

**HAVA PLATFORMUNDAN RF KAYNAK  
KONUMLANDIRMA**

**AIRBORNE RF EMITTER GEOLOCALIZATION**

**AHMET AK**

**DR. ÖĞR. ÜYESİ YAKUP SABRİ ÖZKAZANÇ**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

# ÖZET

## HAVA PLATFORMUNDAN RF KAYNAK KONUMLANDIRMA

**Ahmet AK**

**Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Yakup Sabri ÖZKAZANÇ**

**Ocak 2024, 77 sayfa**

Elektromanyetik spektrum üzerinde hâkimiyet kurma, muhasım unsurların spektrum kullanımını kısıtlama ve dost unsurların spektrumu etkin şekilde kullanmasını sağlamayı amaçlayan elektronik harp konsepti zamanla daha çok önem kazanmaktadır. Elektronik harp konsepti içerisinde yer alan RF elektronik destek sistemleri; RF unsurların tespiti, parametrelerinin belirlenmesi, konumlandırılması vb. amaçlar için kullanılan kritik sistemler olarak görülmektedir. RF kaynakların konumlarının tespit edilmesi ile muhasım unsurların elektronik harp düzenleri belirlenebilmektedir ve gerek stratejik gerekse taktik sahada operasyonel üstünlük sağlanabilmektedir. Sağladığı üstünlüğün yanı sıra pasif bir sistem üzerinden konum tespitinin zorlukları bulunmaktadır. Temelde karşılaştırmalı veriler üzerinden konum belirleme işlemi yapılmaktadır. Karşılaştırılacak verilerin tek veya çok sayıda platformdan elde edilmesi konum belirleme yaklaşımını şekillendirmektedir. Hava platformları özelinde değerlendirildiğinde birden çok platformun eş zamanlı görev yapmasının maliyetli olduğu bilinmektedir ve konum belirleme çalışmalarında tek platform üzerinden konum tespitinin mümkün olduğu yaklaşımlar tercih edilebilmektedir. Tek platform üzerinden konum belirleme yaklaşımları arasında kerteriz hatlarının kullanımı

sıklıkla görülmektedir. Son yıllarda, kerteriz hatlarını temel alan yaklaşımlar haricinde doğrudan konum belirleme yöntemleri de incelenmektedir. Tez çalışması kapsamında, doğrudan konum belirleme yapılabilmesine yönelik altyapısı bulunan Doppler frekansı değişim oranı ve faz farkı değişim oranı temelli konum belirleme yöntemleri incelenmiştir. Belirtilen her iki yöntem, elektronik destek sistemini barındıran platformun dinamikleri ve alınan sinyalin parametreleri üzerinden karşılaştırmalı olarak çalışmaktadır. Karşılaştırma işlemi, ölçümlenen parametrelerin zamansal değişimleri üzerinden yürütülmektedir. Elde edilen değişim bilgileri ve platforma ait değişkenler ortak noktada birleştirildiğinde RF yayın kaynağının yönü ve mesafesi tespit edilebilmektedir. Tespit edilen yön ve mesafe bilgilerinin kullanımı ile yayın kaynağının bölgesel konumu doğrudan elde edilebilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Elektronik Harp, RF Kaynak Konumlandırma, Faz Karşılaştırma, Doppler Değişim Oranı, Faz Farkı Değişim Oranı.

# **ABSTRACT**

## **AIRBORNE RF EMITTER GEOLOCALIZATION**

**Ahmet AK**

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

**Supervisor: Assist. Prof. Yakup Sabri ÖZKAZANÇ**

**January 2024, 77 pages**

The concept of electronic warfare, which aims to establish dominance over the electromagnetic spectrum, restrict the spectrum usage of adversary forces and ensure effective spectrum utilization by friendly forces, is gaining increasing importance over time. RF electronic support systems, which are part of the electronic warfare concept, are seen as critical systems used for purposes such as the detection, parameter determination, and positioning of RF sources. Determining the locations of RF sources enables the identification of adversary forces' electronic order of battle, providing operational superiority both in strategic and tactical fields. Despite the advantages it offers, there are challenges in locating positions through a passive system. Essentially, the process of determining a location is based on comparative data. The use of single or multiple platforms to obtain the data for comparison shapes the location determination approach. When evaluated in the context of aerial platforms, it is known that the simultaneous operation of multiple platforms is costly, and approaches allowing location determination from a single platform are often preferred. Among the location determination approaches from a single platform, the use of bearing lines is frequently observed. In recent years, direct location estimation methods are also

being investigated. Within the scope of the thesis, direct location estimation methods based on Doppler frequency rate of change and phase difference rate of change have been examined. Both methods work comparatively based on the dynamics of the platform containing the electronic support system and the parameters of the received signal. The comparison process is conducted based on the temporal changes of the measured parameters. When the obtained rate of change information is combined with the dynamics of the platform at a common point, the direction and distance of the RF transmission source can be determined. The use of the determined direction and distance information allows the direct determination of the regional position of the transmission source.

**Keywords:** Electronic Warfare, RF Geolocating, Phase Interferometer, Doppler Rate of Change, Phase Difference Rate of Change.

## TEŞEKKÜR

Tez alıőmam sũresince gũsterdiđi rehberlik ile problemlerin zũlmesine destek veren, sunduğu eleőtiriler ile alıőmayı kıymetlendiren ve karőtılaőtılan problemlerin zũmũ için teőtvik eden danıőtmanım Sayın Dr. Yakup Őzkazan'a,

Tez çalıőmam boyunca gũsterdikleri anlayıőt ve verdikleri destekten dolayı TũBİTAK BİLGEM İLTAREN kurumundaki yũneticim Uğur Renklibay'a ve mesai arkadaőtlarım,

Çalıőmalarımı sũrdũrmemde beni motive eden ve fikirleriyle katkı sağlayan arkadaőtlarım Sezer Yũney'e, Mustafa Őzkan'a ve Burhan Kaya'ya,

Çalıőmam boyunca sabırla yanımda olan ve bũyũk bir destek sağlayan eőtım Nur Hilal Ak'a, hayatım boyunca her konuda yol gũstericim olan ve her daim destek veren annem Hatice Ak'a, babam Mehmet Ak'a ve abim İsmail Ak'a,

Teőtekkũrlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xiii
SÖZLÜK DİZİNİ .....	xv
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Tezin Amacı.....	5
1.2. Tez Akışı.....	5
2. ED SİSTEMLERİ ve YÖN – KONUM BULMA YAKLAŞIMLARI .....	7
2.1. Yön Bulma Yaklaşımları .....	7
2.1.1. Genlik Karşılaştırma.....	8
2.1.2. Varış Zamanı Farkı (Yön Belirleme) .....	11
2.1.3. Faz Karşılaştırma .....	14
2.2. Konum Bulma Yaklaşımları .....	17
2.2.1. Üçgenleme .....	17
2.2.2. Varış Zamanı Farkı (Konum Belirleme) .....	19
2.2.3. Varış Frekansı Farkı .....	21
2.2.4. Doğrudan Konum Belirleme .....	21
3. DOPPLER FREKANSI DEĞİŞİM ORANI YÖNTEMİ.....	23
3.1. Doppler Etkisi .....	23
3.2. Menzil ve Sinyal Geliş Açısı Hesaplamaları .....	24

3.3.	Doppler Frekansı Oranı Yöntemine Yönelik Senaryo.....	27
3.4.	Sentetik Veri Üretimi.....	28
3.5.	Senaryoyu Şekillendiren Varsayımlar ve Geometri Etkisi.....	29
3.5.1.	Uçuş Geometrisinin Etkisi.....	29
4.	FAZ FARKI DEĞİŞİM ORANI YÖNTEMİ .....	30
4.1.	Menzil ve Sinyal Geliş Açısı Hesaplamaları .....	30
4.2.	Faz Farkı Değişim Oranı Yöntemine Yönelik Senaryo.....	32
4.3.	Sentetik Veri Üretimi.....	34
4.4.	Senaryoyu Şekillendiren Varsayımlar .....	35
5.	RF KAYNAK KONUMU BELİRLEME .....	36
5.1.	Menzil ve Yön Bilgilerinin Kullanımı.....	36
5.2.	Bölgesel Konum Belirleme.....	37
5.3.	EEP – CEP Gösterimi İlişkisi .....	41
5.4.	Bölgesel Konum Tespitinin İyileştirilmesi .....	42
6.	BENZETİM ÇALIŞMALARI .....	45
6.1.	Doppler Frekansı Değişim Oranı Benzetim Çalışması.....	45
6.1.1.	Senaryo 1: $V_X = 300$ m/s, $V_Y = 0$ m/s .....	46
6.1.1.1.	Senaryo 1 için Monte Carlo Benzetimi Sonuçları.....	51
6.1.2.	Senaryo 2: $V_X = 300$ m/s, $V_Y = 100$ m/s .....	53
6.1.2.1.	Senaryo 2 için Monte Carlo Benzetimi Sonuçları.....	58
6.2.	Faz Farkı Değişim Oranı Benzetim Çalışması .....	60
6.2.1.	Senaryo 3: $V_X = 300$ m/s, $V_Y = 0$ m/s .....	60
6.2.1.1.	Senaryo 3 için Monte Carlo Benzetimi Sonuçları.....	65
6.2.2.	Senaryo 4: $V_X = 300$ m/s, $V_Y = 100$ m/s .....	67
6.2.2.1.	Senaryo 4 için Monte Carlo Benzetimi Sonuçları.....	72
7.	SONUÇLAR .....	75
	KAYNAKLAR.....	78



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Elektromanyetik Ortam Unsurları [3] .....	1
Şekil 1.2. Elektronik Harp Kırılımı .....	2
Şekil 1.3. Temsili Elektronik Muharebe Düzeni [6].....	3
Şekil 2.1. Genlik Karşılaştırma – Anten Geometrisi .....	9
Şekil 2.2. Genlik Karşılaştırma Jenerik Blok Diyagram .....	9
Şekil 2.3. Yön – Kazanç İlişkisi .....	10
Şekil 2.4. Zaman Farkı Yöntemi Ölçüm Geometrisi .....	11
Şekil 2.5. Tipik Varış Zamanı Farkı Konfigürasyonu.....	12
Şekil 2.6. Hatlar için Zaman Farkı ve Açılı İlişkisi .....	12
Şekil 2.7. Antenler Arası Mesafenin Zaman Farkı – Yön İlişkisine Etkisi.....	13
Şekil 2.8. Faz Karşılaştırma Yöntemi Geometrisi .....	14
Şekil 2.9. Frekans Etkisi a) 3 GHz b) 9 GHz .....	16
Şekil 2.10. Antenler Arası Mesafenin Çözünürlüğe Etkisi .....	16
Şekil 2.11. Üçgenleme Yöntemi Geometrisi .....	18
Şekil 2.12. Hava Aracından Üçgenleme .....	18
Şekil 2.13. Gerçekçi Kerteriz Kesişimleri ve Bölgesel Konum Gösterimi .....	19
Şekil 2.14. Varış Zamanı Farkı Geometrisi .....	20
Şekil 2.15. FDOA Geometrisi [14].....	21
Şekil 3.1. Doppler Geometrisi .....	24
Şekil 3.2. Çizgisel Hız ile Açılı Hız İlişkisi .....	26
Şekil 3.3. Doppler Frekansı Değişim Oranı Yöntemi Blok Diyagramı.....	27
Şekil 3.4. Hız ve Yönelim Vektörleri.....	28
Şekil 4.1. Kurgulanan Faz Karşılaştırma Sistemi .....	31
Şekil 4.2. Faz Farkı Değişim Oranı Yöntemi Blok Diyagramı .....	32
Şekil 4.3. Senaryo Ölçüm Geometrisi .....	33
Şekil 5.1. Sinyal Geliş Açısı ve Baş Açısı Kullanımı .....	37
Şekil 5.2. Nokta Konum Dağılımına Örnek Gösterim .....	37
Şekil 5.3. Elips Çiziminde Kullanılan Kritik Bilgiler .....	38
Şekil 5.4. Elipslerde Büyük/Küçük Eksen Oranı .....	41
Şekil 5.5. Elips Kesişim Bölgesi .....	43

Şekil 6.1. Platform Uçuş Rotası – Senaryo 1 .....	46
Şekil 6.2. Doppler Frekansı – Senaryo 1 .....	47
Şekil 6.3. Doppler Frekansı Değişim Oranı – Senaryo 1 .....	47
Şekil 6.4. Açık Değişim Oranı – Senaryo 1 .....	48
Şekil 6.5. Sinyal Geliş Açısı – Senaryo 1 .....	48
Şekil 6.6. Menzil Değeri – Senaryo 1 .....	49
Şekil 6.7. Anlık Konum Belirleme Hata Miktarı – Senaryo 1 .....	49
Şekil 6.8. Nokta Konum Ölçümleri ve EEP – Senaryo 1 .....	50
Şekil 6.9. Nokta Konum Ölçümleri ve CEP – Senaryo 1 .....	50
Şekil 6.10. Platform Uçuş Rotası – Senaryo 2 .....	53
Şekil 6.11. Doppler Frekansı – Senaryo 2 .....	54
Şekil 6.12. Doppler Frekansı Değişim Oranı – Senaryo 2 .....	54
Şekil 6.13. Açık Değişim Oranı – Senaryo 2 .....	55
Şekil 6.14. Sinyal Geliş Açısı – Senaryo 2 .....	55
Şekil 6.15. Menzil Değeri – Senaryo 2 .....	56
Şekil 6.16. Anlık Konum Belirleme Hata Miktarı – Senaryo 2 .....	56
Şekil 6.17. Nokta Konum Ölçümleri ve EEP – Senaryo 2 .....	57
Şekil 6.18. Nokta Konum Ölçümleri ve CEP – Senaryo 2 .....	57
Şekil 6.19. Platform Uçuş Rotası – Senaryo 3 .....	61
Şekil 6.20. Faz Farkı – Senaryo 3 .....	61
Şekil 6.21. Faz Farkı Değişim Oranı – Senaryo 3 .....	62
Şekil 6.22. Açık Değişim Oranı – Senaryo 3 .....	62
Şekil 6.23. Sinyal Geliş Açısı – Senaryo 3 .....	63
Şekil 6.24. Menzil Değeri – Senaryo 3 .....	63
Şekil 6.25. Anlık Konum Belirleme Hata Miktarı – Senaryo 3 .....	64
Şekil 6.26. Nokta Konum Ölçümleri ve EEP – Senaryo 3 .....	64
Şekil 6.27. Nokta Konum Ölçümleri ve CEP – Senaryo 3 .....	65
Şekil 6.28. Platform Uçuş Rotası – Senaryo 4 .....	68
Şekil 6.29. Faz Farkı – Senaryo 4 .....	68
Şekil 6.30. Faz Farkı Değişim Oranı – Senaryo 4 .....	69
Şekil 6.31. Açık Değişim Oranı – Senaryo 4 .....	69
Şekil 6.32. Sinyal Geliş Açısı – Senaryo 4 .....	70
Şekil 6.33. Menzil Değeri – Senaryo 4 .....	70
Şekil 6.34. Anlık Konum Belirleme Hata Miktarı – Senaryo 4 .....	71

Şekil 6.35. Nokta Konum Ölçümleri ve EEP – Senaryo 4 .....	71
Şekil 6.36. Nokta Konum Ölçümleri ve CEP – Senaryo 4.....	72

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Yön Bulma Yaklaşımlarının Genel Karşılaştırılması [9],[12],[13] .....	8
Çizelge 3.1. Doppler Frekansı Değişim Oranı Yöntemi Senaryo Parametreleri.....	27
Çizelge 4.1. Faz Farkı Değişim Oranı Yöntemi Senaryo Parametreleri.....	33
Çizelge 5.1. Kapsama Oranları ve Çarpan Değeri [14].....	40
Çizelge 6.1. Doppler Frekansı Değişim Oranı Yöntemi – Senaryo 1 Bilgileri.....	46
Çizelge 6.2. EEP ve CEP Bilgileri – Senaryo 1.....	51
Çizelge 6.3. Monte Carlo Benzetimi Sonucu Konum Hatası ve Bölgesel Konum Bilgileri – Senaryo 1.....	51
Çizelge 6.4. Monte Carlo Benzetimi Sonucu Elde Edilen En Küçük Alanlı Bölgesel Gösterimlerin Bilgileri – Senaryo 1 .....	51
Çizelge 6.5. Monte Carlo Benzetimi Sonucu Elde Edilen CEP Gösterim İyileştirmesi Sonuçları – Senaryo 1 .....	52
Çizelge 6.6. Monte Carlo Benzetimi Sonucu Elde Edilen EEP Gösterim İyileştirmesi Sonuçları – Senaryo 1 .....	52
Çizelge 6.7. Doppler Frekansı Değişim Oranı Yöntemi – Senaryo 2 Bilgileri.....	53
Çizelge 6.8. EEP ve CEP Bilgileri – Senaryo 2.....	58
Çizelge 6.9. Monte Carlo Benzetimi Sonucu Konum Hatası ve Bölgesel Gösterim Sonuçları – Senaryo 2 .....	58
Çizelge 6.10. Monte Carlo Benzetimi Sonucu Elde Edilen En Küçük Alanlı Bölgesel Gösterimlerin Bilgileri – Senaryo 2 .....	58
Çizelge 6.11. Monte Carlo Benzetimi Sonucu Elde Edilen CEP Gösterim İyileştirmesi Sonuçları – Senaryo 2 .....	59
Çizelge 6.12. Monte Carlo Benzetimi Sonucu Elde Edilen EEP Gösterim İyileştirmesi Sonuçları – Senaryo 2 .....	59
Çizelge 6.13. Faz Farkı Değişim Oranı Yöntemi – Senaryo 3 Bilgileri.....	60
Çizelge 6.14. EEP ve CEP Bilgileri – Senaryo 3.....	65
Çizelge 6.15. Monte Carlo Benzetimi Sonucu Konum Hatası ve Bölgesel Gösterim Sonuçları – Senaryo 3 .....	65
Çizelge 6.16. Monte Carlo Benzetimi Sonucu Elde Edilen En Küçük Alanlı Bölgesel Gösterimlerin Bilgileri – Senaryo 3 .....	66

Çizelge 6.17. Monte Carlo Benzetimi Sonucu Elde Edilen CEP Gösterim İyileştirmesi	
Sonuçları – Senaryo 3 .....	66
Çizelge 6.18. Monte Carlo Benzetimi Sonucu Elde Edilen EEP Gösterim İyileştirmesi	
Sonuçları – Senaryo 3 .....	66
Çizelge 6.19. Faz Farkı Değişim Oranı Yöntemi – Senaryo 4 Bilgileri.....	67
Çizelge 6.20. EEP ve CEP Bilgileri – Senaryo 4.....	72
Çizelge 6.21. Monte Carlo Benzetimi Sonucu Konum Hatası ve Bölgesel Gösterim	
Sonuçları – Senaryo 4 .....	73
Çizelge 6.22. Monte Carlo Benzetimi Sonucu Elde Edilen En Küçük Alanlı Bölgesel	
Gösterimlerin Bilgileri – Senaryo 4 .....	73
Çizelge 6.23. Monte Carlo Benzetimi Sonucu Elde Edilen CEP Gösterim İyileştirmesi	
Sonuçları – Senaryo 4 .....	74
Çizelge 6.24. Monte Carlo Benzetimi Sonucu Elde Edilen EEP Gösterim İyileştirmesi	
Sonuçları – Senaryo 4 .....	74

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$\theta$	Sinyal geliş açısı
$t$	Zaman (sn)
$c$	Işık hızı (m/s)
$d$	Antenler arası mesafe (m)
$\Delta t$	Sinyalin antenlere ulaşma zamanı farkı (sn)
$\delta \Delta t$	Zaman çözünürlüğü (sn)
$\delta \theta$	Açı çözünürlüğü (rad)
$\lambda$	Dalga boyu (m)
$\phi$	Sinyaller arasındaki faz farkı (rad)
$\hat{\phi}'$	Faz farkı değişim oranı
$f$	Frekans (Hz)
$\Delta f_D, \hat{f}_D$	Frekans değişim oranı
$V$	Platform hızı (m/s)
$\hat{\theta}'$	Sinyal geliş açısı değişim oranı
$R$	Menzil (m)
$\omega$	Açısal hız (rad/sn)
$\psi$	Baş açısı
$\sigma$	Standart sapma
$\Lambda$	Matris özdeğeri
$v$	Matris özvektörü
$\gamma$	Elips eğiklik derecesi
$\eta$	Kapsama oranı çarpanı
$r$	Yarıçap (m)

### Kısaltmalar

AOA	Angle of Arrival (Sinyal Geliş Açısı)
CEP	Circular Error Probable (Olası Dairesel Hata)
DPD	Direct Position Determination (Doğrudan Konum Belirleme)

ED	Elektronik Destek
EEP	Elliptical Error Probable (Olası Eliptik Hata)
EH	Elektronik Harp
EK	Elektronik Korunma
ELINT	Electronic Intelligence (Elektronik İstihbarat)
EMD	Elektronik Muharebe Düzeni
ET	Elektronik Taarruz
FDOA	Frequency Difference of Arrival (Varış Frekansı Farkı)
GNSS	Global Navigation Satellite System (Küresel Uydu Seyrüsefer Sistemi)
İHA	İnsansız Hava Aracı
RF	Radyo Frekans
RWR	Radar Warning Receiver (Radar İkaz Alıcısı)
TDOA	Time Difference of Arrival (Varış Zamanı Farkı)

## SÖZLÜK DİZİNİ

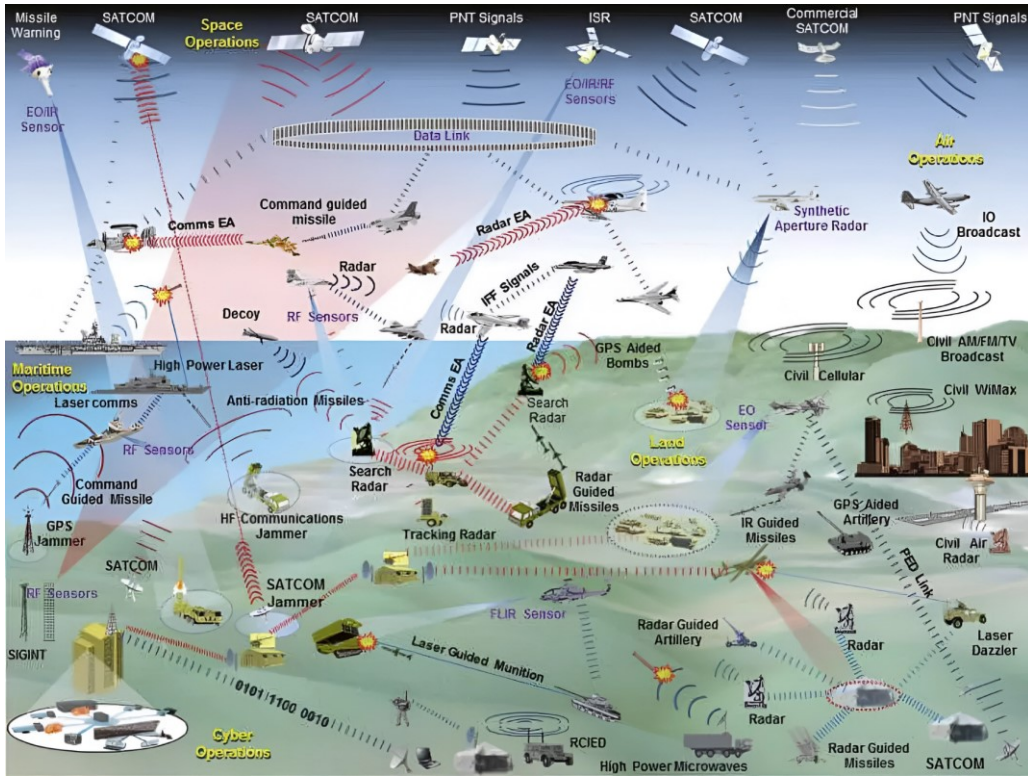
Angle of Arrival	Sinyal Geliş Açısı
Circular Error Probable	Muhtemel Dairesel Hata
Confidence Level	Kapsama Oranı
Direct Position Determination	Doğrudan Konum Belirleme
Electronic Intelligence	Elektronik İstihbarat
Elliptical Error Probable	Olası Eliptik Hata
Frequency Difference of Arrival	Variş Frekansı Farkı
Global Navigation Satellite Systems	Küresel Uydu Seyrüsefer Sistemi
Hard Kill	Fiziksel İmha
Heading	Baş Açısı
Hyperbolic Positioning	Hiperbolik Konumlandırma
Line of Bearing	Kerteriz Hattı
Polygon	Çokgen
Radar Warning Receiver	Radar İkaz Alıcı
Soft Kill	Elektronik İşlevsizleştirme
Time Difference of Arrival	Variş Zamanı Farkı
Triangulation	Üçgenleme



# 1. GİRİŞ

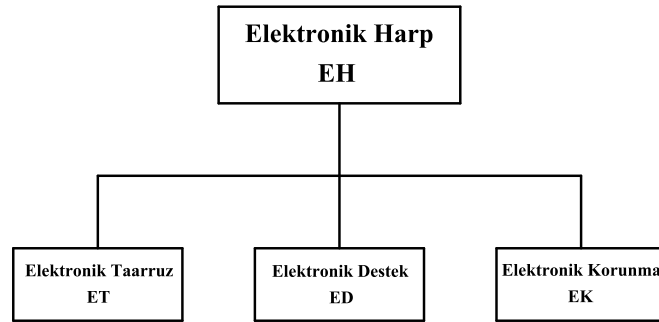
Elektronik Harp (EH); elektromanyetik spektrum üzerinde hâkimiyet kurma, muhasım unsurların spektrum kullanımını kısıtlama ve dost unsurların spektrumunu etkin şekilde kullanmasının sağlanması üzerine kurgulanmış harp çeşidi olarak tanımlanabilmektedir. Elektromanyetik spektrum temel alan radyo navigasyon sistemleri, haberleşme sistemleri, radar sistemleri, radyo frekans (RF) ve elektro-optik/kızılötesi kontrollü silah sistemleri EH konseptinin bir unsuru olarak görülmektedir. EH sistemleri kara, deniz, hava ortamlarına göre özelleştirilebilmektedir ve taktik sahada kullanılabilir [1].

Gelişen teknoloji içerisinde EH konseptinin etki alanı da genişlemektedir. Gerek taktik gerekse stratejik üstünlük elde edilmesi adına EH sistemleri yeryüzüyle sınırlı kalmayarak uzay teknolojilerine de entegre edilmektedir. Muhasım unsurlara ait elektromanyetik sinyallerin uydu sistemleri üzerinden alınabileceği ifade edilirken, gerektiği takdirde muhasım unsurun faaliyetlerini sekteye uğratılmasına yönelik saldırıların da uydu sistemlerinden yapılabileceği belirtilmektedir [2]. Teknolojinin geldiği nokta göz önüne alındığında EH sistemlerinin öneminin arttığı görülmektedir.



Şekil 1.1. Elektromanyetik Ortam Unsurları [3]

EH konsepti elektronik destek (ED), elektronik taarruz (ET) ve elektronik korunma (EK) başlıkları altında değerlendirilebilmektedir. İlgili kırılım Şekil 1.2 ile görselleştirilmektedir. ED sistemleri EH senaryosunun başlangıç noktası olarak ifade edilebilmektedir. Elektromanyetik ortamda yer alan sinyallerin tespiti ve tespite dayalı uyarı bilgisinin oluşturulması ED sistemleri tarafından yapılmaktadır. Tespit edilen sistemlerin görevlerini yapmasına engel olunması adına ET sistemleri kullanılmaktadır. ET sistemleri bünyesinde elektronik işlevsizleştirme (soft kill) ve fiziksel imha (hard kill) olarak iki ana başlık yer almaktadır. Elektronik işlevsizleştirme başlığı altında muhasım unsurun elektromanyetik sisteminin aktif ya da pasif yöntemlerle geçici olarak görevini yapamaz hale getirilmesi amaçlanmaktadır. Bununla birlikte, fiziksel imha başlığı altında anti-radyasyon füzeleri ve yönlendirilmiş enerji silahları bulunmaktadır. Fiziksel imha işlemi sonucunda muhasım unsura ait sistemin kalıcı olarak işlevsizleştirilmesi amaçlanmaktadır. EH konsepti içerisinde yer alan diğer ana başlık olan EK kabiliyetleri ise çoğunlukla muhasım unsura ait sistemin görevini yerine getirmesine yönelik bulundurduğu kabiliyetler olarak görülmektedir. EK kabiliyetleri olarak yayın kontrolü, yayının tespit edilebilirliğinin azaltılmasına yönelik alınan önlemler, anten hüzme örüntüsünün kontrolü vb. örnekler verilmektedir [4].



Şekil 1.2. Elektronik Harp Kırılımı

ED sistemlerine odaklanıldığında; sistemlerin temel amacının, daha önceden bilinen bir yayın formunun taktik sahadaki varlığının tespit edilmesi olduğu belirtilmektedir. ED sistemlerinin, karmaşık EH ortamlarında çalışabilecek şekilde tasarlanmakta olduğu belirtilirken alıcı bant genişlikleri, işlem kapasiteleri vb. kabiliyetlerinin belirlenmesi sırasında EH ortamını tasvir edebilecek nitelikte olmasına dikkat edilmektedir. Ortamın tasvir edilmesi sonucunda hem ED sisteminin kendini koruması sağlanmakta hem de dost unsurlara bilgi paylaşımı yapılmaktadır. ED sistemleri göz önüne alındığında resmedilen EH ortamının sadece var/yok bilgilerinden oluşmayacağı bilinmektedir. Ortam içerisinde hangi yayın kaynaklarının bulunduğu belirlenmesi adına yayın karakteristiklerinin

belirlenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Elde edilen karakteristikler ile önceden bilinen yayın formları karşılaştırılarak yayın kaynağı kimliklendirilmektedir [5].

Bir yayının kimliklendirilmesi ve ortam içerisinde resmedilebilmesi sırasında,

- Frekans,
- Darbe genişliği,
- Darbe tekrarlama aralığı
- Darbe genliği,
- Darbe içi modülasyon varlığı,
- Darbe geliş açısı,

bilgileri kullanılabilir [5].

Anlık verilerle oluşturulan EH ortamı, taktik manada önemli görülmektedir. Bununla birlikte, anlık verilerin kaydedilerek birleştirilmesi sonucunda herhangi bir RF kaynağın doğrudan tespitine ihtiyaç kalmaksızın uyarı oluşturulabilmesi mümkün olmaktadır. Uyarının oluşturulabilmesi için RF kaynak harita üzerinde konumlandırılabilir. Konumlandırma ve haritalama işlemi sonucunda elektronik muharebe düzeni (EMD) kavramı ortaya çıkmaktadır. EMD sayesinde muhasım unsurlara ait RF kaynakların konumları önceden bilinmektedir. EMD'nin belirlenmesi için tespitler sırasında elde edilen veriler içerisinde kaynağa ilişkin konum bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. İhtiyaç duyulan bilgi, ED sistemleri üzerinden elde edilebilmektedir [4],[5].



Şekil 1.3. Temsili Elektronik Muharebe Düzeni [6]

Şekil 1.3'te temsili olarak görüldüğü üzere karmaşık EH ortamında özellikle muhasım unsurlara ait RF kaynakların konumlarının bilinmesi ve EMD'nin uygun şekilde belirlenebilmesinin taktik üstünlük sağlayacağı değerlendirilmektedir. Üstünlüğün sağlanabilmesi adına ED sistemlerinin ve konum bulma yöntemlerinin önemi görülmektedir.

Belirtilen sebepler doğrultusunda, tez çalışması kapsamında, hava platformlarında yer alan ED sistemlerine ve havadan uygulanan konum bulma yaklaşımlarına odaklanılmaktadır. Geçmiş çalışmalarda hava aracından yapılan konumlandırma işlemlerinde üçgenleme (triangulation), varış zamanı farkı (Time Difference of Arrival, TDOA), varış frekansı farkı (Frequency Difference of Arrival, FDOA) ve doğrudan konum belirleme (Direct Position Determination, DPD) yöntemlerinden bahsedilmektedir [7],[8],[9].

