

# Bağlı bileşen etiketleme tabanlı öbekleme ile DTA ayrıştırımı PRI deinterleaving with connected component labeling-based clustering

Neslihan FİŞNE<sup>1\*</sup> , Ahmet Güngör PAKFİLİZ<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Başkent Üniversitesi, Ankara, Türkiye.  
neslihanfisne@gmail.com, apakfiliz@baskent.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 03.03.2022  
Kabul Tarihi/Accepted: 11.11.2022

Düzeltilme Tarihi/Revision: 03.09.2022

doi: 10.5505/pajes.2022.82274  
Araştırma Makalesi/Research Article

## Öz

Askeri operasyonlarda kullanılan hava platformları tehdit radarları tespit etmek için radar ikaz alıcı sistemlerine sahiptir. Muharebe ortamında görev yapan bir uçak için radar sinyallerin tespit edilmesi, sınıflandırılması, radar yayın kaynaklarının kimliğinin ve kabiliyetinin belirlenmesi kritik hale gelir. Bu çalışmada, darbeli radar sinyalleri için sinyal ayrıştırma problemine yönelik bilgisayarlı görü tabanlı, bağlı bileşen etiketleme yöntemi ile yenilikçi bir çözüm önerilmektedir. Önerilen çözüm ile sinyallerin varış açısı, radyo frekansı, darbe genişliği parametreleri kullanılarak oluşturulan üç boyutlu görüntü matrisi üzerinde otomatik olarak öbekleme gerçekleştirilmektedir. Öbekleme ardından her bir kümede varış zamanı analizi ile darbe tekrarlamaları (DTA) ayrıştırma sağlanır. Bu çalışmada darbe üzerine darbe durumlarını içeren farklı sentetik radar veri setleri kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar sonucunda DTA doğruluk analizleri yapılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Radar ikaz alıcısı, Sinyal ayrıştırma, Bağlı bileşen etiketleme, Darbe tekrarlamaları aralığı.

## Abstract

Air platforms use radar warning receiver systems to detect threat radars in military operations. It is critical for an aircraft operating in a hostile environment to detect and classify radar signals and determine radar emitters' identity and capability. This study proposes an innovative solution to the signal separation problem for pulse radar signals by the computer vision-based connected component labeling method. With the proposed solution, clustering is performed automatically on the three-dimensional image matrix created by using the parameters of the arrival angle, radio frequency, pulse width of the signals. After clustering, the pulse repetition interval (PRI) deinterleaving is provided by the time of arrival analysis in each cluster. Also, various simulations were carried out using different synthetic radar datasets containing pulse-on-pulse states. In the simulations, PRI accuracy analyzes were performed.

**Keywords:** Radar warning receiver, Signal deinterleaving, Connected component labeling, Pulse repetition interval.

## 1 Giriş

Harekât alanında hava platformları için en yaygın tehditler radar temelli sistemler olup, kullanılan elektronik harp karşı tedbir metodlarının geliştirilmesinde büyük önem taşırlar. Hava savunma top ve füze sistemleri, sınır ve sahil gözetleme sensörleri, hava keşif gözetleme platformlarının algılayıcı sistemlerinde radar tabanlı sistemler bulunmaktadır. Elektronik harp (EH) kendini koruma sistemleri kullanan hava platformları, hedefleri tespit etmek ve karşı tedbir uygulamak için elektronik destek (ED), elektronik taarruz (ET) ve karşı tedbir salma sistemlerine sahiptir. Bu hava platformları; savaş uçağı, nakliye uçağı, helikopter ve insansız hava aracı (İHA) olabilir. Hava platformlarındaki kendini koruma EH sistemlerindeki ED sistemleri radar ikaz alıcı (RİA) sistemlerini ve bunların yeniden programlanmasını içerir. Bir RİA alıcısına, frekans kapsama durumuna göre, aynı anda birçok yayın kaynağından değişik radar sinyali ulaşır. RİA sistemi bir dizi donanım ve fonksiyonel yapılmından oluşur. RİA'daki donanım antenler, filtreler, yükselteçler, alıcı ve sinyal işleme faaliyetleri için bilgisayar alt yapısından oluşur. RİA'da gerçekleştirilen fonksiyonlar ise; alıcıya gelen radar sinyallerinin tespit edilmesi, sınıflandırılması, tanımlanması işlemlerini içerir. Tanımlanan sinyaller Görev Veri Dosyasına (GVD) iletilerek buradaki veriler ile karşılaştırılır ve kimliklendirilir [2].

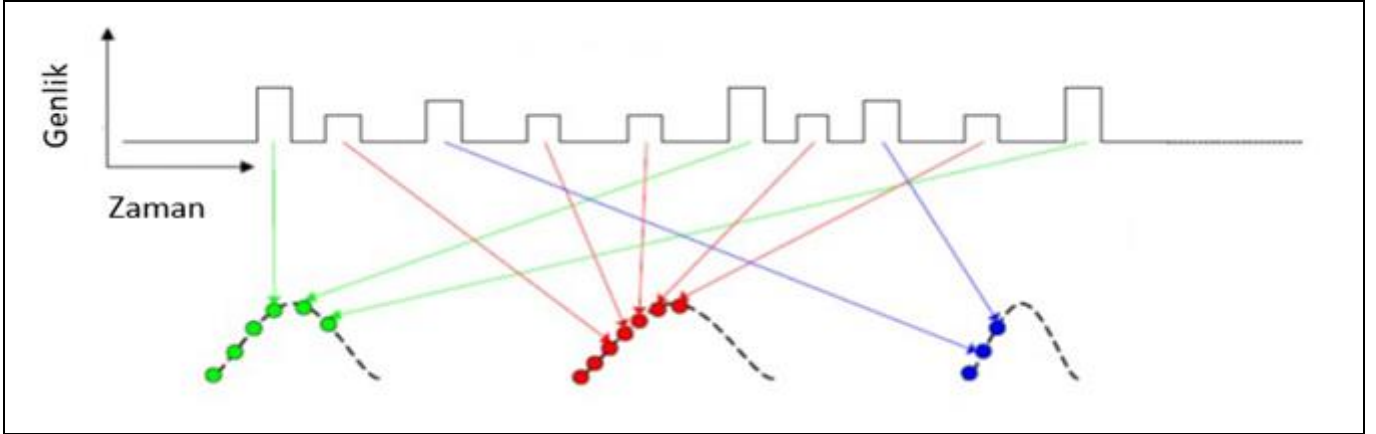
Alıcıya ulaşan sinyallerden radar sistemlerinin tespit edilmesi ve tanımlanması için darbe dizileri kullanılır. Her yayın kaynağının ortama yaydığı darbe dizisi kendine özgüdür ve

