



**T.C.**

**ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**



**YAPAY AÇIKLIKLI RADAR VE GPS/GNSS VERİLERİ**  
**İLE DÜŞEY YÖNLÜ YÜZEY DEFORMASYONLARININ**  
**MODELLENMESİ**

**Oğuz ÇINAR**

**Coğrafi Bilgi Teknolojileri**

**ÇANAKKALE**

**T.C.**  
**ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**YAPAY AÇIKLIKLIL RADAR VE GPS/GNSS VERİLERİ  
İLE DÜŞEY YÖNLÜ YÜZEY DEFORMASYONLARININ  
MODELLENMESİ**

**Oğuz ÇINAR**

**Coğrafi Bilgi Teknolojileri**

**Tezin Sunulduğu Tarih : 29/01/2019**

**Tez Danışmanı:**

**Doç. Dr. Ramazan Cüneyt ERENOĞLU**

**ÇANAKKALE**

Oğuz ÇINAR tarafından Doç. Dr. Ramazan Cüneyt ERENOĞLU yönetiminde hazırlanan ve **29/01/2019** tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan “**Yapay Açıklıklı Radar ve GPS/GNSS Verileri ile Düşey Yönlü Yüzey Deformasyonlarının Modellenmesi**” başlıklı çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Coğrafi Bilgi Teknolojileri Anabilim Dalı**’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

### **JÜRİ**

Doç. Dr. Ramazan Cüneyt ERENOĞLU .....

#### **Başkan**

Doç. Dr. Tolga BEKLER .....

#### **Üye**

Dr. Öğr. Üyesi İsmail Onur TUNÇ .....

#### **Üye**

Prof. Dr. Levent GENÇ

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

Sıra No:.....

## İNTİHAL (AŞIRMA) BEYAN SAYFASI



**Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belirttiğimi beyan ederim.**

Oğuz ÇINAR

## TEŞEKKÜR

Lisans yıllarından itibaren ve bu tezin gerçekleŐtirilmesinde değerli fikirleriyle bana yol gösteren, çalıŐmam boyunca benden bir an olsun yardımlarımı esirgemeyen saygı değer danışman hocam Doç. Dr. Ramazan Cüneyt ERENOğLU'na sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.

Ayrıca interferometri tekniği hakkındaki tecrübelerini benimle paylaşan sevgili büyüğüm sayın Dr. Fatma CANASLAN OMUT'a, tüm destekleri için saygı değer hocam Prof. Dr. Levent GENÇ'e, yetişmemde emeği bulunan tüm hocalarıma, çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğsleyen arkadaşlarıma ve hayatımın her evresinde bana destek olan değerli aileme teşekkür ederim.

Oğuz ÇINAR  
anakkale, Ocak 2019

## SİMGELER VE KISALTMALAR

R	Radar ile hedef arasındaki eğik mesafe (slant range)
c	Işık hızı
$\lambda t$	Radar ile hedef arasındaki sinyalin gidiş-geliş süresi
$\theta$	Radarın bakış açısı
s	Eğik mesafe
g	Yatay mesafe
$\varphi_{\text{çözümleme}}$	Çözülmüş interferometrik faz
H	Radarın uçuş yüksekliği
h	Hedef noktanın topoğrafik yüksekliği
$\alpha$	Antenler arası uzaklığın (baseline) yatayla yaptığı açı
$\varphi$	İki sinyal arasındaki faz farkı
$\lambda$	Dalga boyu
$r, r_1, r_2$	Uydu ile hedef nokta arasındaki menzil
$B_y, B_z$	Baz uzaklığı (baseline) bileşenleri
$B_c$	Antenler arası uzaklık (baseline) değeri
$R_y$	Menzildeki çözünürlük
y	Hedefin uçuş doğrultusuna dik yatay mesafesi
$B_x$	Antenler arası uzaklığın bileşeni
V	Uçak hızı
$\delta_r$	Menziller arasındaki fark
$\delta_h$	Baz uzaklığı (baseline) yatay bileşeni
$\delta_v$	Baz uzaklığı (baseline) düşey bileşeni
$\delta\rho$	Bakış açısı istikametindeki menzil değişikliği
$\vec{D}$	Yer değiştirme vektörünün radar ekseni yönündeki bileşeni
$\hat{l}_1$	Yüzeydeki noktadan radara doğru olan birim vektör
$\ddot{\vec{r}}$	Uydu hareketi
G	Evrensel yer çekimi sabiti
M	Dünya'nın kütlesi
$\vec{r}$	Uydunun jeosentrik konum vektörü
$B_{\perp}$	Dik baz mesafesi
$h_a$	Yükseklik belirsizliği

u	Bir noktanın veya nesnenin hızı
ALOS	Advanced Land Observing Satellite
DEM	Digital Elevation Model
ECI	Earth-Centered Inertial
EnviSat	Environmental Satellite
ERP	Earth Rotation Parameters
ERS	European Remote-Sensing Satellite
ESA	European Space Agency
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IGS	International GPS Service
InSAR	Interferometric SAR
IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
IW	Interferometric Wide
JERS	Japanese Earth Resources Satellite
MHz	Megahertz
NASDA	National Space Development Agency
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System
RADAR	Radio Detection And Ranging
RADARSAT	Radio Detection And Ranging Satellite
RTK	Real Time Kinematic
SAM	Sayısal Arazi Modeli
SAR	Synthetic Aperture Radar
SLC	Single Look Complex
SNAP	Sentinel Application Platform
SOPAC	Scips Orbit And Permanent Array Center
SP3	Standard Product 3
SYM	Sayısal Yükseklik Modeli
TEC	Total Electron Content
UHF	Ultra High Frequency
WGS	World Geodetic System
3D	Three-Dimensional

## ÖZET

### YAPAY AÇIKLIKLI RADAR VE GPS/GNSS VERİLERİ İLE DÜŞEY YÖNLÜ YÜZEY DEFORMASYONLARININ MODELLENMESİ

Oğuz ÇINAR

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Coğrafi Bilgi Teknolojileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi

Danışman : Doç. Dr. Ramazan Cüneyt ERENOĞLU

29/01/2019, 73

Günümüzde geleneksel ölçme sistemlerinin yanı sıra uydu jeodezisindeki gelişmeler yardımı ile daha geniş alanlarda daha hızlı ve yüksek hassasiyette veri elde edilebilmektedir. Bu doğrultuda düşey hareketliliği izlemek üzere santimetre seviyesinde hassasiyete sahip Yapay Açıklıklı Radar (Synthetic Aperture Radar-SAR) verisinden yararlanılmıştır.

Söz konusu araştırmada potansiyel hareketliliğe sahip karakteristik bir çalışma bölgesi seçilmiştir. Çalışma alanında oluşturulan Küresel Konumlama Sistemi (Global Positioning System-GPS) ağı yardımıyla ölçme noktalarındaki düşey hareketliliğin Yapay Açıklıklı Radar teknolojisi ile birlikte belirlenmesi ve aralarındaki korelasyon üzerinde durulmuştur. Yukarıda bahsedilen GPS ağı kampanya tipi ölçmelerle periyodik bir şekilde takip edilmiştir.

Jeodezi bilimi, zamana bağlı olarak meydana gelen yüzey değişimlerini yani deformasyonları farklı tekniklerle belirleyebilmektedir. Günümüzde düşey hareketliliğin izlenmesinde GPS'in yanı sıra SAR teknolojisi de kullanılmaktadır. GPS ile yatay düzlemde yüksek hassasiyetli noktasal veri elde edilebilir. SAR ise alan bazlı ölçme yapmaktadır. Yer ölçmelerine gerek duymaz ve uydu bakış doğrultusunda bilgi verir.

İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar (Interferometric Synthetic Aperture Radar-InSAR), aynı bölgeye ait iki SAR görüntüsünün interferogram denilen faz girişimi görüntüsünü elde etmek üzere birleştirilmesidir. SAR görüntüleri faz ve genlik değerlerinden oluşur. Faz değeri radar anteni ile hedef arasındaki uzaklık bilgisini içermektedir. Genlik bilgisi ise hedefin yansıma özelliklerini içermektedir. SAR algılayıcıları gönderdiği elektromanyetik sinyalin hem geri yansıyan kısmının şiddetini hem de sinyaldeki gecikme zamanını kaydeder. İnterferogramdaki faz bilgisi kullanılarak çalışılan bölgeye ait sayısal

yükseklik modeli oluşturulabilmektedir. Yükseklik değışimleri ve deformasyonlar tespit edilebilmektedir. Diğer jeodezik yöntemler düzensiz olarak dağılmış ve kesikli ölçüler sağlarken SAR görüntülerinin kapsadığı binlerce kilometrelik alan içerisinde piksel tabanlı deformasyon bilgisi sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasında kullanılan SAR verisi Avrupa Uzay Ajansı'nın Sentinel-1A uydu görüntüleridir. Elde edilen SAR görüntüleri SNAP programı aracılığıyla incelenmiştir ve Sentinel-1 interferometrik veri işleme aşamaları uygulanmıştır. Faz çözümlemesi ise SNAPHU yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

Araştırma sonucunda SAR yardımıyla alansal olarak izlenen düşey hareketlilik verileri ve GPS gözlemleriyle elde edilen noktasal düşey hareketlilikler arasındaki korelasyon incelenmiştir. Zemin çökmeleri ve yükselmeleri coğrafi bilgi sisteminde modellenmiştir.

**Anahtar sözcükler:** GNSS, GPS, Zemin Çökmesi, Yapay Açıklıklı Radar

## **ABSTRACT**

### **MODELING OF VERTICAL SURFACE DEFORMATIONS USING SYNTHETIC APERTURE RADAR AND GPS / GNSS DATA**

Oguz CINAR

Çanakkale Onsekiz Mart University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Master of Science Thesis in Geographic Information Technologies

Advisor : Assoc. Prof. Dr. Ramazan Cuneyt ERENOGLU

29/01/2019, 73

Today, besides conventional measuring systems, faster and more accurate data can be obtained in larger areas with the help of improvements in satellite geodesy. In this aspect, Synthetic Aperture Radar (SAR) data with the precision at the centimeter level were utilized to monitor the vertical mobility.

In this research, a characteristic working area with potential mobility was selected. With the help of Global Positioning System (GPS) network that formed in the working area, the vertical mobility in the measuring points were determined with SAR technology and the correlation between them were emphasized. Above mentioned GPS network were monitored periodically with the campaign type measurements.

Geodesy science can determine surface changes over time, namely deformations, by different techniques. Nowadays, besides the GPS, SAR technology is also used to monitor vertical mobility. High-precision point data in a horizontal plane can be obtained with GPS. SAR, on the other hand, takes field-based measurement, does not require earth measurements and gives information in the satellite line of sight.

Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) is the combining of two SAR images of the same region into a phase interference image called interferogram. SAR images consist of phase and amplitude values. The amplitude value contains the reflection features, while the phase value contains the information about the distance between the radar antenna and the target. SAR sensors record the intensity of both the reflected part and the delay time of the electromagnetic signal that sent. Digital elevation model of the work area can be created with the use of phase value in the interferogram. Elevation changes and deformations

can be determined. Other geodetic methods provide irregular distributed and discrete measurements, while SAR provides pixel based deformation information within thousands of kilometers covered by SAR images.

The SAR data which used in this thesis were obtained from Sentinel-1A satellite images from European Space Agency. SAR images were investigated through SNAP program and Sentinel-1 interferometric data processing steps were applied. Phase analysis were carried out with SNAPHU software.

As a result of this research, correlation between the vertical mobility data which areally monitored with the help of SAR and the point vertical mobilities obtained by GPS observations were investigated. Land subsidence and elevations were modeled with geographical information system.

**Keywords:** GNSS, GPS, Land Subsidence, Synthetic Aperture Radar

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa No

TEZ SINAVI SONUÇ FORMU .....	ii
İNTİHAL (AŞIRMA) BEYAN SAYFASI.....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	v
ÖZET .....	vii
ABSTRACT.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2	
ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....	3
2.1. InSAR Tekniğinin Tarihsel Gelişimi .....	3
2.1.1. Önceki Çalışmalar .....	3
2.1.2. Yapay Açıklıklı Radar Uydularının Genel Özellikleri.....	4
2.2. Radar Temelleri.....	10
2.3. Yapay Açıklıklı Radar (SAR) .....	11
2.4. İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar (InSAR) .....	18
BÖLÜM 3	
MATERYAL VE YÖNTEM.....	21
3.1. İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar Teknikleri .....	21
3.1.1. Hareket Doğrultusuna Dik İnterferometri Tekniği.....	21
3.1.2. Hareket Doğrultusunda İnterferometri Tekniği.....	22
3.1.3. Tekrar Geçiş İnterferometri Tekniği .....	24
3.2. Veri Kalitesini Etkileyen Faktörler .....	27
3.2.1. Atmosferik Etki .....	27
3.2.2. Yörünge Hatası .....	27
3.2.3. Zamansal Korelasyonsuzluk.....	28
3.2.4. Dik Baz Mesafesi .....	28
3.2.5. Topoğrafyanın Etkisi .....	29
3.3. Küresel Uydu Seyrüsefer Sistemi (GNSS) .....	29
3.3.1. Küresel Konumlama Sistemi (GPS).....	30

3.3.1.1. Gerçek Zamanlı Kinematik (RTK) Ölçme Yöntemi .....	34
3.3.1.2. Statik Ölçme Yöntemi .....	36
3.4. Deformasyon Modelleri .....	38
3.4.1. Statik Deformasyon Modeli .....	39
<b>BÖLÜM 4</b>	
<b>ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....</b>	<b>41</b>
4.1. Terzioğlu Yerleşkesi .....	41
4.2. Sentinel Verisinin Seçilmesi .....	43
4.3. İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar Veri İşleme Adımları .....	45
4.4. Terzioğlu Yerleşkesindeki Düşey Yönlü Yüzey Deformasyonlarını Gösteren İnterferogramlar .....	51
4.5. Jeodezik Düşey Deformasyon Belirleme .....	57
4.5.1. GNSS Kontrol Ağı ve Nirengi Ağının Tesisi, GNSS ve Yersel Ölçmelerinin Yapılması .....	57
4.5.2. GNSS ve Nirengi Ağı Dengelemesi .....	62
<b>BÖLÜM 5</b>	
<b>SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>66</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>68</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>I</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 2.1. Referans yörüngeye göre tekrarlayan hatanın şematik görünümü .....	8
Şekil 2.2. TanDEM-X konfigürasyonu ile sanatçının bistatik gözlemine dair görüşü.....	9
Şekil 2.3. Elektromanyetik spektrum.....	11
Şekil 2.4. Yapay açıklıklı radar tekniği .....	12
Şekil 2.5. a) Gerçek açıklıklı radar ve b) yapay açıklıklı radar tekniği arasındaki çözünürlük farkı .....	13
Şekil 2.6. Yapay açıklıklı radarda geometrik bozulmalar .....	15
Şekil 2.7. Kısa görüntüleme ve gölge bozulmaları.....	15
Şekil 2.8. Eğik mesafe ve yatay mesafe.....	16
Şekil 2.9. Eğik mesafe ve yatay mesafe görüntüleri.....	17
Şekil 2.10. a) Eğik mesafe görüntüsü ve b) yatay mesafe görüntüsü .....	17
Şekil 2.11. İnterferometrik yapay açıklıklı radar geometrisi .....	18
Şekil 2.12. $S_1$ ve $S_2$ radar antenleri arasındaki baz (B) vektörü .....	20
Şekil 3.1. Hareket doğrultusuna dik interferometri geometrisi .....	21
Şekil 3.2. Hareket doğrultusuna dik interferometri görüntüleme geometrisi .....	22
Şekil 3.3. Hareket doğrultusunda interferometri geometrisi.....	23
Şekil 3.4. Hareket doğrultusunda interferometri görüntüleme geometrisi .....	24
Şekil 3.5. Tekrar geçiş interferometri görüntüleme geometrisi .....	24
Şekil 3.6. Tekrar geçiş interferometri geometrisi .....	25
Şekil 3.7. SAR geometrisi – dik baz mesafesi.....	28
Şekil 3.8. GPS uydu takımı yıldızı.....	31
Şekil 3.9. GPS'in bölümleri.....	32
Şekil 3.10. GPS anteni sinyal yansıma hatası (multipath).....	33
Şekil 3.11. RTK – GPS genel bakış.....	35
Şekil 3.12. Gerçek zamanlı kinematik (RTK) yapısı.....	35
Şekil 3.13. İşleme sonrası diferansiyel düzeltilmeli Statik GPS.....	37
Şekil 3.14. Bağlı konum belirlemede hata kaynakları .....	38
Şekil 4.1. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Terzioğlu Yerleşkesi 3 boyutlu modeli ..	41
Şekil 4.2. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Terzioğlu Yerleşkesi etrafındaki heyelan yoğunluğunun görüldüğü alanları gösterir harita.....	42
Şekil 4.3. Çanakkale ili fay yoğunluğunun görüldüğü alanları gösterir harita .....	43
Şekil 4.4. Sentinel-1 veri özelliklerinin girilmesi .....	44
Şekil 4.5. Sentinel-1 radar görüntülerinin seçilmesi.....	44
Şekil 4.6. İnterferometrik alt genişliğin görüntülenmesi .....	46
Şekil 4.7. İnterferometrik alt genişlik seçimi.....	46
Şekil 4.8. SNAP deburst işlemi öncesi interferogram faz görüntüsü .....	47
Şekil 4.9. SNAP deburst işlemi sonrasında interferogram faz görüntüsü .....	47
Şekil 4.10. InSAR veri işlem akışı.....	48
Şekil 4.11. 31 Mayıs 2017 – 15 Kasım 2017 tarihleri arasındaki Sentinel-1A faz görüntüsü, Çanakkale ve Terzioğlu Yerleşkesine genel bakış.....	50
Şekil 4.12. 31 Mayıs 2017 – 15 Kasım 2017 tarihleri arasındaki Sentinel-1A çözümlenmiş (unwrapped) faz görüntüsü, Çanakkale ve Terzioğlu Yerleşkesine genel bakış.....	50
Şekil 4.13. 31 Mayıs 2017 – 15 Kasım 2017 tarihli radar görüntülerinden elde edilen interferogram faz bilgisi.....	51

Şekil 4.14. 31 Mayıs 2017 – 15 Kasım 2017 tarihli radar görüntülerinden elde edilen interferogram çözümlenmiş (unwrapped) faz bilgisi.....	52
Şekil 4.15. 31 Mayıs 2017 – 15 Kasım 2017 tarihli radar görüntülerinden elde edilen interferogram benzeşim (coherence) bilgisi.....	52
Şekil 4.16. 15 Kasım 2017 – 10 Kasım 2018 tarihli radar görüntülerinden elde edilen interferogram faz bilgisi.....	53
Şekil 4.17. 15 Kasım 2017 – 10 Kasım 2018 tarihli radar görüntülerinden elde edilen interferogram çözümlenmiş (unwrapped) faz bilgisi.....	53
Şekil 4.18. 15 Kasım 2017 – 10 Kasım 2018 tarihli radar görüntülerinden elde edilen interferogram benzeşim (coherence) bilgisi.....	54
Şekil 4.19. 31 Mayıs 2017 – 10 Kasım 2018 tarihli radar görüntülerinden elde edilen interferogram faz bilgisi.....	54
Şekil 4.20. 31 Mayıs 2017 – 10 Kasım 2018 tarihli radar görüntülerinden elde edilen interferogram çözümlenmiş (unwrapped) faz bilgisi.....	55
Şekil 4.21. 31 Mayıs 2017 – 10 Kasım 2018 tarihli radar görüntülerinden elde edilen interferogram benzeşim (coherence) bilgisi.....	55
Şekil 4.22. 31 Mayıs 2017 – 10 Kasım 2018 tarihli radar görüntülerinden elde edilen uydu bakış doğrultusundaki yer değişimi ve Terzioğlu Yerleşkesindeki GPS noktaları .....	56
Şekil 4.23. 31 Mayıs 2017 – 10 Kasım 2018 tarihli radar görüntülerinden elde edilen uydu bakış doğrultusu verilerinden interferogram bant formülü ile türetilen düşey yöndeki yer değişimi ve Terzioğlu Yerleşkesindeki GPS noktaları .....	56
Şekil 4.24. Üst derece kampüs nirengi ağı.....	60
Şekil 4.25. ÇOMÜ Terzioğlu Yerleşkesinde tesis edilmiş pilyelerden örnekler.....	61
Şekil 4.26. GNSS nirengi ağı kanavasını.....	64

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa No

Çizelge 2.1. Yapay açıklıklı radar uydularının özellikleri.....	5
Çizelge 4.1. InSAR yığına genel bakış ve en uygun birincil görüntü seçimi.....	45
Çizelge 4.2. SNAP (Sentinel Application Platform) işlem-zaman ilişkisi.....	49
Çizelge 4.3. Üst derece ağı oluşturan pilyelerin coğrafi koordinatları.....	58
Çizelge 4.4. GPS/GNSS ölçmelerine ilişkin anahtar parametreler.....	59
Çizelge 4.5. Üst derece ağı oluşturan pilyelerin ITRF koordinatları.....	63
Çizelge 4.6 Terzioğlu heyelanı mikro-jeodezik izleme ağı I. ve III. epoklar arası üç boyutlu deformasyon analizi sonuçları.....	65



## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

1990'lı yıllardan itibaren haritacılık anlamında teknolojiye çok önemli ve hızlı ilerlemeler yaşanmıştır. Bu gelişmelere en iyi örnek olarak GPS/GNSS sistemlerinin günlük hayattaki yeri verilebilir. Düşey yönlü yüzey deformasyonlarının tespitinde birçok yöntem kullanılabilir. Bu yöntemlere hassas nivelman ölçmeleri, Küresel Konumlama Sistemi (Global Positioning System-GPS) ölçmeleri örnek olarak gösterilebilir. Ancak söz konusu yöntemler nokta bazlı ölçme yöntemleri olup geniş alanlarda uygulanması güç, zaman açısından uzun ve maliyetli yöntemlerdir. Uydu jeodezisindeki gelişmeler doğrultusunda düşey yöndeki yüzey deformasyonlarının daha geniş alanlarda ve daha kısa zamanda elde edilebileceği görülmektedir.

Günümüzde Yapay Açıklıklı Radar (Synthetic Aperture Radar-SAR) görüntülerinden yararlanılarak düşey yönlü yüzey deformasyonlarının santimetre hassasiyetinde tespiti mümkündür. İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar (Interferometric Synthetic Aperture Radar-InSAR), bir bölgeye ait birden fazla radar görüntüsünün faz farkları alınarak interferogram oluşturulan bir ölçme yöntemidir. Oluşturulacak interferogramın hassasiyetinin yüksek olması için yeterli sayıda uydu görüntüsü ile çalışılmalıdır. Elde edilen uydu görüntüleri arasında çift oluştururken benzer nitelikteki zaman aralıklarında alınmış olmasına ve görüntülerin alındığı yörüngede farklı geçiş zamanlarında dik uydu konumları arasındaki baz değerine dikkat edilmesi gerekmektedir. Söz konusu baz (uzaklık) değerinin en uygun aralıkta olması görüntülerin düşey yöndeki hassasiyetini belirlediğinden istenilen hassas sonuçlara uygun baz seçimi ile ulaşılabilecektir.

Yapay Açıklıklı Radar yöntemi mikrodalga frekanslarda çalışır ve aktif bir uzaktan algılama sistemidir. Bu sayede kendi enerjisini kendi sağladığı için gece ve gündüz, her türlü hava koşulunda görüntü aldığı alanın faz ve genlik değerlerini kaydedebilir. Buna karşın yapay açıklıklı radar görüntüleri iki boyutlu bilgi sağlamaktadır. İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar (InSAR) yöntemi ile üç boyutlu arazi modeli oluşturulmaktadır. InSAR ilk olarak Ay'ın topoğrafyasını çıkarmak üzere yeryüzüne konumlandırılmış radarlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Massonnet ve Thierry, 1993). Daha sonraları InSAR yeryüzü deformasyon ölçmelerinde kullanılmıştır.

Yapay Açıklıklı Radar uydu görüntüleri birbiri ile piksel piksele eşleştirilerek interferogram oluşturulur. İnterferogramdaki bilgiler yardımıyla düşey yöndeki değişimler belirlenebilir. Oluşturulan interferogram radar uydularının kaydettiği faz ve genlik

değerlerini içerir. Faz bilgisi radar sinyallerinin hedefe olan uzaklığına bağlı bir değeri ifade ederken genlik ise radar sinyallerinin hedeften yansıma özelliklerini ifade eder. InSAR iki SAR görüntüsündeki birbirine karşılık gelen piksellerin faz farklarını belirler ve interferogram oluşturur (Bürgmann ve ark., 2000; Canaslan, 2010). InSAR ile elde edilen veriler yeryüzünde meydana gelen değişimler hakkında önemli bilgiler içermektedir. Normal şartlarda yersel ölçmelerle uzun zaman alacak yeryüzü deformasyon gözlemleri InSAR yardımı ile yersel ölçmelere gerek olmaksızın kolayca belirlenebilir. Ayrıca yersel ölçmelere olanak vermeyen engebeli arazilerde, volkanik alanlarda, heyelan bölgelerinde InSAR tekniği riskleri ortadan kaldırarak önemli derecede fayda sağlamaktadır ve ekonomik olarak da avantajlıdır.

Bunun yanı sıra GPS'in yatay düzlemdeki üstün hassasiyetinden yararlanılmıştır. GPS sivil kullanıma açıldığı günden bu yana insan yaşamının birçok alanında kullanılmaya başlanmıştır.

Bu tez çalışmasında düşey yönlü yüzey deformasyonları veya diğer bir deyişle zemin çökmeleri veya yükselmeleri GPS kullanılarak yeterli sayıda tesis edilmiş ölçme noktaları yardımıyla hassas bir şekilde belirlenmiştir. Öncelikle çalışma bölgesinde istikşaf yapılarak topoğrafyayı tam olarak yansıtacak karakteristik noktalar belirlenmiş olup daha sonra belirlenen bu alanlarda GPS ile nokta uygulaması hassas bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Böylece üç boyutlu konumu milimetre hassasiyetinde bilinen GPS ağı zemine tesis edilmiş ve söz konusu ölçme noktalarının üç boyutlu konumları tez süresi boyunca kampanya tipi ölçmelerle takip edilmiştir. Ayrıca çalışma alanını içeren paftalar üzerinden sayısallaştırma yapılarak arazinin sayısal yükseklik modeli elde edilmiş ve elde edilen yüzey deformasyonları coğrafi bilgi sisteminde modellenmiştir. GPS, arazide yapılan ölçmelerin sonuçlarını literatürde tanımlı yöntemler kullanarak hassas olarak belirlemeye dayalı bir konumlama sistemidir. Yapılan ölçmeler sonucunda GPS alıcısından üç boyutlu dik koordinatlar (X,Y,Z) veya jeodezik koordinatlar (enlem, boylam, yükseklik) WGS 84 koordinat sisteminde alınmaktadır. GPS/GNSS verisi Bernese v.5.0 (Hugentobler ve ark., 2005) bilimsel yazılımı kullanılarak değerlendirilmiştir.

Bu tez çalışmasında kullanılan Yapay Açıklıklı Radar görüntüleri Avrupa Uzay Ajansı'nın (ESA) Sentinel uydularından elde edilen ücretsiz uydu görüntüleridir. Ayrıca Avrupa Uzay Ajansı tarafından geliştirilen SNAP programı kullanılarak görüntü çiftleri interferometri tekniğine uygun olarak işlenmiş olup sonrasında interferogramlar oluşturulmuştur.

## BÖLÜM 2

### ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

#### 2.1. InSAR Tekniğinin Tarihsel Gelişimi

Radar ile ilgili çalışmalar 20. yüzyıl başlarında başlamıştır. Ancak yapılan deneyler pek dikkate alınmamıştır. Çünkü radar, o yıllarda teknolojiye yaşanan gelişmeler yeterli seviyede olmadığından dolayı sosyal yaşamda veya askeri amaçlı gereken değeri bulamamıştır. Fakat 1930'lu yıllara gelindiğinde radar ile ilgili ilk ciddi çalışmalar başlamıştır. 1950'li yıllar başladığında ise yapay açıklıklı radarlarla ilgili çalışmalar başlamıştır. Radar platformundan hedefe gönderilen sinyallerin geri dönmesiyle mesafe ölçümü gerçekleştirilmiştir. Daha sonra teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte dijital çağ başlamıştır ve radar platformu 1970'lerin sonlarına doğru uydulara yerleştirilmiştir. Bu sayede deniz yüzeyinde esen rüzgarların tespiti yapılmıştır. Ayrıca buzulların hareketleri, deniz üzerindeki yapılar radar yardımıyla görüntülenmeye başlamıştır. Böylece radar yardımıyla geniş alanların görüntülenmesi gerçekleşmiştir. 1980'li yılların sonuna gelindiğinde ise İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar (InSAR) tekniğinin yeryüzünde meydana gelen değişiklikleri belirlemeye katkısı Gabriel ve ark. (1989) tarafından yayınlanmıştır. Söz konusu çalışmada İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar (InSAR) tekniği, Seasat verilerinden yararlanılarak Kaliforniya'nın Imperial Vadi'sinde bir görüntüleme bölgesinde su emici toprağın genişlemesine atfedilen hareket etkilerinin görüntülenmesi amacıyla uygulanmıştır (Canaslan, 2010).

#### 2.1.1. Önceki Çalışmalar

İnterferometrik yapay açıklıklı radar teknolojisi geliştirildiği yıllardan beri birçok disiplin tarafından farklı alanlarda kullanılmış olup, çalışmaların geniş alanlarda hızlı bir şekilde yapılmasına olanak sağlamıştır. Bu bağlamda InSAR ile düşey yönlü yüzey deformasyonlarının belirlenmesi amacıyla jeotermal santrallerin etrafında meydana gelen değişimler araştırılmıştır. Bunlara örnek olarak; Wairakei-Tauhara jeotermal sahalarının hepsinde 1990'lı yıllarda jeotermal akışkan ve reenjeksiyon başlamıştır. Bu sayede 1950 yıllarından itibaren süre gelen çökme oranları yavaşlatılmıştır. Ancak yavaşlatılan zemin çökmeleri durdurulamamıştır ve İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar (InSAR) tekniği ile belirlenen zemin çökmeleri yılda 80 mm'ye kadar ulaşmıştır (Hole ve ark., 2006; Badur, 2011). 1992 yılına gelindiğinde Kaliforniya Landers depreminin yapay açıklıklı radar interferometresi teknolojisi kullanılarak haritalandırılması sonucu yöntemin jeodezik amaçlı

faydaları görülmüştür. 17 Ağustos 1999 İzmit Depremi sonrası oluşan deformasyonlar Rizos ve ark. (2015) tarafından InSAR yöntemiyle incelenmiştir.

### **2.1.2. Yapay Açıklıklı Radar Uydularının Genel Özellikleri**

Radar uydu sistemleri belirli bant aralıklarında elektromanyetik dalgaların iletimini sağlar. Dalga boyları sırasıyla X (2.5 cm-3.75 cm), C (3.75 cm-7.5 cm) ve L bant (15 cm-30 cm) aralığındadır. İlgili bant aralıklarında elektromanyetik dalgalar bulut veya yağmur gibi farklı atmosferik koşullardan çok az etkilenirler ve bu sayede uzun menziller için kullanılabilirler. Günümüzde pek çok interferometrik yapay açıklıklı radar uydusu mevcuttur ve nominal görev sürelerinin ardından yeni uydu misyonları ile desteklenmektedir. Söz konusu radar uydularının teknik özellikleri Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Yapay açıklıklı radar uydularının özellikleri

İsim (Kısaltma)	Fırlatma Tarihi	Dalgaboyu (mm)	Bant	Yörünge Periyodu (Gün)	Tarama Alanı Genişliği (km)	Yersel Çözünürlük (m)	Uydu Yüksekliği (km)
ERS-1	1991	56.7	C	35	100	25	790
ERS-2	1995	56.7	C	35	100	25	790
Envisat	2001	56.7	C	35	100-405	15-1000	800
Sentinel-1	2014	55.5	C	12	250	20	700
JERS-1	1992	235	L	44	70	20	568
ALOS-1	2006	235	L	46	20-350	7-100	691.65
ALOS-2	2014	240	L	14	350-490	100	628
Radarsat-1	1995	56	C	24	50-500	8-100	792
Radarsat-2	2007	56	C	24	18-500	1-100	798
Radarsat constellation	2018	55.5	C	12	500	5-100	592,7
TerraSAR-X	2007	31	X	11	4-270	0.24-40	514
TanDEM-X	2010	31	X	11	4-270	0.24-40	515
RISAT-1	2012	56	C	25	10-225	1-50	536
SAOCOM	2018	235	L	16	30-350	10-100	619.6
COSMO-Skymed	2007	31	X	16	40-200	1-100	620
PAZ	2018	31	X	11	5-100	1-16	514
KOMPSat-5	2013	32	X	28	5-100	1-20	550

ERS, elektromanyetik spektrumun mikrodalga bölgesinde faaliyet gösteren, topoğrafyanın ve okyanus yüzey süreçlerinin değişimlerinin devamlı izlenmesi amacıyla Avrupa Uzay Ajansı'nın (European Space Agency-ESA) yerküre gözlemindeki ilk programıdır. Bu programın ilk uydusu ERS-1'in lansmanı, 17 Temmuz 1991'de Fransız Guyanası Kourou'nun Ariane-4 aracında yapılmıştır. Uydu yüksekliği Çizelge 2.1'de görüldüğü gibi 790 km'dir. ERS-1 elektromanyetik spektrumun mikrodalga bölgesinde gelişmiş tekniklerle görevine başlamıştır ve bu sayede her türlü atmosferik koşulda görüntü sağlamaktadır. Belirli periyotlarla sürekli olarak yerküre gözlemlerini yürütmüştür. Tekrar döngüsü 35 gündür ve bu döngüde yapay açıklıklı radar ile yerkürenin tamamının görüntülenmesini taahhüt etmiştir. ERS-1 görevde olduğu süre zarfında yerküre gözlemleri sonucu birçok görüntü sağlamıştır. 1994 yılına gelindiğinde yaklaşık 800.000 yapay açıklıklı radar görüntüsü elde etmiştir. ERS-1 ile elde edilen görüntüler sonucunda C bant yapay açıklıklı radar sisteminin uygulanabilirliği görülmüş ve birçok uygulama için öncü olmuştur. 10 Mart 2000'de gerçekleşen yerleşik kontrol sistemi arızası sebebiyle ERS-1 görevi sona ermiştir.