Yayın geliş açısını temel alan üçgenleme yönteminde kullanılacak yön ve konum bulma yaklaşımlarının açıklandığı çalışmada [9] detay bilgilere yer verilmektedir. Yön bulma yaklaşımları sonucunda elde edilen kerteriz hatları üzerinden RF yayın kaynağının konumunun tespit edilebileceğinin gösterildiği çalışmada [10], konum tespitine dair analizler de bulunmaktadır. Bununla birlikte, birden çok sayıda alıcı kullanılarak oluşturulan çalışmada [11], varış zamanı farkı ve varış frekansı farkı yöntemleri ayrı ayrı açıklanmaktadır ve iki yöntemin ortak kullanımına yönelik analizlere yer verilmektedir. Ayrıca varış zamanı farkı veya varış frekansı farkı yöntemlerinin uygulanabilmesi için en az iki alıcı sistemin gerekliliği görülmektedir. İki aşamalı yöntemler olarak değerlendirilen yöntemler haricinde, tek aşamalı ve doğrudan konum bulma yaklaşımının uygulandığı çalışmada [8] Doppler değişim oranı üzerinden konum tespitine yönelik analizler gerçekleştirildiği görülmektedir.

Kaynaklar incelendiğinde özellikle konum bulma sonuçlarının iyileştirilmesine yönelik farklı yaklaşımlar olduğu görülmektedir. Doğrudan konum bulma yöntemleri arasında yer alan Doppler frekansı değişim oranı yöntemine ek olarak faz farkı değişim oranı yönteminin, konum bulma yaklaşımlarına yönelik uygulamalarına ilişkin detaylandırabilecek bir yaklaşım olduğu değerlendirilmektedir.

Tez çalışması kapsamında incelenecek Doppler frekansı değişim oranı ve faz farkı değişim oranı yöntemlerinin mevcut durumda görevlerini yürüten ve uygun altyapısı bulunan sistemlere entegre edilmesi sonucunda hava platformlarında bulunan sistemlerin konum

tespit performanslarında artış olabileceği değerlendirilmektedir. Özellikle faz farkı değişim oranı yöntemi üzerine araştırma yapıldığında, yönteme dair literatürde görece daha az kaynak olduğu gözlenmiştir. Bu çalışma sonucunda, yöntemlere dair analizler yapılmasıyla literatüre katkı sağlanacağı değerlendirilmiştir.

### **1.1. Tezin Amacı**

Tez kapsamında, hava platformlarında bulunan ED sistemlerinde kullanılan radyo frekans (RF) kaynak konumlandırma yaklaşımlarının karşılaştırmalı olarak incelenmesi ve Doppler frekansı veya faz farkı değişim oranları kullanılarak tek hava platformu aracılığıyla RF kaynak konumlandırmanın yapılabilmesi amaçlanmaktadır.

Amaca yönelik olarak, öncelikle hava platformlarında kullanılan ED sistemlerinin kullandığı yön ve konum bulma yaklaşımları detaylı olarak incelenmiştir. İncelemenin ardından literatürde görece daha az karşılaşılan faz farkı değişim oranı ve Doppler frekansı değişim oranı yöntemlerini temel alan tek aşamalı doğrudan pozisyon belirleme yaklaşımlarına yönelik senaryolar kurgulanmış ve benzetimler gerçekleştirilmiştir.

Benzetimler sonucunda elde edilen veriler üzerinden yöntemlerin performansına dair değerlendirmeler yapılacaktır ve RF yayın kaynağının konumunun hava platformu üzerinden tespiti sonucunda elde edilen konum doğruluğu değerlendirilecektir.

### **1.2. Tez Akışı**

Bölüm 1 içerisinde, çalışmanın temeli olan EH kavramı açıklanarak EH sistemlerinin önemi vurgulanmaktadır. EH sistemleri içerisinde yer alan ED sistemlerin kullanım amaçlarına ilişkin genel girizgâh yapılmaktadır ve ED sistemleri bünyesinde kullanılan bazı konum bulma yaklaşımlarına ilişkin bazı çalışmalar özetlenmektedir.

Bölüm 2 içerisinde, çalışmanın temelini oluşturulan ED sistemlerinde kullanılan yön ve konum bulma yaklaşımları detaylandırılmaktadır. Literatürde yer alan yön bulma yaklaşımları hava platformları özelinde incelenmekte olup avantajları ve dezavantajları açıklanmaktadır. Yön bulma yaklaşımları sonrasında RF kaynak konumunun belirlenmesine yönelik kullanılan konum bulma yaklaşımları tek bir hava platformu kurgusu üzerinden incelenmektedir.

Bölüm 3 içerisinde, RF kaynak konumunun bulunmasına yönelik çalışma kapsamında önerilen, Doppler frekansı değişim oranını temel alan yaklaşım detaylandırılmaktadır. Yaklaşımın matematiksel altyapısı ifade edilmektedir. Yaklaşımında kullanılan yön ve mesafe bulma senaryosu gösterilmektedir ve geometrinin ölçüm performansı üzerindeki etkisi açıklanmaktadır.

Bölüm 4 içerisinde, çalışma kapsamında önerilen, faz farkı değişim oranı üzerinden RF kaynak konumunun belirlenmesine yönelik yaklaşımın teorik altyapısı detaylandırılmaktadır ve matematiksel olarak ifade edilmektedir. Yaklaşımında kullanılan yön ve mesafe bulma senaryosu açıklanmaktadır ve senaryoda kullanılan varsayımlardan bahsedilmektedir.

Bölüm 5 içerisinde, Bölüm 3 ve Bölüm 4 içerisinde elde edilen yön ve mesafe bilgilerinin kullanımı açıklanmaktadır. Elde edilen bilgilerin konum bilgisine dönüştürülmesi için kullanılan yaklaşım detaylandırılmaktadır. Yaklaşım sonucu elde edilen bölgesel konum verisinin iyileştirilmesine yönelik uygulanan iyileştirmeler ve uygulama yöntemleri gösterilmektedir.

Bölüm 6 içerisinde, önceki üç bölümde kurgulanan senaryoların MATLAB® ortamına aktarılması sonucunda elde edilen sonuçlar sunulmaktadır.

Bölüm 7 içerisinde, çalışma sonucunda elde edilen kazanımlar özetlenmektedir. Elde edilen bulgular karşılaştırılarak RF kaynak konumunun tespitine yönelik kurgulanan iki farklı yaklaşım üzerinden çıkarımlar yapılmaktadır.

## 2. ED SİSTEMLERİ ve YÖN – KONUM BULMA YAKLAŞIMLARI

EH konsepti içerisinde ED sistemlerinin yeri ve önemi Bölüm 1’de kısaca sunulmuştur. Bu bölümde ED sistemleri daha detaylı incelenecek ve hava platformlarında kullanılan ED sistemlerindeki yön – konum bulma yaklaşımları detaylandırılacaktır. Çalışma kapsamında radarlar göz önüne alınarak kullanılan ED sistemleri incelenecek olup muhasım unsur haberleşmesine ve diğer amaçlı unsurlara karşı kullanılan ED sistemleri odak noktada olmayacaktır. Çalışma kapsamında, “platform” terimi, üzerinde ED sistemi bulunan hava platformunu ifade etmektedir.

Genel yaklaşımda RF yayınların dinlenmesine yönelik kullanılan sistemler radar ikaz alıcı (Radar Warning Receiver, RWR), ED ve elektronik istihbarat (Electronic Intelligence, ELINT) sistemleri olarak 3 ana başlık altında değerlendirilmektedir. Radar ikaz alıcı sistemleri tehdit varlığının tespit edilmesi, kullanıcının uyarılması, yön bilgisinin oluşturulması üzerine kurgulanmaktadır. Bu sistemler tehdit varlığı durumunda kısa sürede tepki verebilecek şekilde özel olarak tasarlanmaktadır. Bununla birlikte ED sistemleri daha yüksek işlem gücüne sahip olmaktadır ve RF yayınlara ilişkin parametreleri daha detaylı olarak üretebilmektedir. ELINT sistemler ise ED sistemlere göre daha uzun süreli dinlemelerin yapılabildiği ve doğrudan sinyal analiz algoritmalarının yürütülebildiği sistemler olarak görülmektedir. Ancak, teknolojinin gelişmesi ve işlem güçlerinin artmasıyla 3 üç ana başlık tek sistem altında toplanabilmektedir. Sonuç olarak, ED sistemleri hem ikaz oluşturma amaçlı hem de analize yönelik veri toplama amaçlı kullanılabilir [4],[9].

RF yayınların tespiti, kimliklendirilmesi, sınıflandırılması, RF yayın kaynağının yönünün ve konumunun belirlenmesi ED sistemlerinin temel kullanım amaçlarını oluşturmaktadır. Çalışma kapsamında yön ve konum belirlenme işlemlerine odaklanılmakla beraber; bilgilerin elde edilmesi sırasında kullanılan yayın tespit yaklaşımlarına da kısaca değinilecektir.

### 2.1. Yön Bulma Yaklaşımları

RF yayının geliş yönünün (Angle of Arrival, AOA) belirlenmesi, ED sistemlerinin asli amaçlardan biri olarak tanımlanmaktadır. Bilindiği üzere ED sistemleri pasif sistemler olarak çalışmaktadır. Pasif bir sistem üzerinden yön bulma işleminin gerçekleştirilebilmesi

için karşılaştırmalı işlem ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. İhtiyaca yönelik olarak hava platformları özelinde sinyal geliş yönünün belirlenmesi için çoğunlukla genlik karşılaştırma, varış zamanı farkı ve faz karşılaştırma şeklinde üç farklı yaklaşım görülmektedir.

Çizelge 2.1’de görüldüğü üzere yaklaşımların birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Kullanım amacı, maliyet ve hedeflenen performans göz önüne alınarak uygun yaklaşımın seçilmesi gerekmektedir.

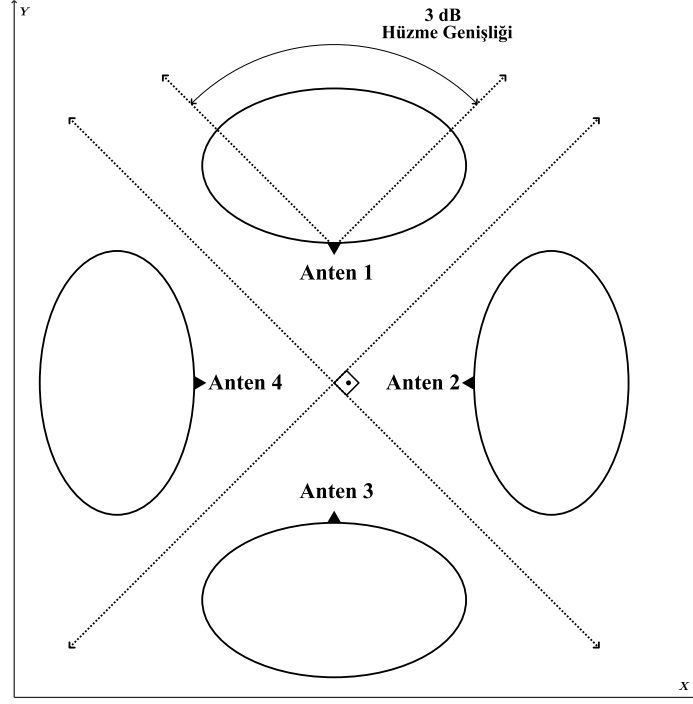
Çizelge 2.1. Yön Bulma Yaklaşımlarının Genel Karşılaştırılması [9],[12],[13]

	<b>Avantajlar</b>	<b>Dezavantajlar</b>
<b>Genlik Karşılaştırma</b>	Maliyeti düşük	Doğruluğu sınırlı Performansı frekansa göre değişken Sinyalin eşit genlikte olduğu varsayımı
<b>Varış Zamanı Farkı</b>	Maliyet etkin Geniş bant çalışabilir Doğruluk iyileştirilebilir	Büyük platform ihtiyacı
<b>Faz Karşılaştırma</b>	Doğruluk çok iyi	Maliyet yüksek Hassas kalibrasyon gerekli Frekans kısıtı

### 2.1.1. Genlik Karşılaştırma

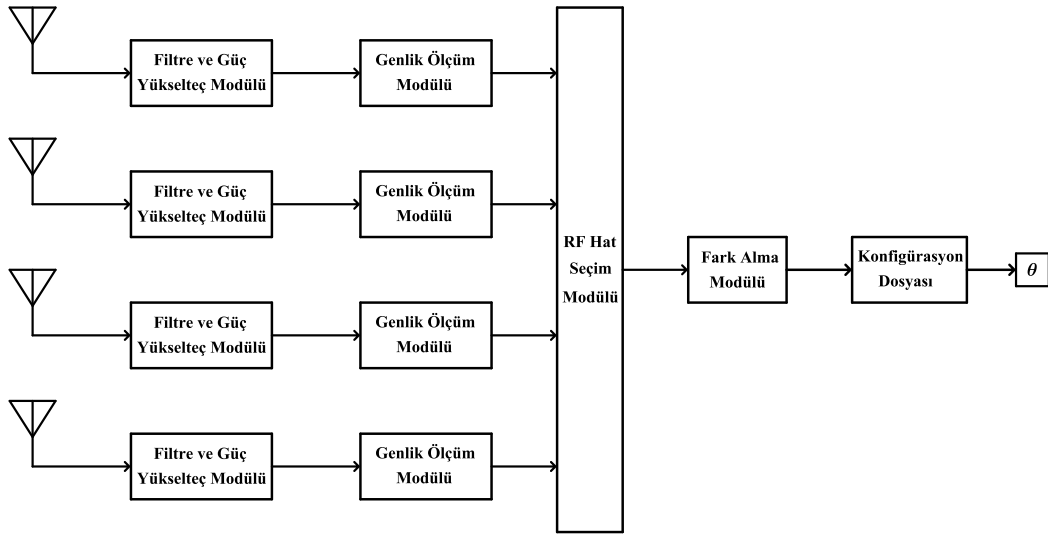
ED sistemlerinde kullanılan antenler, yarıda 360° tam kapsama sağlanması amacıyla aralarında 90° bakış açısı farkı olacak şekilde platformun belirli bölgelerine yerleştirilebilmektedir. Yerleşim sırasında anten kapsamalarının birbirleri ile çakışması da sağlanmaktadır. Böylelikle belirli bir yönde herhangi bir yayın olduğu takdirde yayının birden fazla anten tarafında alınması amaçlanmaktadır. Oluşan çakışmalar genlik karşılaştırma yönteminin temelini oluşturmaktadır ve farklı antenlerden alınan yayınların genlik değeri üzerinden yön hesaplaması yapılmaktadır. Yön hesaplamasının yapılabilmesi için antenlere ulaşan güç değerlerinin eşit olduğu varsayılmakta olup, antenlerin hüzmeye şekilleri sebebiyle alınan güç değerlerinde görülen farklılıklar üzerinden işlem yapılmaktadır [4].





Şekil 2.1. Genlik Karşılaştırma – Anten Geometrisi

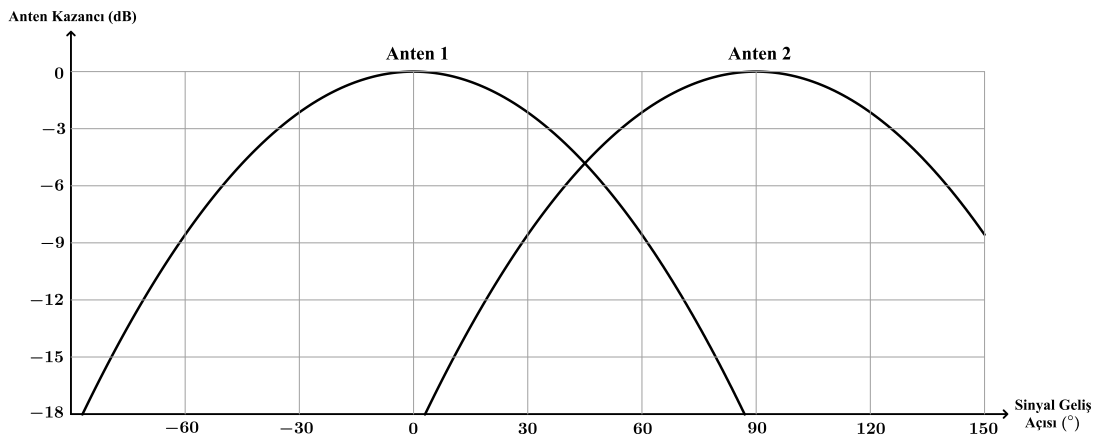
Şekil 2.1’de genlik karşılaştırma yöntemi için kullanılabilen anten geometrisi görülmektedir. Farklı antenler üzerinden elde edilen bilgiler Şekil 2.2’de jenerik olarak verilen blok diyagram kullanılarak işlenmektedir. Verilerin işlenmesi sonucunda genlik farkı değerleri elde edilmektedir. Elde edilen değerler, Şekil 2.2’de görülen ve antenlerin açı – kazanç ilişkilerini içeren konfigürasyon dosyası ile karşılaştırılmaktadır. Karşılaştırma sonucuna göre genlik farkı üzerinden yön bilgisi elde edilmektedir.



Şekil 2.2. Genlik Karşılaştırma Jenerik Blok Diyagram

Konfigürasyon dosyasındaki açı – kazanç ilişkisinin kaydı sırasında kullanılan hassasiyet düzeyi, yön hesabını doğrudan etkilemektedir. Açı adımları küçük seçilerek açı – kazanç ilişkisi kaydedildiği takdirde konfigürasyon dosyasının boyutu artarken açı adımlarının büyük seçilmesi sonucunda yön ölçüm çözünürlüğü kötüleşmektedir. Sistem kullanım amacına göre açı – kazanç ilişkisi tasarım sırasında belirlenmektedir.

Genlik karşılaştırma yöntemi belirtildiği gibi toplam 4 adet anten ile uygulanabilmektedir ve görece düşük maliyetlidir. Bundan dolayı özellikle hassas yön tespiti gerektirmeyen senaryolarda hava platformları için sıklıkla tercih edilmektedir [12].



Şekil 2.3. Yön – Kazanç İlişkisi

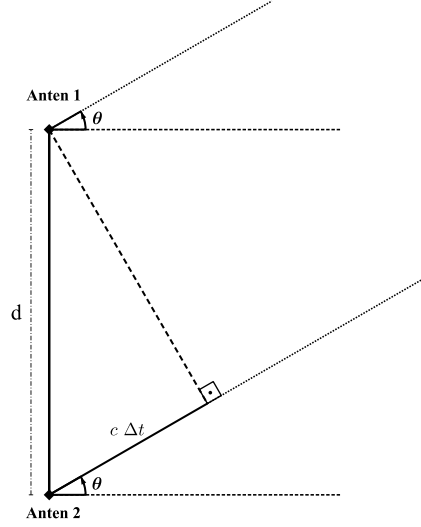
Jenerik bir örnek olarak sistemde, anten 1 üzerinden  $P_{RA1} = A \sin(\theta)$  ve anten 2 üzerinden  $P_{RA2} = A \cos(\theta)$  güç değerleri ile sinyal alındığında Eşitlik (2.1) kullanılarak yön bilgisi elde edilebilmektedir [12].

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{P_{RA2}}{P_{RA1}} \right) \quad (2.1)$$

Çalışma kapsamında doğrudan konum bulma yöntemlerine odaklanılmaktadır. Bu nedenle genlik karşılaştırma temelli yön bulma yaklaşımı kapsam dışındadır. Yaklaşımın teorik altyapısının açıklandığı çalışmada [4], matematiksel gösterimlere yer verilmektedir. Bununla birlikte, yaklaşım sırasında gözlenen etkilerin incelendiği çalışmada [9]; antenler arası mesafenin, RF yayın kaynağının hüzme şeklinin ve irtifanın yön ölçüm performansı üzerindeki etkileri ile bu etkilerin sonuçları açıklanmaktadır.

### 2.1.2. Varış Zamanı Farkı (Yön Belirleme)

Varış zamanı farkı yönteminde yayın geometrisi üzerinden yön bilgisi elde edilmektedir. Yöntemin uygulanması için aralarında belirli mesafe bulunan iki anten kullanılmaktadır. Yayının antenlere belirli açıda gelmesi durumunda yayının antenlere ulaşma süreleri üzerinden yön bilgisi elde edilebilmektedir.

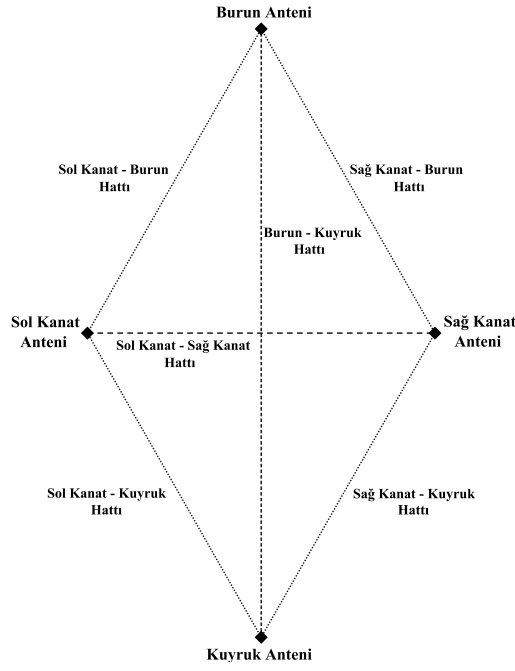


Şekil 2.4. Zaman Farkı Yöntemi Ölçüm Geometrisi

Şekil 2.4'te yer alan geometride antenler arası mesafe  $d$  olarak alındığında, sinyal geliş açısı ( $\theta$ ) Eşitlik (2.2)'de verildiği şekilde elde edilebilmektedir. Eşitlikte yer alan  $\Delta t$  ifadesi, sinyalin iki antene varış zamanı farkıdır ve alınan iki sinyalin korelasyonu ile belirlenebilmektedir.

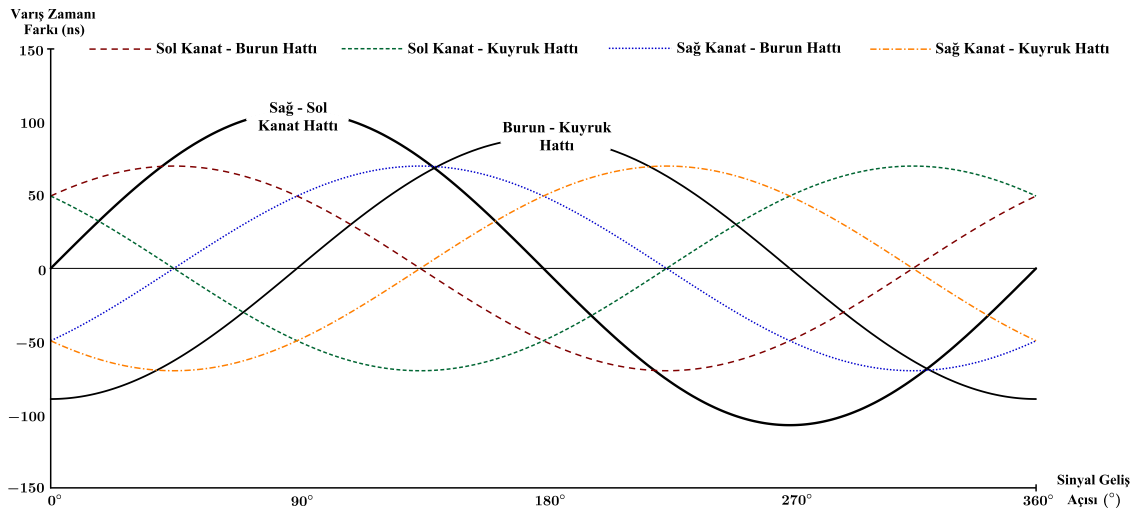
$$\theta = \sin^{-1} \left( \frac{c \Delta t}{d} \right) \quad (2.2)$$

ED sistemlerinde, yönlü anten ile tam kapsamanın sağlanması adına çoğunlukla 4 antenli konfigürasyonlar kullanılmaktadır [9]. 4 antenli konfigürasyon sonucunda toplam 6 adet hat oluşabilmektedir ve her hat için zaman farkı bilgisi üretilebilmektedir. Ancak yayın geometrisi ve anten kazanç etkisi göz önüne alındığında yayının her antene ulaşması beklenmemektedir. Yayın ulaşan antenler arasında zaman farkı bilgisi kullanılabilir. Yayının sadece 2 antene ulaşması durumunda yön belirsizliği oluşabilmesine rağmen yönlü antenler ve platform üstü yerleşim bilgilerinin kullanımı ile belirsizliğin çözülmesi beklenmektedir [9].



Şekil 2.5. Tipik Varış Zamanı Farkı Konfigürasyonu

Farklı hatlar üzerinden elde edilen zaman farklarının farklı yönlerle ilişkili olduğu Şekil 2.6’da gösterilmektedir. Zaman farkı ile yön bilgisi arasındaki ilişki, yön bulma yaklaşımına ait konfigürasyon dosyasında tutulabilmektedir ve ölçümlerin alınması sonrasında elde edilen bilgi üzerinden yön tayini yapılabilmektedir.

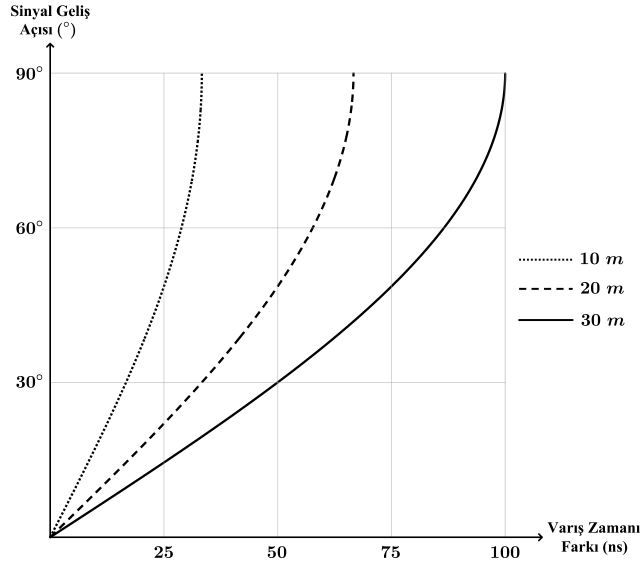


Şekil 2.6. Hatlar için Zaman Farkı ve Açılı İlişkisi

Zaman farkı temelli yön bulma yaklaşımında sinyal varış anının doğru belirlenmesi kritik öneme sahiptir. Yaklaşımında kullanılan antenlerin frekans kapsamasının yeterli olduğu ve alınan yayının yeterli güçte olduğu durumda yayın frekansına bağlı olarak performans

değişiminin gözlenmesi beklenmemektedir. Bu bakımdan zaman farkı yönteminde, genlik karşılaştırma yöntemine göre daha kararlı sonuçlar elde edilebilmektedir [4].

Yöntem, özellikle büyük hava platformlarında kullanıldığı takdirde yüksek çözünürlüklü yön tayini yapabilmektedir. Eşitlik (2.2) incelendiğinde yön çözünürlüğü ile antenler arası mesafenin ilişkili olduğu görülmektedir. Buna göre antenler arası mesafenin artırılması durumunda yön bilgisinin adım aralıkları küçülmekte olduğu ve yön çözünürlüğünün iyileştiği görülmektedir.



Şekil 2.7. Antenler Arası Mesafenin Zaman Farkı – Yön İlişkisine Etkisi

Yöntem bünyesinde çözünürlüğün teorik hesabının yapılması da mümkün olmaktadır. Eşitlik (2.2)'de yer alan ifade tekrar düzenlenerek türevi alındığında Eşitlik (2.3)'te yer alan ifade ortaya çıkmaktadır [9].

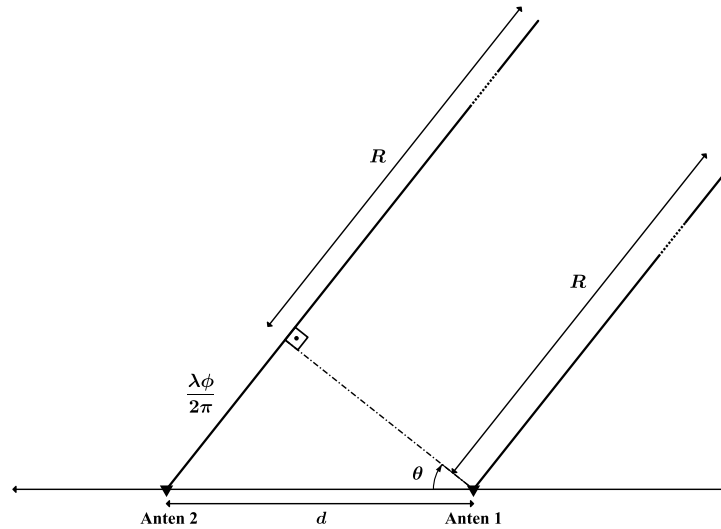
$$\delta\theta = \frac{c}{d \cdot \cos(\theta)} \delta\Delta t \quad (2.3)$$

Modern sistemlerde sinyal varış zamanı ölçüm hassasiyetinin 1 ns altında olduğu belirtilmektedir. Bu doğrultuda, antenler arası mesafenin  $d = 10$  m ve sistem varış zamanı ölçüm hassasiyetinin  $\delta\Delta t = 1$  ns olarak kabul edildiği durumda  $3^\circ$  çözünürlükle yön bilgisinin elde edilebileceği belirtilmektedir [9]. Bununla birlikte, varış zamanı farkı yönteminde, ölçüm işleminde sinyalin varış zamanı asıl etken olması sebebiyle ölçüm sonuçları frekansa karşı daha tutarlı davranmaktadır.

Yöntem sonucu elde edilen yön bilgileri kullanılarak konum bilgisi dolaylı şekilde elde edilebilmektedir, ancak çalışma kapsamında zaman farkı temelli yön ve konum bulma yaklaşımları doğrudan kullanılmamıştır. Yöntemle ilgili olarak [4] ve [9] içerisinde matematiksel açıklamalar yer almaktadır. Ayrıca, [9] içerisinde yöntemin uygulanması sırasında kullanılan; varış zamanının tespiti, antenler arası mesafenin etkisi, ED sistemi antenlerinin hüzmeye yapısının ölçüm performansına etkisi ve antenlerin platform üzerindeki yerleşimin etkisine dair açıklamalara yer verilmektedir.

### 2.1.3. Faz Karşılaştırma

Faz karşılaştırmalı yön bulma yaklaşımında zaman farkı yöntemine benzer bir yaklaşım sergilenmektedir. Zaman farkı yönteminde, sinyallerin varış zamanlarının ölçülmesinden sonra zaman farkı elde edilirken faz karşılaştırma yönteminde aralarında dalga boyu mertebesinde mesafe bulunan antenlerden alınan sinyaller arasındaki faz farkı üzerinden işlem yapılmaktadır.



Şekil 2.8. Faz Karşılaştırma Yöntemi Geometrisi

Şekil 2.8'de görülen geometride  $d = \lambda$  olarak belirlenmektedir ve Eşitlik (2.4) kullanılarak yön bilgisi elde edilebilmektedir. Eşitlikte yer alan ters sinüs fonksiyonunun  $[-1, 1]$  aralığında tanımlı olduğu ve  $[-\pi/2, \pi/2]$  açı değerlerini üretebildiği bilinmektedir.

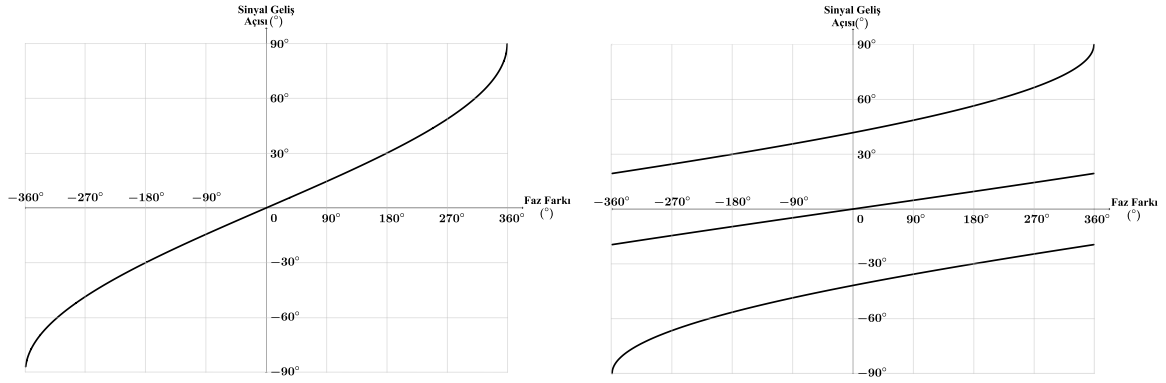
$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda \phi}{2\pi d}\right) \quad (2.4)$$

Eşitlik (2.4) incelendiğinde, yön bilgisinin doğru üretilmesinin yayın frekansı ve antenler arası mesafe ile ilişkili olduğu görülmektedir. Yön belirsizliği olmaksızın yön belirlenebilmesi için faz farkının ( $\phi$ )  $2\pi$  değerini aşmaması gerekmektedir.