yayın kaynağını kimliklendirmek için bu darbe dizilerinin belirlenmesi gerekir. Sinyal ayrıştırma, birden fazla sinyalden gelen darbeleri içeren bir darbe akışından, tek bir yayın kaynağından gelen darbelerinin belirlenerek ayrıştırılması işlemidir [3]. Başka bir deyişle ortamdaki yayın kaynaklarının varlığını belirlemek için gelen akıştan tutarlı darbe dizi grupları elde etmek gerekir. Bu süreç ortamda az sayıda radar sinyali olduğu durumlarda daha kolay yapılabilirken, elektromanyetik ortamın yoğun olduğu, farklı kaynaklara ait darbelerin zaman içinde çakıştığı ve darbeler arasında kayıp darbe sorunun olduğu durumlarda zorlaşmaktadır.

Darbeler, sistem alıcısına ulaştıkları zaman göre (geliş zamanı, GZ) darbe akışında yer alır. Şekil 1'de birden fazla kaynaktan gelen darbe dizisinin bulunduğu bir darbe akışı gösterilmektedir. Analog olarak alınan darbe akışı sayısal forma dönüştürülerek her bir darbe dizisi için Darbe Tanımlayıcı Kelime (DTK)'yi oluşturulur. DTK'lar Tablo 1'de yer alan parametrelerden oluşmaktadır.

Sinyal ayrıştırma işlemi oluşturulan bu DTK'lar kullanılarak yapılmaktadır. Öncelikle istatistiksel olarak aynı yayın kaynağından gelme olasılığı yüksek olan DTK'lar bir araya getirilerek kümeleme yapılır. Kümeleme darbe dizilerinin bir ya da birden fazla parametresi kullanılarak yapılabilir. Fakat kümeleme sırasında kullanılan ilave parametreler kümeleme başarısını artırmaktadır. Örneğin, darbelerin sadece frekans parametrelerine göre sınıflandırılması durumunda, frekansta örtüşme olabilecek ve başarılı bir kümeleme sağlanmayacaktır.

\*Yazışılan yazar/Corresponding author



Şekil 1. Alıcıdaki darbe dizilerinin gösterimi.

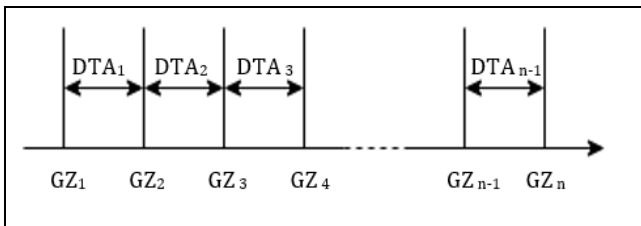
Figure 1. The demonstration of pulse arrays in the receiver.

Tablo 1. DTK Bileşenleri.

Table 1. PDW components.

Parametreler	Kısaltmalar
Darbe Geliş Zamanı	GZ (ToA)
Radyo Frekansı	RF (RF)
Darbe Genişliği	DG (PW)
Darbe Geliş Açısı	GA (AoA)
Darbe Genliği	DA (PA)

Başarılı bir şekilde yapılan kümeleme, sinyallerin doğru bir şekilde ayrıştırılması için oldukça önemli olsa da tek başına yeterli olmamaktadır. Radar kimliğini belirlemek için gerekli olan DTA parametresi, tek bir radardan alınan darbeler arasındaki GZ farkından hesaplanır. Bu yüzden sinyallerin DTA değerlerine ulaşmak için GZ'ye göre analiz yapmak gerekmektedir. Radar ED sistemlerinin çoğu sinyal ayrıştırma için kümeleme sonrası DTA bilgisini elde etmek için geliş zamanına dayalı histogramları kullanmaktadır [1]. DTA-GZ arasındaki bu ilişki Şekil 2'de görülebilmektedir.



Şekil 2. DTA-GZ arasındaki ilişki.

Figure 2. The relationship between PRI and ToA.

Bu çalışmada sinyal ayrıştırma için görüntü işleme tabanlı bir yöntem önerilmektedir. Yöntem ile gelen sinyalin GA, RF, DG parametreleri kullanılarak üç boyutlu (3-B) görüntü matrisi oluşturulur. 3-B görüntü matrisinde bağlı bileşen etiketleme ile öbikleme sağlanır. Öbikleme sonrası DTA bilgisine ulaşmak için GZ analizi sıralı türev (STÜR) algoritması ile gerçekleştirilir ve darbeleri tanımlayan DTA parametresi elde edilir. Doğruluk testleri için sabit ve aşamalı DTA'lardan oluşan sentetik radar veri setleri oluşturulmuştur. Testler sonucunda bu çalışmada önerilen bağlı bileşen etiketleme tabanlı öbikleme sayesinde DTA ayrıştırma yüksek başarımla gerçekleştirilmektedir.

