

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOK ZAMANLI VE ÇOK FREKANSLI SAR-GNSS VERİLERİ İLE
HEYELANLARIN ARAŞTIRILMASI: BEYLİKDÜZÜ-ESENYURT ÖRNEĞİ

GEOMATİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ÇAĞLAR BAYIK

ARALIK 2018

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOK ZAMANLI VE ÇOK FREKANSLI SAR-GNSS VERİLERİ İLE
HEYELANLARIN ARAŞTIRILMASI: BEYLİKDÜZÜ-ESENYURT ÖRNEĞİ

GEOMATİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

Çağlar BAYIK

DANIŞMAN: Doç. Dr. Saygın ABDİKAN

ZONGULDAK

Aralık 2018

KABUL:

Çağlar BAYIK tarafından hazırlanan “Çok Zamanlı ve Çok Frekanslı SAR-GNSS Verileri ile Heyelanların Araştırılması: Beylikdüzü-Esenyurt Örneği” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir.
19/12/2018

Danışman: Doç. Dr. Saygın ABDİKAN

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü

Üye: Prof. Dr. Uğur DOĞAN

Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü

Üye: Doç. Dr. Füsün BALIK ŞANLI

Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Eray KÖKSAL

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin KEMALDERE

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

..../..../2018

Doç. Dr. Ahmet ÖZARSLAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”


Çağlar BAYIK

ÖZET

Doktora Tezi

ÇOK ZAMANLI VE ÇOK FREKANSLI SAR-GNSS VERİLERİ İLE HEYELANLARIN ARAŞTIRILMASI: BEYLİKDÜZÜ-ESENYURT ÖRNEĞİ

Çağlar BAYIK

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Saygın ABDİKAN

Aralık 2018, 113 sayfa

Doğal afetlerin önemli bir parçası olan heyelanların belirlenmesi ve izlenmesi oldukça önemlidir. Heyelanın mevcut durumunun belirlenmesi ve hareketlerinin periyodik olarak izlenmesi için farklı periyotlardaki koşulları (alansal genişlik, hareket hızı, yüzey topografisi, yağış miktarı veya toprak nemi) birbirleriyle karşılaştırmak gerekmektedir. Bu çalışmada Beylikdüzü-Esenyurt bölgesinde yoğun faaliyetlerden dolayı meydana gelen heyelanların InSAR tekniği yardımıyla belirlenmesi ve elde edilen sonuçların GNSS ölçümleri ile karşılaştırılması amaçlanmıştır. Çalışmada çok frekanslı (C band, L band) uydu algılayıcıları ve periyodik olarak gerçekleştirilmiş GNSS ölçümleri kullanılmıştır.

Çalışmada Büyükçekmece ve Küçükçekmece gölleri arasında bulunan yarımadaının tamamı için 174 adet Sentinel-1 yükselen yörünge ve 169 adet alçalan yörünge C band görüntüsü ile 19 adet ALOS -2 yükselen yörünge L band görüntüsü kullanılmıştır. Yapılan değerlendirmeler Sentinel görüntülerinde her iki yörünge için Ocak 2015-Ekim 2018 yılları arasındaki periyotta, ALOS-2 için Temmuz 2016-Ekim 2018 yılları arasındaki periyotta yapılmıştır.

ÖZET (devam ediyor)

Heyelan davranışlarının belirlenebilmesi için yapılaşmanın çok olduğu alanların yoğunluğunun fazla olması sebebiyle PSI tekniğinden yararlanılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre Sentinel-1 iki yörüngesi için bölgede -4 mm ile 3 mm arasında yatay hareketler belirlenirken -2 mm ile 4 mm arasında düşey hareketler belirlenmiştir. L band etkisiyle ALOS-2 değerlendirme sonuçları Sentinel-1 değerlerine göre daha yüksek elde edilmiştir. ALOS-2 görüntüleri tek yörünge elde edildiğinden yalnızca bakış yönünde (LOS) -6 mm ile 10 mm arasında düşey hareketler belirlenmiştir.

Çalışmada elde edilen PSI sonuçlarının doğrulanması amacıyla 3 aylık periyotlarda 3 kampanya GNSS ölçümü gerçekleştirilmiştir. GNSS InSAR sonuçları karşılaştırıldığında bazı noktalarda benzer yöne doğru hareket verirken çoğunda farklı yönde hareket olduğu gözlenmiştir. Bunun en olası nedeni GNSS noktalarının InSAR noktaları ile aynı konumda olmaması ve lokal hareketlerin meydana gelebilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Heyelan jeolojik formasyon, yağış ve eğim gibi etkili parametrelere bağlı olarak gerçekleştiği için lokal alanlarda farklı davranışlar göstermektedir.

Bu tez çalışmasının ana amaçları doğrultusunda, heyelanların belirlenmesi ve izlenmesi için elde edilen sonuçlar, çok zamanlı ve çok frekanslı InSAR tekniklerinin yeteneklerini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: InSAR, GNSS, Heyelan, Çok zamanlı SAR, Zaman serisi

Bilim Kodu: 616.01.00

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

INVESTIGATION OF THE LANDSLIDES WITH MULTI-TEMPORAL AND MULTI-FREQUENCY SAR-GNSS DATA: BEYLİKDÜZÜ-ESENYURT EXAMPLE

Çağlar BAYIK

**Bulent Ecevit University
Graduate School of Natural Applied Sciences
Department of Geomatics Engineering**

**Thesis Advisor: Assoc. Prof. Saygın ABDİKAN
December 2018, 113 pages**

The detection and monitoring of landslides which is a kind of natural disaster is very significant. It is required to compare certain conditions with each other in different periods (aerial coverage, velocity of the movement, surface topography, precipitation or soil moisture) for determination of present situation and periodic movement of the landslide. The aim of this study is to detect landslides caused by intense activity using InSAR technique and compare the results with GNSS observations in Beylikdüzü-Esenyurt region. In this study, multi frequency satellite sensors (C band, L band) and periodic GNSS observations were employed.

In this study, for the entire peninsula between Büyükçekmece and Küçükçekmece lakes 174 Sentinel-1 images with ascending orbit, 169 C band images with descending orbit and 19 ALOS-2 L band images with ascending orbit were used. The evaluations were carried out in the period between January 2015-October 2018 for Sentinel-1 imagery and July 2016- October 2018 for ALOS-2 imagery respectively. Due to the fact that research area is covered by dense settlement area, PSI technique was utilized to determine the landslide behaviors.

ABSTRACT (continued)

According to the results, for both orbits of the Sentinel-1, the horizontal movement was determined in the range of -4 mm-3 mm, and the vertical movement was determined in the range of -2 mm-4 mm. The amount of movement determined using ALOS-2 data was higher with the affect of L band. Since the ALOS-2 data was obtained only in one orbit, vertical movement determined in the Line of Sight in the range of -6 mm-10 mm.

In order to validate the PSI results obtained in the study, 3 GNSS measurement campaigns were performed in three month periods. When GNSS and InSAR results were compared, it was observed that the movement direction was similar for some points. However, this case was not observed for most of the points. The most likely reason for this case is that GNSS points are not exactly at the same position as the InSAR points and the possiblity of local movements. The landslides show different behaviors in local areas beucause they occur due to affective parameters such as geological formation, precipitation and slope.

In accordance with the main purposes of this thesis, the results obtained for the determination and monitoring of landslides reveal the capabilities of multi-temporal and multi-frequency InSAR techniques.

Key Words: InSAR, GNSS, Landslides, Multi temporal SAR, Time series

Science Code: 616.01.00

TEŞEKKÜR

Bilgi ve tecrübesi ile her zaman yanımda olan, beraber çalışmaktan büyük keyif aldığım ve memnuniyet duyduğum, manevi desteği ve ilgisi ile karşılaştığım tüm zorlukları kolaylıkla aşmamı sağlayan tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Saygın ABDİKAN'a,

Tez çalışmam süresince bilgi ve deneyimleri ile yolumu aydınlatan ve desteğini her zaman yanımda hissettiğim Sayın Doç. Dr. Füsün BALIK ŞANLI'ya,

Desteklerinden dolayı Tez izleme komite üyesi Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin KEMALDERE'ye,

İstanbul'da gerçekleştirilen arazi çalışmalarım sırasında sağladığı büyük katkılardan dolayı Başta Arş. Gör. Alpay ÖZDEMİR'e, Sayın Prof. Dr. Uğur DOĞAN'a, Arş. Gör. Zeynel Abidin POLAT'a, Arş. Gör. Hüseyin DUMAN'a, Arş. Gör. Batuhan KILIÇ'a, Arş. Gör. Müslüm HACAR'a, Sayın Prof. Dr. Doğan Uğur ŞANLI'ya ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Kurtuluş Sedar GÖRMÜŞ'e,

Analizlerimdeki desteklerinden dolayı Sayın Mahmut ARIKAN'a,

Tez çalışmam sırasındaki desteklerinden dolayı çalışma arkadaşlarım Arş. Gör. Mustafa ÖZENDİ'ye, Arş. Gör. Gökhan GÜRBÜZ'e, Harita Yüksek Müh. Ali CAM'a ve Arş. Gör. Samed İNYURT'a,

Zonguldak'ta geçirdiğim süre içerisinde varlıkları ile bana destek olan, yanlarında olmaktan ve yanımda olmalarından büyük mutluluk duyduğum arkadaşlarıma,

Hayatımın her aşamasında sevgi ve destekleri ile güç bulduğum başta babam ve annem olmak üzere tüm aileme,

Bu zorlu sürecin her aşamasını benimle paylaşan ve beni destekleyen çok sevgili eşim ve arkadaşım Gülçin DEMİREL BAYIK’a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasında kullanılan ALOS-2 görüntüleri için JAXA-Japonya Havacılık ve Uzay Araştırma Ajansı’na (Proje No: 3210) teşekkür ederiz.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xix
 BÖLÜM 1 GİRİŞ	 1
1.1. LİTERATÜR ÖZETİ	1
1.2. TEZ ÇALIŞMASININ KONUSU VE AMACI.....	4
1.3. TEZ ÇALIŞMASININ ARAŞTIRMA SORULARI.....	5
1.3.1. Tez Bölümlerinin İçeriği.....	6
 BÖLÜM 2 SAR TEKNOLOJİSİ VE TEMEL PRENSİPLERİ.....	 9
2.1. YAPAY AÇIKLIKLI RADAR (SAR).....	9
2.1.1. Geometrik Bozukluk Çeşitleri	13
2.1.2. InSAR Temelleri ve Geometrisi	15
2.3. DİFERANSİYEL InSAR TEKNİĞİ (DInSAR).....	19
2.3.1. Yörünge Etkileri.....	20
2.3.2. Atmosferik Etkiler	21
2.3.3. Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) Etkileri.....	22
2.3.4. InSAR Korelasyon Bozukluğunun Etkileri	23
2.3.5. Yüzey Deformasyonun Geri Kazanımı.....	26

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

BÖLÜM 3 INSAR TEKNİĞİ METODOLOJİSİ	29
3.1. ÇOK ZAMANLI INSAR TEKNİKLERİ.....	29
3.1.1. Kalıcı Yansıtıcı İnterferometre (Persistent Scatterer Interferometry-PSI)	30
3.1.2. Kısa Baz Uzunluğu İnterferometre (Small Baselines Interferometry-SBAS)	32
3.2. StaMPS ADIMLARI	33
BÖLÜM 4 BEYLİKDÜZÜ-ESENYURT HEYELAN ALANI VE KULLANILAN VERİLER	35
4.1. ÇALIŞMA ALANI.....	35
4.1.1. Jeolojik Yapı	36
4.2. PROBLEM TANIMI VE HEYELANLAR.....	38
4.2.1. Heyelanların Sınıflandırılması	40
4.3. KULLANILAN VERİLER	43
4.3.1. Sentinel-1 Görüntü Alımı.....	44
4.3.2. ALOS PALSAR-2 Görüntü Alımı.....	46
BÖLÜM 5 BULGULAR VE TARTIŞMA	49
5.1. SENTINEL-1 ÇOK ZAMANLI INSAR ANALİZİ.....	49
5.1.1. Sentinel-1 Yükselen Yörünge PSI Sonuçları	49
5.1.2. Sentinel-1 Alçalan Yörünge PSI Sonuçları.....	53
5.1.3. Sentinel-1 Yatay ve Düşey Yöndeki Hareketlerin Belirlenmesi	56
5.2. ALOS/PALSAR-2 ÇOK ZAMANLI INSAR ANALİZİ.....	58
5.2.1. ALOS/PALSAR-2 Yükselen Yörünge PSI	59
5.3. GNSS ÖLÇMELERİ VE SONUÇLARI.....	63
5.3.1. GNSS Ölçmelerinin Değerlendirilmesi	63
5.3.2. GNSS Ölçülerinin Analizi	66
5.4. PSI VE GNSS SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI	76

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 6 SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	85
KAYNAKLAR.....	89
EK AÇIKLAMALAR.....	101
EK A: Haritalar	101
EK B: GNSS Noktalarına Ait Zaman Serileri.....	106





ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Elektromanyetik spektrum	9
Şekil 2.2 SAR görüntüleme geometrisi	10
Şekil 2.3 Eğik mesafe ve arazi yüksekliğinin neden olduğu radar bozulmaları.....	15
Şekil 2.4 InSAR görüntüleme geometrisi	16
Şekil 2.5 Tekrar geçişli (Repeat-pass) DInSAR geometrisi.....	27
Şekil 3.1 a) Bir pikselde faza katkıda bulunan dağıtılmış PS, b) Baskın PS.....	31
Şekil 3.2 StaMPS adımları (SNAP)	34
Şekil 4.1 Çalışma alanı.....	36
Şekil 4.2 Çalışma alanına ilişkin jeolojik formasyonlar.....	37
Şekil 4.3 Çalışma alanındaki heyelan alanları	38
Şekil 4.4 Çalışma alanında bulunan yollarda meydana gelen deformasyonlar	39
Şekil 4.5 Çalışma alanında bulunan binalarda meydana gelen deformasyonlar	39
Şekil 4.6 Bir heyelanın yapısı ve bölümleri	40
Şekil 4.7 Heyelan tipleri.....	42
Şekil 4.8 Çalışma alanını kapsayan mevcut SAR veri çerçeveleri.....	44
Şekil 4.9 Sentinel-1 uydusu.....	45
Şekil 4.10 Sentinel-1 görüntü alım modları	46
Şekil 4.11 ALOS PALSAR-2 uydusu	47
Şekil 4.12 ALOS PALSAR-2 görüntü alım modları.....	48
Şekil 5.1 Sentinel-1 yükselen yörünge baz mesafeleri.....	50
Şekil 5.2 Sentinel-1 yükselen yörünge verilerinden elde edilen hız alanı (atmosfer, yörünge ve SYM hataları çıkarılmamıştır.)	51
Şekil 5.3 Sentinel-1 yükselen yörünge verilerinden elde edilen hız alanı (atmosfer, yörünge ve SYM hataları çıkarılmıştır.)	52
Şekil 5.4 Sentinel-1 yükselen yörünge verilerinden elde edilen hız alanının standart sapma değerleri	52
Şekil 5.5 Sentinel-1 alçalan yörünge baz mesafeleri.....	53