ERS-2'nin lansmanı ise 21 Nisan 1995'te Ariane-4 aracında Kourou'da gerçekleştirilmiştir. ERS-2, 2000'li yıllarda meydana gelen jiroskop sistem hatalarına rağmen hedeflenen 3 yıllık nominal ömrünün çok ötesinde bir performans sergilemiştir. ESA ve endüstride çalışan bir grup mühendis tarafından çalışılan sıfır jiroskop modu geliştirilmiştir. Bu uçuş içi ayarlamalar sayesinde nominal görev süresinin çok ötesinde çalışması sağlanmıştır. ERS-2, 21 Nisan 2005 yılına gelindiğinde yörüngesinde 10 yıllık görevi geride bırakmıştır ve büyük bir mühendislik başarısı elde etmiştir. ERS-2, 3 yıllık nominal görev süresinden yaklaşık 13 yıl sonra 5 Eylül 2011'de misyonunu tamamlamıştır.

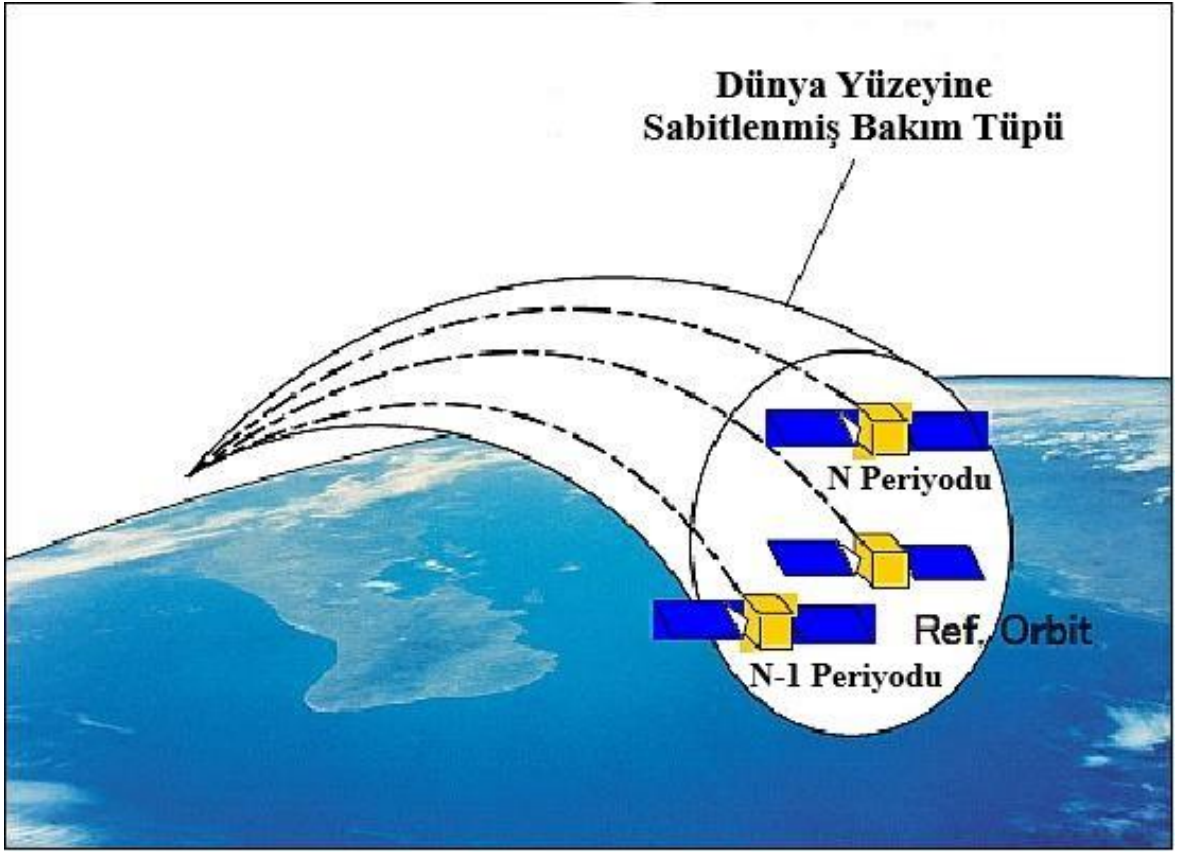
EnviSat, Avrupa Uzay Ajansı'nın (ESA) ilgili tarihe kadar yapılmış en büyük yerküre gözlem uydusudur. Fransız Guyanası'nda ki Avrupa uzay gemisinde Ariane-5 roketi üzerinde 1 Mart 2002'de lansmanı yapılmıştır. Görevi yerkürenin çevresini ve yerküre kaynaklarını gözlemlemektir. Bu sayede yeryüzü kaynaklarının yönetiminin sağlanması hedeflenmektedir. ERS-1 ve ERS-2'nin devamı niteliğindedir. EnviSat planlanan görev süresinin yaklaşık iki katı kadar yörüngede kalmıştır ve başlangıcından yaklaşık on yıl sonra 9 Mayıs 2012'de uydu ile irtibat aniden kesilmiştir ve misyon sona ermiştir.

Sentinel-1, Fransız Guyanası'nda Kourou'dan 3 Nisan 2014'te fırlatılan Sentinel-1A ve 25 Nisan 2016'da fırlatılan Sentinel-1B takımı yıldızından oluşur. Uydu, güneş eşzamanlı yörüngeye sahiptir ve 12 günlük periyotlar halinde döngüsünü tamamlamaktadır. Orman, su, toprak ve tarım arazilerinin kara izlemesi, doğal afetler durumunda acil haritalama desteği,

deniz ulaştırma bölgelerinin gözetimi, deniz buz gözlemleri ve buzdağı izleme, yüksek çözünürlüklü buz haritaları üretimi, denizde buz koşullarını tahmin etme, petrol sızıntılarının haritalanması, gemi tespiti, iklim değişikliği izleme Sentinel-1'in görevleri arasındadır. İnterferometrik geniş alan modunda şerit genişliği 250 km'dir. 5m x 20m uzaysal çözünürlüğe sahiptir. Sentinel 1A ve Sentinel 1-B takımıyıldızının tasarım ömrü 7 yıl olup günümüzde halen verimli bir şekilde görevine devam etmektedir.

JERS-1 uydusu FUYO-1 takma adıyla 11 Şubat 1992'de Tanegashima Uzay Merkezi'nde Japonya Ulusal Uzay Geliştirme Ajansı (NASDA) tarafından H-I fırlatma aracından fırlatılmıştır. Uydu genel hedefleri arasında entegre yüzey gözleme sisteminin oluşturulması, kaynakların araştırılması için SAR ve OPS (optik sensör) sensörleriyle küresel veri setlerinin oluşturulması, enstrüman ve sistem performanslarının doğrulanması gösterilebilir. Arazi kullanımının gözlemlenmesi, kıyıların gözlemlenmesi, jeolojik olayların araştırılması, çevre ve afet izlemeleri JERS-1 misyonları olarak sayılabilir. JERS-1 Güneş eşzamanlı yörüngeye sahiptir ve 44 günlük periyotlar halinde döngüsünü tamamlamaktadır. Yörünge yüksekliği 568 km olup, 70 km tarama alanı genişliğine ve 18m x 18m mekansal çözünürlüğe sahiptir. Nominal görev süresi 2 yıl olarak tasarlanmıştır. Buna rağmen 6 yıl gibi bir süre misyonunu devam ettirdikten sonra 12 Ekim 1998'de görevi sona ermiştir.

ALOS-2, Japonya'daki Tanegashima Uzay Merkezi'nden 24 Mayıs 2014 tarihinde fırlatılmıştır. Uydunun genel amaçları arasında haritacılık, afet izleme, bölgesel gözlem ve çevre izlemesi için veri sürekliliğini sağlamak sayılabilir. Uydu periyot süresi 14 gün olup, güneş eş zamanlı bir yörüngeye sahiptir. Daha yüksek interferometre tutarlılığı elde etmek için, otonom doğru yörünge manevrası (500 m orbital tüp içinde) ve L-bandı SAR sinyaline karşı dayanıklılığı olan zenginleştirilmiş GPS alıcısı geliştirilmiştir. Tekrar geçişli SAR interferometresinden kaynaklanan geometrik kısıtlamayı gidermek için yörünge kontrol koşulu, Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Referans Dünya-sabit uçuş yolu yörüngesinin tekrar döngüsü için tanımlanmıştır. ALOS-2 uydusu, tüp şeklindeki bir koridorda uçmalıdır ve bunun merkezi referans uçuş yoludur. Tüp şeklindeki koridorun yarıçapı, 500 m, bir yörünge hatasının toleransıdır. Ayrıntılı bir pertürbasyon modeline dayanan yörünge tahmini, referans uçuş yolunu oluşturmak için tanıtılmıştır. Bunu yörünge korunmasında referans olarak kullanarak, gereksiz yörünge manevralarından kaçınılabilir.



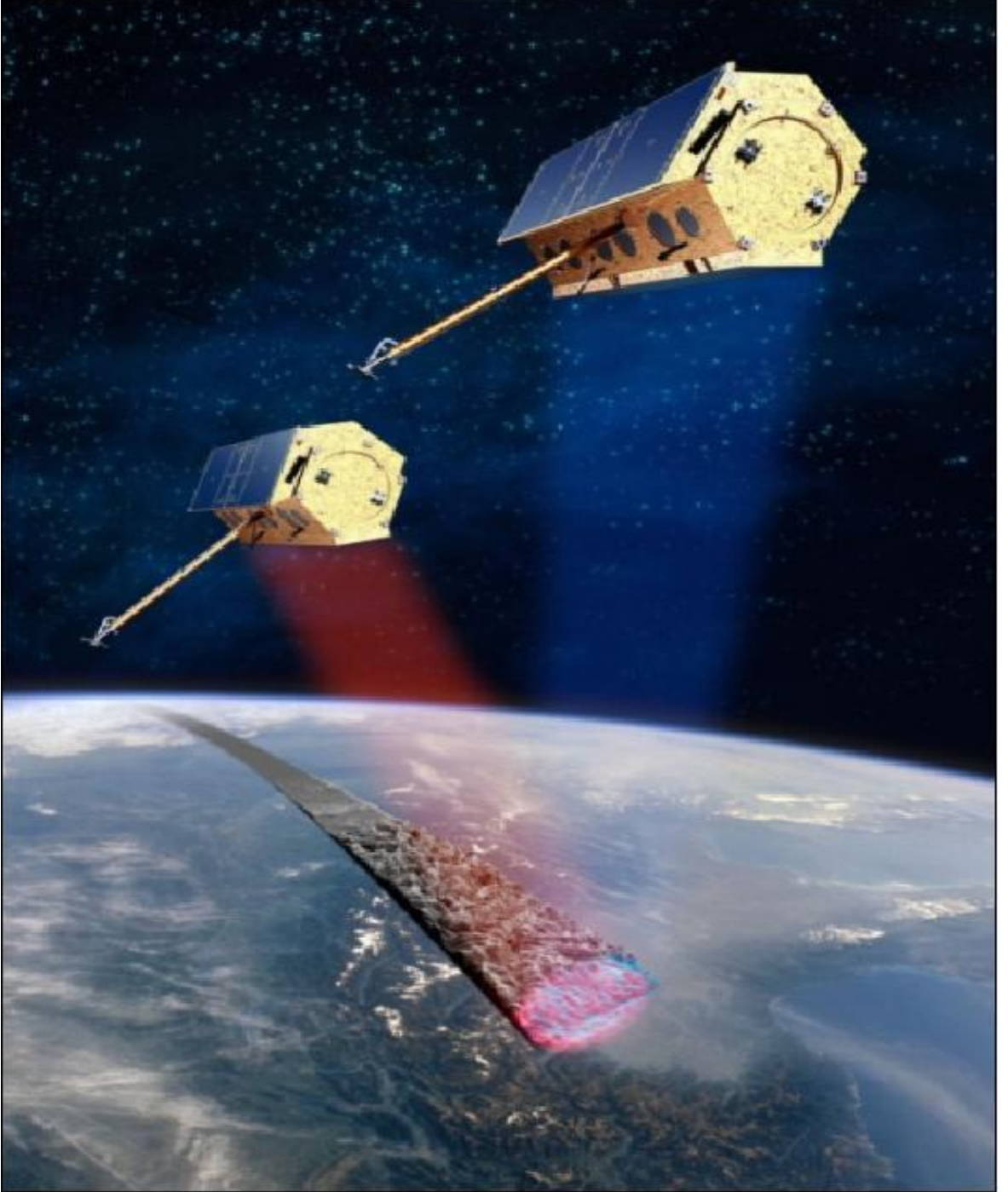
Şekil 2.1. Referans yörüngeye göre tekrarlayan hatanın şematik görünümü

ALOS-2'nin nominal görev süresi 5 yıl olarak tasarlanmıştır ve günümüzde misyonunu halen devam ettirmektedir.

RADARSAT Takımyıldızı Misyonu (RADARSAT Constellation Mission), RADARSAT-2'nin tamamlayıcı görevi olacak şekilde 29 Ekim 2018 ile 30 Kasım 2018 tarihleri arasında SpaceX'in Falcon 9 aracında lansmanı planlanmaktadır. Uydu misyonları arasında deniz gözlemleri, afet izleme, ekosistem gözlemleri, buzulların izlenmesi, petrol kirliliğinin izlenmesi sayılabilir.

TanDEM-X, 21 Haziran 2010 tarihinde Kazakistan Baikonur uzay üssünde Dnepr-1 fırlatma aracından fırlatılmıştır. Uydunun genel amacı TerraSAR-X ile birlikte global, yüksek çözünürlüklü sayısal yükseklik modeli üretimi için veri toplamaktır. TanDEM-X ve TerraSAR-X uyduları birbiri ile uyumlu olarak çalışmaktadır. İki uydu 300m - 500m geçiş izi mesafesi ile tek geçişli yapay açıklıklı radar interferometresi konfigürasyonu sağlar. Kısacası TanDEM-X misyon kavramı, uzayda bistatik interferometrik uydu oluşumunun ilk görüntülenişi ve yanı sıra operasyonel modda ilk yakın oluşum uçuşu da dahil olmak üzere çeşitli yollarla teknolojilerin kullanımını kapsamaktadır. Örneğin iki uydu ile dijital hüzmeye şekillendirme (Digital Beamforming), tek geçişli polarimetrik SAR interferometresi ve aynı

zamanda değişen referans hattına sahip tek geçişli interferometri gibi birkaç yeni SAR tekniği de ilk defa gösterilecektir. TanDEM-X, Dünya'daki tüm kara yüzeyini kapsayacak şekilde sayısal yükseklik modeli üretiminin yanı sıra hidrolojik bilgi toplanmasında, buzulların izlenmesinde kullanılabilir. TanDEM-X sayısal yükseklik modeli, 90 m çözünürlüğe kadar bilimsel kullanım için ücretsizdir. TanDEM-X günümüzde halen görevine devam etmektedir.



Şekil 2.2. TanDEM-X konfigürasyonu ile sanatçının bistatik gözlemine dair görüşü

PAZ, 22 Şubat 2018'de SpaceX Falcon-9 fırlatma aracından fırlatılan, X bantlı İspanyol gözlem uydusudur. Güneş eş zamanlı yörüngeye sahip olup nominal döngü süresi 11 gündür. PAZ uydusunun, TerraSAR-X ve TanDEM-X uyduları ile birlikte, 500 m aynı yörünge tüpü içerisinde takımyıldızı olarak görevlendirilmesi üstünde çalışılmaktadır. Bu sayede veri edinme kapasitesinin artırılması, döngü sürelerinin azaltılması hedeflenmektedir. Ayrıca takımyıldızı faal hale geçtiğinde veri yığınları artacağından interferometrik yüzey deformasyonu izlemesine hassasiyet açısından katkısı da artacaktır. PAZ, lansmandan sonra görüntü toplamaya başlamasına rağmen devreye alma süreci halen devam etmektedir. Takımyıldızı, bu süreç bittiğinde başlayacaktır.

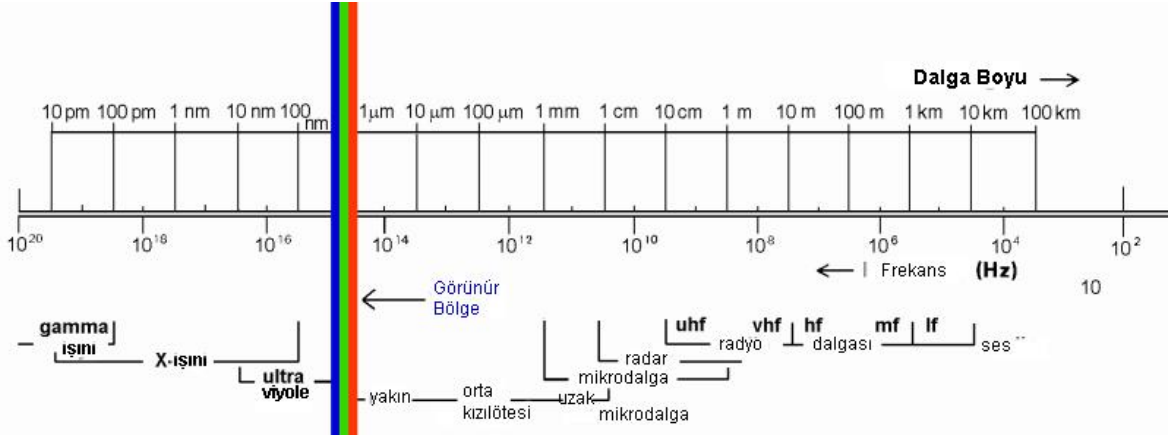
## 2.2. Radar Temelleri

RADAR (Radio Detecting And Ranging), atmosferik koşullardan etkilenmeden, gece ve gündüz yüksek frekanslı (UHF) radyo bantlarında veya mikrodalga dalga boylarında, nesnelerin yükseklik bilgisini, konumunu veya hareketini tespit etmek için kullanılır. Radar sinyalleri magnetron adı verilen bir ekipman tarafından üretilir. Sinyaller hedefe ulaşır yansıdıktan sonra geri döner ve radar platformunda kayıt ünitesine kaydedilir. Sinyalin gidiş-geliş süresi ve ışığın ortamda yayılma hızı bilindiğinden radar ile hedef arasındaki mesafe tayini yapılır. Radar dalgaları ışık dalgalarına benzemektedir ve aynı hızda hareket etmektedirler. Buradan hareketle c ışık hızı,  $\lambda t$  radar ile hedef arasındaki sinyalin gidiş-geliş süresi olmak üzere radar ile hedef arasındaki eğik mesafe (slant range),

$$R = \frac{c \cdot \lambda t}{2} \quad (2.1)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Hem radar hem de ışık dalgaları elektromanyetik spektrumun bir parçasıdır. Radarlar aktif enerji sistemleridir. Yani kendi enerjilerini kendileri üretirler ve bu sayede gece-gündüz herhangi bir enerji kaynağına ihtiyaç duymaksızın, her türlü meteorolojik koşullarda çalışabilirler.



Şekil 2.3. Elektromanyetik spektrum

Radar sistemleri:

- Karalar üzerinde meydana gelen değişimleri,
- Sulara nüfuz etmemesine rağmen deniz yüzeyinde oluşan dalga, girdap gibi olayları,
- Topoğrafyanın uygun olduğu koşullarda yeraltında meydana gelen değişimleri

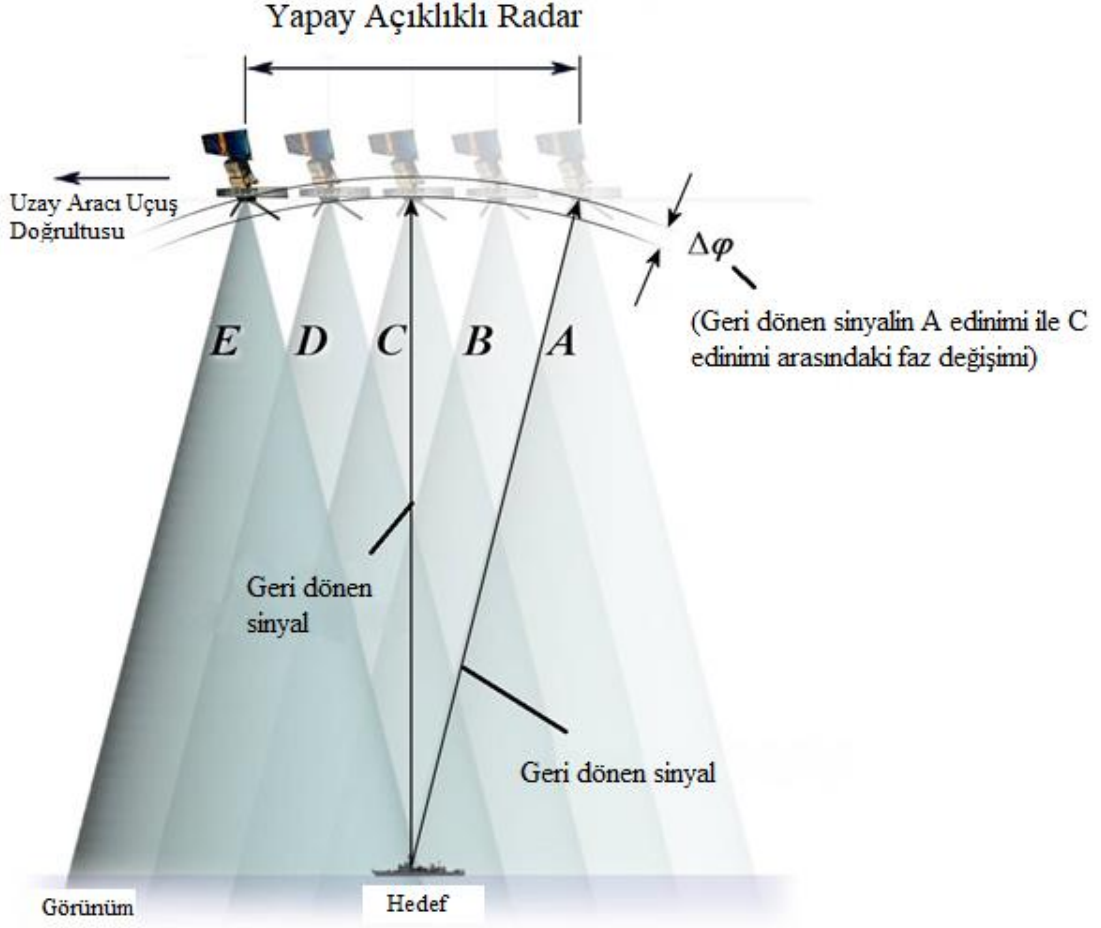
yağmur, sis vb. hava şartlarından etkilenmeden görüntüleyebilmektedir. Bunun yanı sıra radar sinyallerini bozucu etmenler olarak yeryüzünün yapısı pürüzlü ise sinyalde saçılmalara neden olabilir. Ayrıca toprağın nemli olması da radar sistemlerini olumsuz olarak etkilemektedir (Canaslan, 2010).

### 2.3. Yapay Açıklıklı Radar (SAR)

Günümüzde yüksek çözünürlüklü radar görüntüsü toplamak amacıyla radar sisteminin en gelişmiş yöntemi olan Yapay Açıklıklı Radar (SAR) yöntemi kullanılmaktadır. Bu bölümden sonra adını daha sık tekrarlayacağımız SAR, Yapay Açıklıklı Radar'ın İngilizce yazılışı olan Synthetic Aperture Radar teriminin baş harflerinden oluşan bir kısaltmadır.

Yapay Açıklıklı Radar'ın adından da anlaşılacağı üzere geleneksel radar sistemlerinden en büyük farkı sentetik açıklık oluşturarak yüksek çözünürlüğe katkı sunmasıdır. Geleneksel radar sistemlerinin yeryüzünün yüksek çözünürlüklü görüntüsünü elde etmek için ihtiyaç duyduğu anten uzunluğu, uzay araçlarının kaldırabileceği büyüklükten çok daha fazladır. Bu nedenle Yapay Açıklıklı Radar (SAR) yöntemi ile daha küçük anten uzunlukları kullanılarak istenilen yüksek çözünürlük elde edilir.

Yapay Açıklıklı Radar, sahip olduğu antenin istenilen açıklık boyunca yönlendirilmesiyle belirli zaman aralıklarında ölçümler alır ve bu verileri birleştirerek yapay açıklık oluşturur.



Şekil 2.4. Yapay açıklıklı radar tekniği

Yapay Açıklıklı Radar, Şekil 2.4'te görüldüğü gibi radar platformunun uçuş doğrultusunda (azimut) yansıyan sinyalleri sürekli kaydederek sentetik açıklık oluşturur. Ancak yatayda konumsal ölçümün gerçekleştirilmesi gerekliliği azimut çözünürlüğünü kısıtlamaktadır.



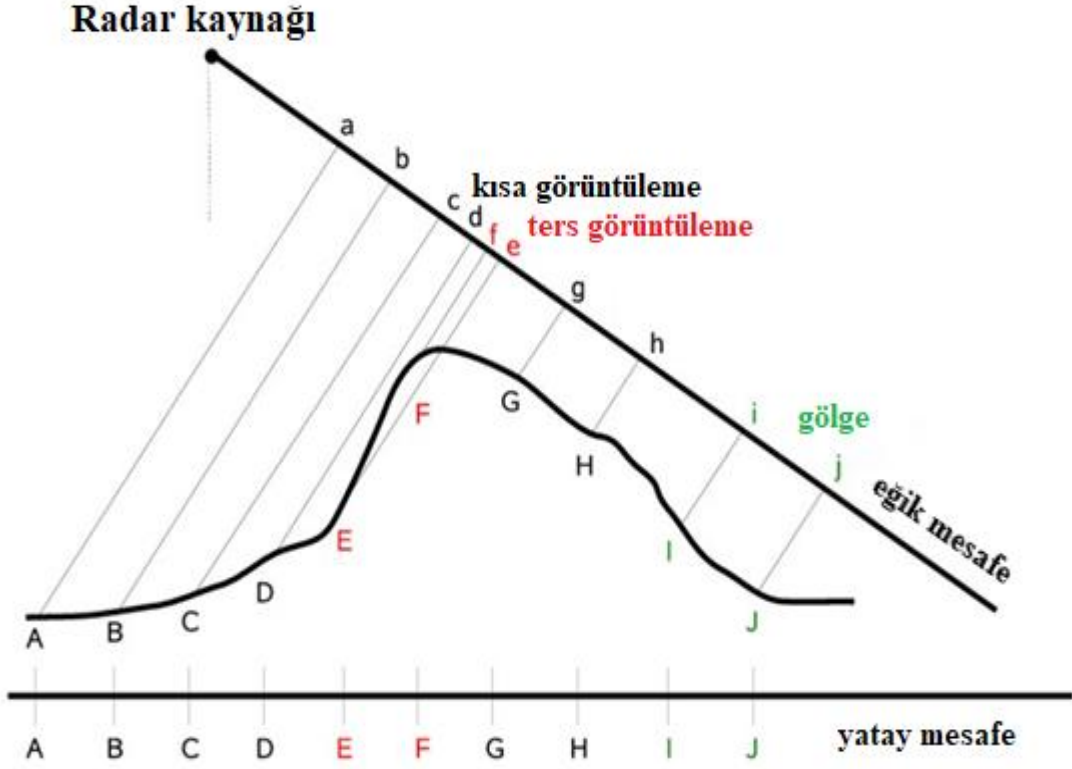
Şekil 2.5. a) Gerçek açıklıklı radar ve b) yapay açıklıklı radar tekniği arasındaki çözünürlük farkı (Massonnet ve Feigl, 1998)

Şekil 2.5'te üst tarafta bulunan görüntü 5km\*14km'lik bir çözünürlükle elde edilmiştir. Alttaki görüntü ise Yapay Açıklıklı Radar tekniği ile 4m\*20m çözünürlüğünü sağlamaktadır. Şekil 2.5'te görüleceği üzere Gerçek Açıklıklı Radar tekniği ile elde edilen görüntüde detaylar birbirinden zor ayırt edilebilmektedir. SAR tekniğinde ise deniz, rüzgar ve karalar rahatlıkla görülebilmektedir.

Yapay Açıklıklı Radar'ın çalışma prensibi bölüm 2.2'de belirtildiği gibi radar kaynağından çıkan sinyallerin hedefe gönderilmesi ve hedeften yansıyan sinyallerin kaydedilmesi şeklindedir. Ancak gönderilen sinyalin tekrar geri yansımaları durumuna kadar radar platformu hareket ettiğinden, yansıyan sinyaller Doppler etkisi altındadır. Söz konusu Doppler etkisi, radar sinyallerinin dalga boyu ve frekansının yaklaşan veya uzaklaşan hareketli bir platform tarafından farklı algılanmasıdır. Doppler etkisine örnek olarak, bize yaklaşan bir arabanın ses dalga boyu azaldığından dolayı sesinin tiz olarak algılanması ve bizden uzaklaşırken ses dalga boyu arttığı için sesin kalın olarak duyulması gösterilebilir.

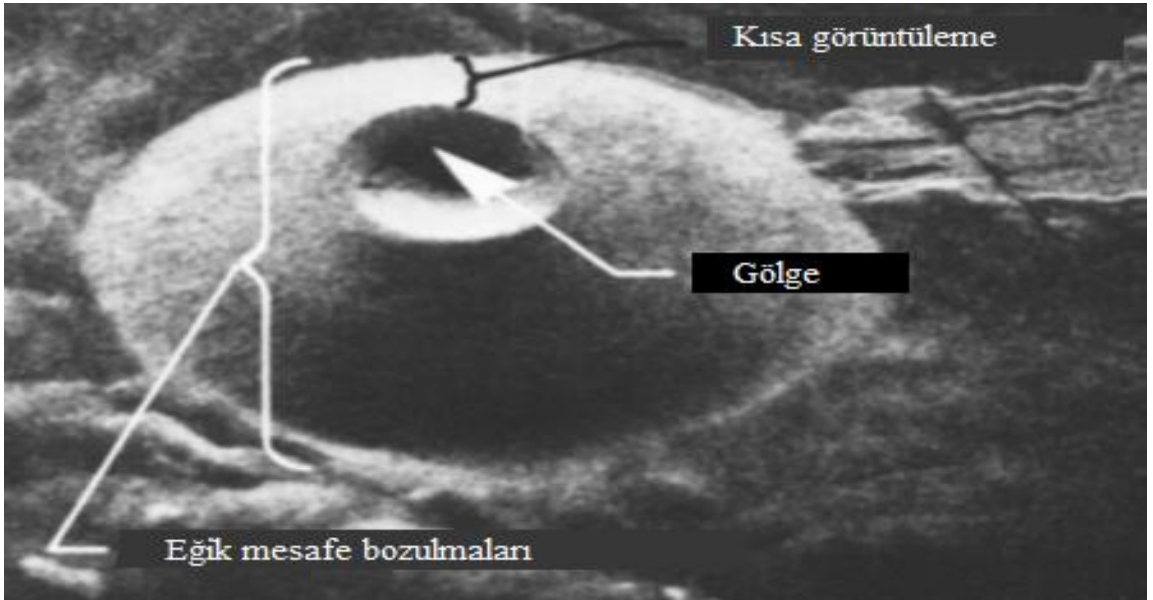
Diğer ölçme ve görüntüleme tekniklerinde olduğu gibi Yapay Açıklıklı Radar yönteminde de hata kaynakları mevcuttur. SAR sistemindeki söz konusu bozulma unsurları ise kısa görüntüleme, ters görüntüleme ve gölge olarak sıralanabilir.

- Kısa görüntüleme, arazinin dağlık olduğu alanlarda daha net görülmesi mümkün bir bozulmadır. SAR eğik mesafeyi ölçmektedir. Örneğin bir dağ üzerindeki noktaların iz düşümleri eşit yatay mesafelere sahip olsun. Dağın başlangıcından itibaren göreceli daha az eğimle yükselen A ve B noktalarının eğik mesafesi a-b olsun. Eğimin biraz daha arttığı C ve D noktalarının eğik mesafesi ise c-d olsun. Yüksekte olan noktalar radar sensörüne daha yakın olduğu için c-d eğik mesafesi a-b eğik mesafesinden daha kısa görüntülenecektir. Bu duruma kısa görüntüleme (foreshortening) bozulması denir (Şekil 2.6).
- Ters görüntüleme ise dağın taban noktalarından E noktasının, dağın tepeye yakın olan F noktasına göre daha erken görüntülenmesi olayıdır. Bu durum, dağın yüksekte olan F noktasına radar sensörü tarafından gönderilen sinyalin erken ulaşması yansıyan sinyalin radara erken dönmesinden kaynaklanır. Böylece E noktasına göre daha ilerde olan F noktası ters olarak daha önce görüntülenir (Şekil 2.6).