## 2 İlgili çalışmalar ve motivasyon

Sinyal ayrıştırma üzerine yapılan çalışmalara bakıldığında karşımıza birçok farklı yöntem çıkmaktadır. İki temel yaklaşımla sinyal ayrıştırma çözümü gerçekleştirilmektedir. Öncesinde yoğun darbe çeşitliliği içeren DTK tablosu kategorize olacak şekilde öbeklere ayrılmaktadır. Sonrasında her bir öbek içerisinde periyot analizleri yapılarak DTA ayrıştırması gerçekleştirilir. Bu iki temel yaklaşım için literatür çalışmaları incelenmiştir.

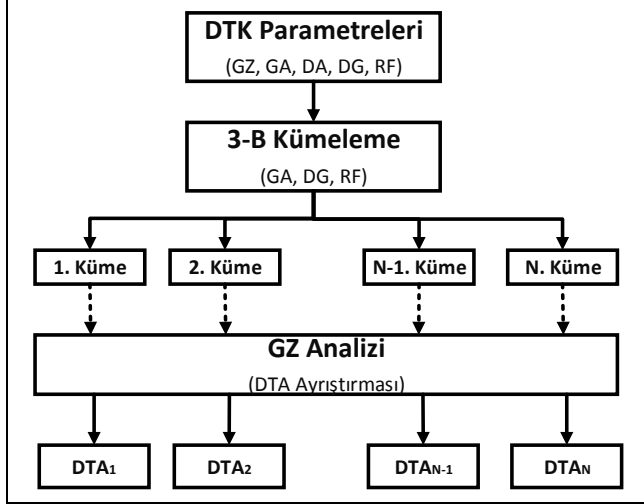
Günümüzde de DTK içerisinde yer alan ve kullanılan darbe parametreleri Davies ve Hollands tarafından 1982'de yaptıkları çalışmaları ile önerilmiştir [5]. Bu parametreleri dikkate alarak metrik tabanlı kümeleme teknikleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır [6]. Mardia, DTA ayrıştırmasına yönelik yapmış olduğu çalışmasında darbelerin periyodikliğini bulmak için GZ farklarından yararlanmış olup histogram yardımıyla dizi aramada gerekli hesaplamaları azaltmak için kümülatif türev (KTÜR) algoritmasını önermiştir [7]. Anderson ve arkadaşları yapay sinir ağlarını kullanarak radar darbe serpiştirme ayırma ve tanımlama için ilk akıllı algoritmayı sunmuştur [8]. Milojevic tarafından KTÜR algoritmasının gerçek zamanlı özelliğini geliştirmek için, STÜR histogramı algoritması önerilmiştir [9].

Geleneksel çalışmaların temelinde yakın dönem yenilikçi çalışmalar incelenmiştir. Kayıp darbe durumlarının ortaya çıkması ile oluşan alt harmonik problemini çözmek için farklı versiyonlarda DTA dönüşüm yöntemleri önerilmiştir [10],[11]. Gelişen yapay zekâ teknolojisi ile destek vektör makinesi (DVM) ile kümeleme ve DTA ayrıştırımı önerilmiştir [12], [13]. Son dönemde pek çok değişik uygulama alanı bulan yapay sinir ağı modelleri kullanılarak sinyal ayrıştırma ve parametre çıkarımı için gerçekleştiren çalışmalara rastlanılmıştır [14]-[16].

Bu çalışmanın ana motivasyonu, literatürde yer alan öbikleme veya kümeleme aşamasında yüksek başarımlı ve yenilikçi bir yaklaşımla 3-B gruplama yaparak DTA ayrıştırmasını güvenilir bir forma getirmektir. Bu yaklaşım doğrultusunda DTA ayrıştırması için STÜR Histogram tabanlı yöntem kullanılmakta, sabit ve aşamalı DTA sınıflandırması ve çözümlemesi yapılmaktadır.

### 3 Önerilen yöntem

Bu çalışmada ortamda bulunduğu düşünülen çok sayıda radarın darbeleri sinyallerinin ayırıştırma sorunu için bilgisayarlı görü tabanlı bağlı bileşen etiketleme yöntemi ile bir çözüm önerilmiştir. Bu çalışmada önerilen bağlı bileşen etiketleme tabanlı kümeleme yöntemini içeren çözüm modeli Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Bağlı bileşen etiketleme tabanlı kümeleme ve DTA ayırıştırmanın blok şeması.

Figure 3. The block scheme of connected component labeling based clustering and PRI deinterleaving.

DTK parametrelerinden GA, RF, DG parametreleri darbe dizisi ayırıştırma ve tanımlama için en kullanışlı olanlardır [4]. Çalışmada darbelerin bu üç parametresi örüntü ayırıştırıcı öz nitelik olacak şekilde alınarak 3-B görüntü matrisi oluşturulmaktadır. Oluşturulan görüntüde bağlı bileşen etiketleme yöntemi ile darbelerin öbeklenmesi sağlanmıştır.