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

No	Sayfa
Şekil 5.6 Sentinel-1 alçalan yörünge verilerinden elde edilen hız alanı (atmosfer, yörünge ve SYM hataları çıkarılmamıştır.)	54
Şekil 5.7 Sentinel-1 alçalan yörünge verilerinden elde edilen hız alanı (atmosfer, yörünge ve SYM hataları çıkarılmıştır.)	55
Şekil 5.8 Sentinel-1 alçalan yörünge verilerinden elde edilen hız alanının standart sapma değerleri	55
Şekil 5.9 Yükselen ve alçalan yörüngeler boyunca SAR uydusunun görüntüleme geometrisi ve LOS yönündeki yer değişimleri ile 3B hareket bileşenleri arasındaki yansıtma ilişkisi.....	56
Şekil 5.10 Deformasyonun düşey hız alanı	57
Şekil 5.11 Deformasyonun yatay hız alanı.....	58
Şekil 5.12 ALOS-2 yükselen yörünge baz mesafeleri	59
Şekil 5.13 ALOS-2 alçalan yörünge verilerinden elde edilen hız alanı (atmosfer, yörünge ve SYM hataları çıkarılmamıştır.)	60
Şekil 5.14 ALOS-2 yükselen yörünge verilerinden elde edilen hız alanı (atmosfer, yörünge ve SYM hataları çıkarılmıştır.)	61
Şekil 5.15 ALOS-2 yükselen yörünge verilerinden hız alanı (atmosfer, yörünge, SYM hataları ve StaMPS 8. adımı ile elde edilen etkiler çıkarılmıştır.).....	62
Şekil 5.16 ALOS-2 yükselen yörünge verilerinden elde edilen hız alanının standart sapma değerleri	63
Şekil 5.17 Çalışmada kullanılan GNSS noktalarının dağılımı	64
Şekil 5.18 Bernese iş akış şeması-I	65
Şekil 5.19 Bernese iş akış şeması-II.....	65
Şekil 5.20 Bernese iş akış şeması-III	66
Şekil 5.21 IGS referans istasyonları.	67
Şekil 5.22 GRAZ istasyonuna ait zaman serisi.	67
Şekil 5.23 Bursa-Wolf Modeli	68
Şekil 5.24 İstasyonlara ait Tx, Ty ve Tz test değerlerinin grafiksel gösterimi.	70
Şekil 5.25 TERK istasyonuna ait zaman serileri.	71
Şekil 5.26 Gerçekleştirilen ölçümlerden örnekler.	71
Şekil 5.27 GNSS noktaları	72
Şekil 5.28 1. ve 2. kampanya aralığında yatay yer değiştirme vektörleri ve hata elipsleri.....	72
Şekil 5.29 2. ve 3. kampanya aralığında yatay yer değiştirme vektörleri ve hata elipsleri.....	73
Şekil 5.30 1. ve 3. kampanya aralığında yatay yer değiştirme vektörleri ve hata elipsleri.....	74

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

No

Sayfa

Şekil 5.31 1. ve 2. kampanya aralığında düşey yer değiştirme vektörleri ve standart sapmaları	74
Şekil 5.32 2. ve 3. kampanya aralığında düşey yer değiştirme vektörleri ve standart sapmaları	75
Şekil 5.33 1. ve 3. kampanya aralığında düşey yer değiştirme vektörleri ve standart sapmaları	75
Şekil 5.34 Sentinel-1 görüntülerinden elde edilen yatay (doğu-batı) hız alanı	77
Şekil 5.35 Sentinel-1 görüntülerinden elde edilen düşey (çökme-yükselme) hız alanı	77
Şekil 5.36 ALOS-2 görüntülerinden elde edilen LOS yönünde düşey (çökme-yükselme) hareketler	78
Şekil 5.37 Çalışma bölgesine ait yağış miktarları	79
Şekil 5.37 Ölçümlerde hareket trendini koruyan 2 noktaya ait zaman serisi	80
Şekil 5.38 Ölçümlerde hareket trendini koruyamayan 2 noktaya ait zaman serisi	81
Şekil 5.39 Ölçümlerde hareket trendini koruyamayan 2 noktaya ait zaman serisi	82
Şekil 5.40 InSAR sonuçlarının profili	83
Şekil B.1 N021 noktasına ait GNSS ölçümü zaman serisi	106
Şekil B.2 TULP noktasına ait GNSS ölçümü zaman serisi	106
Şekil B.3 N055 noktasına ait GNSS ölçümü zaman serisi	107
Şekil B.4 N110 noktasına ait GNSS ölçümü zaman serisi	107
Şekil B.5 N040 noktasına ait GNSS ölçümü zaman serisi	108
Şekil B.6 N034 noktasına ait GNSS ölçümü zaman serisi	108
Şekil B.7 N030 noktasına ait GNSS ölçümü zaman serisi	109
Şekil B.8 N027 noktasına ait GNSS ölçümü zaman serisi	109
Şekil B.9 N015 noktasına ait GNSS ölçümü zaman serisi	110
Şekil B.10 ISPT noktasına ait GNSS ölçümü zaman serisi	110
Şekil B.11 MGR3 noktasına ait GNSS ölçümü zaman serisi	111
Şekil B.12 H031 noktasına ait GNSS ölçümü zaman serisi	111
Şekil B.13 ISPT2 noktasına ait GNSS ölçümü zaman serisi	112



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 SAR bandlarının frekans ve dalga boyları.	12
Çizelge 2.2 Bazı SAR sistemlerinin polarizasyonları.	13
Çizelge 4.1 Heyelanların Sınıflandırılması	41
Çizelge 4.2 Kullanılan SAR görüntülerinin özellikleri.	43
Çizelge 4.3 Sentinel-1 uydusu genel özellikleri.....	46
Çizelge 5.1 11 IGS istasyonuna ait ITRF2008 epok 2005 koordinat ve hızları.....	68
Çizelge 5.2 2018 116. GNSS günü uyuşum testi	70
Çizelge A.1 Sentinel-1 Yükselen yörünge Master görüntü ve veri kümesi bilgileri	101
Çizelge A.2 Sentinel-1 Alçalan yörünge Master görüntü ve veri kümesi bilgileri	103
Çizelge A.3 ALOS-2 Yükselen yörünge Master görüntü ve veri kümesi bilgileri	105



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

R_g	: Mesafe aralığı çözünürlüğü
c	: Işık hızı
τ_{amp}	: Genlik uzunluğu
$\emptyset$	: Geliş açısı
Az	: Azimut çözünürlüğü
l	: Anten uzunluğu
λ	: Dalgaboyu
$S_{1,2}$	: Radar algılayıcıları
B	: Baz mesafesi
B_{II}	: Baz mesafesine paralel olan bileşen
$B_{\perp}$	: Baz mesafesine dik olan bileşen
$R_{1,2}$	: Algılayıcı ile nesne arasındaki mesafeler
h	: Uydu yüksekliği
δ	: Yol uzunluklarının geometrik farkı
φ_{InSAR}	: İnterferometrik faz
φ_{defo}	: Yüzey (zemin) deformasyonu ile ilgili faz etkisi
φ_{topo}	: Topoğrafik faz etkisi
$\varphi_{yör}$	: Yörünge faz etkisi
$\varphi_{düz}$	: Düzleştirilmiş yeryuvarı fazı
φ_{atm}	: Atmosferik (troposferik, iyonosferik) faz etkisi
φ_{yan}	: Yansıtıcıların elektriksel özellikleri ile ilişkili faz etkisi
$\varphi_{gür}$	: Bileşke gürültü
z	: Referans elipsoidin üzerindeki belirli bir çözünürlük hücresinin yüksekliği
$\Delta\emptyset$	: İki gözlem zamanında görüntüleme veya geliş açılarının farkı
u	: Yer ve radar sensörü arasındaki LOS yönüne yansıtılan 3B yer değişimini

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

$\hat{n}$	: Birim vektör
η	: Uydu azimutu
δ_{LOS}	: Ölçüm hatası
B_c	: Kritik bir dik baz mesafesi
U_n	: Deformasyonunun Kuzey bileşeni
U_e	: Deformasyonunun Doğu bileşeni
U_u	: Deformasyonunun Yukarı bileşeni
ΔH_p	: Yükseklik hatası
$\Delta B_{\perp}$	: Yükseklik hatasından kaynaklı yerel $B_{\perp}$ hatası
$\Delta\varphi_{topo}^{artık}$	: Artık topoğrafik faz etkisi
$\Delta\varphi_{InSAR}$	: Yer değiştirme
φ_{LOS}	: SAR bakış yönünde (LOS) saptanan deformasyon
γ	: Çapraz korelasyon katsayısı
$z_{1,2}$	: Ortak kayıtlı kompleks görüntüler
$*$	: Karmaşık eşlenik
γ_{termal}	: Termal korelasyon bozukluğu
$\gamma_{konumsal}$	: Konumsal korelasyon bozukluğu
$\gamma_{zamansal}$	: Zamansal korelasyon bozukluğu
$\gamma_{yüzeysel}$	: Yüzeysel korelasyon bozukluğu
$\gamma_{hacimsel}$	: Hacimsel korelasyon bozukluğu
SNR	: Sinyal-gürültü oranı
σ_x	: Yatay standart sapma
σ_z	: Düşey standart sapma
φ_{yatay}	: Yatay hareket yönü
$\varphi_{düşey}$	: Düşey hareket yönü
D_A	: Genlik dağılım dizisi
σ_A	: Genlik görüntüsü standart sapması
μ_A	: Genlik görüntüsü
A	: Katsayılar matrisi
t_x, t_y, t_z	: Eksenler boyunca ötelemeler

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	: Eksenler etrafındaki dönüklükler
k	: Ölçek faktörü
V_x, V_y, V_z	: Eksen yönündeki hızlar
T_x, T_y, T_z	: Test değerleri
T_x, T_y, T_z	: Test değerleri
α	: Anlamlılık düzeyi

KISALTMALAR

ALOS PALSAR-2:	Advanced Land Observing Satellite 2
ASTER GDEM:	ASTER Global Digital Elevation Map (ASTER Global SYM)
dB	: Geri saçılma katsayısı
DInSAR	: Differential Interferometric SAR (Diferansiyel İnterferometrik SAR)
DORIS	: Delft Object-Oriented Radar Interferometric Software
ERS 1	: European Remote Sensing 1
ESA	: European Space Agency (Avrupa Uzay Ajansı)
EW	: Extra-Wide swath
GNSS	: Global Navigation Satellite System (Küresel Konumlama Uydu Sistemi)
IGS	: International GNSS Service (Uluslararası GNSS Servisi)
InSAR	: Interferometric SAR (İnterferometrik SAR)
ITRF2008	: International Terrestrial Reference Frame 2008
IW	: Interferometric Wide swath
LOS	: Line of Sight (Uydu bakış yönü)
MTI	: Multi-temporal InSAR (Çok Zamanlı InSAR)
PSI	: Persistent Scatterers InSAR (Kalıcı Yansıtıcı InSAR)
PS	: Persistent Scatterers InSAR (Kalıcı Yansıtıcı)
RADAR	: Radio Detecting and Ranging
ROI_PAC	: Repeat Orbit Interferometry PACkage
SAR	: Synthetic Aperture Radar (Sentetik Açıklıklı Radar)
SBAS	: Small Baseline Subset (Kısa Baz Uzunluğu Tekniği)
SLC	: Single Look Complex
SM	: StripMap

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

SNAP	: Sentinel Application Platform
SNR	: Signal to noise ratio (Sinyal gürültü oranı)
SOPAC	: Scripps Orbit and Permanent Array Center
SRTM	: Shuttle Radar Topography Mission
SYM	: Sayısal Yükseklik Modeli
WGS84	: World Geodetic System 1984 (Dünya Jeodezik Sistemi 1984)
WV	: Wave mode



BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1. LİTERATÜR ÖZETİ

Heyelanların doğal afetlerin önemli bir parçası olmasından dolayı ani kayma hareketlerini tespit edilmesi ve izlenmesi çok önemlidir. Bir heyelan durumunu izlemek ve heyelan etkinliğini değerlendirmek için, farklı periyotlardaki koşullarını (alansal genişlik, hareket hızı, yüzey topografisi veya toprak nemi) karşılaştırmak gerekmektedir. Bir eğim hareketi ile aktif hale gelen yüzeysel yer değişimini ölçebilmek, davranışlarını tanımlamak için en etkili yöntemlerin başında gelir (Farina et al. 2006). Yüzeysel yer değiştirmelerinin belirlenmesi, geleneksel tel ekstensometreler (Corominas et al. 2000), eğim ölçerler (Angeli et al. 2000), Küresel Konumlama Uydu Sistemi (Global Navigation Satellite System-GNSS) (Dogan et al. 2013, Qiu et al. 2018), yükseklik ölçmeleri gibi geleneksel tekniklere dayanmaktadır.

Teknoloji ile hareketlerin detaylı analizi yeryüzünün üç boyutlu olarak belirlenmesini gerektirir (Malet et al. 2002). Hava veya yersel fotogrametriye ek olarak, yer kaymalarının mekansal deformasyonunu incelemek için uydu görüntüleri yardımıyla ilgili noktaya ait koordinatlar, yükseklik bilgileri ve sayısal yükseklik modelleri elde edilebilmektedir.