Faz karşılaştırma yönteminde kullanılan antenler arası mesafenin, frekans kapsamı ve yön ölçüm çözünürlüğü üzerindeki etkisi bir örnek üzerinden açıklanmıştır. Örneğin, tasarım sırasında referans alınan yayın frekansının 3 GHz olması durumunda  $\lambda$  dalga boyu 10 cm olmaktadır. Sistemin,  $[-2\pi, 2\pi]$  aralığındaki tüm faz farkı değerlerini  $[-\pi/2, \pi/2]$  aralığındaki tüm geliş yönü açısı değerlerine birebir eşleştirebilmesi ve yön belirsizliği olmaksızın sonuç alabilmesi adına  $d$  mesafesinin en fazla 10 cm olarak belirlenmesi gerekmektedir. Belirtilen şekilde kurgulanan sistemde,  $d$  mesafesi sabit tutularak frekans değeri 6 GHz olarak belirlendiğinde,  $\lambda$  dalga boyu 5 cm olmaktadır. Dalga boyunun  $d$  mesafesinden küçük olduğu ve antenlerden alınan sinyaller arasındaki faz farkının  $2\pi$  olduğu durumda ölçülebilecek maksimum açı değeri  $30^\circ$  olarak belirlenebilmektedir. Belirtilen açı değerinden daha yüksek açıdan sinyal alınması durumunda gerçekte faz farkı  $2\pi + p$  değerinde iken ölçüm sonucu doğrudan  $p$  olarak hesaplanmaktadır ve faz tekrarı sebebiyle açı ölçümü hatalı olmaktadır. Ancak, frekansın artırılması sırasında gözlenen belirsizliğe karşılık  $[-2\pi, 2\pi]$  faz farkı değer aralığı üzerinden yön açısı olarak  $[-\pi/2, \pi/2]$  aralığı elde edilmektedir ve sistemin ölçüm çözünürlüğünün iyileştiği görülmektedir.

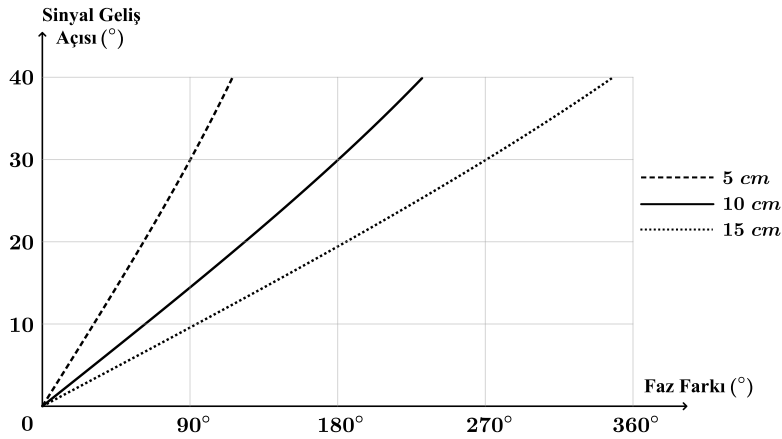
Yüksek frekans örneğine ek olarak, tasarımda kullanılan frekans değerinden düşük frekanslı yayın alındığı durumu değerlendirildiğinde, yayın frekansının 1 GHz olduğu durumda  $\lambda$  dalga boyu 30 cm olmaktadır ve antenler arası mesafe sebebiyle sistemde ölçülebilecek maksimum faz farkı  $2\pi/3$  olarak ölçülmektedir. Sonucun  $2\pi$  faz farkı değerinden düşük olması sebebiyle belirsizlik oluşmamaktadır ancak  $[-2\pi/3, 2\pi/3]$  faz farkı değer aralığının  $[-\pi/2, \pi/2]$  yön açısı aralığı ile eşleştiği ve yön çözünürlüğünün kötüleştiği görülmektedir.

Sonuç olarak, faz karşılaştırma sisteminin tasarımı sırasında antenler arası mesafe, istenen frekans kapsamına göre belirlenmektedir. Tasarımda kullanılan frekanstan düşük frekansta yayın alındığı durumda yön çözünürlüğü kötüleşmesine rağmen belirsizlik gözlenmezken, yüksek frekans yayın alınması durumunda çözünürlük iyileşmesine karşılık maksimum ölçülebilecek açı değeri azalmaktadır ve daha yüksek açı değerinden yayın alındığı durumda yön belirsizliği oluşabilmektedir.



Şekil 2.9. Frekans Etkisi a) 3 GHz b) 9 GHz

Şekil 2.9’da antenler arası mesafe sabit tutularak frekansın artırılmasının yön belirsizliği ve ölçüm çözünürlüğü üzerindeki etkisi görülmektedir. Yön ölçüm çözünürlüğünün değerlendirilmesinde kullanılacak diğer yöntem ise yön belirsizliği olmaksızın antenler arası mesafenin artırılması durumu olmaktadır. Şekil 2.10’da görüldüğü üzere aynı geliş yönüne ve aynı frekansa sahip yayın, farklı sistemler tarafından ölçümlendiğinde farklı faz değerlerine karşılık gelmektedir. Antenler arası mesafesi büyük olan sistemde her faz derecesine karşılık gelen yön bilgisi daha küçük olmaktadır ve çözünürlük iyileşmektedir.



Şekil 2.10. Antenler Arası Mesafenin Çözünürlüğe Etkisi

Faz karşılaştırma yönteminde belirsizliklerden kurtulmak için önerilen bazı yöntemler bulunmaktadır. Yönlü anten kullanımı yöntemlerinden birisi olarak kabul edilmektedir. Örnek olarak, Şekil 2.9’da 9 GHz frekans değeri için görülen senaryoda 3-dB hüzme genişliği  $\pm 15^\circ$  olduğu kabul edilen anten kullanıldığı takdirde antenin hüzmesi dışında kalan yönlerden herhangi bir yayın alınmayacağı ve böylelikle belirsizliğin ortadan kalkabileceği belirtilmektedir [14].



Belirsizlik çözümü için dizi anten kullanımı da tercih edilebilmektedir. Farklı frekans seviyelerine odaklanması amacıyla aralarında farklı mesafeler bulunan antenler ile oluşturulan diziler tasarım aşamasında tanımlanmakta ve belirsizlik çözümünü mümkün hale getirmektedir. Dizi kullanımı sayesinde antenler arası mesafenin artırılması ile elde edilen çözünürlük avantajı kullanılabilirken açı ölçüm belirsizliğinin de önüne geçilebilmektedir [15].

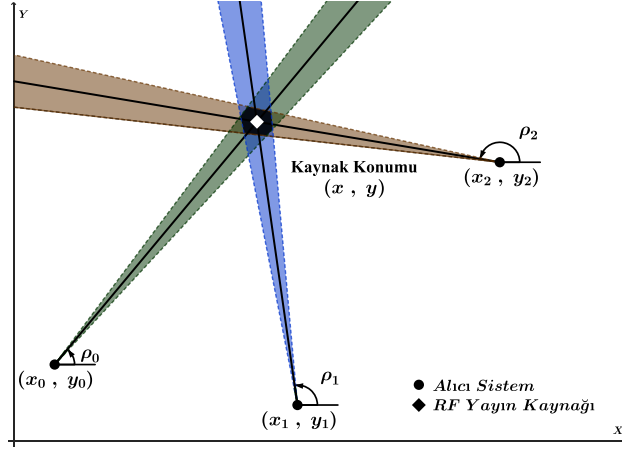
Belirsizlik çözme adına önerilen diğer yöntem ise genlik ve faz karşılaştırma yöntemlerinin birlikte kullanımı olarak görülmektedir. Yöntem, anten hüzmeye genişliğinin daraltılması yaklaşımına benzer bir yaklaşım oluşturmaktadır ve yayının beklenmediği yönlerde oluşabilecek belirsizlikler engellenebilmektedir. Hibrit olarak uygulanan yöntem bünyesinde bulunan anten setleri ile genlik karşılaştırma yaklaşımları üzerinden yayın geliş sektörü belirlenmektedir. Elde edilen sektör üzerinde faz karşılaştırması yapılarak daha yüksek doğrulukla yön belirlenebilmektedir [16].

## **2.2. Konum Bulma Yaklaşımları**

ED sistemlerinin, taktik saha ortamında kritik öneme sahip olduğu ve EMD'nin belirlenmesine katkı sağladığı Bölüm 1'de açıklamıştır. Bu başlık kapsamında EMD'nin belirlenmesi için kritik öneme sahip konum bulma yaklaşımları detaylandırılmaktadır. Yaklaşımlar hava platformlarında kullanılan ED sistemleri özelinde açıklanmaktadır. Konum bulma yaklaşımlarında; üçgenleme yöntemi yaygın olarak görülmekle birlikte TDOA, FDOA ve doğrudan konum belirleme yöntemleri de bulunmaktadır.

### **2.2.1. Üçgenleme**

Üçgenleme yöntemi, Bölüm 2.1'de açıklanan yön bulma yaklaşımları kullanılarak farklı ölçüm noktalarından alınan yön bilgilerinin birleştirilmesi ile RF kaynak konumunun bulunmasını amaçlamaktadır. Yöntemin temel kullanımında birbirlerinden farklı pozisyonlara yerleştirilmiş alıcı sistemler ile elde edilen yön bilgileri birleştirilmektedir ve konum tespiti yapılabilir. Bu şekilde konum tespiti yapılabilmesi için en az iki adet alıcı istasyona ihtiyaç duyulmaktadır [14].

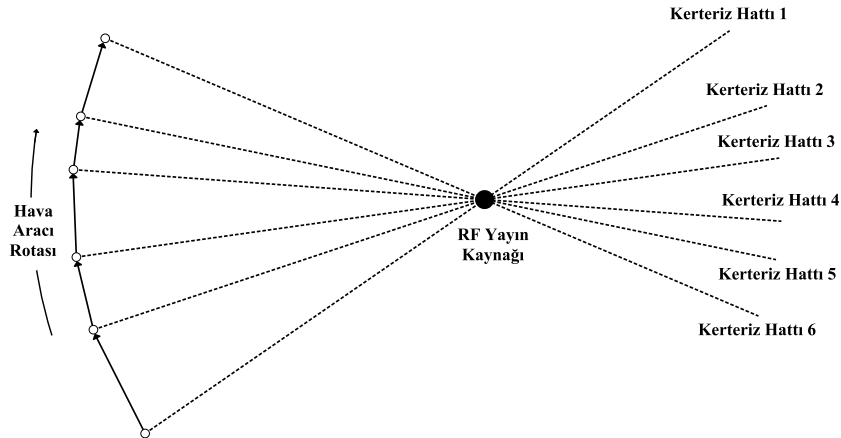


Şekil 2.11. Üçgenleme Yöntemi Geometrisi

Şekil 2.11’de görülen geometri kullanılarak Eşitlik (2.5)’te yer alan trigonometrik ifade üzerinden kerteriz hatları çizdirilmektedir. Çizdirilen hatların teorik olarak tek bir noktada kesişmesi beklenmektedir. Kesişen nokta üzerinden de RF yayın kaynağının koordinatları belirlenebilmektedir [14].

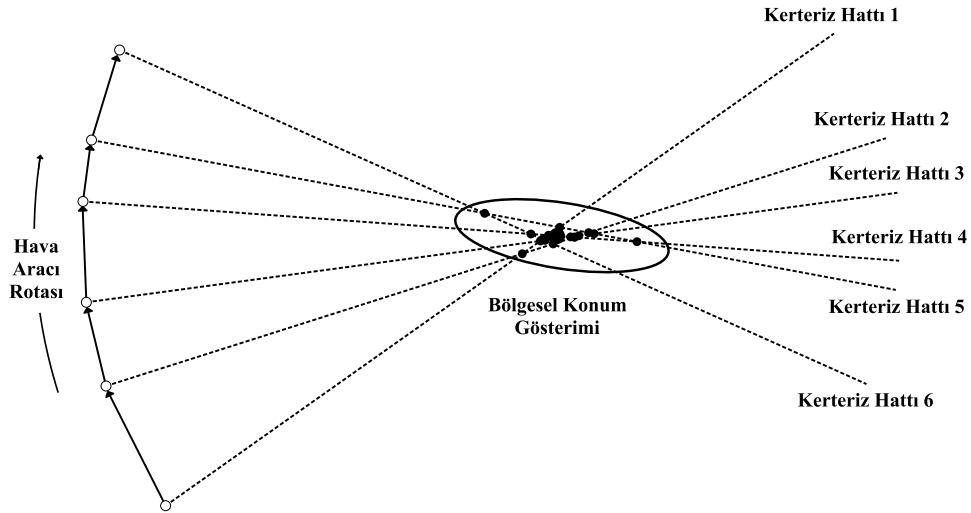
$$\rho_i = \tan^{-1} \left( \frac{y - y_i}{x - x_i} \right) \quad (2.5)$$

Üçgenleme yöntemi, farklı ölçüm istasyonlarından alınan ölçümlerin birleştirilmesini temel almaktadır, ancak hareketli tek bir platform kullanılarak da üçgenleme yapılması mümkün olmaktadır. Tek platform ile üçgenleme yapılabilmesi için platformun hareketi boyunca çeşitli noktalarda ölçüm alması yeterli olmaktadır ve alınan ölçüm değerlerinin (kerteriz hatları) birleştirilmesi ile Şekil 2.11’de görülen geometri sağlanabilmektedir.



Şekil 2.12. Hava Aracından Üçgenleme

Şekil 2.12’de görülen geometri ideal durumu temsil etmektedir. Gerçekçi senaryolar göz önüne alındığında; yön belirleme sisteminin anten hüzme genişliği, olası ölçüm hataları vb. etkenler gözlenmektedir. Gözlenen etkiler sebebiyle ölçüm sistemi tarafından elde edilen kerteriz hatları farklı noktalarda kesişebilmektedir ve birden çok konum tahmini ortaya çıkmaktadır. Konum belirleme sistemleri, oluşan belirsizliğe çözüm olarak nokta konum belirleme yerine Şekil 2.13’te gösterildiği gibi bölgesel bir konum belirlemektedir.



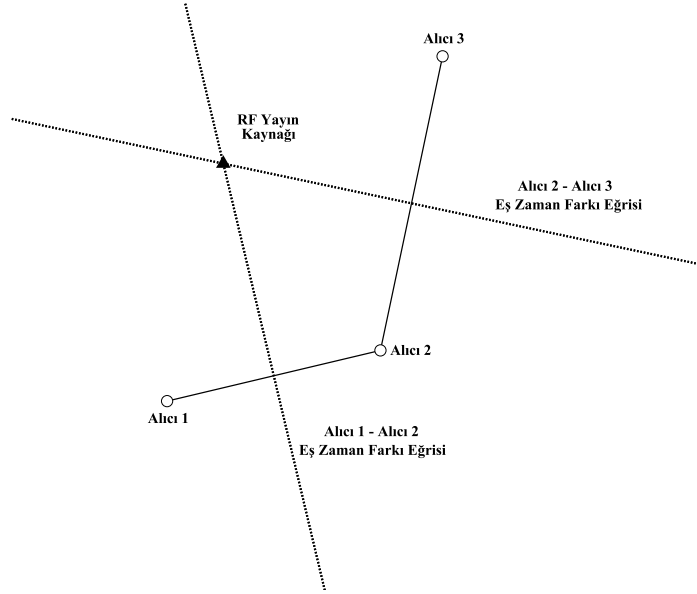
Şekil 2.13. Gerçekçi Kerteriz Kesişimleri ve Bölgesel Konum Gösterimi

Mevcut sistemler göz önüne alındığında, hava platformları aracılığıyla üçgenleme yöntemi üzerinden konum bulunması sırasında en az altı adet kerteriz hattının bulunması ve ilk – son kerteriz hattı arasında yaklaşık  $12^\circ$  açı farkının gerekliliği belirtilmektedir. Bazı durumlarda ölçüm sırasında hava platformunun en az 10 km yol alması gerekliliği de ifade edilmektedir [9]. Bununla birlikte, uçuş rotasının doğrudan RF yayın kaynağı doğrultusunda olmamasının ve Şekil 2.12’de görüldüğü gibi platformun RF yayın kaynağı etrafında radyal hareket yapmasının ölçüm performansını iyileştireceği belirtilmektedir [17].

### 2.2.2. Varış Zamanı Farkı (Konum Belirleme)

Varış zamanı farkı üzerinden konumlandırma yönteminde birden fazla platforma ulaşan sinyallerin varış zamanı farkları üzerinden işlem yapılmaktadır. Sinyaller, farklı konumlarda bulunan platformlara farklı zamanlarda ulaşmaktadır. Sinyal varış zamanlarının farkı alındığında RF yayın kaynağının, ilgili farkı oluşturabilecek bir hat üzerinde olması beklenmektedir.

Ortamda iki adet sabit ED sistemi bulunduğu durumda tek bir zaman farkı hattı oluşturulabilmektedir ve konum tespiti doğrudan yapılamamaktadır. Bununla birlikte 2-boyut konumlandırma için en az üç ED sistemi üzerinden zaman farkları alındığında en az iki adet hat oluşturulmaktadır ve konum tespiti yapılabilmektedir. TDOA yönteminde elde edilen hatların hiperbol olması sebebiyle yöntem hiperbolik konumlandırma (hyperbolic positioning) yöntemi olarak da isimlendirilmektedir [14],[18].



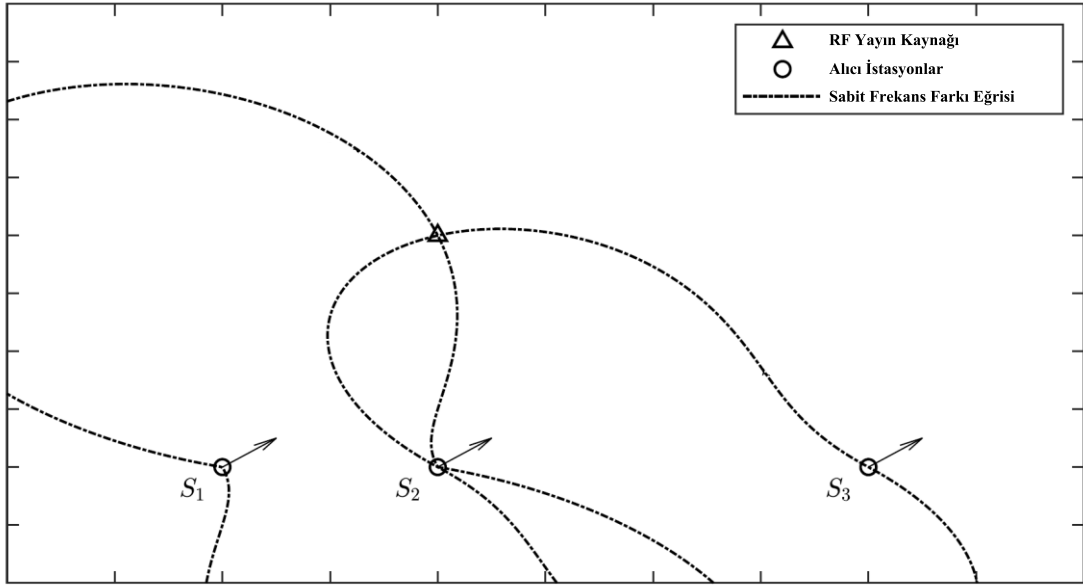
Şekil 2.14. Varış Zamanı Farkı Geometrisi

Varış zamanı farkı yönteminde birden fazla platformun kullanılması ve zaman bilgisi üzerinden işlem yapılması sebebiyle zaman senkronizasyonu oldukça önem kazanmaktadır. Zaman bilgisinin senkronize edilmesinde GNSS tabanlı sistemler yaygın yöntem olarak kullanılmasına rağmen görülen senkronizasyon bozuklukları platformlar arası karşılıklı haberleşme ile minimize edilebilmektedir [19].

Hava platformları özelinde değerlendirildiğinde yönteminin kullanımı için iki adet hava aracının farklı noktalarda zaman farkı ölçümü almaları yeterli olmaktadır ve oluşturulan hiperboller ile RF yayın kaynağının konumu belirlenebilmektedir. Genel anlamda bilinen hava platformları göz önüne alındığında iki adet platformun konum bulma işlemi için kullanılmasının maliyetli olacağı aşikardır. Bundan dolayı, gelişen teknoloji doğrultusunda daha düşük maliyetli görülen İHA'ların da bu amaçla kullanılabileceği ve işlem maliyetini düşürebileceği değerlendirilmektedir [20].

### 2.2.3. Varış Frekansı Farkı

Varış frekansı farkı yöntemi yapısal olarak varış zamanı farkı yöntemine benzemektedir ve ortamda birden çok sayıda bulunan ED sisteminin tespit ettiği yayınların frekans değerleri arasındaki fark üzerinden konum tespiti yapabilmektedir. RF yayın kaynağının sabit frekansta yayın yaptığı varsayımı altında ED sistemlerin aldığı yayınlar arasındaki frekans farkının Doppler kaynaklı olması gerektiği aşikardır. Bundan dolayı, varış zamanı farkı yönteminden farklı olarak varış frekansı farkı yönteminin işlevini yerine getirebilmesi için ED sistemi ve RF yayın kaynağından en az birinin hareketli olmasına ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 2.15. FDOA Geometrisi [14]

Yöntem, özellikle karmaşık yapısı ve frekans ölçüm sisteminde ihtiyaç duyduğu hassasiyet sebebiyle varış zamanı farkı yöntemi kadar yaygınlaşmamıştır [14]. Varış frekansı farkı yöntemi “differential Doppler” yöntemi olarak da bilinmektedir [21].

### 2.2.4. Doğrudan Konum Belirleme

Konum bulma yaklaşımları içerisinde anlatılan üçgenleme, TDOA ve FDOA yöntemleri açıklandığı üzere iki aşamalı olarak konum belirleyebilmektedir. Yöntemlerde, alınan yayın üzerinden ilk aşamada yön, zaman farkı veya frekans farkı belirlenmektedir. Elde edilen bilgiler doğrultusunda konum tespiti yapılmaktadır.

Doğrudan konum belirleme yaklaşımı ise göreceli olarak yeni bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir. Yaklaşımında, alınan yayına ait parametrelerin belirlenmesi sırasında zaman farkı veya Doppler frekansı gibi yayın parametreleri doğrudan aranmazken RF yayın kaynağının konumunun belirlenmesi önceliklendirilmektedir [7],[8],[22].

Çalışma kapsamında incelenen Doppler frekansı değişim oranı ve faz farkı değişim oranı yöntemleri de doğrudan konum belirleme yaklaşımı içerisinde değerlendirilebilmektedir.

### 3. DOPPLER FREKANSI DEĞİŞİM ORANI YÖNTEMİ

Çalışma kapsamında RF yayın kaynağı ile hava platformu üzerinde bulunan ED sistemi arasındaki açının ve menzilin tespiti için ilk olarak Doppler frekansı değişim oranı yöntemi incelenecektir.

Bölüm içerisinde; sinyal geliş açısı ve menzil bilgisinin elde edilmesine yönelik teorik altyapı, uygulanan senaryo, senaryo içerisinde yer alan matematiksel eşitlikler ve çözümleri, senaryonun kurgulandığı varsayımlar anlatılmaktadır. Ölçüm geometrisinin, platform dinamiklerinin ve gerçek mesafenin ölçüm doğruluğuna olan etkilerine değinilmektedir.

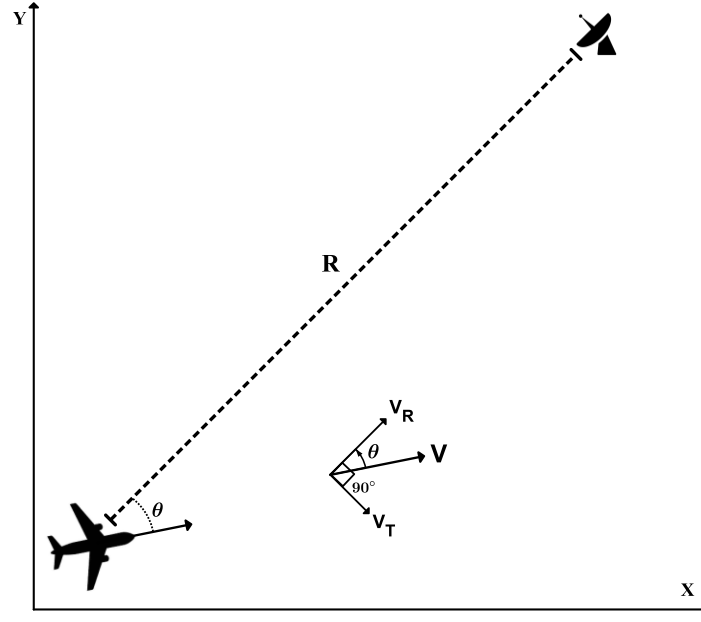
Yöntemin oluşturulması sırasında iki aşama yer almaktadır. İlk aşamada, ölçülen Doppler frekansı değerinin algoritmaya bir girdi olarak verildiği varsayılmaktadır ve girdinin sağlanması adına sentetik veri üretilmektedir. İkinci aşamada, üretilen sentetik veri algoritma içerisinde işlenmektedir.

#### 3.1. Doppler Etkisi

Doppler etkisi, herhangi bir yayının frekansının yayın kaynağı ve/veya izleyicinin görelî hareketi ile ilişkili olarak farklı düzeyde algılanması şeklinde ifade edilebilmektedir. Doppler etkisi sebebiyle frekansta gözlenen farklılık Doppler frekansı olarak isimlendirilmektedir.

$$f_D = \frac{V \cos(\theta)}{\lambda} = \frac{V_R}{\lambda} \quad (3.1)$$

Doppler frekansı, radyal hareketin değişmesi sonucunda farklılaşmaktadır ve Eşitlik (3.1)'de görüldüğü şekilde hesaplanmaktadır. Doppler frekansı değerinin belirlenebilmesi için yayın kaynağında kullanılan frekans bilgisine ve görelî hız değerine ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 3.1. Doppler Geometrisi

Eşitlik (3.1)'de yer alan  $\theta$  açı değeri Şekil 3.1'de görülen platform ile RF yayın kaynağı arasındaki açı olarak tanımlanmaktadır. Platformun hızı  $V$  olduğu durumda, platformun radyal hızı  $V_R$  ve platformun teğet hızı  $V_T$  olarak Eşitlik (3.2) ve Eşitlik (3.3)'te görüldüğü şekilde tanımlanmaktadır.

$$V_R = V \cos(\theta) \quad (3.2)$$

$$V_T = V \sin(\theta) \quad (3.3)$$

### 3.2. Menzil ve Sinyal Geliş Açısı Hesaplamaları

Eşitlik (3.1)'de görüldüğü şekilde platform hareketi Doppler frekansını doğrudan etkilemektedir. Frekans üzerindeki etkiden yararlanılması mümkün olmakla beraber EH konsepti içerisinde değerlendirildiğinde RF yayın kaynağından yayılan sinyalin frekansının, sinyal geliş açısının ve RF yayın kaynağının konumunun bilinmemesi sebebiyle frekans üzerindeki Doppler etkisinin doğrudan gözlenmesi mümkün olmamaktadır. Bununla birlikte, ED sistemde yer alan frekans ölçüm devreleri sayesinde alınan sinyalin frekansı ( $f_R$ ) belirlenebilmektedir.

Eşitlik (3.4)'te, alınan sinyalin frekansının bileşenleri görülmekte olup duran bir RF kaynaktan yayılan sinyal frekansı ( $f_T$ ) kararlı ve sabit olduğu takdirde alınan sinyal frekansı



üzerinde sadece platform hareketi sebebiyle oluşan Doppler frekansına ait zamansal değişiminin bulunduğu görülmektedir.

$$f_R(t) = f_T + f_D(t) \quad (3.4)$$

Yukarıda belirtildiği gibi  $f_T$  değerinin bilinmemesi sebebiyle  $f_D$  değerinin doğrudan belirlenmesi mümkün olmamaktadır ancak Eşitlik (3.4)'te yer alan ifadenin türevi alındığında  $f'_T = 0$  olması sebebiyle yayın frekansının etkisi ortadan kalkmaktadır ve Eşitlik (3.5)'te görüldüğü üzere alınan sinyal frekansının değişim oranı, Doppler frekansı değişim oranına eşitlenmektedir.

$$f'_R(t) = f'_D(t) \quad (3.5)$$

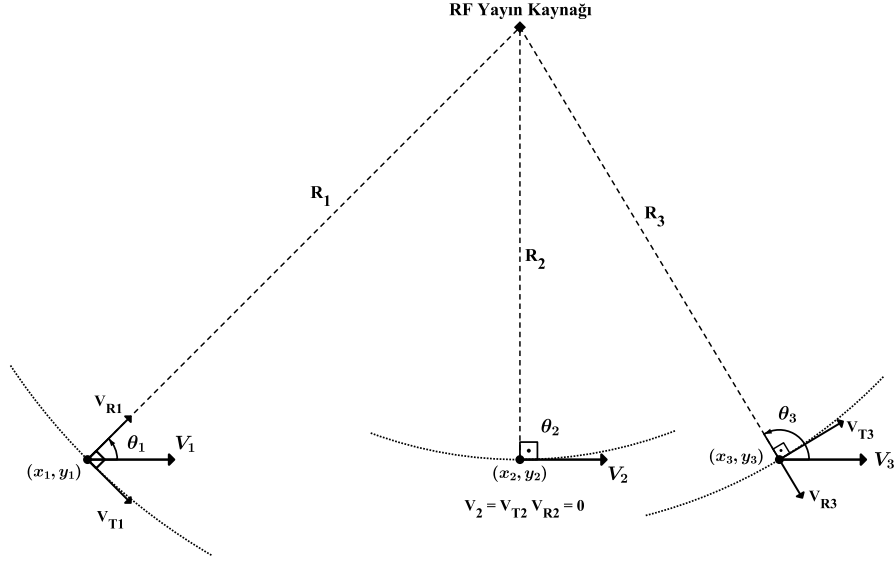
$$\widehat{f'_D}(t_i) \cong \frac{\Delta f_D}{\Delta t} = \frac{f_R(t_i) - f_R(t_{i-1})}{\Delta t} \quad (3.6)$$

Alınan sinyal frekansının değişim oranının Doppler frekansı değişim oranına eşitlenmesi sayesinde Doppler frekansı bilinmese dahi Doppler frekansının değişim oranı elde edilebilmektedir. Platformun hızının sabit olduğu durum ( $V' = 0$ ) göz önüne alınarak Eşitlik (3.1)'de yer alan Doppler frekansı eşitliğinin zamansal değişiminin hesaplanmasıyla elde edilen analitik sonuç Eşitlik (3.7)'de sunulmakta olup  $\theta(t)$  ve  $\widehat{\theta}'(t)$  ifadeleri denklemin bilinmeyenleri olarak görülmektedir.

$$\widehat{f'_D}(t) = -\frac{V \sin(\theta(t))}{\lambda} \widehat{\theta}'(t) \quad (3.7)$$

$$\widehat{\theta}'(t_i) \cong \frac{\theta(t_{i+1}) - \theta(t_i)}{\Delta t} \quad (3.8)$$

Eşitlik (3.7)'de sinyal geliş açısı ve sinyal geliş açısının zamana göre değişim oranı parametreleri yer almasına rağmen mesafenin belirlenmesine yönelik bileşen henüz bulunmamaktadır. Açılı ve açının zamansal değişimi ile mesafenin ilişkilendirilebilmesi adına temel açısal hareket yaklaşımlarının incelenmesi gerekmektedir. Çizgisel hız ile açısal hız arasındaki ilişki Şekil 3.2'de görülmektedir.