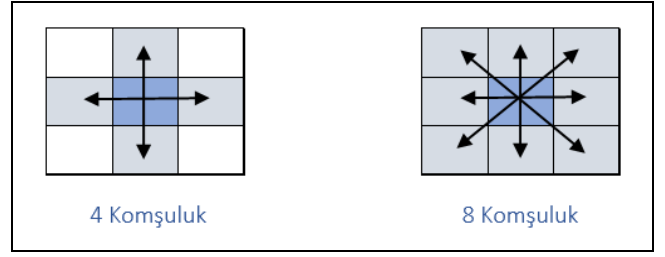
Öbekleme işlemi ile aynı yayın kaynağından gelen darbe dizilerinin aynı grupta olması sağlanmaktadır. Gruplama sonrası GZ analizi için STÜR algoritması kullanılarak ve histogram tabanlı eşik işlemleri gerçekleştirilerek DTA çeşidi ve DTA değerlerine ulaşılmıştır. Bu bölümde Bağlı Bileşen Etiketleme yöntemi ve çalışmada kullanımı anlatılmaktadır. Ayrıca kullanılan GZ analiz süreci ve analiz pencereleri arasındaki güncelleme işlemi açıklanmaktadır.

#### 3.1 Bağlı bileşen etiketleme

Bağlı bileşen etiketleme, ikili resimler üzerinde uygulanan birbiri ile komşu olan piksellerin bir grup olmasına yarayan işlemdir [17]. Resim üzerindeki her bir grup numaralandırılarak etiketlenir.

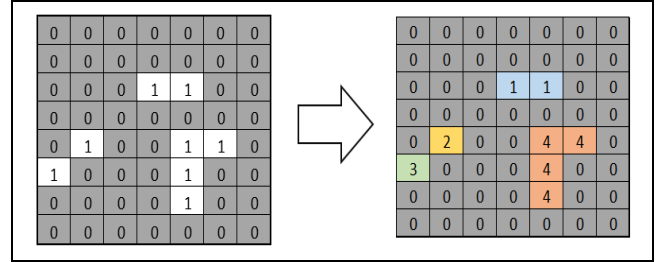
Bağlı bileşen etiketleme yapılırken 2 boyutlu bir görüntüde 8'li ya da 4'lü komşuluklara göre işlem yapılabilirken, 3 boyutlu görüntüde 6,18,26 bağlı komşuya sahip olabilir. Şekil 4'te görüldüğü gibi 4 komşuluk durumunda çapraz pikseller komşu kabul edilmezken 8 komşuluk durumunda çapraz pikseller komşu kabul edilerek bağlı bileşen durumunda olur.

Şekil 5 ve Şekil 6'da bağlı bileşen etiketleme ile gruplama örnekleri yer almaktadır. Şekil 5'te, 4 komşuluk durumunda, etiket 2 ve etiket 3 komşu olmaz iken, Şekil 6'da 8 komşuluk durumunda, 2 ve 3 komşuluk ilişkisinde olarak aynı etiket numarasına sahip olur.



Şekil 4. Bağlı bileşenlerde komşuluk.

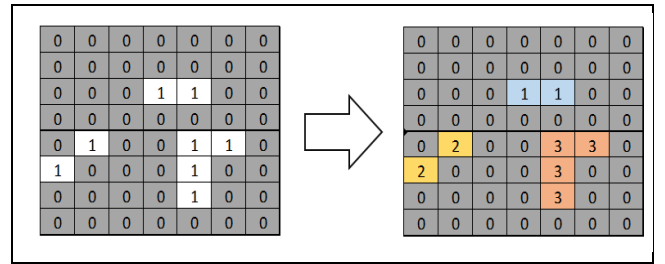
Figure 4. The neighborhood in the connected components.



Şekil 5. 4-bağlantılı etiketleme ile gruplama.

Figure 5. The grouping with 4-connectivity.

Aynı resim için 4 komşuluk durumunda 4 grup, 8 komşuluk durumunda 3 grup oluşturulmaktadır.

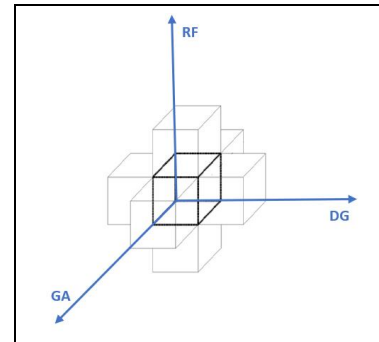


Şekil 6. 8-bağlantılı etiketleme ile gruplama.

Figure 6. The grouping with 8-connectivity.

#### 3.2 3-B bağlı bileşen etiketleme tabanlı kümeleme

Bu çalışmada önerilen yöntem ile DTK tablosundaki GA, RF, DG parametrelerine göre üç boyutlu görüntüde her darbe dizisi GZ sırasına göre [GA, RF, DG] koordinatları ile ilgili hücreye yerleştirilir. Böylece etiketleme sırasında bir hücrenin çevresindeki Şekil 7'de gösterildiği üzere 26 bağlı hücre aynı etiket numarası ile numaralandırılır ve aynı yayın kaynağından gelen darbelerin birbirlerinden ayrılmadan aynı kümede olması sağlanır.



Şekil 7. 3-B uzayda komşuluk.

Figure 7. The connectivity in 3-D space.

3-B Bağlı Bileşen Etiketleme ile Öbekleme Algoritması'na ait adımları Algoritma 1'de verilmektedir.

Algoritma 1: 3-B bağlı bileşen etiketleme tabanlı öbekleme

- Adım-1 GZ bilgisine göre sıralanmış her bir darbenin RF, GA ve DG değeri karşılığında eşleşen koordinata tespit olarak belirlenir,
- Adım-2 Eşleşen hücre için 1 değerini, yoksa varsayılan 0 değeri imge matrisine işlenir. Sinyalleri ayırtmak bir imge (görüntü) işleme problemine dönüşür,
- Adım-3 1 ve 0 değerlerinden oluşan imge matrisi için tarama yapılır. Tarama yapılırken ilk bulunan değeri ilk etiket olarak belirlenir,
- Adım-4 Komşuluk tespitine göre ilgili darbenin ilk etiketle dâhil olduğu ya da yeni bir etiket olduğu belirlenir,
- Adım-5 Tarama işlemi bittikten sonra tespit değerlerinin olduğu hücrelerin hepsi bir etikete atanmış olur.
- Adım-6 Etiketler daha sonrasında birer radar seti kümesi olarak işlenip öbek haline getirilir,
- Adım-7 Öbeklenen her bir kümeye ait ortalama frekans değeri, ortalama GA değeri ve frekans standart sapması hesaplanır.