Geçtiğimiz 20 yılda, İnterferometrik Sentetik Açıklıklı Radar (Interferometric Synthetic Aperture Radar - InSAR), dünya çapında çok sayıda alanda yüzey deformasyonlarının ve toprak kaymalarının belirlenmesi ve izlenmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır (Gens and Van Genderen 1996, Gens 1998, Hanssen 2001). InSAR'ın, tüm hava koşullarında yeryüzünü görüntüleme yeteneği geleneksel izleme yöntemlerine göre büyük çaplı ve birçok avantaj sunmaktadır (Nengwu et al. 2012). InSAR kullanmanın en önemli avantajı, uzun süreli veri arşivine sahip olmasıdır (Cigna et al. 2014, Frey et al. 2016). 1960'larda Radar sinyallerinin InSAR tekniği yardımıyla yapılan faz analizleri ile elde edilen bilgilere dayanarak, dünyanın üç boyutlu konum bilgisine ulaşılmaktadır. Diferansiyel İnterferometrik SAR (Differential

Interferometric SAR - DInSAR) olarak bilinen teknik, yalnızca 1986 yılından bu yana, yer kabuğunun deformasyondan kaynaklanan hareketlerinin belirlenmesi için kullanılmaktadır. Bu teknik, farklı zamanlarda elde edilen SAR uydu görüntülerini kullanarak mekansal değişimi belirlemeyi sağlar. Böylece deprem izlenmesi (Ryder et al. 2007, Dreger et al. 2015, Cheloni et al. 2017), volkanik ve tektonik araştırmaların izlenmesi (Neri et al. 2015, Chen et al. 2018), buzul hareketleri (Trouvé et al. 2007, Lippl et al. 2018) vb. hareketlerin neden olduğu deformasyonların araştırılması bu teknikle önem kazanmıştır.

DInSAR tekniği, milimetre aralığında küçük ölçekli hareketleri tespit edebilir (Calvello et al. 2017, Gaber et al. 2017, Susaki et al. 2017). Öte yandan, yörünge hataları, atmosferik gecikme, zamansal ve mekansal korelasyon bozukluğuna bağlı olarak tutarlılık kaybı gibi çeşitli hata kaynaklarından dolayı, DInSAR tekniği ile anlamlı sonuçlar her zaman elde edilememektedir (Delacourt et al. 2003, Dandan et al. 2014).

Kalıcı Yansıtıcı InSAR (Persistent Scatterers InSAR - PSI) yöntemi, DInSAR tekniğinin bu tür problemlerini ortadan kaldırmak için önerilmiştir (Ferretti et al. 2001, Hooper et al. 2004, Kampes 2006b). Bu teknik geniş bölgelerdeki zemin deformasyonları hakkında milimetrik hassasiyetle bilgi sağlama yeteneğini göstererek, bu yaklaşımı hem bölgesel hem de büyük ölçekli kütle hareketleri araştırmaları için uygun hale getirmiştir. Bu yöntemde kullanılan ana fikir, çok zamanlı SAR görüntülerini bir yığın halinde kullanarak meydana gelen korelasyon bozukluğunun etkinliğini azaltmaktır. Bu nedenle elde edilen veriler, bu algoritmanın en önemli özelliği olan interferogramları oluşturmak için kullanılmaktadır (Osmanoğlu et al. 2016). Kentsel ortamlarda Kalıcı Yansıtıcı (PS) noktalarının sayısı genellikle çok yüksek olduğundan, PSI küçük ölçekli deformasyonların devam ettiği kentsel alanlarda zaman serisi analizi için uygun bir yöntemdir (Hooper et al. 2007, Soergel 2010). PSI teknolojisi, birçok araştırmacı tarafından heyelanların izlenmesinde de kullanılmıştır (Farina et al. 2006, Meisina et al. 2006, Chen et al. 2008, Bianchini et al. 2012, Tofani et al. 2013, Frangioni et al. 2015, Bayer et al. 2017, Rosi et al. 2018).

Kısa Baz Uzunluğu Tekniği (Small Baseline Subset - SBAS) yöntemi, bir ana görüntü seçmek yerine görüntü çiftlerini seçer. PSI yönteminden farklı olarak SBAS, çözümleme (unwrapping) hatalarını en aza indirmek için küçük zamansal ve uzaysal baz uzunluklarını kullanır (Berardino et al. 2002, Lanari et al. 2004, Casu et al. 2006, Hooper 2008, Crosetto et al. 2013, Calò et al. 2015, Hu anSandwelld Wu 2018,). İnterferogram serileri tekil değer ayrıştırmasıyla

birleştirilebilir. PSI tekniğinden farklı bir yaklaşımla deformasyon analizi için Stanford Method for PS (StaMPS) yöntemini geliştirilmiştir (Hooper et al. 2007). Bu yöntem, her bir arazi tipi üzerinde analiz gerçekleştirme olanağı sağlamıştır. Ayrıca bu yöntem, düşük faz kaymalarını gösteren pikselleri bulmak için interferometrik fazın mekansal korelasyonunu kullanmaktadır.

Bununla birlikte, yeryüzünde meydana gelen değişikliklerin zamana ve uydu bakış yönüne (Line of Sight – LOS) bağlı sorunlar yaratması, InSAR'ın uygulanmasını sınırlandırmaktadır. Ölçümün mümkün olduğu durumlarda yer değiştirme miktarını belirlemek için kullanılan sinyal, her iki uydu yörüngesindeki ve yüzey yüksekliğinin belirlenmesindeki atmosferik özelliklerde meydana gelen değişimler nedeniyle gürültü oluşmaktadır (Hooper 2008). Bu sorunların miktarını belirlemek ve çok zamanlı InSAR yöntemlerinden elde edilen sonuçları doğrulamak amacıyla, bu sonuçlarla çalışma alanında gerçekleştirilmiş GNSS ölçmelerinden karşılaştırılmaktadır (Akcin et al. 2010, Gourmelen et al. 2010, Çakir et al. 2012, Mirzaee et al. 2017).

Son yıllarda Beylikdüzü ve Esenyurt'ta meydana gelen bu sürekli hareket çeşitli çalışmaların yapılmasına öncü olmuştur. Bu çalışmaların başında PSI ve SBAS teknikleri ile zaman serisi analizleri gelmektedir. Walter et al. (2010) tarafından European Remote Sensing (ERS) 1, ERS 2 ve ENVISAT verileri ile 1992-2010 yılları arasında Beylikdüzü'nün de içinde bulunduğu İstanbul yerleşim alanları için ortalama hız haritaları oluşturulmuştur. Aslan et al. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışma da ise; ERS 1, ERS 2, ENVISAT ve Sentinel-1 uydu verileri kullanılarak 1992-2017 yılları arasında İstanbul'da zaman serisi analizi yapılmıştır. Bu çalışma da Beylikdüzü ve Esenyurt çalışma alanlarımızın içinde bulunduğu kıyı bölgeleri için 8-15 mm/yıl arasında değerler elde edilmiştir. Akarvardar et al. (2009) yaptığı çalışmada 47 adet ERS 1 ve ERS 2 verisi kullanarak yaptığı zaman serisi analizinde 1992-1999 yılları arasında Avcılar bölgesi ve civarında 12 mm/yıl deformasyon elde etmişlerdir. Diao et al. (2016a) 1999 İzmit-Düzce depremlerinin etkilerini araştırmak için yaptığı çalışmada Büyükçekmece Gölü ve Küçükçekmece Gölü arasında bulunan bölgede fay hareketleri için inceleme yapılmıştır. Bölgede yapılan araştırma için 2002-2009 yıllarına ait Envisat verileri ile PSI yöntemi kullanılarak yaklaşık olarak 5 mm/yıl gibi bir yeryüzü hareketi belirlenmiştir. Yine Diao et al. (2016b) tarafından yapılan benzer çalışmada 2002-2009 yılları arasında yapılan analizler sonucunda InSAR ve GNSS yöntemlerinden yararlanılmış ve yaklaşık olarak 19 mm/yıl bir kayma tespit edilmiştir. Bu çalışmalarının yanında aynı bölgeye ait GNSS tekniği kullanılarak yapılan çalışmalar da bulunmaktadır (Ergintav et al. 2011, Dogan et al. 2013, Coccia et al. 2014,

Bourdeau et al. 2017). Yapılan bu çalışmalarda genel olarak İzmit-Düzce depremlerinin etkilerinin yanı sıra Avcılar ve Büyükçekmece bölgesinde meydana gelen yer yüzeyi hareketleri GNSS gözlemleri ile incelenmiştir. 1992-2015 yılları arasında yapılan periyodik ölçümler sonucunda 8-20 mm/yıl arasında değişen hareketler belirlenmiştir.

Yukarıda açıklanan yöntemler göz önüne alındığında, PS-InSAR ve SBAS yöntemlerinin heyelan izleme için en yaygın ve en uygun yöntemler olduğu anlaşılmaktadır. Günümüzde, araştırmacılar hala bu iki yöntemin en iyi şekilde nasıl kullanılacağını öğrenmektedir. Bu tez çalışmasında, PSI yöntemiyle birlikte elde edilen sonuçlar ve GNSS ölçmeleri ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

1.2. TEZ ÇALIŞMASININ KONUSU VE AMACI

Beylikdüzü ve Esenyurt ilçeleri; özellikle son yıllarda kentsel, endüstriyel, tarımsal ve ekonomik faaliyetlerin yoğun olduğu İstanbul'un önemli bölgelerinden bir tanesidir. Bölgede bu yoğun faaliyetler nedeniyle meydana gelen heyelanlar olduğu bilinmektedir. Bu türdeki hareketler, yer yüzeyinde ve binalarda ağır hasara neden olmaktadır. Son verilere göre, Beylikdüzü ve Esenyurt ilçelerinin nüfusu endüstriyel faaliyetlerin de çoğalmasıyla son 5 yılda yaklaşık olarak 150 bin kişi artmıştır. Bunun yansıması olarak birçok ciddi yeryüzü hareketine sebep olacak yüksek binalara sahip bir yerleşim bölgesi haline gelmiştir. Bölgede meydana gelen hasarlar ve vatandaşların bina hasarından kaynaklanan maddi zararı, Beylikdüzü ve Esenyurt'ta riskin yüksek olduğunu göstermektedir. Bu tür mekansal ve zamansal değişikliklerin araştırılması geleneksel yöntemlerle zor olabilmektedir.

Özellikle heyelanların izlenmesi gibi doğal olayları ve bunların evrimi hakkında en kesin ve güncel bilgileri elde etmek için sürekli olarak teknolojik gelişmeleri takip etmek gerekmektedir. En etkili izleme sisteminin tanımlanması zordur. Fakat her fırsatta kullanılabilecek teknik olarak, lojistik ve ekonomik gerekliliklere bağlı olan uygun bir izleme tekniği seçilebilir. Son yıllarda Uzaktan Algılama, doğal felaketleri izleme sürecinde önemli bir rol oynamaktadır.

Bu tez çalışmasının amacı, bölgedeki bu yoğun faaliyetlerin neden olduğu yer hareketlerini çok zamanlı InSAR yöntemleri ile belirlemek ve güncel heyelan haritaları oluşturmaktır. Mekansal ve zamansal heyelan haritalaması, bu doğal felaketin potansiyel büyüklüğünü veya

yoğunluğunu ortaya çıkarmak ve ilgili duyarlılığı, tehlikeyi, savunmasızlığı ve riski belirlemek için çok önemli bir adımdır.

Tez kapsamında GNSS ölçmelerinin 3 kampanya olarak yapıldığı Beylikdüzü ve Esenyurt ilçelerinde meydana gelen heyelan alanlarını belirlemek için yerleşimin ve sanayi tesislerinin yoğun kullanıldığı alanlar InSAR tekniği ile incelenmiştir.

Geçmiş çalışmalar incelendiğinde, farklı çalışma alanlarında gerçekleşmiş olan heyelanlar için birçok gelişmiş InSAR tekniği kullanılmış ve çoğunda başarı elde edilmiştir. Bu tez çalışmasında, Beylikdüzü ve Esenyurt'ta meydana gelen heyelanları belirlemek için PSI yöntemi kullanılmış ve sonuçlar GNSS ölçmelerinden elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır.

Sonuç olarak bu tez çalışmasının temel amacı;

- Beylikdüzü ve Esenyurt bölgelerindeki heyelan hareketlerini çok zamanlı InSAR teknikleri yardımıyla tespit etmek,
- GNSS ölçmeleri ile InSAR sonuçlarının başarısını irdelemek,
- Kullanılan PSI yönteminin avantaj ve dezavantajlarını tespit etmek,
- Bölgedeki heyelan hareketlerini, derinliklerini ve boyutlarını belirlemektir.

1.3. TEZ ÇALIŞMASININ ARAŞTIRMA SORULARI

İleri InSAR teknikleri ile gerçekleştirilmiş son uygulamalar heyelanların, büyük alanlara (kilometrekare büyüklüğünde) ve yüksek konumsal çözünürlüğe (metre büyüklüğüne) sahip olması ile ilgili potansiyellerini göstermiştir. Ayrıca mevcut sonuçlar, geleneksel teknikler kullanılarak elde edilebilenler ile yüksek duyarlılık (birkaç milimetre) açısından rekabetçi olarak değerlendirilebilir.

Bu tez çalışmasında yavaş hareket eden heyelanların izlenmesinde ileri InSAR tekniklerinin avantajlarını vurgulamak ve aynı zamanda yöntemin ne zaman ve nerede kullanılabileceği hakkında genel bir çerçeve elde etmektir. Bunun yanında elde edilen sonuçlar ışığında karşılaşılan ana dezavantajlar da sunulmuştur. Genel olarak bu çalışmada, ileri InSAR tekniklerinin ne zaman ve nasıl kullanılabileceği ve karşılaşılan kısıtlamalar vurgulanmıştır. Bu

uygunluk değerlendirmeleri geleneksel izleme yöntemleri ile doğrulama gerektirdiğini de ortaya çıkarmıştır.

Kitle hareketlerinin mekânsal ve zamansal değişiminin değerlendirilmesi için çok zamanlı SAR görüntüleri kullanılmıştır. Bu tezde heyelan büyüklüğü ve yönü PSI yöntemi ile analiz edilmiştir.