Şekil 3.2. Çizgisel Hız ile Açısal Hız İlişkisi

Platformun her ölçüm noktasında farklı bir konumda bulunacağı ve zamanla RF yayın kaynağı ile platform arasında kalan sinyal geliş açısında değişim olacağı Şekil 3.2’de görülmektedir. Hareket geometrisi incelendiğinde her bir ölçüm noktası için çizgisel/açısal hız dönüşümünün yapılabileceği görülmektedir. Dönüşümden yola çıkıldığında, bilinen çizgisel hız bilgisinin kullanılması ile açısal hız elde edilebilmekte ve Eşitlik (3.10)’da görüldüğü gibi sinyal geliş açısının değişim oranı hesaplanabilmektedir.

$$V_T = R\omega \quad (3.9)$$

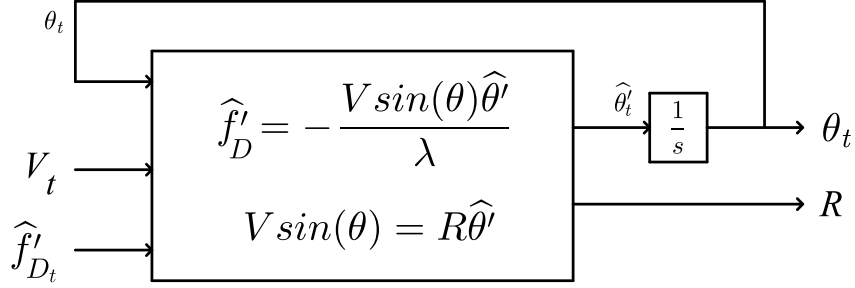
$$\omega \cong \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{\theta(t_i) - \theta(t_{i-1})}{\Delta t} \cong \widehat{\theta}'(t_i) \quad (3.10)$$

Şekil 3.2’de geometrik olarak gösterilen yaklaşım Eşitlik (3.9) ve (3.10) üzerinden genelleme yapılmasıyla Eşitlik (3.11)’de görüldüğü şekilde matematiksel olarak elde edilmektedir.

$$V\sin(\theta(t)) = R\widehat{\theta}'(t) \quad (3.11)$$

Eşitlik (3.7) ve Eşitlik (3.11) birlikte değerlendirildiğinde;  $\theta(t_{i-1})$  açı değerinin belirlenmesi durumunda  $\widehat{\theta}'(t_i)$  ve R mesafe değerlerinin belirlenebileceği görülmektedir.  $\theta(t_{i-1})$  ve  $\widehat{\theta}'(t_i)$  değerlerinin belirlenmesine müteakip Eşitlik (3.8) kullanılarak  $\theta(t_i)$  değerinin

belirlenmesi mümkün olmaktadır. Yaklaşım, Şekil 3.3'te yer alan blok diyagramda görüldüğü üzere iteratif olarak yürütüldüğünde menzil ve sinyal geliş açısı bilgileri elde edilebilmektedir.



Şekil 3.3. Doppler Frekansı Değişim Oranı Yöntemi Blok Diyagramı

Sonuç olarak; başlangıçtaki sinyal geliş açısının tespit edilmesi durumunda, diğer ölçüm noktaları için R mesafesinin ve sinyal geliş açılarının elde edilebileceği görülmektedir.

### 3.3. Doppler Frekansı Oranı Yöntemine Yönelik Senaryo

Şekil 3.1'de görülen ölçüm geometrisi temel alınarak Doppler frekansı değişim oranı üzerinden RF yayın kaynağının konumunun belirlenmesi amacıyla iki farklı senaryo kurgulanmıştır. Senaryolarda, RF yayın kaynağı hareketsiz iken platform sabit hızla ve sabit baş açısı (heading) ile hareket etmektedir. Platform hareketi boyunca belirli ölçüm noktalarında frekans ölçümü yapılmakta olup ölçülen değerler bir dizi halinde kayıt altına alınmaktadır. Ayrıca ölçüm noktalarında; platformun konumu, anlık hızı ve baş açısı parametreleri konum belirleme aşamasında kullanılması amacıyla kayıt altına alınmakta ve zamansal olarak frekans ölçüm değerleri ile ilişkilendirilmektedir. Kurgulanan senaryolara ait parametreler Çizelge 3.1'de sunulmuştur.

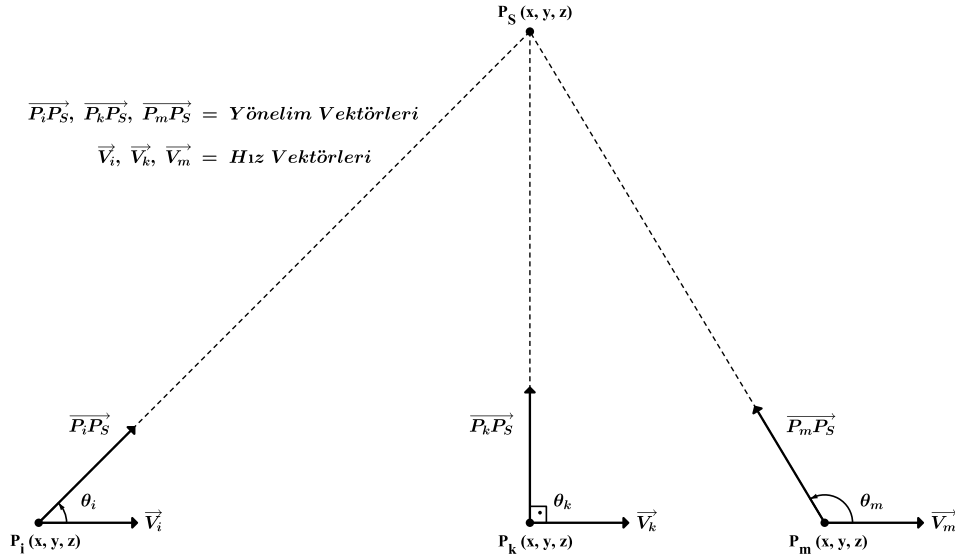
Çizelge 3.1. Doppler Frekansı Değişim Oranı Yöntemi Senaryo Parametreleri

Senaryo Parametreleri	Senaryo 1	Senaryo 2
Benzetim Süresi	100 sn	100 sn
Ölçüm Süre Aralığı	0.1 sn	0.1 sn
RF Kaynak Konumu	X = 0, Y = 0	X = 0, Y = 0
Platform Başlangıç Noktası	X = -20 km, Y = -20 km	X = -20 km, Y = -20 km
Platform Hızı	V <sub>X</sub> = 300 m/s, V <sub>Y</sub> = 0 m/s	V <sub>X</sub> = 300 m/s, V <sub>Y</sub> = 100 m/s

### 3.4. Sentetik Veri Üretimi

Doppler frekansı değerinin doğrudan belirlenememesi sebebiyle Eşitlik (3.4)'te gösterilen ve ED sistemi tarafından ölçülen frekans değerleri yönteme doğrudan girdi olmaktadır. Yöntemde, alınan girdi üzerinden zamansal değişim hesaplanmakta ve Doppler frekansı değişim oranı elde edilmektedir.

Sentetik veri olarak kullanılmak üzere gerçek Doppler frekansının belirlenmesi için platformun hız vektörüne ve sinyal geliş açısına ihtiyaç duyulmaktadır. Sabit hızlı hareket için ölçüm alınacak her bir ölçüm noktası özelinde hız vektörü tanımlanmaktadır. Hız vektörünün tanımlanmasına müteakip, platformun ölçüm noktasındaki konumu ve RF yayın kaynağının konumu kullanılarak yönelim vektörü oluşturulmaktadır.



Şekil 3.4. Hız ve Yönelim Vektörleri

Elde edilen hız ve yönelim vektörlerinin iç çarpımı kullanılarak sinyal geliş açısı elde edilmektedir.

$$\theta_m = \cos^{-1} \left( \frac{\vec{V}_m \cdot \overrightarrow{P_m P_s}}{|\vec{V}_m| |\overrightarrow{P_m P_s}|} \right) \quad (3.12)$$

Açının belirlenmesi sonrasında Eşitlik (3.1) kullanılarak ideal Doppler frekansı hesaplanmaktadır. Her ölçüm noktası için hesaplanan ideal Doppler frekansı Eşitlik (3.4)'te

sunulduğu şekilde RF yayın frekansı üzerine eklenmekte ve bir dizi halinde yönteme girdi olarak kullanılmaktadır. Sentetik veri üretim aşaması ile verinin işleme aşaması birbirinden bağımsız çalışmakta olup gerçek veriler üzerinden de işlem yapılabilmesi mümkün olmaktadır.

### **3.5. Senaryoyu Şekillendiren Varsayımlar ve Geometri Etkisi**

Doppler frekansı değişim oranı yönteminin kurgulandığı senaryoda platformun sabit hızla ( $V' = 0$ ) ve sabit baş açısı ( $\psi' = 0$ ) ile hareket ettiği varsayımı üzerinden işlem yapılmaktadır. Bununla birlikte, RF yayın kaynağının hareketsiz olduğu, frekansının sabit ve kararlı ( $f_T' = 0$ ) yapıda olduğu varsayılmaktadır. Ayrıca, yönteme dair hesaplamalar  $0^\circ$  yükseliş açısı referans alınarak 2 boyutlu x – y düzlemi üzerinde yapılmaktadır.

#### **3.5.1. Uçuş Geometrisinin Etkisi**

ED sistemleri üzerinden elde edilen ölçümler göz önüne alındığında ölçüm sonuçlarının geometriye bağlı olduğu bilinmektedir. Bölüm 2.2.1'de açıklanan üçgenleme yönteminin uygulanması durumunda uçuş geometrisine yönelik genel yaklaşımın, platformun RF yayın kaynağı etrafında yol alması ve ölçüm alınan noktalardaki sinyal geliş açılarının farklılaşması olduğu belirtilmektedir [9]. Uçuş geometrisinin benzer yapıda olmasına karşılık dairesel hareketin yönü ve yarıçapı gibi parametreler sayısal olarak yakın değerlere sahip olsa bile konum bulma performansını etkileyebilmektedir [23]. Bununla birlikte, platformun düz bir hat üzerinde ilerlemesi ile RF yayın kaynağı etrafında dairesel geometri oluşturacak hat üzerinde ilerlemesine yönelik analiz çalışmaları da bulunmaktadır ve dairesel geometri sonucunda elde edilen konum tespitlerinin iyileştiği belirtilmektedir [17]. Ayrıca, platformun kendi konum bilgisini üretirken ortaya çıkan hataların da değerlendirilmeye alınmasıyla konum belirleme sonuçlarının iyileştirildiğine yönelik veriler bulunmaktadır [24]. Bulunan verilerin, kerteriz hatlarının kesişimini temel alan yöntemler için uygun olduğu değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, pasif konum bulma yaklaşımlarının karşılaştırmalı veriler üzerinden yapılması sebebiyle uçuş geometrisi ve konum tespit performansı arasında ilişki olduğu bilinmektedir. Bundan dolayı, yöntem üzerine kurgulanan senaryolarda, platform hızları farklı olacak şekilde tanımlanmıştır.

## 4. FAZ FARKI DEĞİŞİM ORANI YÖNTEMİ

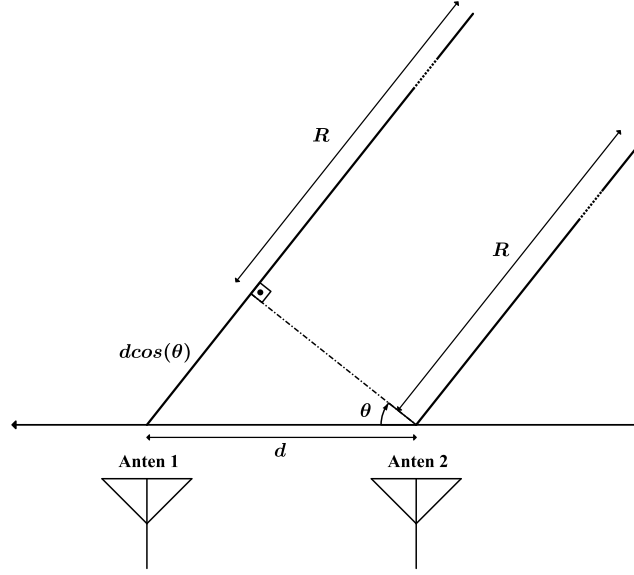
RF yayın kaynağı ile hava platformu üzerinde bulunan ED sistemi arasındaki menzilin ve sinyal geliş açısının belirlenmesi için incelenecek bir diğer yöntem faz farkı değişim oranı yöntemidir. Faz farkı değişim oranını temel alan konum bulma yaklaşımında, faz ölçümü için kullanılan antenlerin oluşturduğu hattın yöneliminin, platformun manevralarının ve hareket yönünün konum bulma performansını etkilediği bilinmektedir [25]. Faz farkı değişim oranının hesaplanmasında kullanılan yöntemlerin geliştirilmesi, ölçüm hatalarının azaltılması ve ölçüm hızının artırılması ile yöntemin daha verimli şekilde kullanılacağı değerlendirilmektedir [26]. Yöntem, konum bulma yaklaşımlarında doğrudan kullanılabilirliği gibi faz farkı ölçümleri sonucunda elde edilen yön bilgilerinde gözlenen belirsizliklerin çözümüne de destek olmaktadır [27]. Ayrıca, ED amaçlı konum bulma yaklaşımları ötesinde pasif radar yaklaşımlarında da faz farkı değişim oranı yöntemi kullanılabilir [28].

Faz farkı değişim oranı yönteminin anlatıldığı bu bölüm içerisinde; faz farkı üzerinden ED amaçlı konumlandırma için gerekli bilgiler, yöntemin yön ve mesafe bulma yaklaşımlarına dair teorik altyapısı, yön ve mesafe bilgisinin elde edilmesi için uygulanan senaryo, senaryo içerisinde kullanılacak matematiksel eşitlikler ve eşitliklerin çözümüne dair yaklaşımlar anlatılmaktadır. Ölçüm geometrisinin, platform dinamiklerinin ve gerçek mesafenin ölçüm doğruluğuna olan etkilerine değinilmektedir.

Yöntemin geliştirilmesi sırasında iki aşama yer almaktadır. İlk aşamada, faz farkı bilgisinin algoritmaya bir girdi olduğu varsayılmakta olup girdinin sağlanması adına sentetik veri üretilmektedir. İkinci aşamada, üretilen sentetik veri algoritma içerisinde işlenmektedir.

### 4.1. Menzil ve Sinyal Geliş Açısı Hesaplamaları

Faz farkı yöntemi, ED sistemi ile RF yayın kaynağı arasındaki sinyal geliş açısını bulma amaçlı olarak kullanılabilir. Çalışma kapsamında oluşturulan faz karşılaştırma altyapısı Şekil 4.1’de görülmektedir. Oluşturulan altyapıda antenler arası mesafe  $d = \lambda$  olarak belirlenmiş ve 3 GHz frekansa sahip sinyale odaklanılarak aralarında  $d = 10$  cm mesafe yer alan iki anten varsayılmıştır.



Şekil 4.1. Kurgulanan Faz Karşılaştırma Sistemi

RF yayın kaynağından yayılan sinyalin antenlere ulaşma zamanı, yayın kaynağının anten setine olan yönelimi ve antenler arası mesafe sebebiyle farklı olmaktadır. Oluşan zaman farkı, birbirlerine dalga boyu mertebesinde yakınlıkta bulunan antenlerden alınan sinyaller arasında faz farkı olarak gözlenmektedir. Antenler arası mesafenin bilinmesi sayesinde ölçümlenen faz farkı üzerinden yön tayini yapılabilmektedir. Yön tayini haricinde, her bir ölçüm noktasında ölçümlenen faz farkı bilgisinin zamansal değişimi üzerinden RF yayın kaynağının konumuna yönelik çıkarım yapılabilmektedir.

$$\phi(t) = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin(\theta(t)) \quad (4.1)$$

$$\theta(t) = \sin^{-1} \left( \frac{\lambda \phi(t)}{2\pi d} \right) \quad (4.2)$$

RF kaynak ile anten seti arasında bulunan açı değeri, ölçülen faz farkı üzerinden Eşitlik (4.2) kullanılarak hesaplanmaktadır. Elde edilen açı bilgisi kullanılarak kerteriz hatları oluşturulabilmektedir. Oluşturulan kerteriz hatları, sadece açı üzerinden konum tespitinin yapılabildiği ve kerteriz hat kesişimlerini esas alan algoritmalarda kullanılabilir. Bu çalışma kapsamında konum belirleme işleminin doğrudan yapılması amaçlanmakta olup kerteriz hat kesişimi yaklaşımı çalışma kapsamı dışında kalmaktadır. Ayrıca faz karşılaştırma ile yön bulmaya dair detay bilgiler Bölüm 2.1.3'te sunulmuştur.

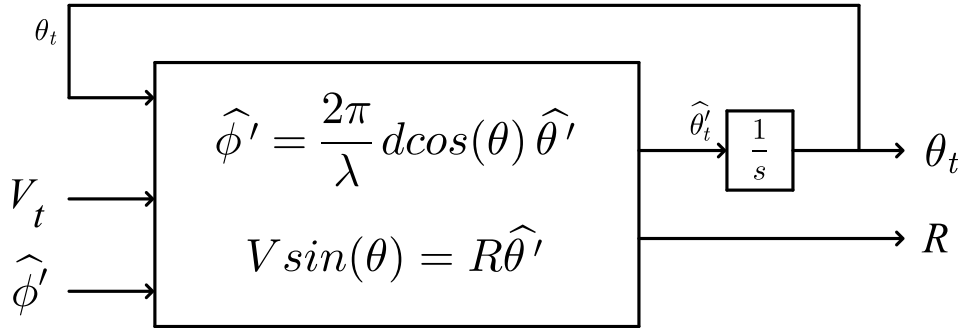
Yön bilgisi, faz karşılaştırma sistemi üzerinden hesaplanabildiği gibi faz farkı değişim oranı yöntemi içerisinde de iteratif olarak hesaplanabilmektedir. Bilindiği üzere antenlere ulaşan sinyaller arasındaki faz farkı Eşitlik (4.1) kullanılarak hesaplanabilmektedir. Hesaplanan faz farkı değerinin zamansal değişimi hesaplandığında, Eşitlik (4.3)'te görülen ve sinyal geliş açısının değişim oranı ( $\hat{\theta}'$ ) ile ilişkili olan eşitlik elde edilmektedir.

$$\hat{\phi}' = \frac{2\pi}{\lambda} d \cos(\theta) \hat{\theta}' \quad (4.3)$$

Bölüm 3.2'de açıklanan ve Eşitlik (4.4)'te sunulan çizgisel – açısal hız ilişkisi ile Eşitlik (4.3)'te yer alan ifade birlikte kullanılabilir.

$$V \sin(\theta) = R \hat{\theta}' \quad (4.4)$$

Eşitlik (4.3) ve Eşitlik (4.4)'ün birlikte kullanımı ile oluşturulan iteratif hesaplamayı gösteren yaklaşıma dair blok diyagram Şekil 4.2'de görülmektedir.



Şekil 4.2. Faz Farkı Değişim Oranı Yöntemi Blok Diyagramı

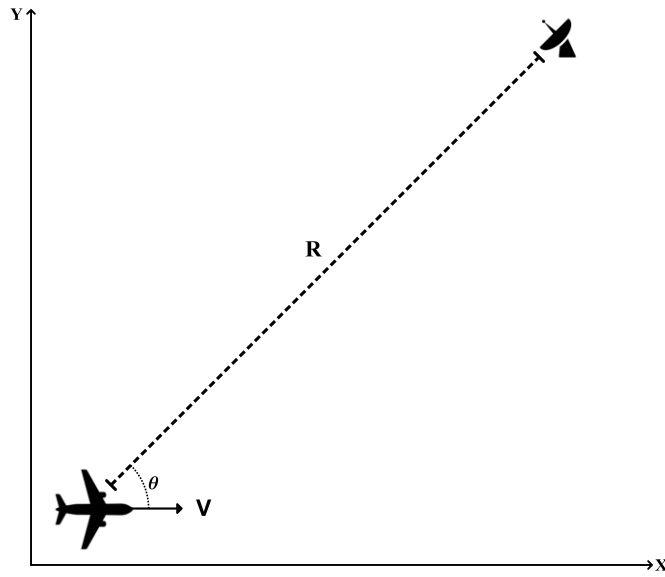
Sonuç olarak, faz farkı değişim oranı üzerinde RF yayın kaynağı ile platform arasındaki menzil ve sinyal geliş açısı iteratif olarak belirlenebilmektedir.

#### 4.2. Faz Farkı Değişim Oranı Yöntemine Yönelik Senaryo

RF yayın kaynağının konumunun belirlenmesi için faz farkı değişim oranı yöntemini temel alan iki senaryo kurgulanmıştır. Senaryolarda, RF yayın kaynağı ve hava platformu üzerine entegre edilmiş durumda olan ED sistemi üzere iki temel unsur bulunmaktadır. Hava platformu belirli doğrultuda ve sabit hızlı olarak hareket etmektedir. Platform konumlu ED



sistemi bünyesinde yer alan ve aralarında  $d$  mesafe bulunan antenler ile oluşturulan anten seti üzerinden, platform hareketi boyunca belirli zaman aralıklarında faz farkı değeri ölçülmektedir ve zamana göre değişimi hesaplanmaktadır. Ölçüm alınan noktalarda platformun hızı, konumu ve baş açısı parametreleri kaydedilmektedir. Ölçümler ve hesaplamalar ile platforma ait parametreler, konum tespiti sırasında kullanılması amacıyla ilişkilendirilmektedir. Ölçümler, her ölçüm noktasında güncellenmek üzere bir matris yapısında tutulmakta ve ölçüm sayısının artırılması ile sistem performansının artırılması amaçlanmaktadır. Senaryoda kullanılan temel geometri Şekil 4.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Senaryo Ölçüm Geometrisi

Çalışma kapsamında kurgulanan senaryoya ait parametreler Çizelge 4.1'de sunulmuştur. Senaryolarda, Doppler frekansı değişim oranı yöntemi ile faz farkı değişim oranı yöntemi aynı geometri üzerinden kurgulanmıştır.

Çizelge 4.1. Faz Farkı Değişim Oranı Yöntemi Senaryo Parametreleri

Senaryo Parametreleri	Senaryo 1	Senaryo 2
Benzetim Süresi	100 sn	100 sn
Ölçüm Süre Aralığı	0.1 sn	0.1 sn
RF Kaynak Konumu	$X = 0, Y = 0$	$X = 0, Y = 0$
Platform Başlangıç Noktası	$X = -20 \text{ km}, Y = -20 \text{ km}$	$X = -20 \text{ km}, Y = -20 \text{ km}$
Platform Hızı	$V_X = 300 \text{ m/s}, V_Y = 0 \text{ m/s}$	$V_X = 300 \text{ m/s}, V_Y = 100 \text{ m/s}$

### 4.3. Sentetik Veri Üretimi

Algoritma içerisinde hesaplanan faz farkı bilgisi sisteme girdi olarak alınmaktadır. Faz farkı bilgisinin elde edilmesi amacıyla geometrik bir yaklaşım sergilenmektedir.

Şekil 4.1’de görülen anten yapısı Şekil 4.3’te görülen geometri üzerine yerleştirilmektedir. Verilen anten yapısında, aralarında  $d = \lambda$  mesafe bulunan antenlere gelen sinyaller arasındaki faz farkı geometrik olarak hesaplanmaktadır. Hesaplamanın yapılabilmesi adına antenlerin RF yayın kaynağına olan mesafesi matematiksel olarak hesaplanmaktadır.

$$R_{A_1} = \sqrt{(x_{Anten_1} - x_{Kaynak})^2 + (y_{Anten_1} - y_{Kaynak})^2} \quad (4.5)$$

$$R_{A_2} = \sqrt{(x_{Anten_2} - x_{Kaynak})^2 + (y_{Anten_2} - y_{Kaynak})^2} \quad (4.6)$$

Eşitlik (4.5) ve Eşitlik (4.6) kullanılarak her iki antenin yayın kaynağı ile arasındaki mesafesi hesaplanmaktadır. Hesaplanan mesafe ve ışık hızı kullanılarak, RF yayın kaynağından yayılan sinyalin antenlere ulaşma süreleri Eşitlik (4.7) ve Eşitlik (4.8) üzerinden hesaplanmaktadır.

$$t_{A_1} = \frac{R_{A_1}}{c} \quad (4.7)$$

$$t_{A_2} = \frac{R_{A_2}}{c} \quad (4.8)$$

Elde edilen zaman farkları kullanılarak yayınlar arasında oluşacak faz farkı elde edilmektedir.

$$\Delta t = t_{A_1} - t_{A_2} \quad (4.9)$$

$$\phi = 2\pi \cdot f \cdot \Delta t \quad (4.10)$$

Eşitlik (4.10) sonucunda faz farkı bilgisi sentetik olarak elde edilmekte ve sisteme girdi olarak kullanılmaktadır. Sentetik veri üretim aşaması ile verinin işleme aşaması birbirinden bağımsız çalışmakta olup gerçek veriler üzerinden de işlem yapılabilmesi mümkün olmaktadır.

#### **4.4. Senaryoyu Şekillendiren Varsayımlar**

Faz farkı değişim oranı yönteminin kurgulandığı senaryoda platformun sabit baş açısı ( $\psi' = 0$ ) ile hareket ettiği ve RF yayın kaynağından uzakta ( $R \gg 0$ ) olduğu varsayımları üzerinden işlem yapılmıştır. Ayrıca, yöntemle dair hesaplamalar  $0^\circ$  yükseliş açısı referans alınarak 2 boyutlu  $x - y$  düzlemi üzerinde yapılmıştır. Senaryolarda platform hızının ölçüm performansına etkisinin gözlenmesi amacıyla farklı hız değerleri üzerinden çalışılmıştır.

## 5. RF KAYNAK KONUMU BELİRLEME

RF yayın kaynağının konumunun tespitine yönelik elde edilen verilerin birleştirilmesi bu bölüm içerisinde yapılmaktadır. Doppler frekansı değişim oranı ve faz farkı değişim oranı yöntemleri üzerinden elde edilen sinyal geliş açısı ve mesafe bilgileri ile platforma ait konum bilgileri kullanılarak her ölçüm noktasında alınan değer için RF yayın kaynağının nokta konumu tespit edilmektedir. Tespitler sonucu elde edilen nokta konumlarının dağılımı üzerinden RF yayın kaynağının bulunması muhtemel bölge belirlenmektedir.

Bölüm içerisinde; hesaplanan sinyal geliş açısı ve menzil bilgilerinin platforma ait konum verileri ile kullanımı, nokta konum tespiti ve nokta konum verilerinin dağılımı üzerinden elde edilen bölgesel konum gösterimine dair yaklaşımlar anlatılmaktadır. Bölgesel konum gösteriminde olası eliptik hata (Elliptical Error Probable, EEP) ve olası dairesel hata (Circular Error Probable, CEP) gösterimlerine ayrı ayrı yer verilmektedir. Ayrıca, elde edilen bölgesel konumun iyileştirilmesine yönelik yaklaşım da bölüm içerisinde anlatılmaktadır. Anlatımlara ek olarak ölçüm geometrisinin, platform dinamiklerinin ve gerçek mesafenin ölçüm doğruluğuna olan etkilerine değinilmektedir.

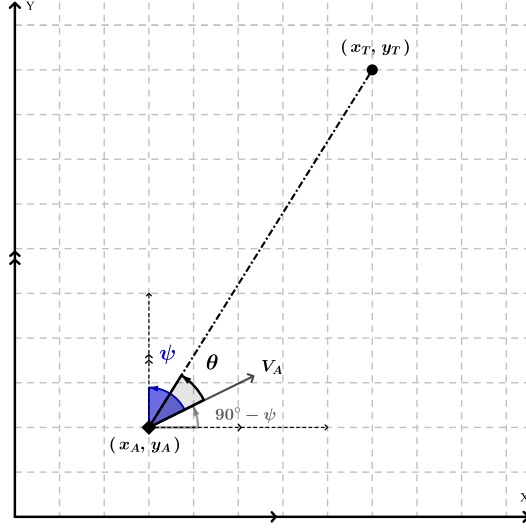
### 5.1. Menzil ve Yön Bilgilerinin Kullanımı

Bölüm 3 ve Bölüm 4 içerisinde yer alan yöntemler sonucunda elde edilen  $\theta$  sinyal geliş açısı ve  $R$  menzil bilgisi, RF yayın kaynağının konumunun belirlenmesi için temel girdiler olarak kullanılmaktadır. Sinyal geliş açısı ve menzil bilgisi ile bu bilgilerin hesaplandığı ölçüm zamanındaki platform konumu  $(x_A, y_A)$  ve baş açısı  $\psi$ , Eşitlik (5.2) ve Eşitlik (5.3)'te ifade edildiği şekilde birleştirilmektedir ve RF yayın kaynağının nokta konumu elde edilmektedir. Nokta konumun elde edilmesi sırasında kullanılan geometri Şekil 5.1'de görülmektedir.

$$R = \sqrt{(x_A - x_T)^2 + (y_A - y_T)^2} \quad (5.1)$$

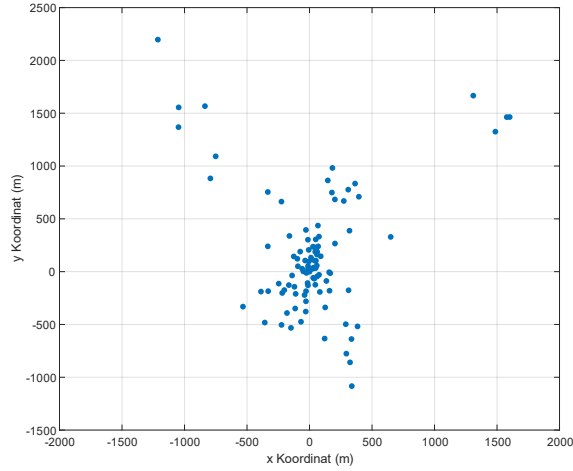
$$x_T = x_A + R \cos \left( \theta + \frac{\pi}{2} - \psi \right) \quad (5.2)$$

$$y_T = y_A + R \sin \left( \theta + \frac{\pi}{2} - \psi \right) \quad (5.3)$$



Şekil 5.1. Sinyal Geliş Açısı ve Baş Açısı Kullanımı

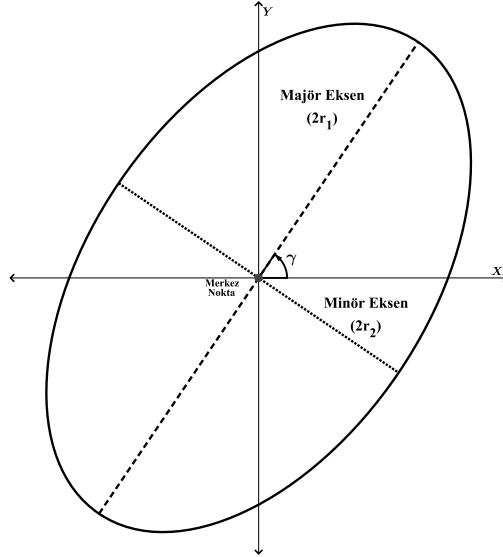
Ölçüm sonuçları ile platformun ilgili ölçüm anındaki konumu zaman referansı üzerinden eşlenmektedir. Her bir ölçüm noktası için ayrı bir nokta konum bilgisi üretilmektedir ve matris formunda kayıt altına alınmaktadır. Kaydedilen nokta konum bilgilerinin görselleştirilmesine dair bir örnek Şekil 5.2’de yer almaktadır.



Şekil 5.2. Nokta Konum Dağılımına Örnek Gösterim

## 5.2. Bölgesel Konum Belirleme

Şekil 5.2’de verilen nokta konum bilgilerinin belirli bir alanda dağıldığı gözlenmektedir. Dağılım sebebiyle nokta konum bilgilerinin doğrudan kullanımının hatalı sonuçlara sebep olabileceği görülmektedir. Bundan dolayı, elde edilen bilgileri belirli oranda kapsayan ve bilgilerin dağılımı üzerinden olasılıksal yaklaşım sergileyen EEP gösterimi ile bölgesel konumun belirlenmesi amaçlanmaktadır.