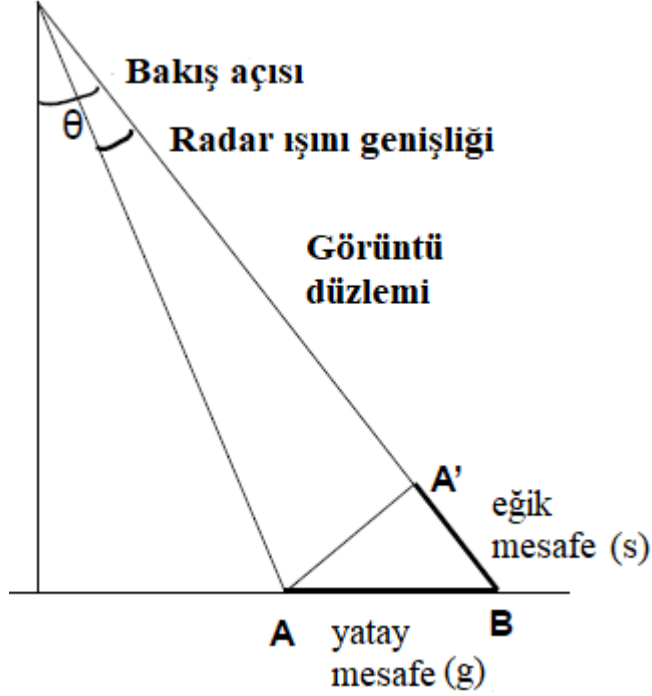
Şekil 2.6. Yapay açıklıklı radarda geometrik bozulmalar (Trouvé ve ark., 2010)

- Gölge bozulması, örneğin dağlık bölgelerde yamacın arka tarafında bulunan ve eğim sebebiyle radar sinyallerinin görüntüleyemediği alanlarda oluşur. Gölge bozucu etkisi altında olan alanlar görüntüde karanlık olarak görünürler (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Kısa görüntüleme ve gölge bozulmaları (Palma, 2011)

Yapay Açıklıklı Radar yönteminde hedef ile radar arasındaki eğik mesafe (slant range) ölçülür. Elde edilen bu mesafe yatay mesafeye (ground range) dönüştürülür. Eğik mesafe ile yatay mesafe arasındaki geometrik bağıntı Şekil 2.8'den hareketle formül (2.2)'de gösterilmiştir.



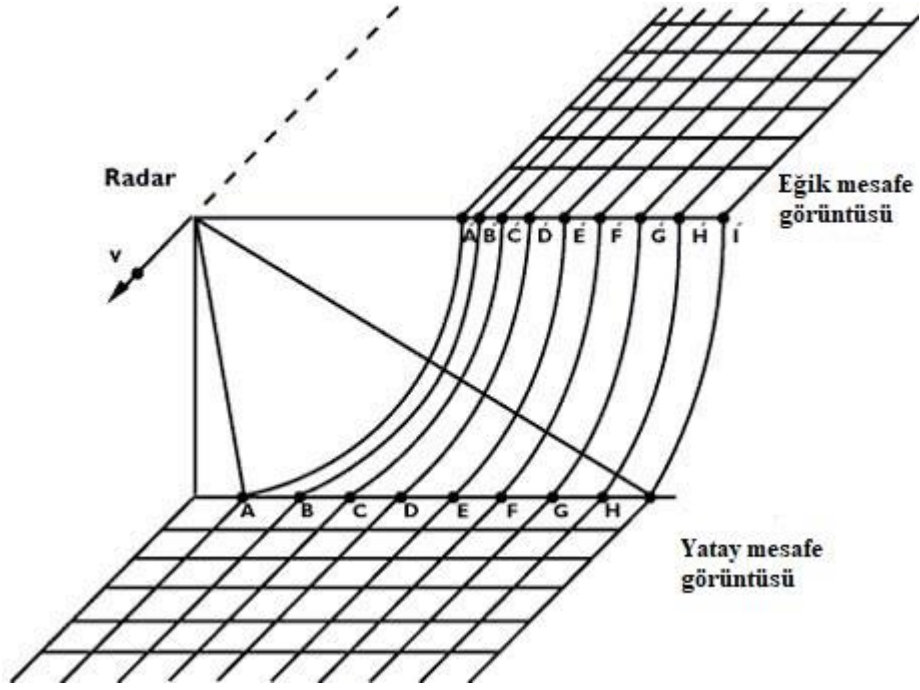
Şekil 2.8. Eğik mesafe ve yatay mesafe (Palma, 2011)

Radarın bakış açısı  $\theta$ , eğik mesafe s ve yatay mesafe g olmak üzere;

$$g = s / \sin (\theta) \quad (2.2)$$

eşitliği geçerlidir.

Yapay Açıklıklı Radar'da eğik mesafe görüntüsü ve yatay mesafe görüntüsü Şekil 2.9'da gösterilmiştir. Eğik mesafeler SAR tekniğinin doğal sonucu olarak elde edilir. Her bir hedef noktanın eğik mesafesinin yatay mesafeye veri düzeltmeleri yapılarak dönüştürülmesi gerekir.



Şekil 2.9. Eğik mesafe ve yatay mesafe görüntüleri

Cenevre'nin (İsviçre) bir Seasat görüntüsünü kullanarak SAR verilerinin bir örneği Şekil 2.10'da gösterilmektedir. Sol tarafta yer alan görüntü eğik mesafe görüntüsü ve sağ tarafta yer alan görüntü yatay mesafe görüntüsüdür.



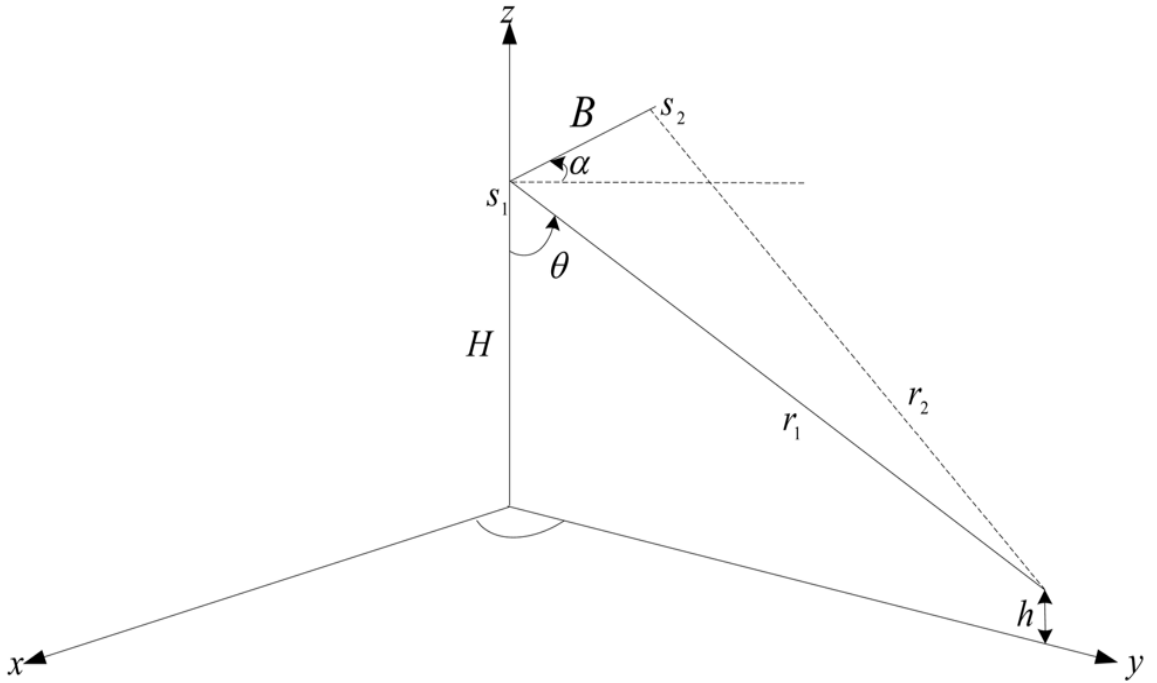
Şekil 2.10. a) Eğik mesafe görüntüsü ve b) yatay mesafe görüntüsü

Bir radar görüntüsünde bulunan geometrik çarpıklıklar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Mesafe çarpıklıkları: Radar eğik mesafeyi ölçer ancak bir görüntünün yüzeyi doğru bir şekilde temsil etmesi için yatay mesafe düzeltilmiş olmalıdır.
- Yükseklik çarpıklıkları: Bu durum, noktaların ortalama arazi yüksekliğinden farklı bir yüksekliğe sahip olduğu durumlarda oluşur.

#### 2.4. İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar (InSAR)

İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar tekniği, aynı bölgeye ait iki Yapay Açıklıklı Radar (SAR) görüntüsünün faz farklarının yorumlanması olarak tanımlanabilir. Radar platformuna yerleştirilmiş sensörler yardımıyla objelerin yükseklik bilgisini, yeryüzündeki değişimleri hassas bir şekilde görüntüleme olanağı sunmaktadır. InSAR, hedefe ait faz ve genlik değerlerini kaydeder. Bu değerler yardımıyla hedefe ait yükseklik bilgisi elde edilir.



Şekil 2.11. İnterferometrik yapay açıklıklı radar geometrisi (Zou ve ark., 2009)

İnterferometri tekniğinin uygulanabilmesi için aynı bölgeye ait iki farklı Yapay Açıklıklı Radar (SAR) görüntüsünün piksel piksele işlenmesi gerekmektedir. İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar (InSAR) tekniğinin geometrisi Şekil 2.11'de gösterilmiştir.

$S_1$  ve  $S_2$  radar antenleri  $B$  ile tanımlanan bir baz mesafesine (baseline) sahiptir ve rotalarındaki hareketleri Şekil 2.11’de gösterilmiştir. Radar antenlerinin yeryüzündeki aynı objeye olan eğik mesafeleri (slant range)  $S_1$  anteninden  $r_1$  ve  $S_2$  anteninden ise  $r_2$  olarak ifade edilmiştir. Bakış açısı  $\theta$  ve uçuş yüksekliği  $H$ ’dir.  $h$  ise hedef noktanın topoğrafik yüksekliğidir.  $\alpha$ , antenler arası uzaklığın (baseline) yatayla yaptığı açıdır.  $\lambda$ , radar sinyalinin dalga boyu ve  $\varphi_{\text{çözümleme}}$  çözülmüş interferometrik fazdır. Buna göre nokta yüksekliği:

$$\sin(\theta - \alpha) = \frac{r_1^2 - r_2^2 + B^2}{2r_1B} \approx \frac{-\lambda\varphi_{\text{çözümleme}}}{2\pi B} \quad (2.3)$$

$$\theta = \alpha - \arcsin \left[ \frac{\lambda\varphi_{\text{çözümleme}}}{4\pi B} \right] \quad (2.4)$$

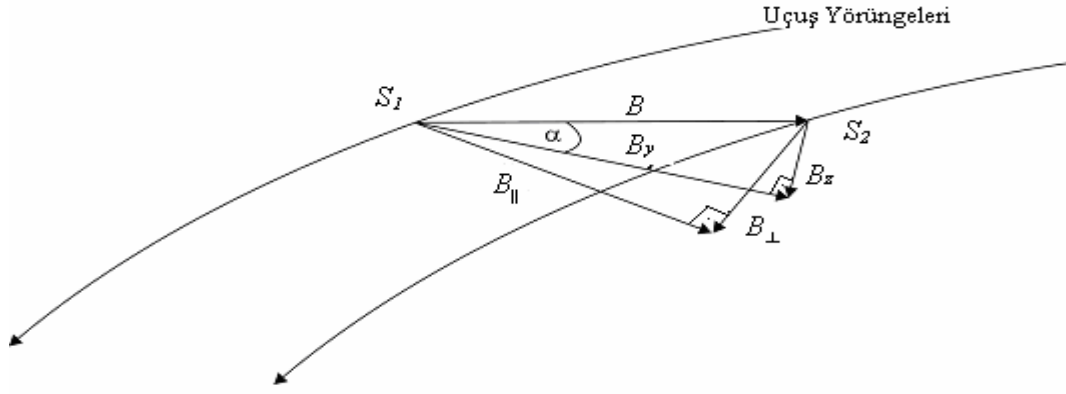
$$h = H - r_1 \cos\theta \quad (2.5)$$

bağıntıları yardımı ile hesaplanır (Zou ve ark., 2009).

Yapay Açıklıklı Radar (SAR) tekniği ile alınan verilerde faz bileşeni de bulunmaktadır. Yeryüzündeki aynı ölçme noktasından radar antenlerine gelen iki radar sinyali arasındaki faz farkı ise şöyle hesaplanabilir:

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda}(r_2 - r_1) = \frac{4\pi}{\lambda}(B_y \sin\theta - B_z \cos\theta) \quad (2.6)$$

Burada  $\lambda$  dalga boyu, menziller  $r_1$  ve  $r_2$ , baz uzaklığı (baseline) bileşenleri  $B_y$  ve  $B_z$ , bakış açısı  $\theta$  olarak tanımlanabilir. İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar (InSAR) tekniğinde önemli parametrelerden bir tanesi de radar antenleri arasındaki mesafe (baseline) değeridir. Şekil 2.12’de söz konusu baz mesafesi ve bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 2.12.  $S_1$  ve  $S_2$  radar antenleri arasındaki baz ( $B$ ) vektörü. Baz vektörü  $S_1$  'de oluşturulan yerel koordinat sistemi eksenlerine göre  $B_y$  ve  $B_z$  bileşenlerine ayrılabilceği gibi bakış doğrultularına göre ( $B_{\parallel}$ ) ve ( $B_{\perp}$ ) biçiminde de gösterilebilir (Gens, 1998)

İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar (InSAR) tekniğinin uygulanabilmesi için kullanılacak radar görüntülerinin elde edildiği radar platformlarının antenleri arasındaki baz mesafesi değeri önemli bir parametredir. Örnek olarak bir çalışma alanının radar görüntüleri kullanılarak sayısal yükseklik modeli oluşturulmak istenirse radar antenleri arasındaki baz mesafesi 150-300 metre arasında olmalıdır. Yeryüzündeki yüzey değişimlerinin araştırılması istenirse radar antenleri arasındaki baz mesafesi 30-70 metre, genel olarak interferometri tekniğinin uygulanabilmesi için gerekli radar antenleri arasındaki baz mesafesi ise 600 metreyi aşmamalıdır (Solaas, 1994). Baz mesafesi değeri arttıkça faz gürültüsü uyumsuzluğa neden olacaktır ve benzeşim (coherence) düşecektir. Söz konusu baz mesafesi değeri sınır değeri olan 600 metreye kadar ulaşırsa görüntüler arasındaki benzeşim tamamen kaybolacaktır. Radar antenleri arasındaki baz mesafesi (baseline) değeri  $B_c$  şu şekilde hesaplanabilir:

$$B_c = \frac{\lambda r}{2R_y \cos^2 \theta} \quad (2.7)$$

eşitliğinden bulunabilir (Akoğlu, 2001).

Bağıntıda  $\lambda$  dalga boyunu,  $r$  menzili,  $R_y$  menzildeki çözünürlüğü ve  $\theta$  ise bakış açısını temsil etmektedir. Radar verileri kullanılarak oluşturulan topoğrafik haritaların duyarlılığı için radar antenleri arasındaki baz mesafesi (baseline) değeri olası hata unsurlarından bir tanesidir ve hassas olarak bilinmesi gerekmektedir (Zebker ve ark., 1997; Akoğlu, 2001).

## BÖLÜM 3

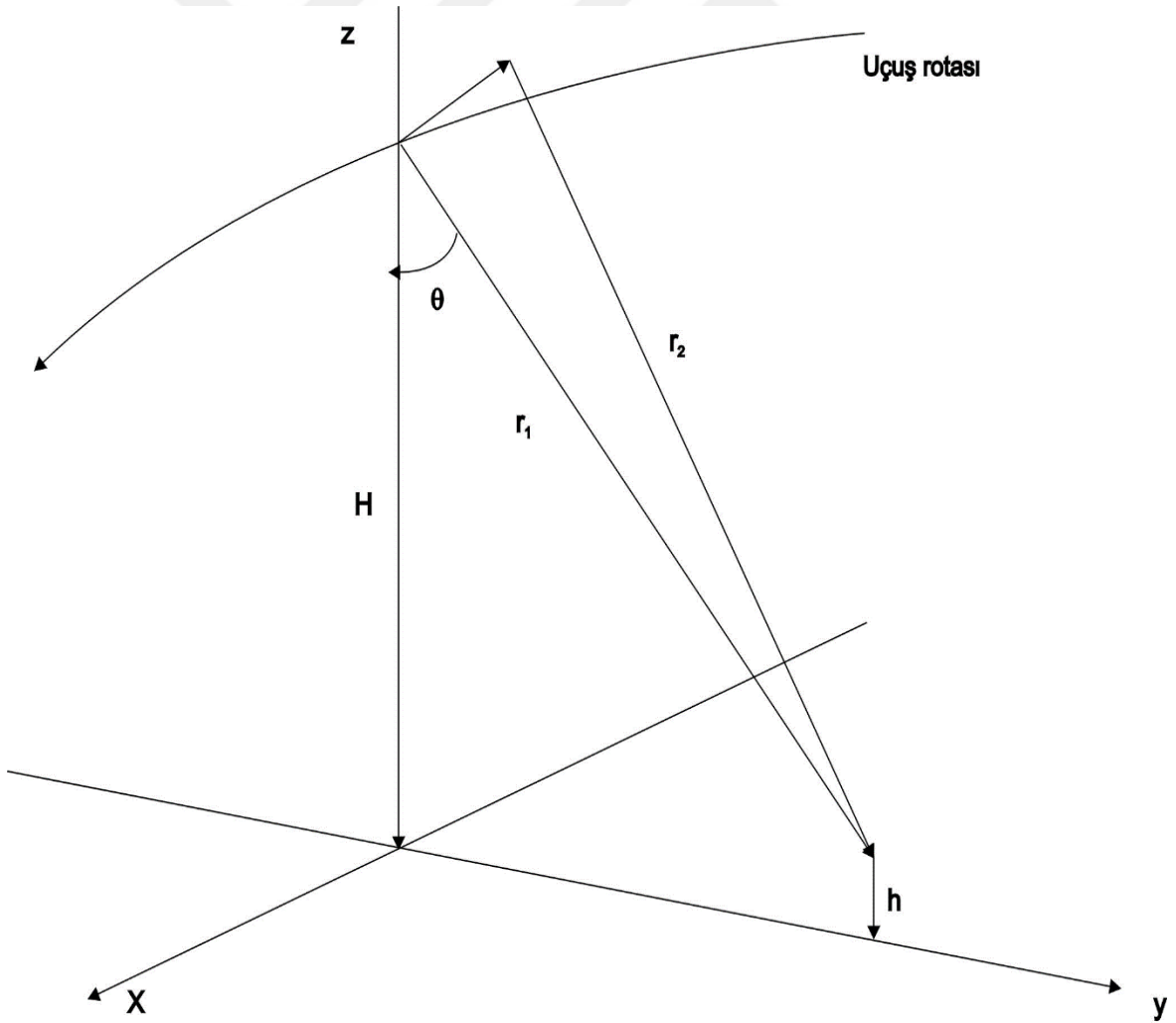
### MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar Teknikleri

İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar (InSAR) verileri üç farklı yoldan elde edilebilir. Bu yöntemler hareket doğrultusuna dik (across-track), hareket doğrultusunda (along-track) ve tekrar geçiş (repeat pass) olarak sıralanabilir (Gens, 1998).

##### 3.1.1. Hareket Doğrultusuna Dik İnterferometri (Across-Track Interferometry-XTI) Tekniği

Uydu platformuna yerleştirilmiş iki adet Yapay Açıklıklı Radar (SAR) anteni aracılığıyla eş zamanlı olarak farklı konumlardan veri elde edilen bir tekniktir. Söz konusu iki anten arası mesafe sabittir. Antenler uçuş doğrultusuna dik olarak konumlandırılmıştır.



Şekil 3.1. Hareket doğrultusuna dik interferometri geometrisi (Gens, 1998)

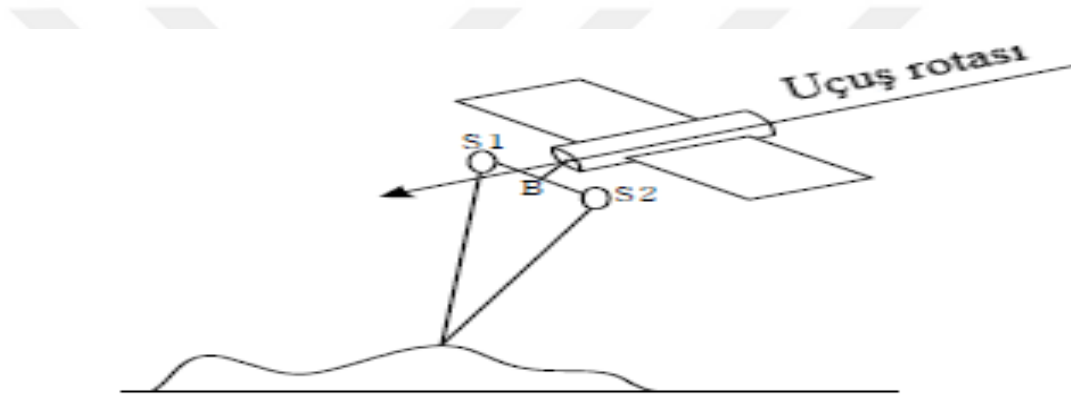
Formül (2.5)'ten hareketle ve Şekil 3.1'de görüldüğü üzere hedef noktanın yüksekliği;

$$h = H - r_1 \cos\theta \quad (3.1)$$

eşitliği ile hesaplanır.  $\theta$  bakış açısı olmak üzere hedefin uçuş doğrultusuna dik yatay mesafesi ise ;

$$y = r_1 \sin\theta \quad (3.2)$$

formülü ile hesaplanır.

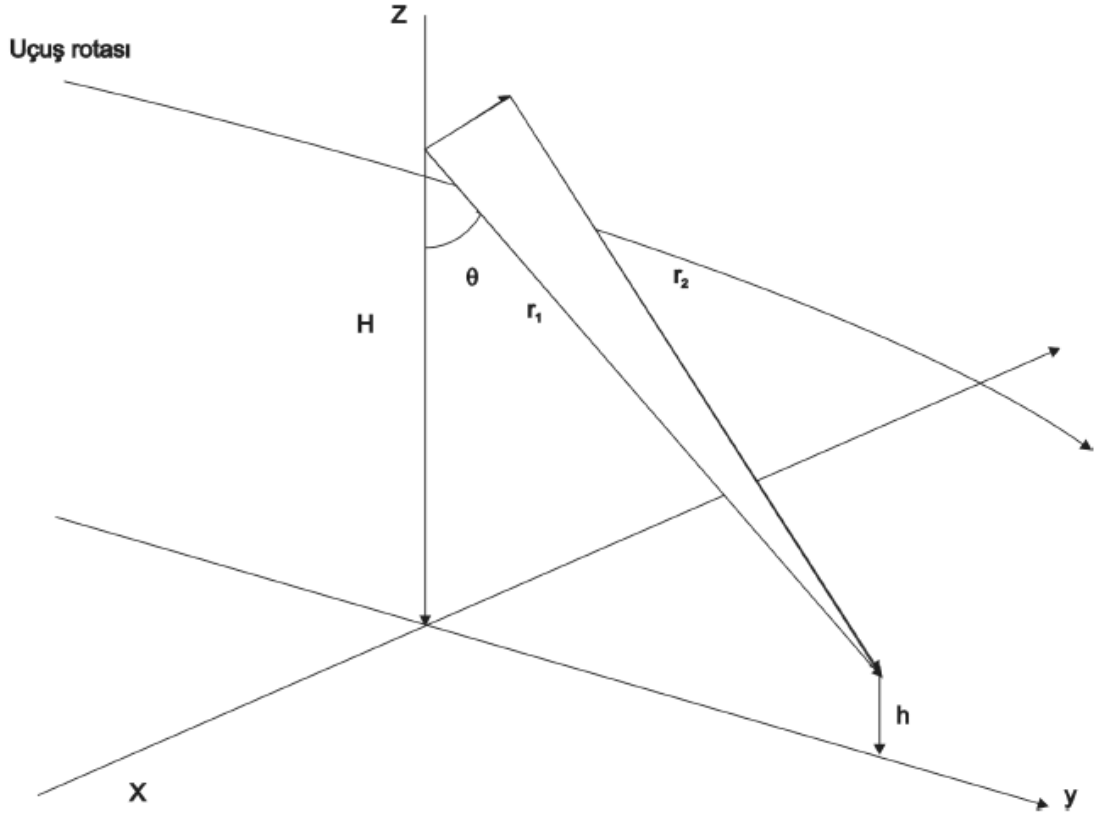


Şekil 3.2. Hareket doğrultusuna dik interferometri görüntüleme geometrisi (Zou ve ark., 2009)

Hareket doğrultusuna dik interferometri tekniği Sayısal Yükseklik Modeli (Digital Elevation Model-DEM) üretimi için de kullanılır (Zou ve ark., 2009). Yöntemin geometrisi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

### 3.1.2. Hareket Doğrultusunda İnterferometri (Along-Track Interferometry-ATI) Tekniği

Bu teknikte de iki adet Yapay Açıklıklı Radar (SAR) anteni aralarında sabit mesafe ile uçuş doğrultusuna paralel olacak şekilde platforma yerleştirilmiştir. Veriler eş zamanlı olarak elde edilir. Yöntem hareket eden cisimlere karşı duyarlıdır. Bu nedenle okyanus akıntısı veya cisimlerin anlık hareketlerini gözlemlemek için kullanılabilir. Antenlerden hedefe ulaşan ve yansıyan sinyaller arasındaki faz farkı kullanılarak hedefin hareketi tespit edilebilir (Zou ve ark., 2009; Canaslan, 2010).

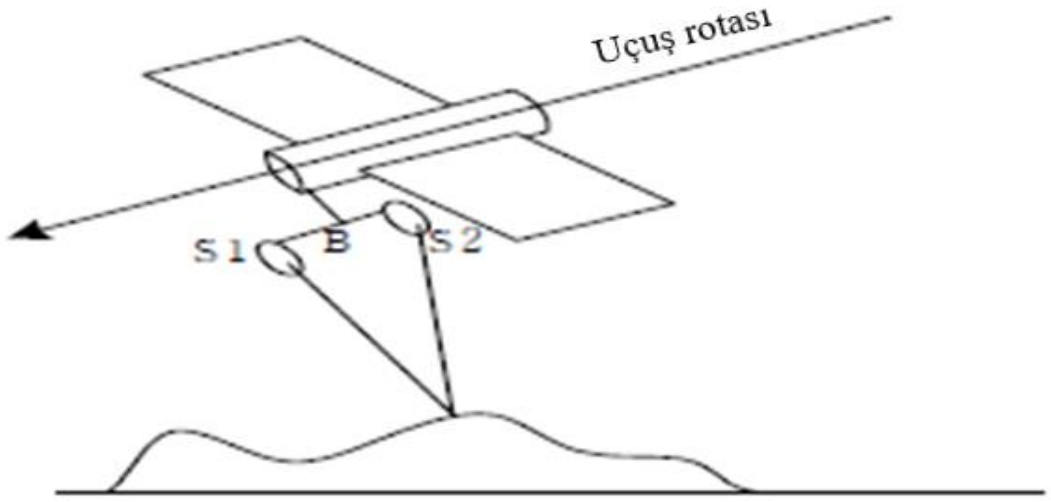


Şekil 3.3. Hareket doğrultusunda interferometri geometrisi (Gens, 1998)

Söz konusu tekniğin geometrik ifadesi daha önce tanımlanan yöntemden çok farklılık göstermemektedir. Bu teknikte değişen tek parametre eksenlerdir. Denizlerde meydana gelen akıntılar incelenirse radar sinyalleri arasında oluşan faz farkı  $\varphi$  akıntılarının hareketi nedeniyle oluşacaktır. Hareket halindeki deniz yüzeyi suda meydana gelen dalgaların faz hızına bağlı olarak bir Doppler atımına neden olacaktır. Söz konusu teknik ile yalnızca hareket halinde olan yerler radar görüntüsü ile tespit edilecektir. Herhangi bir noktanın veya objenin hızı olarak tanımlanan  $u$  ile faz farkı arasındaki ilişki:

$$\varphi = \frac{4\pi u}{\lambda V} B_x \quad (3.3)$$

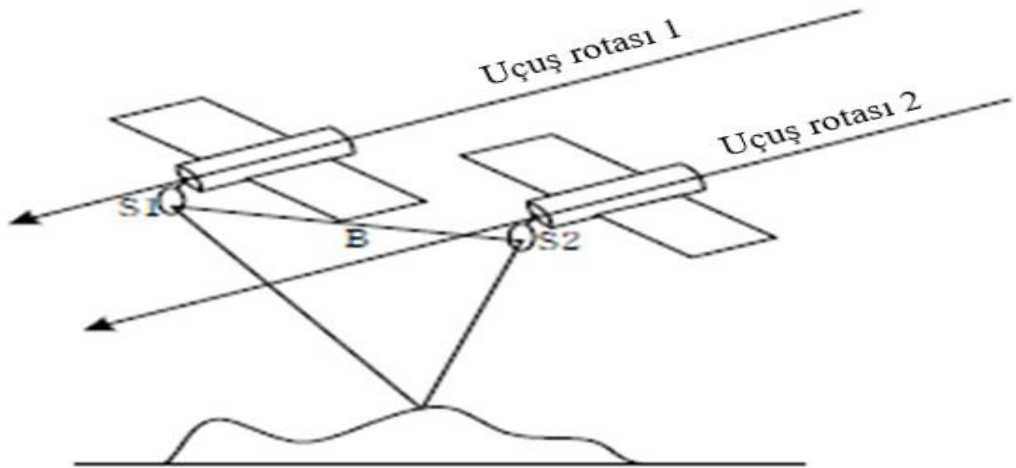
bağıntısı ile tanımlanır. Bağıntıda ifade edilen  $V$  uçağın hızını,  $\lambda$  dalga boyunu ve  $B_x$ 'de radar antenleri arasındaki mesafenin bileşenidir. Uçak uçuş esnasında birtakım yalpalamalara maruz kalabilir. Bu nedenle meydana gelen faz farkı antenler arası baz mesafesi değerinin  $y$  ve  $z$  eksenlerindeki bileşenlerinde oluşacak değişiklikler sebebiyle kalibre edilmelidir (Gens, 1998). Şekil 3.3'te tekniğin geometrisi gösterilmiştir.



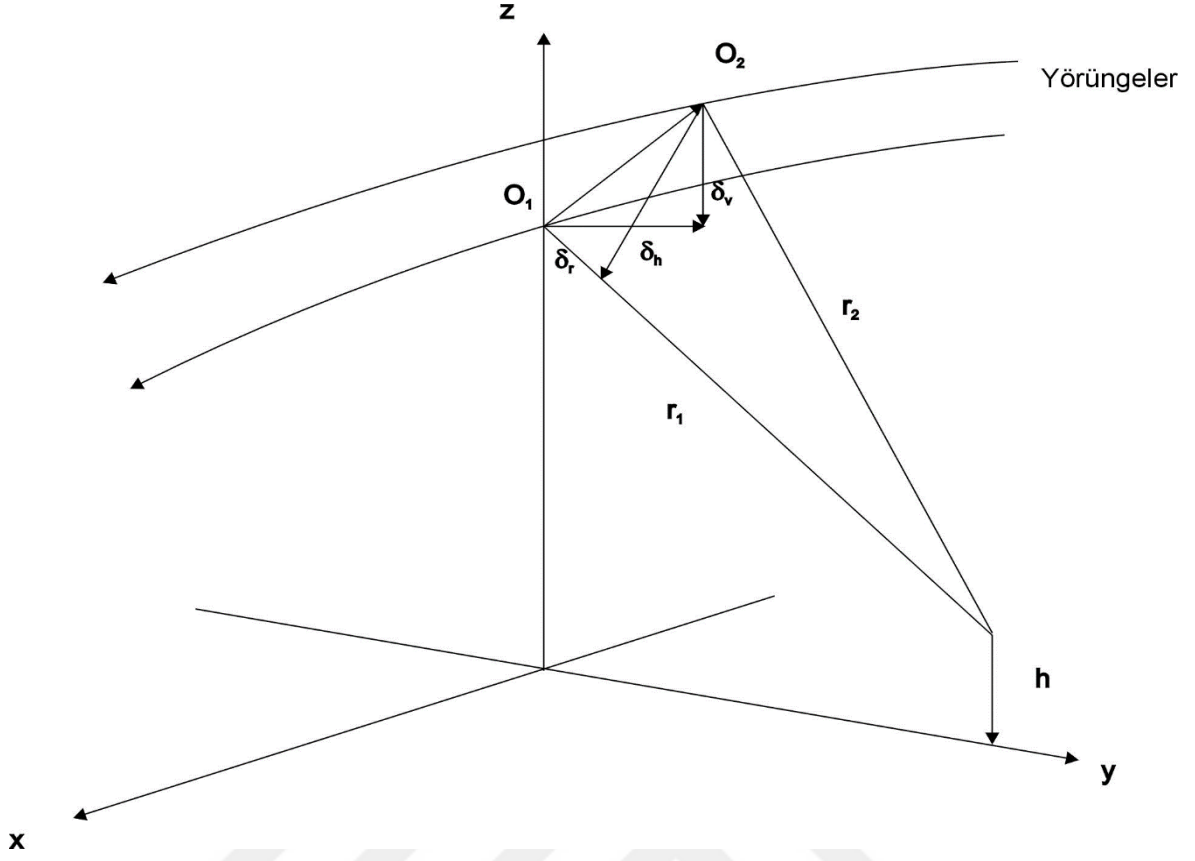
Şekil 3.4. Hareket doğrultusunda interferometri görüntüleme geometrisi (Zou ve ark., 2009)

### 3.1.3. Tekrar Geçiş (Repeat-Pass) İnterferometri Tekniği

Bu teknikte platform üzerine yerleştirilmiş bir adet Yapay Açıklıklı Radar (SAR) anteni vasıtasıyla, aynı bölgeden farklı zamanda ve biraz farklı bakış açısı ile görüntü elde edilir. Tekrarlı geçiş sayesinde ikinci bir anten gereksinimine ihtiyaç duyulmaz. İnterferometri yönteminde duyarlılık uygun baz uzunluğuna bağlıdır. Tekrar geçiş interferometri tekniği tek Yapay Açıklıklı Radar (SAR) anteni ile çalıştığından dolayı sabit aralıklı olmayıp uygun baz seçimine imkân sağlamaktadır. Yöntemin geometrisi Şekil 3.6'da gösterilmiştir (Zou ve ark., 2009; Canaslan, 2010).