Genel olarak bu çalışmada aşağıdaki amaç ve araştırma sorularına yanıt aranmıştır:

- InSAR zaman serileri analizi ile izlemek ve deformasyonunun sürekliliğini göstermek.
 - Sentinel-1 ve ALOS PALSAR-2 (Advanced Land Observing Satellite 2) verileriyle çok zamanlı InSAR yönteminin heyelan hareketlerini belirleme başarısı nedir?
 - Çalışma alanlarının yer değiştirme belirlenmesi için yeterli PS noktaları var mıdır?
 - Kentsel ve kırsal alanlardaki tepkiler aynı mıdır?
- Beylikdüzü ve Esenyurt bölgelerinin heyelan haritalarını üretmek ve sonuçları yorumlamak.
 - Uzun süreli heyelan hareket miktarı (mm/yıl) nedir?
 - Heyelan hareketlerinin izlenmesi için PSI ve GNSS yöntemlerine ait sonuçların ilişkisi nedir?
 - Kentsel ve kırsal alanlardaki C band ve L band sonuçlarının farkları nedir?
 - Çok zamanlı InSAR teknikleri ile heyelan izleme için ne gibi geliştirmeler yapılabilir?

1.3.1. Tez Bölümlerinin İçeriği

Tez beş bölümden oluşmaktadır. Bu ilk bölüm literatür özeti, araştırma hedefleriyle birlikte tezin kapsadığı ana konulara giriş niteliğindedir.

İkinci bölümde Yapay Açıklıklı Radar (SAR) teknolojisi, görüntülerin özellikleri ve görüntüye ait geometrik bozukluklardan bahsedilmiştir. Bunun yanında InSAR'ın temelleri ve geometrisi bu bölümde verilmiştir. Ayrıca, DInSAR özellikleri, deformasyon belirleme adımları ve kısıtlamaları bu bölümde açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde, ileri InSAR teknikleri ile zaman serisi analizi yapılarak, devamında kullanılan yöntemler olan PSI yöntemi ve veri işleme adımları tanımlanmaktadır. Ayrıca işlemlerin çalıştırıldığı StaMPS programı hakkında bilgi verilmektedir.

Dördüncü bölümde, çalışma alanı ve kullanılan görüntülerle ilgili bilgi verilmektedir. Sonrasında Sentinel-1 ve ALOS PALSAR-2 görüntüleri ile elde edilen sonuçlar sırasıyla verilecek ve farklı yöntem sonuçları tartışılmaktadır. Bölümün sonunda InSAR sonuçları ile GNSS ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılıp doğruluk araştırması yapılmıştır.

Son olarak beşinci bölümde, tezin sonuçları tartışılarak ve elde edilen sonuçların InSAR uygulamasının güçlü ve zayıf yanlarını vurgulayan bir analiz yapılmıştır. Ayrıca, çalışılan teknolojinin gelecekteki uygulamaları da tanımlanmıştır.

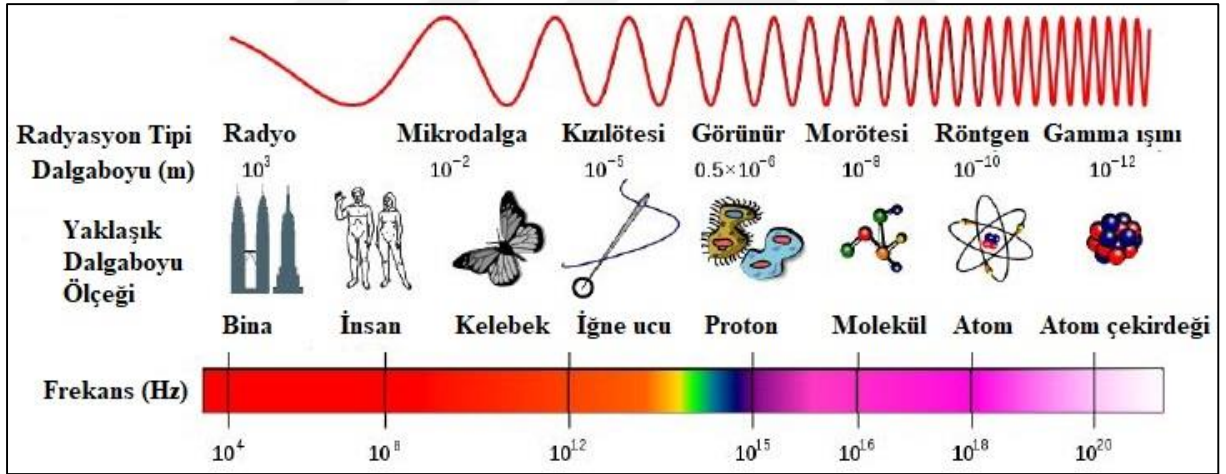


BÖLÜM 2

SAR TEKNOLOJİSİ VE TEMEL PRENSİPLERİ

2.1. YAPAY AÇIKLIKLI RADAR (SAR)

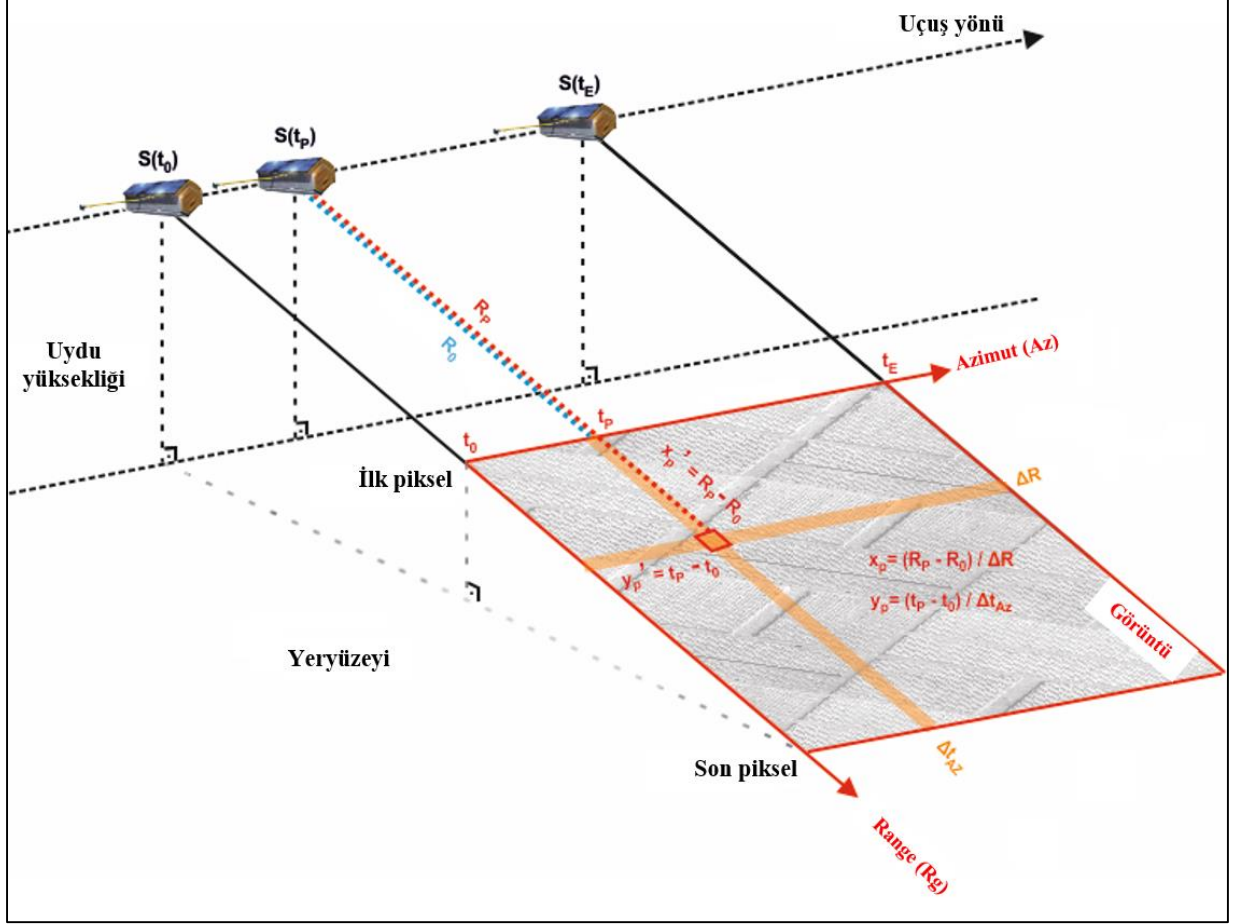
Radio Detecting and Ranging (RADAR), 1970'lerin sonlarından beri uzaktan algılama teknolojisinde önemli bir rol oynamakta ve günümüzde oldukça sık olarak kullanılmaktadır. Aktif bir algılama sistemi olarak radar, hedef nesneleri elektromanyetik enerji kullanarak aydınlatır ve yansıyan enerjiyi almaktadır. Elektromanyetik spektrumda mikrodalga dalga boyları 1 cm ile 1 m arasındadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Elektromanyetik spektrum.

SAR sistemi, Dünya yüzeyini neredeyse tüm hava koşullarından, gece ve gündüz döngüsünden bağımsız olarak yüksek konumsal çözünürlüklü ve iki boyutlu (2D) görüntüler halinde elde etmek için kullanılan aktif mikrodalga görüntüleme radarıdır. Bu benzersiz özellikleri günümüzde gerçekleştirilen çalışmalarda araştırmacılara büyük faydalar sunmaktadır.

Optik algılayıcılardan farklı olarak SAR görüntüleme sistemleri, yörünge boyunca yan bakış (side-looking) özeliği ile görüntülenmek istenen nesneye radyasyonu iletir ve geri alır (Şekil 2.2). Görüntü elde etmenin bu yolu (bakış yönü) iki farklı görüntü türü elde etmeye imkan sağlamaktadır.



Şekil 2.2 SAR görüntüleme geometrisi.

Uydu güneyden kuzeye hareket ettiği sırada nesneyi batıdan gözlemliyorsa yükselen (ascending), uydu kuzeyden güneye doğru hareket ettiği sırada nesneyi doğudan gözlemliyor ise alçalan (descending) görüntü olarak adlandırılır. Antenin nadire göre eğimi geliş açısı (incidence angle) olarak adlandırılır ve birçok SAR sisteminde bu açı 20° - 50° arasında değişir. Geliş açısı, gelen radyasyonun yönü ile görüntülenen yüzeye dik doğrultu arasındaki açı olduğundan yakın aralıktan (near range) uzak aralığa (far range) gidildikçe bu açı artmaktadır. Çoğu doğal hedef için, geri saçılma katsayısı geliş açısına göre değişmektedir (Dallemand et al. 1993).

Radarın hedef çözümü, her iki aralık (range) veya azimuta (azimuth) çok yakın olan hedefleri ayırt etme yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Buna göre, çözünürlük genellikle iki kategoriye ayrılır: aralık çözünürlüğü ve azimut çözünürlüğüdür.

Aralık çözünürlüğü (yörüngeye dik), mikrodalga genliğinin uzunluğu ile orantılıdır. Genlik uzunluğu ne kadar kısa olursa, aralık çözünürlüğü de o kadar iyi olur. Aralık çözünürlüğünü R_g hesaplama eşitliği aşağıdaki gibidir (Henderson and Lewis 1998):

$$R_g = \frac{c \tau_{amp}}{2 \sin \emptyset} \quad (2.1)$$

Burada;

c : ışık hızı,

τ_{amp} : genlik uzunluğu,

$\emptyset$: geliş açısıdır.

SAR sistemlerinde bir hedef için en uygun azimut veya yörünge boyunca çözünürlük (Henderson and Lewis 1998):

$$Az = \frac{1}{2} \quad (2.2)$$

olarak tanımlanır. Burada;

l : anten uzunluğudur.

Bir radar anteni tarafından yayılan sinyallerin bir kısmı, radar antenine bir hedeften direkt olarak geri yansır. Bu kavram geri saçılma (backscatter) olarak bilinir. SAR görüntüsüne geri saçılma katsayısını (dB) elde etmek için, görüntü işlemenin üç aşamasına ihtiyaç vardır. Bunlar radyometrik kalibrasyon, spektral filtreleme ve arazi düzeltmesidir.

Single Look Complex (SLC) görüntüler üreten tipik SAR uyduları radyometrik düzeltmeleri içermez ve önemli radyometrik bozulmalara sahiptir. Bu nedenle SAR görüntülerinde gerçekleştirilecek radyometrik düzeltmeler, SAR görüntülerindeki piksel değerlerinin yansıtıcı

yüzeyin radar geri yansıtıcısını gerçekten temsil etmesini sağlamalıdır. Radyometrik düzeltme, farklı veya aynı algılayıcılar ile elde edilen ancak farklı zamanlarda farklı modlarda kaydedilen SAR görüntülerinin karşılaştırılması için de gereklidir. Bu nedenle bu adım, farklı tarihlerdeki geri yayılma katsayılarını kullandığı ve karşılaştırdığı için çok önemlidir.

SAR görüntüleri, her SAR çözünürlük hücresinde bulunan nesneler (yansıtıcılar) tarafından antene doğru geri saçılan radyasyon genliğinin bir ölçümünü içermektedir. Bu genlik değerleri, yerkürenin yüzeyindeki saçılmaların yönelimine, pürüzlülüğüne, boyutuna ve dielektrik özelliklerine bağlıdır. Doğal olarak, kentsel alanlar ve kayalık ortamlar güçlü genlikler gösterirken, sakin su gibi yumuşak düz yüzeyler düşük genlik değerlerini gösterir. Çünkü radyasyon temel olarak radardan uzaklaşır. SAR sistemleri sadece genlik değeri değil, aynı zamanda kaydedilen bir sinyalin fazını da kaydedebilen uyumlu sistemlerdir. Faz değeri, bir radar anteninden aktarılan sinyalin nesnelere ulaşması ve ardından radara geri dönmesinin zamansal bir ölçümüdür.

SAR sistemlerinde yaygın olarak kullanılan birkaç dalga boyu aralığı veya frekans bandı vardır (Çizelge 2.1) (Henderson and Lewis 1998):

Çizelge 2.1 SAR bandlarının frekans ve dalga boyları.