Şekil 5.3. Elips Çiziminde Kullanılan Kritik Bilgiler

Şekil 5.3'te elips çizimi sırasında kullanılan büyük eksen yarıçapı ( $r_1$ ), küçük eksen yarıçapı ( $r_2$ ), elips merkez noktası ve elips eğiklik derecesi parametrelerinin gösterimi yer almaktadır. EEP çizimi kapsamında, gösterilen parametrelerin hesaplanması sırasında, nokta konum bilgilerine ait x ve y koordinatlarının birbirleri ile korelasyonlarının olmaması durumunda x ve y dağılımını gösteren varyans değerleri üzerinden EEP yarıçapları belirlenmektedir. Ancak, x ve y noktaları arasında korelasyon olması durumunda varyans değerleri yerine Eşitlik (5.4)'te görülen C kovaryans matrisinin özdeğerleri üzerinden yarıçap belirleme işlemi yapılmaktadır.

$$C = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} \\ \sigma_{yx} & \sigma_y^2 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Yarıçap hesaplamasında özdeğerler üzerinden işlem yapılmasına ek olarak kapsama oranının (confidence level) da belirlenmesi gerekmektedir. Kapsama oranı, kullanılan bölgesel konum gösteriminin, verileri hangi oranda kapsayacağını belirleyen bir değerdir ve bu değer EEP gösteriminin büyük/küçük eksen yarıçaplarını doğrudan etkilemektedir. Yarıçap ve kapsama oranının belirlenmesi sonrasında EEP gösteriminin merkezinin belirlenmesi adına x ve y koordinatlarının aritmetik ortalamaları alınmaktadır.

EEP hesaplaması sırasında kullanılan veri seti X olarak kabul edildiğinde, dağılım Eşitlik (5.4)'te yer alan C kovaryans matrisi kullanılarak  $N(M_X, C)$  şeklinde gösterilmektedir.

Belirtilen dağılıma sahip verinin EEP gösteriminin yapılması için temelde Eşitlik (5.5)'te yer alan ifade kullanılabilir.

$$(X - M_X) C^{-1} (X - M_X) = \eta^2 \quad (5.5)$$

Gösterim kapsamında elde edilecek elipsin çiziminde  $\alpha$  açısı 0 ile  $2\pi$  değer aralığını tarayacak şekilde tanımlanmaktadır. Tanımlama sonucunda elde edilen (x, y) noktaları Eşitlik (5.6)'da görüldüğü şekilde herhangi bir eksen eğikliğine sahip olmayan elipsin gösterimini tanımlamaktadır.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_x \cos(\alpha) \\ r_y \sin(\alpha) \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Şekil 5.3'te görülen eğikliğin elde edilmesi için Eşitlik (5.6) üzerinden elde edilen (x, y) noktaları Eşitlik (5.7)'de gösterildiği şekilde döndürülmektedir.

$$X = \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_x \cos(\alpha) \\ r_y \sin(\alpha) \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Döndürme işleminin tanımlanması sonrasında Eşitlik (5.5)'te yer alan ifadede bulunan C kovaryans matrisi yerine matrisin özdeğerleri kullanılmakta ve Eşitlik (5.8)'de yer alan elips denkleminin elde edilmektedir.

$$\left( \frac{\tilde{x} - m_x}{\sqrt{\Lambda_1}} \right)^2 + \left( \frac{\tilde{y} - m_y}{\sqrt{\Lambda_2}} \right)^2 = \eta^2 \quad (5.8)$$

Nokta konum bilgilerinde yer alan x koordinatlarının aritmetik ortalaması  $m_x$ , y koordinatlarının aritmetik ortalaması  $m_y$  olarak gösterilmekte ve  $(m_x, m_y)$  noktası Eşitlik (5.8) üzerinden hesaplanan EEP gösteriminin merkezini ifade etmektedir. Elipsin büyük ve küçük eksen yarıçaplarının belirlenmesi için Eşitlik (5.8)'de yer alan özdeğerler kullanılmaktadır. Eşitlik (5.9)'da büyük özdeğerin ( $\Lambda_{maks}$ ) karekökü ile hesaplanan büyük eksen yarıçapı ( $r_1$ ), Eşitlik (5.10)'da küçük özdeğerin ( $\Lambda_{min}$ ) karekökü ile hesaplanan küçük eksen yarıçapı ( $r_2$ ) görülmektedir.

$$r_1 = \eta\sqrt{\Lambda_{maks}} \quad (5.9)$$

$$r_2 = \eta\sqrt{\Lambda_{min}} \quad (5.10)$$

Yarıçap bilgilerinin elde edilmesi sonrasında eğiklik açısının belirlenmesi gerekmektedir. Eğiklik açısının hesaplanması için baskın özdeğerle ilişkili özvektör kullanılmaktadır. Baskın özdeğer  $\Lambda_{maks}$  olduğu durum için özdeğer ile ilişkili özvektör  $v_{maks}$  olarak ifade edilmektedir. Eşitlik (5.11)'de özvektörün bileşenleri gösterilmektedir.

$$v_{maks} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Özvektörde yer alan x ve y eksenlerine ait bileşenler kullanılarak Şekil 5.3'te görülen  $\gamma$  eğiklik açısı Eşitlik (5.12)'de gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{v_y}{v_x}\right) \quad (5.12)$$

Eğiklik açısının hesaplanması ile EEP gösterimi mümkün olmaktadır. Hesaplamalar sırasında kullanılan ve kapsama oranına göre belirlenen bazı kapsama çarpanı değerleri Çizelge 5.1'de sunulmuştur.

Çizelge 5.1. Kapsama Oranları ve Çarpan Değeri [14]

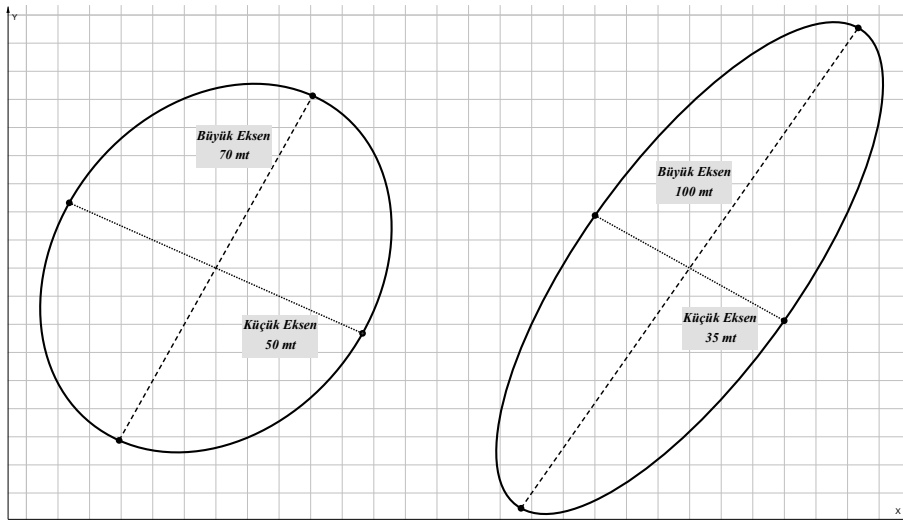
Kapsama Oranı	Çarpan ( $\eta^2$ )
%50	1.386
%75	2.773
%90	4.601
%95	5.991

EH sistemleri göz önüne alındığında veri güvenilirliği oldukça yüksek öneme sahip olmaktadır. Bu yüzden çalışma kapsamında elips alanının büyümesi göz önüne alınarak %95 kapsama oranında çalışılmaktadır.



### 5.3. EEP – CEP Gösterimi İlişkisi

Bölgesel konum belirleme sonucunun EEP şeklinde gösteriminde birçok farklı parametrenin kullanıldığı görülmektedir. Bu sebeple performans analizi açısından bakıldığında elips üzerinden değerlendirilme yapılması bazı riskler taşımaktadır. Örneğin, Şekil 5.4'te  $3500\pi$  m<sup>2</sup> alana sahip iki farklı elips görülmektedir. Elipslerin alanları aynı olmasına rağmen büyük/küçük eksen oranları farklılaşmaktadır. Büyük/küçük eksen oranı daha az olan elipsin oluşturulması sırasında kullanılan verilerin belirli bir nokta etrafında daha düzgün dağıldığı gözlenmektedir. Buna karşılık, büyük/küçük eksen oranı daha fazla olan elipsin oluşturulması sırasında kullanılan verilerin uygun geometride kaydedilmemesi veya belirli doğrultuda yüksek hataya sahip veriler üzerinden hesaplama yapılması ihtimalleri ortaya çıkmaktadır. Eksenler oranı düşük olan elipste merkezden uzaklık görelisi olarak daha düşük düzeylerde kalmakta ve hata oranı azalmaktadır, buna karşılık eksenler oranı yüksek olan elipste büyük eksenin uzunluğu sebebiyle hata oranı artmaktadır. Sonuç olarak, doğrudan elips alanları üzerinden performans değerlendirilmesinin yapılması sonucunda hatalı değerlendirmeler oluşabilecektir. Hatanın önüne geçilmesi adına büyük/küçük eksen oranları da performans değerlendirmesi sırasında göz önüne alınmaktadır. Bununla birlikte, hatalı değerlendirmelerin önüne geçilmesi ve performans karşılaştırmalarının daha verimli yapılabilmesi adına EEP yerine CEP gösteriminin yapılması ön plana çıkmaktadır. Dairesel gösterim sayesinde sadece daire merkezinin koordinatı ve dairenin yarıçapının bilinmesi ile gösterim yapılabilmesi mümkün olmaktadır ve performansın değerlendirilmesi sırasında doğrudan yarıçap üzerinden kıyas yapılabilmektedir. Çalışma kapsamında hem EEP hem CEP hesaplamaları yapılmaktadır ve her iki gösterime de yer verilmektedir.



Şekil 5.4. Elipslerde Büyük/Küçük Eksen Oranı

EEP – CEP gösterimleri elipsin büyük/küçük eksen oranları kullanılarak belirli bir katsayı üzerinden birbirine dönüştürülebilmektedir [5]. Dönüşüm işlemi haricinde doğrudan CEP yarıçapının ve merkez noktanın belirlenmesi de mümkündür. Doğrudan hesaplama işleminde Bölüm 5.2’de açıklanan yaklaşıma benzer yaklaşım uygulanmakta ve daire merkezi olarak  $(m_x, m_y)$  noktası kullanılmaktadır. Ayrıca daire yarıçapının belirlenmesi için Eşitlik (5.4)’te verilen C kovaryans matrisinin büyük ( $\Lambda_{maks}$ ) ve küçük ( $\Lambda_{min}$ ) özdeğerleri üzerinden karşılaştırma yapılmakta ve Eşitlik (5.13)’te belirtildiği şekilde %50 kapsama oranına sahip dairesel gösteriminin yarıçap bilgisi elde edilmektedir [14],[29].

$$r_{CEP} = \begin{cases} 0,59 (\sqrt{\Lambda_{min}} + \sqrt{\Lambda_{maks}}) & , \quad \sqrt{\frac{\Lambda_{min}}{\Lambda_{maks}}} \geq 0,5 \\ \sqrt{\Lambda_{maks}} \cdot \left(0,67 + 0,8 \frac{\Lambda_{min}}{\Lambda_{maks}}\right) & , \quad \sqrt{\frac{\Lambda_{min}}{\Lambda_{maks}}} < 0,5 \end{cases} \quad (5.13)$$

Çizelge 5.1’de verilen çarpan oranları ve çarpan oranlarının yarıçap üzerindeki etkisi göz önüne alındığında, Eşitlik (5.13)’te verilen %50 kapsama oranına sahip yarıçap bilgisinin 2,08 ile çarpılması durumunda %95 kapsama oranına sahip dairesel gösterimin yarıçapı elde edilmektedir.

#### 5.4. Bölgesel Konum Tespitinin İyileştirilmesi

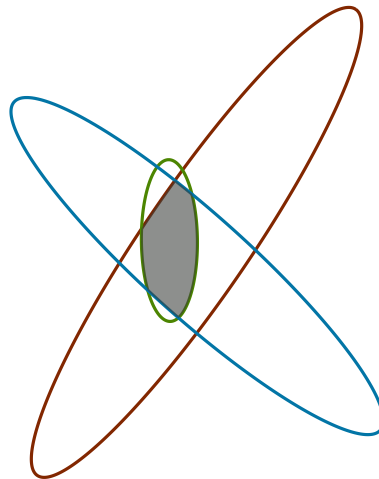
Bölüm 5.2’de açıklandığı üzere bölgesel konum tespitinin yapılması amacıyla ilk etapta ölçüm noktalarında alınan veriler üzerinden hesaplanan tüm nokta konum verileri kullanılmış ve bölgesel konuma dair EEP – CEP gösterimleri oluşturulmuştur. Tüm nokta konum verileri göz önüne alınarak oluşturulan bölgesel konum gösterimleri, yüksek güvenilirlik seviyesine sahip olmaları sebebiyle referans gösterim olarak kullanılabilir.

Senaryoların, bozucu etkiler altındaki performansının incelenmesi adına bozucu verilerin dahil edildiği durumda benzetim zamanı boyunca elde edilen tüm nokta konum verilerinin kullanılması ile elde edilen EEP veya CEP’in tanımladığı bölgenin görece büyük olması sebebiyle elipsoit ya da dairesel gösterim boyutunun azaltılmasına yönelik yaklaşımlar sunulmuştur. Öncelikle, elde edilen nokta konum verisinin parçalara ayrılması ve her bir parça üzerinden EEP veya CEP hesabının yapılması değerlendirilmiştir. Ancak bu yöntemin

uygulanması durumunda, olası gürültülü verilerin belirli zaman aralığında alınması durumunda hatalı sonuçların elde edilmesi ihtimali ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple doğrudan ayrı parçalar üzerinden bölgesel konum hesabı yapılmamıştır.

Ayrı parçalar üzerinden işlem yapılması yerine ardışık parçalar üzerinden işlem yapılabilecek yöntem kurgulanmıştır. Kurgulanan pencereleme yönteminde 10 saniye zaman aralığına sahip bir veri penceresi boyutu belirlenmekte ve ilgili veri penceresi tüm nokta konum bilgilerinin olduğu matris üzerinde hareket ettirilmektedir. Veri pencerelerinde alınan nokta konum verileri üzerinden birden çok sayıda EEP ve CEP hesabı yapılabilmektedir. Hesaplanan çok sayıda bölgesel konum verisi içerisinde en küçük alana sahip olan seçilmekte ve seçilen gösterim bölgesel konum sonucu olarak sunulabilmektedir.

En küçük alana sahip bölgesel konum verisine ek olarak, her bir EEP veya CEP gösteriminin bir küme olduğu değerlendirilmektedir. Belirli kümeler üzerinden tanımlanan kesişim bölgesinin, ilgili kümelerden daha küçük veya eşit büyüklükte olduğu bilinmektedir. Bu doğrultuda hareket edilerek, bölgesel konum gösterimlerinden her 10 saniyede bir tanesi belirlenmekte ve kesişim bölgeleri hesaplanmaktadır. İşlem sonucunda bölgesel konumun daha dar bir alanda belirlenmesi amaçlanmaktadır. EEP ve CEP gösterimlerinin kesişimlerinin belirlenmesi adına MATLAB programında yer alan çokgen (polygon) yapısı kullanılmaktadır. En küçük alana sahip bölgesel konumun belirlenmesi sırasında elde edilen her bir gösterim “polyshape” komutu ile çokgen yapıya dönüştürülmektedir ve çokgenlerin kesişim alanları elde edilmektedir. Elde edilen alanın RF yayın kaynağını barındırma durumu, benzetimde üretilen veriler üzerinden kontrol edilmektedir.



Şekil 5.5. Elips Kesişim Bölgesi

Açıklanan iyileştirme yaklaşımı Şekil 5.5'te temsili olarak verilen üç farklı elips üzerinden gösterilmektedir. En küçük alana sahip bölgesel konumun seçimi durumunda, bölgenin belirli düzeyde daraltılabileceği Şekil 5.5'te görülen elipsler üzerinden anlaşılmaktadır. Ek olarak, üç bölgesel konumun kesişim bölgesinin alınması durumunda daha dar bir alanda bölgesel konum belirlenebileceği görülmektedir.

## 6. BENZETİM ÇALIŞMALARI

Sentetik veriler kullanılarak üretilen benzetim senaryoları iki yöntem için ayrı ayrı yürütülmektedir. Öncelikle Doppler frekansı değişimi yöntemine ait benzetim çalışmalarına yer verilmekte ardından faz farkı değişim oranı yöntemine dair benzetim çalışmaları sunulmaktadır. Her iki yöntem için de ideal durumlar altında RF kaynak konumu bilgisi elde edilmektedir. İdeal durumlar haricinde, bozucu etkilerin konum bulma performansına etkisinin gözlenmesi adına sistemlere normal dağılıma sahip gürültü eklenerek Monte Carlo benzetimi uygulanmaktadır.

Monte Carlo benzetimlerinde; Doppler frekansı değişim oranı yönteminde ölçüm değeri olan Doppler frekansı değişim oranı ( $\hat{f}_D$ ) değeri üzerine, faz farkı değişim oranı yönteminde ise ölçülen faz farkı değişim oranı ( $\hat{\phi}$ ) değeri üzerinde Gaussian dağılıma sahip sıfır ortalamalı ve %0,5, %1, %3 standart sapmaya sahip gürültü eklenmektedir. Gürültü etkisinin gözlenmesi adına ideal durum için kullanılan senaryolar gürültülü durum için 10000 kez tekrarlanmıştır. Benzetim sonucunda hesaplanan menzil değerinin kök ortalama kare (Root Mean Squared – RMS) hatası ve bölgesel konum belirleme yöntemleri ile RF kaynak konumunun belirlenmesine yönelik performans sonuçları hesaplanmıştır. Ayrıca bölgesel konum belirlenmesinde gözlenen alan artışlarını en küçük düzeye indirmek ve bölgesel konum sonucunda elde edilen alanları daraltmak adına Bölüm 5.4'te açıklanan; en küçük alana sahip bölgesel konum sonucunun seçilmesi ve benzetim içerisinde pencereleme ile elde edilen bölgesel konum verilerinin kesişimi üzerinden işlem yapılmasına dair yöntemlerin sonuçları hesaplanmıştır.

### 6.1. Doppler Frekansı Değişim Oranı Benzetim Çalışması

Doppler frekansı değişim oranı üzerine iki farklı uçuş geometrisine yönelik senaryo kurgulanmıştır. Kurgulanan senaryolarda Bölüm 3'te açıklanan matematiksel yaklaşımlar kullanılmaktadır. Benzetim çalışmasında ilk aşamada senaryolar özelindeki geometriler üzerinden sentetik veriler üretilmekte ve yöntem girdi olarak verilmektedir. Yöntem aldığı girdiyi kullanarak menzili ve sinyal geliş açısını hesaplamaktadır. Hesaplanan parametreler sonucunda nokta konum ve bölgesel konum belirleme işlemleri yapılmaktadır. Yöntemin ideal durumlar altındaki performansı haricinde bozucu etkiler altında gösterdiği performans da incelenmektedir.

Doppler frekansı değişim oranı temelinde yürütülen benzetim çalışmalarında sinyal geliş açısının başlangıç değeri ideal değer olarak sisteme verilmektedir. Başlangıç değerinden sonraki değerler, sistem tarafından hesaplanmaktadır.

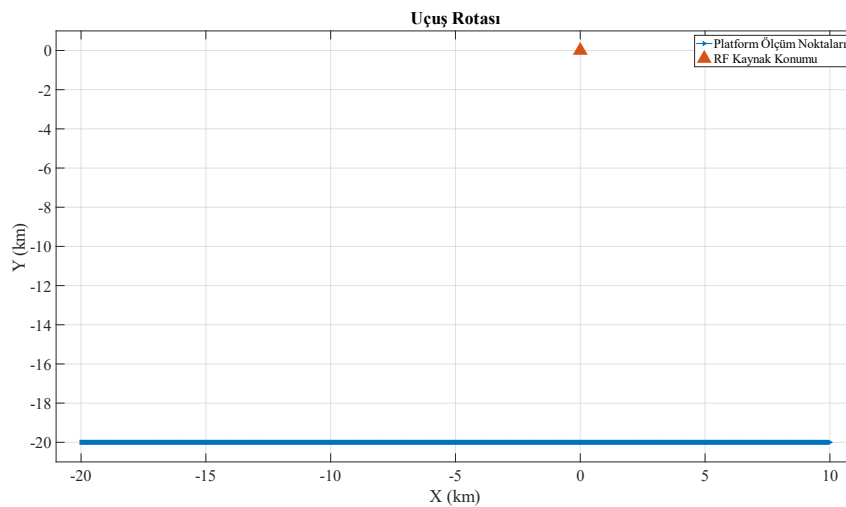
### 6.1.1. Senaryo 1: $V_X = 300$ m/s, $V_Y = 0$ m/s

Senaryo içerisinde yer alan hava platformu üzerinde Doppler frekansı değişim oranı yöntemini kullanan bir sistem olduğu ve platformun sabit hızla hareket ettiği varsayılmaktadır. Senaryoya ait bilgiler izelge 6.1’de verilmektedir.

Çizelge 6.1. Doppler Frekansı Değişim Oranı Yöntemi – Senaryo 1 Bilgileri

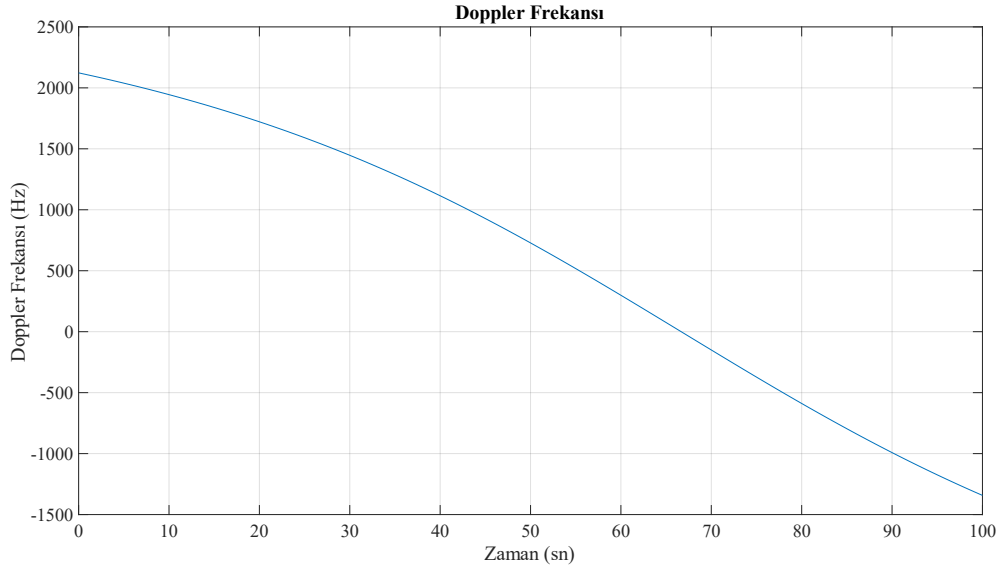
Senaryo Parametreleri	Senaryo 1
Benzetim Süresi	100 sn
lm Süre Aralığı	0.1 sn
RF Kaynak Konumu	$X = 0, Y = 0$
RF Kaynak Hızı	$V_X = 0$ m/s, $V_Y = 0$ m/s
Yayın Frekansı	3 GHz
Platform Başlangıç Noktası	$X = -20$ km, $Y = -20$ km
Platform Hızı	$V_X = 300$ m/s, $V_Y = 0$ m/s

Sentetik veri üretimi aşamasında Şekil 6.1’de görülen uçuş geometrisi üzerinden Doppler frekansı değeri hesaplanmaktadır ve yayın frekansı üzerine eklenerek sisteme girdi olarak kullanılmaktadır.



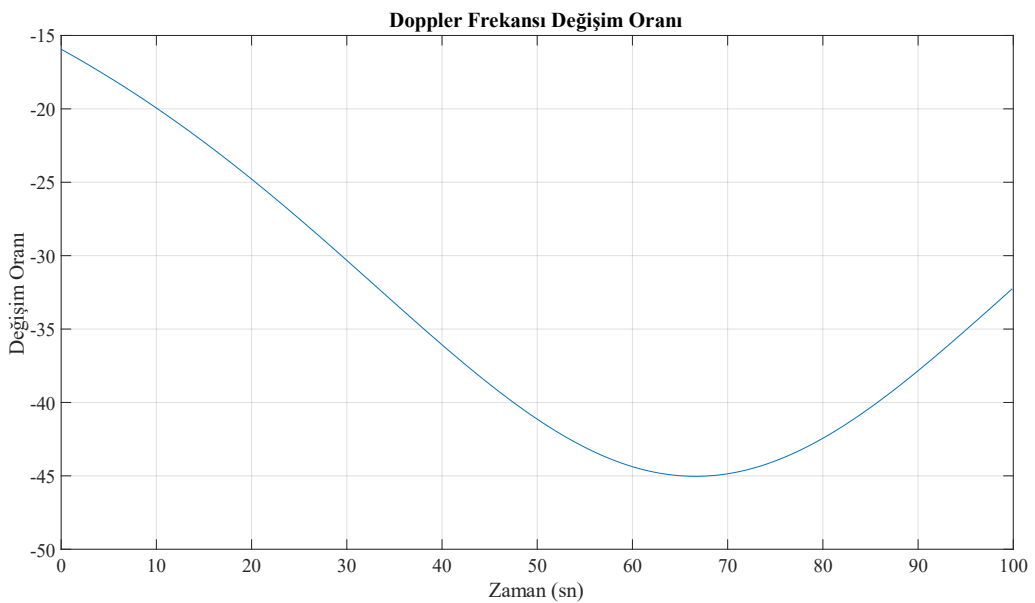
Şekil 6.1. Platform Uçuş Rotası – Senaryo 1

Uçuş rotası boyunca alınan ölçümler üzerinden sinyal geliş açısı belirlenmektedir ve yön bilgisi ile platform hızının birleştirilmesi sonucunda Şekil 6.2’de sunulan Doppler frekansı bilgisi elde edilmektedir.



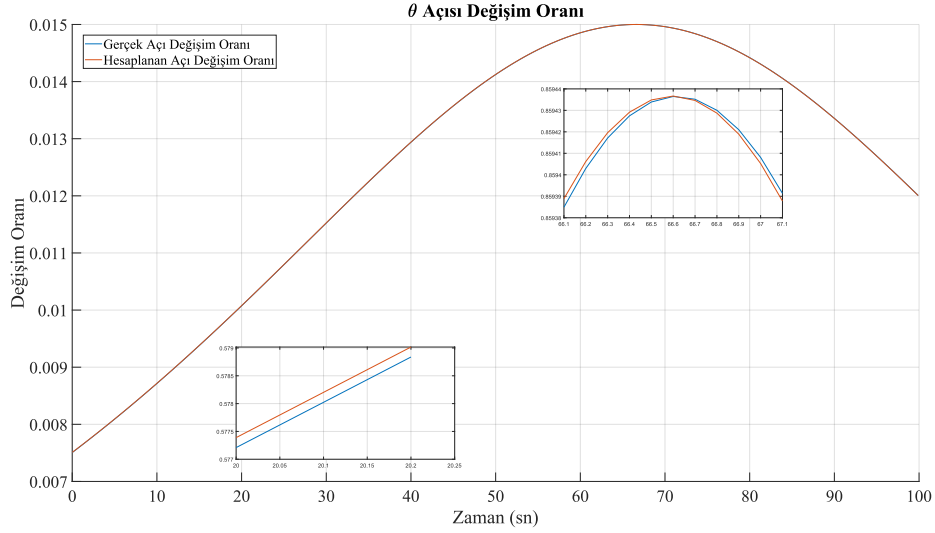
Şekil 6.2. Doppler Frekansı – Senaryo 1

Elde edilen Doppler frekansı çıktı niteliğinde olup sistem bünyesinde doğrudan kullanılmamaktadır. Buna karşılık Bölüm 3.2’de açıklandığı şekilde, ölçülen Doppler frekansı değişim oranı bilgisi sistemde kullanılmaktadır. Doppler frekansı değişim oranına ilişkin ölçüm sonucu Şekil 6.3’te sunulmaktadır.



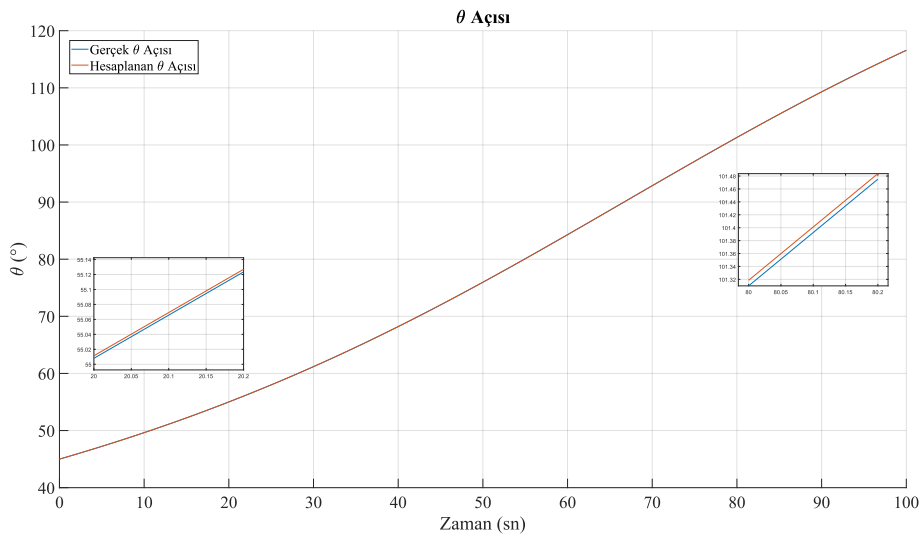
Şekil 6.3. Doppler Frekansı Değişim Oranı – Senaryo 1

Ölçülen Doppler frekansı değişim oranı bilgisi kullanılarak sinyal geliş açısı değişim oranı hesaplanmaktadır. Hesaplama sonucu Şekil 6.4'te sunulmuştur. Şekilde görüldüğü üzere gerçek değer ile hesaplanan değer arasındaki hata değeri düşük düzeydedir ve her iki grafik yapısal olarak birbirine benzemektedir.



Şekil 6.4. Açık Değişim Oranı – Senaryo 1

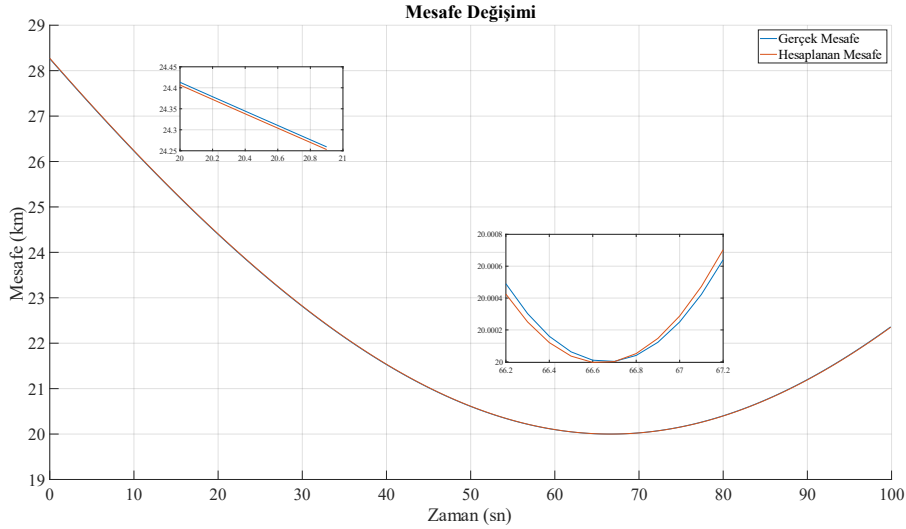
Sistemin çıktısı olarak kabul edilen, konum belirleme işlemlerinde kullanılan sinyal geliş açısı, açı değişim oranı kullanılarak hesaplanmaktadır. Hesaplama sonucu Şekil 6.5'te görülmektedir. Elde edilen sinyal geliş açısı bilgisinin gerçek değer ile benzer seviyede olduğu görülmektedir.