Şekil 3.5. Tekrar geçiş interferometri görüntüleme geometrisi (Zou ve ark., 2009)



Şekil 3.6. Tekrar geçiş interferometri geometrisi (Gens, 1998)

Radarı antenleri arasındaki baz mesafesi değeri yatay  $\delta_h$  ve düşey  $\delta_v$  bileşenleri ile ya da bakış açısındaki eğik mesafeler  $r_1$  ve  $r_2$  arasındaki fark ile ifade edilir:

$$\delta_r = r_1 - r_2 \quad (3.4)$$

Radarı görüntüleri arasındaki faz farkı ise eğik mesafe farklarından elde edilir:

$$\varphi = - \frac{4\pi}{\lambda} \delta_r \quad (3.5)$$

Tekrar geçiş geometrisi yardımı ile çalışma alanının bir sayısal yükseklik modeli oluşturmak istenirse, öncelikli olarak çalışma alanına ait iki Yapay Açıklıklı Radarı (SAR) görüntüsünde mevcut olan her bir noktanın yükseklik değeri olarak ifade edilen  $h$  hesaplanmalıdır. Radarı dalga boyu değeri bilinmektedir. Hassas olarak belirtilen uydu yörünge bilgileri ile uyduya ait uçuş yüksekliği  $H$  ve baz mesafesi  $B$  de hesaplanabilmektedir. (3.5)'te gösterilen formül yardımı ile faz farkından interferogram

oluşturulur. Söz konusu hesaplamalar yapılırken iki Yapay Açıklıklı Radar (SAR) görüntülerinin elde edildiği tarihler arasında yeryüzünde meydana gelen yüzey deformasyonunun ve atmosferik değişiklikler sebebiyle herhangi bir gecikmenin olmadığı varsayılmaktadır. Özetlenecek olursa anten dizilişleri hassas bir biçimde biliniyorsa elde edilen faz farkı ile çalışma alanı topoğrafyasına ait bilgiler görülecektir. İki görüntüdeki her bir noktanın birbiriyle karşılaştırılması sonucunda elde edilen faz ile interferogram oluşturulmuş olur. Söz konusu faz farkları sadece  $2\pi$  ve katları olarak elde edilebilir. İnterferogramda görülen bir diğer veri genlik değerleridir ve radar görüntülerinin geri yansıma değerlerinden meydana gelmektedir. Genlik değerleri interferogramlarda genel olarak gri renk tonlarında ifade edilirken faz değerleri ise renkli olarak gösterilirler. İnterferogramdan elde edilen faz değerleri  $2\pi$  ve katları ile çarpılarak faz çözümü (unwrapping) yapılabilir.

Eğik mesafeler (slant range) arasındaki farklar, ilgili faz farklarının radar sinyalinin dalga boyu ile çarpılması ile hesaplanabilirler. Yapay Açıklıklı Radar görüntüsündeki herhangi bir noktanın konum bilgisinin elde edilebilmesi için yörünge verisi, baz mesafesi vektörü ve radardan yüzeydeki objeye olan eğik mesafelerin bilinmesi yeterli olacaktır. Faz farkları, radar dalga boyu ve Şekil 3.6'daki geometri ile yeryüzündeki bir noktanın yüksekliği olan  $h$  şu şekilde hesaplanabilir:

$$h = H - r_1 \cos\theta \quad (3.6)$$

Radar görüntüleri arasındaki faz farkları kullanılarak elde edilen yükseklik bilgisi ve Yapay Açıklıklı Radar verileri ile hesaplanan iki boyutlu konum verisi ile radar görüntülerinden sayısal yükseklik modeli oluşturulabilir. Bu tez çalışmasında İnterferometrik Yapay Açıklık Radar ile yeryüzü haricinde ölçülmesi hedeflenen bir diğer büyüklük de iki görüntünün alındıkları tarihler arasında oluşan düşey yönlü yüzey deformasyonları veya tektonik hareketler gibi etkilerden dolayı oluşan değişikliklerdir. Yeryüzünde meydana gelen değişiklikler ve bu nedenle ortaya çıkan uydunun bakış yönündeki yer değiştirme arasındaki ilişki şu şekildedir:

$$\delta\rho = \vec{D} \cdot \hat{l}_1 \quad (3.7)$$

Bağıntıda  $\delta\rho$  bakış yönündeki eğik mesafe değişimini,  $\vec{D}$  yer değiştirme vektörünün eğik mesafe yönündeki bileşenini ve  $\hat{l}_1$  ise yeryüzündeki hedef noktadan radar platformuna doğru olan birim vektörü simgelemektedir (Akoğlu, 2001; Canaslan, 2010).

### 3.2. Veri Kalitesini Etkileyen Faktörler

Bazı çevresel etkiler sebebiyle Yapay Açıklıklı Radar ile elde edilen verilerin kalitesi olumsuz olarak etkilenmektedir. İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar görüntülerinin kalitesini en kısıtlayıcı etkinin atmosferik etki olduğu varsayılmaktadır. Söz konusu tüm etkiler:

- Atmosferik etki,
- Yörünge hatası,
- Zamansal korelasyonsuzluk,
- Dik baz mesafesi,
- Topoğrafyanın etkisi,

olarak sıralanabilir (Gens, 1998).

#### 3.2.1. Atmosferik Etki

Yapay Açıklıklı Radar verilerinin maruz kaldığı atmosferik etki, ortamın kırılma indeksindeki değişikliklerden kaynaklanmaktadır. Söz konusu değişikliklerin sebebi atmosferik basınç, su buharı ve sıcaklıktır. Bunlardan atmosferik basınç ve sıcaklığın bozucu etkisi iyonosferik etkiler olarak adlandırılır ve interferogramda homojen olarak dağılır. Su buharı ise troposferik etki olarak adlandırılır ve yeryüzüne yakın mesafede troposferde bulunur. Troposferde rüzgâr vb. etmenler sebebiyle türbülans karıştırıcı etkiye neden olur. Türbülanslı karıştırma, kırılmada üç boyutlu (3D) uzaysal heterojenlik ile sonuçlanabilir ve hem düz hem de dağlık bölgelerde lokalize faz gradyanına neden olabilir (Hanssen, 2001).

#### 3.2.2. Yörünge Hatası

Uyduların tam verimli veri elde etmesi için etkili olan faktörlerden biri de yörünge koşuludur. Daha önceden planlanan yörüngelerinde görevlerini yerine getirmeleri istenen bir durumdur. Yörüngeler Kepler parametreleri ile tanımlanmıştır.

Bir uydu hareketi,  $\ddot{\vec{r}}$  ;

$$\ddot{\vec{r}} = -\frac{GM}{r^3}\vec{r} \quad (3.8)$$

evrensel yer çekimi sabiti  $G$ , Dünya'nın kütlesi  $M$ ,  $r$  uyduya olan jeosentrik (yermerkezli) mesafe ve  $\vec{r}$  uydunun jeosentrik konum vektörü (3.8) ile gösterilen Kepler hareketinin temel denklemi ile tanımlanabilir (Gens, 1998).

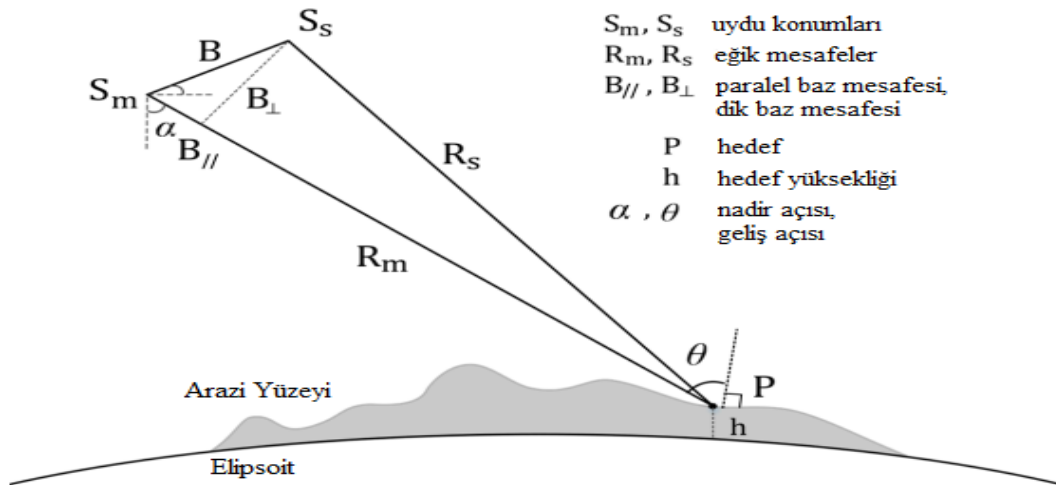
Uydu antenleri arasındaki mesafenin (baseline) tespit edilebilmesi için yörünge bilgisi gerekmektedir. Uyduların yörüngeden olası sapması interferogramda frinç bozukluklarına sebep olacaktır.

### 3.2.3. Zamansal Korelasyonsuzluk

Yapay Açıklıklı Radar (SAR) tarafından yeryüzüne ait görüntüler uyduların döngüsü dahilinde farklı zamanlarda elde edilmektedir. Bu nedenle ilk görüntü (master) alımı ve ikinci görüntü (slave) alımı arasında olası mevsimsel ve atmosferik farklılıklar görüntüde bozucu etkiye neden olarak ve yansıtım değeri (indeks) farklılıklarına yol açarak zamansal korelasyonsuzluğu meydana getirecektir.

### 3.2.4. Dik Baz Mesafesi

Dik baz mesafesi uydulara daha önceden tanımlanmış yörünge bilgilerinden elde edilir. Antenler arası baz mesafesi arttıkça radar sinyallerinde korelasyonsuzluk meydana gelir. Bunun sonucunda interferogramda frinç bozuklukları görülür.



Şekil 3.7. SAR geometrisi – dik baz mesafesi (Xiong ve ark., 2017)

Dik baz mesafesi  $B_{\perp}$  Şekil 3.7’de gösterilmiştir.

### 3.2.5. Topoğrafyanın Etkisi

Radar uydularının görüntü aldığı topoğrafya engebeli bir yapıya sahip ise, topoğrafyanın gözlemlenen faz farkına etkisi olacaktır. Yükseklik belirsizliği,  $h_a$ ;

$$h_a = \frac{R\lambda}{2B_{\perp}} \sin\theta \quad (3.9)$$

bağıntısı ile hesaplanır (Bamler ve Hartl, 1998; Altın, 2013).

Burada  $h_a$  yükseklik belirsizliğini, R mesafeyi,  $\lambda$  dalga boyunu,  $B_{\perp}$  dik baz bileşenini,  $\theta$  bakış açısını ifade etmektedir. (3.9)’dan hareketle dik baz mesafesinin sıfırdan farklı olması durumunda topoğrafik etkiden dolayı interferogramda frinçler oluşacaktır. Dik baz mesafesinin küçük olması durumunda ise yükseklik belirsizliği büyük olacaktır ve yüzey değişiminde topoğrafik etki azalacaktır (Altın, 2013).

### 3.3. Küresel Uydu Seyrüsefer Sistemi (Global Navigation Satellite System- GNSS)

Bu bölümden sonra adını daha sık tekrarlayacağımız GNSS, Küresel Uydu Seyrüsefer Sistemi’nin İngilizce yazılışı olan Global Navigation Satellite System teriminin baş harflerinden oluşan bir kısaltmadır. GNSS,

- Amerika Birleşik Devletleri’nin GPS (Global Positioning System-Küresel Konumlama Sistemi),
- Avrupa Birliği’nin GALILEO,
- Rusya’nın GLONASS (Global Navigation Satellite System-Küresel Uydu Konumlandırma Sistemi),
- Hindistan’ın IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System-Hint Bölgesel Uydu Konumlandırma Sistemi),
- Çin’in BeiDou/BDS (BeiDou Navigation Satellite System-Beidou Uydu Konumlandırma Sistemi),
- Japonya’nın QZSS (Quasi-Zenith Satellite System-Yarı Zenit Uydu Sistemi),

uydu konumlama sistemleri için kullanılan bir terimdir.

GNSS uyduları, sistemi çalıştırmak için kullanılan atomik saatlere, radyo vericilerine, bilgisayarlar ve destek ekipmanlarına sahiptir. Her bir uydunun sinyalleri, kullanıcının

alıcıdan uyduya olan yaklaşık mesafeyi ölçmesini sağlar, bu mesafeye pseudorange (sahte mesafe) denir. Pseudorange, bir uydudan alıcıya gönderilen sinyallerin seyahat süresinden hesaplanır. Radyo sinyalleri c ışık hızıyla ilerlediğinden, burada  $c = 299,792,458$  m/s olmak üzere pseudorange;

$$\text{pseudorange} = (\text{zaman farkı}) \times c \quad (3.10)$$

bağıntısı ile hesaplanır.

GNSS uzay bölümü, kontrol bölümü ve kullanıcı bölümü olmak üzere genellikle üç bölümden oluşur (Hofmann ve ark., 2007; Dawoud, 2012).

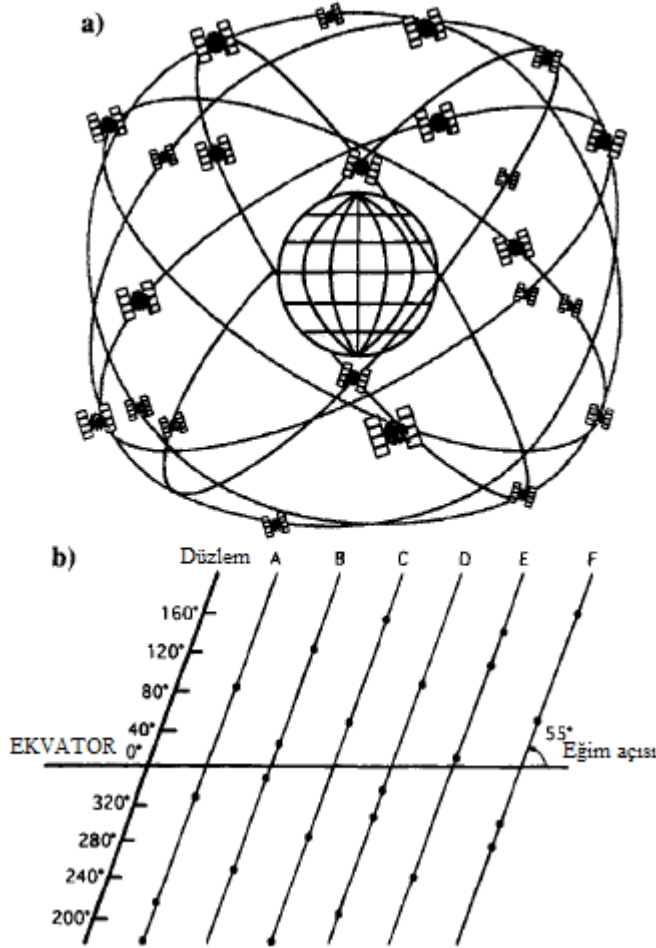
### **3.3.1. Küresel Konumlama Sistemi (Global Positioning System-GPS)**

GPS, Küresel Uydu Seyrüsefer Sistemi'nin (GNSS) en önemli parçasıdır. GPS ilk olarak ABD (Amerika Birleşik Devletleri) tarafından askeri kullanım için tasarlanmıştır. ABD, 1985 yılından itibaren GPS'in sivil kullanıma açılması için çalışmalar başlatmıştır. Ancak seçici kullanılabilirlik (Selective Availability) opsiyonu nedeniyle sivil kullanımda bir süre daha yüksek hassasiyetle kullanılamamıştır. 2000'li yıllarda bu opsiyon ABD tarafından kapatılarak doğruluk sivil kullanım için artırılmıştır ve sistem doğruluğu zamanla geliştirilerek bugünkü halini almıştır.

GPS, ekvatorla 55 derecelik açı yapan, yeryüzünden yaklaşık 20200 km yükseklikte, periyot süresi 11 saat 58 dakikadan oluşan, 6 yörüngede toplam 24 uydudan oluşmaktadır. Bu uydulardan 21 tanesi asıl ve 3 tanesi yedek uydulardır. Günümüzde uydu sayısı 32'ye kadar yükselmiştir. Şekil 3.8'de gösterilen uydu konfigürasyonu sayesinde günün herhangi bir saatinde herhangi bir nokta en az dört uydudan sinyal almaktadır. GPS uyduları, L1 (1575.42 MHz frekansında, dalgaboyu 19 cm) ve L2 (1227.60 MHz frekansında, dalgaboyu 24cm) frekanslarında kesintisiz mikrodalga taşıyıcı sinyali gönderirler. Bu sayede atmosferik koşullara karşı dayanıklıdır. L1 sinyaline hem ABD ordusu hem de sivil kullanıcılar erişebilmektedir. Ancak L2 sinyaline sadece ABD hükümeti ve ordusu tarafından erişilebilmektedir (Erol, 2008; Dawoud, 2012).

P kod yalnızca askeri kullanıma açıktır. Bu nedenle sivil kullanıcılar tek frekans (L1-C/A kod) kullanmaktadırlar ve iyonosferik düzeltme olanağı sağlayan çift frekans özelliğinden yararlanamamaktadır. Söz konusu durum tartışmaları da beraberinde getirmiştir. Sivil kullanıcıların bu durumdan olumsuz olarak etkilenmemesi için yapılan

çalışmalar ve GPS'in modernizasyonu ile 2004 yılından itibaren L2 frekansı üzerinden C/A kod (L2C-L2 Civil Signal) yayınlanmaya başlanmıştır. 2006 yılından itibaren yörüngeye yerleştirilen uydularda yine GPS'in modernizasyonu ile sivil kullanıcılara yeni bir frekans verilmiştir. Söz konusu frekans L5 olarak adlandırılmış olup frekansı 1176.45 MHz'dir. L5 sinyalinin 2012 yılına geldiğinde 18 uyduda olması planlanmıştır (Erol, 2008).



Şekil 3.8. GPS uydusu takımı: a) ECI (Earth-Centered Inertial- Dünya merkezli atalet) koordinatlarında gösterilen altı yörünge düzlemi: ve b) Altı yörünge düzlemlerinin her birinde uyduların konumları. GPS takımı altı eşit aralıklı yörünge düzleminde uydulara sahiptir. Mevcut GPS-24 uyduları takımı b) 'de gösterilen, 24 uydudur. Her düzlemdeki düzensiz uyduların aşaması, uyduların kesintisiz etkisini en aza indirecek şekilde tasarlanmıştır (Parkinson ve ark., 1996)

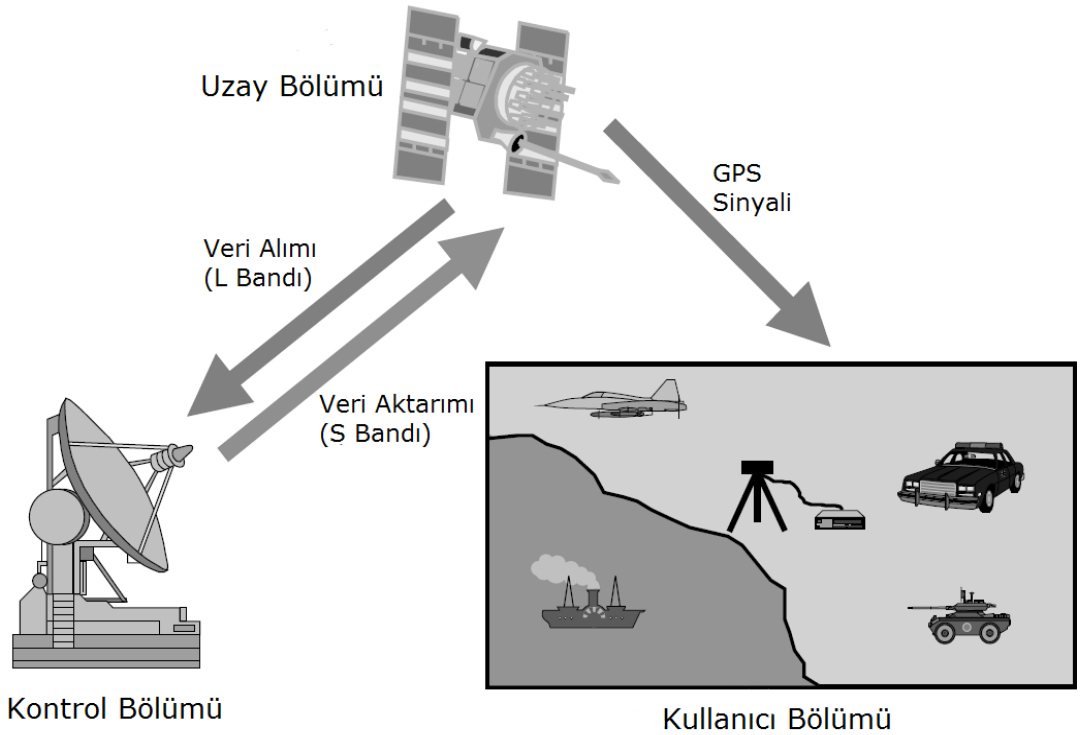
GPS sinyalleri sahte rastgele kod (pseudorandom code) bilgisi, uyduların efemeris (ephemeris) verileri ve almanak (almanac) verilerini içermektedir. Sahte rastgele kod

sinyalin geldiği uydu bilgisini, efemeris uydu konumu hakkındaki bilgileri, almanak ise uydunun durumu ve mevcut tarih ve saat hakkında bilgi verir. Uydularda atomik saatler kullanılmaktadır. GPS uyduları, konumları çok hassas olarak bilinen 5 adet izleme istasyonlarından sürekli olarak izlenmektedir.

GPS tekniği, günümüzde haritacılığın yanı sıra hemen hemen hayatın her alanında kullanılmaktadır. Bu kullanım alanlarına:

- Kara, hava ve deniz araçlarının navigasyonu,
- Jeodezik uygulamalar,
- Jeolojik uygulamalar,
- Ormancılık uygulamaları,
- Madencilik uygulamaları,
- Askeri amaçlı uygulamalar,
- Arama kurtarma çalışmaları,
- Aktif kontrol ağları,
- Asayiş,

örnek olarak verilebilir.



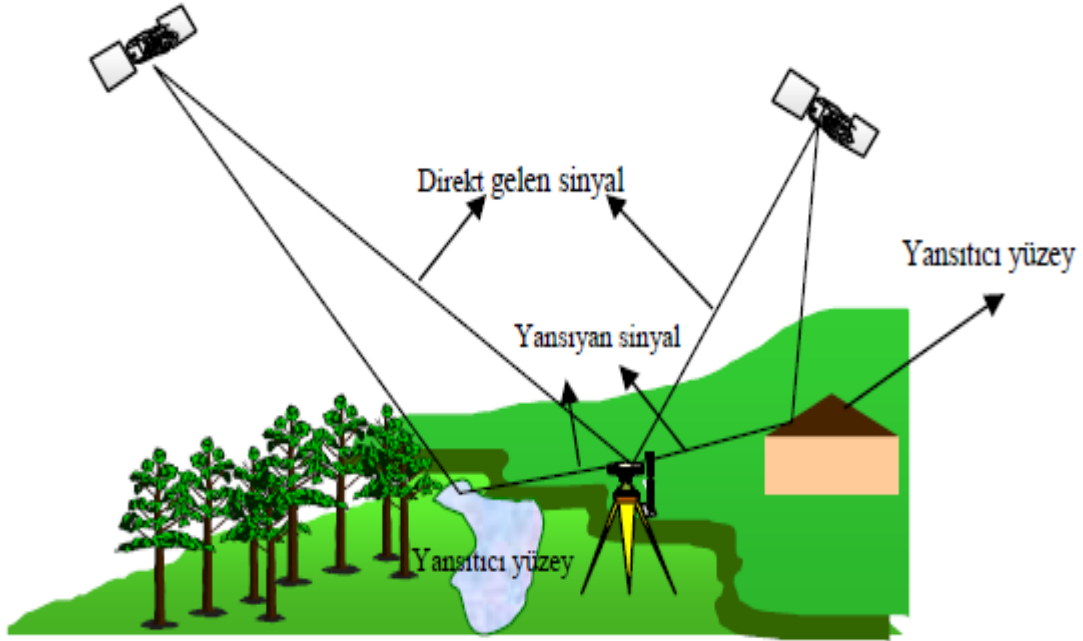
Şekil 3.9. GPS'in bölümleri (El-Rabbany, 2002)

GPS ölçmelerinin konum doğruluğunu kısıtlayan bazı faktörler vardır. Bu faktörler:

- Çok yollu (multipath) yansıma,
- Uydu efemerisi,
- Uydu saat hatası,
- Alıcı saat hatası,
- İyonosferik etkiler,
- Troposferik etkiler,

olarak sıralanabilir.

GPS antenleri uydulardan gelen birden fazla sinyali aynı anda toplayabilmektedir. Uydulardan gelen esas sinyale diğer sinyallerin karışması durumuna sinyal yansıma (multipath) etkisi denir. Bu etki antenin kurulu olduğu topoğrafyanın yapısına, sinyalin yükseklik açısına bağlı olarak gerçekleşebilir (Farrell ve Barth, 1999; Özbey, 2017). Binalar, caddeler, arabalar, ağaçlar multipath etkisine sebep olabilir.



Şekil 3.10. GPS anteni sinyal yansıma hatası (multipath) (Tiryakioğlu ve ark., 2005)

GPS uydu yörüngeleri efemeris olarak adlandırılmaktadır. Bu efemeris verileri ana kontrol istasyonu olan Colorado Springs'te işlenmektedir. GPS navigasyon mesajı içerisinde bulunan uydu efemeris bilgisi yardımıyla uyduların konumu hesaplanır. Uydu efemeris hatası ise uydunun gerçek konumu ile efemeris bilgisinde yer alan konumu arasındaki fark

olarak tanımlanabilir. Yüksek hassasiyet isteyen GPS uygulamalarında navigasyon mesajı içerisindeki efemeris bilgileri kullanılmaz, uydu yörüngesi hassas hesaplamalarla belirlenir (Rizos, 1997).

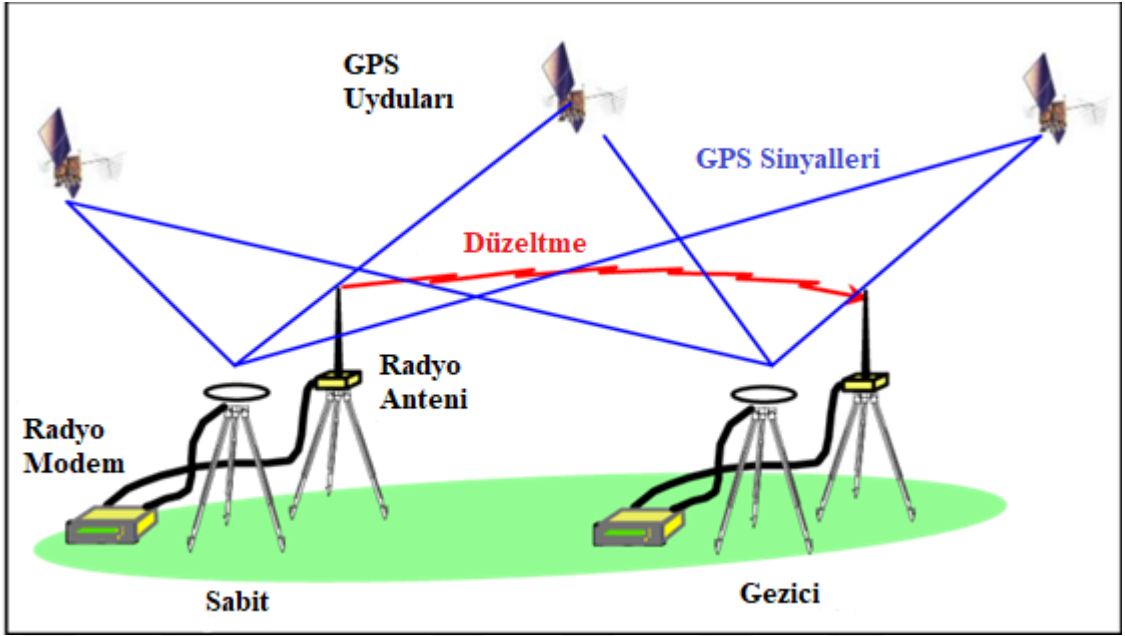
GPS ölçmelerinde çözülmesi gereken diğer hata kaynakları uydu saati ve alıcı saati hatasıdır. Uydu saati hatası, uydu saatinin GPS saatinden farklı olması ve alıcı saati hatası ise alıcı saatinin GPS saatinden farklı olması olarak tanımlanabilir. Uydu saati hatasından tüm GPS alıcıları aynı oranda etkilenirler. Taşıyıcı faz ölçmeleri ve bunların lineer kombinasyonları yardımıyla söz konusu hata kaynakları giderilir. Tekli farklar yöntemiyle uydu saati hatası ve çiftli farklar yöntemiyle alıcı saati hatası elimine edilir (Sickle, 2008).

İyonosfer, yeryüzünden yaklaşık olarak 100. km'den 1000. km'ye kadar olan katmandır ve iyonlaşmadan kaynaklanan serbest elektronlar içerir. İyonosfer bu nedenle saçıcı etkiye sahiptir. İyonosferik etkiden kaynaklanan GPS sinyallerindeki gecikme etkisi toplam elektron yoğunluğuna (Total Electron Content-TEC) bağlıdır (Klobuchar, 1996; Kahveci, 1997; Mekik, 1999).

Troposfer yeryüzüne en yakın katmandır. Elektron bulunmadığından dolayı nötr bir yapıdadır ve bu nedenle saçıcı etki görülmemektedir. Troposferik etki, kuru (hidrostatik) ve ıslak (su buharı) olarak iki bileşene ayrılabilir. Nötr olan atmosferin elektromanyetik dalgalara olan etkisi troposferik gecikme olarak tanımlanmıştır. Bu etki, elektromanyetik dalganın yavaşlamasına ve eğilmesine neden olur. Saastamoinen ve Hopfield modelleri GPS verilerinin değerlendirilmesinde zamandan ve gerçek meteorolojik koşullardan bağımsız atmosferik değişkenlerle beraber yaygın bir biçimde kullanılmaktadır (Kahveci, 1997; Mekik, 1999; Schuler, 2001).

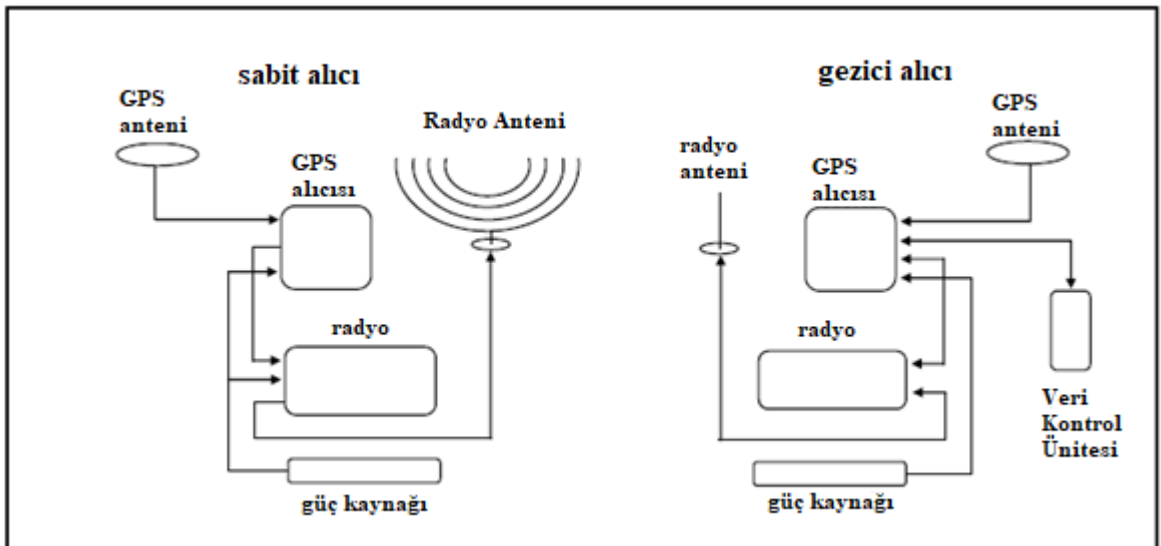
### **3.3.1.1. Gerçek Zamanlı Kinematik (Real-Time Kinematic-RTK) Ölçme Yöntemi**

GNSS bileşenlerinde meydana gelen önemli teknolojik gelişmelerle birlikte faz gözlemleri ile yüksek doğruluğa sahip gerçek zamanlı kinematik ölçmelerin gerçekleştirilmesi mümkün hale gelmiştir (Gündüz, 2013). Gerçek zamanlı kinematik (RTK) ölçme yöntemi taşıyıcı dalga faz gözlemlerini kullanır ve kısa zamanda yüksek doğruluk elde etmek amacıyla birçok haritacılık ve mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır. Gerçek zamanlı kinematik ölçme yönteminde faz bilgileri referans istasyonunda kurulu olan sabit GPS alıcısı tarafından alınarak veri düzeltilmesi ile birlikte arazideki gezici GPS alıcısına anlık (gerçek zamanlı) olarak iletilir. Diğer bir deyişle RTK yönteminde gezici GPS alıcısı bulunduğu her noktanın düzeltilmiş ve dengelenmiş koordinatlarını anlık olarak el ünitesindeki grafik ekrandan görebilmektedir (Diggelen, 1997; Gökalp ve Güngör, 2001).



