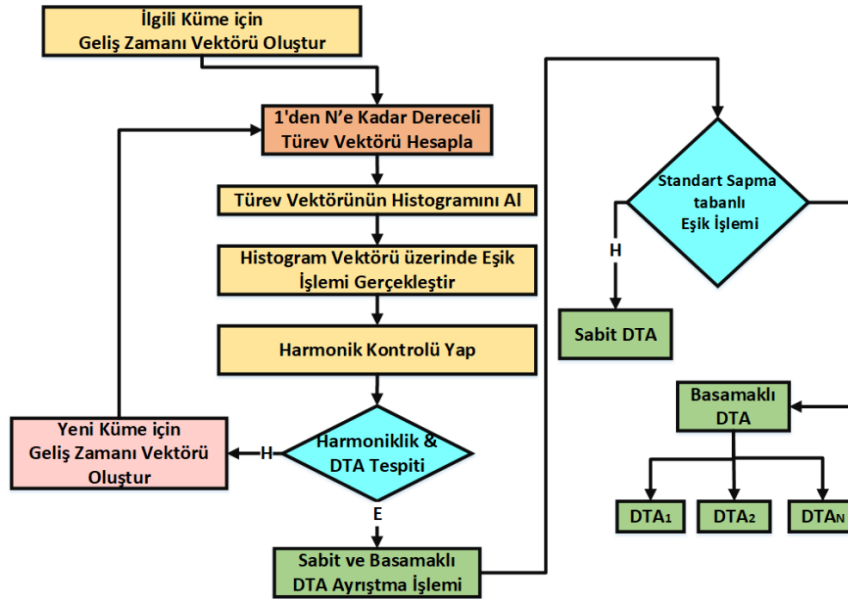
SDIF yöntemi sabit ve basamaklı DTA sinyallerinde yüksek başarımlı sunar. Fakat titreşimli DTA sinyali için başarımı düşüktür [17]. Şekil 2.9.'da SDIF yöntemi için bir algoritma blok şeması yer almaktadır.



Şekil 2.9. Ardışık Türev Histogram DTA Ayrıştırma Yöntemi

2.4.2. Kümülatif Türev Histogram Yöntemi (CDIF)

Bu yöntemde birinci ve ikinci dereceden türevler alınarak DTA değerinin harmonikleri incelenmektedir. Küme içerisinde sinyaller için kümülatif işlemler yapılarak DTA değerleri sabit ve aşamalı DTA durumları için belirlenmektedir [18]. Sabit DTA için yüksek başarımlı sunan CDIF yönteminde basamaklı DTA için başarımlı düşmektedir. Şekil 2.10.'da CDIF yöntemi için algoritma blok şeması gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Kümülatif Türev Histogram DTA Ayrıştırma Yöntemi

2.4.3. DTA Dönüşüm Yöntemi

Türev histogramı alındıktan sonra histogram spektrumunda zirve yapan noktalar belirlenir. Maksimum zirve noktasında yer alan DTA değeri için dinamik dizi araması yapılır. Yapılan bu arama ile DTA değerleri belirlenerek güvenilir bir sonuç üretmektedir [19]. Fakat basamak değeri fazla DTA radar sinyalinde dinamik aramadan dolayı hesaplama yükü artmaktadır. Titreşimli DTA yapılarında daha güvenilir sonuç verdiği için radar ikaz alıcısına önemli bir kabiliyet kazandırmaktadır.

Sinyal ayrıştırma çalışmalarına yönelik detaylı anlatımlar literatür incelemelerinde verilmektedir. Son yıllarda özellikle DTA ayrıştırma çözümleri makine öğrenmesi tabanlı yöntemler ile ele alınmaktadır [20]. FMSD sinyal ayrıştırma işlemlerinde ise zaman-frekans analizleri yapılmaktadır. Kısa Süreli Fourier Dönüşümü (KSFD, Short Time Fourier Transform (STFT)) ile zaman pencereleri akışında frekans değişimi gözlemlenebilmektedir [21]. Ayrıca Hough Dönüşümü gibi görüntü işleme yöntemleri ile geometri şekillerin anlamlandırılması yetisiyle eğim, yön ve akış bilgileri çıkartılabilmektedir [22]. Literatür incelemelerinde bu problemler için gerçekleştirilen çalışmalar detaylıca anlatılmaktadır.

3. LİTERATÜR İNCELEMELERİ

Bu bölümde öncelikle elektronik harp kavramına ve bileşenlerine yer verilmektedir. Ardından darbeli radar sinyalleri ve FMSD sinyalleri için sinyal ayırıştırma problemine yönelik yapılan çalışmalar incelenmektedir.

3.1. Elektronik Harp Kavramı ve Bileşenleri

Elektronik harp sistemleri kullanıldığı silah sistemleri için bir kuvvet çarpanı, uygulanan elektronik harp teknikleri ise modern muharebe senaryolarında harbin seyrini ve sonucunu doğrudan etkileyen kritik bileşenler olarak karşımıza çıkar [3]. Bu tekniklerin amaçları;

- Tehdit unsurları doğru tanımlamak,
- Uygun anda tehdit hedefine karşı savaş sistemlerini etkin kullanmak,
- Tehdit unsurların elektronik harp ataklarına karşı savunma göstermek,
- Gerekli bilgi ve istihbarat hamlelerini hareket merkezine iletmektir.

Elektronik harp 3 alt bileşenden oluşan bir bütündür. Bu bileşenler şekildedir:

- Elektronik Taarruz
- Elektronik Koruma
- Elektronik Destek

Elektronik destek (ED) sistemleri RF güdümlü savaş sistemlerini tespit ve teşhis etmeyi amaçlamaktadır. ED sistemleri RF yayın kaynaklarını analiz ederek ölçüm sistemleri aracılığıyla çeşitli parametreleri ölçerek önceden kaydı bulunan sensör verileri ile karşılaştırılarak yayın kaynağına ait kimlik belirleme işlemini gerçekleştirir. ED sistemleri elektronik harpin alıcı kısmında olsa da yine temel sistemi alıcı olan Sinyal İstihbaratı (SIGINT)'ndan farklıdır. Sinyal istihbaratı sistemleri savaş ve barış ortamında her türlü askeri bilgi, gözlem ve keşif çalışmaları yapmayı amaçlayan bileşenlerdir. Ölçüm ve

analizler sonucu veri tabanında kayıtlı olan tehdit unsurlar ile örtüştürme sağlanarak yayın kimliğinin güvenilir bir şekilde oluşması sağlanır. Fakat tanımlanmayan durumlarda da veri tabanına yeni yayın kimliği ve özellikleri işlenerek gözlem ve keşif çalışmalarının takibi yapılmaktadır. Sinyal İstihbaratı; haberleşme istihbaratı (COMINT) ve elektronik istihbaratından (ELINT) oluşmaktadır. COMINT düşman iletişim sinyalleri ile ilgilenerek, sinyal özelliklerinin belirlendiği bileşen iken ELINT doğrudan haberleşme sinyali olmayan sinyaller ile ilgilidir[7]. Sinyal istihbaratı sistemleri savaş ve barış ortamında her türlü askeri bilgi, gözlem ve keşif çalışmaları yapmayı amaçlayan görev kritik bileşenlerdir. Ölçüm ve analizler sonucu veri tabanında kayıtlı olan tehdit unsurlar ile örtüştürme sağlanarak yayın kimliğinin güvenilir bir şekilde oluşması sağlanır. Fakat tanımlanmayan durumlarda da veri tabanına yeni yayın kimliği ve özellikleri işlenerek gözlem ve keşif çalışmalarının takibi yapılmaktadır.

Elektronik destek sistemleri ise istihbarat sistemleri ile eş görevler gerçekleştirse de bu sistemlerden temel farkı sadece muharebe ortamında çalışmalarıdır. Gerçek zamanlı işlemler ile ölçümleri anlık olarak askeri unsur sistemlerine iletmektedir. Elektronik harp bileşenleri ile uyumlu hareket ettiğinden savaş sırasında taarruz ve savunma sistemlerinin görev şekillerini ve pozisyonlarını doğrudan etkilemektedir. Bir elektronik destek bileşeni olan radar ikaz alıcıları (RİA) kullanıldığı platforma erken uyarı kabiliyeti kazandıran sistemlerdir. RİA sistemlerinin gerçek zamanlı çalışması gerekmektedir.

RİA sistemleri havadan havaya veya yerden havaya atılan füzelerin algılanmasını ve hangi modda olduklarını (arama, kilit, fırlatma, vb.) pilot veya operatörlere bildirmektedir. RİA sisteminin birincil amacı bir uçağın hayatta kalması için pilota sinyal hakkındaki bilgileri zamanında sağlamaktır[7]. RİA sistemlerinde yer alan tehdit kütüphaneleri sayesinde algılanan sinyallerin yayın kaynakları tanımlanarak uyarı bilgisi sonucu verilmektedir. RİA sistemlerinde, sinyal ayrıştırma bloğuna girdi oluşturan ölçümlerin gerçekleştiği ve sayısal

sinyallerin oluşturulduğu alıcı mimarileri çeşitli konfigürasyonlarda yer almaktadır [24]. Bu mimarilerde kullanılan alıcı tipleri:

- **Kristal Video Alıcı:** Anten, dedektör ve yükselticiden oluşan klasik alıcı tipidir. Dedektör öncesi filtreleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Yüksek anlık bant genişliği sunarken hassasiyet, dinamik aralık, ölçüm sonuçları için düşük performans gösterirken sistem karmaşıklığı diğer alıcı mimarilerine göre düşüktür.
- **Anlık Frekans Ölçüm Alıcı:** Bu tip alıcılar anlık olarak ortamdaki sinyallerin frekansını ölçer. Anlık frekans ölçümü kısa darbelerde (mikro saniye ve daha küçük) sağlanır fakat ortamda güçleri birbirine yakın birden fazla sinyal olması durumunda sonuçlar güvenilir değildir[3].
- **Süperhet Alıcı:** Genellikle dar bantlı EH ve keşif sistemlerinde, geniş bant tarama işlevlerinde sıkça tercih edilen alıcı tipidir. Süperhet; kazanç, seçicilik ve duyarlılık özelliklerinin diğer alıcı tiplerine göre daha iyi olmasından dolayı pek çok sistemde yaygın olarak kullanılır[3]. Süperhet alıcı RF, mikser ve IF olarak 3 ana kısımdan oluşmaktadır. RF kısmı alıcının hassasiyetinin belirlenmesinde etkili olan kısımdır. Mikser kısmı; Lokal Osilatör (LO), frekans kontrolü, mikser bölümlerinden oluşmaktadır. Kazanç ve seçiciliğin önemli bir bölümü IF katında gerçekleştirilmektedir. Seçicilik, alıcıya ulaşan sinyallerden istenilen sinyalin kendisine yakın frekanslardaki sinyallerden ayrılabilme parametresidir. IF katının önemi frekans yoğunluğunun artmasıyla artmıştır.
- **Çok Kanallı Alıcı:** Modern alıcı mimarilerinde kullanılması birlikte istenilen geniş bant frekans aralığında çalışma imkânı ve yüksek dinamik aralığı sunulması ile bilinmektedir. Çok kanallı alıcı, tek bir sinyalin takibi gereken durumlarda kullanılan sabit ayarlı alıcı setinden oluşmaktadır. Sabit ayarlı alıcıların geçiş bantları

birbirlerine bitişik olarak ayarlanmıştır.

Bahsedilen bu temel alıcı tipleri elektronik harp sistemlerinde hibrit şekilde kullanılarak başarımlarının etkinliğinin artırıldığı sistemlerin oluşturulması hedeflenmektedir [24]. Ayrıca dijital gelişimle birlikte yeni nesil elektronik harp alıcı mimarilerinde yüksek bit çözünürlüklü ADC, ASIC, FPGA gibi paralel işlemeye uygun hesaplayıcılar ile yüksek kapasiteli hafıza birimleri yer almaktadır [25]. Dijital alıcıların sağladığı en büyük faydalardan biri de yüksek faz çözünürlüğü sayesinde darbe parametreleri kolayca ölçülebilmesidir. Dijital alıcıların yanı sıra elektronik taarruz ve savunma sistemlerine avantaj kazandıran Dijital Telsiz Frekans Bellek (Digital Radio Frequency Memory, DRFM) teknolojisi ile kaydedilen dalga biçimleri ve gerçekleştirilen ölçümler karıştırma ve aldatma elektronik harp teknikleri için modern elektronik harp sistemlerinde aktif kullanılmaktadır [26]. Sayısal tasarım teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte elektronik harp sistemlerinde önemli kazanımlar ve yıkıcı etkiler gözlemlenmektedir [27]. Aktarılan bu bilgiler doğrultusunda, tez çalışmasında RİA sistemleri ile ilgili yapılan sinyal ayrıştırma problemine yönelik çözüm sunan literatür çalışmalarına bu bölümde yer verilmektedir.

3.2. Darbeli Radar Sinyal Ayrıştırılması için Literatür İncelemeleri

Davies ve Hollands, ED için alt işlem bloklarını tanımlayarak önerdikleri otomatik işleme prosedürü ve karar verme tekniklerini içeren çalışmayı sunmuşlardır [28]. Yazarlar, alıcı antenden kimliklendirme ve sonuç gösterme aşamasına kadar baştan sona bir elektronik destek akışı tanımlamışlardır. Günümüzdeki temel ED ve RİA alıcı sistemlerinin temelini oluşturan fikirleri içeren çalışmada yazarların vurguladıkları en kritik işlem sinyal ayrıştırma için kullanabilecek otomatik tekniklerin uygulanmasıdır. DTA tespit ve sınıflandırma işlemi için sinyal ayrıştırma yöntemlerinden bahsetmektedir. İlgi çekici konulardan biri de o yıllarda işlemci mimarileri yapılabilecek gerçek zamanlı otomatik ED işlemleri için iyileştirmeler önerilmesidir. Bu çalışma literatürde sinyal ayrıştırma çalışmaları için temel

Çalışmalardan biridir. Yazarlar, literatürde sinyal ayrıştırma çalışmaları yapan araştırmacılara bilgi edinebilecekleri bir kaynak kazandırmışlardır.

Wilkinson ve diğerkleri, sinyal ayrıştırma öncesinde gerçekleşen kümeleme aşamasını incelemişlerdir [29]. Yazarlar, çalışmasında geliş açısı ve radyo frekansı metrikleri kullanarak DTA ayrıştırması öncesi sinyallerin öbeklenmesini önermişlerdir. Her bir sinyal öbeği yeni gelen sinyallerin metrik tabanlı ağırlık uzaklık durumuna göre güncellenmektedir. Öbekte yer alan sinyallere ait geliş zamanı vektörleri kullanılarak DTA bilgisi çıkarımı gerçekleştirilmiştir. DTA bilgisi çıkarımında güncelleme çalışması için darbe genişliği, darbe tekrarlama aralığı gibi metriklerini kullanarak DTA bilgi çıkarımının devamlılığı sağlanmıştır. Yazarlar, literatüre DTA bilgisi çıkarımı öncesi gerçekleşmesi fayda getiren kümeleme yaklaşımını kazandırmışlardır.

Geliş zamanı tabanlı darbe sinyalleri için DTA ayrıştırmasında Mardia, geçmiş çalışmalarına göre dönemi için yenilikçi ayrıştırma tekniklerini önermiştir [30]. Ardışık arama (sequential search) yöntemi ve ardışık türev histogram yöntemlerini incelemiştir. Yenilikçi yaklaşım olarak kümülatif türev histogram ve ağırlıklandırılmış ardışık arama yöntemleri iki aşama içeren bir akış önermiştir. Önerilen bu aşamalı yöntem ile yüksek doğruluk içeren bir sinyal ayrıştırma gerçekleştirdiğini iddia edilmiştir. Fakat çalışmanın performansı konusunda net olmayan durumlar gözlemlenmiştir. Güvenilir bir ayrıştırma için ağırlık değerlerinin optimum değerlere çekilmesi gerekmektedir.

Nishiguchi ve Kobayashi, titreşimli DTA sinyallerine karşın yüksek başarımlı gösteren DTA dönüşümü yöntemini incelemişlerdir [31]. Yazarlar, DTA dönüşümünün matematiksel formunu detaylıca anlattıktan sonra DTA ayrıştırma testleri gerçekleştirmişlerdir. SDIF ve CDIF yöntemlerinde alt harmonik incelemelerinin yeterince yapılmamasını tartışarak titreşimli DTA'lar için daha uyarlanabilir olan DTA dönüşümünde modifikasyonlar tanımlamışlardır. Testler sonucunda modifiye edilen DTA dönüşüm yöntemi darbe sayısı

örneği arttıkça %30 titreşimli DTA gibi zor bir problem %75-%100 arasında doğruluk ile ayrıştırmanın yapıldığı gözlemlenmektedir. Yazarların bu yaklaşımı literatürde jittered DTA ile ilgilenen araştırmacılar için önemli bir motivasyon ve ilhâm kaynağı olmuştur.

Ata'a ve Abdullah, DTA ayrıştırmada kümeleme yaklaşımı için Bulanık Uyarlamalı Rezonans Teori (Fuzzy Adaptive Resonance Theory) önermişlerdir [32]. Önermeleri sonucu ayrıştırma ve DTA kimliklendirme işlemlerini geliştirmiş oldukları model ile yapmışlardır. Testler sonucu sabit DTA yüksek başarımlı sağlanırken basamaklı DTA yapılarında aynı ölçüde başarımlı gerçekleşmemiştir. Modelin yakınsama zamanı az olduğu gerçek zamanlı uygulamalara uyarlanabilir bir kümeleme yaklaşımı gerçekleştirilmiştir. Yazarlar histogram ve periodogram yöntemlerinin kombinasyonu ile gelecek çalışmalarına motivasyon oluşturmuşlardır. Çalışmayı değerlendirdiğimizde test sonuçlarının belirtildiği gibi başarılı olmadığı ve kaynak sayısı arttıkça başarımlının düştüğü görülmektedir. Ayrıca ezberlenebilecek bir model verisi ile çalışıldığı için çeşitli veri setleri üzerinden testler yenilenmeli ve tartışılmalıdır.