Şekil 6.5. Sinyal Geliş Açısı – Senaryo 1

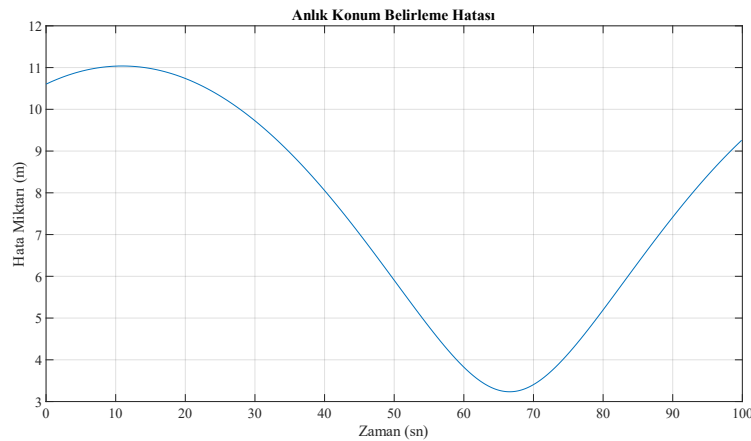


Sistemin çıktısı olarak kabul edilen diğer parametre olan menzil bilgisi; sinyal geliş açısı, açı değişim oranı ve platform hızı kullanılarak hesaplanmaktadır. Konum belirleme işlemlerinde kullanılan menzil bilgisine ait hesaplama sonucu Şekil 6.6’da görülmektedir.



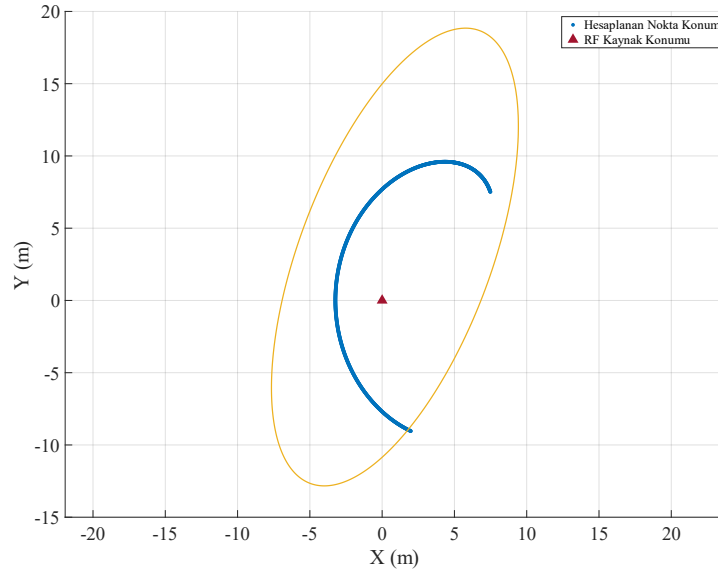
Şekil 6.6. Menzül Değeri – Senaryo 1

Platformun konumu ve baş açısı ile sistem bünyesinde elde edilen menzül bilgisi ve sinyal geliş açısı kullanılarak Bölüm 5.1’de açıklandığı şekilde RF yayın kaynağına ilişkin konum belirleme işlemi yapılmaktadır. Konum belirleme işlemi sonucunda her ölçüm noktasında alınan veriler kullanılarak RF yayın kaynağına ait nokta konum bilgisi elde edilmektedir. Elde edilen nokta konum bilgisi ile gerçek konum arasındaki mesafe sistem performansını inceleme adına hesaplanmaktadır. Hesaplama sonucunda elde edilen hata değerinin zamana göre değişimi Şekil 6.7’de sunulmaktadır. Tüm benzetim zamanı boyunca elde edilen anlık konum verilerinin RMS hata değeri 7,99 metre olarak hesaplanmaktadır.



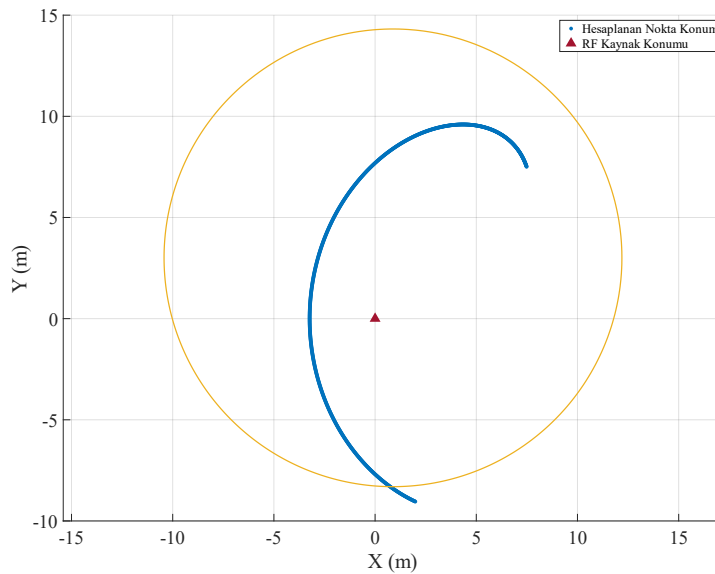
Şekil 6.7. Anlık Konum Belirleme Hata Miktarı – Senaryo 1

Nokta konum bilgilerinin dağılım göstermesi sebebiyle RF yayın kaynağının konumunun belirlenmesi adına EEP hesaplaması yapılmaktadır. Hesaplama sonucu elde edilen bölgesel konum gösterimi Şekil 6.8’de sunulmaktadır. EEP gösteriminin parametreleri Çizelge 6.2’de yer almaktadır.



Şekil 6.8. Nokta Konum Ölçümleri ve EEP – Senaryo 1

Özellikle sistem performansının daha objektif değerlendirilebilmesi adına EEP gösterimine ek olarak CEP hesaplaması da yapılmaktadır. CEP gösterimi Şekil 6.9’da, gösterime ilişkin parametreler Çizelge 6.2’de yer almaktadır.



Şekil 6.9. Nokta Konum Ölçümleri ve CEP – Senaryo 1

Çizelge 6.2. EEP ve CEP Bilgileri – Senaryo 1

Kapsama Oranı	CEP Yarıçapı (m)	EEP Büyük Eksen Yarıçapı (m)	EEP Küçük Eksen Yarıçapı (m)	Büyük/Küçük Eksen Oranı
%95	11,3	16,7	6,6	2,52

#### 6.1.1.1. Senaryo 1 için Monte Carlo Benzetimi Sonuçları

Monte Carlo benzetimi sonucunda ilk olarak, her tekrarda alınan 1000 ölçüm üzerinden konum hatası ve bölgesel konum bölgelerin yarıçapları hesaplanmaktadır. Hesaplama sonucunda elde edilen ortalama değerler Çizelge 6.3'te yer almaktadır.

Çizelge 6.3. Monte Carlo Benzetimi Sonucu Konum Hatası ve Bölgesel Konum Bilgileri – Senaryo 1

	RMS Konum Hatası (m)	CEP Yarıçapı (m)	EEP Büyük Eksen Yarıçapı (m)	EEP Küçük Eksen Yarıçapı (m)
$\sigma = \% 0,5$	112,1	172,8	254,5	102,3
$\sigma = \% 1,0$	223,8	345,1	508,3	204,2
$\sigma = \% 3,0$	673,5	1038,2	1528,9	614,6

Çizelge 6.2 ile Çizelge 6.3'te yer alan veriler karşılaştırıldığında bölgesel konum yarıçap değerlerinin beklendiği şekilde arttığı görülmektedir. Yöntem sonucunda elde edilen bölgesel konumun gösterdiği alanın azaltılması adına Bölüm 5.4'te açıklanan en küçük alana sahip gösterim belirlenmiştir. Benzetim boyunca her tekrarlama elde edilen en küçük alana sahip EEP ve CEP gösterimi parametrelerinin ortalamaları Çizelge 6.4'te yer almaktadır.

Çizelge 6.4. Monte Carlo Benzetimi Sonucu Elde Edilen En Küçük Alanlı Bölgesel Gösterimlerin Bilgileri – Senaryo 1

	CEP Yarıçapı (m)	EEP Büyük Eksen Yarıçapı (m)	EEP Küçük Eksen Yarıçapı (m)
$\sigma = \% 0,5$	130,4	230,1	7,3
$\sigma = \% 1,0$	261,3	461,1	14,6
$\sigma = \% 3,0$	787,6	1390,3	43,7

En küçük alana sahip bölgesel konumun tanımlanmasıyla bölgesel konum gösterimi alanında azalma olduğu görülmektedir. Bununla birlikte Bölüm 5.4'te açıklanan diğer yöntem olan kesişim yöntemi ile her tekrarda elde edilen kesişim bölgelerinin alanları üzerinden değerlendirme yapılabilmektedir. Çizelge 6.5 ve Çizelge 6.6'da tüm veriler üzerinden elde edilen gösterim alanlarına ek olarak en küçük alana sahip gösterimlerin alan ortalaması ve EEP/ CEP gösterimlerinin kesişim alanlarının ortalaması yer almaktadır.

Çizelge 6.5. Monte Carlo Benzetimi Sonucu Elde Edilen CEP Gösterim İyileştirmesi

Sonuçları – Senaryo 1

	Her Tekrar Sonucu Hesaplanan CEP Alanı (m <sup>2</sup> )	En Küçük Alana Sahip CEP Alanı (m <sup>2</sup> )	CEP Kesişim Bölgesi Alanı (m <sup>2</sup> )
$\sigma = \% 0,5$	93842	54030	49968
$\sigma = \% 1,0$	374363	216980	202122
$\sigma = \% 3,0$	3387947	1972014	1835553

Çizelge 6.6. Monte Carlo Benzetimi Sonucu Elde Edilen EEP Gösterim İyileştirmesi

Sonuçları – Senaryo 1

	Her Tekrar Sonucu Hesaplanan EEP Alanı (m <sup>2</sup> )	En Küçük Alana Sahip EEP Alanı (m <sup>2</sup> )	EEP Kesişim Bölgesi Alanı (m <sup>2</sup> )
$\sigma = \% 0,5$	81757	5310	277
$\sigma = \% 1,0$	326131	21197	1111
$\sigma = \% 3,0$	2951788	190966	10042

Monte Carlo benzetiminde, en küçük alana sahip bölgesel gösterimin ve bölgesel gösterimlerin kesişim alanının RF yayın kaynağını barındırma oranı da incelenmiştir. CEP gösterimi için; en küçük alana sahip CEP ve CEP kesişim bölgesi yaklaşımları sonucunda elde edilen bölgesel konumun %100 oranla RF yayın kaynağını barındırdığı gözlenmiştir. EEP gösterimi için; en küçük alana sahip EEP gösterimlerinin %99,9 oranla, bölgesel gösterimlerin kesişimleri üzerinden belirlenen konumun ise sırasıyla %97,8, %99,4, %99,5 oranlarında RF yayın kaynağı barındırdığı gözlenmiştir. Gürültü standart sapması daha az olan senaryoda gözlenen performans azalmasının, kesişim bölgesinin fazla daraltılması sebebiyle olduğu değerlendirilmiştir.

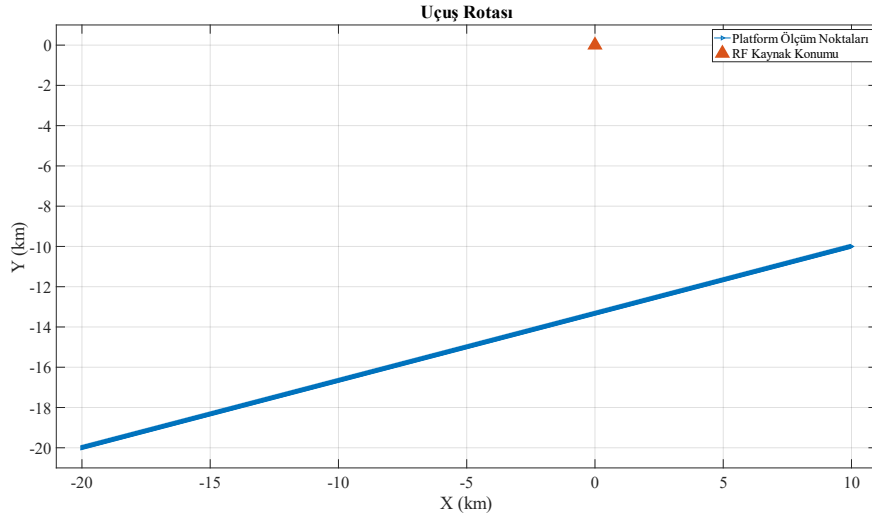
### 6.1.2. Senaryo 2: $V_X = 300$ m/s, $V_Y = 100$ m/s

Senaryoda, üzerinde Doppler frekansı değişim oranı yöntemini kullanan bir sistem bulunduğu varsayılan hava platformunun sabit hızla hareket etmesi üzerine kurgu yapılmıştır. Kurgulanan senaryoya ait bilgiler Çizelge 6.7’de verilmektedir.

Çizelge 6.7. Doppler Frekansı Değişim Oranı Yöntemi – Senaryo 2 Bilgileri

Senaryo Parametreleri	Senaryo 2
Benzetim Süresi	100 sn
Ölçüm Süre Aralığı	0.1 sn
RF Kaynak Konumu	$X = 0, Y = 0$
RF Kaynak Hızı	$V_X = 0$ m/s, $V_Y = 0$ m/s
Yayın Frekansı	3 GHz
Platform Başlangıç Noktası	$X = -20$ km, $Y = -20$ km
Platform Hızı	$V_X = 300$ m/s, $V_Y = 100$ m/s

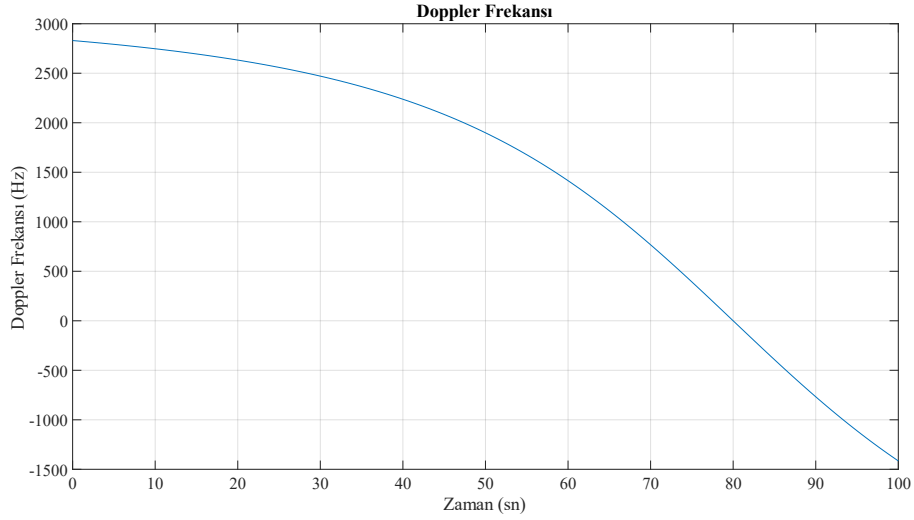
Senaryoda kullanılan sentetik verinin üretimi aşamasında Şekil 6.10’da görülen uçuş geometrisi üzerinden Doppler frekansı değeri hesaplanmaktadır ve yayın frekansı üzerine eklenerek sisteme girdi olarak kullanılmaktadır.



Şekil 6.10. Platform Uçuş Rotası – Senaryo 2

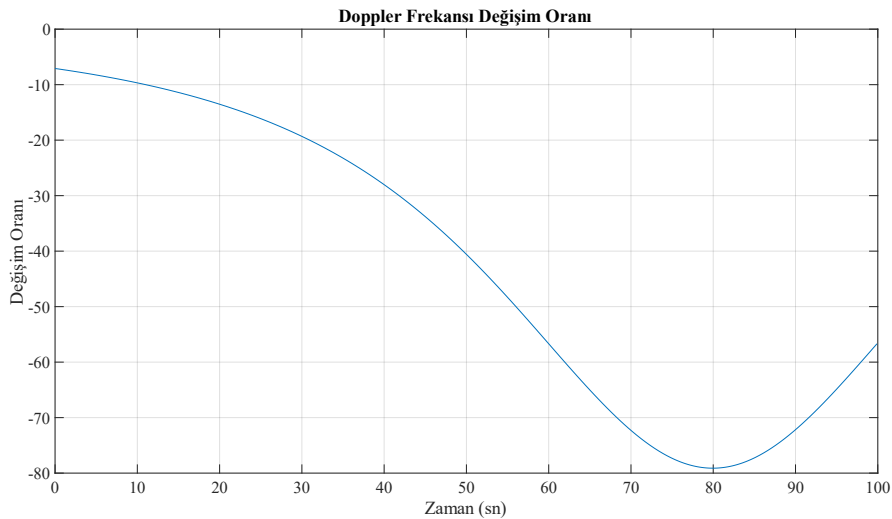
Benzetim sonucunda Şekil 6.11’de sunulan Doppler frekansı bilgisi elde edilmektedir. Platformun hızı ve harekete başladığı konum göz önüne alındığında, benzetimin

başlangıcından 80 saniye sonrasında, RF yayın kaynağına göre platform radyal hızının sıfır olması sebebiyle Doppler frekansının sıfıra indiği görülmektedir. Elde edilen Doppler frekansı çıktı niteliğinde olup sistem bünyesinde doğrudan kullanılmamaktadır.



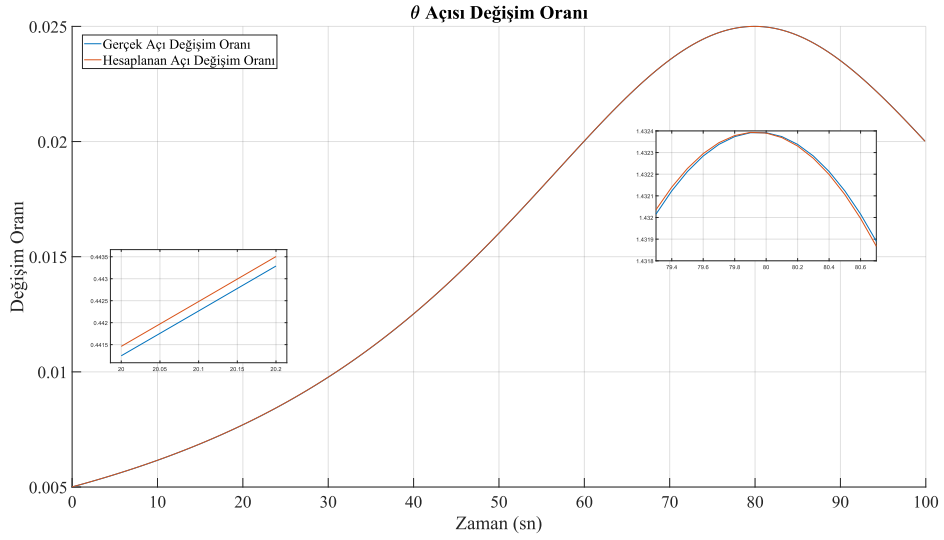
Şekil 6.11. Doppler Frekansı – Senaryo 2

Senaryo bünyesinde alınan yayın frekansı üzerinden Bölüm 3.2’de anlatıldığı şekilde Doppler frekansı değişim oranı elde edilmektedir. Elde edilen oran Şekil 6.12’de sunulmaktadır.



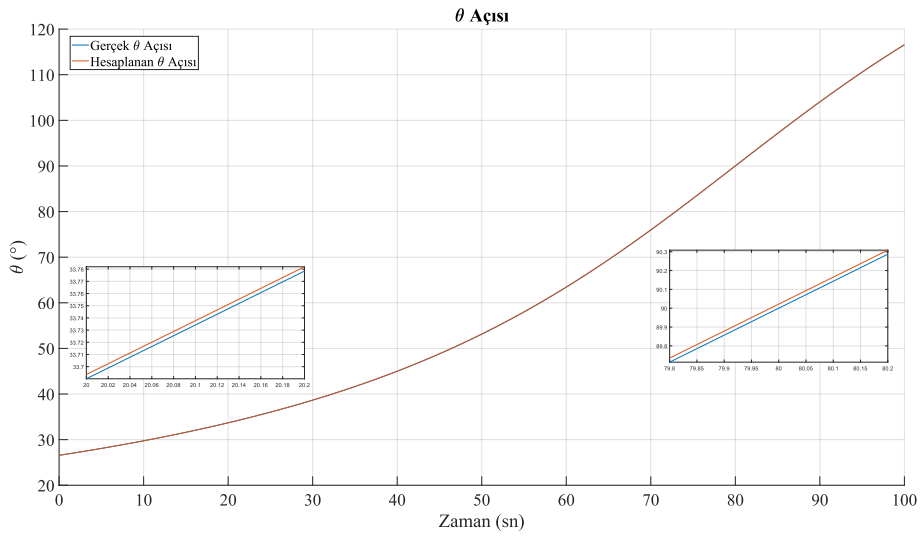
Şekil 6.12. Doppler Frekansı Değişim Oranı – Senaryo 2

Doppler frekansı değişim oranı ölçümü sonucunda elde edilen bilgi kullanılarak sinyal geliş açısı değişim oranı hesaplanmaktadır. Hesaplama sonucu Şekil 6.13’te sunulmuştur. Gerçek değer ile hesaplanan değer aynı karakteristikte olduğu anlaşılmaktadır.



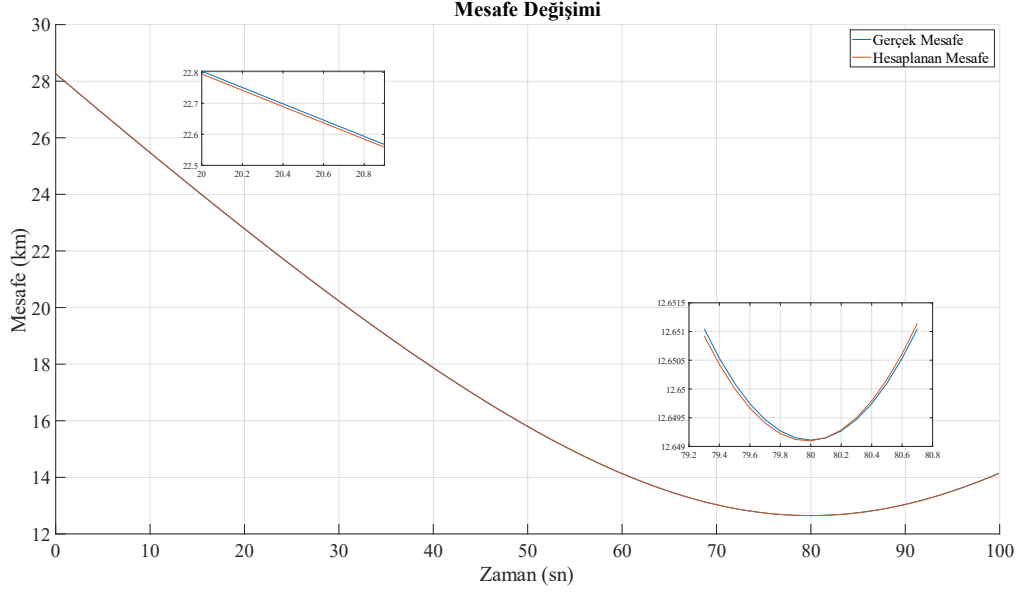
Şekil 6.13. Açık Değişim Oranı – Senaryo 2

Sinyal geliş açısının değişim oranı kullanılarak yöntemin çıktılarında birisi olan sinyal geliş açısı hesaplanmaktadır. Hesaplama sonucu Şekil 6.14’te sunulmaktadır.



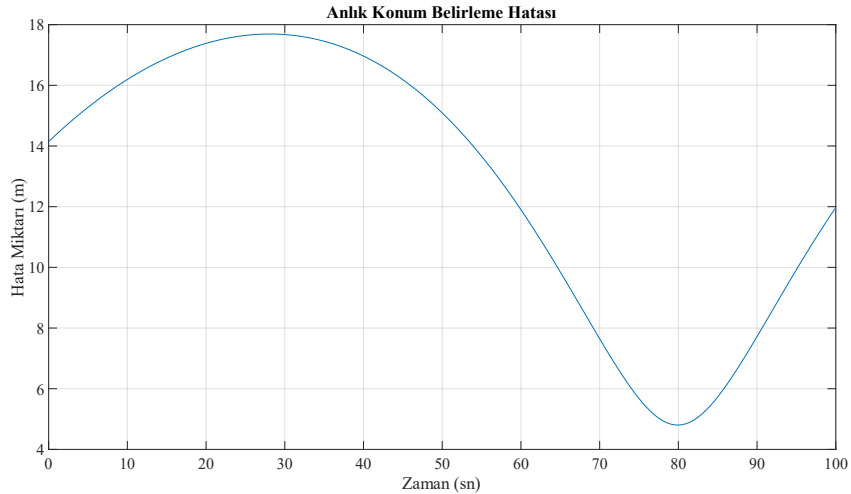
Şekil 6.14. Sinyal Geliş Açısı – Senaryo 2

Sinyal geliş açısı, açı değişim oranı ve platform hızı kullanılarak platformdan RF yayın kaynağına olan mesafe hesaplanmaktadır. Hesaplanan mesafe değerinin zamana göre değişimi Şekil 6.15’te görülmektedir.



Şekil 6.15. Menzil Değişimi – Senaryo 2

Konum tespiti için gerekli görülen menzil bilgisi ve sinyal geliş açısı değeri ile hava platformunun konumu ve baş açısı Bölüm 5.1’de açıklandığı birleştirildiğinde her ölçüm noktasında alınan veriler üzerinden RF yayın kaynağına ilişkin nokta konum bilgileri elde edilmektedir. Elde edilen nokta konum bilgisi ile gerçek konum arasındaki mesafe hatası hesaplanmaktadır ve hatanın zamana göre değişimi Şekil 6.16’da sunulmaktadır. Tüm benzetim zamanı boyunca elde edilen anlık konum verilerinin RMS hata değeri 13,58 metre olarak hesaplanmıştır.

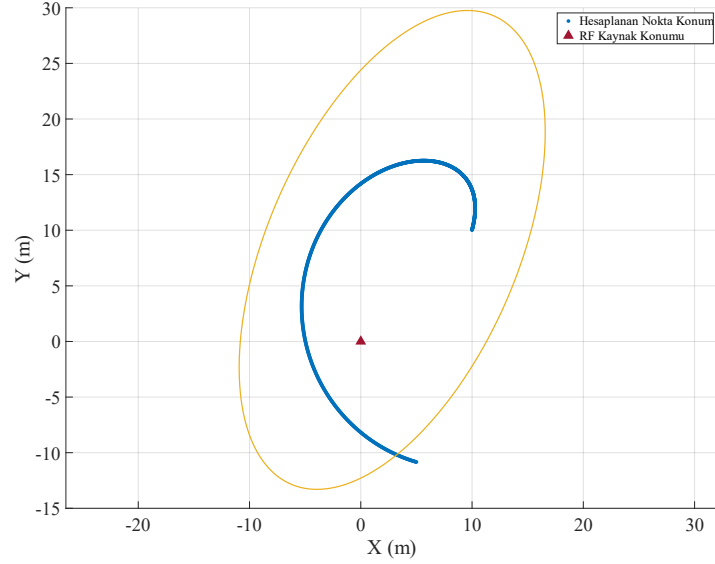


Şekil 6.16. Anlık Konum Belirleme Hata Miktarı – Senaryo 2

Nokta konum bilgilerinin belirli bir bölgede dağılım göstermesi sebebiyle bölgesel konum gösterimlerinin sunulması uygun olmaktadır. Bölgesel konum gösterimi olarak öncelikle

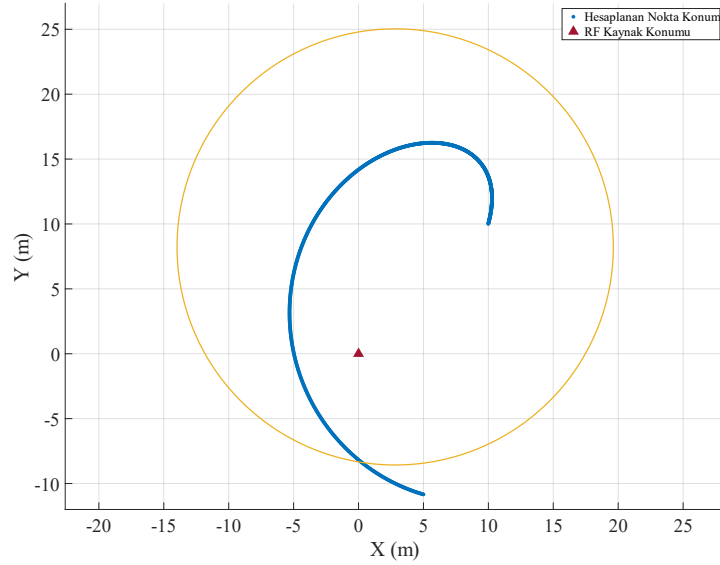


%95 kapsama oranına sahip EEP gösterimi için hesaplama yapılmıştır. Yapılan hesaplama sonucunda elde edilen EEP gösterimi Şekil 6.17’de, EEP parametreleri Çizelge 6.8’de yer almaktadır.



Şekil 6.17. Nokta Konum Ölçümleri ve EEP – Senaryo 2

Yöntem performansının değerlendirilmesi adına EEP gösterimine ek olarak sunulan CEP gösterimi Şekil 6.18’de sunulmuştur. CEP gösterimine ilişkin parametrelere Çizelge 6.8’de yer verilmiştir.



Şekil 6.18. Nokta Konum Ölçümleri ve CEP – Senaryo 2

Çizelge 6.8. EEP ve CEP Bilgileri – Senaryo 2

Kapsama Oranı	CEP Yarıçapı (m)	EEP Büyük Eksen Yarıçapı (m)	EEP Küçük Eksen Yarıçapı (m)	Büyük/Küçük Eksen Oranı
%95	16,8	22,9	11,2	2,0

### 6.1.2.1. Senaryo 2 için Monte Carlo Benzetimi Sonuçları

Senaryo 2 için yürütülen Monte Carlo benzetimi sonucunda her tekrarda alınan 1000 ölçüm üzerinden konum hatası, CEP yarıçapı, EEP büyük ve küçük eksen yarıçaplarının ortalama değerleri hesaplanmıştır. Hesaplama sonucunda elde edilen değerler Çizelge 6.9’da yer almaktadır.

Çizelge 6.9. Monte Carlo Benzetimi Sonucu Konum Hatası ve Bölgesel Gösterim Sonuçları – Senaryo 2

	RMS Konum Hatası (m)	CEP Yarıçapı (m)	EEP Büyük Eksen Yarıçapı (m)	EEP Küçük Eksen Yarıçapı (m)
$\sigma = \% 0,5$	92,3	141,8	208,6	84,2
$\sigma = \% 1,0$	183,1	282,1	415,3	167,0
$\sigma = \% 3,0$	550,2	848,2	1248,7	502,1

Çizelge 6.8 ile Çizelge 6.9’da yer alan veriler incelendiğinde bozucu etkiler altında bölgesel konum yarıçap değerlerinin beklendiği şekilde arttığı gözlenmektedir. Bölgesel konum bulma performansının gürültülü veriler için iyileştirilmesi adına Bölüm 5.4’te açıklanan en küçük alana sahip bölge belirlenmiştir. Her tekrarda elde edilen en küçük EEP ve CEP bölgelerine ait parametrelerin ortalamaları Çizelge 6.10’da yer almaktadır.

Çizelge 6.10. Monte Carlo Benzetimi Sonucu Elde Edilen En Küçük Alanlı Bölgesel Gösterimlerin Bilgileri – Senaryo 2

	CEP Yarıçapı (m)	EEP Büyük Eksen Yarıçapı (m)	EEP Küçük Eksen Yarıçapı (m)
$\sigma = \% 0,5$	101,1	183,6	6,2
$\sigma = \% 1,0$	205,1	372,2	12,1
$\sigma = \% 3,0$	617,3	1120,4	36,2

En küçük alana sahip bölgenin belirlenmesi üzerinden elde edilen iyileşmeye ek olarak Bölüm 5.4’te yer alan kesişim yöntemi ile her tekrar sonucunda elde edilen kesişim bölgesine ait parametreler hesaplanmaktadır. Çizelge 6.11 ve Çizelge 6.12’de tüm veriler üzerinden elde edilen gösterim alanlarına ek olarak en küçük alana sahip gösterimlerin alan ortalaması ve EEP/CEP gösterimlerinin kesişim alanlarının ortalaması sunulmaktadır.