Şekil 3.11. RTK-GPS genel bakış (Nordin ve ark., 2008)

RTK GPS yönteminde koordinatları bilinen bir ölçme noktasına yerleştirilen bir sabit GPS alıcısı, tüm gözlem sırasında statik (referans istasyonu) olarak tutulurken, diğer gezici GPS mekansal konumları belirlenecek olan noktalar arasında hareket eder. Referans istasyonundaki sabit GPS ve gezici GPS çift frekanslı alıcılarda donatılmıştır. Gezici GPS alıcısı ve referans istasyonundaki sabit GPS alıcısı bağlantı kurmak için radyo modem ile donatılmıştır. Referans istasyonu, gezici GPS alıcısına faz gözlem düzeltmelerini söz konusu radyo modem aracılığıyla göndermektedir (El-Mowafy, 2000; Mekik ve Arslanoğlu, 2009).



Şekil 3.12. Gerçek zamanlı kinematik (RTK) yapısı (Mekik ve Arslanoğlu, 2009)

RTK GPS tekniğinin diğer GPS tekniklerine göre avantajları aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

- Ölçme sonrası veri işlemesine gerek yoktur.
- Çalışma alanında ölçülen noktaların koordinatları, yerel koordinat sisteminde koordinatları da bilinen birkaç noktanın (en az üç) olması koşuluyla, yerel koordinat sistemlerine gerçek zamanlı olarak dönüştürülebilir.
- Tüm noktaları doğru şekilde konumlandırmak için güvenilir bir araçtır. Konvansiyonel kinematik araştırmalarda referans noktasında (tespit edilmemiş) çevrim kaymaları veya kilitlenme kaybı durumunda, kinematik konumlandırma yapılamazken, RTK'da bu durum kolayca tespit edilebilmekte, sürekli ölçmeler ile yeni bir tamsayı belirsizliği tanımlanır ve gerçek zamanlı olarak çözülür.
- Koordinatları bilinen noktaların, gerçek zamanlı olarak (cm seviyesinde) sahada doğru bir şekilde aplikasyonu yapılabilir.
- RTK sayesinde, GPS alıcıları elektronik takometre olarak kullanılabilir (total stations).

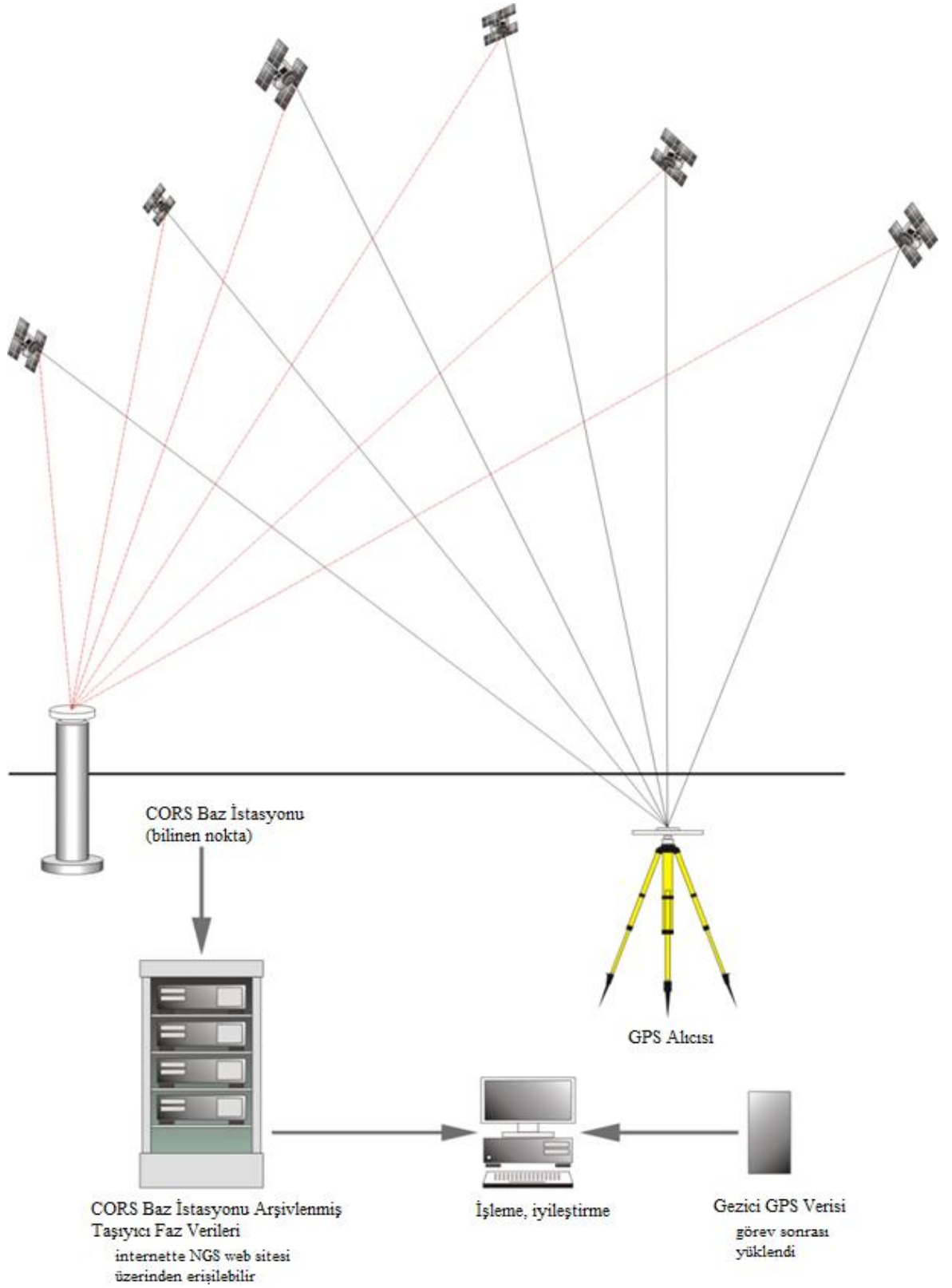
Gerçek zamanlı kinematik ölçme yöntemi ekonomik olması, hızlı ve güvenilir sonuçlar sağlaması sebebiyle günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır (Mekik ve Arslanoğlu, 2009).

### **3.3.1.2. Statik Ölçme Yöntemi**

GPS, yıllardan beri yeryüzündeki hareketlilikleri ölçmede kullanılan bir yöntem olsa dahi milimetre hassasiyetinde veri elde etmek için birtakım teknikler uygulanmaktadır. Statik ölçme yöntemi ile milimetre hassasiyetinde sonuçlar elde edilebilmektedir. Söz konusu doğruluk seviyesi GPS'i yeryüzü deformasyonlarının incelenmesinde statik konumlandırma çalışmaları için önemli hale getirmiştir. Bununla birlikte bu yöntem ve diğer jeodezik yöntemler bazı hata kaynaklarını içermektedir. Bunlar GPS noktalarındaki (pilye) istenmeyen hareketlilikler, modellenmemiş troposferik sinyal gecikmeleri, GPS anten hataları ve çevresel etkiler olarak sıralanabilir (National Research Council, 1997).

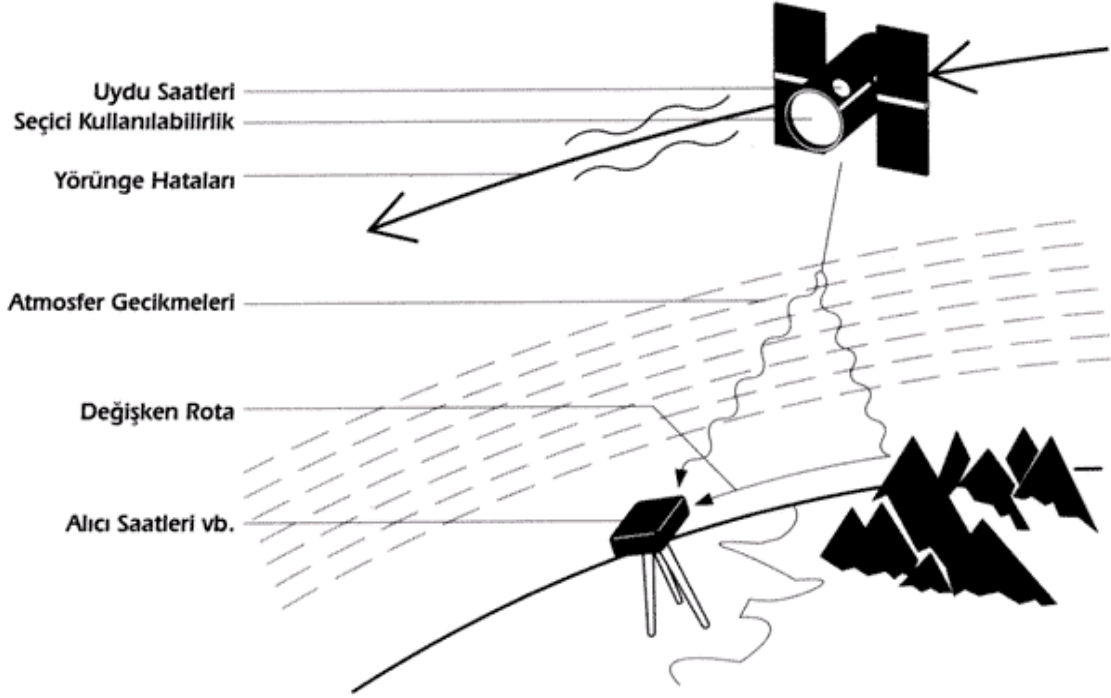
Tektonik ve volkanik süreçlerin incelenmesi için konumlandırma doğruluğu Watkins (1997) ve Murray (1997) tarafından sunulan konuşmalarda tartışılmıştır. Kuzey Kaliforniya'daki St. Helens dağı ve Hawaii'deki Kilauea volkanındaki özel izleme hareketliliklerini tartışan konuşmacılar Watkins ve Murray, yatay düzlemde 1-3 milimetre hassasiyet ve düşey düzlemde 5-10 milimetre hassasiyet gerekliliğinden bahsetmiştir. Söz

konusu hassasiyeti elde etmek için yukarıda bahsedilen hata kaynaklarını en aza indirmek gerekmektedir (National Research Council, 1997).



Şekil 3.13. İşleme sonrası diferansiyel düzeltilmeli Statik GPS

Tektonik hareketliliklerin, heyelanların veya volkanik süreçlerin izlenmesi, verinin güvenilirliği ve otonom “temizliği” için 30 saniyelik bir zamansal örnekleme hızı gerektirir. Yani döngü kaymaları, hatalı veri tespiti ve bunların kaldırılması için söz konusu zamansal örnekleme hızına ihtiyaç duyulmaktadır (National Research Council, 1997).



Şekil 3.14. Bağlı konum belirlemede hata kaynakları (Tut, 2009)

Söz konusu yöntem çok hassas ölçme sonuçları elde edilmek istendiğinde uygulanan ve yüksek duyarlılıklı sonuçlar veren bir ölçme yöntemidir. Statik ölçme yönteminde en az iki veya daha fazla GPS alıcısı aynı anda uzun süreli gözlem yapmaktadır. Rölatif değerlendirme yapılarak GPS hata kaynakları olan uydu saat hatası, alıcı saat hatası, iyonosferik ve troposferik etkiler minimuma indirilebilir. Akademik çalışmalar ve deformasyon izlemeleri için uygun bir ölçme yöntemidir (Gökalp, 1999; Gündüz, 2013).

### 3.4. Deformasyon Modelleri

Kuhlmann ve Pelzer'e göre; deformasyonlar kuvvetlerin etkimesi sonucunda oluşur ve çoğunlukla zamana bağlı olarak değişir. Deformasyonları belirlemek için oluşturulan matematiksel modeller fiziksel gerçeğin basitleştirilmiş biçimleridir, genellikle kuvvet ya da zamana bağlı olarak tanımlanır (Mierlo, 1978; Dupraz ve Niemeier, 1979; Ayan, 1982; Atasoy ve Öztürk, 1984; Ayan ve ark., 1993; Moss ve ark., 1999; Doğan, 2002).

Deformasyon nedenleri;

- Tabandaki değişimler,
- Yapı temelindeki gevşemeler,
- Nem, basınç ve sıcaklık değişimleri,
- Ani değişimler olarak sıralanabilir (İnal, 2000).

Deformasyonlar, probleme uygulanan ölçme planına ve yöntemine göre statik, kinematik ve dinamik olmak üzere üç ana model ile incelenir (Ayan, 1982).

### 3.4.1. Statik Deformasyon Modeli

İki ölçü periyodunda hesaplanan nokta koordinatları  $(x_1, x_2)$  ile fark vektörü,

$$d = x_2 - x_1 \quad (3.11)$$

biçimindedir. Deformasyon analizi için;

$$H_0 = x_2 - x_1 = 0 \quad (3.12)$$

(3.12)' ye göre kurulur,  $Q_d$  matrisi,

$$Q_d = Q_{xx_1} + Q_{xx_2} = (A_1^T P_1 A_1)^+ + (A_2^T P_2 A_2)^+ \quad (3.13)$$

şeklindedir.  $\theta^2$ -ölçütü,

$$\theta^2 = (x_2 - x_1)^T \{ (A_1^T P_1 A_1)^+ + (A_2^T P_2 A_2)^+ \}^+ (x_2 - x_1) \quad (3.14)$$

olarak bulunur.  $Q_d$  'nin rangı, ağ şekli eşlenikse;

$$h = rang(Q_{xx_1}) = rang(Q_{xx_2}) = u_k - d_{datum} \quad (3.15)$$

biçiminde hesaplanır. İki ölçü kümesinin ortak standart sapması

$$S_0^2 = \sqrt{\frac{V_1^T P_1 V_1 + V_2^T P_2 V_2}{f_1 + f_2}} \quad (3.16)$$

eşitliğinden hesaplanır. Eşdeğerlik testinin test büyüklüğü,

$$f_i = n_i - u_i + d_{datum} ; \quad i = 1,2 \quad (3.17)$$

biçimindedir.

$$d = \begin{vmatrix} d_F \\ d_B \end{vmatrix} \quad (3.18)$$

$$Q_d \begin{vmatrix} Q_{FF} & Q_{FB} \\ Q_{BF} & Q_{BB} \end{vmatrix} \quad (3.19)$$

$$Q_d^+ = P_d = \begin{vmatrix} P_{FF} & P_{FB} \\ P_{BF} & P_{BB} \end{vmatrix} \quad (3.20)$$

elde edilmiş olur.

$$\theta_{kalan}^2 = d_D^T Q_{DD}^+ d_D \quad (3.21)$$

Burada  $h_D = h - m$  ve  $f_D = f - 3$  olmak üzere test büyüklüğü,

$$T_D = \frac{\theta_{kalan}^2}{s_0^2 \cdot h_D} > F_{h_D, f_D, 1-\alpha} \quad (3.22)$$

ise ağda hareketli nokta vardır.

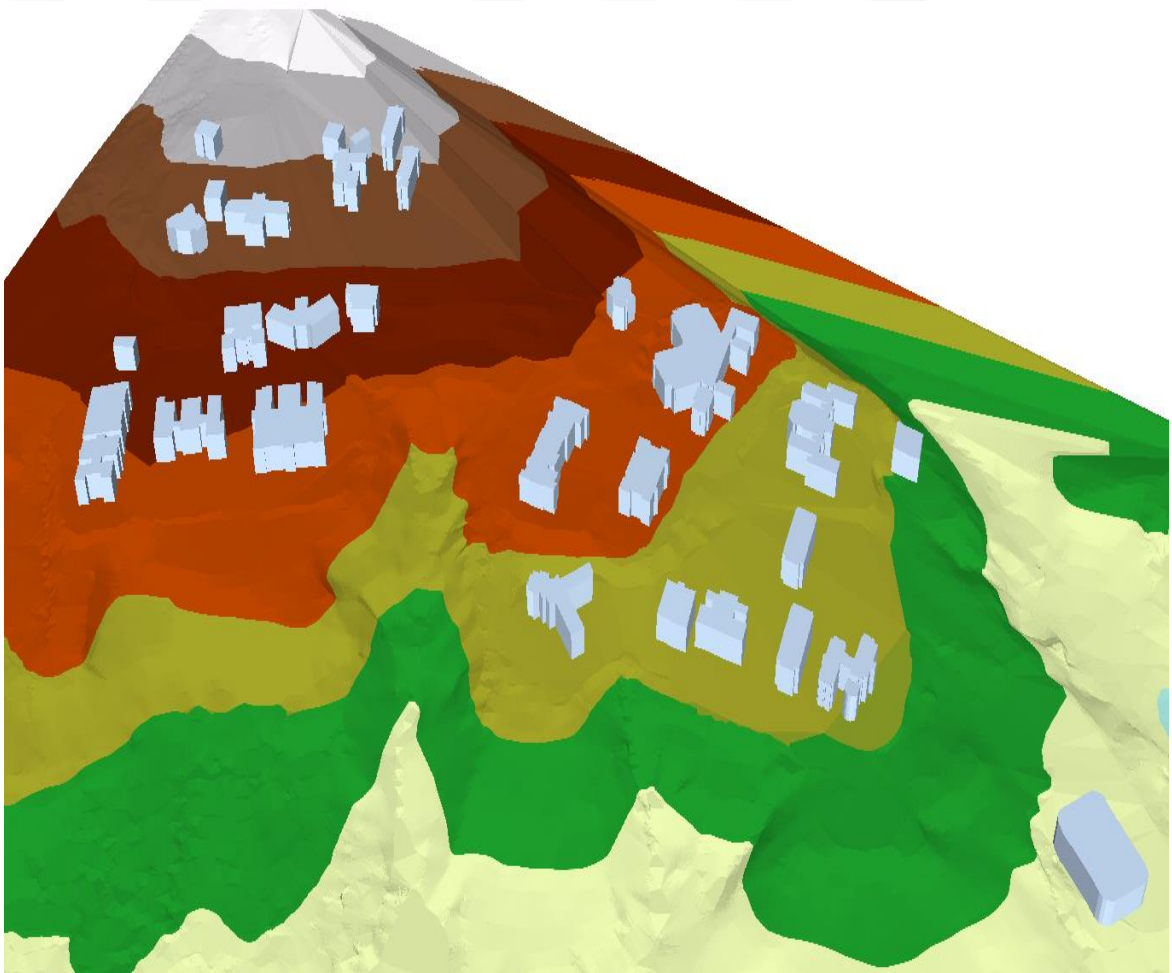
Tektonik hareketlerde deformasyonların GPS ile belirlenmesine Erdoğan (2005)'ın Burdur-Fethiye fay zonu tektonik hareketlerinin GPS ile belirlenmesi, Doğanalp ve Turgut (2009)'un statik ve kinematik modelde deformasyon analizi ve Açıkgöz (2010)'ün Türkiye Ulusal Yatay Kontrol Ağı'nın kuzeybatı bölümünde yer kabuğu hareketleri nedeniyle oluşan deformasyonun yersel ve GPS ölçüleri ile araştırılması adlı çalışmalarından ulaşılabılır.

## BÖLÜM 4

### ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

#### 4.1. Terzioğlu Yerleşkesi

Söz konusu çalışma alanı olan Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Terzioğlu Yerleşkesi kayaç yapısı ve bölgede meydana gelen heyelan, tektonik hareketler bakımından olası deformasyonları barındırmaktadır. Güncel deformasyonlar jeodezik ölçme yöntemleri yardımıyla zamansal ve mekansal olarak izlenerek deformasyonların karakteri ve yönü belirlenmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalarda GPS ve InSAR yöntemleri kullanılmıştır. Çalışma alanına ait sayısal yükseklik modeli ArcGIS programı aracılığıyla oluşturulmuştur.

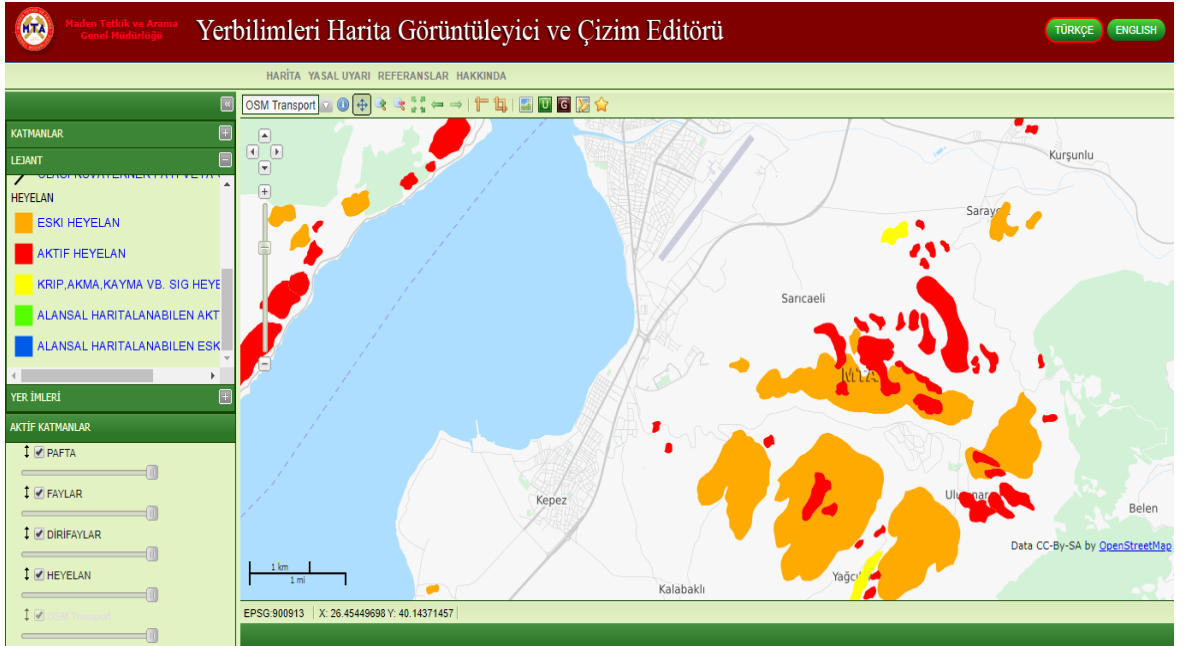


Şekil 4.1. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Terzioğlu Yerleşkesi 3 boyutlu modeli

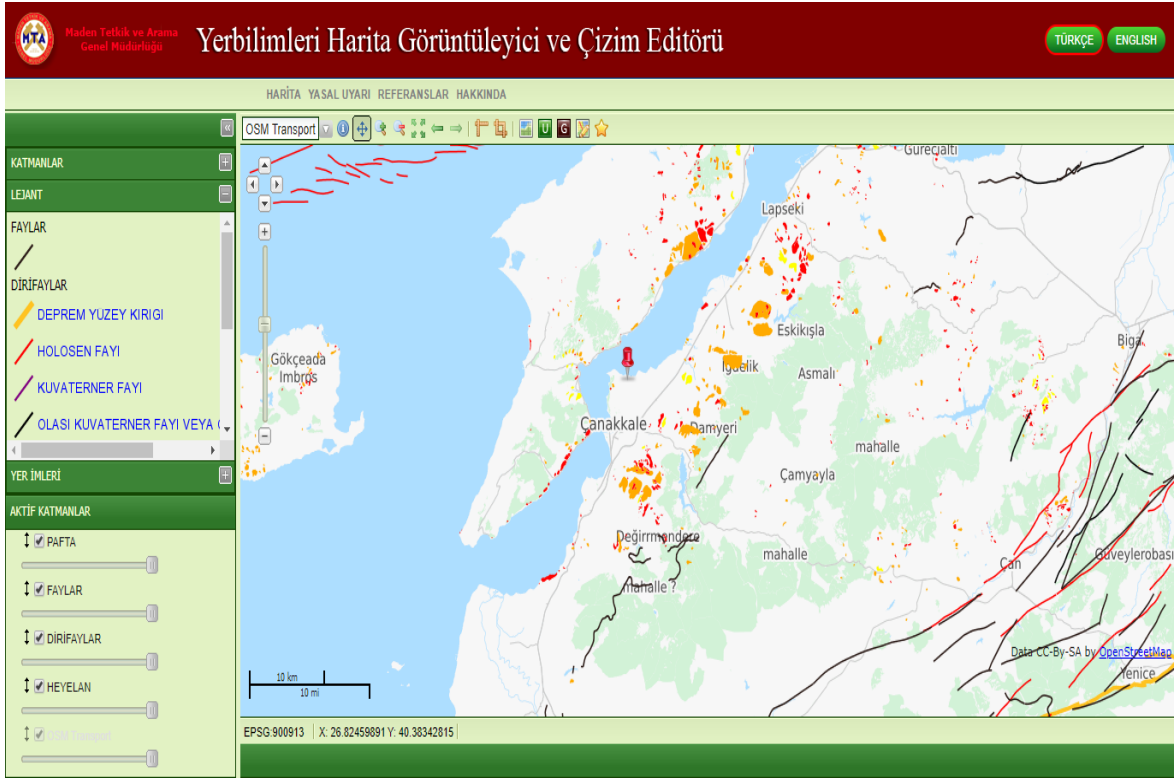
Bölgedeki morfolojik üniteler batı, kuzey ve güneyde irili ufaklı kıyı ovaları ve bunların gerisindeki tepelikler, platolar ve iç kesimlerdeki yaygın yüksek dağlık alanlardır. Platolar ve dağlık kütleler arasına sıkışmış tektonik depresyonlara sıkça rastlamak

mümkündür. Genel olarak yüzey deformasyonlarının sebepleri kayaç yapısına ve çevresel faktörlere bağlı olarak zemin çökmeleri veya yükselmeleri, heyelanlar ve tektonik hareketlilikler olarak sıralanabilir (Yiğitbaş, 2016). Zemin çökmeleri yeraltı sularındaki hacimsel değişimler sebebiyle veya tektonik hareketler sonrasında çökme şeklinde gerçekleşebilir. Heyelanlar ise bir yamaçtaki kaya, toprak zeminin veya molozların yamaç aşağı hareket etmesi olarak tanımlanabilir. Ülkemizde sebebiyet verdikleri kayıplar bakımından depremlerden sonra ikinci sıradadır. Bu bağlamda yüzey deformasyonları, can kayıplarına neden olmanın yanı sıra, kentleşmeye zarar vermekte, tarım ve orman alanları ile akarsuların kalitesi üzerinde olumsuz etkiler oluşturmaktadır. Ayrıca Terzioğlu Yerleşkesi'nde meydana gelen olası yüzey deformasyonlarının nedenleri arasında yerleşke içerisinde hızla artan yapı stoğu ve aşırı yağış gösterilebilir.

Çanakkale il merkezi ve çevresinde bulunan aktif heyelan haritası, eski heyelan haritası, fay haritası ve diri fay haritası Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Söz konusu alan geçmişten günümüze kadar birçok tektonik hareketliliğin yaşandığı birinci derece risk barındıran deprem bölgesidir (Sezer, 2006). Son yıllarda potansiyel risk alanlarında meydana gelen aşırı yapılaşma günlük hayatı olumsuz etkileme ihtimalini içermektedir. Bu nedenle bölgede oluşabilecek ve gündelik hayata zarar verebilecek olası deformasyonlar InSAR tekniği ile incelenerek olası zararlara karşı alınacak önlemler belirlenmelidir.



Şekil 4.2. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Terzioğlu Yerleşkesi etrafındaki heyelan yoğunluğunun görüldüğü alanları gösterir harita (Duman ve ark., 2011; Emre ve ark., 2013; <http://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx>)

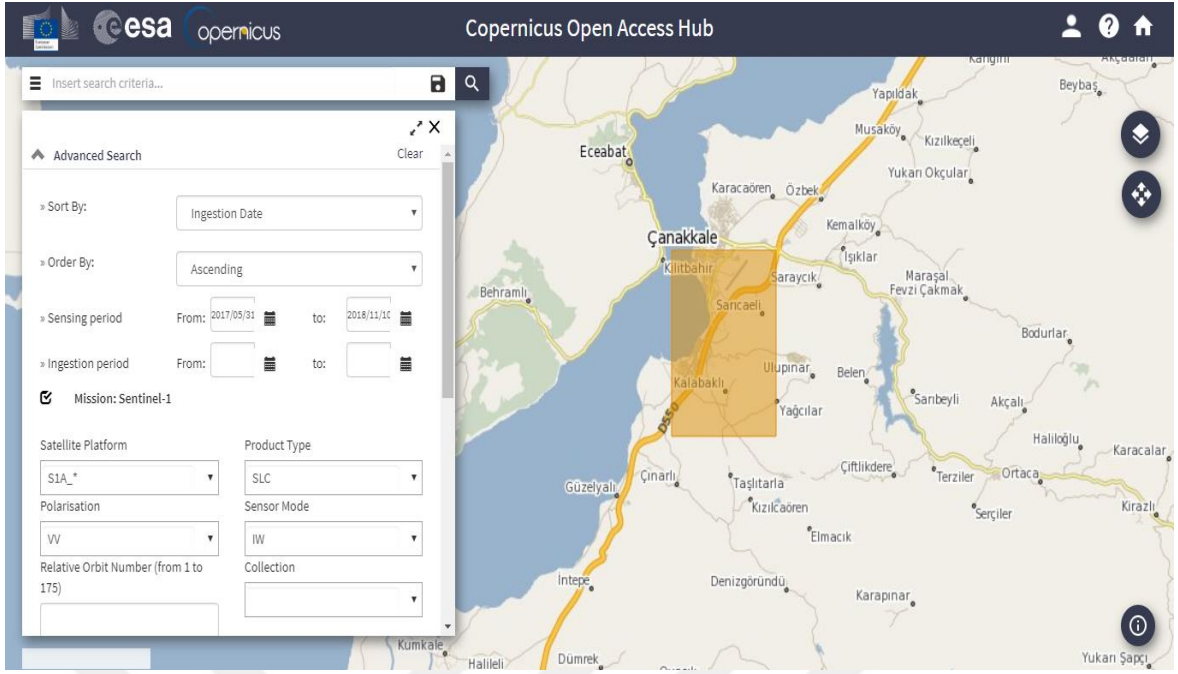


Şekil 4.3. Çanakkale ili fay yoğunluğunun görüldüğü alanları gösterir harita (Duman ve ark., 2011; Emre ve ark., 2013; <http://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx>)

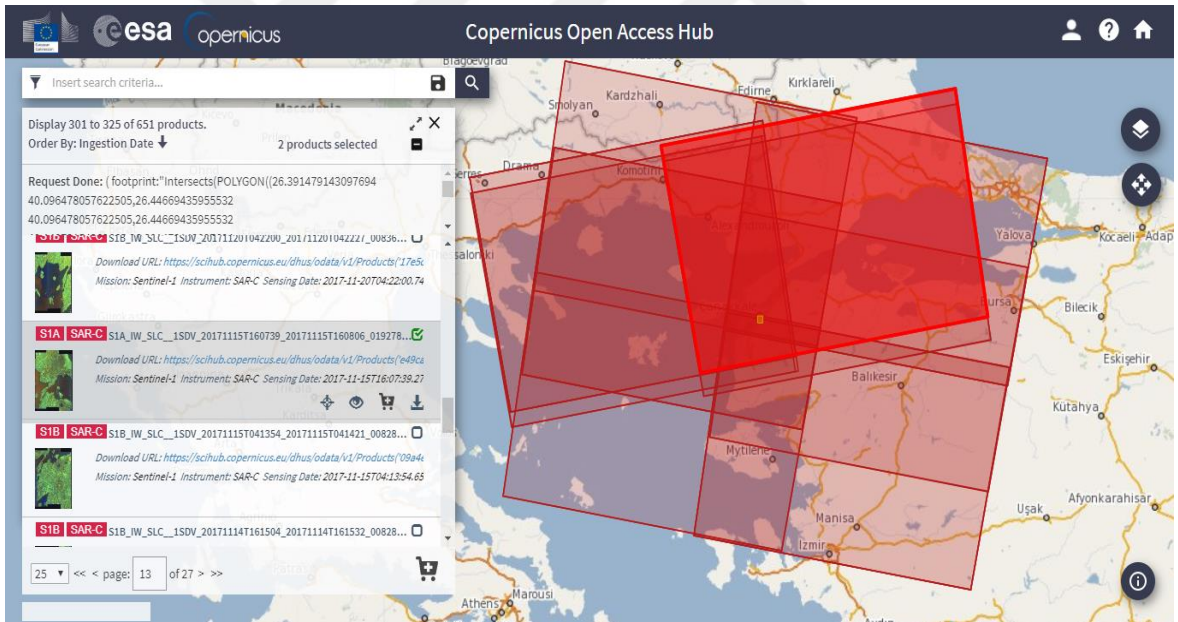
#### 4.2. Sentinel Verisinin Seçilmesi

İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar (InSAR) tekniğinin uygulanabilmesi için öncelikle çalışma alanını tam olarak yansıtabilecek radar görüntülerinin seçilmesi gerekmektedir. Yapay Açıklıklı Radar (SAR) uydu görüntülerinin kalitesi bölüm 3'te bahsedildiği üzere bazı faktörlere bağlıdır. Bu nedenle uygun görüntü çiftleri oluşturabilmek için radar görüntüleri seçilirken dik baz mesafesi, zamansal korelasyon gibi parametrelere dikkat edilmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışması için kullanılan görüntü çiftleri Avrupa Uzay Ajansının SENTINEL uydularından elde edilen Yapay Açıklıklı Radar (SAR) görüntüleridir. Avrupa Uzay Ajansı'nın SAR verilerinin bulunduğu "copernicus" adlı portalda çalışma alanı dikdörtgen biçiminde kabaca seçilmiştir. Daha sonra söz konusu portalda bulunan filtreleme bölümü aracılığıyla uydunun görüntüleme tarihleri, uydu geçişleri (artan veya azalan), uydu platformu, ürün tipi, sensör modu ve polarizasyon bilgileri doldurularak çalışma alanını kapsayan görüntü olup olmadığı ve görüntülerin uyumluluğu incelenmiştir. Söz konusu görüntü seçme aşamaları Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Sentinel-1 veri özelliklerinin girilmesi



Şekil 4.5. Sentinel-1 radar görüntülerinin seçilmesi

Bu tez için çalışma alanı kapsayan ücretsiz Sentinel uydu görüntüleri zamansal korelasyon açısından sınırlayıcı olmuştur. Yani 2016 yılı Kasım ayı içerisinde çalışma alanına ait uygun radar görüntüsü olmadığından dolayı en yakın tarihli, en uygun görüntü 2017 yılının Mayıs ayından seçilmiştir. Bu nedenle seçilen uygun uydu görüntüleri 31 Mayıs 2017, 15 Kasım 2017 ve 10 Kasım 2018 tarihlerinde alınmış veridir. İndirilen radar görüntüleri Sentinel-1A verisi olup uydu geçiş yönü artan formatta olan görüntülerdir. Ürün

tipi interferometri tekniği için uygun olan tek bakışlı karmaşık görüntü (Single Look Complex-SLC) olarak, sensör ise interferometrik genişlik (Interferometric Wide-IW) modunda seçilmiştir.