Gençol ve diğerleri, çalışmalarında darbe radar sinyallerinin ayrıştırılması için darbe genlik takip algoritmasını önermişlerdir [33]. Kümeleme görevi için Fuzzy ART sinir ağı modelini inşa etmişlerdir. Gerçekleştirilen benzetim testleri ile hesaplama süresi, kümeleme kalitesi ölçülmüştür. %80 değerinin üzerinde kalite faktörü ile kümeleme yapılmıştır. Çalışmanın sunduğu önemli çıktılardan biri otomatik kümeleme için bir sinir ağı modelinin uygulanmasıdır. Fakat modelin hesaplama süresinin iyileştirilmesi, modelin çeşitli veriler ile test edilmesi ve sonuçların karşılaştırılmalı tartışılması gereğinin olduğu değerlendirilmektedir.

Liu ve Yu, sinyal ayrıştırma problemi için Devirli Sinirsel Ağı (Recurrent Neural Network, RNN) tabanlı bir model çözümü önermişlerdir [34]. Yazarlar problemin aynı zamanda bir zaman serisi problemi olduğu belirterek RNN tabanlı yapay zekâ sınıflandırıcısını

çalışmışlardır. Çalışmada sabit ve basamaklı DTA veri setleri için testler gerçekleştirilmiş olup parametre çıkarımları yapılmıştır. Yazarların modelin başarımını geleneksel yöntemler ile karşılaştırmamışlardır. Fakat derin öğrenme çalışmalarının sinyal ayrıştırma problemine uyarlanması açısından ilgi çekici bir çalışma olmuştur. Modelin başarımı için test sayısının az tutulduğu gözlemlenmiş olup sonuç çıkarım ve eğitim süreleri hakkında yeterince bilgi verilmemiştir.

Iglesias ve diğerleri, çalışmalarında DTK listesinden radar parametre çıkarım için gerçek zamanlı çalışan bir tasarım gerçekleştirmişlerdir [35]. Yazarlar, FPGA ile çeşitli darbe genişliği, sinyal gücü tahmini, frekans tahmini ve geliş zamanı değerlerini küçük RMS (Root Mean Square) hataları ile hesaplamışlardır. FPGA gerçekleşmesi bellek arayüzü, zaman işleme, frekans işleme ve kontrol gibi temel donanım kriterleri açısından değerlendirilmiştir. Kullanılan Xilinx Virtex-5 XC5VLX110T kartı ile %74 oranında bir DSP kullanımı yapılmış olup işlemlerin gerçek zamanlı yapıldığı ifade edilmiştir. Çalışma sinyal ayrıştırma öncesi DTK listesinin gerçek zamanlı üretimin gösterilmesi açısından faydalı olmuştur.

3.3. FMSD Radar Sinyal Parametre Çıkarım için Literatür İncelemeleri

Darbeli radar sinyalleri için gerçekleştirilen literatür incelemelerinin yanı sıra FMSD radar sinyalleri için yapılan parametre çıkarımı çalışmaları bu alt başlık altında incelenmektedir. Barbarossa, Wigner Wille Dönüşümü ve Hough Dönüşümü yöntemlerini kullanarak parametre tahmini yaptığı çalışmasında doğrusal frekans modülasyonu sinyaline ait tarama eğimini bulmaktadır [36]. Yazar, çeşitli sinyal gürültü oranlarında sinyal üzerinden parametre tahminin doğruluk değerlerini karşılaştırmıştır. Çalışmada sinyal gürültü oranı ile kestirim başarımı üzerinde matematiksel kapalı bir form şeklinde denklem kurulmaktadır. Çalışmada teorik bir işleyiş yer almakta olup araştırmacılara ilgili dönüşümlerin sunduğu matematiksel denklemler gösterilmiştir. Herhangi bir hesaplama başarımı veya pratik test çalışmaları gerçekleştirilmemiştir.

De Luigi ve Jauffret, çalışmalarında FM sinyaller için parametre tahmini ve sınıflandırma işlemlerini yapmışlardır [37]. Yazarlar, FM radar sinyallerinden IF frekans değerini tahmin etmek için istatistiksel bir model önererek literatüre katkıda bulunmuşlardır. Cramer-Rao Düşük Sınır (CRLB) ile düşük sinyal gürültü oranlarında doğru sınıflandırma başarımı gözlemlenmiştir. Maksimum Likelihood Tahmin (MLE) ile sınıflandırma ve parametre tahmin modeli klasik yöntemler ile karşılaştırılmıştır. Yazarlar çalışmasında FM radar yayın kaynaklarından alıcıya ulaşan sinyaller üzerinde yapılabilecek tahmin ve sınıflandırma işlemleri için istatistiksel model önerilerini sınır testleri ile teorik doğrultuda test ederek sonuçları paylaşmışlardır. Teorik bir çalışma olduğu için çeşitli pratik testler ile pekiştirilmesi çalışmanın kalitesini artıracak değerlendirilmektedir.

Erdoğan ve diğerleri, FMSD radar sinyalleri için Wigner-Wille Dönüşümü ile Hough Dönüşümü'nü birlikte ele alıp sinyal parametre tahminlerini çalışmalarında gerçekleştirmişlerdir [38]. Yazarlar, chirp oranı, bant genişliği ve merkez frekansı değerlerini içeren test senaryoları ile çeşitli başarımların testleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada sadece parametre tahmini değil sinyal tespiti için algoritma modeli sunulmuştur. Tespit başarımı için tespit olasılığı parametresi ile karşılaştırma gerçekleştirilerek algoritma modelin doğruluğu ve çeşitli senaryolar için güvenilirlik sonuçları çıkarılmıştır. Çalışmada belirtilen dönüşümler ışığında zaman-frekans analizleri gerçekleştirilerek özellikle tespiti zor olan LPI radar sinyallerinin bulunması için başarılı bir tespit yaklaşımı literatüre kazandırılmıştır. Çalışma özellikle sinyal tespiti konusunda önemli bir algoritma modelini literatüre kazandırmıştır. Parametre tahmini için yapılan zaman-frekans analizleri sinyal ayırıştırma ve parametre çıkarım çalışmaları ile ilgilenen araştırmacılara fikir vermektedir.

Guo ve diğerleri, çalışmalarında günümüz akademik çalışmalarında revaçta olan derin öğrenme modellerini LPI radar sinyal parametrelerinin çıkarımı için uyarlamışlardır [39]. Yazarlar, zaman-frekans dönüşümü sonrası 2B imge matrisi üzerinde derin öğrenme

eğitimleri gerçekleştirilerek LPI radar sinyali içindeki dalga şeklinin otomatik olarak tanımlanmasını amaçlamışlardır. Derin öğrenme modeli olarak Inception-v3 [40] ve ResNet [41] modelleri öz nitelik çıkarma ile Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machines, SVM) tabanlı sınıflandırma işlemlerini gerçekleştirilmiştir. Doğrusal FM içeren faz kodları içeren LPI radar sinyalleri yüksek başarımla bulunmuştur. Çalışmada hesaplama karmaşıklığı ve algoritma çalışma süreleri ayrıntılı olarak çıkarılmıştır. Doğrusal FM içeren faz kodları içeren LPI radar sinyalleri yüksek başarımla bulunmuştur. Çalışmada hesaplama karmaşıklığı ve algoritma çalışma süreleri ayrıntılı olarak çıkarılmıştır. Doğrusal FM dışında 7 adet farklı LPI dalga şekli için sınıflandırma gerçekleştirilerek değişik tipteki LPI sinyallerinin tespiti otomatik hale getirilmiştir. Çalışma yapay sinir ağlarının LFM tespiti ve parametre çıkarımında kullanılması popüler gelişmelerin bu alanda uygulanmasının bir örneği olmuştur.

Guner ve diğerleri, doğrusal FMSD radar sinyallerinin elektronik destek alıcıları tarafından tespiti ve parametre çıkarımı konusunda çalışma gerçekleştirmişlerdir [42]. Yazarlar, tespit ve parametre çıkarım işlemlerinin gerçek zamanlı bir uygulaması için Xilinx Virtex-7 FPGA birimi üzerinde hesaplama başarımlarını testleri yapmışlardır. Çalışmada modifiye Wigner-Wille Dönüşümü uygulanarak ve Hough Dönüşümü ile birleştirilerek hesaplama modeli önerilmiştir. Doğrusal FMSD radar sinyalinin geometrisi ayrıntılı olarak incelendiği çalışmada çeşitli sinyal gürültü oranı seviyelerinde MATLAB tabanlı benzetimler gerçekleştirilmiştir. FPGA birimi üzerinde detaylı hesaplama analizlerinin yapıldığı bu çalışmada merkez frekansı, bant genişliği ve salınım süresi parametre tahmini için görece hata oranları hesaplanmıştır. Zaman-frekans analizi sırasında frekans çözünürlüğü iyileştirildikçe hata oranının azaldığı görülmektedir. Çalışmada doğrusal FMSD radar sinyalinin gerçek zamanlı olarak bir hesaplama biriminde tespiti ve parametre tahmininin yapılması bu alandaki pratik çalışmalara önemli bir motivasyon kazandırmıştır. Yapılan

hesaplamalara ait kaynak kullanımının analizi ve MATLAB tabanlı benzetimlerle sonuçların desteklenmesi çalışmanın kalitesini artırmıştır.

3.4. Radar Sinyallerinin Kümelenmesi için Literatür İncelemeleri

Literatür incelemelerinde genel olarak darbeli radar sinyallerinin ayrıştırılması ve FMSD radar sinyallerinin parametre çıkarımı konusunda çalışmalara rastlanılmıştır. Aynı zamanda bir örüntü tanıma problemi olan radar sinyal gruplama ve tanımlama işlemi için literatürde radar sinyalleri için kümeleme çalışmaları incelenmiştir. Dudczyk, çalışmasında radar sinyal kaynaklarının hiyerarşik kümeleme yaklaşımı ile kimliklendirilmesini geniş veri setleri üzerinden incelemiştir [43]. Dendrogram ile radar sinyal örüntüleri ayrıştırılarak darbeli radar sinyalleri ayrıştırılmaktadır. Yazar, öznitelik olarak DTA bilgisini de kullandığı için radar sinyallerinde PoP durumunun oluşmadığını varsaymıştır. Çalışma değerlendirildiğinde hiyerarşik kümeleme ile yapılan sinyal ayrıştırma çalışmasında hesaplama karmaşıklığı dikkate alınmamıştır. Özellikle ortamdaki sinyal sayısı artıkça dendrogram ağacının derinliği arttığında kümeleme işleminin hesaplama maliyeti artmaktadır. Fakat radar sinyallerin otomatik kümelenmesi açısından bilgi verici bir çalışma olmuştur.

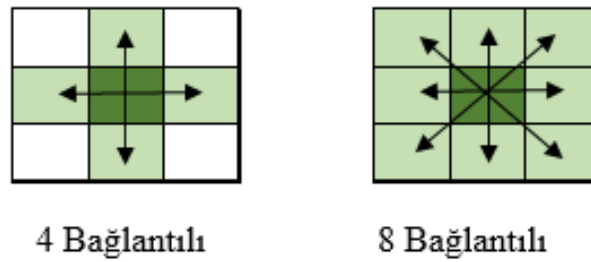
Kang ve diğerleri, çok fonksiyonlu radarlar için darbe sinyal yapısının tanınması ve çıkarımı konusunda literatüre çalışma sunmuşlardır [44]. Yazarlar çalışmasında uzun kısa dönem bellek (Long Short-term memory, LSTM) model tabanlı hiyerarşik bir yöntem ile darbe serisi tanımlamayı yapmışlardır. Çalışma girdisi olarak geliş zamanı farkları alınarak bir durum makinesi (state machine) yapısı oluşturulmuştur. Hesaplama karmaşıklığının analizi gerçekleştirilerek algoritmanın hesaplama başarımı için değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Benzetimler sonucunda çalışmanın başarımı yüksek bir tanıma ve darbe sinyal takibi yapıldığı belirtilmiştir. Ancak çeşitli veri setleri üzerinden testlerin gerçekleştirilmesi gerektiği, bunun çalışmanın kalitesini ve güvenilirliğini artıracak değerlendirilmektedir.

4. ÖNERİLEN RADAR SİNYAL AYRIŞTIRMA YÖNTEMLERİ

Tez çalışmasında, alıcıya gelen darbe dizinlerinden tek bir yayın kaynağına ait olan darbe dizinini bulmak, oluşabilecek darbe üstüne darbe problemine çözüm sunmak için verimli ve etkin bir sinyal ayrıştırma yöntemi önerilmektedir. Önerilen Bağlantı Bileşen Etiketleme (BBE) tabanlı kümeleme ile DTA ayrıştırması ve FMSD parametre çıkarımı uygulaması yüksek başarımlı sağlamıştır. Bu bölümde önerilen kümeleme yöntemi, DTA ayrıştırma ve FMSD parametre çıkarımına dair çalışmalar anlatılmaktadır.

4.1. Bağlantılı Bileşen Kümeleme tabanlı Kümeleme

BBE yöntemi, bilgisayarlı görü ve görüntü işleme alanında bağlantılı bölgeleri tespit etmek, bölge çıkarımı ve keşfi konusundaki problemleri için çözüm önermektedir [51]. Yöntem, piksel bağlantısı temelinde komşu pikselleri aynı etiket ile işaretlenmesini sağlayarak ikili (binary) imge üzerinde bölgesel gruplama ve etiketleme yapmaktadır. İkili imge üzerinde komşu pikseller 4'lü ya da 8'li komşuluklara göre belirlenirken, 3 boyutlu imgede 6, 18, 26 bağlantılı komşuluklara göre atanır. 8 bağlantılı komşuluk durumunda çapraz pikseller de bağlantılı komşuluk içinde yer alır. Şekil 4.1.'de 4'lü ve 8'li bağlantılı durumlardaki komşuluk kapsamı gösterilmektedir.



Şekil 4.1. 4 ve 8-Bağlantılı Komşuluk Durumları

Şekil 4.2.'de ikili bir imge örneği verilmektedir. Bu ikili imge üzerinde bağlantılı komşuluk durumları incelenmektedir.

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0
0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0
0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0
0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0
0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0
0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0
0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0
0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0
0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0
0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0
0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0
0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Şekil 4.2. İkili İmge Örneği

Bu örnek imge üzerinde BBE, 8 bağlantılı piksel komşuluğu ile yapıldığında ortaya çıkan sonuç Şekil 4.3.'de gösterilmektedir. 8-bağlantılı piksel komşuluğu ile yapılan etiketleme, ikili imge üzerinde 4-bağlantılı piksel komşuluğu ile de gerçekleştiğinde Şekil 4.4.'te verilen sonuç elde edilmektedir.

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	1	1	0	0	5	0	5	0	0	1	0
0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	5	5	0	0	1	0
0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0
0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0
0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0
0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0
0	0	0	4	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0
0	2	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0
0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0
0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	6	0
0	3	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	6	0
0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Şekil 4.3. 8-Bağlantılı Komşuluk ile Bağlantılı Bileşen Etiketleme Yöntemi

Şekil 4.3. ve Şekil 4.4.'te görüldüğü üzere 4-bağlantılı komşuluk durumunda 8-bağlantılı komşuluk durumuna göre daha fazla etiketleme gerçekleştirilmiştir. İkili imge üzerinde gerçekleştirilen BBE işlevi N-boyutlu imge üzerinde de gerçekleştirilebilmektedir.

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	5	0	7	7	0	0	12	0	13	0	0	16	0	0
0	0	0	0	7	7	7	0	0	0	13	13	0	0	16	0	0
0	1	0	0	0	7	0	9	9	0	0	0	0	16	16	0	0
0	1	1	1	1	0	9	9	0	0	0	0	0	16	16	0	0
0	1	0	1	0	0	0	0	10	10	0	14	14	0	16	0	0
0	1	0	0	0	8	8	8	0	10	0	0	14	0	16	0	0
0	0	0	6	0	0	8	0	0	10	10	0	0	17	0	0	0
0	2	0	0	0	0	0	10	10	10	0	0	0	17	0	0	0
0	0	0	0	3	3	0	0	10	10	10	10	0	17	0	0	0
0	3	3	3	3	3	3	3	0	10	0	0	10	0	0	0	0
0	3	3	3	0	0	3	3	0	10	10	10	10	0	0	0	0
0	0	0	3	0	0	3	3	0	10	0	10	0	0	18	0	0
0	4	0	0	0	0	3	0	11	0	10	10	0	0	18	0	0
0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	10	0	15	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Şekil 4.4. 4-Bağlantılı Komşuluk ile Bağlantılı Bileşen Etiketleme Yöntemi

BBE yöntemi için ikili imge üzerinde yapılan işlem basamaklarının yer aldığı algoritma akışı Algoritma 1’de gösterilmektedir. Tez çalışmasında BBE yönteminin sunduğu etiketleme ve kümeleme yaklaşımının radar sinyallerinin ayrıştırılmasında kullanılarak otomatik kümeleme yapılması amaçlanmıştır. BBE yöntemini uygulamak için gerekli imge matrisi oluşturulurken eksenler için radar sinyali tanımlayan parametreler kullanılmaktadır.

Algoritma: Bağlantılı Bileşen Etiketleme

```

M, N : İmge Boyutları.....
IMxN : İmge Matrisi.....
CMxN : Bağlantı Matrisi.....
L : Etiket Sayısı.....
for i=1:M.....
    for j=1:N.....
        if (I(i,j) == 1) .....
            Komşuluk Kontrolü Gerçekleştir;
            Etiketleme Yap; .....
            if (Etiket == Yeni_Etiket).....
                L++;.....
            end.....
            C(i,j) = L; .....
        end.....
    end.....
end.....

```

Algoritma 1 : Bağlantılı Bileşen Etiketleme Yöntemi İşlem Akışı

Metrik tabanlı öznitelikler imge matrisinde her bir geliş zamanına karşılık gelen piksel değeri 1 ile işaretlenir. Böylece ikili imge oluşturulmaktadır. Darbe sinyalleri için 3B imge oluşturulurken, FMSD sinyaller için 2B imge matrisi oluşturularak bağlantılı bileşen etiketleme gerçekleştirilmektedir. Etiketleme sonucu kümeleme işlemi gerçekleştirilip ardından her bir küme için DTA ve parametre çıkarımı yapılmaktadır.