Band	Dalgaboyu (cm)	Frekans (GHz)
P	133 – 76,90	0,225 – 0,39
L	76,9 – 19,40	0,39 – 1,55
S	19,40 – 7,69	1,55 – 3,90
C	7,69 – 5,21	3,90 – 5,75
X	5,21 – 2,75	5,75 – 10,90
Ku	2,75 – 1,67	10,90 – 18
K	1,67 – 1,13	18 – 26,50
Ka	1,13 – 0,83	26,50 – 36
Q	0,83 – 0,63	36 – 46
V	0,63 – 0,53	46 – 56
W	0,53 – 0,30	56 – 100

Bazı SAR sistemleri elektromanyetik enerjiyi iletme ve alma yeteneğine sahiptir. Ek olarak, radar cihazları elektrik alanının farklı yönlerinde dalgaları iletme ve almak için tasarlanabilir. Aktarılan bir sinyalin polarizasyonunu değiştirerek gözlenen yüzeylerin polarimetrik özellikleri hakkında bilgi elde etmek mümkündür. Çoğunluğu HH, HV, VV ve VH dahil olmak üzere dört tipik mod ile doğrusal polarizasyon sistemlerinde tasarlanmıştır (Çizelge 2.2). H yatay polarizasyonu, V dikey polarizasyonu ifade eder. İlk harf polarizasyon iletimlerini, ikinci harf ise polarizasyonun algılayıcı tarafından nasıl algılandığını gösterir. Hedeflerin polarizasyon sinyallerinin yorumlanmasıyla fiziksel yapı ve elektromanyetik özellikler çıkarılabilir.

Çizelge 2.2 Bazı SAR sistemlerinin polarizasyonları.

Uydu	λ (cm)	Band	Polarizasyon	ΔT (gün)
ERS-1	5,6	C	Single	35
ERS-2	5,6	C	Single	35
RADARSAT-1	5,6	C	Single	24
ENVISAT	5,6	C	Single	35
ALOS PALSAR-1	23,6	L	Single	46
RADARSAT-2	5,5	C	Single, Dual, Quad	24
TerraSAR-X	3,1	X	Single, Dual, Quad	11
COSMOSkymed	3,1	X	Single, Dual	4
KOMPSAT-5	3,2	X	Single	28
Sentinel-1	5,6	C	Single, Dual	6
ALOS PALSAR-2	23,6	L	Single, Dual, Quad	14

2.1.1 Geometrik Bozuluk Çeşitleri

Bir radar görüntüsünde bulunan geometrik bozuluklar aşağıdaki gibi ayrılabilir:

- Aralık bozulmaları: Radar eğik aralıkları (slant range) ölçer, ancak bir görüntünün yüzeyini doğru bir şekilde temsil etmesi için yer aralığının (ground range) düzeltilmesi gerekir.
- Yükseklik bozulmaları: Bu bozulmalar noktaların ortalama arazi yüksekliğinden farklı bir yüksekliğe sahip olduğu durumlarda oluşur.

Her iki bozulma görüntüde farklı etkiler yaratır. Bu etkiler Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Şekilde $\emptyset$: geliş açısı, θ : topoğrafya eğim açısıdır. SAR görüntülerinde muhtemelen en çarpıcı özellik, aralıklıdaki (range) değişken geometridir.

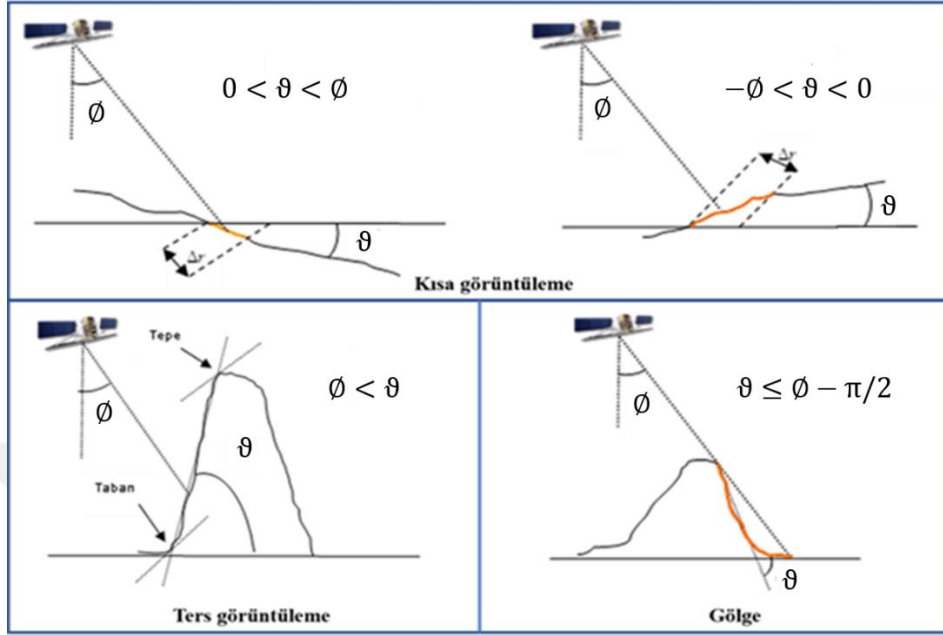
SAR görüntülerinde muhtemelen en çarpıcı özellik, aralıktaki (range) tam geometrik olmayan piksel yapılarıdır. SAR görüntülemeye prensibi mesafe ölçümüdür ve optik sistemlerdeki gibi açı ölçmezler. Bunun sonucunda bu gibi bozukluklar ve değişken geometriler ortaya çıkabilir. İki farklı noktadan alınan radar yansımaları arasındaki zaman gecikmesi ve görüntüdeki göreceli mesafeleri belirler. Bu sinyallerin seyahat süresi ölçümü nedeniyle, arazi yüksekliğine bağlı olarak radar görüntülerinin aralık (range) doğrultusunda farklı sapmaları olabilir. Bunlar (Abdikan 2007):

Kısa görüntüleme (Foreshortening): Bu bozulma engebeli arazilerde elde edilen SAR görüntülerinde baskın bir etkidir. Radar sinyalinin araziye dik olduğu durumlarda; yani eğimli arazide tabana, yüzeye ve yüzeyin tepesinde bulunan iki nokta arasındaki mesafe farkı düz alanlarda olacaklarından daha kısadır. Bu etki, engebeli bölgelerden geriye yansıyan radyometrik bilgilerin sıkıştırılmasıyla sonuçlanır. Bu sorun görüntü koordinatlandırma işlemi sırasında bir arazi modeli ile telafi edilebilir. Elipsoit düzeltilmesi getirilen görüntüler üzerinde hala kısa görüntüleme bozulmalarının bulunduğunu belirtmek gerekmektedir.

Ters görüntüleme (Layover): Eğimli bir topografyada geri saçılan enerjinin, alt tarafından önce üst tarafının kaydedilmesi nedeni ile oluşur. Diğer bir ifade ile, bu bozulma radar görüntüsündeki yüzey elemanlarının ters olarak kaydedilmesidir. Genel olarak bu bozulma, düşük geliş açısına bağlı olarak görüntü üzerinde parlak özellikler olarak görünür. Aynı eğik mesafeye sahip olan nesneler arasında belirsizlikler oluşur. Dik geliş açıları için bu, arka eğimde bulunan hedefleri de içerebilir. Görüntüdeki tek bir nokta yer yüzeyindeki birkaç noktayı temsil ettiği için koordinatlandırma işlemi belirsizlikleri çözemez. Bu bölgeler aynı zamanda koordinatlandırılmış görüntülerde de parlak görünmektedir.

Gölge (Shadowing): Radar ışını, yüksek açılardan dolayı zemin yüzeyinin parçalarını aydınlatamadığında gölgeler meydana gelmektedir. Bu etki, geri saçılmaya uygun bir enerji olmadığı için dikey özelliğe sahip nesnelerin veya engebeli arazinin radar görüntülerinde karanlık görünmesine neden olmaktadır. Bu etki karanlık olan bölgeye ait geri saçılım

değerlerinin elde edilememesine neden olduğu için Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) üretilmez.



Şekil 2.3 Eğik mesafe ve arazi yüksekliğinin neden olduğu radar bozulmaları (Franceschetti and Lanari 1999).

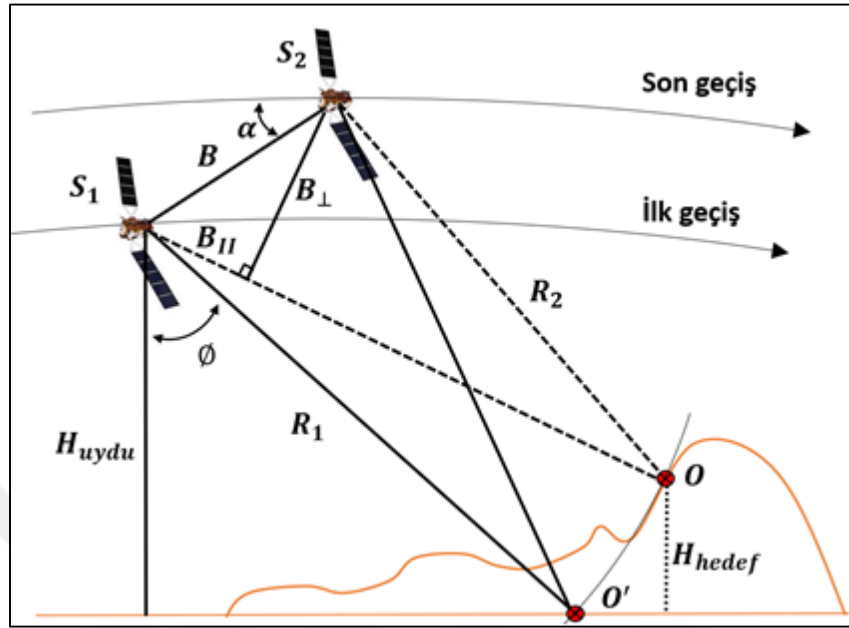
2.2. İNTERFEROMETRİK YAPAY AÇIKLIKLI RADAR (InSAR)

InSAR aynı dalga boyuna sahip farklı zamanlarda (tekrarlı geçiş) elde edilen, aynı alanın en az iki SLC görüntüsünde yer alan faz bilgisinden yararlanır. Ancak uydu yörüngeleri tam olarak tekrar etmediği için biraz farklı görüntüleme geometrilerine sahiptir. Bu tezin devam eden bölümlerinde kullanılan InSAR zaman serisi analizi tekrarlı geçiş InSAR ile ilgilidir.

2.2.1. InSAR Temelleri ve Geometrisi

InSAR, iki SAR görüntüsü arasındaki faz farklarını çıkarır. İki görüntünün fazı, alt piksel seviye kaydı sonrasında karşılaştırılabilir (Massonnet and Feigl 1998). İki SAR görüntüsü arasındaki faz farkı, interferogram adı verilen yeni bir görüntü oluşturur. İnterferogram deformasyon sinyallerini ve bozulma sinyallerini içerir (Bamler and Hartl 1998, Massonnet and Feigl 1998). Örneğin, bir deprem sebebiyle meydana gelen yüzey deformasyonu, belirli bir zaman aralığında aynı alan üzerinde iki SAR görüntüsü elde edildiğinde tespit edilebilir. Yüzey yer değiştirmesi elde etmek için interferogramdaki topografik katkılar, bir SYM kullanılarak kaldırılmalıdır.

Çünkü radar, topoğrafyayı iki farklı açıdan görmektedir (Massonnet and Feigl 1998). Tipik bir InSAR görüntüleme geometrisi, Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4 InSAR görüntüleme geometrisi (Abdikan 2012).

Interferomerik faz, aralık (range) ve azimut koordinat sisteminde bir aralıkta düzenlenmiş iki boyutlu bir dizidir. Yerdeki bir çözünürlük hücresi, iki SAR antenine olan yol uzunluklarının farkına eşittir (Hanssen 2001).

Şekil 2.4'te, iki radar algılayıcısı $S_{1,2}$, her iki geçişte de aynı hedefe sinyal yollar. Uydular B baz mesafesi ile ayrılır. B iki bileşene sahiptir: baz mesafesine paralel olan bileşen $B_{||}$, dik olan bileşen ise $B_{\perp}$ 'dir. Algılayıcı ile nesne arasındaki mesafeler R_1 ve R_2 , geliş açısı ϕ ve uydu yüksekliği h olarak ifade edilmiştir. İnterferometrik faz (Hanssen 2001):

$$\varphi_{\text{InSAR}} = \frac{4\pi\delta}{\lambda} \quad (2.3)$$

olarak tanımlanır. Burada δ Şekil 2.4'te gösterildiği gibi yol uzunluklarının geometrik farkını ifade etmektedir. δ yaklaşık olarak (Hanssen 2001):

$$\delta = B \sin(\phi - \alpha) \quad (2.4)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Aslında, çeşitli bileşenler deformasyon sinyallerine ek olarak interferometrik faz φ_{InSAR} 'e katkıda bulunur (Zebker et al. 1994, Hanssen 2001):

$$\varphi_{\text{InSAR}} = \varphi_{\text{defo}} + \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{yör}} + \varphi_{\text{düz}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{yan}} + \varphi_{\text{gür}} \quad (2.5)$$

Burada;

- φ_{InSAR} : İnterferometrik faz (iki SAR görüntüsü arasında aynı piksele ilişkin faz değişimi),
- φ_{defo} : yüzey (zemin) deformasyonu ile ilgili faz etkisi,
- φ_{topo} : topografik faz etkisi,
- $\varphi_{\text{yör}}$: yörünge faz etkisi,
- $\varphi_{\text{düz}}$: düzleştirilmiş yeryuvarı fazı,
- φ_{atm} : atmosferik (troposferik, iyonosferik) faz etkisi,
- φ_{yan} : yansıtıcıların elektriksel özellikleri ile ilişkili faz etkisi,
- $\varphi_{\text{gür}}$: bileşke gürültüdür.

Deformasyon fazını hassas bir şekilde elde etmek için diğer tüm faz bileşenleri interferometrik fazdan dikkatli bir şekilde çıkarılmalıdır (Zebker and Goldstein 1986). Topografik faz etkisi, SYM'lerin üretilmesinde kullanılabilen belirli bir dik taban çizgisi için topografya değişiminin bir sonucudur. Topografik faz etkisi aşağıdaki şekilde verilmiştir (Zebker et al. 1994):

$$\varphi_{\text{InSAR}} = \frac{-4\pi B_{\perp} z}{\lambda R_1 \sin \theta} \quad (2.6)$$

Burada z referans elipsoidin üzerindeki belirli bir çözünürlük hücresinin yüksekliğidir.

Topografik faz bileşeni, genel olarak bir SYM kullanılarak çıkarılır. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) tarafından üretilen SYM sık kullanılan bir yükseklik modelidir (Farr et al. 2007). SRTM, 60°'den küçük enlemler için küresel yakın topografya ürünü üretmiştir. SRTM verileri, 3x3 saniye (yaklaşık 90x90 m) bir grid üzerinde örneklenmiş ve 10m'den düşük yükseklik hatasına sahiptir (Rodríguez et al. 2005, Farr et al. 2007).