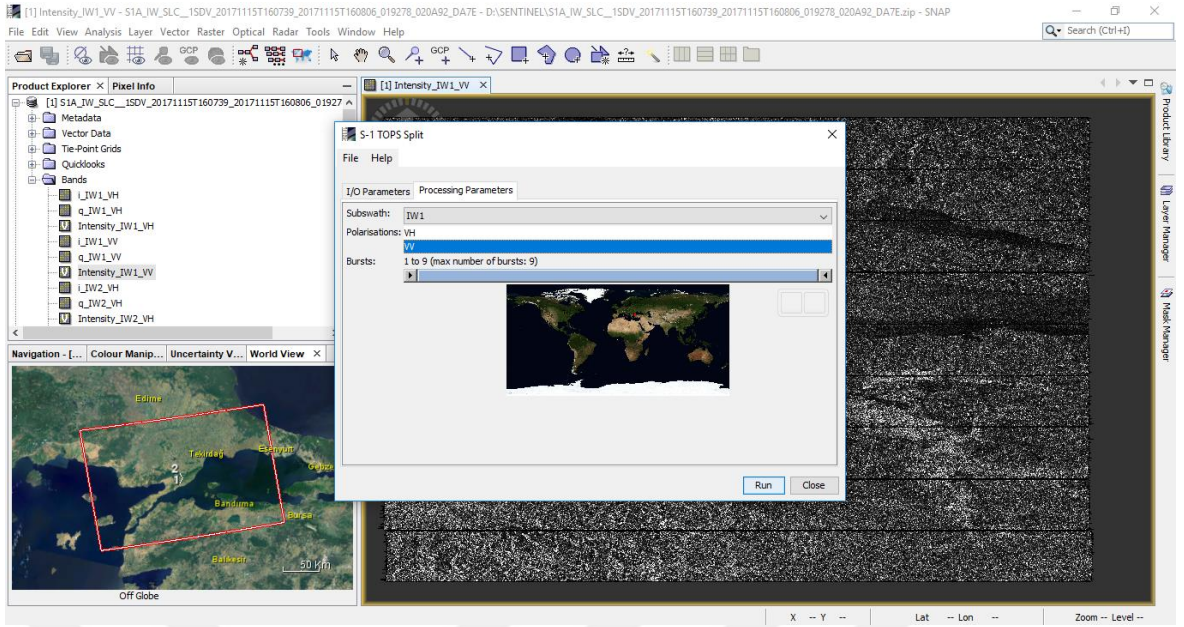
Çizelge 4.1. InSAR yığına genel bakış ve en uygun birincil görüntü seçimi

Acquisition	Mst/Slv	Track	Orbit	Bperp [m]	Btemp [days]	Modeled Coherence
15.11.2017	Master	131	19278	0	0	1
31.05.2017	Slave	131	16828	-132,81	168	0,75
15.11.2017	Master	131	19278	0	0	1
10.11.2018	Slave	131	24528	-38	-360	0,65
31.05.2017	Master	131	16828	0	0	1
10.11.2018	Slave	131	24528	95,09	-528	0,48

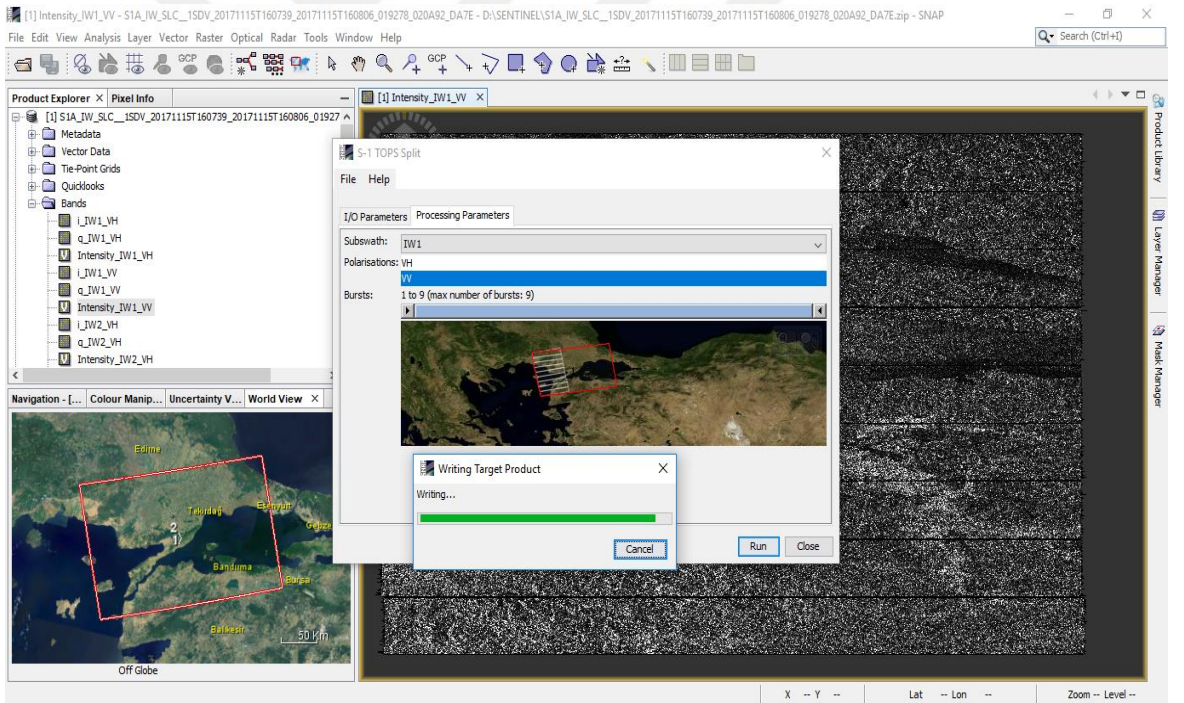
Yapay Açıklıklı Radar (SAR) görüntüleri arasındaki dik baz uzunluğu, zamansal korelasyon, iz numarası ve yörünge bilgisi Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Burada “modeled coherence” olarak ifade edilen sütun, modellenmiş tutarlılığın (benzeşimin) beklenen değerini temsil etmektedir. Btemp sütunu ise görüntü çiftleri arasındaki zamansal korelasyonu ifade etmektedir. Uydu görüntüleri arasındaki dik baz uzunluğu ise Bperp olarak gösterilmiştir. Ayrıca interferometri için en uygun olan birincil (master) ve ikincil (slave) görüntüler SNAP (Sentinel Application Platform) programı aracılığı ile belirlenmiştir.

### 4.3. İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar Veri İşleme Adımları

İnterferometri tekniği için interferometrik genişlik (Interferometric Wide-IW) modunda indirilen görüntüler üç adet alt görüntüden oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla IW1, IW2 ve IW3 olarak sıralanabilir. Bu görüntülerden çalışma alanını kapsamakta olan IW1 alt görüntüsü üzerinde çalışılmıştır. Seçilmiş olan interferometrik genişlik Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de gösterilmektedir.



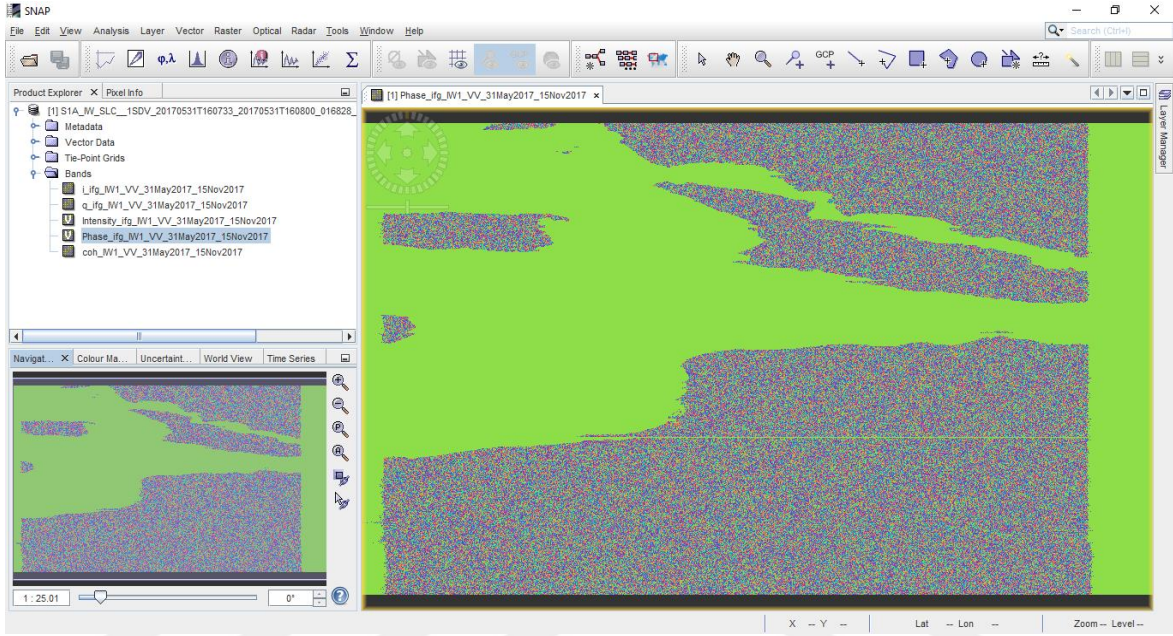
Şekil 4.6. İnterferometrik alt genişliğin görüntülenmesi



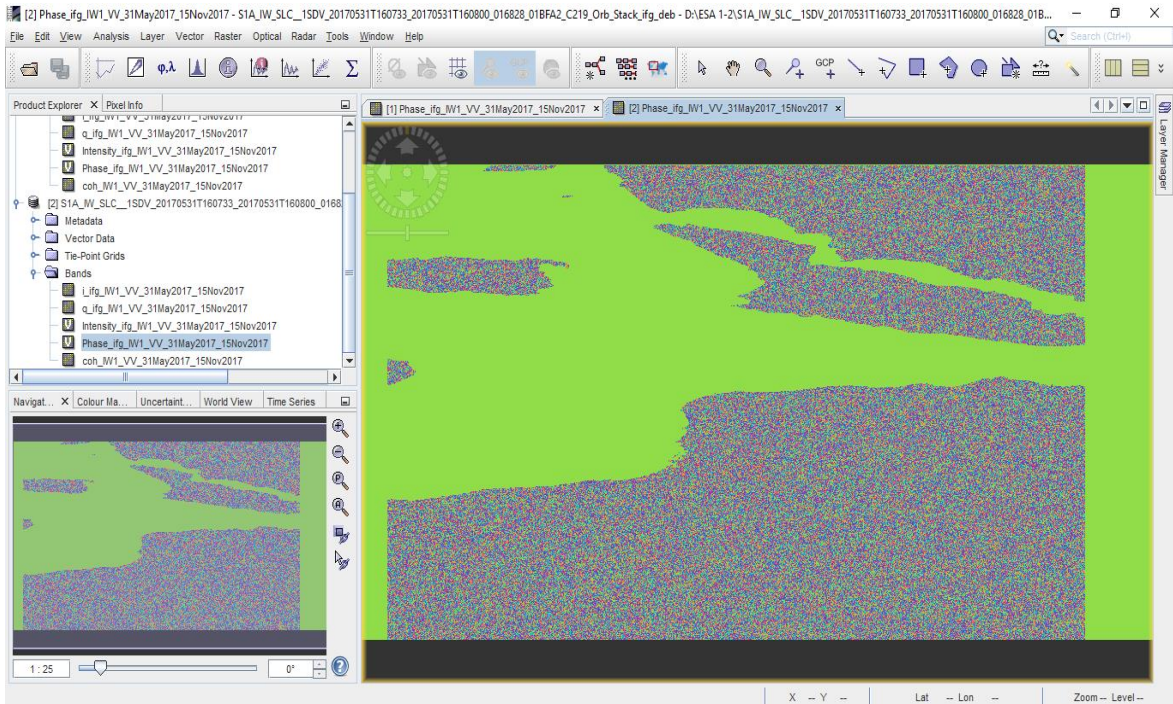
Şekil 4.7. İnterferometrik alt genişlik seçimi (subswath)

SAR görüntülerinden interferogram oluşturabilmek için görüntülerin birtakım ön işlemlerden geçirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla seçilen uydu görüntüleri SNAP programı kullanılarak açılmıştır. Program üzerinde açılan SAR görüntü çiftine öncelikle bağdaştırma işlemi uygulanır ve görüntülerin eşleştirilmesi sağlanır. Daha sonra coğrafi kodlama işlemi gerçekleştirilir ve birincil görüntüdeki her bir pikselin faz değeri, ikincil görüntüdeki

eşlenmiş olan piksel faz değerinden çıkartılarak interferogram oluşturulur. Oluşturulan interferogram bazı bozucu etkilerden arındırılmalıdır. İnterferogramın gereksiz çizgilerden temizlenmesi için patlatma (deburst) işlemi yapılır. “Deburst” işlemi uygulanmadan önceki interferogram faz görüntüsü ve uygulandıktan sonra oluşan interferogram faz görüntüsü sırasıyla Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



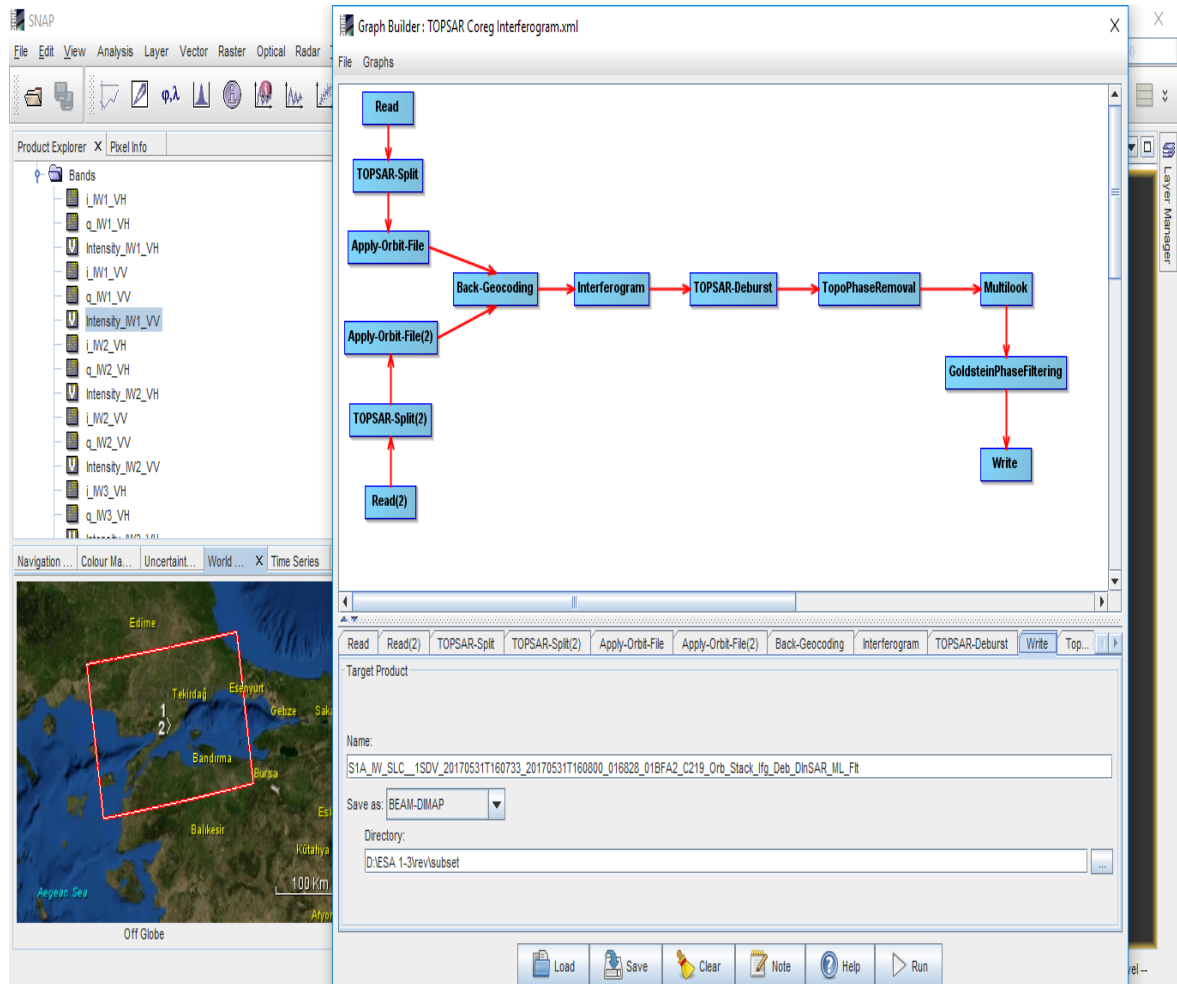
Şekil 4.8. SNAP deburst işlemi öncesi interferogram faz görüntüsü



Şekil 4.9. SNAP deburst işlemi sonrasında interferogram faz görüntüsü

Bu aşamaların ardından görüntüdeki topoğrafik faz kaldırılarak interferogram üzerindeki gürültü miktarını azaltmak amacıyla çoklu bakış (multilook) işlemine geçilmiştir. Son olarak filtreleme işlemi için goldstein faz filtrelemesi uygulanmıştır.

Çalışma alanını kapsayacak şekilde seçilen uygun görüntü çiftleri Avrupa Uzay Ajansı'nın (ESA) Sentinel Application Platform (SNAP) programı kullanılarak İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar (InSAR) tekniğine uygun olarak işlenmiştir. Veri işleme aşamaları Şekil 4.10'da gösterilmektedir.



Şekil 4.10. InSAR veri işlem akışı

Radar görüntüleri ve her aşamada oluşturulan interferogram ürünleri yüksek depolama alanları gerektirmektedir. Eğer çalışma alanı görüntünün tamamını kapsamıyorsa çalışma alanı görüntü üzerinden seçilerek veri fazlalığı ortadan kaldırılabilir.

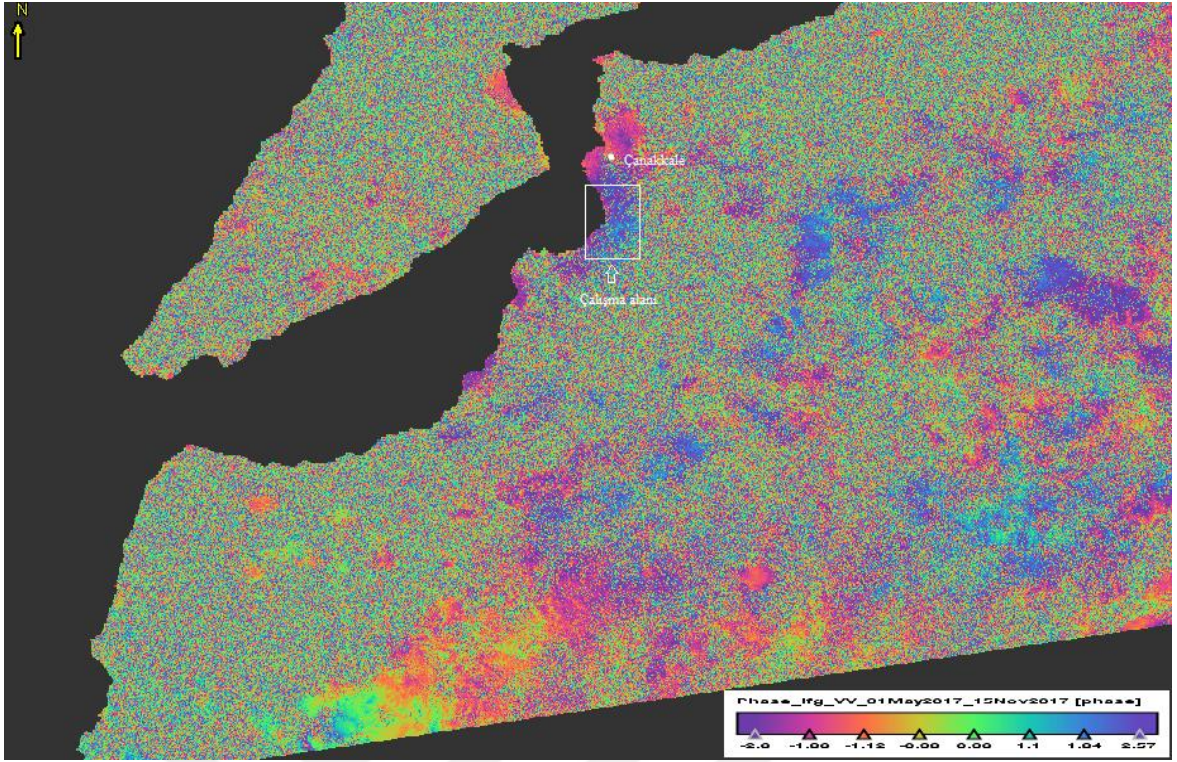
Yapay Açıklıklı Radar (SAR) görüntüleri ile interferogram oluşturmak için donanıma bağlı olduğu belirtilmek üzere gerekli işlem adımlarına ait zamansal veriler ise Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. SNAP (Sentinel Application Platform) işlem-zaman ilişkisi

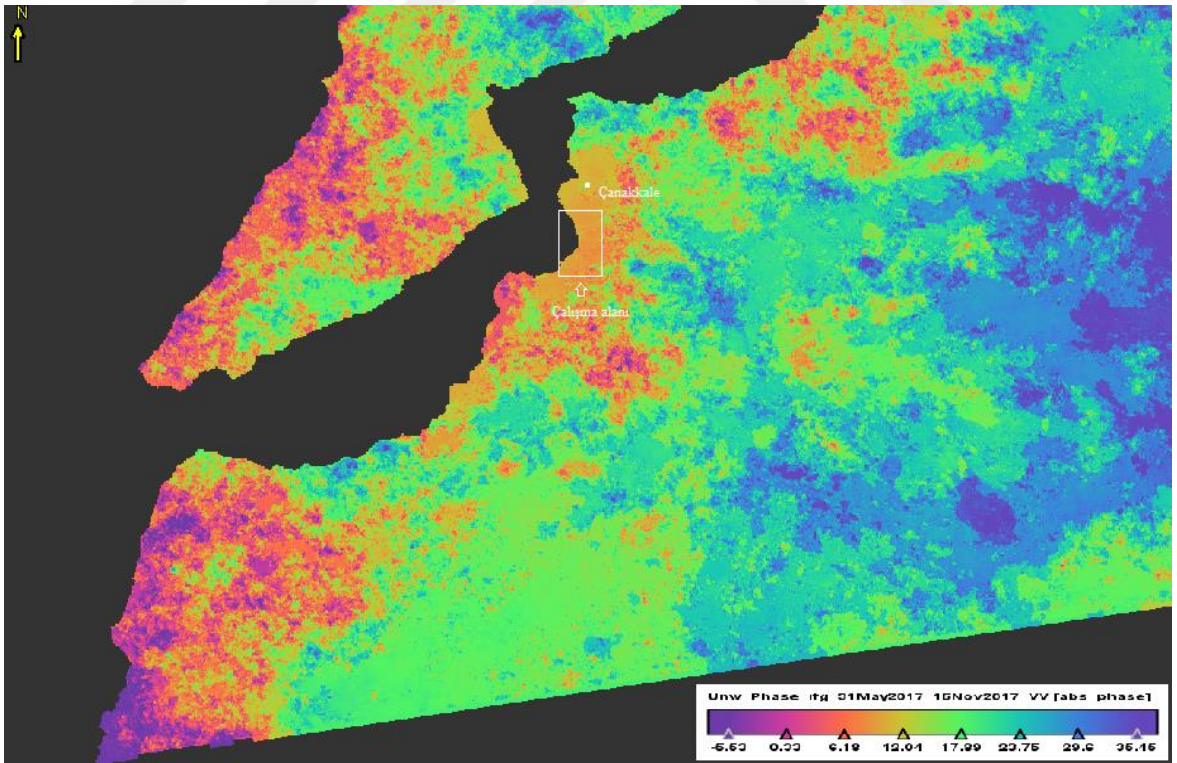
<b>İşlem</b>	<b>Zaman (Dakika)</b>
<b>S-1 TOPS Split</b>	<b>0.5</b>
<b>Apply Orbit File</b>	<b>10.6</b>
<b>S-1 Back Geocoding</b>	<b>82.8</b>
<b>S-1 Enhanced Spectral Diversity</b>	<b>118.85</b>
<b>Interferogram Formation</b>	<b>105.18</b>
<b>S-1 TOPS Deburst</b>	<b>111.5</b>
<b>Topographic Phase Removal</b>	<b>83.06</b>
<b>Goldstein Phase Filtering</b>	<b>74.16</b>
<b>Range-Doppler Terrain Correction</b>	<b>33.75</b>
<b>Toplam</b>	<b>620.4</b>

Sentinel-1 veri işleme aşamaları uygulanan interferogram istenirse çözümlenme (unwrapping) işlemine tabi tutulabilir. Faz çözümlenmesi SNAP ve SNAPHU programları yardımıyla gerçekleştirilebilir. Çözümlememiş faz görüntüsü ve çözümlenmiş faz görüntüsüne örnekler sırasıyla Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de gösterilmiştir.

Faz çözümlenmesi yapıldıktan sonra oluşan görüntü üzerinde arazi düzeltmesi işleminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu işlem için SNAP içerisindeki “Range-Doppler Terrain Correction” komutu uygulanabilir. Düzeltme işlemi uygulanan radar görüntüsü gerçek konumunda görüntülenecektir.



Şekil 4.11. 31 Mayıs 2017- 15 Kasım 2017 tarihleri arasındaki Sentinel-1A faz görüntüsü, Çanakkale ve Terzioğlu Yerleşkesine genel bakış

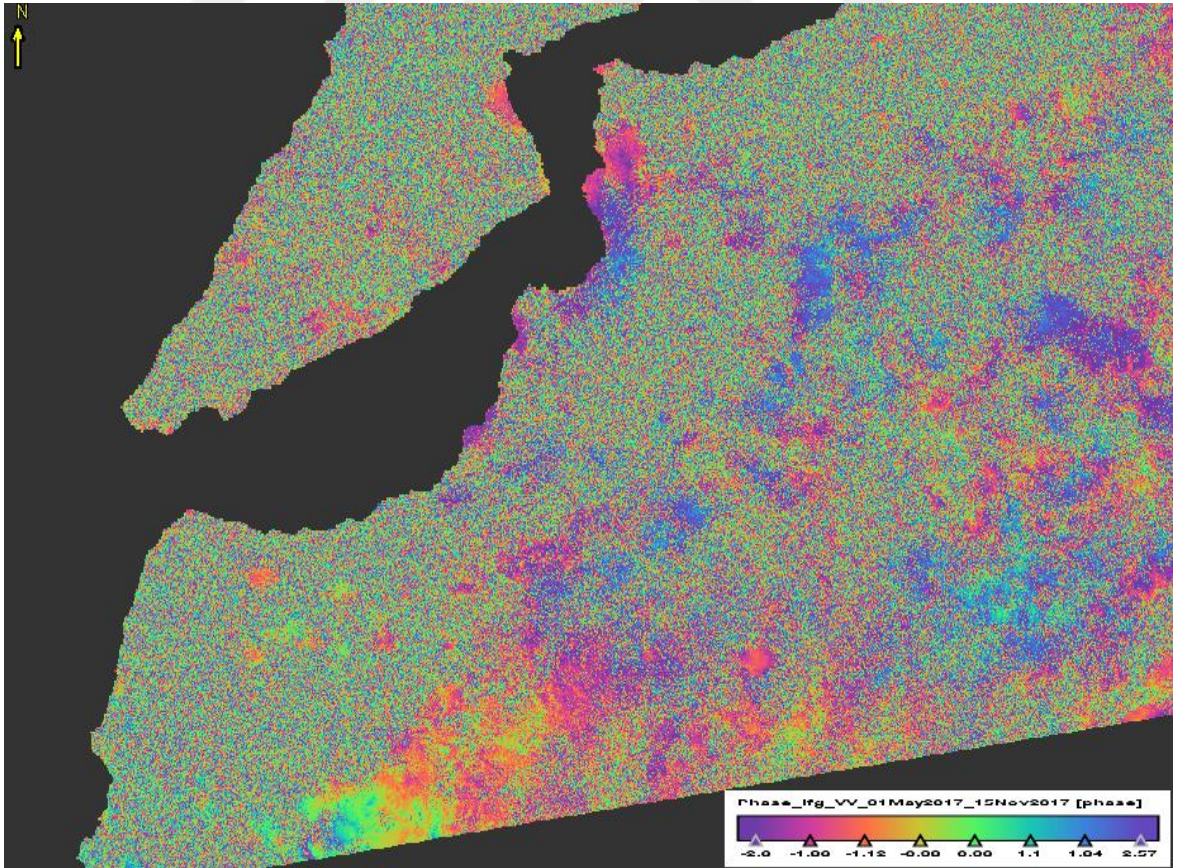


Şekil 4.12. 31 Mayıs 2017- 15 Kasım 2017 tarihleri arasındaki Sentinel-1A çözülmemiş (unwrapped) faz görüntüsü, Çanakkale ve Terzioğlu Yerleşkesine genel bakış

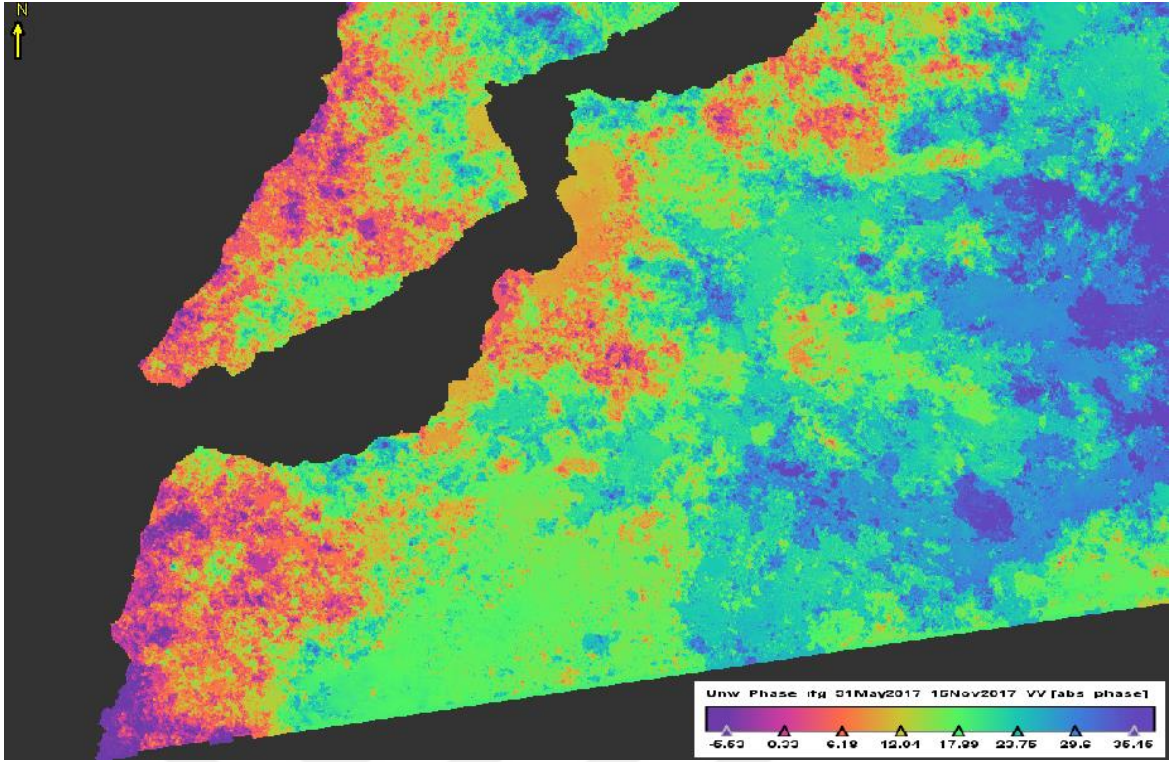
#### 4.4. Terzioğlu Yerleşkesindeki Düşey Yönlü Yüzey Deformasyonlarını Gösteren İnterferogramlar

Düşey yönlü yüzey deformasyonlarını modelleyebilmek için üç ayrı epoktaki sentinel uydu görüntüleri kullanılmıştır. Söz konusu radar görüntülerinin elde edilme tarihlerine ait bilgiler bölüm 4.2’de verilmiştir. Bu tez çalışmasında kullanılan 3 radar görüntüsünden 3 ayrı interferogram oluşturulmuştur. Elde edilen interferogramlar sırasıyla Şekil 4.13, Şekil 4.16 ve Şekil 4.19’da gösterilmiştir.