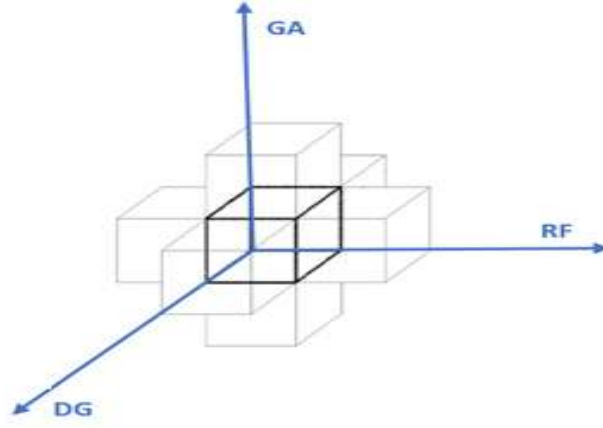
4.1.1. Darbe Radar Sinyalleri için 3B Kümeleme

Darbeleri radar sinyallerinde DTK girdi tablosunda yer alan parametreler öznitelik adayı olarak değerlendirilmektedir. Bu parametreler içerisinde seçilen parametreler ile 3B imge matrisi oluşturulmaktadır. Seçilen parametreler aşağıda maddeler halinde verilmektedir:

- Geliş Açısı (GA),
- Radyo Frekans (RF),
- Darbe Genişliği (DG) değerlerine karşılık gelen piksel 1 ile işaretlenir.

DTK listesinde her bir geliş zamanında bu değerlere karşılık gelen pikseller 1 ile işaretlenerek 3 boyutlu görüntü oluşturulur.

DTK listesi her bir analiz süresi kadar periyodik olarak oluşturulmakta ve 3B imge matrisi her bir analiz penceresinde üretilmektedir. Üretilen 3B imge matrisinde eksen parametrelerinin çözünürlüğü doğrultusunda darbe atlanmadan kümeleme işlemi sağlanmaktadır. Bu sayede kümeleme işlemindeki güvenilirlik artırılmaktadır. Şekil 4.5.'teki Geliş Açısı (GA), Radyo Frekansı (RF) ve Darbe Genişliği (DG) parametre eksenleri ile oluşturulan 3B uzayda komşuluk ilişkisi gösterilmektedir.



Şekil 4.5. RF-GA-DG Eksenli 3B Uzayda Komşuluk Gösterimi.

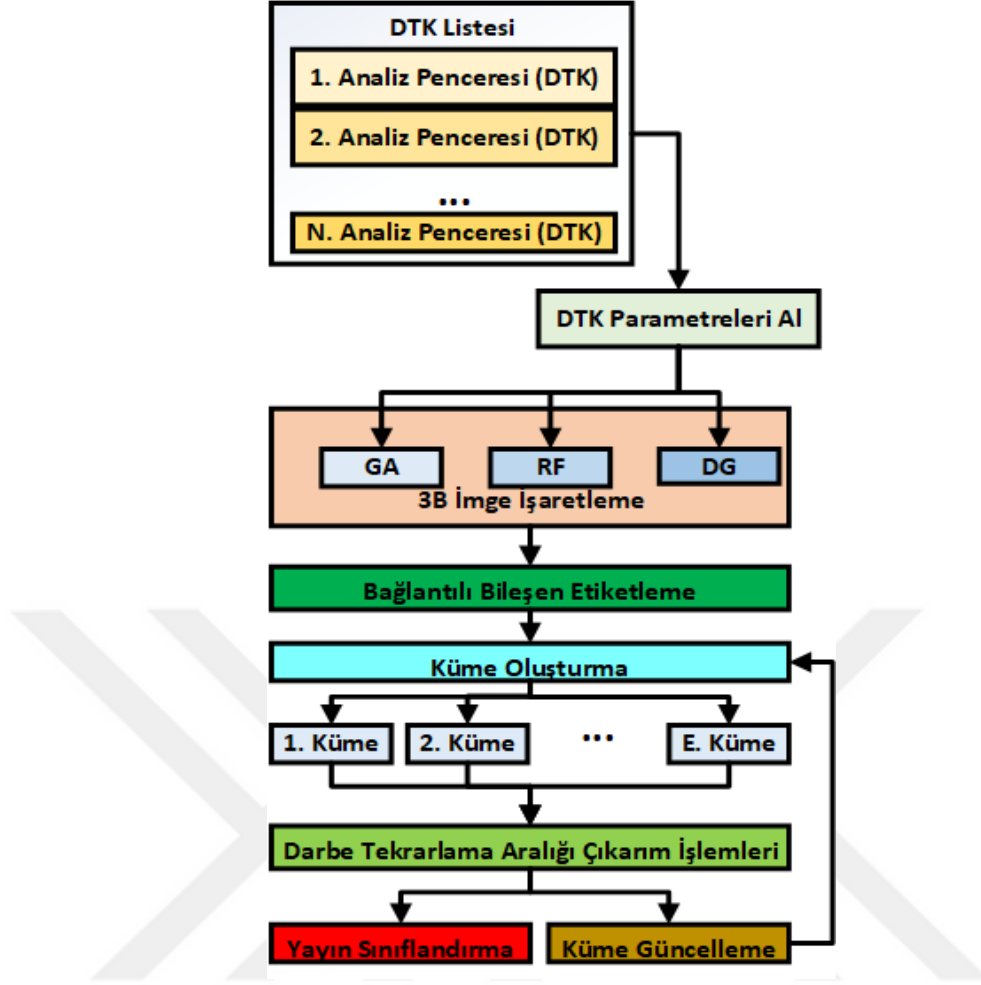
Algoritma 2’de ise 3B BBE tabanlı kümeleme işlem adımları açıklanmaktadır.

Adım-1	Geliş Zamanı’na göre her bir darbenin radyo frekansı, geliş açısı ve darbe genişliği değerlerine karşılık gelen koordinat işaretlenir.
Adım-2	İşaretlenen hücre 1 değeri ile imge matrisine işlenir. İşaretlenmeyen değerler 0 olarak bırakılır.
Adım-3	İmge matrisi üzerinde tarama gerçekleştirilir. <i>Tarama yapılırken ilk bulunan değeri ilk etiket olarak belirlenir.</i>
Adım-4	Komşuluk kararına göre ilgili darbenin ilk etiketle aynı olduğu ya da yeni bir etiket olduğu belirlenir.
Adım-5	İmge taramasından sonra darbe satırlarının hepsi etiketlenmiş olur.
Adım-6	Etiketler daha sonrasında birer radar seti kümesi olarak işlenip öbek haline getirilir.
Adım-7	Öbekleşen her bir kümeye ait ortalama frekans değeri, ortalama GA değeri ve frekans standart sapması hesaplanır.

Algoritma 2: 3B BBE tabanlı Kümeleme ile Algoritma Alt Adımları

Darbeli radar sinyallerinde darbe genişliği de bir sinyalin tanımlanmasında önemli bir parametre olduğu için 3B imge matrisinde bir eksen olarak kullanılmıştır.

Her bir analiz sonucunda elde edilen küme grupları arasında devamlılığı sağlamak için analiz pencereleri arasında güncelleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Şekil 4.6.’da kümeleme işlemi içeren DTA çıkarım işlem akışı gösterilmektedir.



Şekil 4.6. 3B Kümeleme tabanlı DTK Darbe Analiz Akışı

Şekil 4.6.'da küme güncelleme işlemleri, bir küme içindeki parametrelerin ortalama değerleri ve çıkarılan DTA değeri açısından uzaklık/yakınlık ilişkisine göre yapılmaktadır. Güncelleme işleminde kümeler arasında öklit uzaklığı alınarak minimum yakın küme bulunması sonucu güncelleme sağlanır. Eşitlik (2)'de pencereler arası güncelleme işleminde kullanılan öklit uzaklığının hesaplaması için kullanılan denklem belirtilmektedir.

K_1, K_2 ve K_3 katsayıları sırasıyla geliş açısı, frekans, darbe genliği parametrelerinin ağırlık katsayılarıdır. Bu değerler ampirik olarak denemeler ile belirlenmiştir. $Uzaklık_{DTA_{Küme}}$ hesabı ardışık analiz pencereleri (n) ile $(n-1)$ arasındaki küme değerleri kullanılarak yapılmaktadır.

$$Uzaklık_{DTA_{Küme}} = \sqrt{K_1(GA_n - GA_{n-1})^2 + K_2(RF_n - RF_{n-1})^2 + K_3(DG_n - DG_{n-1})^2} \quad (2)$$

4.1.2. FMSD Radar Sinyalleri için 2B Kümeleme

FMSD radar sinyalleri için sinyal ayrıştırma bloğuna girdi olarak gelen sinyal kelime listesindeki her bir sinyal satırı içerisinde geliş zamanı, radyo frekansı ve geliş açısı parametreleri yer almaktadır. Kümeleme, bu parametrelerden 2'si seçilerek sağlanmaktadır. FMSD radar sinyalleri için en kritik ayırıcı özellik radyo frekansı parametresinde olabilmektedir. Fakat muharebe ortamında çok sayıda yayın kaynağı olması nedeniyle tek bir parametre tabanlı kümeleme ile güvenilir bir sonuç alınması beklenmemektedir. Bu nedenle geliş açısı parametresi de kullanılarak 2B bir kümeleme yaklaşımı bu tez çalışmasında benimsenmiştir.

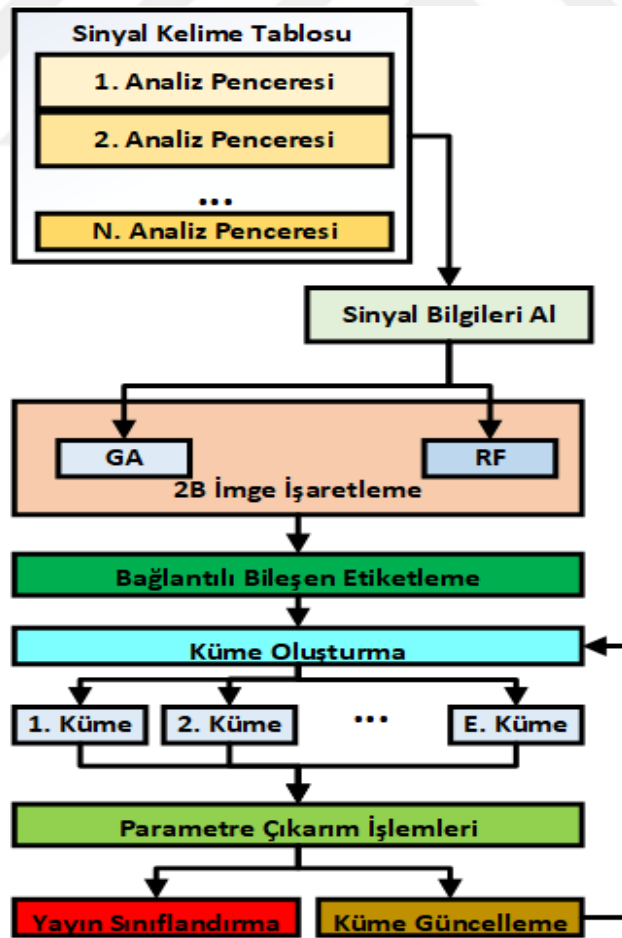
Bağlantılı Bileşen Etiketleme tabanlı kümeleme 2B uzay ekseninde yapılarak etkin bir FMSD radar sinyal kümelemesi gerçekleştirilmektedir. Radar sinyallerinin kümelenmesinden sonra parametre çıkarımının yüksek doğrulukta yapılması için kümeleme başarımı kritik önem arz etmektedir. Kümeleme için kullanılan 2B imge matrisinin eksenleri geliş açısı ve radyo frekansı parametrelerinden oluşmaktadır. Algoritma 3'te FMSD radar sinyalleri için geliştirilen 2B BBE tabanlı kümeleme algoritmasına ait alt adımlar sunulmaktadır.

Algoritma Adımları	Adım Açıklaması
Adım-1	Sinyal Kelime Tablosu 'nu belirlenen geliş zamanı değer aralığı için al.
Adım-2	Tablodaki geliş zamanı değerine karşılık gelen, radyo frekansı ve geliş açısı değerine göre 2B matrisi işaretledikten sonra işaretlenen hücreyi matrisin komşu hücreleri ile ilişkilendir.
Adım-3	2B imge üzerinde Bağlantılı Bileşen Etiketleme işlemini yap.
Adım-4	Bulunan her etiketi öbek olarak belirle ve kümeleme işlemini gerçekleştir.
Adım-5	Kümeleme sonrası ayrıştırma için zaman-frekans analizi vektörleri üret.
Adım-6	Parametre çıkarımından sonra yeni kümeleme işlemi için Adım-1'e dön.
Adım-7	Tablo satırları işlendiyse analiz tamamlanmaktadır.

Algoritma 3. Bağlantılı Bileşen Etiketleme tabanlı 2B Kümeleme Çalışmaları

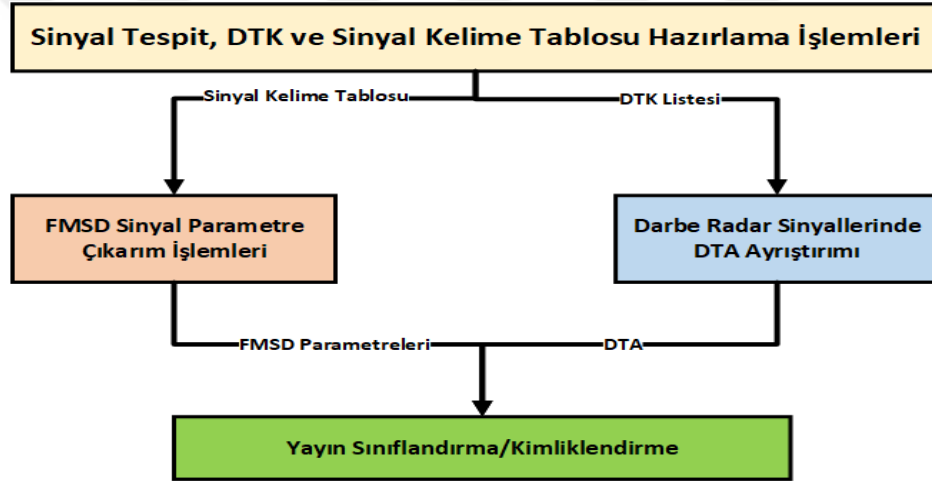
2B kümeleme etiketleme işleminde komşuluk değeri 8 alınmaktadır. Etiketleme sonrası her bir öbekte geliş zamanı ve radyo frekansı değerlerini içeren fonksiyon tanımlanarak sinyal parametreleri çıkarılmaktadır. Kümeleme işlemi ilk analiz işleminden sonra ardışık gelen analiz penceresinde yapılır ve pencereler arasında kümelerin güncelleme çalışmaları yapılarak analiz işleminin sürekliliği sağlanmaktadır. Güncelleme işlemlerinde matematiksel ifade tıpkı Eşitlik (2)'de benzer bir yapıda olmaktadır. Şekil 4.7.'de kümeleme işlemi içeren FMSD parametre çıkarım işlem akışı gösterilmektedir.

Darbeli sinyallerde gruptama 3B kümeleme ile yapılırken FMSD sinyallerde 2B kümeleme ile gerçekleştirilmektedir. FMSD sinyallerde, DTK listesine benzer yapıda sinyal kelime tablosu kullanılmaktadır. Sinyal analiz işlemleri tıpkı darbe sinyallerinde yapıldığı gibi analiz penceresi uzunluğunda yapılmaktadır.



Şekil 4.7. 2B Kümeleme tabanlı FMSD Sinyal Analiz Akışı

Darbeleri sinyaller ile FMDS sinyali analizi paralel akış içerisinde yer alarak yayın kimliği belirlemede fayda sağlanmaktadır. Şekil 4.8.'de sinyal ayrıştırma işlemlerinin paralel akışta yapılmasını gösteren akış sunulmaktadır. Sayısal almaç yapısında gerçekleşen sinyal tespiti, geliş açısı kestirimi, genlik seviyesi ölçümü, geliş zamanı kaydı, darbe genişliği ölçümü ve frekans belirleme işlemleri ile DTK ve sinyal kelime tablosu oluşturulmaktadır. Ayrıştırma işlemleri hem kümelemeyi hem de parametre çıkarımını içermektedir. Almaç sonrası gerçekleştirilen ayrıştırma işleminin iki bağımsız işlem akışı ile yapılması yayın kimliklendirme aşamasındaki girdi verisinin genişliğini ve çeşitliliğini artırmaktadır. Bu sayede muharebe ortamındaki farklı radar tiplerinin sınıflandırılması sağlanmış olacaktır.



Şekil 4.8. Paralel Sinyal Ayrıştırma İşlem Akışı

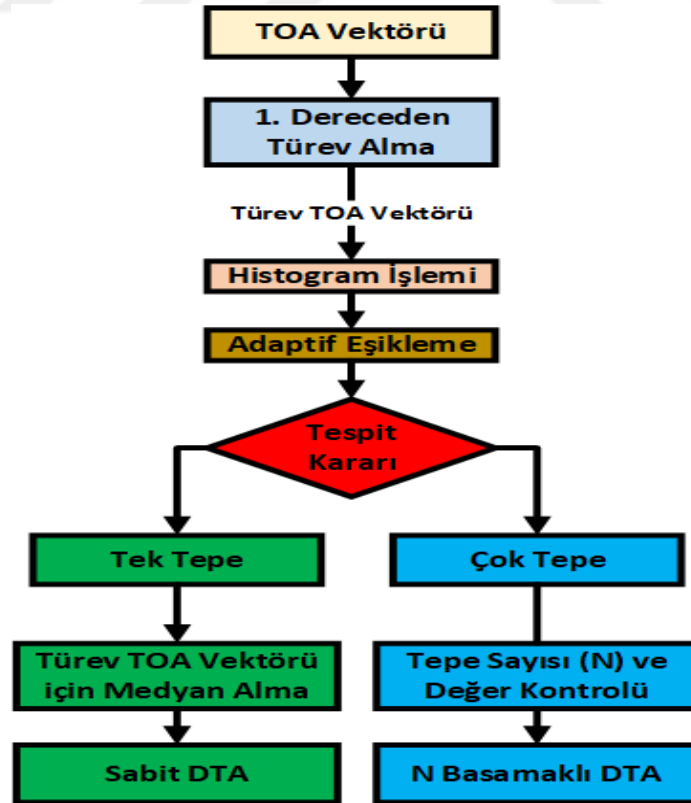
4.2. Ardışık Türev Histogram tabanlı DTA Ayrıştırma

Herhangi bir kümeleme yapılmadığında oldukça zorlaşan DTA çıkarım işlemi aynı yayın kaynağına sahip olan darbelerin kayıpsız bir şekilde aynı gruba alınması sonucu yani yüksek doğrulukta bir kümeleme işlemi sonucunda başarılı bir şekilde yapılabilmektedir. Kümeleme sonucunda ayrılan DTK darbeleri içerisinde yer alan geliş zamanı bilgisi kullanılarak geliş zamanı (TOA) vektörü üzerinde DTA çıkarım işlemi gerçekleştirilmektedir.