### 3.3 Geliş zamanı analizi

Bu çalışmada öbekleme sonrası DTA parametresini belirlemek için GZ fark histogramına dayanan yöntemlerden biri olan STÜR tercih edilmektedir. Öbekleme sonrası aynı kaynaktan gelen darbe dizileri aynı öbek içinde yer alır ve her öbek için GZ, DG, RF, GA parametre vektörleri belirlenir. Her öbek DTA ayırıştırma sürecine girerek görev veri dosyasına iletilecek DTA bilgileri elde edilir. DTA ayırıştırma süreci Algoritma 2'deki adımlar ile tanımlanmaktadır.

Algoritma 2: DTA ayırıştırması için GZ analizi

- Adım-1 Her bir kümede GZ vektörü için sıralı türev uygulanır. Böylece ardışık GZ değerleri arasındaki fark hesaplanmış olur,
- Adım-2 Hesaplanan sıralı türev vektörünün standart sapması hesaplanır. Standart sapma değeri 0'a yakın bir değerse sabit DTA olarak belirlenir,
- Adım-3 Sabit DTA için Adım-1'deki hesaplanan vektör üzerinde medyan değeri bulunarak DTA bilgisine karar verilir,
- Adım-4 Standart sapma değeri belirli bir eşğin üzerinde çıkarsa aşamalı DTA bilgisi olduğuna karar verilir,
- Adım-5 Sıralı türev vektörü üzerinde histogram tabanlı eşik işlemi yapılarak aşamalı DTA değerleri bulunmaktadır,
- Adım-6 Adım-1 ile Adım-5'teki işlemler her bir küme için tekrarlanır.

Algoritma 1 ve 2'deki işlemler her bir analiz penceresi için gerçekleştirilirken ayırıştırmanın pencereler arası takibini sağlamak için uzaklık fonksiyonu tabanlı güncelleme işlemleri gerçekleştirilir.

### 3.4 Pencere güncelleme işlemleri

DTA ayırıştırma süreci ardışık devam eden analiz pencerelerinde gerçekleştirilmektedir. Pencereler arasında

sürekliliği sağlamak amacıyla güncelleme işlemleri yapılmaktadır. Güncelleme işleminde Eşitlik 1'de tanımlanan Euclidean uzaklık [4] kullanılarak analiz penceresindeki her bir sinyal kümesinin bir önceki pencerede var olan kümeler ile ilişkisi değerlendirilir. Değerlendirme sonucunda devamlılık veya yeni bir radar yayın kaynağı olduğu kararı verilir.

$$Uzaklık = \sqrt{\left(\text{abs}(RF_n - RF_{(n-1)})^2 K_1\right) + \dots + \left(\text{abs}(GA_n - GA_{(n-1)})^2 K_2\right) + \dots + \left(\text{abs}(DG_n - DG_{(n-1)})^2 K_3\right)} \quad (1)$$

Eşitlik 1'deki K1, K2 ve K3 değerleri ilgili parametrenin uzaklık hesabına olan ağırlıklı etkisini sağlamaktadır. Bu çalışmada bu değerler empirik olarak, denemeler sonucunda sabit alınmıştır.

## 4 Veri seti ve benzetim sonuçları

Bağlı Bileşen etiketleme tabanlı Öbekleme Yöntemi'nin DTA ayırıştırmadaki başarımı analiz etmek için çeşitli test senaryoları oluşturulmuştur. Bu senaryolarda kullanılmak üzere 16 adet radarın olduğu veri seti hazırlanmıştır. Bu veri setinde oluşturulan radarlar 4 farklı tip radar olarak gruplandırılmıştır. Bunlar:

1. Erken ikaz radarları,
2. Gözetleme/Yakalama (Acquisition) radarları,
3. Hava Önleme (Fighter) radarları,
4. Takip radarları şeklindedir.

Tablo 2'de Erken İkaz Radarı olarak tanımlanan 4 adet radarın özellikleri yer almaktadır.

- Sabit DTA'ya sahip radar: Radar 3,
- Aşamalı (2'li) DTA'ya sahip radarlar: Radar 2 ve 4,
- Aşamalı (3'lü) DTA'ya sahip radar: Radar 1.

Tablo 2. Erken ihbar radarları.

Table 2. Early warning radars.

Parametreler	Erken İhbar Radarları			
	1	2	3	4
Radar Nu.				
RF (GHz)	3.55	3.8	2.95	3.15
DA (dBm)	145	143	143	145
DG(µs)	5	5	5	10
DTA(µs)	[375 400 420]	[110 90]	770	[280 300]
DTF(kHz)	[2.67 2.5 2.38]	[9.11 11.11]	1.29	[3.57 3.33]
Zaman Ofseti (µs)	10	40	50	30
GA(derece)	10.25	10.5	25.15	18

Tablo 3'te Yakalama Radarı olarak tanımlanan 8 adet radarın özellikleri yer almaktadır.

Tablo 3. Gözetleme/Teşhis radarları.

Table 3. Acquisition radars.