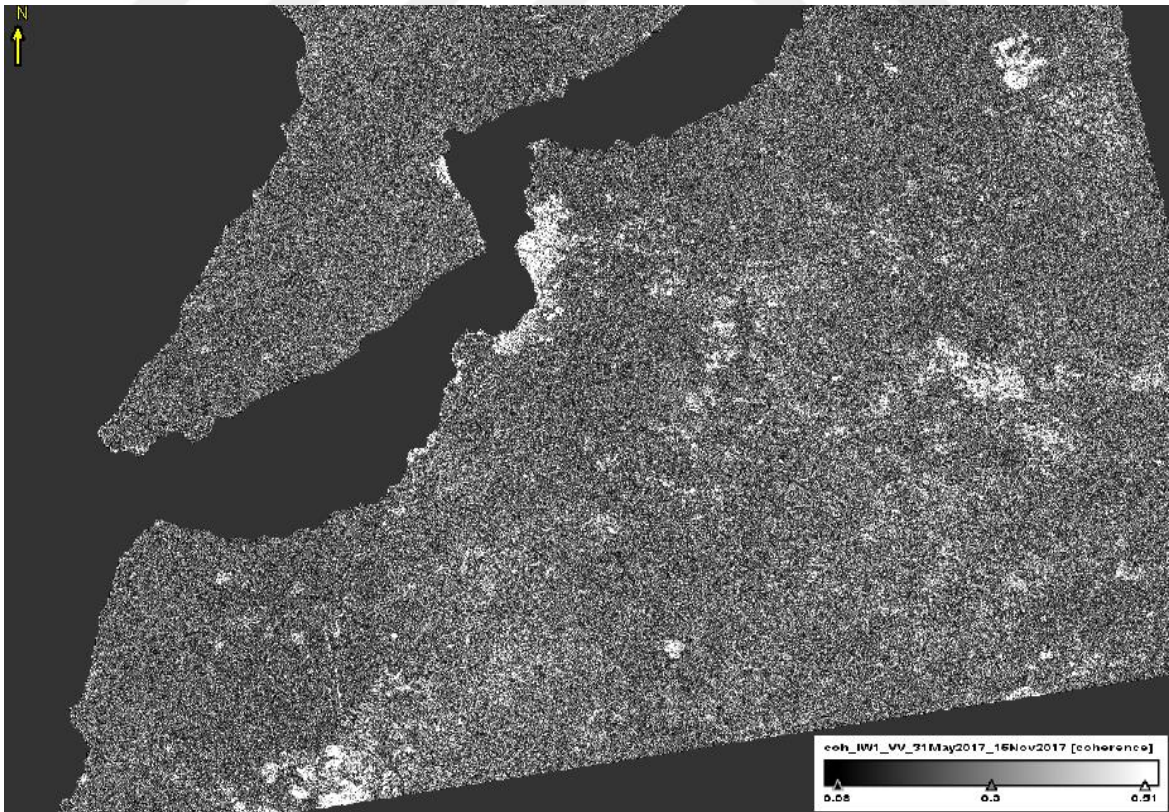
İnterferogramlarda faz bilgisinin bulunduğu bantların yanı sıra benzeşim ve çözümlenmiş faz bilgilerinin yer aldığı diğer bantlar da yer almaktadır. İnterferogramlar arasındaki benzeşim bilgisi ise bölüm 4.2’de verilmiştir. Radar görüntülerinin elde edilmesi sırasındaki atmosferik etkiler, görüntüler arasındaki dik baz mesafesi ve zamansal korelasyon gibi bozucu etkiye neden olan parametreler benzeşimi etkilemektedir. Oluşturulan interferogramlarda faz değerleri Kuzey Biga Yarımadası, Çanakkale şehir merkezi ve Terzioğlu Yerleşkesi yakınlarında sistematik renk değişimleri olarak görülmektedir.



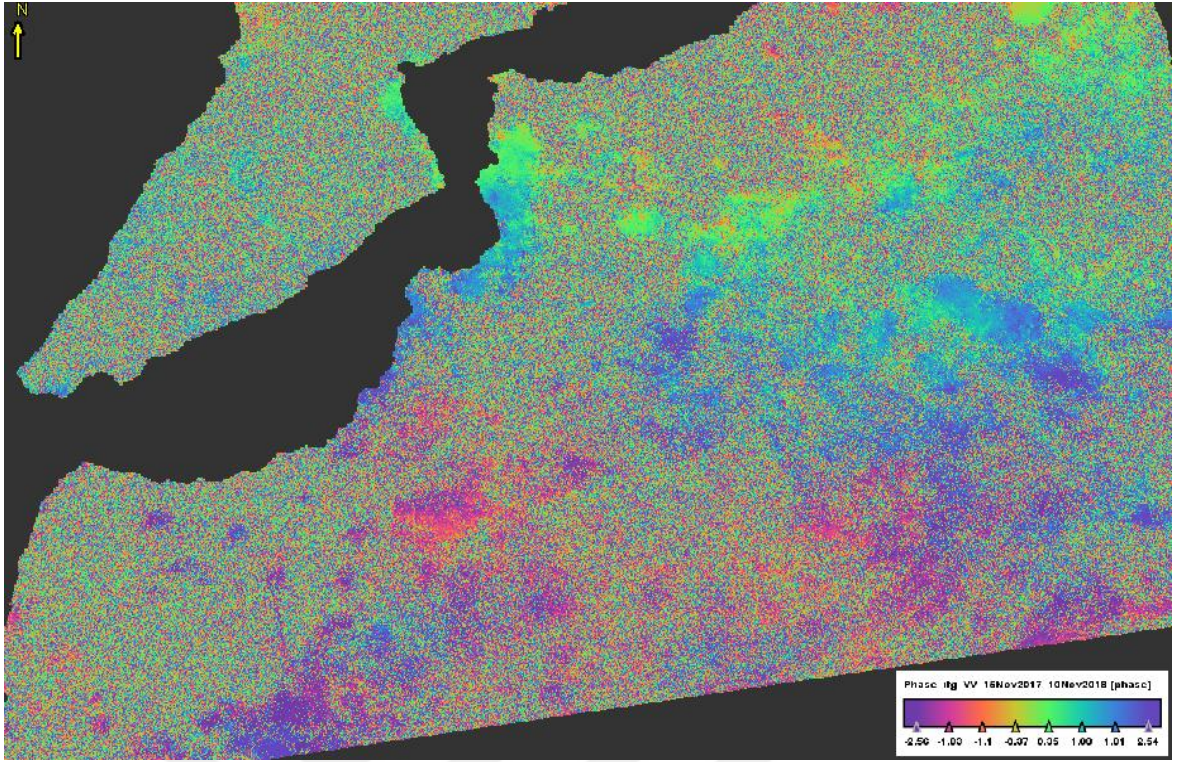
Şekil 4.13. 31 Mayıs 2017 – 15 Kasım 2017 tarihli radar görüntülerinden elde edilen interferogram faz bilgisi



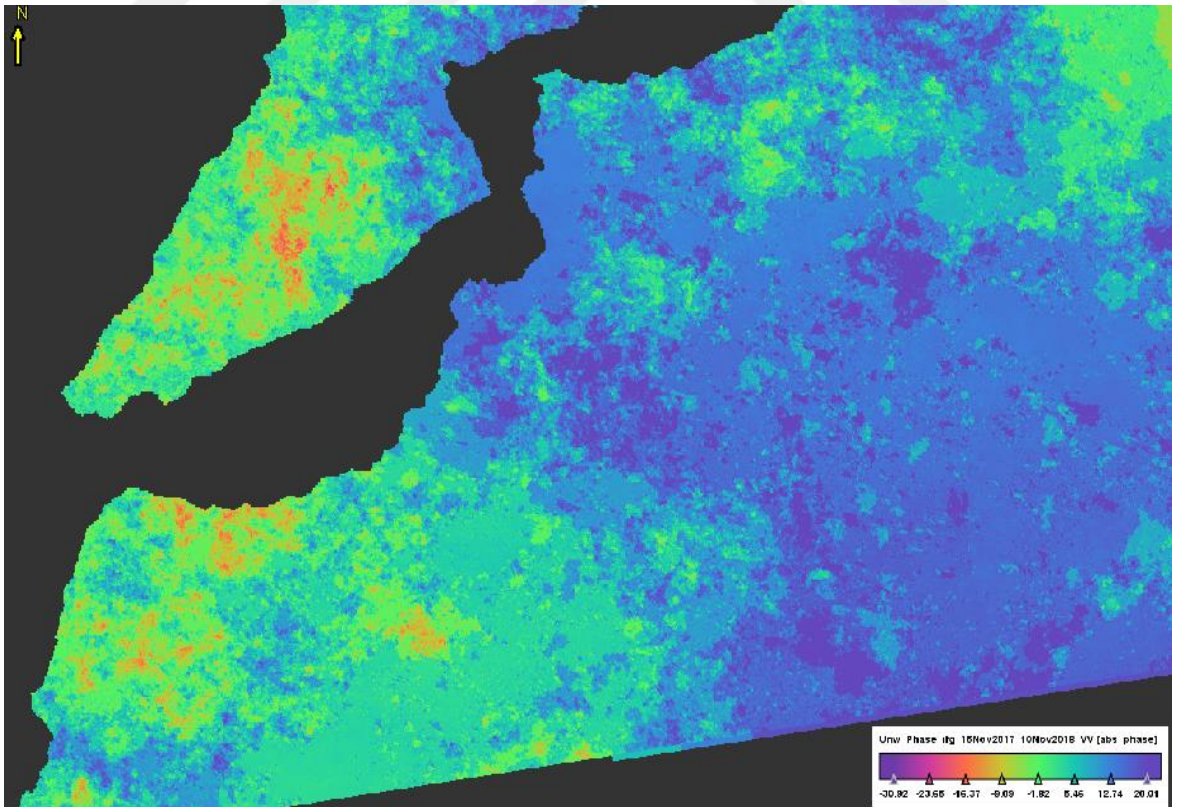
Şekil 4.14. 31 Mayıs 2017 – 15 Kasım 2017 tarihli radar görüntülerinden elde edilen interferogram çözömlenmiş (unwrapped) faz bilgisi



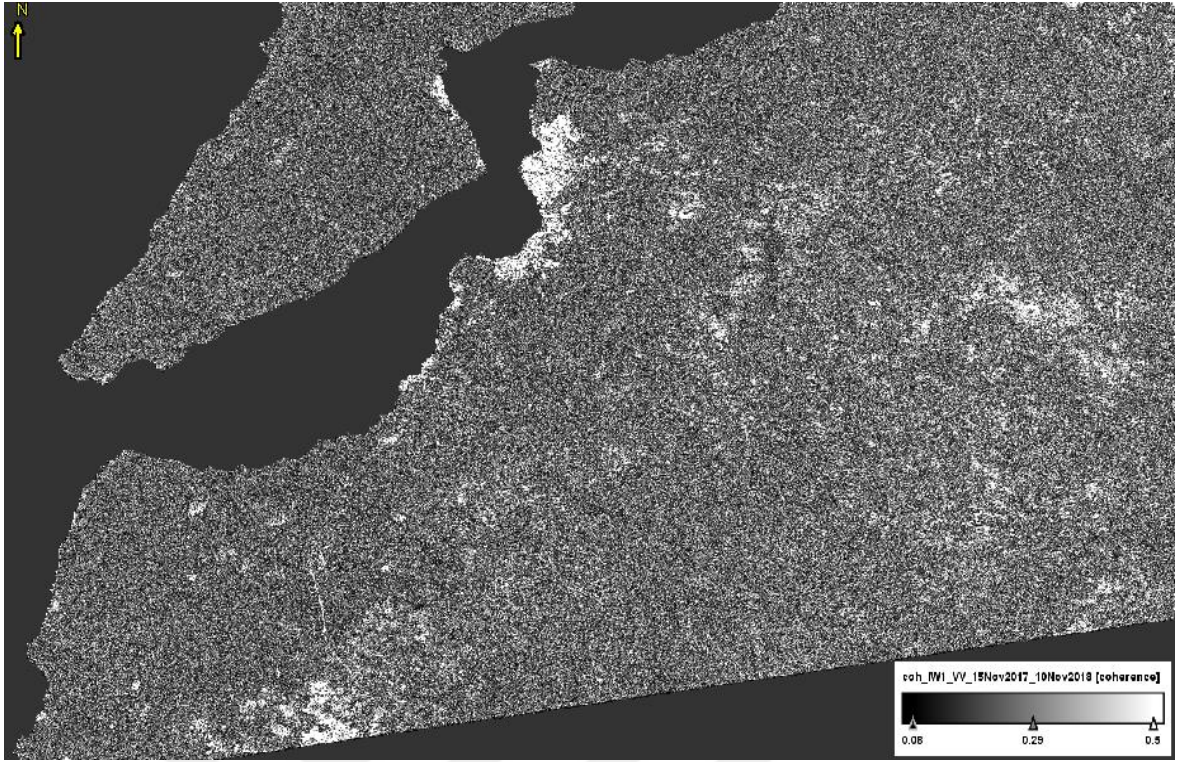
Şekil 4.15. 31 Mayıs 2017 – 15 Kasım 2017 tarihli radar görüntülerinden elde edilen interferogram benzeşim (coherence) bilgisi



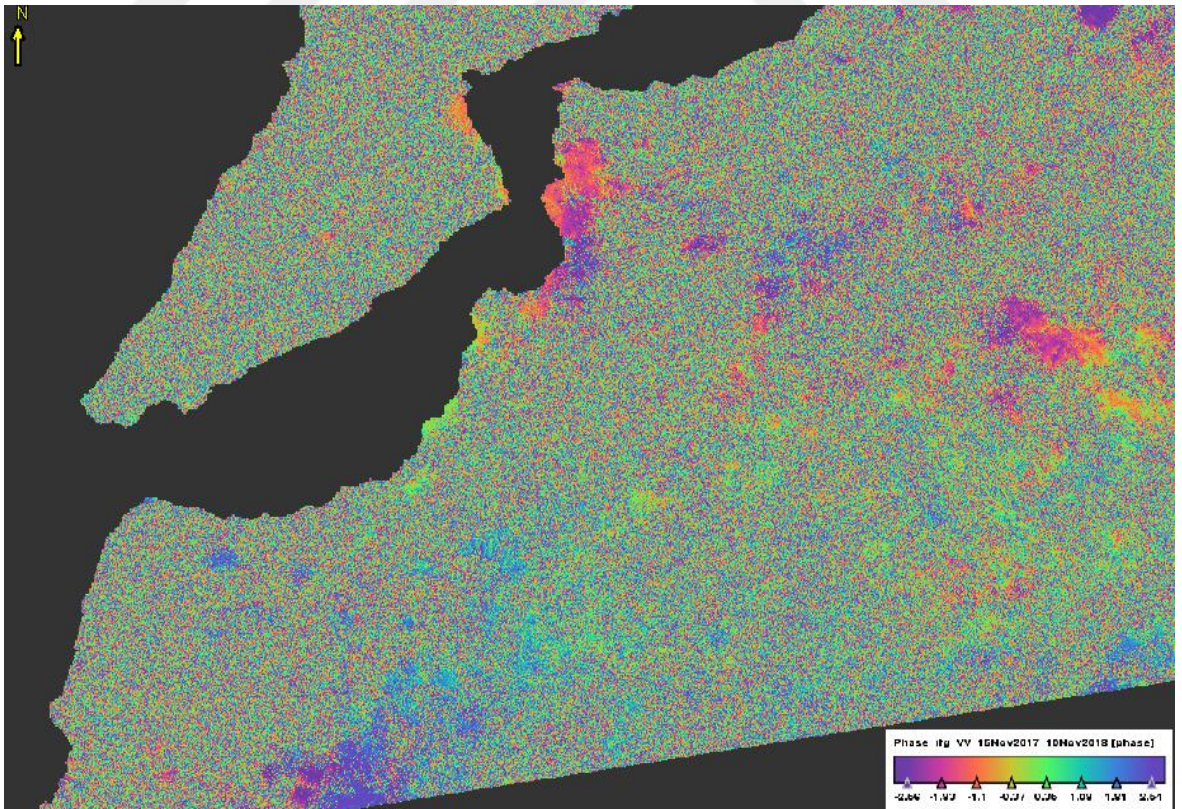
Şekil 4.16. 15 Kasım 2017 – 10 Kasım 2018 tarihli radar görüntülerinden elde edilen interferogram faz bilgisi



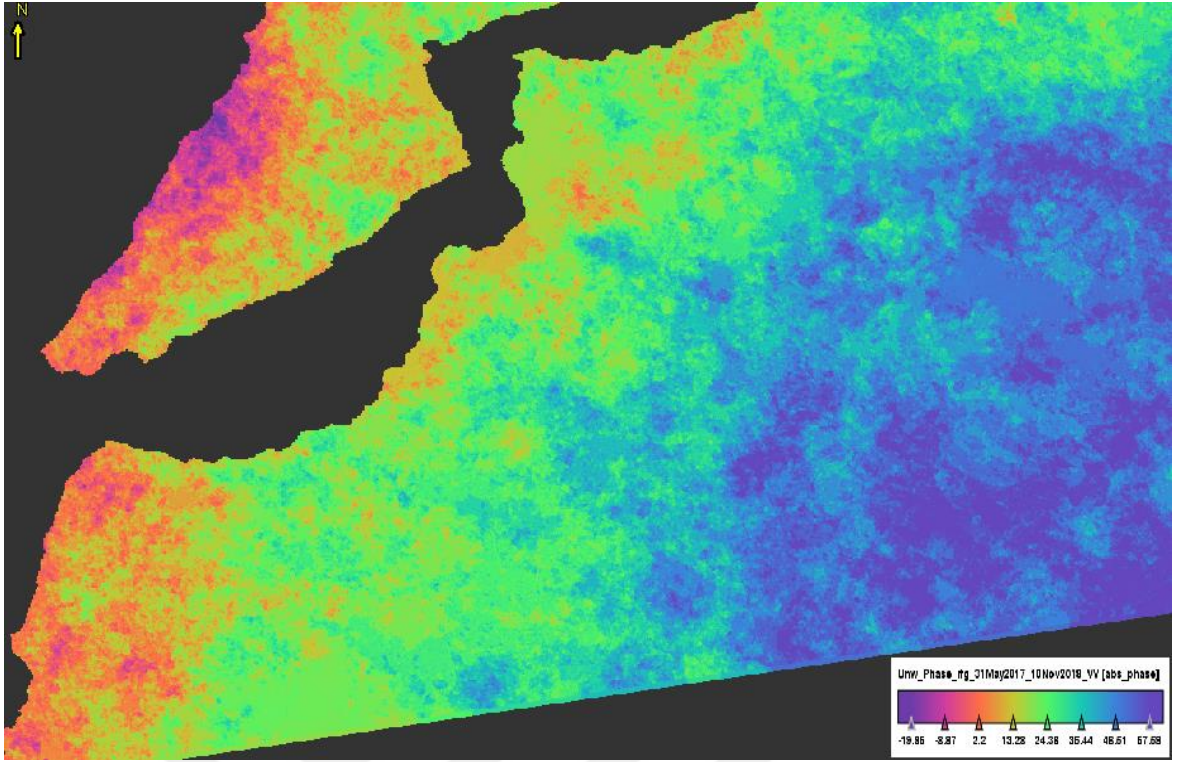
Şekil 4.17. 15 Kasım 2017 – 10 Kasım 2018 tarihli radar görüntülerinden elde edilen interferogram çözümlenmiş (unwrapped) faz bilgisi



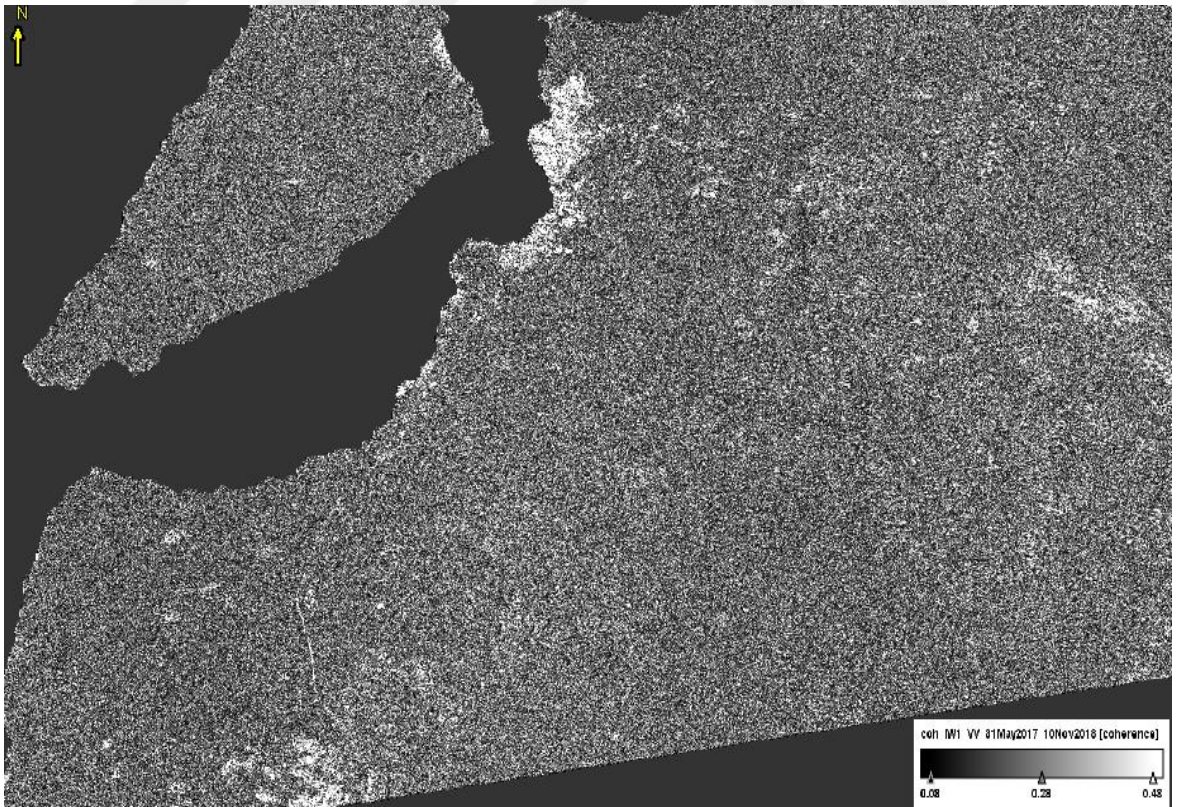
Şekil 4.18. 15 Kasım 2017 – 10 Kasım 2018 tarihli radar görüntülerinden elde edilen interferogram benzeşim (coherence) bilgisi



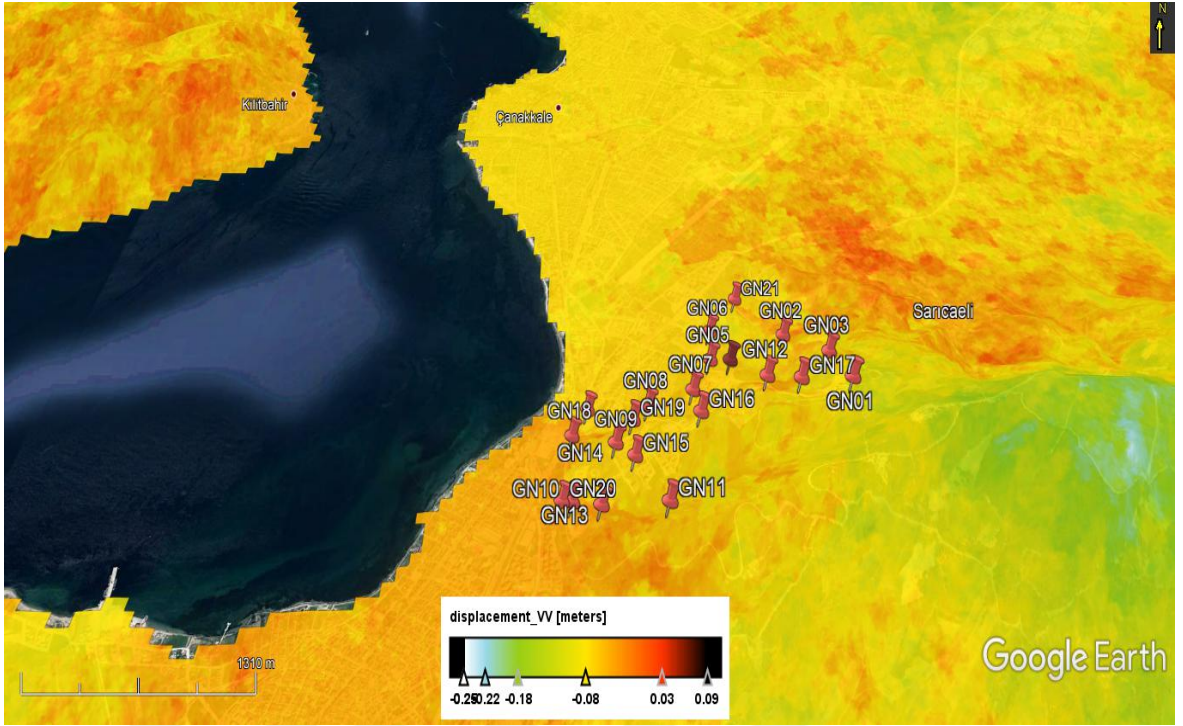
Şekil 4.19. 31 Mayıs 2017 – 10 Kasım 2018 tarihli radar görüntülerinden elde edilen interferogram faz bilgisi



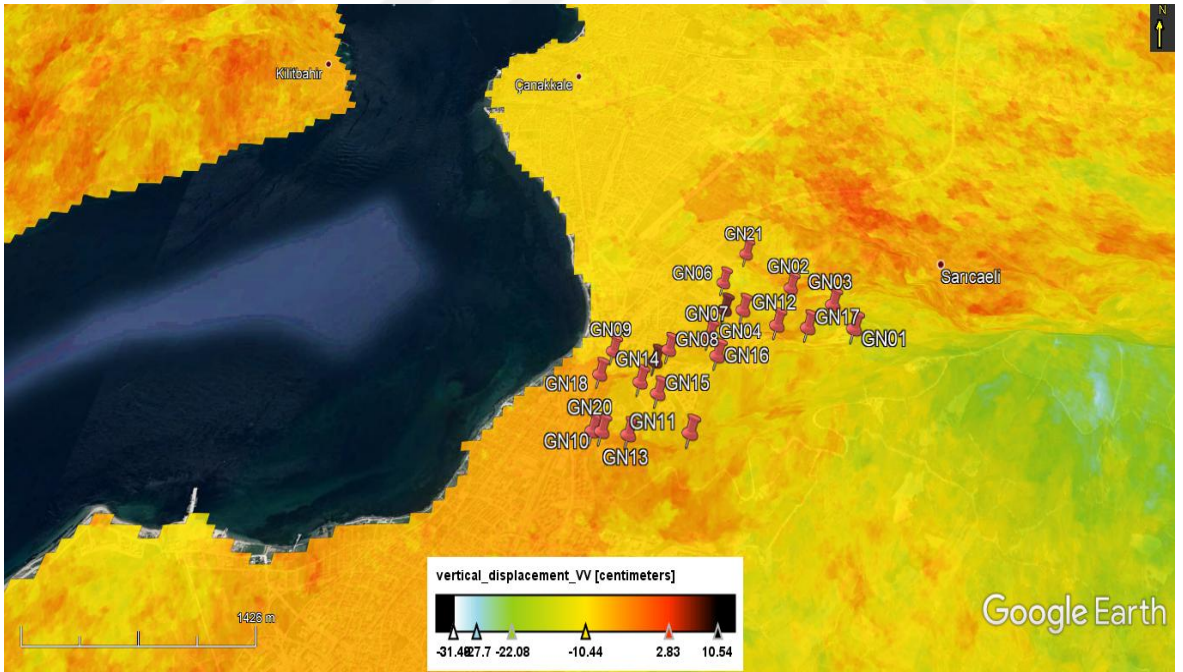
Şekil 4.20. 31 Mayıs 2017 – 10 Kasım 2018 tarihli radar görüntülerinden elde edilen interferogram çözömlenmiş (unwrapped) faz bilgisi



Şekil 4.21. 31 Mayıs 2017 – 10 Kasım 2018 tarihli radar görüntülerinden elde edilen interferogram benzeşim (coherence) bilgisi



Şekil 4.22. 31 Mayıs 2017 – 10 Kasım 2018 tarihli radar görüntülerinden elde edilen uydu bakış doğrultusundaki yer değişimi ve Terzioğlu Yerleşkesindeki GPS noktaları (yer değiştirme katmanı saydamlaştırılmıştır)



Şekil 4.23. 31 Mayıs 2017 – 10 Kasım 2018 tarihli radar görüntülerinden elde edilen uydu bakış doğrultusu verilerinden interferogram bant formülü ile türetilen düşey yöndeki yer değişimi ve Terzioğlu Yerleşkesindeki GPS noktaları (yer değiştirme katmanı saydamlaştırılmıştır)

InSAR tekniđi kullanılarak elde edilen dűsey yĐnlű yer deđiřtirmeler radar platformunun bakıř dođrultusunda meydana gelen deđiřiklikleri temsil etmektedir. SNAP programı içerisinde bulunan bant forműlleri dűzenlenerek uydu bakıř dođrultusundaki yer deđiřtirmeler dűsey yer deđiřtirme bilgilerine dĐnűřtűrűlműřtűr. Sonuç gĐrűntű Őekil 4.23'te gĐsterilmiřtir.

#### **4.5. Jeodezik Dűsey Deformasyon Belirleme**

##### **4.5.1. GNSS Kontrol Ağı Ve Nirengi Ağının Tesisi, GNSS Ve Yersel lmelerinin Yapılması**

Proje kapsamında Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Terziođlu Yerleřkesinde oluřturulması planlanan st Derece Kampűs Nirengi Ađı; niversitemiz Yapı İřleri Daire Bařkanlıđının teknik desteđi ile tesis edilmiřtir (Őekil 4.24). Planlama ařamasında noktaların niversitemiz lisans ve lisansűstű programlarında eđitim ve arařtırma amacıyla kullanılabilirliđinin yanı sıra Yapı İřleri Daire Bařkanlıđı tarafından da kullanılması hedeflenmiřtir. Bu kapsamda niversitemiz Terziođlu Yerleřkesi'nde toplam 21 pilyeden oluřan st Derece Kampűs Nirengi Ađının istikřaf ve tesisi Bűyűk lekli Harita ve Harita Bilgileri retim YĐnetmeliđi esaslarına gĐre tamamlanmıřtır (Őekil 4.25).

Bilindiđi gibi jeodezinin temel amacı, yeryuvarının geometrik ve fiziksel Őeklinin belirlenmesidir. Bu amaca yĐnelik olarak tűm yeryuvarı veya bir kısmı jeodezik ađ noktalarının ű boyutlu koordinatları ile tanımlanır. Çalışma kapsamında st derece kampűs nirengi ağı noktalarının uydu teknikleri ile ölçmeleri tamamlanmıştır. lmelere başlamadan önce pilye bĐlgelerinde istikşaf çalışması yapılmış ve mevcut personel, arazi ve teçhizat gĐz nűne alınarak planlama yapılmıştır. Genel olarak beton pilye biçiminde konumlandırılan referans nokta isimleri 4 karakterli kısaltmalarla IGS formatında GN01, GN02, ..., GN21 biçiminde isimlendirilmiştir. Noktaların yaklaşık coğrafı koordinatları izelge 4.3'te verilmektedir.