Sabit ve basamaklı DTA değerlerinin otomatik olarak sınıflandırılması ve değerlerin belirlenmesi için dört aşamada bir işlem akışı yapılmaktadır:

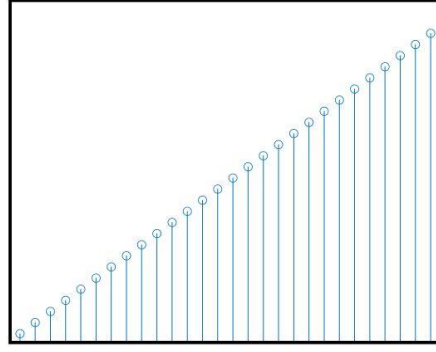
- i. TOA vektörü üzerinde türev alınır.
- ii. Türevi alınmış vektörün histogramı alınır.
- iii. Histogram üzerinde adaptif eşikleme ile TOA fark değerleri tepeleri belirlenir.
- iv. Birden fazla tepe varsa ve histogram değerleri eşikten büyükse basamaklı TOA kararı verilir. Tek tepe noktası var ise sabit DTA kararı verilmektedir.

İşlem akışı sonucunda ilk analiz penceresi için radar DTA çıktıları oluşturulur. Şayet ilk analiz penceresinden sonra devam eden bir analiz için işlem yapılıyorsa güncelleme işlemi yapılarak hesaplanan DTA değerinin var olan bir kümeye yakınlığı bulunmaktadır. Bir küme ile ilişkilendirme yapıldığında ilgili kümenin metrik ortalamaları ve standart sapma değerleri güncellenerek ardışık analizler için güvenilir bir uzaklık/yakınlık ilişkisi kurulmaktadır. İlişkilendirme olmazsa yeni radar sinyal değeri şeklinde atama yapılarak çıktı tablosuna eklenir. Şekil 4.9.'da kümeleme sonrasında her bir küme için yapılan DTA çıkarım işlemi gösterilirken Şekil 4.10.'da örnek bir TOA vektörü üzerinden anlatım yapılmaktadır.

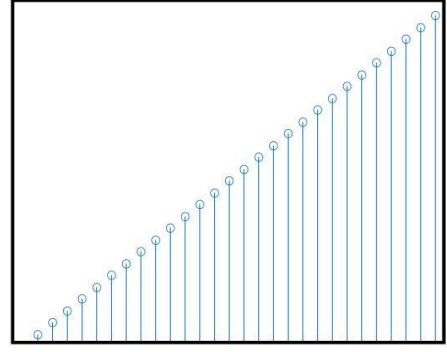


Şekil 4.9. Ardışık Türev Histogram ile DTA Ayırıştırma İşlem Akışı

Geliş
Zamanı
(TOA)



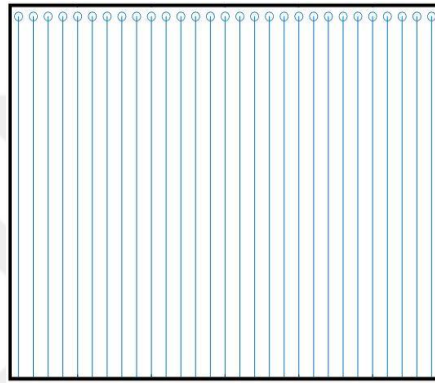
Sabit



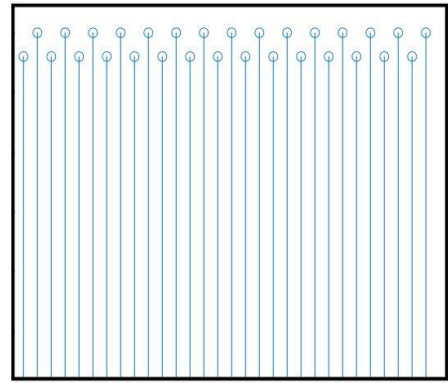
Basamaklı

a) Sabit ve 2-Basamaklı DTA Radar Sinyalleri Geliş Zamanı Vektörleri

Türev
Değeri



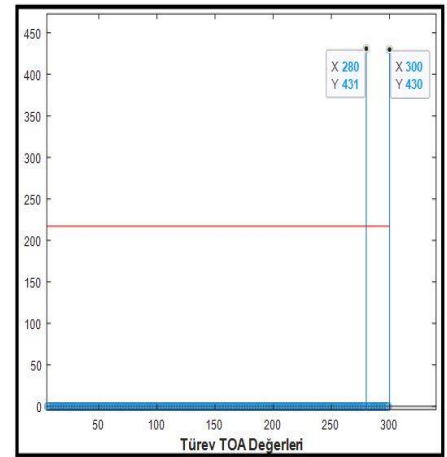
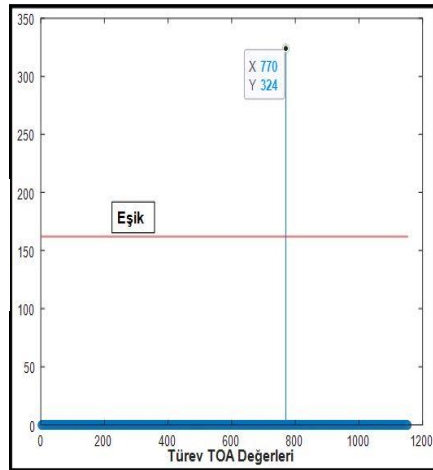
Sabit



Basamaklı

b) Ardışık Türev TOA Vektörleri

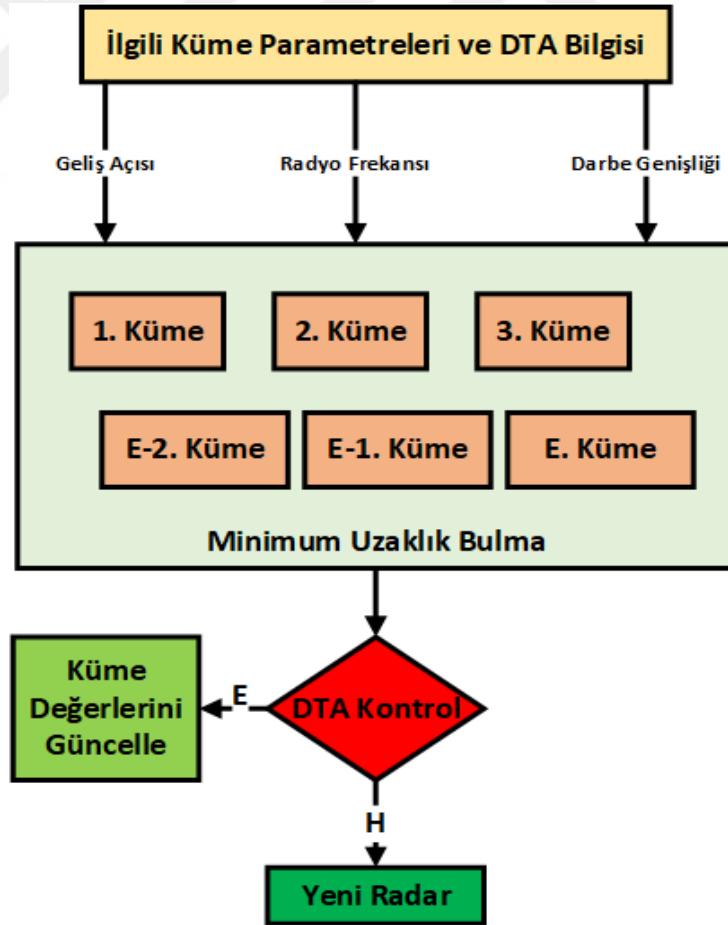
Histogram
Değeri



c) Ardışık Türev Histogram Vektörleri ve Eşik İşlemi

Şekil 4.10. DTA Ayrıştırma İşleminin Deneysel Gösterimi a) Sabit ve 2-Basamaklı DTA Radar Sinyalleri Geliş Zamanı Vektörleri b) Ardışık Türev TOA Vektörleri c) Ardışık Türev Histogram Vektörleri ve Eşik İşlemi

Şekil 4.10.'da 2-basamaklı DTA ile sabit DTA ayırıştırma işlemlerinin akışı deneysel bir gösterimle sunulmaktadır. Şekil 4.10. a)' da, Şekil 4.9.'da yer alan akışın 1. Adımda elde edilen geliş zamanına göre alınan türev sonucu sabit ve basamaklı DTA'ya sahip radar sinyalleri için gösterilmektedir. Şekil 4.10. b)' de, akışın 2. Adımı sonrası elde edilen 1. Dereceden türev sonucu yer almaktadır. Görüldüğü üzere sabit DTA yapısına sahip radar sinyalinin türevinde sadece tek bir değer varken 2-basamaklı DTA radar sinyalinde iki farklı türev değeri ile karşılaşılmaktadır. Türev sonucuna göre tekrarlanan verilerin incelendiği histogram sonucu ve adaptif eşikleme işlemi sonucu Şekil 4.10. c)'de gösterilmektedir. Şekil 4.10'da adım adım görüldüğü üzere Önerilen algoritma modeli çok basamaklı DTA ayırıştırmasını çözümleyecek şekilde çalışmaktadır. Şekil 4.11.'de güncelleme işlem adımını açıklayan bir şema gösterilmektedir.



Şekil 4.11. DTA Ayırıştırma Ardışık Analiz Güncelleme İşlemi

Güncelleme sırasında öncelikle geliş açısı, radyo frekansı ve darbe genişliği parametrelerinin ağırlıklandırılmış hesaplama ile en yakın küme bulunur. Bulunan en yakın kümenin DTA değerleri ile kontrol süreci gerçekleştirilerek iki aşamalı bir işlem ile güncelleme tamamlanır. DTA kontrolü sonrası hesaplanan DTA en yakın kümenin DTA'sı ile benzerlik oluşturmuyorsa yeni radar sinyali olarak tanımlanır.

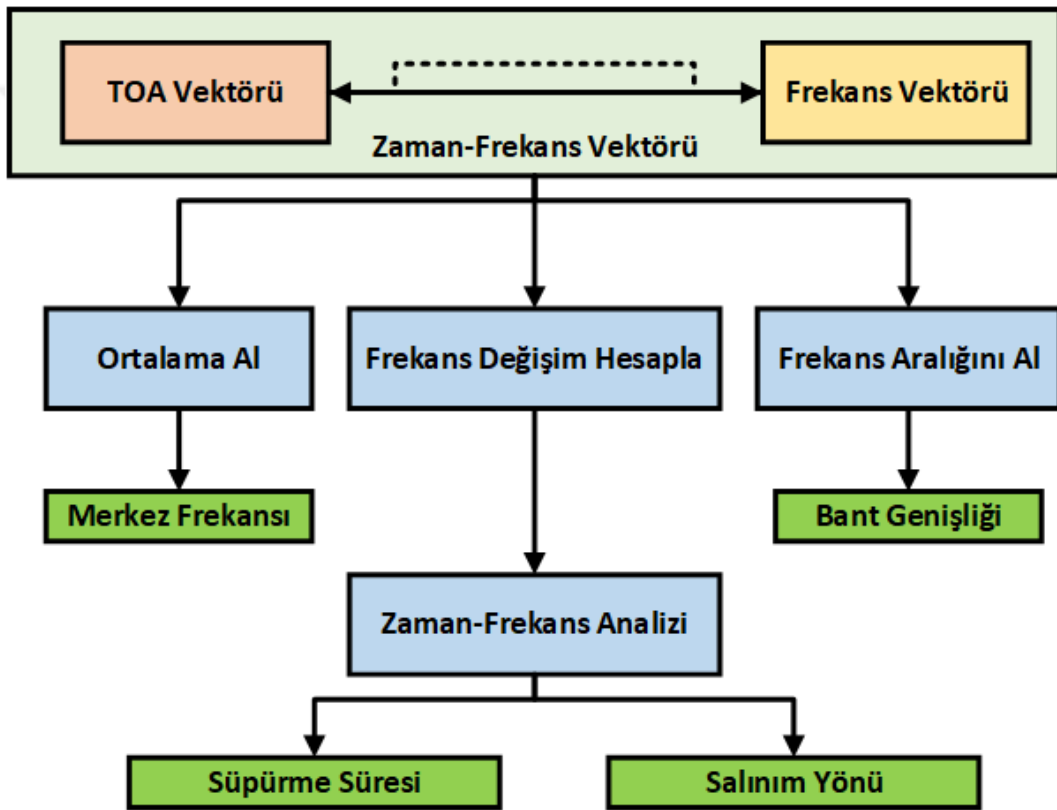
4.3. Zaman-Frekans Analizi ile FMSD Radar Sinyal Parametre Çıkarımı

Bu tez çalışmasında, FMSD radar sinyalleri için temel sinyal parametre değerleri olarak merkez frekansı, frekans bant genişliği, süpürme süresi ve salınım yönü değerleri ile ilgilenilmektedir. 2B BBE tabanlı kümeleme ile ayrıştırma işleminin ilk aşaması gerçekleştirildikten sonra her bir küme için zaman ve frekans vektörleri kullanılarak sinyallerin parametre çıkarım işlemi gerçekleştirilmektedir. Her bir parametre çıkarımı için yapılan işlemler maddeler halinde açıklanmaktadır:

- i. **Merkez Frekansı:** Küme içindeki frekans değerlerinden oluşturulan frekans vektörünün ortalaması alınarak hesaplanmaktadır.
- ii. **Bant Genişliği:** Frekans vektörünün maksimum ve minimum değerleri arasındaki fark alınarak bulunmaktadır.
- iii. **Süpürme Süresi:** Frekans vektörünün türevi alınarak frekans değişim analizi yapılmaktadır. Frekans değişim tepeleri hem pozitif yönde hem de negatif yönde bulunarak tepe analizleri gerçekleştirilmektedir. Tepe analizinde histogram tabanlı eşik işleminden faydalanarak süpürme süresi hesaplanmaktadır.
- iv. **Salınım Yönü:** Frekans değişim vektörü ile minimum ve maksimum noktalar belirlenerek her bir salınım geçişindeki yön tespit edilmektedir.

Parametre çıkarımı ilk analiz penceresinde işlem gerçekleştiriliyorsa her bir küme sonucu yeni bir radar sinyali olarak belirlenmektedir. Ardışık analiz işlemlerinde ise tıpkı darbe

radar sinyallerinde olduğu gibi güncelleme işlem adımları gerçekleştirilmektedir. Güncelleme adımı radyo frekansı, geliş açısı ve bant genişliği parametreleri ile en yakın küme hesabı yapılmaktadır. Bulunan en yakın küme ile ilişkilendirme yapılarak küme parametre değerleri güncellenmektedir. Güncelleme öncesi merkez frekans varyansı ile kontrol gerçekleştirilmektedir. Yeni veri hiçbir küme ile ilişkilendirilmiyorsa yeni radar sinyali olarak tanımlanmaktadır. Şekil 4.12.'de FMSD radar sinyali için gerçekleştirilen parametre çıkarımının işlem akışı gösterilmektedir.



Şekil 4.12. FMSD Sinyal Parametre Çıkarım İşlem Akışı

5. VERİ SETLERİ, BENZETİM ÇALIŞMALARI VE SONUÇLAR

Bu bölümde Bağlantılı Bileşen Etiketleme tabanlı öbekleme yönteminin darbeli radar sinyalleri ve FMSD radar sinyalleri ayrıştırmada başarısını görmek amacıyla oluşturulan veri setleri, benzetim çalışmaları ve sonuçları anlatılmaktadır.

Veri setlerinin oluşturulması ve benzetim çalışmaları amacıyla; darbeli radar sinyalleri için frekans, darbe genliği, darbe genişliği, darbe tekrarlama aralığı gibi bir sinyali oluşturulan parametreler belirlenerek 16 adet radar sinyali üretilmiştir. Üretilen radar sinyallerinin farklı senaryolarla alıcıya ulaşması, DTK tablolarının üretilmesi ardından tasarlanan yöntem ile sinyal ayrıştırılmasının sağlanması sağlanmıştır.

Benzer şekilde FMSD radar sinyalleri için; sırasıyla FMSD radar sinyalleri için sürekli bir sinyalin kendine özgü olan parametreleri belirlenerek 8 adet sinyal üretilmiştir. Üretilen bu sinyallerinde farklı senaryolarla alıcıya ulaşması, sinyal tanıma kelime tablolarının üretilmesi ardından tasarlanan yöntem ile sinyallerin parametre çıkarımı sağlanmıştır. Bu parametreler sürekli sinyallerin tanımlanmasında gereklidir.

Üretilen sinyallerin parametre bilgileri 5.1 Veri Setleri başlığı altında sunulmaktadır. Müteakip kısımda farklı radar veri setleri ile test senaryoları kurularak benzetimler gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları incelenerek yöntemin başarısı değerlendirilmiştir. Ayrıca örnek bir test senaryosuna sinyal ayrıştırma problemi için metrik tabanlı bir kümeleme yöntemi uygulanarak sonuçlar karşılaştırılmaktadır.

5.1. Veri Setleri

Veri seti hazırlanırken radar tipine göre farklı bir yaklaşım sergilenmiştir. Darbeli radarlar için bir DTA tanımı üzerinde periyodik radar zaman sinyali oluşturulurken, FMSD radar sinyalleri için zaman sinyalinin Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (KZFD) alınarak zaman-frekans matrisi (spektrogram) üretilmiştir.

Spektrogram matrisinde akan zamana karşılık frekans değişimi görülebilmektedir. Otomatik bir sınıflandırma yapılmadan bazı durumlarda operatör aracılığıyla sinyal hakkında karar verilebilmektedir.