Parametreler	Teşhis radarları							
	5	6	7	8	9	10	11	12
Radar Nu.								
RF (GHz)	4.8	5.65	7.20	6.45	5.2	8.6	7.45	6.6
DA (dBm)	125	122	123	123	126	122	122	124
DG(µs)	10	10	15	5	20	5	5	15
DTA(µs)	50	[30 40]	[195 210 225]	[90 100 110]	220	170	[15 25]	285
DTF(kHz)	20	[33.33 25]	[5.13 4.77 4.44]	[11.1 10 9.09]	4.5	5.8	[66.7 40]	3.5
Zaman Ofseti (µs)	20	40	70	50	10	80	110	90
GA(derece)	18	10	20	25	35	24	32	17

- Sabit DTA içeren radarlar: Radar 5, 9, 10 ve 12,
- Aşamalı (2'li) DTA içeren radarlar: Radar 6 ve 11,
- Aşamalı (3'lü) DTA içeren radarlar: Radar 7 ve 8.

Tablo 4'te Av-Önleme Radarı grubunda tanımlanan 2 adet radarın özellikleri yer almaktadır.

- Sabit DTA'ya sahip radarlar: Radar 14,
- Aşamalı (2'li) DTA'ya sahip radar: Radar 13.

Tablo 4. Av-Önleme radarları.

Table 4. Fighter radars.

Parametreler	Av önleme radarları	
Radar Nu.	13	14
RF (GHz)	6.05	5.5
DA (dBm)	126	126
DG( $\mu$ s)	5	5
DTA( $\mu$ s)	[25 35]	[20]
DTF(kHz)	[40 28.57]	50
Zaman Ofseti ( $\mu$ s)	150	70
GA(derece)	12.1	20.15

Tablo 5'te Takip Radarı grubunda tanımlanan 2 adet radarın özellikleri yer almaktadır.

- Sabit DTA'ya sahip radarlar: Radar 15 ve 16.

Tablo 5. Takip radarları

Table 5. Tracking radars.

Parametreler	Takip radarları	
Radar Nu.	15	16
RF (GHz)	9.55	9.9
DA (dBm)	126	126
DG( $\mu$ s)	5	5
DTA( $\mu$ s)	15	10
DTF(kHz)	66.67	100
Zaman Ofseti ( $\mu$ s)	150	70
GA(derece)	19.9	30.2

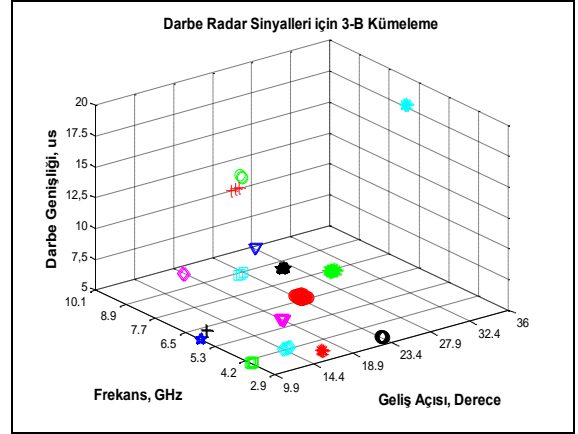
Bu çalışmada öbeleme ve GZ analizi işlemleri 250 ms'lik pencere süresinde yapılmaktadır. Güncelleme işlemleri 250 ms'lik periyotlarda gerçekleşmektedir. Kapsamlı testler için farklı DTA tipleri ile 4 farklı senaryo oluşturulmuştur. Oluşturulan senaryolar Tablo 6'da sunulmaktadır.

Tablo 6. Test senaryoları.

Table 6. Test cases.

Senaryo No	Açıklama	Radarlar
1	Tüm setini içeren senaryo	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10, 11,12,13,14,15,16
2	Sabit DTA içeren senaryo	3, 5, 9, 10, 12, 14,15, 16
3	Aşamalı (2'li) DTA içeren senaryo	2, 4, 6,11, 13
4	Aşamalı (3'lü) DTA içeren senaryo	1, 7, 8

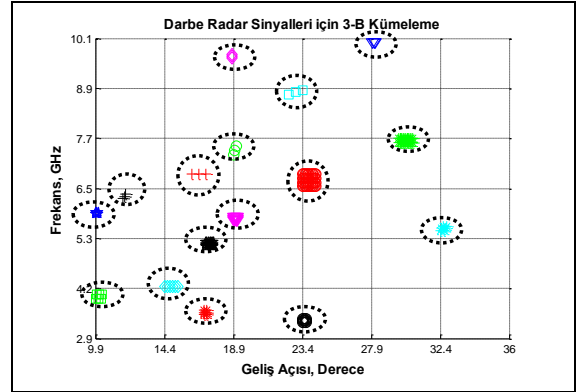
Senaryo 1'de yer alan tüm radarlara ait DTK verilerine ait 1/0 bilgisi 3-B imge matrisinde ilgili parametre koordinatlarına göre yerleştirildikten sonra öbeleme Şekil 8'de farklı renklendirme ve işaretçiler ile belirtilmektedir.



Şekil 8. Senaryo 1 için 3-B kümeleme grupları.

Figure 8. The 3-D clustering groups for Scenario 1.

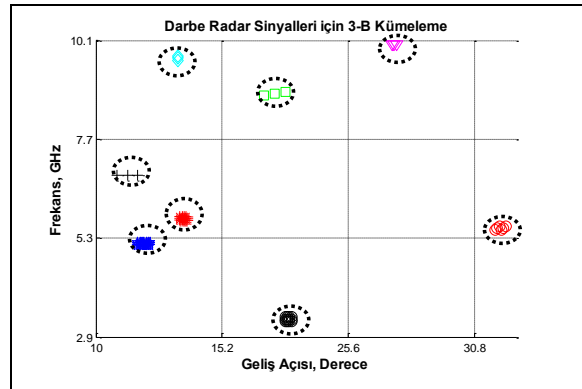
Şekil 9'da Şekil 8'in iki boyutlu izdüşümü gösterilmektedir. DG parametresi öbeleme sırasında kullanılması ile birlikte izdüşüm grafiğinde verilmemektedir.