Çizelge 4.3. Üst derece ağı oluşturan pilyelerin coğrafi koordinatları

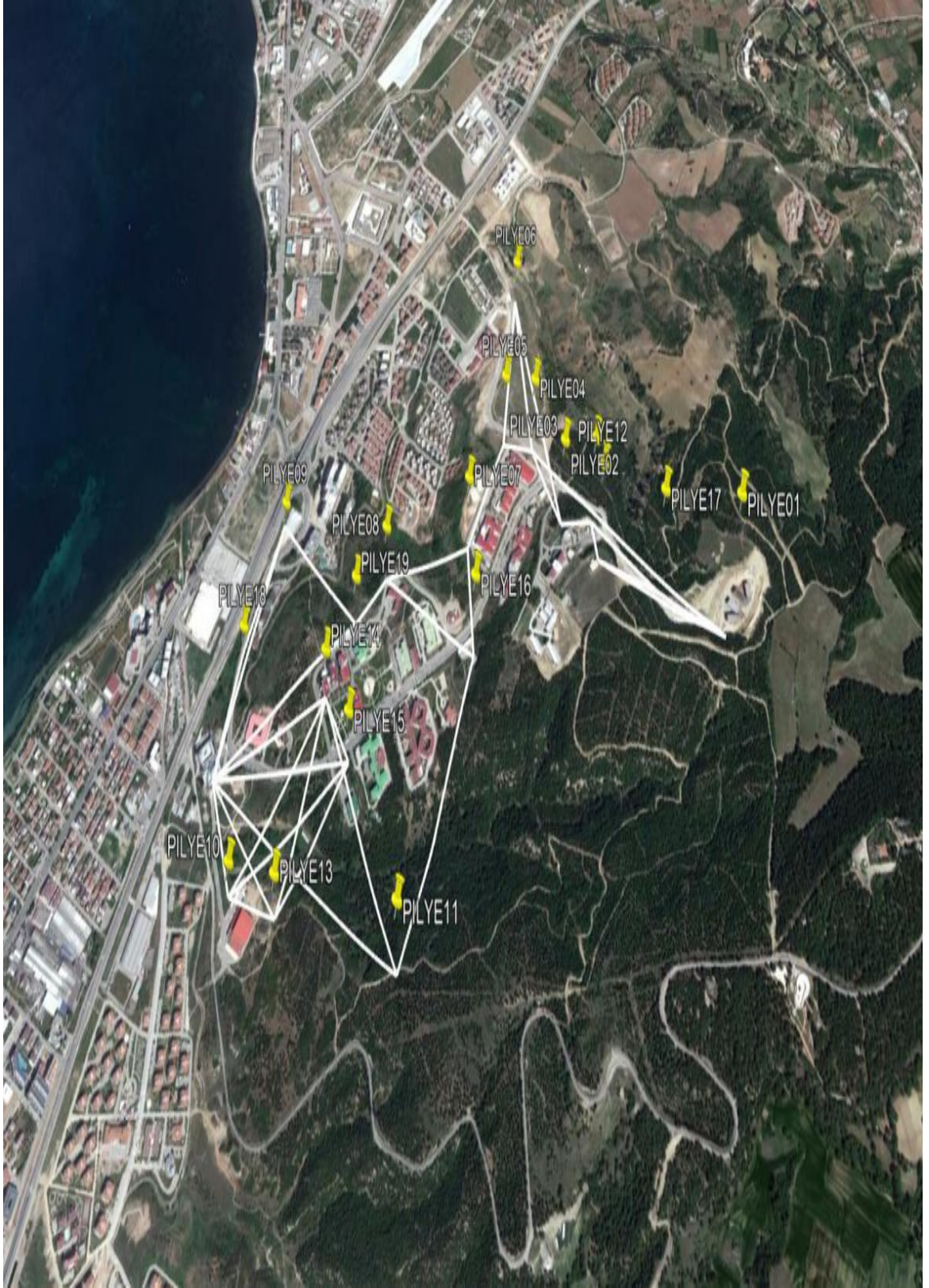
<b>Pilye No</b>	<b>Coğrafi Enlem</b>	<b>Coğrafi Boylam</b>
GN01	40°06'38.25231"	26°25'50.75494"
GN02	40°07'02.88261"	26°25'39.05110"
GN03	40°06'49.04107"	26°25'47.82482"
GN04	40°06'55.46543"	26°25'22.60499"
GN05	40°06'56.82438"	26°25'17.16092"
GN06	40°07'11.88221"	26°25'19.29346"
GN07	40°06'49.03139"	26°25'11.47767"
GN08	40°06'47.50716"	26°24'58.97212"
GN09	40°06'53.50400"	26°24'42.05754"
GN10	40°06'28.74873"	26°24'38.08270"
GN11	40°06'22.07444"	26°25'02.87983"
GN12	40°06'46.18670"	26°25'30.92157"
GN13	40°06'26.62319"	26°24'45.78128"
GN14	40°06'38.92785"	26°24'49.75993"
GN15	40°06'35.24701"	26°24'54.83246"
GN16	40°06'40.38164"	26°25'12.52540"
GN17	40°06'43.41560"	26°25'39.32417"
GN18	40°06'45.65216"	26°24'37.69132"
GN19	40°06'44.46523"	26°24'54.62802"
GN20	40°06'29.29131"	26°24'35.35369"
GN21	40°07'22.27828"	26°25'28.50687"

Jeodezik ölçme yöntemlerine dayalı olarak jeodezik ağların tesisi ve nokta sıklaştırma çalışmalarında kullanılan yöntemlerden birisi de GPS/GNSS yöntemidir. GPS yöntemi klasik yersel ölçme yöntemlerine göre birçok faydasının yanı sıra getirdiği doğruluk değerleri sayesinde pek çok mesleki problemin çözümünde araç olarak kullanılmaktadır. Planlama, istikşaf ve inşaat çalışmalarının ardından, proje ekibi bir araya gelerek GPS/GNSS gözlemi yapılacak noktalara yönelik bir planlama çalışması başlatmıştır. Yapılan bu planlama neticesinde her bir ölçme gününde 2'şer kişilik ekiplerin oluşturulmasına karar verilmiştir.

GPS/GNSS ölçmeleri projenin yürütüldüğü kurum olan Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Harita Mühendisliği Bölümü bünyesinde bulunan SATLAB marka SL500 ve SL600 model GPS/GNSS alıcıları ve SOUTH Galaxy G1 GPS/GNSS alıcıları ile gerçekleştirilmiştir. GPS/GNSS ölçmelerine ilişkin diğer anahtar parametreler Çizelge 4.4'te verilmektedir. Her bir noktada 30 saniyede bir kayıt alınmak suretiyle gözlemler yapılmıştır.

Çizelge 4.4. GPS/GNSS ölçmelerine ilişkin anahtar parametreler

<b>Lokasyon</b>	Terzioğlu Yerleşkesi
<b>Oturum türü</b>	Statik
<b>Alıcı tipi</b>	GPS/GNSS Alıcısı
<b>Anten tipi</b>	Entegre Anten
<b>GPS ölçüleri</b>	C1, P2, L1, L2, S1, S2
<b>Veri toplama aralığı</b>	30 saniye
<b>Uydu yükseklik açısı</b>	5°
<b>Açıklama</b>	Kampüs alanına tesis edilen GPS/GNSS izleme ağındaki pilye noktaları.



Şekil 4.24. Üst derece kampüs nirengi ağı



Şekil 4.25. ÇOMÜ Terzioğlu Yerleşkesinde tesis edilmiş pilyelerden örnekler

#### 4.5.2. GNSS Ve Nirengi Ağı Dengelemesi

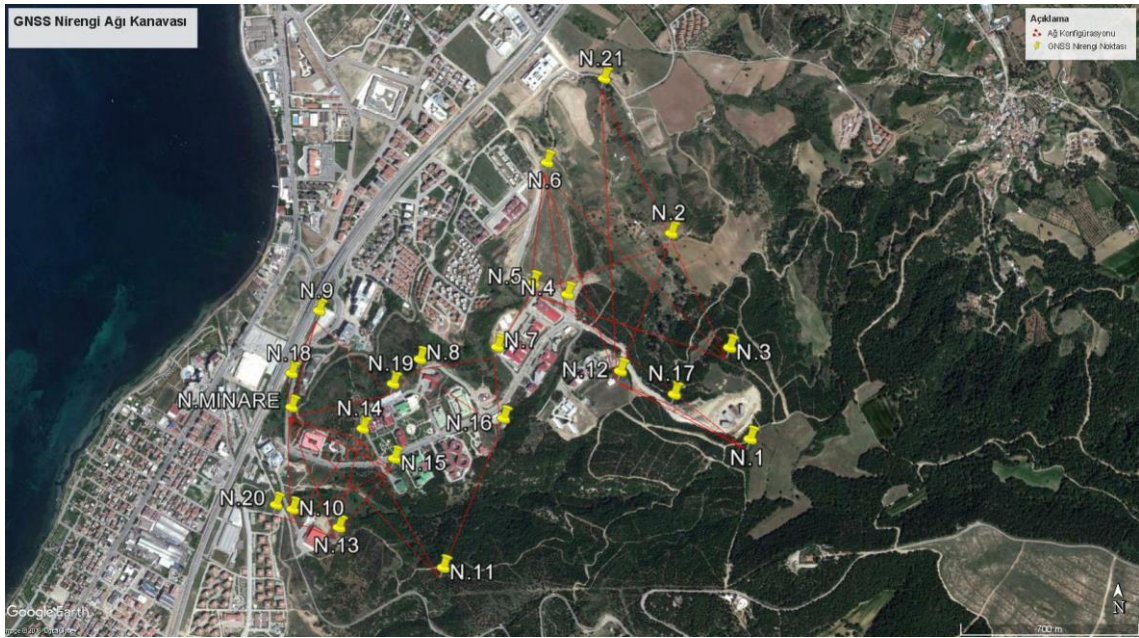
GPS/GNSS verileri Bernese v.5.0 (Hugentobler ve ark., 2005) bilimsel yazılımında değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmede izlenen işlem adımları aşağıdaki gibidir:

- Hassas Yörünge Bilgisi: Uluslararası GPS servisi (IGS) tarafından hazırlanan SP3 (Standard Product 3) formatlı hassas yörünge bilgisi dosyası SOPAC (Scripts Orbit and Permanent Array Center) adresinden alınmıştır.
- Yer Dönme Parametreleri: (ERP; Earth Rotation Parameters), USNO\_bull\_b (United States Naval Observatory\_bulletin\_b) değerlerinden alınarak kullanılmıştır.
- Referans Ağı: Ölçü kampanyaları ITRF 2008'e göre değerlendirilmiştir.
- IGS İstasyonları: Değerlendirmeye Türkiye ve çevresindeki IGS global izleme ağından 16 istasyon dahil edilmiştir. Bu istasyonlar ANKR, ARTU, BOR1, BRUS, BUCU, GRAS, GRAZ, IRKT, ISTA, JOZE, KIT3, KOSG, MADR, MATE, METS, NICO, Nssp, NYAL, ONSA, ORID, SOFI, TRAB, TUBI, VILL, WTZR, ZECK, ZIMM arasından seçilmiştir. İstasyon seçiminde ilgili ölçme periyodunda eğer SOPAC arşivinde ilgili IGS istasyonunun verisi mevcutsa istasyon veri setine dahil edilmiştir. IGS istasyonlarının yanı sıra Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenen COMU-2014-241 no'lu ve "ÇOMÜ Sabit GNSS İstasyonu ile GPS Zaman Serilerinin Gözlem ve Değerlendirilmesi" başlıklı bilimsel araştırma projesi ile yeni kurulan COMU sabit GNSS istasyonunda sağlanan veriler de kullanılmıştır. Ayrıca proje kapsamında her bir heyelan alanı çevresinde tesis edilen iki nokta da ölçme ve değerlendirmelere dahil edilmiştir.
- Radyasyon ve Basınç Modeli: SOPAC tarafından geliştirilen dokuz parametrelilik standart Berne modeli kullanılmıştır.
- Okyanus Yüklemesi: Scherneck modeli ile çalışılmıştır.
- Troposfer Modeli: Zenith gecikme bilinmeyenleri Saastamoinen önsel standart troposfer modeline dayalı olarak hesaplanmıştır.
- Veri değerlendirmede, L1 ve L2 taşıyıcı dalga fazlarının iyonosferden bağımsız LC (L3) doğrusal kombinasyon modeli tercih edilmiştir. Anten faz merkezleri için yüksekliğe dayalı modelleme kullanılmıştır.
- Bernese v.5.0 yazılımı çözümleri sonrasında elde edilen çözümler 16 global IGS noktasından yararlanarak 7 parametrelilik (3 öteleme, 3 dönüklük ve 1 ölçek) dönüşüm ile ITRF referans sistemine tanımlanmıştır.

Çizelge 4.5. Üst derece ağı oluşturan pilyelerin ITRF koordinatları

<b>Pilye No</b>	<b>Sağa Değer (m)</b>	<b>Yukarı Değer (m)</b>	<b>Ort. Yükseklik (m)</b>
GN01	451469.246	4441967.746	264.572
GN02	451196.962	4442729.218	160.436
GN03	451401.987	4442300.957	231.618
GN04	450806.033	4442502.961	150.286
GN05	450677.386	4442545.714	147.322
GN06	450730.905	4443009.827	88.124
GN07	450541.235	4442306.225	144.119
GN08	450244.778	4442261.150	116.996
GN09	449845.439	4442448.755	49.165
GN10	449746.250	4441685.831	75.574
GN11	450332.180	4441476.101	147.363
GN12	451001.126	4442215.494	198.710
GN13	449928.145	4441619.065	95.436
GN14	450024.875	4441997.966	111.057
GN15	450144.258	4441883.644	112.535
GN16	450564.307	4442039.272	168.671
GN17	451199.563	4442128.739	209.976
GN18	449740.437	4442207.259	57.962
GN19	450141.286	4442168.001	109.883
GN20	449681.729	4441702.995	70.788
GN 21	450951.146	4443329.067	92.980

Bu temel stratejiye göre GPS/GNSS kampanyalarından sağlanan veriler değerlendirilmiştir. Elde edilen baz bileşenleri; ANKR, ARTU, BOR1, BRUS, BUCU, COMU, GRAS, GRAZ, IRKT, ISTA, JOZE, KIT3, KOSG, MADR, MATE, METS, NICO, NSSP, NYAL, ONSA, ORID, SOFI, TRAB, TUBI, VILL, WTZR, ZECK, ZIMM noktaları sabit alınarak zorlamasız klasik dengelemeye dayalı olarak en küçük kareler yöntemiyle dengelenmiştir. Üst Derece Kampüs Nirengi Ağına ilişkin dengelenmiş nokta koordinatları daha sonra Uluslararası Yersel Referans Ağına dönüştürülmüştür.



Şekil 4.26. GNSS nirengi ağı kanavas ve ağ konfigürasyonu

Matematiksel temelleri bölüm 3.4.1’de açıklandığı üzere söz konusu deformasyonlar statik deformasyon modeli ile incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda nirengi ağında bulunan her bir ölçme noktası için deformasyon modeli oluşturulmuştur. İstatistiksel testler uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre ağda bulunan hareketli noktalar belirlenmiştir. Bu sonuçlar Çizelge 4.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. Terzioğlu heyelanı mikro-jeodezik izleme ağı I. ve III. epoklar arası üç boyutlu deformasyon analizi sonuçları

<b>Obje Nokta No</b>	<b>d<sub>x</sub> (cm)</b>	<b>d<sub>y</sub> (cm)</b>	<b>d<sub>z</sub> (cm)</b>	<b>d (mm)</b>	<b>Test Büyüküğü</b>	<b>Eşik Değeri</b>	<b>KARAR: Hipotez (d=0)</b>
GN01	3.22	2.59	0.75	4.20	2.81	2.7	+
GN02	3.44	7.40	-4.09	9.13	4.80	2.7	+
GN03	0.57	2.06	-3.29	3.92	2.15	2.7	-
GN04	0.70	1.70	4.63	4.98	3.03	2.7	+
GN05	-1.40	4.86	-3.82	6.34	3.49	2.7	+
GN06	2.48	0.96	2.46	3.62	2.18	2.7	-
GN07	4.71	-3.00	-0.21	5.59	4.16	2.7	+
GN08	4.89	-0.67	-3.65	6.14	4.76	2.7	+
GN09	0.17	3.27	-0.35	3.29	2.46	2.7	-
GN10	1.65	-1.74	-4.71	5.29	3.45	2.7	+
GN11	2.89	5.12	3.72	6.96	4.03	2.7	+
GN12	-0.65	1.74	-4.10	4.50	3.44	2.7	+
GN13	1.69	1.36	-6.55	6.90	3.75	2.7	+
GN14	2.07	2.15	-6.23	6.91	4.41	2.7	+
GN15	2.56	0.79	-8.15	8.58	6.26	2.7	+
GN16	-0.85	-0.73	-6.28	6.38	3.75	2.7	+
GN17	5.04	2.41	-8.88	10.49	6.78	2.7	+
GN18	3.92	4.90	4.44	7.69	5.32	2.7	+
GN19	-6.13	5.90	-5.39	10.07	5.94	2.7	+
GN20	-2.28	-1.11	-3.02	3.94	2.43	2.7	-

## BÖLÜM 5

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışma alanı olan Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Terzioğlu Yerleşkesi'nin bulunduğu bölgede düşey yönlü yüzey deformasyonlarının belirlenmesi amacıyla İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar ve GPS/GNSS tekniği kullanılmıştır. Söz konusu çalışma alanı heyelan bölgelerine yakın ve tektonik hareketlerin etkisi altında olmakla beraber özellikle kış aylarında ağır yağış yüküne maruz kalan, Çanakkale Boğazı kıyısında bulunan eğimli bir yamaç üzerinde bulunmaktadır. Yerleşke içerisinde ve çevresinde geçmiş yıllara göre artan yapılaşma da zemine etki eden yükü arttırmıştır. Söz konusu tüm etkenler çalışma alanındaki düşey yönlü yüzey deformasyonlarının nedenleri olarak düşünülmektedir.

Bu tez çalışmasında İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar tekniğinin uygulanmasına olanak verecek yapıda olan tek bakışlı karmaşık radar görüntüleri tek polarizasyon “VV” kullanılarak çalışma alanına ait interferogramlar oluşturulmuştur. Elde edilen interferogramların yorumlanması sonucu çalışma alanında deformasyonlara rastlanmıştır. İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar tekniği ile çalışma alanını kapsayacak şekilde zemine tesis edilen GPS noktalarının olduğu yerlerde yaklaşık olarak 2 yıllık bir zaman dilimi içerisinde 10.44 cm'ye varan zemin çökmeleri ve 3 cm'ye varan zemin yükselmeleri gözlemlenmiştir.

İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar tekniğini desteklemek amacıyla Terzioğlu Yerleşkesi içerisinde topoğrafyayı en iyi şekilde yansıtabilecek biçimde karakteristik noktalardan oluşan GPS ağı zemine tesis edilmiştir. Yapılan kampanya tipi ölçmelerle nokta bazlı olarak zemindeki hareketlilik gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre yer yer 8.88 cm'ye varan zemin çökmeleri gözlemlenmiştir. Bazı noktalarda ise 4.63 cm'ye varan zemin yükselmeleri görülmüştür.

Düşey yönlü yüzey deformasyonları InSAR tekniği ile incelenmiş olup alınan sonuçlar çalışma alanında yapılan GPS ölçmeleriyle de uyum göstermektedir.

İnterferogram oluşturulurken sayısal yükseklik modeli altlığı olarak SRTM 3 saniyelik sayısal yükseklik modeli kullanılmıştır.

Bölüm 4.4'te gösterilen benzeşim haritalarının yorumlanması ile interferogramların birtakım bozucu etkiler altında olduğu düşünülmektedir. Bunun nedeni olarak bitki örtüsü, topoğrafik etkiler ve atmosferik etkiler gösterilebilir. Benzeşimin artırılıp daha verimli deformasyon sonuçlarına ulaşabilmek için çalışma alanı bozucu etkilerin daha az olduğu,

topoğrafya özelliklerine uygun farklı uydu misyonu verileri ile interferogramlar oluşturularak incelenmelidir.

Tez çalışmamızın ana konusu olan InSAR tekniği ile düşey yönlü yüzey deformasyonlarının belirlenmesinde önceki bölümlerde belirtildiği üzere uygun aralıkta dik baz mesafesine sahip olan, uygun zamansal korelasyonu ve atmosferik koşulları içeren yapay açıklıklı radar görüntülerinin kullanılabilirliği gösterilmiştir.

Sonuç olarak çalışma alanında GPS/GNSS tekniği ve İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar tekniği ile yapılan gözlemler, InSAR tekniğinin maruz kaldığı bozucu etkilere rağmen tutarlılık göstermektedir. Zemin yükselmesi şeklinde yaklaşık olarak yıllık 2 cm'lik ve zemin çökmesi şeklinde yaklaşık olarak yıllık 5 cm'lik bir düşey yönlü yüzey deformasyonu çalışma alanının üniversite ve hastane gibi birimleri kapsamaması nedeniyle bölgede yaşayanlar için risk oluşturmaktadır. İlerleyen zaman içerisinde Terzioğlu Yerleşkesi içerisindeki ve çevresindeki yapılar açısından olumsuz yönde etki oluşturabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

## KAYNAKLAR

- Açıkgöz M., 2010. Türkiye Ulusal Yatay Kontrol Ağı'nın Kuzeybatı Bölümünde Yer Kabuğu Hareketleri Nedeniyle Oluşan Deformasyonun Yersel Ve GPS Ölçüleri İle Araştırılması. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye.
- Akoğlu A. M., 2001. 17 Ağustos 1999 İzmit Depremi Postsismik Deformasyonunun Sentetik Açıklık Radar İnterferometrisi Yöntemi İle İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye.
- Altın M. U., 2013. Yapay Açıklıklı Radar Görüntülerindeki Atmosferik Bozuklukların Küresel Konum Belirleme Sistemi İle Düzeltilmesi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye.
- Atasoy V., Öztürk E., 1984. Jeodezik Deformasyon Ölçmeleri ve Sonuçların Yorumu. TMMOB Harita Kadastro Mühendisliği Dergi. 50-51.
- Ayan T., 1982. Jeodezik Ağlarla Deformasyon Analizine Genel Bakış, İTÜ Dergisi, 40 (1).
- Ayan T., Hekimoğlu Ş., Aktaş O., 1993. Birden Fazla Uyuşumsuz Ölçümün Robust Kestirim Yöntemleriyle Teşhisi ve Uyuşumsuz Ölçü Testleriyle Belirlenmesi, Prof. Wolf Symposium-YTÜ, 3-5 November.
- Badur Ö., 2011. Jeotermal Alanlarda Çökme-Depremsellik Ve SAR Girişimölçer Çalışmaları. X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir. 177-191.
- Bamler R., Hartl P., 1998. Synthetic Aperture Radar Interferometry. Inverse Problems, 14 (4): R1-R54.
- Burgmann R., Rosen P. A., Fielding E. J., 2000. Synthetic Aperture Radar Interferometry To Measure Earth's Surface Topography And Its Deformation. Annual Review of Earth Planetary Science, 13: 169-209.
- Canaslan F., 2010. InSAR Yöntemiyle Düşey Yönlü Yüzey Deformasyonlarının Belirlenmesi: Konya Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Türkiye.
- Dawoud S., 2012. GNSS Principles And Comparison. Potsdam University.
- Diggelen F. V., 1997. GPS And GPS+ GLONASS RTK. ION-GPS, September.

- Doğan E. Z., 2002. Dilatometre İle Zemin Deformasyon Özelliklerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Arazi Çalışması. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye.
- Doğanalp S., Turgut B., 2009. Statik Ve Kinematik Modelde Deformasyon Analizi. Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi, 24 (2): 31-44.
- Duman T. Y., Çan T., Emre Ö., 2011. 1/1.500.000 Türkiye Heyelan Envanteri Haritası, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Özel Yayınlar Serisi, Ankara, Türkiye. 27.
- Dupraz H., Niemeier W., 1979. Un critère pour l'analyse des reseaux géodésique de contrôle. Mensuration, Photogrammetrie, Génie rural, 77 (4): 70-76.
- El-Mowafy A., 2000. Performance Analysis Of The RTK Technique In An Urban Environment. Australian Surveyor, 45 (1): 47-54.
- El-Rabbany A., 2002. Introduction To GPS: The Global Positioning System. Artech house. 2-3.
- Emre Ö., Duman T. Y., Özalp S., Elmacı H., Olgun Ş., Şaroğlu F., 2013. 1/1.250.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Özel Yayınlar Serisi, Ankara, Türkiye. 30.
- Erdoğan S., 2005. Burdur Fethiye Fay Zonu Tektonik Hareketlerinin Gps İle Belirlenmesi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye.
- Erol S., 2008. GPS Ve Nivelman Ölçüleriyle Deformasyonların Belirlenmesi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye.
- Farrell J., Barth M., 1999. The Global Positioning System And Inertial Navigation. New York: Mcgraw-hill. 340 p.
- Gabriel A. K., Goldstein R. M., Zebker H. A., 1989. Mapping Small Elevation Changes Over Large Areas: Differential Radar Interferometry. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 94 (B7): 9183-9191.
- Gens R., 1998. Quality Assessment Of SAR Interferometric Data. ITC.
- Gökalp E., 1999. Gerçek Zamanlı Kinematik GPS Konumlarının Statik GPS ile Test

- Edilmesi. Harita Dergisi, (122).
- Gökalp E., Güngör O., 2001. RTK GPS'in İmar Uygulamalarında Kullanılması. HKMO Dergisi, (87): 39.
- Gündüz A. M., 2013. Klasik RTK ve Ağ-RTK Yöntemlerinin Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Türkiye.
- Hanssen R. F., 2001. Radar Interferometry: Data Interpretation And Error Analysis. Springer Science & Business Media.
- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E., 2007. GNSS–Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, And More. Springer Science & Business Media.
- Hole J. K., Hooper A., Wadge G., Stevens N. F., 2006. Measuring Contemporary Deformation In The Taupo Volcanic Zone, New Zealand, Using SAR Interferometry. In Fringe 2005 Workshop. 610.
- Hugentobler U., Dach R., Fridez P., Meindel M., 2005. Bernese GPS software 5.0. Astron. Inst., Univ. of Berne, Switzerland. (Electronic version available at <http://www.bernese.unibe.ch/docs/DOCU50.pdf>).
- İnal C., 2000. Lisans ve Yüksek Lisans Ders Notları, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Kahveci M., 1997. Türkiye Koşullarında Yapılan GPS Gözlemlerinde Ortam Etkilerinin Araştırılması. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye.
- Klobuchar J. A., 1996. Ionospheric Effects On GPS. Global Positioning System: Theory And Application. 485-515.
- Massonnet D., Thierry R., 1993. Radar Interferometry: Limits And Potential. IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing, 31 (2): 455-464.
- Massonnet D., Feigl K. L., 1998. Radar Interferometry And Its Application To Changes In The Earth's Surface. Reviews Of Geophysics, 36 (4): 441-500.
- Mekik Ç., 1999. GPS'e Atmosferin Etkileri. Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası Dergisi, (86): 14-20.

- Mekik C., Arslanoglu M., 2009. Investigation On Accuracies Of Real Time Kinematic GPS For GIS Applications. *Remote Sensing*, 1 (1): 22-35.
- Mierlo J. V., 1978. A Testing Procedure For Analysing Geodetic Deformation Measurements. In *Proceedings Of The 2nd FIG Symposium On Deformation Measurements By Geodetic Methods*. Bonn, Germany. 321-353.
- Moss J. L., McGuire W. J., Page D., 1999. Ground Deformation Monitoring Of A Potential Landslide At La Palma, Canary Islands. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 94 (1-4): 251-265.
- Murray M., Stanford University, 1997. *Crustal Site, Network, And Data Requirements For Volcano Deformation Studies; Stanford University Continuously Operated DGPS Network*. Washington, DC: The National Academies Press.
- National Research Council, 1997. *The Global Positioning System For The Geosciences: Summary and Proceedings Of A Workshop On Improving The GPS Reference Station Infrastructure For Earth, Oceanic, and Atmospheric Science Applications*. Washington, DC: The National Academies Press, 21-22.
- Nordin Z., Yahya M. H., Akib W. A. W., Amin Z. M., 2008. The Utilization Of RTK-GPS For Real-Time Structural Health Detection. In *International Conference On Civil Engineering (ICCE08)*, Pahang, Malaysia.
- Özbey V., 2017. Orta Marmara Fayının Kinematığının GPS Ölçmeleriyle Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye.
- Palma J. L., 2011. *InSAR: Deformation, Mapping and Modeling*. <https://vhub.org/resources/817>.
- Parkinson B. W., Spilker J. J., Axelrad P., Enge P., 1996. *Global Positioning System: Theory And Applications (Volume I)*. Washington, D.C: American Institute Of Aeronautics And Astronautics. 38-40.
- Rizos C., 1997. *Principles And Practice Of GPS Surveying*. Kensington, N.S.W. : School of Geomatic Engineering, University of New South Wales. 555 p.

- Rizos C., Trinder J. C., Alac R., 2015. Investigation Of The Izmit Fault Deformation Using Integration Of Interferometric SAR With Global Navigation Satellite System (GNSS) Positioning And Geophysical Seismic Modelling. *Geotectonic Research*, 97.
- Schuler T., 2001. On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation. Doctor's Thesis, Studiengang Geodsie und Geoinformation, Universitt der Buundeswehr Munchen, 73: 364.
- Sezer L. İ., 2006. Kaz Dağı Yöresinde Deprem Aktivitesi Ve Riski. *Ege Coğrafya Dergisi*, 15 (1-2): 17-29.
- Sickle J. V., 2008. GPS For Land Surveyors. CRC Press. 368 p.
- Solaas G. A., 1994. ERS-1: Interferometric Baseline Algorithm Verification. ESA/ESRIN. 69 p.
- Tiryakioğlu İ., Güllü M., Baybura T., Erdoğan S., 2005. GPS Sinyal Yansımalarının (Multipath) Nokta Konumlarına Etkisinin Araştırılması. *Bildiriler Kitabı, İkinci Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, İstanbul, Türkiye*. 534-543.
- Trouvé E., Pétillet I., Bolon P., Julea A., Yan Y., Gay M., Vanpé J. M., 2010. Radar-coding And Geocoding Lookup Tables For The Fusion Of GIS And SAR Data In Mountain Areas. *IEEE Geoscience And Remote Sensing Letters*, 7 (2): 309-313.
- Tut İ., 2009. Hızlı Statik GPS Çözümlerinin Güvenilirliği. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye.
- Yiğitbaş E., 2016. Jeolojik–Antropojenik Sebep–Sonuç İlişkileri Açısından Çanakkale Heyelanlarına Toplu Bakış. *Çanakkale Heyelanları, AFAD Çanakkale-Altın Kalemler, İzmir*. 9-25.
- Watkins M., NASA Jet Propulsion Laboratory, 1997. Crustal Strain Monitoring Requirements. Washington, DC: The National Academies Press.
- Xiong S., Muller J. P., Li G., 2017. The Application Of ALOS/PALSAR InSAR To Measure Subsurface Penetration Depths In Deserts. *Remote Sensing*, 9 (6): 638.
- Zebker H. A., Rosen P. A., Hensley S., 1997. Atmospheric Effects In Inteferometric Synthetic Aperture Radar Surface Deformation And Topographic Maps. *Journal of Geophysical Research*, 102 (B4): 7547–7563.

Zou W., Li Y., Li Z., Ding X., 2009. Improvement Of The Accuracy Of InSAR Image Co-Registration Based On Tie Points – A Review. Sensors, 9 (2): 1259-1281.

<http://yebilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx>



## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Oğuz ÇINAR

Doğum Yeri : Mersin

Doğum Tarihi : 12/07/1993

### EĞİTİM DURUMU

Lisans Öğrenimi : Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Geomatik Mühendisliği, 2016

Yüksek Lisans Öğrenimi : Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Coğrafi Bilgi Teknolojileri Anabilim Dalı, 2019

Bildiği Yabancı Diller : İngilizce

### BİLİMSEL FAALİYETLERİ

- a) Yayınlar -SCI -Diğer
- b) Bildiriler -Uluslararası -Ulusal

Trakya Üniversiteler Birliği III.Lisansüstü Öğrenci Kongresi – Yapay Açıklıklı Radar Ve GPS/GNSS Verileri İle Düşey Yönlü Yüzey Deformasyonlarının Modellenmesi - Poster Sunum, 2018

- c) Katıldığı Projeler

Güncel Heyelanların Jeodezik Tekniklerle Modellenmesi : Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Terzioğlu Yerleşkesi Örneği, TÜBİTAK Projesi, 1919B011502502 – 2209 A, 2016

### İŞ DENEYİMİ

Çalıştığı Kurumlar ve Yıl :

Enerjeo Kemaliye Jeotermal Enerji Santrali, Manisa – 2017

HMC Yapı A.Ş., Gökçeada – 2017

ABG Harita Planlama Mühendislik Ltd. Şti., 1915 Çanakkale Boğaz Köprüsü – 2018

Mersin Büyükşehir Belediyesi Etüt ve Projeler Dairesi Başkanlığı, Mersin – 2018

## **İLETİŞİM**

E-posta Adresi : [oguzcinar3@gmail.com](mailto:oguzcinar3@gmail.com)