Çizelge 6.11. Monte Carlo Benzetimi Sonucu Elde Edilen CEP Gösterim İyileştirmesi  
Sonuçları – Senaryo 2

	Her Tekrar Sonucu Hesaplanan CEP Alanı (m <sup>2</sup> )	En Küçük Alana Sahip CEP Alanı (m <sup>2</sup> )	CEP Kesişim Bölgesi Alanı (m <sup>2</sup> )
$\sigma = \% 0,5$	63238	34481	20609
$\sigma = \% 1,0$	250125	141577	85523
$\sigma = \% 3,0$	2261440	1281943	781181

Çizelge 6.12. Monte Carlo Benzetimi Sonucu Elde Edilen EEP Gösterim İyileştirmesi  
Sonuçları – Senaryo 2

	Her Tekrar Sonucu Hesaplanan EEP Alanı (m <sup>2</sup> )	En Küçük Alana Sahip EEP Alanı (m <sup>2</sup> )	EEP Kesişim Bölgesi Alanı (m <sup>2</sup> )
$\sigma = \% 0,5$	55145	3602	188
$\sigma = \% 1,0$	217904	14185	745
$\sigma = \% 3,0$	1969868	127407	6727

Monte Carlo benzetimi sonuçları içerisinde en küçük alana sahip bölgesel gösterimin ve bölgesel gösterimlerin kesişim alanının RF yayın kaynağını barındırma oranı incelenmiştir. CEP gösterimi için; en küçük alana sahip CEP ve CEP kesişim bölgesi yaklaşımları sonucunda elde edilen bölgesel konumun %100 oranla RF yayın kaynağını barındırdığı gözlenmiştir. EEP gösterimi için; en küçük alana sahip EEP bölgesinin %100 oranla, bölgesel hataların kesişimleri üzerinden belirlenen konumun ise sırasıyla %99,3, %99,9 ve %100 oranlarında RF yayın kaynağı barındırdığı gözlenmiştir. Gürültü standart sapması daha az olan senaryoda pencere boyutunun görece küçük kalması sebebiyle kesişim bölgesinin fazla daraltıldığı, bu nedenle performansın azaldığı değerlendirilmiştir.

## 6.2. Faz Farkı Değişim Oranı Benzetim Çalışması

Faz farkı değişim oranı üzerine iki farklı uçuş geometrisine sahip senaryolar kurgulanmıştır. Kurgulanan senaryolarda Bölüm 4'te açıklanan matematiksel yaklaşımlar kullanılmaktadır. İlk olarak senaryolar özelindeki geometriler üzerinden sentetik faz farkı bilgisi üretilmiş ve yönteme girdi olarak verilmiştir. Yöntem aldığı girdiyi kullanarak menzili ve sinyal geliş açısını hesaplamaktadır. Hesaplanan parametreler sonucunda nokta konum ve bölgesel konum belirleme işlemleri yapılmaktadır. Yöntemin ideal durumlar altındaki performansının incelenmesi sonrasında bozucu etkilerin ölçüm performansına etkisi de incelenmektedir.

Benzetim çalışmalarında sinyal geliş açısının başlangıç değeri, sentetik olarak üretilen faz farkı bilgisinin Bölüm 2.1.3'te açıklanan faz karşılaştırmalı yön bulma yaklaşımı içerisinde kullanılması sonucunda elde edilen sinyal geliş açısı değeridir. Yöntem, başlangıç açısı sonrasındaki sinyal geliş açısı değerlerini Bölüm 4.1'de açıklanan açı bulma yaklaşımı üzerinden hesaplamaktadır.

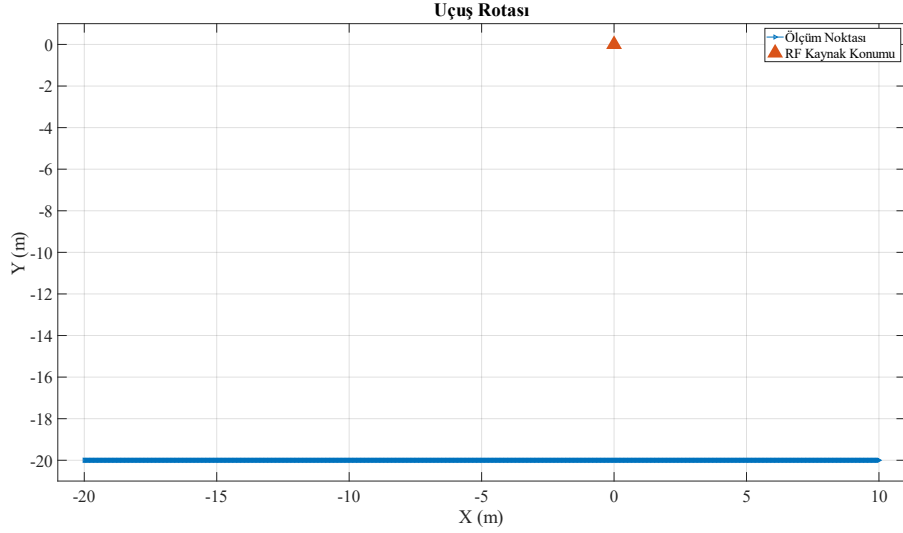
### 6.2.1. Senaryo 3: $V_X = 300 \text{ m/s}$ , $V_Y = 0 \text{ m/s}$

Senaryoda, faz farkı değişim oranı yöntemini kullanan sistemi taşıyan hava platformunun sabit hızla hareket etmesi üzerine kurgu yapılmaktadır. Kurgulanan senaryoya ait bilgiler Çizelge 6.13'te verilmektedir.

Çizelge 6.13. Faz Farkı Değişim Oranı Yöntemi – Senaryo 3 Bilgileri

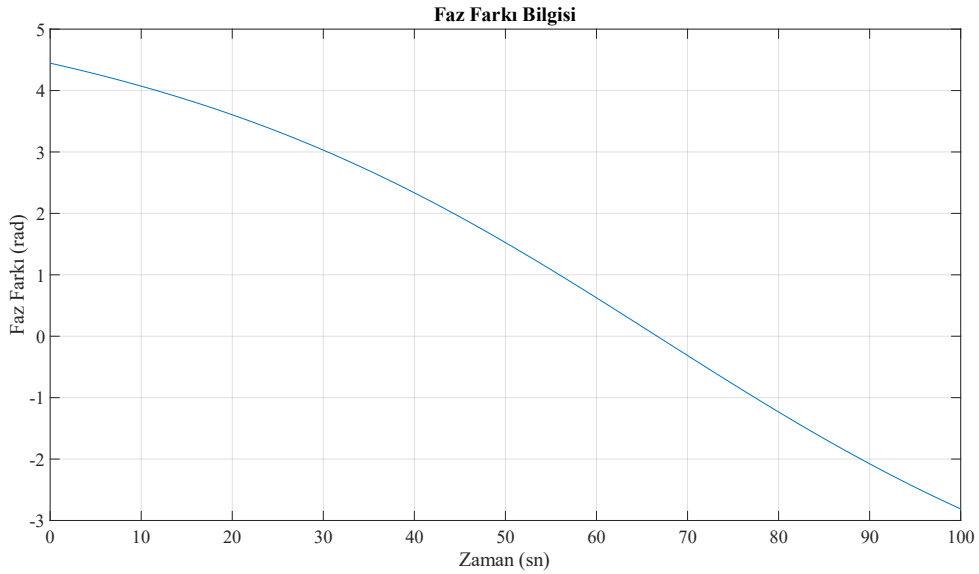
Senaryo Parametreleri	Senaryo 3
Benzetim Süresi	100 sn
Ölçüm Süre Aralığı	0.1 sn
RF Kaynak Konumu	$X = 0, Y = 0$
RF Kaynak Hızı	$V_X = 0 \text{ m/s}, V_Y = 0 \text{ m/s}$
Yayın Frekansı	3 GHz
Platform Başlangıç Noktası	$X = -20 \text{ km}, Y = -20 \text{ km}$
Platform Hızı	$V_X = 300 \text{ m/s}, V_Y = 0 \text{ m/s}$
Platformu Üstü Antenler Arası Mesafe	10 cm

Sentetik veri üretimi aşamasında Şekil 6.19’da görülen uçuş geometrisi kullanılarak hava platformunun burun – kuyruk eksenini doğrultusunda yerleştirildiği varsayılan anten seti üzerinden faz farkı değeri hesaplanmaktadır ve sisteme girdi olarak kullanılmaktadır.



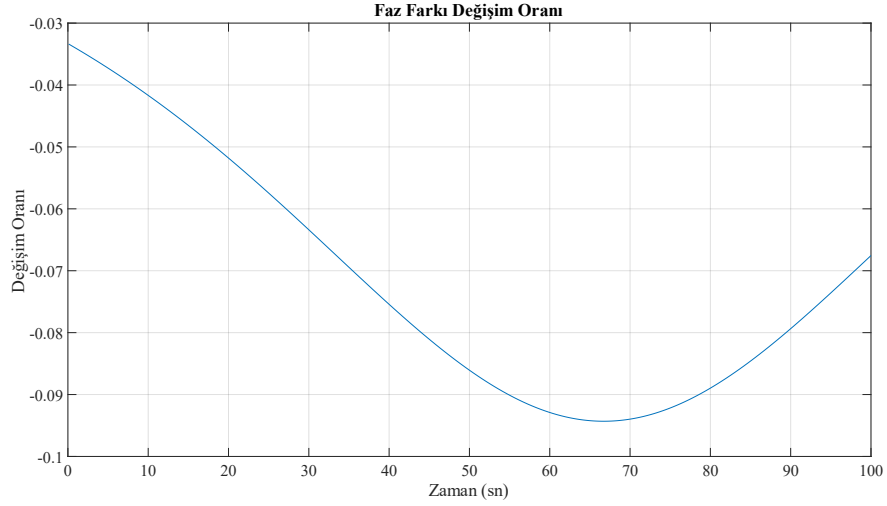
Şekil 6.19. Platform Uçuş Rotası – Senaryo 3

Senaryo parametreleri doğrultusunda elde edilen faz farkı bilgisi Şekil 6.20’de gösterilmektedir. Bölüm 4.1’de belirtildiği şekilde antenler arası mesafenin  $d = \lambda$  olarak belirlenmesi sonucunda faz farkı bilgisinin  $[-2\pi, 2\pi]$  aralığında yer aldığı ve yön ölçüm belirsizliğinin gözlenmeyeceği görülmektedir.



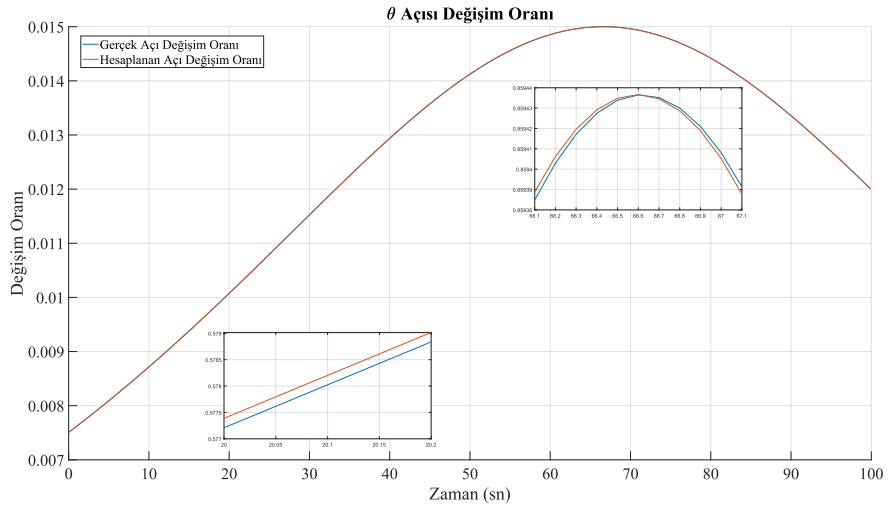
Şekil 6.20. Faz Farkı – Senaryo 3

Yöntem içerisinde faz farkı bilgisi kullanılarak faz farkının zamansal değişimi ölçülmektedir. Ölçüm sonucu Şekil 6.21’de sunulmuştur. Benzetim zamanının  $t = 67$  sn anında platformun RF yayın kaynağına dik pozisyonda olduğu bilinmektedir ve bu durum Şekil 6.21’de de görülmektedir.



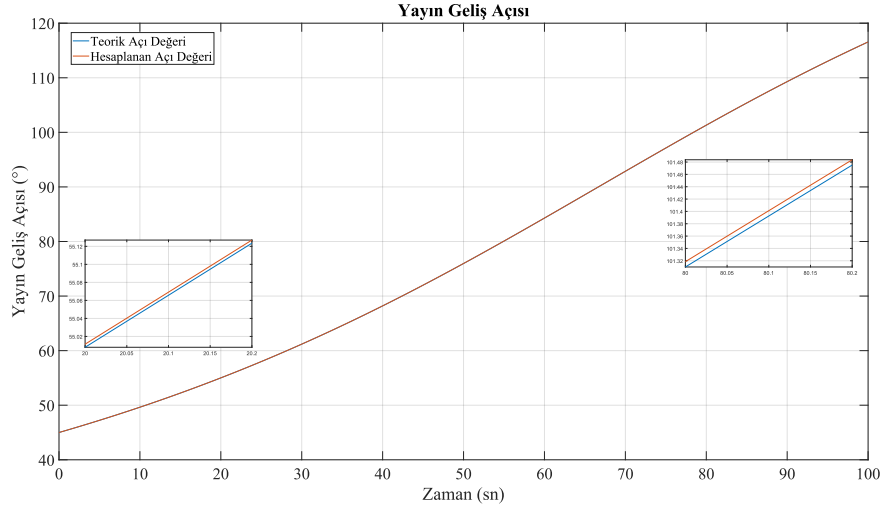
Şekil 6.21. Faz Farkı Değişim Oranı – Senaryo 3

Ölçülen faz farkı değişim oranı bilgisi ile antenler arası mesafe kullanılarak sinyal geliş açısı değişim oranı hesaplanmaktadır. Hesaplama sonucu Şekil 6.22’de görülmektedir.



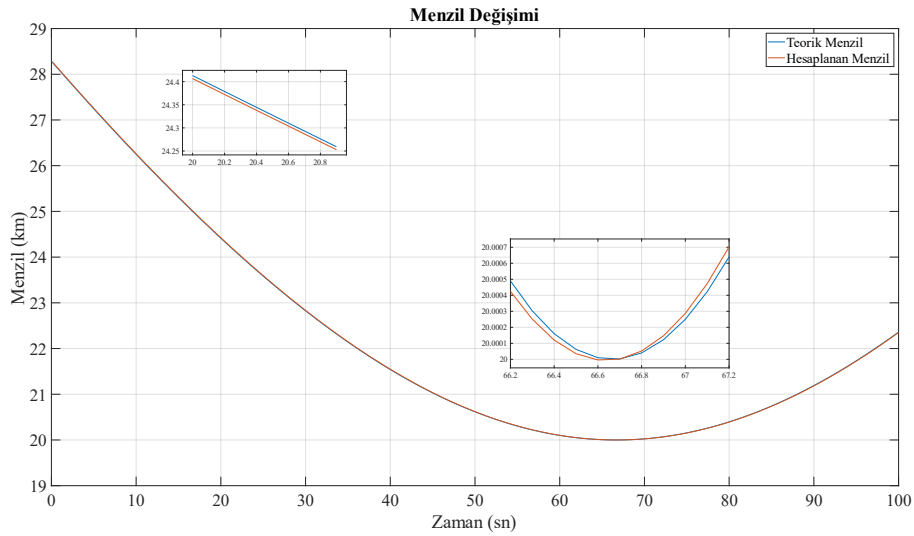
Şekil 6.22. Açık Değişim Oranı – Senaryo 3

Hesaplanan açı değişim oranı bilgisi kullanılarak Şekil 6.23’te sunulan ve yöntemin çıktularından biri olan sinyal geliş açısı hesaplanmaktadır. Hesaplama sonucunda gerçek açı değeri ile hesaplanan açı değerinin aynı karakteristikte olduğu görülmektedir.



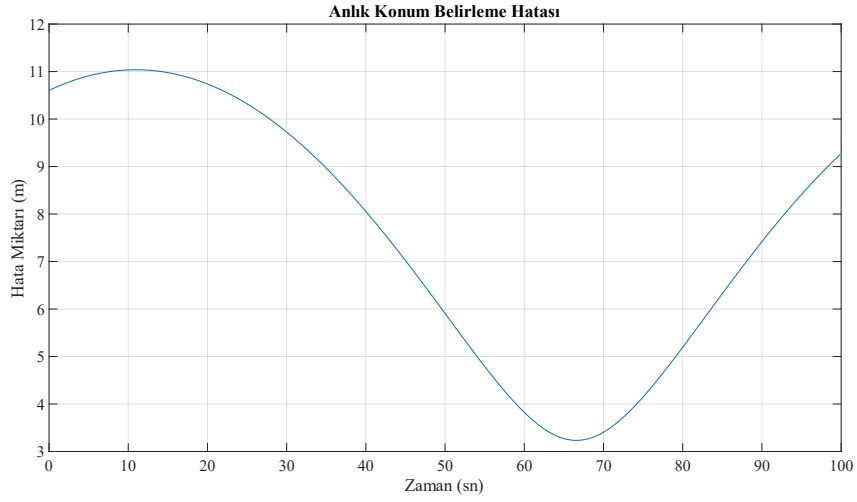
Şekil 6.23. Sinyal Geliş Açısı – Senaryo 3

Yöntemin diğer çıktısı olan menzil bilgisi; sinyal geliş açısı, geliş açısı değişim oranı ve hava platformunun hızı kullanılarak hesaplanmaktadır. Hesaplanan menzil bilgisi Şekil 6.24’te sunulmuştur. Sinyal geliş açısının  $\theta = 90^\circ$  olduğu noktada menzil bilgilerinin tam olarak örtüştüğü görülmektedir.



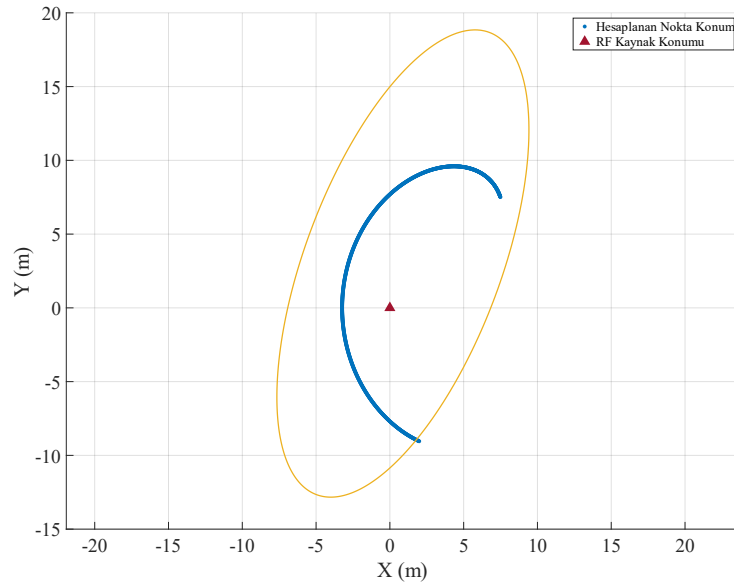
Şekil 6.24. Menzil Değeri – Senaryo 3

Platformun konumu ve baş açısı ile sistem bünyesinde elde edilen menzil bilgisi ve sinyal geliş açısı kullanılarak Bölüm 5.1’de açıklandığı şekilde RF yayın kaynağına ilişkin konum belirleme işlemi yapılmaktadır. İşlem sonucunda, her ölçüm noktasında alınan veri için bir adet nokta konum bilgisi elde edilmektedir. Elde edilen nokta konum bilgileri ile gerçek konum arasındaki mesafe hatasının zamana göre değişimi Şekil 6.25’te yer almaktadır. Nokta konum verilerinin RMS hata değeri 7,99 metre olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 6.25. Anlık Konum Belirleme Hata Miktarı – Senaryo 3

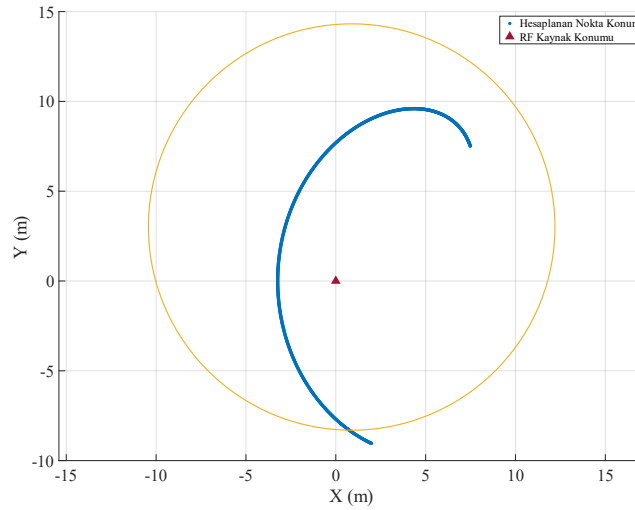
Nokta konum bilgilerinin dağılım şeklinde olması sebebiyle RF yayın kaynağının konumunun belirlenmesi adına bölgesel konum belirleme işlemi yapılmaktadır. İlk olarak EEP gösterimi ile bölgesel konum belirlenmektedir. EEP hesaplamaları sonucunda elde edilen bölgesel konum gösterimi Şekil 6.26’da sunulmaktadır ve Çizelge 6.14’te parametreleri yer almaktadır.



Şekil 6.26. Nokta Konum Ölçümleri ve EEP – Senaryo 3

EEP hesaplamalarına ve gösterimine ek olarak CEP hesaplamaları da yapılmaktadır. Hesaplamalar sonucunda elde edilen CEP gösterimi Şekil 6.27’de yer almaktadır. CEP gösterimine ilişkin parametreler Çizelge 6.14’te sunulmaktadır.





Şekil 6.27. Nokta Konum Ölçümleri ve CEP – Senaryo 3

Çizelge 6.14. EEP ve CEP Bilgileri – Senaryo 3

Kapsama Oranı	CEP Yarıçapı (m)	EEP Büyük Eksen Yarıçapı (m)	EEP Küçük Eksen Yarıçapı (m)	Büyük/Küçük Eksen Oranı
%95	11,3	16,7	6,6	2,52

### 6.2.1.1. Senaryo 3 için Monte Carlo Benzetimi Sonuçları

Senaryo 3 içerisinde ideal olarak elde edilen performans ölçütlerinin gürültü etkisi altındaki değerlerinin incelenmesi adına her tekrarda alınan 1000 ölçüm üzerinden konum hatası ve CEP/EEP yarıçap değerleri hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda Çizelge 6.15'te yer alan ortalama değerler elde edilmiştir.

Çizelge 6.15. Monte Carlo Benzetimi Sonucu Konum Hatası ve Bölgesel Gösterim Sonuçları – Senaryo 3

	RMS Konum Hatası (m)	CEP Yarıçapı (m)	EEP Büyük Eksen Yarıçapı (m)	EEP Küçük Eksen Yarıçapı (m)
$\sigma = \% 0,5$	112,1	172,8	254,5	102,3
$\sigma = \% 1,0$	223,8	345,1	508,3	205,2
$\sigma = \% 3,0$	673,8	1038,5	1529,5	614,8

Gürültü etkisiyle bölgesel konum yarıçap değerlerinde beklenen artış Çizelge 6.14 ile Çizelge 6.15'in karşılaştırılması sonucunda görülmektedir. Bölgesel konumun iyileştirilmesi adına Bölüm 5.4'te açıklanan en küçük alana sahip gösterimin belirlenmesine dair yaklaşım

uygulanmıştır. Uygulama sonucunda her tekrar içerisinde elde edilen en küçük CEP/EEP belirlenmiştir. Belirlenen CEP/EEP gösterimlerinin ortalama parametreleri Çizelge 6.16’da yer almaktadır.

Çizelge 6.16. Monte Carlo Benzetimi Sonucu Elde Edilen En Küçük Alanlı Bölgesel Gösterimlerin Bilgileri – Senaryo 3

	CEP Yarıçapı (m)	EEP Büyük Eksen Yarıçapı (m)	EEP Küçük Eksen Yarıçapı (m)
$\sigma = \% 0,5$	130,3	229,9	7,4
$\sigma = \% 1,0$	261,4	461,3	14,6
$\sigma = \% 3,0$	786,4	1388,2	43,8

Bölgesel konum verisini iyileştirme amaçlı Bölüm 5.4’te açıklanan kesişim yöntemi ile her tekrarda elde edilen kesişim bölgelerinin alanları hesaplanmaktadır. Çizelge 6.17 ve Çizelge 6.18’de her tekrardaki tüm nokta konum verilerinden elde edilen CEP/EEP alanı, en küçük CEP/EEP alanı ve kesişim bölgelerinin alanları yer almaktadır.

Çizelge 6.17. Monte Carlo Benzetimi Sonucu Elde Edilen CEP Gösterim İyileştirmesi Sonuçları – Senaryo 3

	Her Tekrar Sonucu Hesaplanan CEP Alanı (m <sup>2</sup> )	En Küçük Alana Sahip CEP Alanı (m <sup>2</sup> )	CEP Kesişim Bölgesi Alanı (m <sup>2</sup> )
$\sigma = \% 0,5$	93839	53954	49939
$\sigma = \% 1,0$	374357	217163	202070
$\sigma = \% 3,0$	3390331	1965039	1832026

Çizelge 6.18. Monte Carlo Benzetimi Sonucu Elde Edilen EEP Gösterim İyileştirmesi Sonuçları – Senaryo 3

	Her Tekrar Sonucu Hesaplanan EEP Alanı (m <sup>2</sup> )	En Küçük Alana Sahip EEP Alanı (m <sup>2</sup> )	EEP Kesişim Bölgesi Alanı (m <sup>2</sup> )
$\sigma = \% 0,5$	81749	5312	277
$\sigma = \% 1,0$	326130	21168	1111
$\sigma = \% 3,0$	2953613	190805	10037

Monte Carlo benzetimi sonuçları içerisinde en küçük alana sahip bölgesel gösterimin ve bölgesel gösterimlerin kesişim alanının RF yayın kaynağını barındırma oranı incelenmiştir. CEP gösterimi için; en küçük alana sahip CEP ve CEP kesişim bölgesi yaklaşımları sonucunda elde edilen bölgesel konumun %100 oranla RF yayın kaynağını barındırdığı gözlenmiştir. EEP gösterimi için; en küçük alana sahip EEP'nin %100 oranla, bölgesel hataların kesişimleri üzerinden belirlenen konum bilgisinin ise sırasıyla %97,6, %99,3 ve %99,6 oranlarında RF yayın kaynağı barındırdığı gözlenmiştir. Gürültü standart sapması daha az olan senaryoda gözlenen performans düşüşünün, EEP pencere boyutunun göreceli olarak küçük kalması ve buna bağlı olarak fazla odaklanma oluşması sebebiyle gözlendiği değerlendirilmiştir.

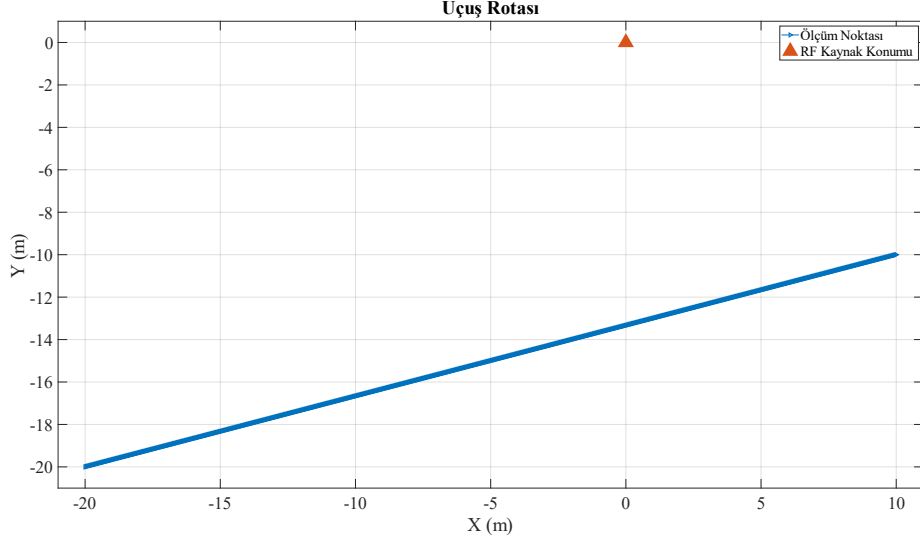
#### 6.2.2. Senaryo 4: $V_X = 300$ m/s, $V_Y = 100$ m/s

Senaryo içerisinde faz farkı değişim oranı yöntemi üzerinden işlem yapan sistemi barındıran hava platformunun sabit hızla hareket etmesi üzerine benzetim yapılmaktadır. Senaryoya ait bilgiler Çizelge 6.19'da verilmektedir.

Çizelge 6.19. Faz Farkı Değişim Oranı Yöntemi – Senaryo 4 Bilgileri

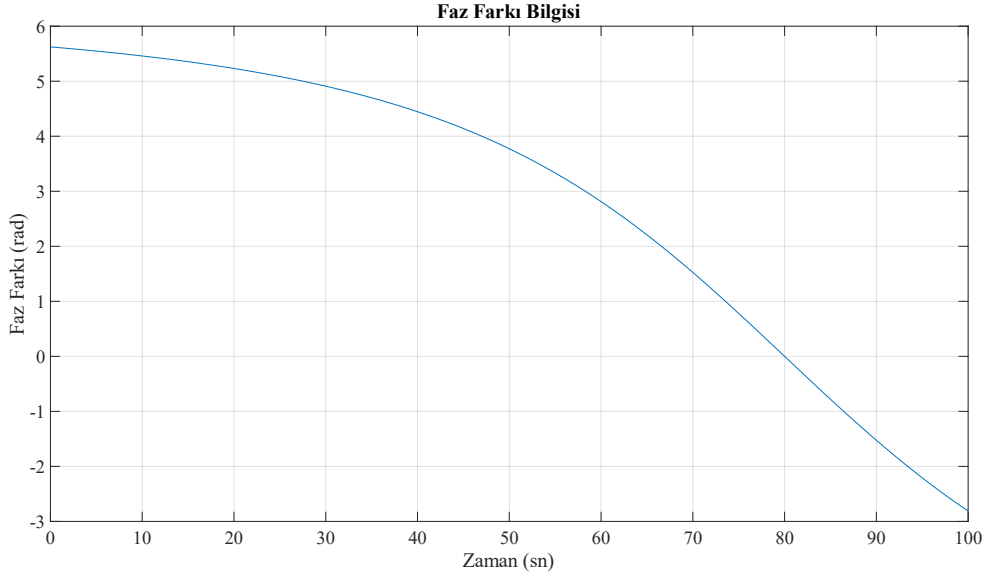
Senaryo Parametreleri	Senaryo 4
Benzetim Süresi	100 sn
Ölçüm Süre Aralığı	0.1 sn
RF Kaynak Konumu	$X = 0, Y = 0$
RF Kaynak Hızı	$V_X = 0$ m/s, $V_Y = 0$ m/s
Yayın Frekansı	3 GHz
Platform Başlangıç Noktası	$X = -20$ km, $Y = -20$ km
Platform Hızı	$V_X = 300$ m/s, $V_Y = 100$ m/s
Platformu Üstü Antenler Arası Mesafe	10 cm

Sentetik veri üretimi aşamasında Şekil 6.28'de görülen uçuş geometrisi ve hava platformunun burun – kuyruk eksenine yerleştirildiği varsayılan anten seti kullanılarak faz farkı değeri hesaplanmakta ve sisteme girdi olarak kullanılmaktadır.