Şekil 9. Senaryo 1'deki Kümelemenin 2-B İzdüşümü.

Figure 9. 2-D projection of clustering in Scenario 1.

Tablo 6'da yer alan Senaryo 2 için 3-B kümelemenin sonuçları Şekil 10'da gösterilmektedir. Farklı özellikteki 8 radar sinyalinin aynı anda alıcıya ulaşması durumunda öbeleme yönteminin başarısı test edilmektedir.

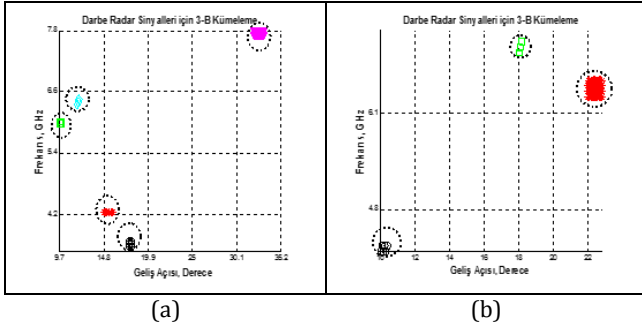


Şekil 10. Senaryo 2'deki Kümelemenin 2B izdüşümü.

Figure 10. 2-D projection of clustering in scenario 2.

Senaryo 3 ve Senaryo 4'te 3-B kümelemenin sonuçları Şekil 11(a) ve Şekil 11(b) gösterilmektedir.





Şekil 11(a): Senaryo 3, (b): Senaryo 4 için kümeleme sonuçları.

Figure 11. The results of clustering, (a): Scenario 3, (b): Scenario 4.

Tablo 6'da yer alan test senaryoları için Şekil 8'den Şekil 11'e kadar öbeleme sonuçları grafiksel bir gösterimle sunulmaktadır. Her bir öbeleme sonucunda GZ analizi ile DTA ayrıştırma gerçekleştirilmektedir. DTA ayrıştırması için yapılan başarımlar testlerinde %100 doğruluk sağlanmıştır. Sentetik radar veri setlerinin kullanılması sayesinde bu başarımlar beklenmektedir.

## 5 Tartışma

Bu çalışmada önerilen bağlı bileşen etiketleme tabanlı öbeleme yöntemi ile darbe kümeleri oluşturularak DTA ayrıştırmasının başarılı bir şekilde yapılması sağlanmıştır. Bu makalede önerilen yöntemin başarımlar ve doğruluk karşılaştırmasını yapmak için literatürde metrik yöntemleri [6] kullanılmıştır. Karşılaştırma yöntemi için örüntü tanıma problemlerinde yaygın olarak kullanılan hiyerarşik öbeleme [18] yöntemi esas alınmıştır. Bu çalışmada önerilen yöntemin girdisi olan aynı veri seti üzeri kullanılarak sonuçlar değerlendirilmektedir.

### 5.1 Hiyerarşik öbeleme yöntemi

Hiyerarşik öbeleme yöntemi literatür incelemelerinde bahsedilen tüm öbeleme yöntemlerini kapsayan nitelikte olup küme ağacı yapısı ile öznitelikler temelinde benzer sonuçları bir küme dalında temsil etmektedir [18]. Hiyerarşik öbelemede sırasıyla üç temel adım gerçekleştirilmektedir:

- Öklit uzaklık ile girdi setindeki her nesne çifti için benzerlik ve farklılık değerleri tespit edilir,
- Benzer değerlere sahip nesne çiftleri bir küme ağacı ile birbirine ilintilenir. Nesnelere ikili kümeler ile eşleştirildikçe öbelemede daha büyük kümeler oluşturulur,
- Son aşama olarak, ağaç dalları ayrıştırılarak her bir ağaç dalı küme (öbek) olarak belirlenmektedir.

### 5.2 Karşılaştırma ve değerlendirme

Hiyerarşik öbeleme ile GA, RF ve DG öznitelikleri ile her bir GZ için DTK bilgisini içeren veri setine yönelik kümeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Tablo 6'da yer alan tüm senaryolar için %100 başarılı kümeleme sonucu alınmıştır. Fakat bu öbeleme yöntemi ayrıştırma işleminin hesaplama yükünü artırmaktadır.

12000 adet darbe bilgisi içeren bir DTK veri setinde 16 adet küme çıktısı varsayımıyla yapılan başarımlar testinde bağlı bileşen etiketleme tabanlı öbeleme yöntemi hiyerarşik öbeleme yöntemine göre 5x daha hızlı bir sürede öbeleme sonucu sağlayarak gerçek zamanlı uygulamalar için avantaj sunmaktadır. Başarımlar testi Intel i7-7700 CPU içeren bir

bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Darbe sayısı ve küme çıktı sayısı arttıkça elde edilen hız makası açılabilir.

Bağlı bileşen etiketleme yöntemi doğruluk karşılaştırmasında en temel öbeleme yöntemi olan hiyerarşik öbeleme ile aynı sonucu vermesinin yanı sıra hesaplama süresi performansını iyileştirerek pratik ve gerçek zamanlı senaryolarda avantaj sağlamıştır.