Eşitlik 2.6'da gösterildiği gibi, interferometrik fazın yükseklik hatalarına olan duyarlılığı, yükseklik hatalarının dikliği ile orantılı olarak artmaktadır. Daha kısa baz mesafeleri ile oluşturulan interferogramlar yükseklik hatasının etkisini azaltabilir.

Düzleştirilmiş yeryuvarı fazı ($\varphi_{\text{düz}}$), uydu yörüngeleri ve jeodezik koordinat sistemi (örn. Dünya Jeodezik Sistemi 1984 (World Geodetic System 1984-WGS84)) yardımıyla hesaplanabilir. SAR görüntüleri aslında düz bir Dünya varsayımıyla oluşturulur. Bu nedenle, düz ve gerçek Dünya yüzeyleri arasındaki faz farklarını tahmin etmek gerekir ve $\varphi_{\text{düz}}$ aşağıdaki eşitlikte verilmiştir (Hanssen 2001).

$$\varphi_{\text{düz}} = \frac{-4\pi}{\lambda} B_{\perp} \Delta\theta \quad (2.7)$$

Burada $\Delta\theta$ iki gözlem zamanında görüntüleme veya bakış açılarının farkıdır.

Uydu yörüngeleri, atmosferik sürüklenme ve güneş radyasyonu basıncı gibi bazı fenomenler ve kuvvetler tarafından bozulur (Hanssen 2001). Sonuç olarak, interferogram oluşumunda yer alan iki radar görüntüsü genellikle farklı konumlardan elde edilir. Bu baz mesafesi farklılığı, yer değiştirme eşlemesi sırasında topografya fazını uzaklaştırmak için kullanılır. Bunun yanında bu farklılık referans elipsoit ve topografyadan kaynaklanan interferometrik fazın zayıf bir şekilde belirlenmesine ve interferogramda hatalara (saçaklara) neden olacaktır. Yörünge hatasının neden olduğu bu kalıntı faz, tüm interferogram boyunca lineer veya kuadratik bir polinom düzlemi yerleştirilerek çıkarılabilir (Hanssen 2001).

Radar interferogramlarında atmosferdeki heterojen kırılma dağılımının neden olduğu interferometrik faz gözlenmiştir (Goldstein 1995, Massonnet and Feigl 1995, Zebker et al. 1997). Özellikle troposferik su buharı atmosferik faz etkileri içinde önemli bir paya sahiptir (Hanssen 2001, Li et al. 2005)

Topografik etkiyi φ_{topo} , Yerküre eğimini $\varphi_{\text{düz}}$, yörünge etkisini $\varphi_{\text{yör}}$ ve atmosferik etkiyi φ_{atm} çıkardıktan sonra kalan sinyal esas olarak yüzey deformasyonundan kaynaklanan yer değiştirme miktarıdır. Bu değişim miktarı aşağıdaki gibi yazılabilir (Elliott 2009):

$$\varphi_{\text{düz}} = \frac{-4\pi\Delta R}{\lambda} = -\left(\frac{-4\pi}{\lambda}\right) \hat{n} \cdot \mathbf{u} \quad (2.8)$$

Burada u yer ve radar sensörü arasındaki LOS yönüne yansıtılan üç boyutlu yer değişimini, $\hat{n}$ ise birim vektörü temsil eder. InSAR, mutlak mesafe değişimlerinden ziyade sadece bağıl aralık değişimlerini ölçer. Başka bir deyişle interferogramlar mutlak değerler değil, bağıl deformasyon haritalarıdır. Ayrıca LOS değişimi, deformasyonunun üç bileşeni Kuzey, Doğu ve Yukarı olarak da yazılabilir (Fialko et al. 2001):

$$\varphi_{\text{def}} = [U_n \sin \eta - U_e \cos \eta] \sin \varnothing + U_u \cos \varnothing + \delta_{\text{LOS}} \quad (2.9)$$

Burada η uyduların azimutu, δ_{LOS} ölçüm hatasıdır, U_n , U_e , U_u deformasyonunun Kuzey, Doğu ve Yukarı bileşenlerini göstermektedir. Üç bileşenin katkılarıyla ilgili bir belirsizlik vardır. Belirsizliği azaltmak için, farklı LOS yönleri üreten hem yükselen hem de alçalan görüntüler birleştirilerek kullanılabilir (Fujiwara et al. 2000, Wright et al. 2004). Alternatif bir yöntem de, 3 boyutlu deformasyon için GNSS 3B bileşenlerini kullanmaktır (Delouis et al. 2002, Simons et al. 2002).

2.3. DİFERANSİYEL InSAR TEKNİĞİ (DInSAR)

DInSAR uygulamasının temel amacı, interferogramlardan elde edilen yüzey deformasyonundan faz bileşeninin çıkarılmasıdır. Eşitlik 2.5'te görüldüğü gibi interferometrik faz sadece yüzey deformasyonu ile ilgili radar sinyalinin değil aynı zamanda arazi yüksekliğinin, Dünya'nın eğriliğinin, atmosferik homojensizliğin ve sinyal gürültüsünün katkıda bulunduğu diğer istenmeyen faz bileşenlerinden oluşmaktadır. Bu nedenle sadece yüzey deformasyon katkısını elde etmek için interferometrik fazdan topografik ve diğer etkileri çıkarmak esastır.

Topoğrafik etki ve Dünya'nın eğriliği ile ilişkili faz bileşenleri, DInSAR ile elde edilen interferogramlardan çıkarılabilir. Topografik faz, üretilen interferogramlarla birlikte harici bir DEM kullanılarak tahmin edilebilir. Bununla beraber Dünya'nın eğriliğinden kaynaklanan faz ise SAR platformunun yörünge bilgileri kullanılarak matematiksel olarak hesaplanabilir. İki SAR verisinin edinme tarihleri arasında meydana gelen düşey yüzey deformasyonu DInSAR uygulaması ile santimetre ve hatta milimetre hassasiyetinde belirlenebilir (Hanssen 2001, Kampes 2006b).

Yüzey deformasyonunun belirlenebilmesi için ortadan kaldırılacak faz bileşenleri (örneğin topoğrafik ve Dünya'nın eğrilik etkileri) InSAR geometrik parametreleri ile matematiksel olarak formüle edilebilir.

2.3.1. Yörünge Etkileri

Uydu efemeris bilgileri, uydu uçuşu sırasında herhangi bir zamanda konumu ve hızı tam olarak tanımlaması gereken uydu durum vektörleridir. Bazı SAR sistemleri, topoğrafik etkinin belirlenmesi için gerekli olan platform konumlarına ve hızlarına ilişkin doğru bilgiye sahip değildir. Bu bilgiler InSAR interferometrik baz mesafelerini belirlemek için gereklidirler. Bu tür yanlış yörüngesel bilgileri baz mesafelerinde hatalara neden olmaktadır. Ayrıca bu hatalar, geleneksel olarak uzun dalga boylu yer değiştirmeyi ölçmek için InSAR'ın ana sınırlaması olarak kabul edilir. Yörüngesel hataları interferogramlarda uzun dalga boylu faz katkılarına neden olur (Massonnet and Feigl 1998). Uzun dalga boylu faz katkıları için bilinen başka bir kaynak, iyonosferik ve troposferik bileşenlerden oluşan atmosferik gecikmelerdir. İyonosferik gecikmeler L bandı için (Meyer 2011), C ve X bandlarından (Hanssen 2001) daha önemlidir. Troposferik gecikmeler interferometrik faza önemli ölçüde katkıda bulunur (Li et al. 2005, Fournier et al. 2011, Gong et al. 2013).

Yörünge hataları ve diğer uzun dalga boylu faz katkılarının etkisini azaltmak için çeşitli stratejiler mevcuttur. Yörünge hatalarını hesaba katan en popüler yöntem, interferogramdan tahmini bir doğrusal eğilimin çıkarılmasıdır. Bu uygulanması kolay bir yöntemdir ancak yörünge hatası sinyali doğrusal olmadığı için küçük bir kolaylık içerir. Bu kolaylık, yörünge hatalarının etkisi için interferometrik fazı düzeltmeyen daha karmaşık yöntemlerle aşılar fakat hata sinyalinin ortadan kaldırılması için uydu yörüngelerini değiştirmektedir (Rosen et al. 2004). Başka bir yaklaşım, yörüngesel hatalardan kaynaklanan artık saçakların sayısını kullanarak temel hata bileşenlerini tahmin etmektedir (Kohlhase et al. 2003).

Bir diğer metot, interferometrik fazlara uyumlu yüzeylerin tutarlı bir tahmini için bir interferogram ağını kullanır (Biggs et al. 2007). Bu yöntemlerin genel dezavantajı tüm uzun dalga boylu faz desenlerinin (pattern) yörüngesel hataları olarak kabul edilmesi ve dolayısıyla sadece yörüngesel etkilerin değil, aynı zamanda uzun dalga boylu yer değiştirme sinyalinin de uzaklaştırılmasıdır (Fattahi and Amelung 2013).

Bunun yanı sıra SAR interferometresi, farklı yörüngeler tarafından mekansal olarak ayrılan iki uyduya ait ölçümlere bağlıdır. Bu ayırım aynı yüzeyden gelen fazda bir kaymaya yol açar. Yeryüzü eğriliği, Avrupa Uzay Ajansı (European Space Agency-ESA) tarafından sağlanan uyduların kesin yörüngeleri kullanılarak kaldırılmalıdır.

2.3.2. Atmosferik Etkiler

Daha önce de belirtildiği gibi, farklı zaman ve farklı yörünge ile gerçekleştirilen görüntü alımı atmosfer tarafından farklı şekilde etkilenebilir. SAR interferogramlarındaki atmosferik etkiler, esas olarak ortamın kırılma indeksindeki değişikliklerden kaynaklanmaktadır. Bu değişiklikler atmosferik basınç, sıcaklık ve su buharı etkisiyle oluşmaktadır. İki alım arasındaki farklı atmosferik nem, sıcaklık ve basınç, interferogramda ek saçak (fringe) olarak tespit edilebilen toplam interferometrik fazda bulunan faz kaymasına neden olabilir. Atmosferik etkiler hem yükseklik hem de arazi deformasyon ölçümlerini etkiler (Ferretti et al. 2007).

Çoğu durumda basınç ve sıcaklığın konumsal varyasyonları, SAR interferogramlarında güçlü bozulmalara neden olacak kadar büyük değildir. Carnec et al. (1996), atmosferik etkilerin büyük ölçekli deformasyonlardan ziyade küçük çaplı deformasyonlar üzerinde daha az etkiye sahip olduğunu belirlemişlerdir. Bu da veri işleme ve yorumlama süreci sırasında ihmal edilebileceği anlamına gelmektedir. Etkileri genellikle büyüklük bakımından daha küçüktür ve su buharı ile kıyaslandığında interferogram boyunca eşit olarak dağılır ve bazen yörünge belirsizliklerinin neden olduğu hatalardan ayırt edilmesi zordur (Tarayre and Massonnet 1996, Hanssen 1998).

Su buharı zemin yüzeyindeki troposferde (zeminden yaklaşık 2 km'ye kadar) yer alır, burada güçlü bir türbülanslı karıştırma işlemi gerçekleşir. Türbülanslı karıştırma, kırılmada üç boyutlu (3B) konumsal etki ile sonuçlanabilir ve hem düz hem de dağlık bölgelerde lokal faz hatasına neden olabilir. Türbülanslı karıştırmanın yanı sıra fiziksel kaynaklı bir başka atmosferik süreç de atmosferin tabakalanmasıdır. Atmosferin farklı dikey kırılma bölgelerinde katmanlanması, dağlık bölgelerde ek atmosferik gecikmelere neden olur (Massonnet ve Feigl 1998, Hanssen 2001). Su buharının genellikle troposferik gecikmelere neden olan en önemli parametre olduğu düşünülmektedir. Fakat güçlü topografyaya sahip bölgelerde iki görüntü alımı arasındaki basınç değişikliklerinin nem değişimlerinden daha büyük bir troposferik gecikme sinyali üretebildiği durumlar vardır.

Havadaki su buharı, görünür damlacık kütesine veya donmuş kristallere yoğunlaştığı zaman bulutlar oluşur. Bulutlar, katmanlı ve taşınımlı olmak üzere iki genel kategoriye ayrılır. Bunlara sırasıyla katman bulutları ve kümülüs bulutları (küme bulutları) denir. Katmanlı bulutlardaki sıvı su içeriği genellikle düşüktür, böylece SAR sinyallerine önemli aralık hatalarına neden olmazlar.

Eğer faz sinyali bir interferogramda olup ve aynı zaman diliminde diğer interferogramlarda görünmüyorsa, faz değişiminin atmosferik etkilere sahip olduğu düşünülebilir. Bunu belirlemek için GNSS meteoroloji tekniğindeki su buharı ölçümleri kullanılabilir. Başka bir yaklaşım, atmosferik etkilerden dolayı faz değişimini ayrı tutan çok zamanlı interferogramları kullanmaktır.

2.3.3. Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) Etkileri

SAR interferogramında topografyanın etkisi, 2π faz farkına (fringe) karşılık gelen bir yükseklik farkı olan yükseklik belirsizliği (H_{belirsiz}) denilen parametre kullanılarak tanımlanabilir. Bu parametre görüntü alımı sırasında uydu pozisyonları arasındaki dik baz mesafesi ($B_{\perp}$) gibi görüntü çifti parametrelerine karşılık gelir. Daha büyük bir $B_{\perp}$, interferogramın yüksekliğe daha duyarlı olmasını sağlar.

$$H_{\text{belirsiz}} = \frac{\lambda R \sin \theta}{2B_{\perp}} \quad (2.10)$$

Topografyanın etkisi interferogramın dik baz mesafesine bağlıdır. Çok küçük bir dik baz mesafesi ile (örneğin Envisat 50 m'den daha az) uydu her iki görüntüyü bir zaman farkı dışında neredeyse aynı noktadan taramaktadır. Çok küçük veya ihmal edilebilir bir stereoskopik etkisi olacaktır. Bu deformasyon belirleme için en uygun durumdur. Topografyanın daha yüksek etkisi, uzun dik baz mesafesinde görülebilir. Topografik faz etkisini gidermek için, interferogramda olduğu gibi aynı H_{belirsiz} ile simüle edilmiş ve bir faz olarak SAR koordinatlarına dönüştürülebilen uygun bir SYM kullanılmalıdır (Lazecky 2011).