5.1.1. Darbeli Radar Veri Seti

Sinyalin tanımlanmasında en önemli parametrelerden biri frekans değeridir. Darbeli radarlar için veri seti 2 GHz - 18 GHz arasında farklı frekansa sahip 16 farklı sinyal parametresinden oluşmaktadır. Bu sinyaller frekans bantlarına göre dört farklı gruba ayrılmış olup Tablo 5.1.'de maddeler halinde belirtilmektedir. Ayrıca, radar sistemlerin frekans aralıklarına göre kullanım yerleri bu tabloda verilmektedir [2].

Tablo 5.1.Radar Frekans Aralığı ve Kullanım Alanları

Frekans Aralığı	Kullanım Yerleri
2-4 GHz (S Bant)	• Uzun Menzilli Havadan Gözetleme Radarlar • Erken İhbar Radarları
4-8 GHz (C Bant)	• Çok İşlevli Faz Dizili (Hava Savunma) Radarlar • Orta Menzilli Hava Savunma Radarları
8-12 GHz (X Bant)	• Doppler Navigasyon Radarları • Hava Önleme Radarları • Gemide Seyrüsefer ve Kılavuz Radarları • Silah Kontrol (Takip) Radarları • Polis Hız Ölçer Radarları
12-18 GHz (K/Ku Bant)	• Keşif/Gözetleme Radarları • Havalimanı Trafik Kontrol Radarları

Veri seti hazırlanırken özellikle elektronik harp alanında kullanılan sistemler incelenmiş ve bu sistemlerin parametre değerleri belirlemede değerlendirilmiştir Hava ve yer hedeflerini takip eden Saber hava savunma radarı, S bantta çalışmaktadır [45]. Arthur tespit radarının çalışma frekansı 4-8 GHz aralığındadır [46]. Önceleri TPY-X olarak bilinen TPY-4 radarı [47] AN/TPS-77 hava gözetleme radarları [48] ile SMART-L deniz uzun menzili arama radarı ve erken uyarı yeteneğine özelliği ile güncellenerek SMART-L-EWC olarak adlandırılan radar L bant (1215 -1400 MHz) frekans aralığında yayın yapmaktadır [49]. FCS-3, silah yönlendirme ve atış kontrol alt sislerine sahip bütünleşmiş bir deniz silah sistemidir. Gözetleme ve izleme için C bant radarı, kontrol radarı için X bant radarına sahiptir [50]. Elektronik Harp açısından tehdit olan radarların çalışma frekans aralığındaki öngörülen bilgiler ışığında sentetik olarak üretilen radar sinyallerinde sabit, 2-basamaklı DTA ve 3-basamaklı DTA olmak üzere üç çeşit DTA tipi yer almaktadır. Veri setinde yer alan parametreler alıcı kısımda ölçülen parametrelerdir. Geliş Açısı parametresi alıcıya gelen sinyalin, sinyal işleme bloğunda kestirimi sonucu hesaplanan yanca açısı değeridir. Darbe genliği parametresi, radarın ERP'si değil RİA'nın alıcı kısmında, belirli bir darbede işlenen verilerin tepe değeri alınarak hesaplan genliktir.

S-bant darbeleri radar sinyallerine ait veri seti hazırlamada kullanılan örnek radar parametreleri Tablo 5.2.'de belirtilmektedir.

Tablo 5.2. S-Bant Darbeli Radar Veri Seti

Parametreler	2-4 GHz (S Bant) Radarlar			
Radar Nu.	1	2	3	4
Frekans (GHz)	3.5	3.7	2.5	2.9
Genlik (dBm)	-45	-40	-42	-48
Darbe Genişliği (μs)	10	5	10	5
DTA (μs)	[240 260 280]	[80 100]	250	[250 300]
Ofset Zaman (μs)	30	10	50	40
DTF (kHz)	[4.1 3.8 3.5]	[12.5 10]	4	[4 3.33]
Geliş Açışı (Derece)	9.5	15	18.3	25

Tablo 5.2.'de gösterildiği üzere 1, 2 ve 4 numaralı darbeli radarlar basamaklı DTA yapısına sahiptir. Radar1 3-basamaklı DTA içerirken, Radar2 ve Radar4 2-basamaklı DTA içermektedir. Tablo 5.3.'te C-Bant darbeli radar sinyalleri açıklanmaktadır.

Tablo 5.3. C-Bant Darbeli Radar Veri Seti

Parametreler	4-8 GHz (C-Bant) Radarları			
Radar Nu.	5	6	7	8
Frekans (GHz)	4.75	5.65	6.25	7.9
Darbe Genliği (dBm)	-42	-41	-40	-43
Darbe Genişliği (μs)	15	5	10	15
DTA (μs)	150	[120 135]	200	140
Ofset Zaman (μs)	90	80	10	10
DTF (kHz)	6.66	[8.33 7.41]	5	7.14
Geliş Açışı (derece)	32	18	24	41

Tablo 5.3.'te sadece Radar6 basamaklı DTA yapısına sahiptir. Uçak platformlarında yer alan RİA sistemlerinin sıkça karşılaştığı radar sinyalleri C-Bant aralığında çalışmaktadır.

Tablo 5.4. X-Bant Darbeli Radar Veri Seti

Parametreler	8-12 GHz (X-Bant) Radarlar					
Radar Nu.	9	10	11	12	13	14
Frekans (GHz)	9.5	8.75	9.8	11.2	10.9	8.2
Darbe Genliği (dBm)	-43	-41	-46	-42	-39	-40
Darbe Genişliği (μs)	5	10	20	10	15	10
DTA (μs)	[235 255]	180	215	225	[100 150 200]	275
Ofset Zaman (μs)	85	45	25	70	50	90
DTF (kHz)	[4.25 3.92]	5.5	4.65	4.44	[10 6.66 5]	3.64
Geliş Açışı (derece)	49.5	50	28.4	23	18	37

Tablo 5.4.'te X-Bant radar veri seti gösterilmektedir. Radar9 2-basamaklı DTA içermekte olup Radar13 3-basamaklı DTA yapısına sahiptir. Tablo 5.5.'te Ku/K-Bant radar veri seti gösterilmektedir. Radar15 2-basamaklı DTA yapısına sahiptir.

Tablo 5.5. Ku-Bant Darbeli Radar Veri Seti

Parametreler	12-18 GHz (Ku-K Bant) Radarlar	
Radar Nu.	15	16
Frekans (GHz)	12.4	14.5
Darbe Genliği (dBm)	-43	-44
Darbe Genişliği (μs)	5	10
DTA (μs)	[80 120]	125
Ofset Zaman (μs)	22	38
DTF (kHz)	[12.5 8.33]	8
Geliş Açışı (derece)	22.5	19

Testlerde kümelemenin başarımını görmek ve ayırıştırmak için çeşitli senaryolar tanımlanmıştır. Bu kapsamda 7 adet senaryo tanımlanmış olup, aşağıda maddeler halinde açıklanmaktadır:

- **Senaryo 1:** 16 adet bütün radarları içeren sinyal ayırıştırma senaryosudur. Sabit ve basamaklı DTA yapıları için başarım gözlemlenmektedir.

- **Senaryo 2:** Sadece sabit DTA radarlarının olduğu sinyal ayrıştırma senaryosudur. Senaryoda Radar 3,5,7,8,10,11,12,14,16 sinyallerinin aynı anda alıcıya ulaşması şekilde bir kurgu oluşturulmuştur.
- **Senaryo 3:** Sadece 2-basamaklı DTA radarlarının olduğu sinyal ayrıştırma senaryosudur. Radar 2,4,6,9,15 sinyalleri ile ilgilenilmektedir.
- **Senaryo 4:** Sadece 3-basamaklı DTA radarlarının olduğu sinyal ayrıştırma senaryosudur. Radar 1, 13 sinyalleri ile senaryo tanımlanmıştır.
- **Senaryo 5:** 2-basamaklı DTA ile 3-basamaklı DTA radar sinyallerinin aynı anda yer aldığı senaryodur. 7 adet farklı radar ile senaryo kurgulanmıştır.
- **Senaryo 6:** Sabit ve 2-basamaklı DTA radar sinyallerinin aynı anda yer aldığı senaryodur. 14 adet farklı radar sinyali ile senaryo tanımlanmıştır.
- **Senaryo 7:** Sabit ve 3-basamaklı DTA radar sinyallerinin yer aldığı senaryodur.

Kurgulanan 7 adet senaryo veri çeşitliliği oluşturularak algoritmanın doğruluk sonuçları incelenmektedir. Senaryolar için kullanılan temel konfigürasyon parametre seti Tablo 5.6.'da gösterilmektedir.

Tablo 5.6. DTA Çıkarım Konfigürasyon Parametreleri

Parametreler	Değerler
Analiz Pencere Süresi	250 ms
Frekans Çözünürlük	50 MHz
Açı Çözünürlük	0.1 Derece
Zaman Çözünürlük	5 μ s
Frekans Komşuluk	150 MHz
Açı Komşuluk	0.3 Derece
Maksimum Radar Sayısı	25

5.1.2. FMSD Radar Veri Seti

FMSD radar sinyalleri için hazırlanan veri setinde ise 10 adet farklı parametre değerlerine sahip radar sinyal bilgileri yer almaktadır. Veri setindeki radar sinyallerin frekans değerleri özellikle birbirine yakın değerde seçilmektedir. Veri seti Tablo 5.7.'de verilmektedir.

Tablo 5.7. FMSD Radar Sinyalleri Veri Seti (Aşağı (A), Yukarı (Y))

Radar No	Parametreler				
	RF (GHz)	Geliş Açısı (Derece)	Salınım Süresi (μs)	Bant Genişlik (MHz)	Salınım Yönü
1	8.6	47	2100	7.5	A
2	7.5	37	650	15	A
3	9	13	1200	7.5	Y
4	8.6	28	1283	6	Y
5	9.2	71	2200	10	A
6	6.3	55	600	30	Y
7	8.2	25	1600	21.43	Y
8	7.3	34	1833	15	A

Tablo 5.7.'de FMSD radar sinyal veri seti hazırlama sonucunda parametre kestirimlerinin doğruluğunu sağlamak için girdi değerler oluşturulmaktadır. Bu değerlerin yüksek doğrulukta tahmini benzetim testlerinde incelenmektedir.

Zaman uzayında üretilen doğrusal FMSD salınım (chirp) sinyali KSFD işlemi sayesinde zaman-frekans eksenlerinde akan bir matris şeklinde veri üretilmektedir. İlgili zaman pencerelerinde zaman etiketine karşılık radyo frekansı ve geliş açısı değerleri işaretlenerek sinyal ayrıştırma işlemlerinde kullanılmak üzere sinyal kelime tablosu üretilmektedir. Sinyal kelime tablosu, başka bir açıdan değerlendirildiğinde spektrogram matrisinin listeye dökülmüş halidir. Spektrogram alırken kullanılan FFT nokta sayısı arttıkça frekans çözünürlüğü artmaktadır. Fakat zaman aralığının artacağı düşünülerek ödünleşimi (trade-

off) optimum değerde sağlayacak spektrogram değerleri deneysel çalışmalar sonucunda belirlenmiştir. FFT nokta sayısı 128 olarak kullanılmaktadır.

5.2. Darbeli Radar Sinyal Ayrıştırması Benzetimleri

Darbeli radar sinyalleri için oluşturulan veri setine yönelik 7 adet senaryo tanımlanmıştır. Bu senaryolarda benzetim sonuçlarına göre 3B BBE tabanlı kümeleme yönteminin ve DTA çıkarımının başarımı incelenmektedir. Intel i7-7700 CPU içeren bir bilgisayarda 3B BBE yöntemi için ortalama çalışma süre ölçümleri alınmıştır.

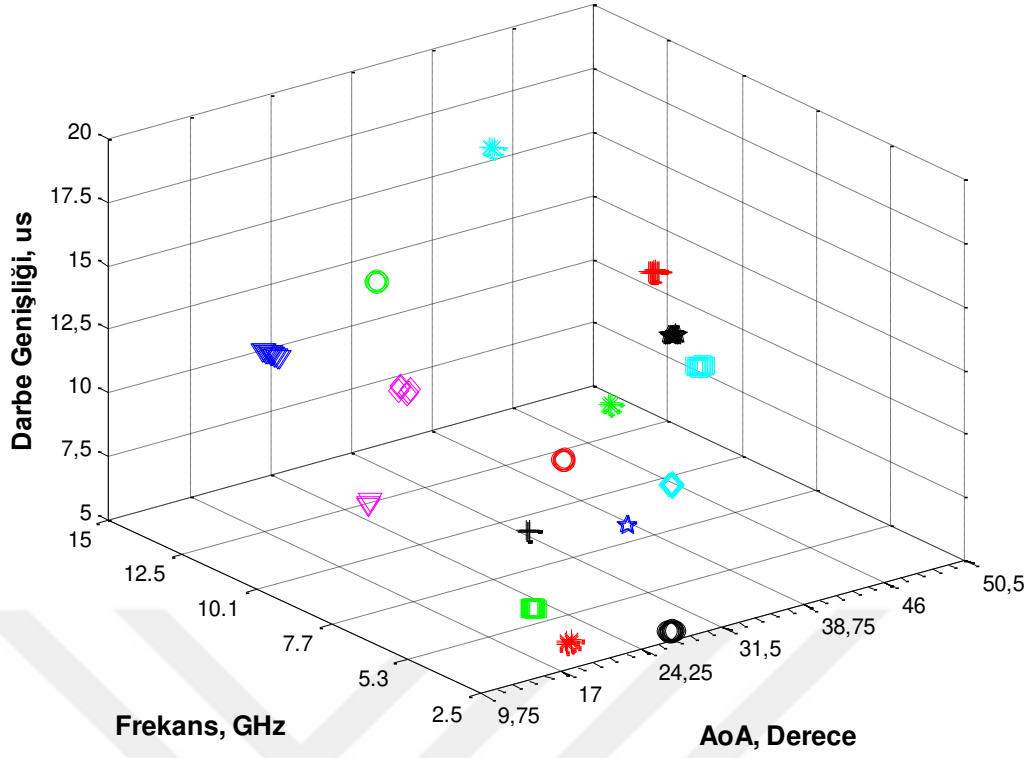
5.2.1. Senaryo 1 (Tüm DTA Sinyalleri)

Senaryo 1’de yer alan radar veri setleri için çıkarımı beklenen DTA değerleri Tablo 5.8.’de verilmektedir. Amacımız aynı anda alıcıya geldiği varsayılan 16 adet radarın zamanda birbiri üstüne bindiği bir radar sinyal zaman verisinden her bir sinyale ait DTA değerini doğru bir şekilde bulmaktır.

Tablo 5.8. Tüm DTA Ayrıştırma Girdi Değerleri

Radar Numarası	Darbe Tekrarlama Aralığı (μ s)
1	[240 260 280]
2	[80 100]
3	250
4	[250 300]
5	150
6	[120 135]
7	200
8	140
9	[235 255]
10	180
11	215
12	225
13	[100 150 200]
14	275
15	[80 120]
16	125

Şekil 5.1.'de Tablo 5.8.'e göre hazırlanan veri seti kullanılarak gerçekleştirilen kümeleme işleminin 3B grafiği gösterilmektedir. Geliş açısı (AoA), radyo frekansı ve darbe genişliği parametre değerleri kullanılarak oluşan 3B imge üzerinde Şekil 5.1.'de görüldüğü üzere 16 adet radar sinyali gruplanmıştır. 1000 adet analiz penceresi içeren bir benzetimde ortalama çalışma süresi 411 ms olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.1. Tüm DTA Sinyalleri için 3B Kümeleme

Şekil 5.1.'deki her bir küme aynı kaynaktan gelen radar sinyaline ait bilgileri içerir. Her bir küme için geliş zaman analizi yapılarak DTA çıkarımı yapılır. Bu senaryoda yer alan tüm sinyaller (sabit, 2-basamaklı ve 3-basamaklı DTA radar sinyalleri) için DTA kestirimi %100 doğrulukla ile yapılmıştır. Tablo 5.9.'da her bir radar için DTA çıkarım sonucu yer almaktadır. Doğru çıkarım gerçekleştirildiğinde D ile sonuç gösterilirken, aksi durumda yanlış çıkarım Y ile ifade edilmektedir.

Tablo 5.9. Tüm DTA Radar Sinyalleri Ayrıştırma Sonuçları

Ayrıştırma Sonucu	Radar Numarası															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
D/Y	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D

5.2.2. Senaryo 2 (Sadece Sabit DTA Sinyalleri)

Senaryo 2’de yer alan radar veri setleri için çıkarımı beklenen DTA değerleri Tablo 5.10.’da verilmektedir. Kullanılan DTA radar sinyali türü Sabit DTA’dır. Sabit DTA sinyallerinin basamaklı DTA sinyallerine göre daha kolay ayrışması beklenmektedir [5].

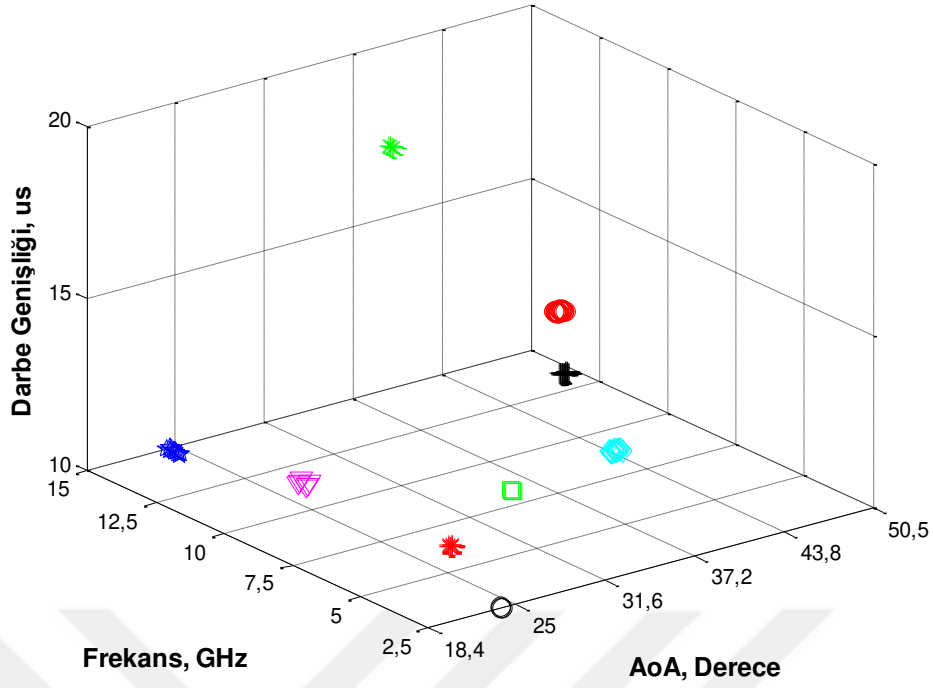
Tablo 5.10. Sabit DTA Ayrıştırma Girdi Değerleri

Radar Numarası	Darbe Tekrarlama Aralığı (μs)
3	250
5	150
7	200
8	140
10	180
11	215
12	225
14	275
16	125

Şekil 5.2.’de görüldüğü üzere 9 adet radar sinyalinin kümelenmesinden sonra her bir küme içerisinde DTA çıkarım işlemleri uygulanmaktadır. Bu senaryoda sabit DTA radar sinyalleri için %100 doğrulukla ile kestirim yapılmıştır. Tablo 5.11.’de her bir radar için hesaplanan DTA değeri belirtilmektedir.