## 6 Sonuçlar

Bu çalışmada DTA ayrıştırmanın doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmak için bağlı bileşen etiketleme tabanlı öbeleme yöntemi önerilmiştir. Sabit ve aşamalı DTA seti içeren sentetik veri setlerini üzerinde benzetimler gerçekleştirilmiştir. Benzetimler sonucunda %100 doğrulukla DTA ayrıştırma yapılmıştır. DTA ayrıştırma için kullanılan GZ vektörü 3-B kümeleme sonucunda başarılı bir şekilde oluşturulduğundan her bir kümenin DTA bilgisi yüksek doğrulukla çıkarılmıştır. Güncelleme sayesinde DTA ayrıştırmanın takibi DTK üretimi yapıldığı sürece sağlanmıştır. Karşılaştırma sonucunda bağlı bileşen etiketleme tabanlı öbeleme, hiyerarşik öbeleme yöntemi ile aynı doğruluk performansını sağlamıştır. Ayrıca, bağlı bileşen etiketleme tabanlı öbeleme yöntemi kümeleme işleminin algoritma çalışma süresini iyileştirmiştir.

Gelecek çalışmalarda farklı veri setleri üzerinde yapay zekâ yaklaşımlarını içeren DTA ayrıştırma çalışmalarının yapılması planlanmaktadır.

## 7 Conclusions

In this study, a connected component labeling-based clustering method is proposed to increase the accuracy and reliability of the PRI deinterleaving process. Simulations were performed on synthetic data sets including fixed and staggered PRI. According to the results of the simulations, PRI deinterleaving was realized with 100% accuracy. Since the ToA vector used for PRI deinterleaving was successfully created as a result of 3-D clustering, PRI information of each cluster was extracted with high accuracy performance. The tracking of PRI deinterleaving processing has been ensured among consecutive analysis windows as long as creating of PDW list owing to the updating process. As a result of the comparison, connected component labeling-based clustering gave the same accuracy performance as the hierarchical clustering method. In addition, our proposed method improves the algorithm running time of the clustering process.

In future studies, we plan to perform PRI deinterleaving studies includes artificial intelligence approaches on different data sets.

## 8 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Neslihan FİŞNE Literatür taraması, tasarımın yapılması, analizlerin gerçekleştirilmesi, yazım, sonuçların değerlendirilmesi başlıklarında; Ahmet Güngör PAKFİLİZ fikrin oluşturulması, sonuçların incelenmesi, yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

## 9 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

## 10 Kaynaklar

- [1] Robertson S. *Practical ESM Analysis*. 1<sup>st</sup> ed. Boston, USA, Artech House, 2019.
- [2] Pakfiliz A. *Elektronik Harp*. 1. Baskı. Ankara, Türkiye, Palme Yayınevi, 2021.
- [3] O'Neill S. *Electronic Warfare and Radar System Engineering Handbook*. 4<sup>th</sup> ed. California, USA, Naval Air Warfare Center Weapons Division, 2013.
- [4] Aslan K. Emitter Identification Techniques in Electronic Warfare. MSc Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2006.
- [5] Davies CL, Hollands P. "Automatic processing for ESM". *IEEE Proceedings-Part F (Communications, Radar and Signal Processing)*, 129(3), 164-171, 1982.
- [6] Wilkinson DR, Watson AW. "Use of metric techniques in ESM data processing". *IEEE Proceedings-Part F (Communications, Radar and Signal Processing)*, 132(4), 229-232, 1985.
- [7] Mardia HK. "New Techniques for the deinterleaving of repetitive sequences". *IEEE Proceedings-Part F (Communications, Radar and Signal Processing)*, 136(4), 149-154, 1989.
- [8] Anderson JA, Gately MT, Penz PA, Collins DR. "Radar signal categorization using a neural network". *IEEE Proceedings*, 78(10), 1646-1657, 1990.
- [9] Milojevic DJ, Popovic BM. "Improved Algorithm for the deinterleaving of Radar Pulses". *IEEE Proceedings (Radar and Signal Processing)*, 139(1), 98-104, 1992.
- [10] Nishiguchi K, Kobayashi M. "Improved algorithm for estimating pulse repetition intervals". *IEEE Transactions on Aerospace Electronics Systems*, 36(2), 407-421, 2000.
- [11] Mao Y, Han J, Guo G. "An improved algorithm of PRI transform". *WRI Global Congress on Intelligent Systems*, Xiamen, China, 19-21 May 2009.
- [12] Ying F, Xing W. "Radar signal recognition based on modified semisupervised SVM algorithm". *IEEE 2<sup>nd</sup> Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, Chongqing, China, 25-26 March 2017.
- [13] Mu H, Gu J, Zhao Y. "A Deinterleaving Method for Mixed Pulse Signals in Complex Electromagnetic Environment". *International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS)*, Chengdu, China, 23-26 October 2019.
- [14] Ahmed MGS, Tang B. "Sorting radar signal from symmetry clustering perspective". *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 28(4), 690-696, 2017.
- [15] Ata'a AW, Abdullah SN. "Deinterleaving of radar signals and PRF identification algorithms". *IET Radar Sonar & Navigation*, 1(5), 340-347, 2007.
- [16] Gencol K, Kara A, At N. "Improvements on deinterleaving of radar pulses in dynamically varying signal environments". *Digital Signal Processing*, 69, 86-93, 2017.
- [17] He L, Ren X, Gao Q, Zhao X, Yao B, Chao Y. "The connected-component labeling problem: A review of state-of-the-art algorithms". *Pattern Recognition*, 70, 25-43, 2017.
- [18] Maimon O, Rokach L. "Clustering methods". Editors: Maimon O, Rokach L. *Data Mining and Knowledge Discovery Handbook*, 321-352, Tel Aviv, Israel, Springer, 2005.