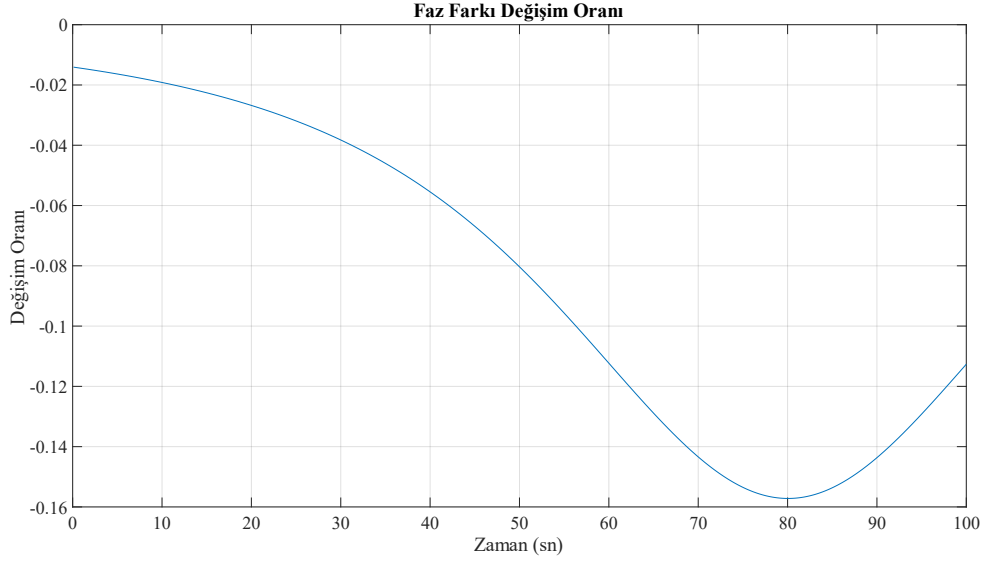
Şekil 6.28. Platform Uçuş Rotası – Senaryo 4

Sabit hız ve baş açısıyla yapılan hareket sonucunda aralarında  $d = \lambda$  mesafe bulunan iki anten üzerinden elde edilen ve sisteme girdi olarak kullanılan faz farkı bilgisi Şekil 6.29’da görülmektedir. Faz farkının yön belirsizliğine sebep olmayacak şekilde  $[-2\pi, 2\pi]$  aralığında kaldığı görülmektedir.



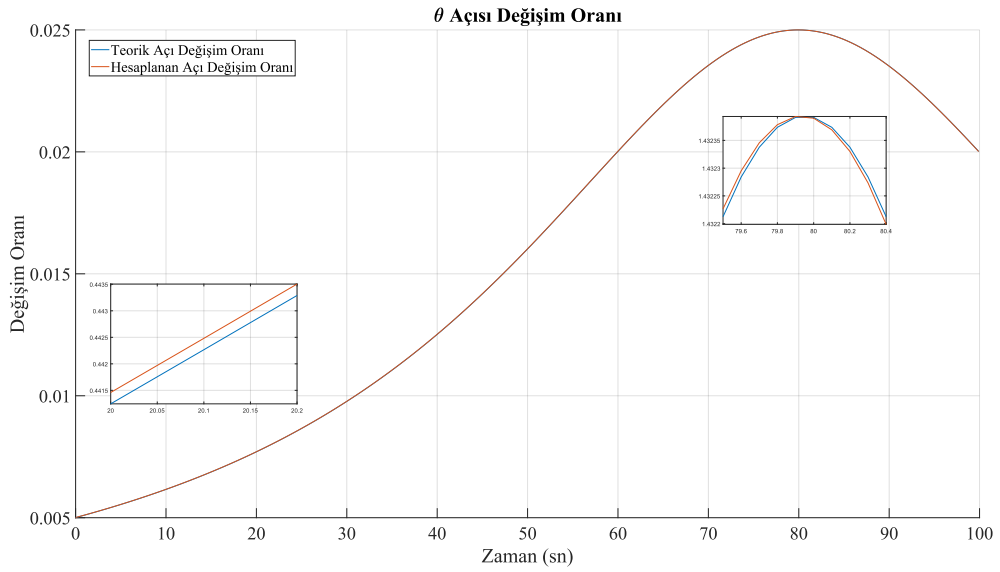
Şekil 6.29. Faz Farkı – Senaryo 4

Girdi olarak alınan faz farkı bilgisi üzerinden faz farkı değişim oranı ölçülmektedir. Ölçüm sonucu Şekil 6.30’da sunulmuştur. Senaryo 1 bahsedildiği gibi benzetim zamanının  $t = 80$  sn anında platformun RF yayın kaynağına dik pozisyonda olduğu bilinmektedir ve bu durum ölçüm sonucunda gözlenmektedir.



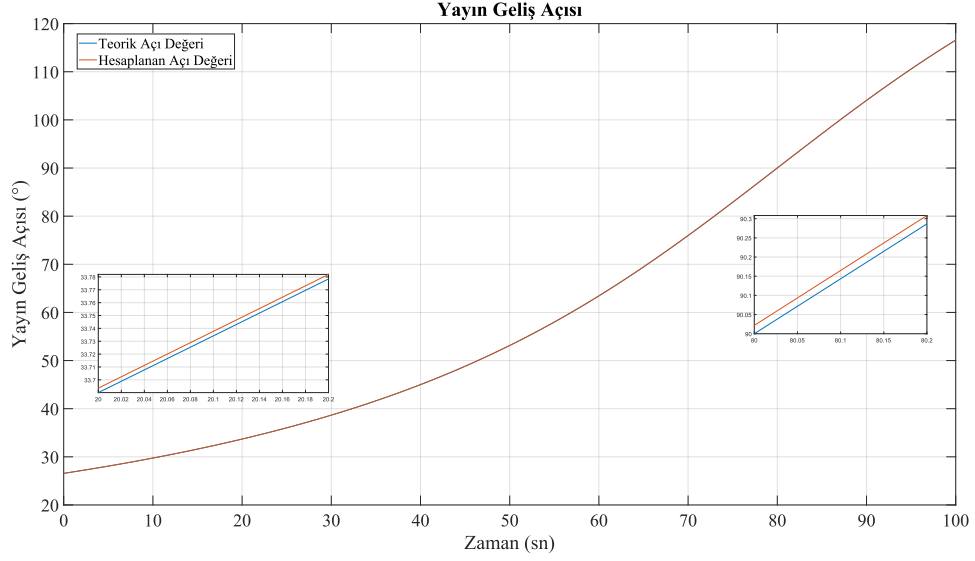
Şekil 6.30. Faz Farkı Değişim Oranı – Senaryo 4

Faz farkı değişim oranı ölçümü sonucunda elde edilen bilgi ile antenler arası mesafe bilgisi kullanılarak sinyal geliş açısı değişim oranı hesaplanmaktadır. Hesaplama sonucu Şekil 6.31’de yer almaktadır.



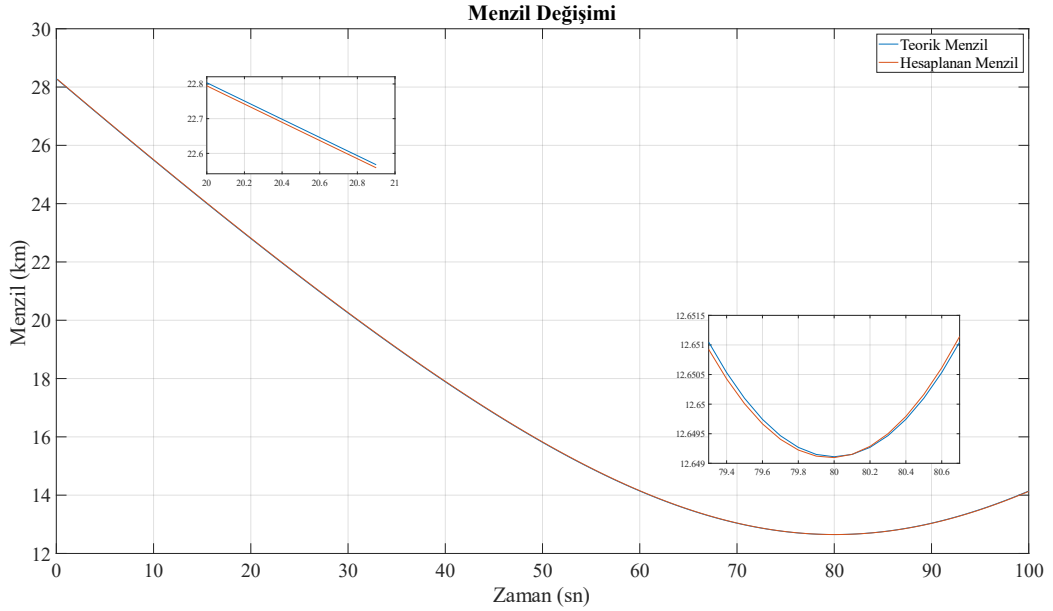
Şekil 6.31. Açık Değişim Oranı – Senaryo 4

Hesaplanan açı değişim oranı bilgisi üzerinden hesaplanan ve yöntemin çıktularından birisi olan sinyal geliş açısı Şekil 6.32’de sunulmuştur. Gerçek açı değeri ile hesaplanan açı değerinin benzer yapıda olduğu görülmektedir.



Şekil 6.32. Sinyal Geliş Açısı – Senaryo 4

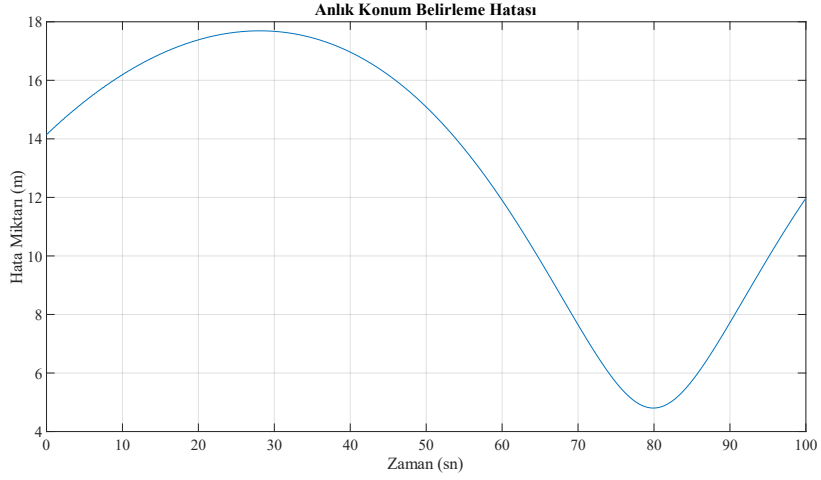
Yöntem sonucunda elde edilen diğer parametre olan menzil bilgisi; sinyalin geliş açısı, geliş açısının değişim oranı ve hava platformunun hızı üzerinden hesaplanmaktadır. Hesaplanan menzil bilgisi Şekil 6.33’te sunulmuştur. Gerçek ve hesaplanan menzil değerlerinin  $t = 80$  sn anında tam olarak kesiştiği görülmektedir.



Şekil 6.33. Menzil Değeri – Senaryo 4

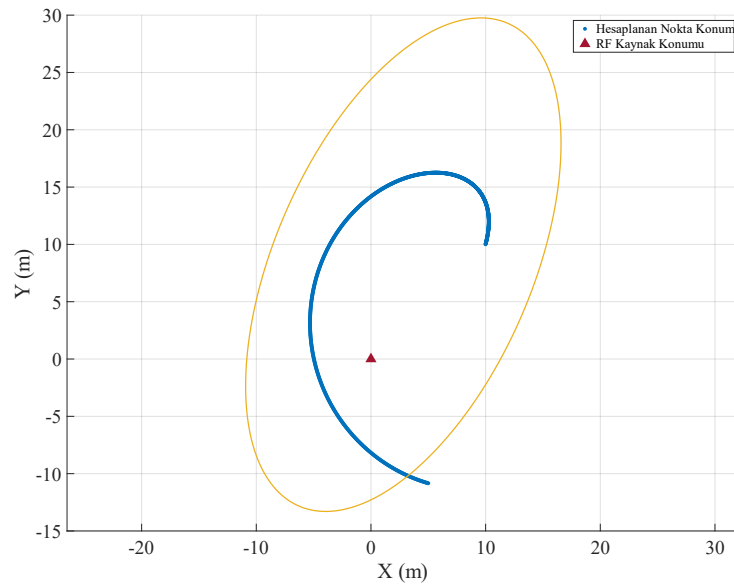
Platformun konumu ve baş açısı ile sistem bünyesinde elde edilen menzil bilgisi ve sinyal geliş açısı kullanılarak Bölüm 5.1’de açıklandığı şekilde RF yayın kaynağına ilişkin konum belirlenmektedir. Belirleme işlemi sonucunda, her ölçüm noktasında alınan veri için bir adet

nokta konum bilgisi üretilmektedir. Üretilen nokta konum bilgileri ile gerçek konum arasındaki mesafe hatası hesaplanmakta ve hatanın zamana göre değişimi Şekil 6.34’te görülmektedir. Nokta konum verilerinin RMS hata değeri 13,58 metre olarak hesaplanmaktadır.



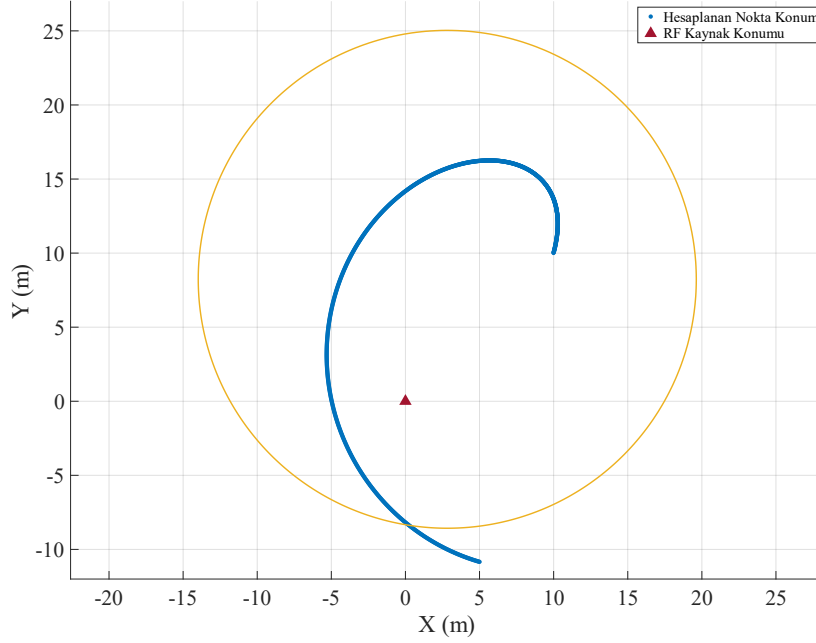
Şekil 6.34. Anlık Konum Belirleme Hata Miktarı – Senaryo 4

RF yayın kaynağının konumunun belirlenmesi sırasında nokta konum verilerinin dağılıma sahip olması sebebiyle bölgesel konum belirleme işlemi yapılmaktadır. Öncelikle EEP gösterimi ile bölgesel konum gösterimi için EEP hesaplamaları yapılmaktadır. Hesaplamalar sonucunda elde edilen bölgesel konum gösterimi Şekil 6.35’te sunulmuştur. EEP parametreleri Çizelge 6.20’de gösterilmektedir.



Şekil 6.35. Nokta Konum Ölçümleri ve EEP – Senaryo 4

Bölgesel konum hesaplamalarında CEP hesaplamaları da yapılmaktadır. Hesaplamalar sonucunda elde edilen CEP gösterimi Şekil 6.36’da yer almaktadır. CEP gösterimine ilişkin parametreler Çizelge 6.20’de sunulmuştur.



Şekil 6.36. Nokta Konum Ölçümleri ve CEP – Senaryo 4

Çizelge 6.20. EEP ve CEP Bilgileri – Senaryo 4

Kapsama Oranı	CEP Yarıçapı (m)	EEP Büyük Eksen Yarıçapı (m)	EEP Küçük Eksen Yarıçapı (m)	Büyük/Küçük Eksen Oranı
%95	16,8	22,9	11,2	2,04

#### 6.2.2.1. Senaryo 4 için Monte Carlo Benzetimi Sonuçları

İdeal olarak elde edilen performans ölçütlerinin gürültü durumundaki değerlerinin incelenmesi adına her tekrarda alınan 1000 ölçüm üzerinden konum hatası ve CEP/EEP yarıçap değerleri gürültülü ölçümler kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda Çizelge 6.21’de yer alan ortalama değerler elde edilmiştir.



Çizelge 6.21. Monte Carlo Benzetimi Sonucu Konum Hatası ve Bölgesel Gösterim

Sonuçları – Senaryo 4

	RMS Konum Hatası (m)	CEP Yarıçapı (m)	EEP Büyük Eksen Yarıçapı (m)	EEP Küçük Eksen Yarıçapı (m)
$\sigma = \% 0,5$	92,3	141,9	208,7	84,1
$\sigma = \% 1,0$	183,2	282,2	415,4	167,1
$\sigma = \% 3,0$	550,1	848,0	1248,5	502,0

Bölgesel konumun tanımladığı alanda gürültü etkisiyle ortaya çıkan artışın azaltılması adına Bölüm 5.4’te açıklanan yaklaşım üzerinden en küçük alana sahip CEP/EEP parametreleri her tekrar için belirlenmiştir. Belirlenen CEP/EEP gösterimlerinin ortalama parametreleri Çizelge 6.22’de yer almaktadır.

Çizelge 6.22. Monte Carlo Benzetimi Sonucu Elde Edilen En Küçük Alanlı Bölgesel

Gösterimlerin Bilgileri – Senaryo 4

	CEP Yarıçapı (m)	EEP Büyük Eksen Yarıçapı (m)	EEP Küçük Eksen Yarıçapı (m)
$\sigma = \% 0,5$	100,9	183,1	6,3
$\sigma = \% 1,0$	205,1	372,2	12,1
$\sigma = \% 3,0$	620,1	1125,8	36,0

Monte Carlo benzetimlerinde son olarak Bölüm 5.4’te açıklanan CEP/EEP kesişim bölgelerinin belirlenmesine yönelik yaklaşım Senaryo 4 için uygulanmıştır. Her tekrar için kesişim bölgesi alanlarının ortalamaları hesaplanmıştır, hesaplama sonucu elde edilen değerler Çizelge 6.23 ve Çizelge 6.24’te sunulmuştur. Çizelgelerde ayrıca her tekrardaki tüm nokta konum verilerinden elde edilen CEP/EEP alanı ve en küçük CEP/EEP alanı ortalamalarına yer verilmiştir.

Çizelge 6.23. Monte Carlo Benzetimi Sonucu Elde Edilen CEP Gösterim İyileştirilmesi

Sonuçları – Senaryo 4

	Her Tekrar Sonucu Hesaplanan CEP Alanı (m <sup>2</sup> )	En Küçük Alana Sahip CEP Alanı (m <sup>2</sup> )	CEP Kesişim Bölgesi Alanı (m <sup>2</sup> )
$\sigma = \% 0,5$	63250	34287	20579
$\sigma = \% 1,0$	250338	141638	85536
$\sigma = \% 3,0$	2260620	1294330	782264

Çizelge 6.24. Monte Carlo Benzetimi Sonucu Elde Edilen EEP Gösterim İyileştirilmesi

Sonuçları – Senaryo 4

	Her Tekrar Sonucu Hesaplanan EEP Alanı (m <sup>2</sup> )	En Küçük Alana Sahip EEP Alanı (m <sup>2</sup> )	EEP Kesişim Bölgesi Alanı (m <sup>2</sup> )
$\sigma = \% 0,5$	55147	3601	188
$\sigma = \% 1,0$	218109	14165	745
$\sigma = \% 3,0$	1969122	127419	6726

Monte Carlo benzetimi sonuçları içerisinde en küçük alana sahip bölgesel gösterimin ve bölgesel gösterimlerin kesişim alanının RF yayın kaynağını barındırma oranı incelenmiştir. CEP gösterimi için; en küçük alana sahip CEP ve CEP kesişim bölgesi yaklaşımları sonucunda elde edilen bölgesel konumun %100 oranla RF yayın kaynağını barındırdığı gözlenmiştir. EEP gösterimi için; en küçük alana sahip EEP gösteriminin %100 oranla, bölgesel hataların kesişimleri üzerinden belirlenen konum ise sırasıyla %99,2, %99,9 ve %100 oranlarında RF yayın kaynağı barındırdığı gözlenmiştir. Gürültü standart sapması daha az olan senaryoda gözlenen performans azalmasının kesişim bölgesinin fazla daraltılması sebebiyle olduğu değerlendirilmiştir.

## 7. SONUÇLAR

Tez çalışması kapsamında ED sistemleri bünyesinde Doppler frekansı değişim oranı ve faz farkı değişim oranı yöntemleri ile RF yayın kaynaklarının konumlarının doğrudan tespit edilebileceği gösterilmiştir. İlk aşamada, ED sistemlerinde kullanılan yön ve konum bulma yaklaşımları açıklamıştır. Genel yaklaşımların açıklanması sonrasında, çalışma kapsamında önerilen Doppler frekansı değişim oranı temelli yön ve menzil bulma yaklaşımına dair matematiksel altyapı gösterilmiştir. Doppler temelli yöntem sonrasında yine çalışma kapsamında önerilen faz farkı değişim oranı yöntemi incelenmiştir. Her iki yöntemin analiz edilmesi amacıyla kurgulanan senaryolar ve matematiksel yaklaşımlar anlatılmıştır. Yöntemler sonucunda, platformun hızı ve baş açısı bilgilerinin kullanılması ile RF yayın kaynağına ilişkin yön ve menzil bilgilerinin elde edilebileceği gösterilmiştir. Elde edilen yön ve menzil bilgileri ile platforma ait konum bilgilerinin birleştirilmesi sonucunda hesaplanan nokta konum bilgileri incelenmiştir. Nokta konum verileri üzerinden CEP ve EEP parametrelerinin belirlenmesine dair altyapı açıklanarak verilerin bölgesel konum belirleme işlemi için kullanımı gösterilmiştir. İdeal durumlar için elde edilen gösterimlere ek olarak gürültülü ölçüm sonuçlarının konum belirleme performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Nokta konum verilerinde gözlenen dağılımın etkisinin azaltılması adına veri seti üzerinde pencereleme yapılarak en küçük alanı sahip bölgesel konumun belirlenmesi sağlanmıştır. Pencereleme sırasında elde edilen bölgesel konum bilgilerinin kesişimleri kullanılarak konum belirleme performansının artırılmasına yönelik yaklaşım açıklanmıştır.

Tüm açıklamalar sonrasında çıktıların görülmesi ve performansların değerlendirilmesi adına Doppler frekansı ve faz farkı temelli yöntemler için iki farklı uçuş geometrisi altında aynı koşullarda senaryolar kurgulanmıştır ve çıktılar alınmıştır. Ek olarak, bozucu faktörlerin performans üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi adına yöntemlerin kullandığı ölçüm parametreleri olan Doppler frekansı değişim oranı ve faz farkı değişim oranı ölçümleri üzerine Gauss dağılımına sahip gürültü eklenmiş ve Monte Carlo benzetimi uygulanmıştır.

Doppler frekansı değişim oranı ve faz farkı değişim oranı yöntemleri üzerinden elde edilen veriler incelendiğinde her iki yöntemin de Senaryo 1/3 ve Senaryo 2/4 için sırasıyla 7,99 m ve 13,58 RMS konum hatası ile RF yayın kaynağının konumunu tespit edebildiği görülmüştür. Tespit edilen nokta konum bilgilerinin bölgesel konum gösterimlerine

çevrilmesi sonucunda RF yayın kaynağının sırasıyla 11,3 m ve 16,8 m yarıçaplı CEP bölgesi içerisinde konumlandırabildiği gözlenmiştir. Yüksek hata değerine sahip Senaryo 2/4 göz önüne alındığında, platformun harekete aynı başlangıç noktasından başlamasına karşılık farklı hızla hareket etmesi sebebiyle yöntemler içerisinde kullanılan değişim oranı değerlerinin mutlak olarak arttığı görülmektedir. Toplam benzetim süresinin ve ölçüm zamanları arasındaki sürenin sabit tutulması sebebiyle, değişim oranında görülen artışın teorik ölçüm hataları oluşturabileceği değerlendirilmiştir. Ayrıca uçuş geometrileri göz önüne alındığında yüksek hata değerine sahip senaryolarda gözlenen en düşük menzil değerlerinin daha az olduğu bilinmektedir. Menzil değerinin azalması sebebiyle açılal hız değerlerinde artış olduğu, oluşan artışın değişim oranı parametrelerinin ölçümünde hatalar gözlenmesine sebep olduğu ve gözlenen hatalar sonucunda ölçüm performansının azaldığı değerlendirilmiştir. Ölçümler arasında en kısa sürenin elde edilmesine yönelik dinamik yaklaşım sergilenmesinin uygun olabileceği, bu sayede parametrelerin zamansal değişiminin hesaplanması sırasında gözlenen hataların azaltılabileceği ve performansın artırılabilceği değerlendirilmiştir.

Çalışma sonucunda, bozucu etkilerin nokta konum verilerinde sebep olduğu dağılımın etkisini azaltma ve bölgesel konum belirleme performansı artırma adına yürütülen en küçük alana sahip bölgenin belirlenmesi ve uçuş boyunca pencereleme ile hesaplanan bölgesel konum verilerinin kesişiminin belirlenmesini temel alan yaklaşımların bölgesel konum belirleme performansını artırdığı görülmüştür. Performans artışı CEP ve EEP için ayrı ayrı değerlendirildiğinde; veri dağılımına odaklanan EEP gösteriminin uçuş geometrisi ile daha ilişkili olması sebebiyle, EEP üzerinde yapılan iyileştirmelerin oldukça etkili olduğu değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, iyileştirme yöntemlerinin hem CEP hem EEP için performansı artırdığı ve bölgesel konum alanını daralttığı görülmüştür. Alanda görülen daralma sırasında CEP üzerinden yapılan iyileştirmelerde en küçük alana sahip CEP ve CEP kesişim bölgelerinin RF yayın kaynağını barındırma oranı değişmediği ve başarılı sonuç alındığı gözlenmiştir. Ancak, EEP üzerinden yapılan iyileştirmelerde en küçük alana sahip EEP gösteriminin RF yayın kaynağını barındırma oranında %0.1 düzeyinde düşüş gözlenirken EEP kesişim yönteminde %2,2 oranla RF yayın kaynağının bölge içerisinde tespit edilemediği gözlenmiştir. Kesişim üzerinden yürütülen işlemlerde, EEP çizimi için kullanılan 10 saniyelik sabit pencere boyutunun fazla odaklanmaya sebep olduğu, bundan dolayı düşük gürültü düzeyleri için performansın azaldığı gözlenmiştir. İyileştirme

yöntemlerinin performanslarının artırılması adına pencere boyutunun dinamik olarak belirlenmesinin uygun olabileceği değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak; çalışma kapsamında, hava platformu parametrelerinin ED sistemi bünyesinde kullanılması durumunda doğrudan konum bulma yaklaşımlarının uygulanabileceği, Doppler frekansı değişim oranı ve faz farkı değişim oranı yöntemleri ile RF yayın kaynağı konumunun en az iki ölçüm alınması sonucunda doğrudan tespit edilebileceği gösterilmiştir.

Doppler frekansı ve faz farkı temelli iki yöntemin birlikte kullanımına bu çalışmada yer verilmemiştir. İlerleyen zamanlarda, her iki yöntemin birlikte kullanımına ek olarak yaygın şekilde görülen üçgenleme yöntemi ile kullanımına yönelik çalışmalar olabileceği öngörülmektedir. Bu çalışmalara ek olarak, tez çalışması içerisinde incelenen pencereleme yaklaşımında, pencere boyutunun veri dağılımına göre dinamik olarak belirlenmesine dair çalışmaların yapılabileceği değerlendirilmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] A. E. Spezio, “Electronic Warfare Systems”, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, c. 50, sayı 3, ss. 633–644, **2002**.
- [2] D. Adamy, *EW 105 Space Electronic Warfare*. Artech House, **2021**.
- [3] M. von Spreckelsen, “Electronic Warfare – The Forgotten Discipline - Joint Air Power Competence Centre”. Erişim: **27 Kasım 2023**. [Çevrimiçi]. Available at: <https://www.japcc.org/articles/electronic-warfare-the-forgotten-discipline/>
- [4] A. De Martino, *Introduction to Modern EW Systems, Second Edition*. Artech House, **2018**.
- [5] F. Neri, *Introduction to Electronic Defense Systems, Third Edition*. Artech House, **2018**.
- [6] A. Tunnicliffe, “Multi-domain operations in the future battlespace - Army Technology”. Erişim: **28 Kasım 2023**. [Çevrimiçi]. Available at: <https://www.army-technology.com/features/multi-domain-operations-in-the-future-battlespace/>
- [7] A. J. Weiss, “Direct position determination of narrowband radio transmitters”, *ICASSP, IEEE Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process. - Proc.*, c. 2, sayı 5, ss. 513–516, **2004**.
- [8] G. Wu, M. Zhang, F. Guo, ve X. Xiao, “Direct position determination of coherent pulse trains based on doppler and doppler rate”, *Electron.*, c. 7, sayı 10, **2018**.
- [9] S. Robertson, *Practical ESM Analysis*. Artech House, **2019**.
- [10] M. T. Grabbe ve B. M. Hamschin, “Geo-location using direction finding angles”, *Johns Hopkins APL Tech. Dig. (Applied Phys. Lab.)*, c. 31, sayı 3, ss. 254–262, **2013**.
- [11] D. Mušicki ve W. Koch, “Geolocation using TDOA and FDOA measurements”, içinde *Proceedings of the 11th International Conference on Information Fusion, FUSION 2008*, **2008**.
- [12] D. Adamy, *EW 101 A First Course in Electronic Warfare*. Artech House, **2001**.
- [13] NAWCWD Avionics Department, *Electronic Warfare and Radar Systems Handbook*, sayı April 1997. **2013**.
- [14] N. O’Donoughue, *Emitter Detection and Geolocation for Electronic Warfare*. Artech House, **2019**.
- [15] J. Lee ve J. Woo, “Interferometer Direction-Finding System With Improved DF Accuracy Using Two Different Array Configurations”, *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, c. 14, ss. 719–722, **2015**.
- [16] A. Orduyilmaz, M. Serin, A. C. Gurbuz, ve A. Yildirim, “Genlik ve faz karşılaştırma

- yöntemi ile pasif yön bulma”, içinde *2014 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference, SIU 2014 - Proceedings*, **2014**, ss. 935–938.
- [17] N. Kim, “Optimized flight path for localization using line of bearing”, Air Force Institute of Technology, **2015**.
- [18] Y. T. Chm, S. Member, ve K. C. Ho, “A Simple and Efficient Estimator for Hyperbolic Location”, c. 42, sayı 8, ss. 1905–1915, **1994**.
- [19] J. Y. Yoon, J. W. Kim, W. Y. Lee, ve D. S. Eom, “A TDoA-based localization using precise time-synchronization”, içinde *International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT*, IEEE, **2012**, ss. 1266–1271.
- [20] N. Okello ve D. Mušicki, “Emitter geolocation with two UAVs”, içinde *Conference Proceedings of 2007 Information, Decision and Control, IDC*, **2007**, ss. 254–259.
- [21] P. C. Chestnut, “Emitter Location Accuracy Using TDOA and Differential Doppler”, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, c. AES-18, sayı 2, ss. 214–218, **1982**.
- [22] A. J. Weiss, “Direct geolocation of wideband emitters based on delay and doppler”, *IEEE Trans. Signal Process.*, c. 59, sayı 6, ss. 2513–2521, **2011**.
- [23] Y. Oshman ve P. Davidson, “Optimization of observer trajectories for bearings-only target localization”, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, c. 35, sayı 3, ss. 892–902, **1999**.
- [24] L. He, P. Gong, X. Zhang, ve Z. Wang, “The bearing-only target localization via the single UAV: Asymptotically unbiased closed-form solution and path planning”, *IEEE Access*, c. 7, ss. 153592–153604, **2019**.
- [25] Q. Wang, F. Guo, ve Y. Zhou, “A single observer passive location method and accuracy analysis using phase difference rate of change only”, içinde *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Information and Automation, ICIA 2008*, IEEE, **2008**, ss. 1030–1033.
- [26] J. Wang, Y. Wang, T. Guo, H. Wang, ve Q. Wang, “Rate of Phase Difference Change Estimation in Single Airborne Passive Locating System”, *Chinese J. Aeronaut.*, c. 22, sayı 2, ss. 184–190, **2009**.
- [27] H. Zhong, H. Ruan, ve B. Sun, “Passive locating method using phase difference rate algorithm based on least squares fitting”, *Proc. 2019 IEEE 3rd Inf. Technol. Networking, Electron. Autom. Control Conf. ITNEC 2019*, ss. 1504–1508, **2019**.
- [28] X. Yang, G. Liu, ve J. Guo, “A single observation passive location algorithm based on phase-difference and doppler frequency rate of change”, içinde *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, **2008**, ss. 1309–1313.
- [29] W. Nelson, “Use of circular error probability in target detection”, **1988**.