Tablo 5.11. Senaryo 1’deki DTA Ayrıştırma Girdi Değerleri

Ayrıştırma Sonucu	Radar Numarası								
	3	5	7	8	10	11	12	14	16
D/Y	D	D	D	D	D	D	D	D	D



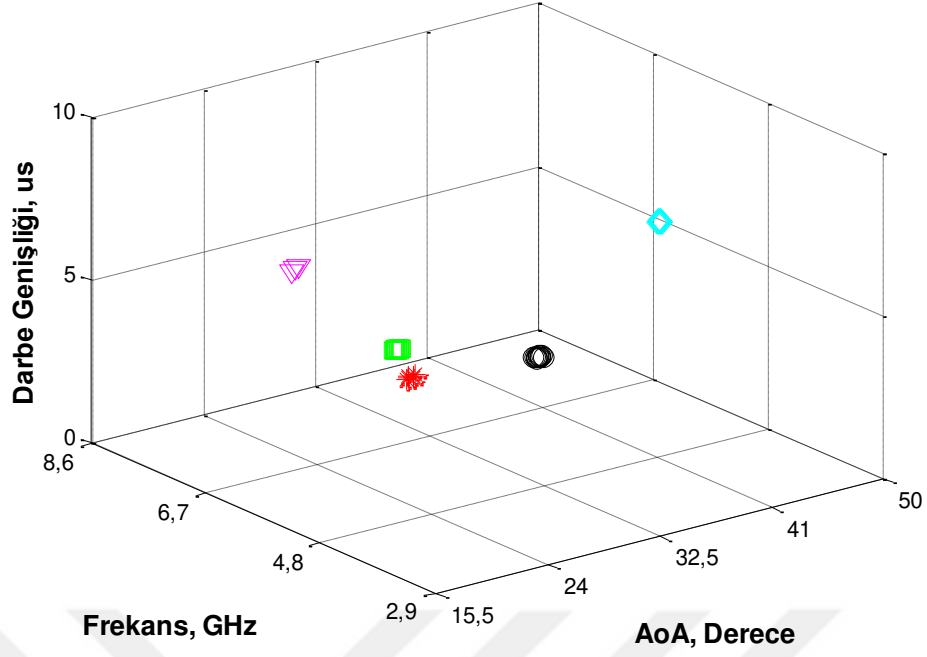
Şekil 5.2. Sabit DTA Radar Sinyalleri 3B Kümeleme

5.2.3. Senaryo 3 (Sadece 2-Basamaklı DTA Sinyalleri)

Tablo 5.12.'de verilen 5 adet radar sinyalinin kümeleme sonucu Şekil 5.3.'te gösterilmektedir. Tablo 5.13.'te her bir radar için DTA çıkarım sonucunun değerini belirtilmektedir. Her bir küme için DTA çıkarım işlemi %100 doğrulukla yapılmıştır. 1000 adet analiz penceresi içeren bir benzetimde ortalama çalışma süresi 129 ms olarak ölçülmüştür.

Tablo 5.12. 2-Basamaklı DTA Ayırıştırma Girdi Değerleri

Radar Numarası	Darbe Tekrarlama Aralığı (μ s)
2	[80 100]
4	[250 300]
6	[120 135]
9	[235 255]
15	[80 120]



Şekil 5.3. 2-Basamaklı DTA Sinyalleri için 3B Kümeleme

Şekil 5.3.'te görüldüğü üzere yakın olan radar sinyalleri 3B kümeleme ile kolayca ayrılmaktadır. Her bir renk ve işaretçi tonu BBE sonucu etiketi temsil etmektedir.

Tablo 5.13. 2-Basamaklı DTA Ayırıştırma Sonuçları

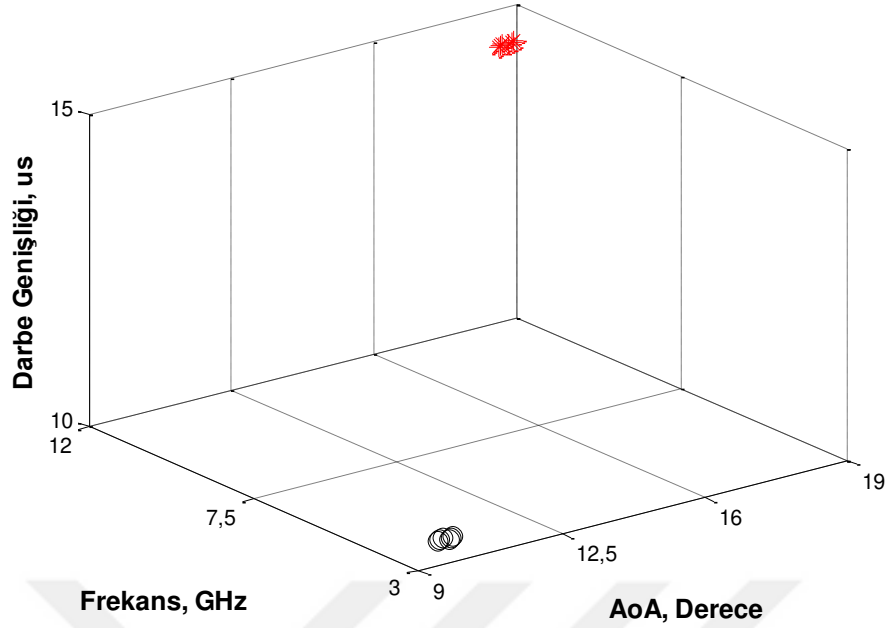
Ayırıştırma Sonucu	Radar Numarası				
	2	4	6	9	15
D/Y	D	D	D	D	D

5.2.4. Senaryo 4 (Sadece 3-Basamaklı DTA Sinyalleri)

Tablo 5.14.'te verilen 2 adet radar sinyalinin kümelenmesi Şekil 5.4.'te gösterilmektedir. Her bir küme için DTA çıkarım işlemleri uygulanmaktadır. 3-Basamaklı DTA radar sinyalleri için %100 doğrulukla ile kestirim yapılmıştır. 1000 adet analiz penceresi içeren bir benzetimde ortalama çalışma süresi 78 ms olarak ölçülmüştür.

Tablo 5.14. 3-Basamaklı DTA Ayırıştırma Girdi Değerleri

Radar Numarası	Darbe Tekrarlama Aralığı (µs)
1	[240 260 280]
13	[100 150 200]



şekil 5.4. 3-Basamaklı DTA Sinyalleri için 3B Kümeleme

Tablo 5.15.’te her bir radar için DTA ıkarım sonucunun değerini belirtilmektedir. 3-Basamaklı DTA radar sinyalleri tıpkı 2-Basamaklı DTA radar sinyalleri gibi ayrıştırılmaktadır. 1000 adet analiz penceresi içeren bir benzetimde ortalama çalışma suresi 12 ms olarak llmştr.

Tablo 5.15. 3-Basamaklı DTA Ayrıştırma Sonuçları

Ayrıştırma Sonucu	Radar Numarası	
	1	13
D/Y	D	D

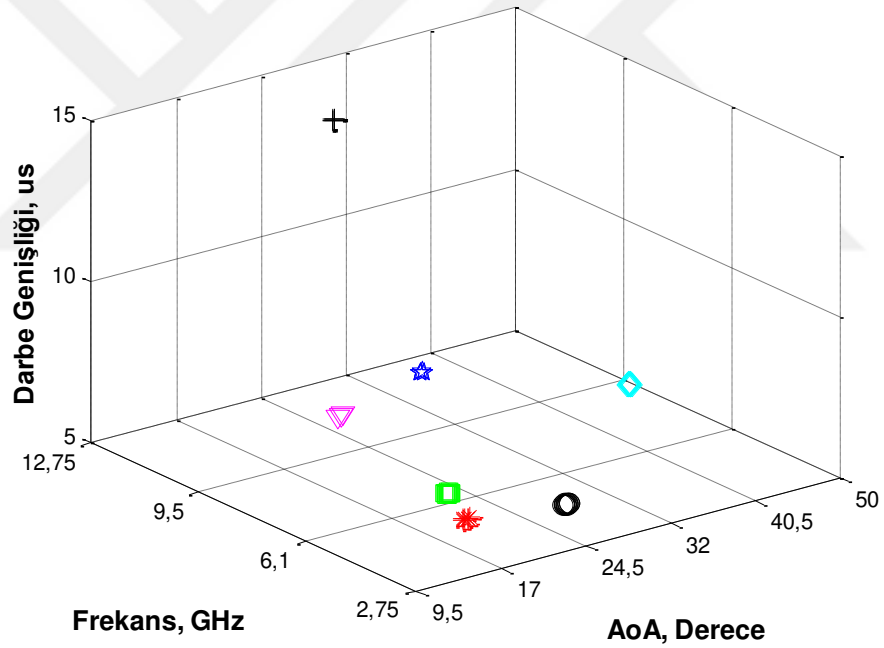
5.2.5. Senaryo 5 (Sadece Basamaklı DTA Sinyalleri)

şekil 5.5.’te görüldüğü üzere Tablo 5.16.’da verilen 7 adet radar sinyalinin kümelenmesinden sonra her bir küme içerisinde DTA ıkarım işlemleri uygulanmaktadır. Basamaklı DTA radar sinyalleri için %100 doğrulukla ile kestirim yapılmıştır. 2-Basamaklı ve 3-Basamaklı DTA’ların birlikte işlenmesine rağmen 3B kümeleme ile darbe dizinlerinin doğru bir şekilde ayrılmasından dolayı DTA ıkarım başarıyla gerçekleşmiştir. Tablo

5.17.'de DTA çıkarım sonuçları verilmektedir. 1000 adet analiz penceresi içeren bir benzetimde ortalama çalışma süresi 124 ms olarak ölçülmüştür.

Tablo 5.16. Basamaklı DTA Ayırıştırma Girdi Değerleri

Radar Numarası	Darbe Tekrarlama Aralığı (μ s)
1	[240 260 280]
2	[80 100]
4	[250 300]
6	[120 135]
9	[235 255]
13	[100 150 200]
15	[80 120]



Şekil 5.5. Basamaklı DTA Sinyalleri için 3B Kümeleme

Tablo 5.17.'deki basamaklı DTA yapısındaki sinyallerin ayırıştırma sonucu gösterilmektedir.

Tablo 5.17. Basamaklı DTA Ayırıştırma Sonuçları

Ayırıştırma Sonucu	Radar Numarası						
	1	2	4	6	9	13	15
D/Y	D	D	D	D	D	D	D

5.2.6. Senaryo 6 (Sabit ve 2-Basamaklı DTA Sinyalleri)

Şekil 5.6.'da 14 adet radar sinyalin gruplanması gösterilmektedir. Tüm radarların olduğu senaryoya göre başarımlı analizi yapmak için daha az bir içerikle benzetimler gerçekleştirilmiştir. 1000 adet analiz penceresi içeren bir benzetimde ortalama çalışma süresi 341 ms olarak ölçülmüştür.

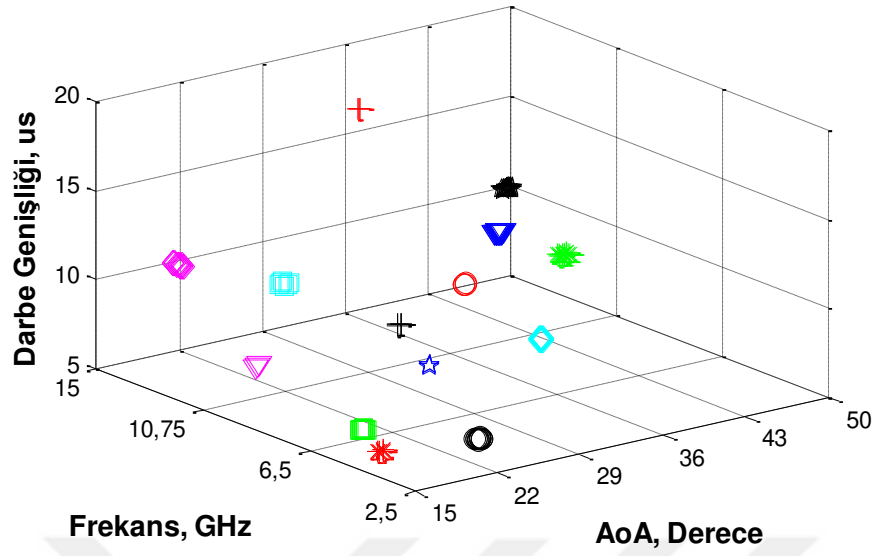
Tablo 5.18. Sabit ve 2-Basamaklı DTA Ayırıştırma Girdi Değerleri

Radar Numarası	Darbe Tekrarlama Aralığı (µs)
2	[80 100]
3	250
4	[250 300]
5	150
6	[120 135]
7	200
8	140
9	[235 255]
10	180
11	215
12	225
14	275
15	[80 120]
16	125

Tablo 5.19.'daki durumlar beklenildiği üzere Senaryo 1 ile tutarlı sonuç vermektedir. Test senaryosunda yer alan 14 adet radar sinyalinin DTA değerleri başarılı bir şekilde çıkarılmıştır.

Tablo 5.19. Sabit ve 2-Basamaklı DTA Ayırıştırma Sonuçları

Ayırıştırma Sonucu	Radar Numarası													
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16
D/Y	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D



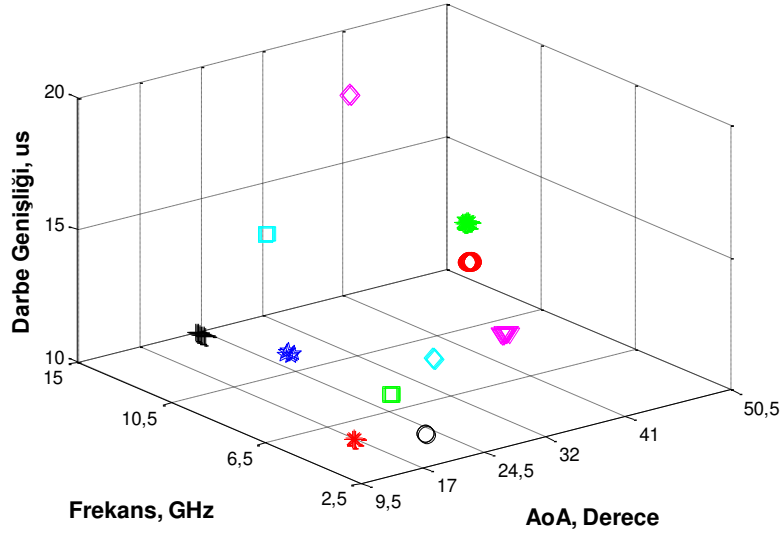
Şekil 5.6. Sabit ve 2-Basamaklı DTA için 3B Kümeleme

5.2.7. Senaryo 7 (Sabit ve 3-Basamaklı DTA Sinyalleri)

Tablo 5.20.'de Sabit ve 3-Basamaklı DTA sinyalleri bulunmaktadır. Bu test setinin olduğu Senaryo 7'de kümeleme ve DTA ayrıştırma başarımı incelenmektedir. Senaryo 7 tıpkı Senaryo 6 gibi Senaryo 1'in bir alt kümesidir. 1000 adet analiz penceresi içeren bir benzetimde ortalama çalışma süresi 179 ms olarak ölçülmüştür.

Tablo 5.20. Sabit ve 3-Basamaklı DTA Ayrıştırma Girdi Değerleri

Radar Numarası	Darbe Tekrarlama Aralığı (µs)
1	[240 260 280]
3	250
5	150
7	200
8	140
10	180
11	215
12	225
13	[100 150 200]
14	275
16	125



Şekil 5.7. Sabit ve 3-Basamaklı DTA için 3B Kümeleme

Tablo 5.21.'de tüm test sonuçları başarılı bir şekilde sonuç vermiştir. 11 adet radar sinyalinin içerildiği kümeleme ve ayrıştırma için analizler tamamlanmıştır.