Herhangi bir DEM hatası, artık bir topografik sinyale neden olur (Hlaváčová 2008):

$$\Delta\varphi_{\text{topo}}^{\text{artık}} = \frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{B_{\perp} + \Delta B_{\perp}}{R \sin \theta} \Delta H_P \right) \quad (2.11)$$

Burada ΔH_P yükseklik hatası, $\Delta B_{\perp}$ ise yükseklik hatasından kaynaklı yerel $B_{\perp}$ hatası olarak verilmiştir. $\Delta B_{\perp}$ değeri pratik amaçlar için genellikle ihmal edilebilir, ancak dik yamaçlarda yer değiştirmelerin tespit edilmesi durumunda önemli bir etki yaratabilir.

Bu $\Delta\varphi_{\text{topo}}^{\text{artık}}$ değeri, yer değiştirme $\Delta\varphi_{\text{InSAR}}$ 'ın (rad) neden olduğu sinyal olarak yanlış yorumlanabilir. Bu değer SAR bakış yönünde (LOS) saptanan deformasyon φ_{LOS} değeridir:

$$\varphi_{\text{LOS}} = \frac{\lambda \Delta\varphi_{\text{InSAR}}}{4\pi} \quad (2.12)$$

SRTM SYM modeli (2000 senesinden itibaren) InSAR'da topoğrafyanın uzaklaştırılması için hala en çok kullanılan yükseklik modelidir. Bu model ~ 90 m çözünürlükte (Avrupa'da) ve 15 metreden daha düşük düşey bir doğrulukla InSAR tekniği için kullanışlı bir modeldir. Böyle bir model, InSAR kullanımlarının çoğunda yeterli kabul edilmiştir ve ASTER Global SYM (ASTER Global Digital Elevation Map-ASTER GDEM) gibi diğer küresel projelere göre daha güvenilirdir. 2014'ten bu yana SRTM-1 tarafından üretilen 1 saniye çözünürlüklü (Avrupa'da ~ 30 m) modeller de bulunmaktadır (Yue et al. 2017). InSAR topografya faz etkisinin giderilmesi için SYM seçiminde iki özellik göz önünde bulundurulmalıdır: doğruluk ve çözünürlük.

Çok zamanlı görüntülerin kullanımı sayesinde $B_{\perp}$ ve SAR faz değişiklikleri arasındaki korelasyonu kullanarak, zaman ve yükseklikteki her iki deformasyon eğilimini nispeten kesin olarak tahmin etmek mümkündür. SYM kalitesine ve ana faz elemanlarının niceliksel değerlerine bağlı olarak çok zamanlı interferometre ile yüksekliği doğru olarak tahmin etmek mümkündür.

2.3.4. InSAR Korelasyon Bozukluğunun Etkileri

SAR pikselleri genlik değeri ve karmaşık bir sayı olarak dijitalleştirilen geri saçılım sinyali fazı hakkında bilgi içerir. Böylece sonuç karmaşık bir dijital görüntüdür. Diferansiyel SAR interferometresi, iki farklı tarihte aynı bölge üzerinde elde edilen en az iki karmaşık görüntünün

algılanması aşamasında yer alan bilgileri kullanır ve küçük bir baz mesafesi ile ayrılır (Ulaby et al. 1982). Arazinin yer değiştirmesi, eğik aralık (slant range) yönündeki geniş alanlarda tespit edilebilir. Farklı SAR interferometrisi kavramları arasında, tekrar-geçiş konfigürasyonu aynı algılayıcıyla farklı zamanlarda veri elde etmekten oluşur. Bununla birlikte, bu teknik önemli sınırlamalara sahiptir. Yüzey yer değiştirme doğruluğu büyük ölçüde sistemin kendisine, yüzey fiziksel özelliklerine, atmosfer koşullarına (iyonosferik ve troposferik gecikme) ve hatta verileri işlemek için kullanılan yazılıma bağlıdır (Hanssen 2001). Bu etkiler, öncül ve soncul fazlarının izleme yeteneğimizi tehlikeye atabilir. InSAR uyuşumunun (coherence) mutlak değeri, yer değiştirmenin bir doğruluk ölçütüdür: uyuşum ne kadar yüksekse, deformasyon saptaması o kadar kesin olur.

Uyuşum parametresi γ , iki ortak kayıtlı kompleks görüntü z_1 ve z_2 arasındaki çapraz korelasyon katsayısının büyüklüğü olarak tanımlanır:

$$\gamma = \frac{|\sum_{i=1}^L z_{1i} z_{2i}^*|}{\sqrt{\sum_{i=1}^L |z_{1i}|^2 \sum_{i=1}^L |z_{2i}|^2}} \quad (2.13)$$

Burada belirlenen bir alanda bulunan bitişik piksellerin ortalaması alınır. ‘*’ işaret karmaşık eşleniği temsil eder ve, azimut ve mesafenin ortalama toplam piksel sayısıdır. $|\gamma|$ 0'dan (korelasyon yok) 1'e (mükemmel korelasyon) kadar değer alabilir. Tüm korelasyon kaynaklarının değerlendirilmesi yüzeyin jeofiziksel özelliklerini ortaya çıkarmayı ve algılayıcı etkilerini anlamayı gerektirir. Zebker and Villasenor (1992)'ye göre, gözlenen toplam korelasyon termal, konumsal ve zamansal korelasyon bozukluğundan etkilenen üç bileşenin ürünüdür:

$$\gamma = \gamma_{\text{termal}} \cdot \gamma_{\text{konumsal}} \cdot \gamma_{\text{zamansal}} \quad (2.14)$$

Bu üç bileşen ayrı ayrı değerlendirilebilirler.

Termal korelasyon bozukluğu: Termal sinyal-gürültü oranı (signal-to-noise ratio-SNR) ile ilgilidir ve aşağıdaki gibi olur:

$$\gamma_{\text{termal}} = \frac{\text{SNR}}{\text{SNR}+1} \quad (2.15)$$

Konumsal korelasyon bozukluğu: Sıfır olmayan bir baz mesafesi ve yerel arazi eğimine bağlıdır. Yüzey ve hacim dağılımı ile ilgili iki terimden oluşur:

$$\gamma_{\text{konumsal}} = \gamma_{\text{yüzey}} + \gamma_{\text{hacim}} \quad (2.16)$$

Yüzey korelasyon bozukluğu $\gamma_{\text{yüzey}}$ esas olarak arazinin eğimine bağlıdır ve aşağıdaki gibi yazılabilir (Wei and Sandwell 2010):

$$\gamma_{\text{yüzey}} = 1 - \frac{2|B_{\perp}|R_g \cos^2(\theta - \alpha)}{\lambda R} \quad (2.17)$$

Burada λ radar dalgaboyunu, R eğik mesafesini, $B_{\perp}$ LOS'a dik baz mesafesini, θ geliş açısını ve α yerel arazi eğimini ifade eder. Engembeli arazide, eğim ve baz mesafesine bağlı mekânsal korelasyon bozukluğu, diğer faktörlere hükmedebilir. Radar görüntüleri arasındaki dik baz mesafesi ne kadar uzun olursa, konumsal korelasyon bozukluğu olasılığı da o kadar yüksektir (Zebker and Villasenor, 1992). Her bir radar sistemi, interferometrik fazın tam bir korelasyon bozukluğuna karşılık gelen ve aşağıdaki gibi ifade edilen kritik bir dik baz mesafesi (B_c) ile karakterize edilir:

$$B_c = \frac{\lambda R}{2 R_g \cos^2 \theta} \quad (2.18)$$

Hacimsel korelasyon bozukluğu γ_{hacim} , saçılma özelliklerinin fiziksel özelliklerinden ve düşey dağılımından etkilenir. Ortama radar dalgasının girmesi, interferometrik uyumu azaltma eğilimindedir. Önemli hacimsel korelasyon bozukluğu bitki örtüsünde (Wei and Sandwell 2010), buzda veya karda (Hoen and Zebker 2000) meydana gelmektedir.

Zamansal korelasyon bozukluğu: İki görüntü alımı arasındaki hedef saçılma özelliklerinde değişiklikleri işaret eder. Zamansal korelasyon bozukluğu, bitki büyümesi veya toprak dielektrik özelliklerinin değişiminden kaynaklanabilir. Volkanik alanlarda meydana gelen değişiklikler öncelikle yanardağ aktivitesi ile ilişkili yüzey deformasyonlarından kaynaklanmaktadır. İki görüntü arasındaki zaman dilimi (zamansal baz mesafesi) ne kadar uzun olursa, korelasyon bozukluğu da o kadar yüksek olur. Bu etkiyi modellemek kolay değildir. Zebker and Villasenor 1992 tarafından aşağıdaki gibi modellenmiştir:

$$\gamma_{\text{zamansal}} = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right)^2 \cdot (\sigma_x^2 \sin^2 \theta + \sigma_z^2 \cos^2 \theta) \right\} \quad (2.19)$$

Burada, σ_x ve σ_z yatay ve düşey standart sapmalardır. Eşitlik 2.19'a göre; geliş açısı 45° 'den küçük olursa yatay değişimlere göre düşeyde daha büyük bir duyarlılık görülmektedir. Bu nedenle korelasyon bozukluğu ormanlar gibi önemli hacim saçılmalarını gösteren yüzeyler üzerinde ve daha kısa dalga boylarında daha hızlıdır.

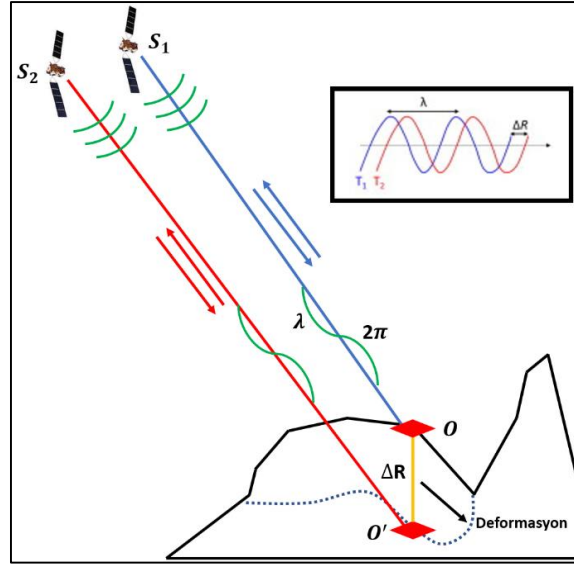
2.3.5. Yüzey Deformasyonun Geri Kazanımı

İnterferogramdan, topoğrafyadan kaynaklı faz katkıları, yörüngesel etkiler ve atmosferik gecikme gibi etkiler kaldırılırsa yüzey deformasyonu elde edilir. İki SAR yörüngesi arasında bir P noktasının LOS yönündeki yer değiştirme (deformasyon) Şekil 2.5'te gösterilmiştir.

Bir İnterferogramda topografik etkinin ve yeryuvarı eğriliğinin bir interferogramdan elde edilen faz bileşenlerinin başarılı bir şekilde ortadan kaldırılmasından sonra, faz ideal halini almaktadır. Bu faz ideal iki SAR veri toplama tarihi arasındaki süre içinde LOS yönü boyunca ölçülen yüzey deformasyonlarını göstermelidir. Yüzey deformasyonuna bağlı diferansiyel interferometrik faz, daha önce Eşitlik 2.3'te verilmiştir.

Eşitlik 2.3'e göre bir diferansiyel interferogramda 2π 'lik bir faz değişikliğine neden olan zemin yüzeyi deformasyonunun $\lambda/2$ 'ye karşılık geldiği sonucuna varılabilir. Örneğin ALOS-1 için böyle bir hesaplama yapılırsa 11,75 cm büyüklüğünde, Sentinel-1 için ise 2,75 cm gibi bir deformasyon elde edilir.

Bununla birlikte, iki SAR verisi edinme tarihi arasında meydana gelen yüzey deformasyonlarının katkıda bulunduğu izole faz bileşeni belirsizdir. Çünkü diferansiyel interferometrik faz, doğal olarak 2π 'dir (2π 'den büyük olan faz değerleri "0" değerinden yeniden başlar). Yüzey deformasyonunun fiziksel ölçümü, faz açma-çözümleme (phase unwrapping) işlemi olarak adlandırılır. Diferansiyel interferometrik fazın çözülmesi için ek işlem gerekir. Yüzey deformasyonu alınmadan önce ortaya çıkan diferansiyel interferogramlara faz çözümleme işlemi uygulanmalıdır.



Şekil 2.5 Tekrar geçişli (Repeat-pass) DInSAR geometrisi (Abdikan 2012).

Çözümlememiş diferansiyel interferogramlar hala birbirine göre olduğundan, diferansiyel interferometrik fazlar zaman içinde sürekli olarak korunan yüksek bir tutarlılığa sahip olurlar. Bu yüzden fazlar deformasyonun gerçekleşmediği durağan alanda bulunan bir referans noktasına göre ölçeklendirilmelidir. Çözümlememiş ve ölçeklendirilmiş diferansiyel interferogramlar, LOS yönü boyunca ölçülen düşey yüzey deformasyonları üzerinde fiziksel olarak anlamlı bilgiler sağlar. Başarılı bir şekilde açılmamış ve ölçeklendirilmiş diferansiyel interferogramlar, $-\frac{\lambda}{4\pi}$ faktörünü çarpılarak LOS yönünde yüzey yer değiştirmelerine dönüştürülebilir. Diferansiyel interferogramları çözümlendikten sonra, LOS yönündeki yüzey yer değiştirmeleri, ihmal edilebilir yatay yüzey deformasyonu varsayımı altında düşey yüzey deformasyonuna dönüştürülebilir. Genel olarak düşey ($\varphi_{\text{düşey}}$) veya yatay (mesafe yönü doğrultusu boyunca- φ_{yatay}) hareket bileşenleri, altta yatan hareketler ve varsayılan deformasyonun ana yönü ile ilgili ön bilgilere göre, ölçülen LOS deformasyonundan yeniden oluşturulur:

$$\varphi_{\text{düşey}} = \frac{\varphi_{\text{LOS}}}{\cos \theta} \quad (2.20)$$

$$\varphi_{\text{yatay}} = \frac{\varphi_{\text{LOS}}}{\sin \theta} \quad (2.21)$$



BÖLÜM 3

INSAR TEKİNİĞİ METODOLOJİSİ

3.1 ÇOK ZAMANLI INSAR TEKİNİKLERİ

Geleneksel InSAR işlemi, iki SAR görüntü alım topografyasındaki değişimler, atmosferik gecikme (iyonosfer ve troposfer), atmosferik durum değişimleri gibi yörünge pozisyonundaki farkın neden olduğu interferometrik sinyalin bir korelasyonunu içerir. Ayrıca, dağıtıcıların dielektrik özelliklerinde meydana gelen değişiklikler, geleneksel D-InSAR interferogramlarında sunulan zamansal ve geometrik (taban çizgisi) korelasyon bozukluğunun varlığını desteklemektedir. ESA ve Delft yörünge hassas verileri (Scharroo and Visser 1998) kullanılarak yörüngesel hata tahmin edilebilir ve kaldırılabilir. Atmosferik ve topografik hatalar ilişkilendirilir ve korelasyon bozukluğuna sebep olan etkenler zayıflatır.