Tablo 5.21. Sabit ve 3-Basamaklı DTA Ayrıştırma Sonuçları

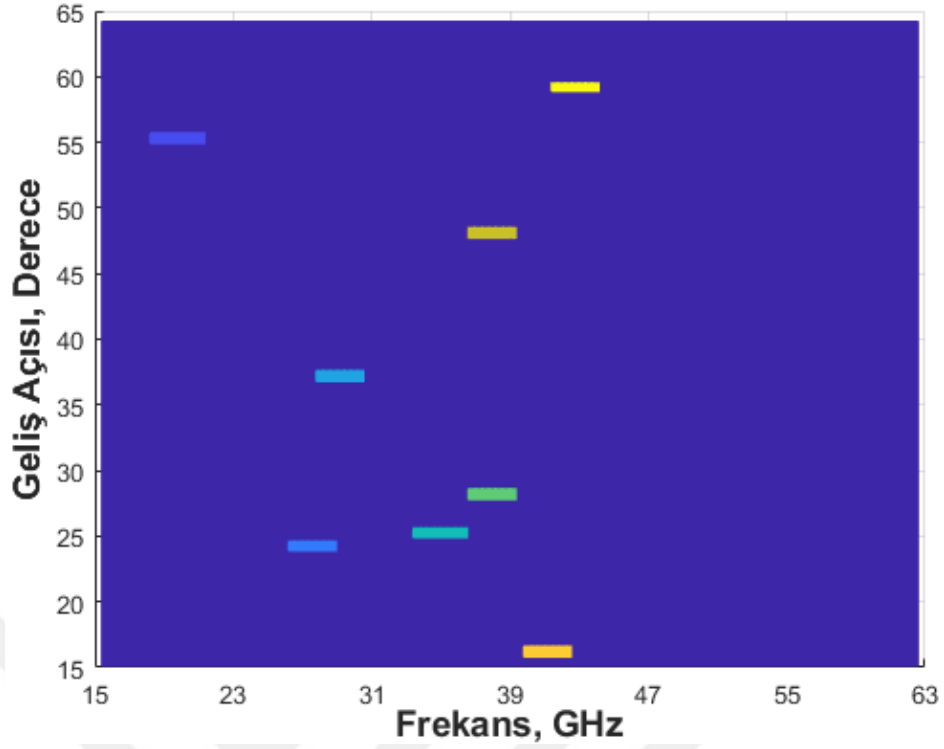
Ayrıştırma	Radar Numarası										
Sonucu	1	3	5	7	8	10	11	12	13	14	16
D/Y	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D

5.3. FMSD Radar Sinyal Ayrıştırması Benzetimleri

FMSD radar sinyalleri için 8 adet radar sinyali tanımlanarak oluşturulan veri setindeki sinyallerin alıcıya aynı anda ulaştığı varsayılarak testler gerçekleştirilmiştir. Kümeleme benzetiminden sonra sinyallerin bant genişliği, merkez frekansı, süpürme süresi ve salınım yönü parametreleri tahmin edilmektedir. Sonuçlar, oluşturulan veriler ile karşılaştırılarak kestirim hata oranları hesaplanmaktadır.

5.3.1. 2B Kümeleme Benzetimi

FMSD radar sinyalleri için gerçekleştirilen sinyal ayrıştırma işleminin ilk aşaması olan kümeleme (gruplama) Şekil 5.8.'de gösterildiği üzere yapılmaktadır. Tablo 5.7.'deki radar veri seti kullanılarak gerçekleşen 2B kümeleme işlemi BBE tabanlı yaklaşımla yapılmıştır.



Şekil 5.8. FMSD Radar Sinyalleri için 2B Kümeleme

Kümeleme sonrasında her bir grup için parametre çıkarımı yapılmaktadır. Parametre çıkarımı sonucunda benzetim verisi hazırlanırken bilinen değerler ile karşılaştırma yapılmaktadır.

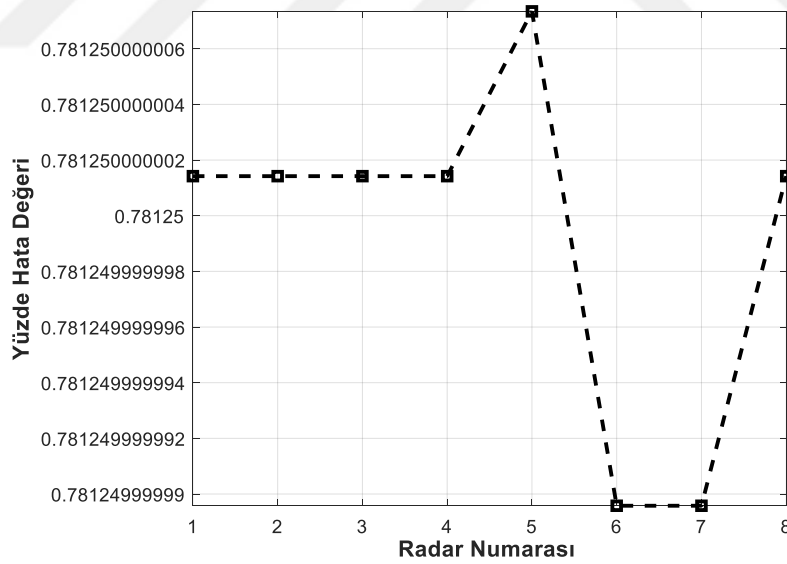
5.3.2. Bant Genişliği Parametre Kestirim Testleri

FMSD radar sinyalinde bant genişliği değeri sinyalin zamandaki frekans değişimini gösteren önemli parametrelerden birisidir. Bu parametre sayesinde frekans değişim bilgisi ölçülerek radar sinyali hakkında bilgiler edinilerek radar davranışının öğrenilmesinde fayda sağlanmıştır. Bant genişliği parametresi salınım eğrisinin bulunmasında da kullanılmaktadır. Veri testlerinde bant genişliği MHz çözünürlüğü ile karşılaştırma yapılmaktadır. Tablo 5.22.'de bant genişliği parametresi için yapılan test sonuçları gösterilmektedir.

Tablo 5.22. Bant Genişliği Parametresi Kestirim Sonuçları

Radar No	Parametreler				
	RF (GHz)	Max. Menzil (km)	Menzil Çözünürlük(m)	Bant Genişlik (MHz)	Kestirim BG (MHz)
1	8.6	50	20	7.5	7.44
2	7.5	25	10	15	14.88
3	9	45	20	7.5	7.44
4	8.6	25	25	6	5.95
5	9.2	30	15	10	9.92
6	6.3	20	5	30	29.76
7	8.2	15	5	30	29.76
8	7.3	30	10	15	14.88

Şekil 5.9.'daki sonuçlara göre bant genişliği değeri %0.78 mutlak hata oranı ile tahmin edilmektedir. Bu değer yüksek doğrulukta bir başarımla bant genişliği parametre tahmininin yapıldığı göstermektedir.



Şekil 5.9. Bant Genişliği Kestirim Doğruluk Başarımları

5.3.3. Merkez Frekansı Parametre Kestirim Testleri

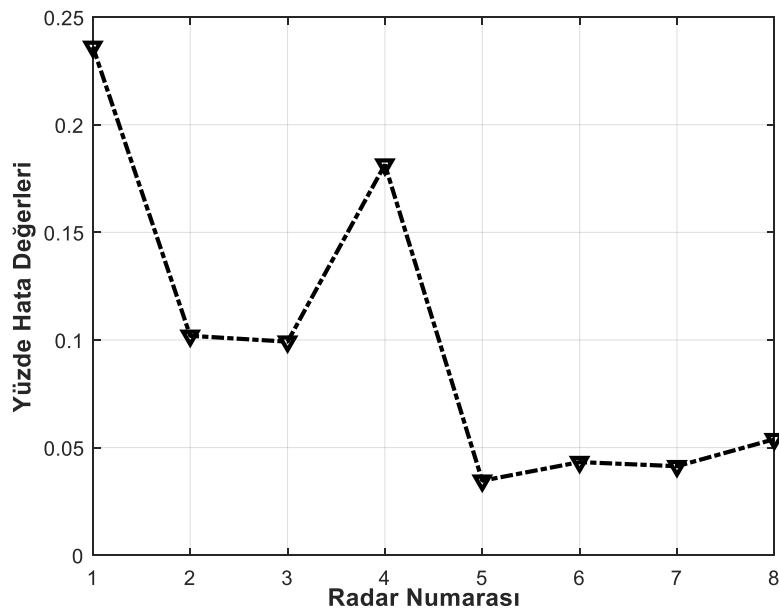
FMSD radar sinyalinde merkez frekansı radarın hangi bant özelliğine sahip olduğunu gösteren kritik bir parametredir. Özellikle yayın sınıflandırmada girdi olarak kullanılan bir

ayırıştırma sonucudur. FMSD radar sinyalleri özellikle LPI radar yapısında kullanılmakta [4] olup tez çalışmamızda ilgilenilen bir radar yapısı değildir. İlgilenilen FMSD radar sinyalleri genellikle füze arayıcı başlıklarda (seeker) yer alan radar yapısında yer almaktadır [6]. Tablo 5.23.'te merkez frekansı kestirim sonuçları gösterilmektedir.

Tablo 5.23. Merkez Frekansı Parametresi Kestirim Sonuçları

Radar No	Parametreler			
	RF (GHz)	Max. Menzil (km)	Menzil Çözünürlük(m)	Kestirim RF (GHz)
1	8.6	50	20	8.61
2	7.5	25	10	7.51
3	9	45	20	9.00
4	8.6	25	25	8.61
5	9.2	30	15	9.21
6	6.3	20	5	6.32
7	8.2	15	5	8.22
8	7.3	30	10	7.31

Şekil 5.10.'daki sonuçlara göre merkez frekansı değeri maksimum %0.25 ve ortalama %0.1 mutlak hata oranı ile tahmin edilmektedir. Bant genişliği için yapılan hatadan daha düşüktür.



Şekil 5.10. Merkez Frekans Kestirim Doğruluk Başarımları

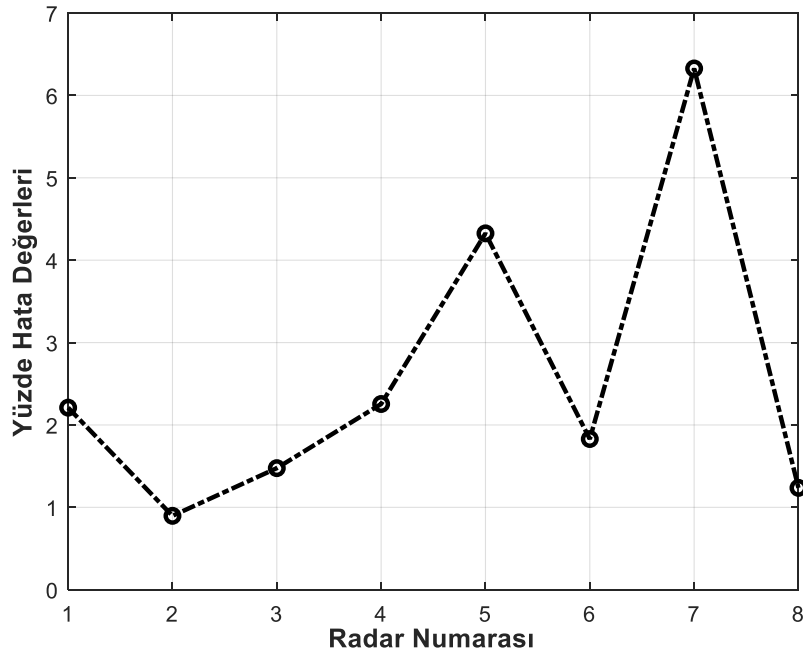
5.3.4. Süpürme Süresi Parametre Kestirim Testleri

Salınım eğrisini bulabilmek ve FMSD sinyal dalga şeklini çözebilmek için önemli bir parametre olan süpürme süresini tahmin etmek üzere zaman-frekans analizleri ile kestirim yapılmaktadır. Tablo 5.24.'te görüldüğü üzere kestirim sonuçları görülmektedir.

Tablo 5.24. Süpürme Süresi Parametre Kestirim Sonuçları

Radar No	Parametreler				
	RF (GHz)	Max. Menzil(km)	Menzil Çözünürlük(m)	Süpürme Süresi(μ s)	Süpürme Süre Tahmini (μ s)
1	8.6	50	20	1833	1799
2	7.5	25	10	917	903
3	9	45	20	1650	1545
4	8.6	25	25	917	877
5	9.2	30	15	1100	1086
6	6.3	20	5	733	717
7	8.2	15	5	550	537
8	7.3	30	10	1100	1090

Şekil 5.11.'de görüldüğü üzere ortalama %3.5 mutlak hata oranı ile süpürge süresi tahmin edilmektedir. Diğer parametrelere göre daha yüksek bir hata oranı ile kestirim yapılmıştır.



Şekil 5.11. Süpürme Süresi Kestirim Başarımları

5.3.5. Salınım Yönü Parametre Kestirim Testleri

Tablo 5.25.'te görüldüğü üzere salınım yönleri %100 doğrulukla bulunmuştur. FMSD radar sinyalinin frekans değişim yönü ile ilgili kritik bir bilginin sunulduğu salınım yönü ile radar sinyal sınıflandırmada önemli bir sonuç elde edilmiştir.

Tablo 5.25. Salınım Yönü Parametre Kestirim Sonuçları

Radar No	Parametreler				
	RF (GHz)	Max. Menzil(km)	Menzil Çözünürlük(m)	Salınım Yönü	Salınım Yönü (Hesaplanan)
1	8.6	50	20	A	A
2	7.5	25	10	A	A
3	9	45	20	Y	Y
4	8.6	25	25	Y	Y
5	9.2	30	15	A	A
6	6.3	20	5	Y	Y
7	8.2	15	5	Y	Y
8	7.3	30	10	A	A

5.4. Sonuçlar ve Tartışma

Gerçekleştirilen benzetimler ve test sonuçları ile 3B kümeleme ve 2B kümeleme özellikle BBE yöntemi kullanımıyla başarılı bir şekilde yapılmaktadır. Kümelemenin getirdiği başarımla DTA bilgileri çeşitli senaryolar için gerçekleştirilen testlerde yüksek doğruluk performansı ile elde edilmiştir. Sabit ve Basamaklı DTA örneklerinin birlikte kullanıldığı benzetimler ile önerilen metodun performansının üstünlüğü kanıtlanmıştır.

FMSD radar sinyalleri için yapılan benzetimlerde bant genişliği, merkez frekansı ve salınım yönü hesaplamada başarılı sonuçlar alınırken süpürge süresi parametre çıkarımında diğer parametre tahminlerine kıyasla yüksek hata ile kestirim gerçekleşmiştir. Parametre çıkarımında kullanılan zaman-frekans çözünürlükleri kestirim başarımını önemli ölçüde etkilemektedir. Bağlantılı Bileşen Etiketleme tabanlı kümelemenin getirdiği gruplama

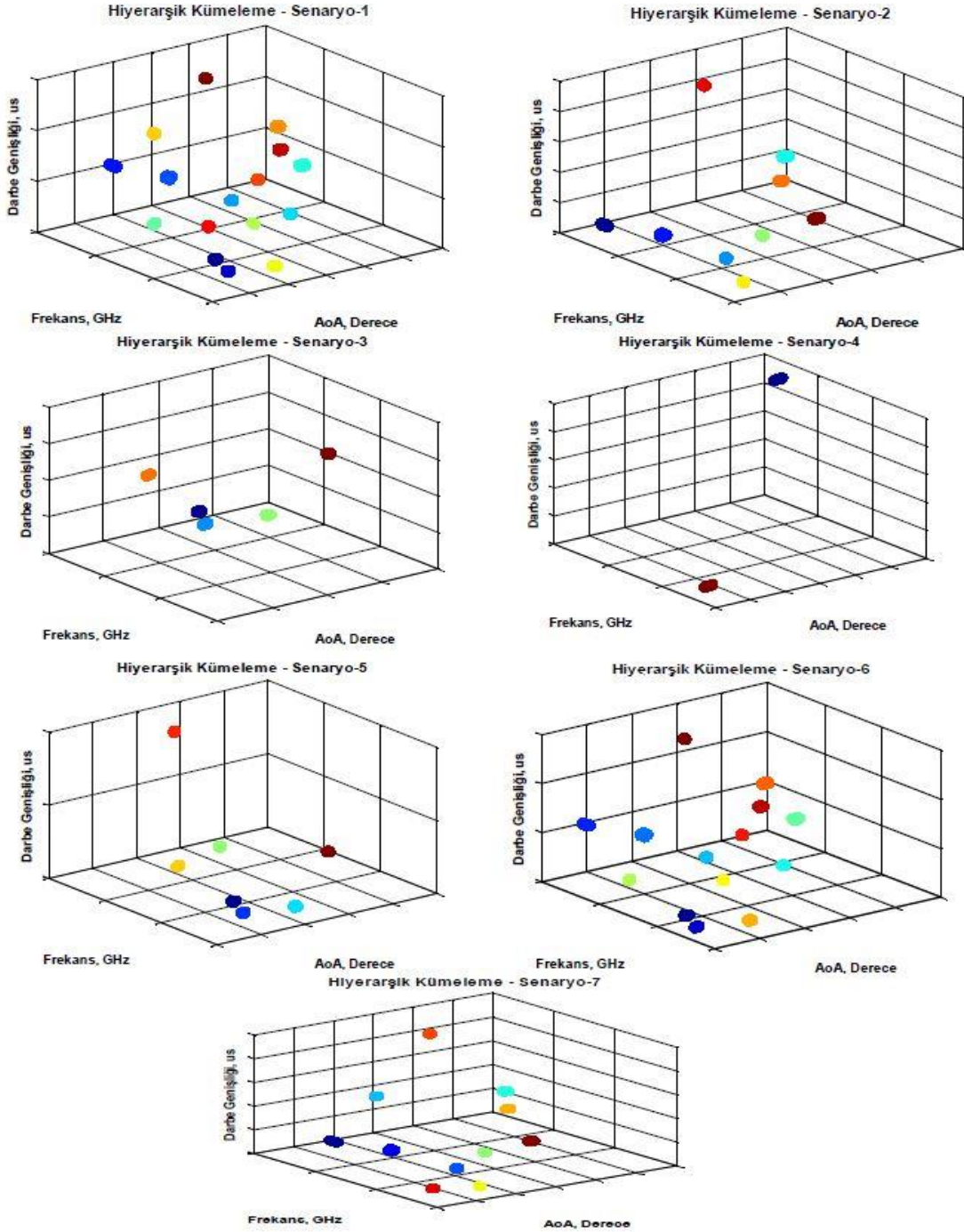
başarımını hiyerarşik kümeleme yöntemi ile kıyaslayarak sonuçlar tartışılmaktadır. Hiyerarşik kümeleme en temel ve doğruluk başarımı yüksek bir kümeleme yöntem olduğu için karşılaştırma işleminde kullanılmaktadır [43].

5.4.1. Hiyerarşik Kümeleme

DTA ayrıştırma sırasında darbeleri radar sinyalleri için yapılan kümeleme işleminde 3B BBE yöntemi ile sonuç alınmaktadır. Bu yöntemin haricinde geleneksel kümeleme yaklaşımı ile kümeleme testi gerçekleştirilerek başarımlar karşılaştırması nezdinde yapılan tartışmalar bu bölümde anlatılmaktadır. Hiyerarşik kümeleme yöntemi sayesinde ilgili özneliliklerin tabanında benzeyen veriler bir küme ağacının içinde bir dal oluşturmaktadır. Hiyerarşik kümeleme 3 temel işlem aşaması ile gerçekleştirilerek gruplamalar yapılmaktadır:

- I. Öklit uzaklık ile kümeleme işlemine girdi olan verideki her nesne çifti arasındaki benzerlik ve farklılıklar çıkarılmaktadır.
- II. Birbirine yakın nesne çiftleri birbirine bağlanarak küme ağacını oluşturmaktadır. Nesneler ikili gruplar şeklinde eşlendikçe kümeler daha büyük hale getirilmektedir.
- III. Hiyerarşik yapıda dallar belirlenerek her bir ağaç dalı küme olarak kararlaştırılmaktadır.

Geliş açısı, radyo frekansı ve darbe genişliği metrikleri ile her bir geliş zamanı değerindeki DTK bilgisi hiyerarşik kümelemede kullanılmıştır. Şekil 5.12.'de hiyerarşik kümeleme sonuçları Bölüm 5.2.'de tanımlanan 7 adet senaryo için gösterilmektedir.



Şekil 5.12. 7 Adet DTA Ayırıştırma Senaryosu için Hiyerarşik Kümeleme Sonuçları

Kümeleme başarımı tıpkı BBE yönteminde olduğu gibi ve Şekil 5.12.'de gösterildiği üzere %100 olup yüksek doğruluk ile çözüm gerçekleştirilmiştir. Fakat detaylı analizler ışığında hiyerarşik kümeleme yöntemi küme sayısı ve veri sayısı arttıkça çok sayıda kümeleme adımı gerçekleştireceğinden hesaplama yükünün artmasında neden olmuştur.

5.4.2. Karşılaştırma

Karşılaştırma metriği algoritma çalışma süresi alınmıştır. Kümeleme doğruluğu her iki yöntemde de aynı ve oldukça başarılı olduğundan algoritma çalışma süresi performansı ile ilgilenilmektedir. Tablo 5.26.'da ortalama süre ölçümleri 7 adet senaryo için hiyerarşik kümeleme ve BBE yöntemi için verilmiştir.

Tablo 5.26. Hiyerarşik Kümeleme (HK) ile BBE Kümeleme Başarım Karşılaştırması

Senaryo No	Küme Sayısı	Kümeleme Başarımı		Çalışma Süresi (ms)		Hızlanma
		HK	BBE	HK	BBE	
1	16	%100	%100	5435	411	13.23x
2	9	%100	%100	1256	129	9.74x
3	5	%100	%100	650	78	8.33x
4	2	%100	%100	36	12	3x
5	7	%100	%100	1159	124	9.35x
6	14	%100	%100	4195	341	12.3x
7	11	%100	%100	1956	179	10.93x

Tablo 5.26.'da karşılaştırmalar sonucunda ortalama 9.56x~10x kat daha hızlı bir şekilde BBE yöntemi ile kümeleme işlemi gerçekleştirilmektedir. BBE yöntemi ile aynı doğruluk sonucu veren hiyerarşik kümeleme yöntemi hesaplama yükü açısından dezavantaja neden olmaktadır. BBE yönteminin grafik işlemci gibi büyük boyutlu verilerin işlenmesinde paralel hesaplama olanağı sunan birimlerde hızlı bir şekilde yapılarak [52] gerçek zamanlı sinyal ayrıştırma işlemlerinde kullanılması mümkün hale gelmektedir. BBE yöntemi hiyerarşik yöntemle göre ikili eşleme yerine bölgesel eşleme yaptığı için hesaplama sayısını azaltmaktadır.

6. DEĞERLENDİRMELER

Tez çalışmasında elektronik destek alıcı sisteminde sinyal ayrıştırma bloğu için detaylı incelemeler yapılmış olup kümeleme ve parametre çıkarım konusunda algoritma yöntemleri çalışılmıştır. Kümeleme işlemi öncesi girdi verilerinin teorik incelenmesi ve oluşum şekilleri hakkında literatür çalışmaları detaylı analiz edilmiştir.

Darbeli radar sinyalleri incelenerek Darbe Tekrarlama Aralığı (DTA) örnekleri detaylıca incelenmiştir. Çalışmada Sabit ve Basamaklı DTA tipleri için analizler gerçekleştirilirken, Frekans Modülasyonlu Sürekli Dalga radar sinyalleri için ise doğrusal frekans modülasyonlu radar sinyalleri için inceleme ve veri oluşturmalar gerçekleştirilmiştir. Radar İkaz Alıcı sistemi, darbe üstünde darbe (PoP) problemi ve çözüm önerileri ile sinyal ayrıştırma bloğu girdi verileri analiz edilmiştir. Darbeli radar sinyalleri için Darbe Tanımlayıcı Kelime (DTK) tablosu parametreleri ve FMSD radar sinyalleri için sinyal tanımlayıcı kelime parametreleri incelenmiş olup veri seti içerisindeki kullanımları çalışmada gösterilmiştir.

Literatürde sıkça kullanılan örüntü kümeleme yöntemleri açıklanmıştır. Kümeleme yöntemleri olarak uzaklık tabanlı kümeleme ve K-ortalama kümeleme yaklaşımları için bilgiler verilmiştir. Sinyal ayrıştırma yaklaşımları olan Ardışık Türev Histogram, Kümülatif Türev Histogram ve DTA Dönüşüm yöntemleri için şematik ve ayrıntılı açıklamalar sunulmuştur.

İlgili çalışmaların inceleme kısmında elektronik harp kavramı ve bileşenleri, darbeli radar sinyal ayrıştırma çalışmaları, FMSD radar sinyal ayrıştırma ve parametre çıkarım çalışmaları ve radar sinyallerinin kümelenmesi konusundaki makale, geçmiş tez, bildiri ve teknik raporlar için değerlendirmeler yapılmıştır. Değerlendirmeler sonucunda yöntemlerin tarihsel gelişimi, günümüz teknolojilerindeki yenilikçi uygulamalar ve başarımları konusundaki yorumlara yer verilmektedir.

Kümeleme işlemi için önerilen Bağlantılı Bileşen Etiketleme tabanlı Kümeleme yaklaşımının ayrıntıları tez çalışmasında bir bölüm olarak verilmiştir. Bağlantılı Bileşen Etiketleme'nin teorik anlatımı sunulmuş olup darbeli radar sinyallerinde ve FMSD radar sinyallerindeki kullanımı ve algoritma yaklaşımları anlatılmıştır. Darbeli radar sinyallerinde geliş açısı, radyo frekansı ve darbe genişliği parametreleri için 3B kümeleme gerçekleştirilirken, FMSD radar sinyallerinde geliş açısı ve radyo frekansı tabanlı 2B kümeleme yapılmaktadır.

Darbeli radar sinyalleri için 3B kümeleme işleminden sonra SDIF yöntemi ile DTA çıkarımı yapılmıştır. Sabit, 2-Basamaklı DTA ve 3-Basamaklı DTA radar sinyallerinin olduğu bir veri/test ortamında 7 adet senaryo hazırlanmış olup %100 başarımla sonuçlar alınmıştır. Başarılı bir kümeleme işleminin getirdiği kazanç DTA çıkarımına böylece yansımıştır. FMSD radar sinyalleri için 8 adet radar sinyali tanımlanarak 2B kümeleme işlemleri yapılmıştır. Başarılı bir kümeleme sonucunda bant genişliği, merkez frekansı, süpürme süresi ve salınım yönü parametreleri için kestirimler yapılmıştır. Kestirim işlemleri için her bir küme içerisinde zaman-frekans analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bant genişliği için yapılan testlerde %0.78 hata oranı ile tahmin yapılırken, merkez frekansı için %0.25 hata ile tahmin gerçekleştirilmektedir. Süpürge süresi için ortalama %3.5 hata oranı kestirim yapılmaktadır. Bu hata oranı diğer parametre kestirimlerindeki orana göre yüksektir. Salınım yönü ise hata yapılmadan 8 adet radar sinyali için başarılı bir şekilde bulunmuştur.

Sonuçlar değerlendirildiğinde literatürde sıkça kullanılan hiyerarşik kümeleme yöntemi ile karşılaştırma yapmanın tez çalışmasında önerilen kümeleme yöntemini pekiştireceği düşünülmüştür. Hiyerarşik kümeleme ile Bağlantılı Bileşen Etiketleme tabanlı kümeleme kıyaslanmıştır. Kıyaslama sonucunda doğruluk performanslarının aynı olmasına rağmen

hıyerarşik kümeleme yavaş çalışmaktadır. CPU’da yapılan testlerde Bağlantılı Bileşen Etiketleme tabanlı kümeleme yöntemi ortalama 10x hızlı kümeleme yapmaktadır. DTK satırı artıkça hızlanma makası da artmaktadır. Gerçek zamanlı senaryolar için Bağlantılı Bileşen Etiketleme yönteminin kazanç getireceği karşılaştırma sonucunda görülmüştür.

Gelecek çalışmalarda süpürme süresi kestiriminde hata oranını azaltacak iyileştirmeler üzerinde çalışmalar planlanmakta olup yapay zekâ destekli sinyal ayrıştırma modelleri konusunda araştırmalar hedeflenmektedir. Ayrıca Bağlantılı Bileşen Etiketleme tabanlı kümeleme için grafik işlemci biriminde hesaplamalar gerçekleştirilerek gerçek zamanlı RİA sistemlerine yönelik pratik sonuçların sunulması planlanmaktadır.

7. KAYNAKLAR

- [1] M. A. Richards, Fundamental of Radar Signal Processing, McGraw-Hill Professional, 2005.
- [2] M.I. Skolnik, Introduction to Radar Systems, McGraw-Hill Professional, 2003.
- [3] A.G. Pakfiliz, Elektronik Harp, Palme Yayınevi, 2021.
- [4] M. Jankiraman, FMCW Radar Design, Artech House, 2018.
- [5] S. Robertson, Practical ESM Analysis, Artech House, 2019.
- [6] R.G. Wiley, ELINT: The Interception and Analysis of Radar Signals, Artech House, 2006.
- [7] S.A. Vakin, L.N. Shustov and R.H. Dunwell, Fundamentals of Electronic Warfare, Artech House, 2001.
- [8] M.K. Aslan, Emitter Identification Techniques in Electronic Warfare, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2006.
- [9] G. Shakhnarovich, T. Darrell and P. Indyk, Nearest-Neighbor Methods in Learning and Vision, MIT Press, 2006.
- [10] L. Rabiner and B. Juang, "An introduction to hidden Markov models," in IEEE ASSP Magazine, vol. 3, no. 1, pp. 4-16, Jan 1986.
- [11] R. Xu and D. Wunsch, "Survey of clustering algorithms", IEEE Transactions on Neural Networks, vol. 16, no. 3, pp. 645-678, May 2005.
- [12] G.A. Carpenter, S. Grossberg and D.B. Rosen, "Fuzzy ART: Fast stable learning and categorization of analog patterns by an adaptive resonance system", Neural Networks, vol.4, pp. 759-771, 1991.

- [13] P.E. Danielsson, "Euclidean distance mapping", Computer Graphics and Image Processing, vol.14(3), pp. 227-248, 1980.
- [14] P.J.F. Groenen, K. Jajuga, "Fuzzy clustering with squared Minkowski distances", Fuzzy Sets and Systems, vol.120(2), pp. 227-237, 2001.
- [15] A. Likas, N. Vlassis and J.J. Verbeek, "The global K-means clustering algorithm", Pattern Recognition, vol.36(2), pp.451-461, 2003.
- [16] S. D'Agostino, G. Foglia and D. Pistoia, "Specific Emitter Identification: Analysis on real radar signal data", 2009 European Radar Conference, pp. 242-245, 2009.
- [17] D.J. Milojević, B.M. Popovic, "Improved algorithm for the deinterleaving of radar pulses", IEE Proceedings F. vol. 139, no. 1, pp. 98-104, 1992.
- [18] S. Lin, M. Thompson, S. Davezac and J.C.J. Sciortino, "Comparision of time of arrival vs. multiple parameter based radar pulse train deinterleavers", Proceeding of SPIE, vol.6235, 2006.
- [19] A. Mahdavi and A. M. Pezeshk, "A Fast Enhanced Algorithm of PRI Transform," 2011 Sixth International Symposium on Parallel Computing in Electrical Engineering, pp. 179-184, 2011.
- [20] Z. Liu and P. S. Yu, "Classification, Denoising, and Deinterleaving of Pulse Streams With Recurrent Neural Networks," in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 55, no. 4, pp. 1624-1639, Aug. 2019.
- [21] D. Griffin and Jae Lim, "Signal estimation from modified short-time Fourier transform," in IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 32, no. 2, pp. 236-243, April 1984.
- [22] J. Illingworth, J. Kittler, "A survey of the hough transform", Computer Vision, Graphics, and Image Processing, vol.44(1), pp.87-116, 1988.

- [23] V. Dinç, "Elektronik Harp Teknikleri", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2010.
- [24] A. De Martino, "Introduction to Modern EW Systems", Artech House, 2nd Ed., 2018.
- [25] R.A. Poisel, "Electronic Warfare Receivers and Receiving Systems", Artech House, 2014.
- [26] C. M. Kwak, "Application of DRFM in ECM for pulse type radar," 2009 34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, pp. 1-2, 2009.
- [27] L. Gherman, "Electronic Warfare in Information Age", Review of the Air Force Academy 3, 27, 2014.
- [28] C. L. Davies, P. Hollands, "Automatic processing for ESM", IEE Proceedings F: Communications Radar and Signal Processing, vol. 129, no. 3, pp. 164–171, 1982.
- [29] D. R. Wilkinson, A.W. Watson. "Use of metric techniques in ESM data processing." IEE Proceedings F-Communications, Radar and Signal Processing. Vol. 132. No. 4. IET, 1985.
- [30] H.K. Mardia, "New Techniques for the deinterleaving of repetitive sequences", IEEE Proc. F, Commun. Radar & Signal Process., 136,(4), pp. 149-154, 1989.
- [31] K. Nishiguchi, M. Kobayashi, "Improved algorithm for estimating pulse repetition intervals", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 36, (2), pp. 407–421, 2000.
- [32] A.W. Ata'a, S.N. Abdullah, "Deinterleaving of radar signals and PRF identification algorithms", IET Radar Sonar Navig., 1, (5), pp. 340–347, 2007.
- [33] K. Gencol, A. Kara, N. At, "Improvements on deinterleaving of radar pulses in dynamically varying signal environments", Digital Signal Process., 69, 2017.
- [34] Z. Liu and P. S. Yu, "Classification, Denoising, and Deinterleaving of Pulse Streams

With Recurrent Neural Networks," in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 55, no. 4, pp. 1624-1639, Aug. 2019.

- [35] V. Iglesias, J. Grajal, P. Royer, M. A. Sanchez, M. Lopez-Vallejo and O. A. Yeste-ojeda, "Real-time low-complexity automatic modulation classifier for pulsed radar signals," in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 51, no. 1, pp. 108-126, January 2015.
- [36] S. Barbarossa and A. Zanalda, "A combined Wigner-Ville and Hough transform for cross-terms suppression and optimal detection and parameter estimation", 1992 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, pp. 173-176 vol.5, 1992.
- [37] C. De Luigi and C. Jauffret, "Estimation and classification of FM signals using time frequency transforms", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 41, no. 2, pp. 421-437, April 2005.
- [38] A. Y. Erdogan, T. O. Gulum, L. Durak-Ata, T. Yildirim and P. E. Pace, "FMCW Signal Detection and Parameter Extraction by Cross Wigner–Hough Transform", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 53, no. 1, pp. 334-344, Feb. 2017.
- [39] Q. Guo, X. Yu and G. Ruan, "LPI Radar Waveform Recognition Based on Deep Convolutional Neural Network Transfer Learning", Symmetry , 11, 540, 2019.
- [40] C. Szegedy, V. Vanhoucke, S. Ioffe, J. Shlens and Z. Wojna, "Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision," 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 2818-2826, 2016.
- [41] K. He, X. Zhang, S. Ren and J. Sun, "Deep Residual Learning for Image Recognition," IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 770-778, 2016.
- [42] K. K. Guner, T. O. Gulum and B. Erkmen, "FPGA-Based Wigner–Hough Transform

- System for Detection and Parameter Extraction of LPI Radar LFM CW Signals," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 70, pp. 1-15, 2021.
- [43] J. Dudczyk, "Radar Emission Sources Identification Based on Hierarchical Agglomerative Clustering for Large Data Sets", Journal of Sensors, 2016.
- [44] Kang, S.-Q., et al., "Sequential extraction and recognition of pulse group structure for multi-function radar," IET Radar Sonar Navig., pp. 1–14, 2021.
- [45] Saber Radar Sistemi, https://en.wikipedia.org/wiki/Saber_Radar, Çevrimiçi, Son Erişim: Mart 2022.
- [46] Arthur Radar Sistemi, [https://en.wikipedia.org/wiki/arthur_\(radar\)](https://en.wikipedia.org/wiki/arthur_(radar)), Çevrimiçi, Son Erişim: Mart 2022.
- [47] TPY-X Radar Sistemi, https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed-martin/rms/documents/ground-based-air-surveillance-radars/TPY-X_TPY-4_brochure.pdf, Çevrimiçi, Son Erişim: Mart 2022.
- [48] TPS-77 Radar Sistemi Özellikleri, https://lockheedmartin.com/content/dam/lockheed-martin/rms/documents/ground-based-air-surveillance-radars/TPS-77_SPEC_sheet.pdf, Çevrimiçi, Son Erişim: Mart 2022.
- [49] SMART-L Radar Sistemi, <https://en.wikipedia.org/wiki/SMART-L>, Çevrimiçi, Son Erişim: Mart 2022.
- [50] M. Yamazaki, "Combat systems of modern Japanese destroyers.", Ships of the World, Kainjin-Sha (748) : 98-107, 2011.
- [51] R. Lumia, " A new three-dimensional connected components algorithm", Computer Vision, Graphics, and Image Processing, vol.23(2), pp. 207-217, 1983.

- [52] H. M. Alnuweiti and V. K. Prasanna, "Parallel architectures and algorithms for image component labeling," in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 14, no. 10, pp. 1014-1034, Oct. 1992.