Zaman serileri analizi olarak da bilinen çok zamanlı InSAR (Multi-temporal InSAR-MTI) işlemi en iyi sinyali elde etmek için aynı yörünge üzerinde birden fazla SAR görüntüsünün işlenmesiyle sinyallerde meydana gelen korelasyon bozukluğunu azaltmayı amaçlamaktadır. Günümüzde sıkça kullanılan, iki MTI sınıfı vardır: Bunlar Kalıcı Yansıtıcı İnterferometre (PSI) ve Kısa Baz Uzunluğu İnterferometre (SBAS) yöntemleridir. Bu iki yöntemin de kalıcı yansıtıcıların (PS) merkezlerinin baskın yansıtıcılığı prensibine dayanarak, ilişkisiz etkenleri zamansal çözümler ile ortadan kaldırmayı sağlar. MTI bir zaman dizisi halindeki görüntüleri kullanır. Bu görüntülerden kullandığı asıl eleman görüntülere ait faz değerleridir. Her elemandan yansıyan sinyal, her bir elemanın saçılma merkezleri tarafından yansıtılan tüm bireysel dalgaların toplamı ile çözünürlüğe bağlı olarak elde edilir.

PSI yöntemi, zaman içinde kararlı saçılma gösteren kalıcı yansıtıcı pikseller olarak bilinir (Ferreti et al. 2000, Hooper et al. 2004, Kampes 2006a). SBAS yöntemi olarak bilinen bir diğer yaklaşımda ise zaman içinde yer değiştirme değişimini elde etmek için geleneksel InSAR interferogramlarının yığını kullanır (Berardino et al. 2002, Schmidt and Bürgmann 2003,

Hooper 2008). PSI yöntemi, çözünürlük hücreleri için dağıtıcıların çözünürlük hücrelerinde tek bir baskın nokta yansıtıcıyı tanımlamaktadır.

ALOS-2 görüntüleri ham (raw) formatta elde edilmiş olsaydı açık kodlu Repeat Orbit Interferometry PACkage (ROI_PAC) yazılımıyla SLC görüntülerine dönüştürülebilirdi (Rosen et al. 2004). Bu çalışmada SLC görüntü olarak elde edilen ALOS PALSAR-2 verileri, açık kodlu Delft Object-Oriented Radar Interferometric Software (DORIS) ile işlenmiştir (Kampes et al. 2003). Sentinel-1 görüntüsünün ön işlemleri Sentinel Application Platform (SNAP) programı ile gerçekleştirilmiştir. DORIS ve SNAP'ten elde edilen interferogramların PS seçimi, SYM hata düzeltilmesi ve çözümleme (unwrapping) işlemleri yine açık kodlu StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers) yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Geometrik temellerin tahmini için uydu yörünge pozisyonlarına ihtiyaç vardır. Topoğrafik etki, harici bir SYM tarafından ~90x90 m çözünürlüğe sahip 3 saniyelik SRTM verileri kullanılarak giderilmeye çalışılmıştır. Koordinat sistemi WGS84 referans sistemi ile ifade edilmiştir.

Günümüzde, MTI algoritmaları farklı varyasyonlarla uygulanmıştır ve en bilinenler şunlardır:

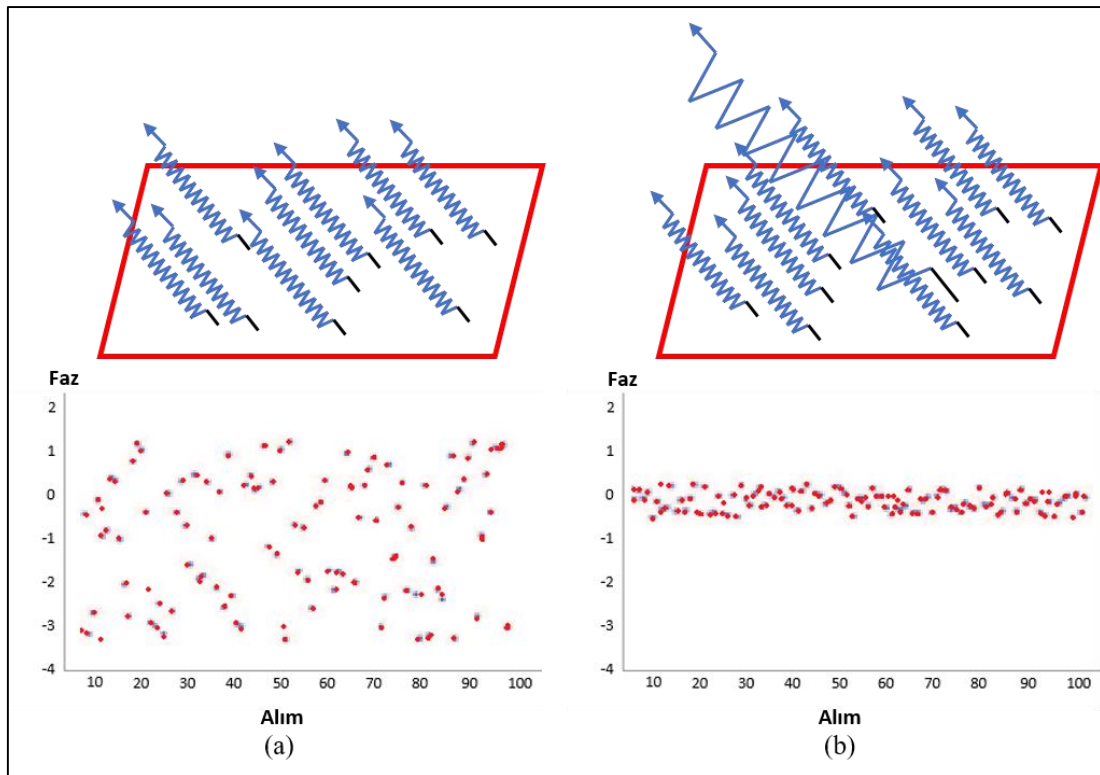
- Coherent Pixels Technique (CPT) (Blanco-Sanchez et al. 2008),
- Delft Persistent Scatterer Interferometry (DePSI) (Kampes 2005),
- Interferometric Point Target Analysis (IPTA) (Werner et al. 2003),
- Permanent Scatterer InSAR (PSI) (Ferreti et al. 2000, Ferretti et al. 2001),
- Persistent Scatterer Pairs (PSP) (Costantini et al. 2008, Costantini et al. 2012),
- Quasi Persistent Scatterers (QPS) (Perissin and Wang 2012),
- Small Baseline Subset (SBAS) (Berardino et al. 2002, Lanari et al. 2007),
- Stable Points Network (SPN) (Crosetto et al. 2008, Kuehn et al. 2010),
- SqueeSAR™ (Ferretti et al. 2009, Ferretti et al. 2011),
- Stanford Method for Persistent Scatterers (StaMPS) (Hooper et al. 2004, Hooper 2008).

3.1.1 Kalıcı Yansıtıcı İnterferometre (Persistent Scatterer Interferometry-PSI)

PSI, tek interferogram DInSAR ve ikinci nesil InSAR teknolojileri arasında ayırım yapmak için InSAR topluluğu içinde kullanılan toplu terimdir (Ferreti et al. 2000, Kampes 2005, Van der Kooij et al. 2005). PSI tekniği ilk olarak 1999'da Politecnico di Milano'da (Polimi) temel

algoritma geliştirildiğinde ortaya çıkmıştır. PSI, Dünya yüzeyinde yer alan elektromanyetik radyasyonun kalıcı yansıtıcılar (PS'ler) üzerindeki faz kayması tespitine dayalı gelişmiş bir interferometri tekniğidir.

PSI, geleneksel InSAR yönteminde meydana gelen korelasyon bozukluklarına, özellikle de zamansal ve geometrik etkilere bağlı olarak çözümler üretecek şekilde geliştirilmiştir (Ferretti et al. 2001). Konumsal ve zamansal varyasyonlara bağlı hatalar, mekan ve zamanda faz hatalarına neden olmaktadır (Hooper 2006). Bu, jeodezik ölçümlerin interferogramlardan yorumlanmasını zorlaştırır ve bazen SNR'yi azaltarak belirsiz hale gelir. Kalıcı yansıtıcılar, bir zaman görüntü dizisindeki tüm görüntüler boyunca kararlı genlik (amplitude) özellikleri ve tutarlı sinyal fazı (Şekil 3.1) sergileyen radar görüntüsünün bir çözünürlük hücresinde oluşan bir radar hedefi olarak tanımlanır. İyi PS yapan nesneler çok çeşitlidir ve bu nesneler doğal veya insan yapımı olabilir. Doğal formlar şunlardır: kaya mostraları, sert bitkisel olmayan yüzeyler ve kayalar. İnsan yapımı nesneler arasında; binalar, sokak lambaları, iletim kuleleri, köprü korkulukları, yer üstü boru hatları, elektrik hatları, barajlar ve çatı yapılarıdır. Uyduya doğru bir açılal sinyal yansıması oluşturabilen herhangi bir doğrusal yapıda olan her nesne PS oluşturabilir.



Şekil 3.1 a) Bir pikselde faza katkıda bulunan dağıtılmış PS, b) Baskın PS (Hooper 2006).

Kalıcı yansıtıcılar metodunun prensibi, zaman ve mekanda tutarlılıklarını koruyan bir dizi InSAR görüntüsünden noktaları tanımlamaktır. Bu dağıtıcılar, faz ölçümlerinden bağlı bir ağ oluştururlar. Bu yöntemde zaman serileri analizini gerçekleştirmek için her pikseldeki baskın dağıtıcının sinyali kullanılarak, sinyalin korelasyon bozukluğuna neden olan etken tarafından daha az etkilenmesi garanti etmektedir. Seçilen pikseller, bir dizi SAR görüntüsü üzerinde genlik ve faz değerleri açısından değişmezlik gösterir. PS yöntemini kullanmanın amacı, gürültü sinyallerini ayırmak ve deformasyon sinyalini ortaya çıkarmaktır.

Genelde PS işlemi için iki yaklaşım tanımlanmıştır. Bunlardan birinci yöntemde zaman içinde kararlı faza sahip olan pikseller çıkarılır (Ferretti et al. 2001, Crosetto et al. 2003, Kampes 2006a). Atmosferik ve yörüngesel katkılar, bitişik aday piksellerin faz farkı ile giderilir. Bu ikili fark deformasyonundan ve SYM hata katkılarından zaman serileri için modellenmiştir. Son olarak gürültü seviyesi model ve çift fazlardan farklı olarak tahmin edilmektedir (Hooper et al. 2012). Bu yaklaşım kentsel olmayan alanlar için yararlı değildir.

İkinci yöntemde, faz ile mekansal korelasyona sahip olan pikselleri aranır (Hooper et al. 2004, Van der Kooij et al. 2005). Her PS adayına deformasyon, yörünge ve atmosferik hatalarla ilişkili olan fazları tahmin etmek için bir konumsal filtre uygulanır. Bu katkılar çıkarılır ve daha sonra kalan fazdan SYM hata katkısı zaman serileri için modellenir. Piksel için gürültü; model ve faz arasında kalan artıktan tahmin edilir.

3.1.2. Kısa Baz Uzunluğu İnterferometre (Small Baselines Interferometry-SBAS)

SBAS yöntemi, interferogram üretmek için kullanılan SAR çiftleri arasındaki küçük baz mesafesi ayrımı ile karakterize edilen, zemin deformasyonunun zamansal etkisini inceleyen DInSAR algoritmalarından biridir (Sandwell and Price 1998, Berardino et al. 2002, Schmidt and Bürgmann 2003). Bu algoritma, SAR verisinden mekansal ve zamansal bilgileri hesaba katarak mekânsal korelasyon bozukluğunu sınırlandırmayı amaçlamaktadır. Yöntemdeki zaman serilerinin üretimi MTI algoritmalarının esasıdır.

SBAS, bir InSAR yığınlama (stacking) yöntemi olarak tanımlanmıştır. Bu yöntem, kısa baz mesafesine göre interferogram seti ile elde edilen deformasyonları ölçerek ortalama hızı hesaplayabilir. SBAS algoritması, bazı durumlarda interferogram serilerini oluşturmak için kısa baz mesafesine sahip farklı SAR kazanımları ile ilgilidir. SAR görüntüleri arasındaki konumsal

ayırımı azaltarak, özellikle büyük baz mesafelerini ayırması nedeniyle korelasyon bozukluğunu azaltır. Bu işlem sonucunda korelasyonlu interferogramlar elde edilir. İnterferogramlar, zaman aralığını, geometriyi ve bakış açısını en aza indiren düşük bir gürültü ile oluşturulur. Eğer geçici fark iki görüntü arasında küçükse, interferogram daha az zamansal ayrışma içerir (Lanari et al. 2004, Hooper 2008).

InSAR işleminden sonra, interferometrik faz dağılımı $[\pi, -\pi]$ arasında değişir. Faz sinyali kalitesini iyileştirmek için MTI algoritmalarından elde edilen mevcut çözümlerden biri de komşu yansıtıcı değerini hesaba katarak her piksel için ortalama değerini belirlemektir. Bu yöntem, zaman içinde gözlemlenen büyük faz farkını azaltabilir. Ayrıca her bir elemanın tüm saçılımlarından ortalamaı hesaba katar.

3.2. StaMPS ADIMLARI

StaMPS'te ilk aday PS noktaları interferogramların yığınınından seçilir. Bu genlik dağılım dizisi için genlik görüntüsünün standart sapmasının SAR genlik görüntülerinin ortalamasına oranı, belirli bir eşik değerine sahip olarak hesaplanır (Abdikan 2012):

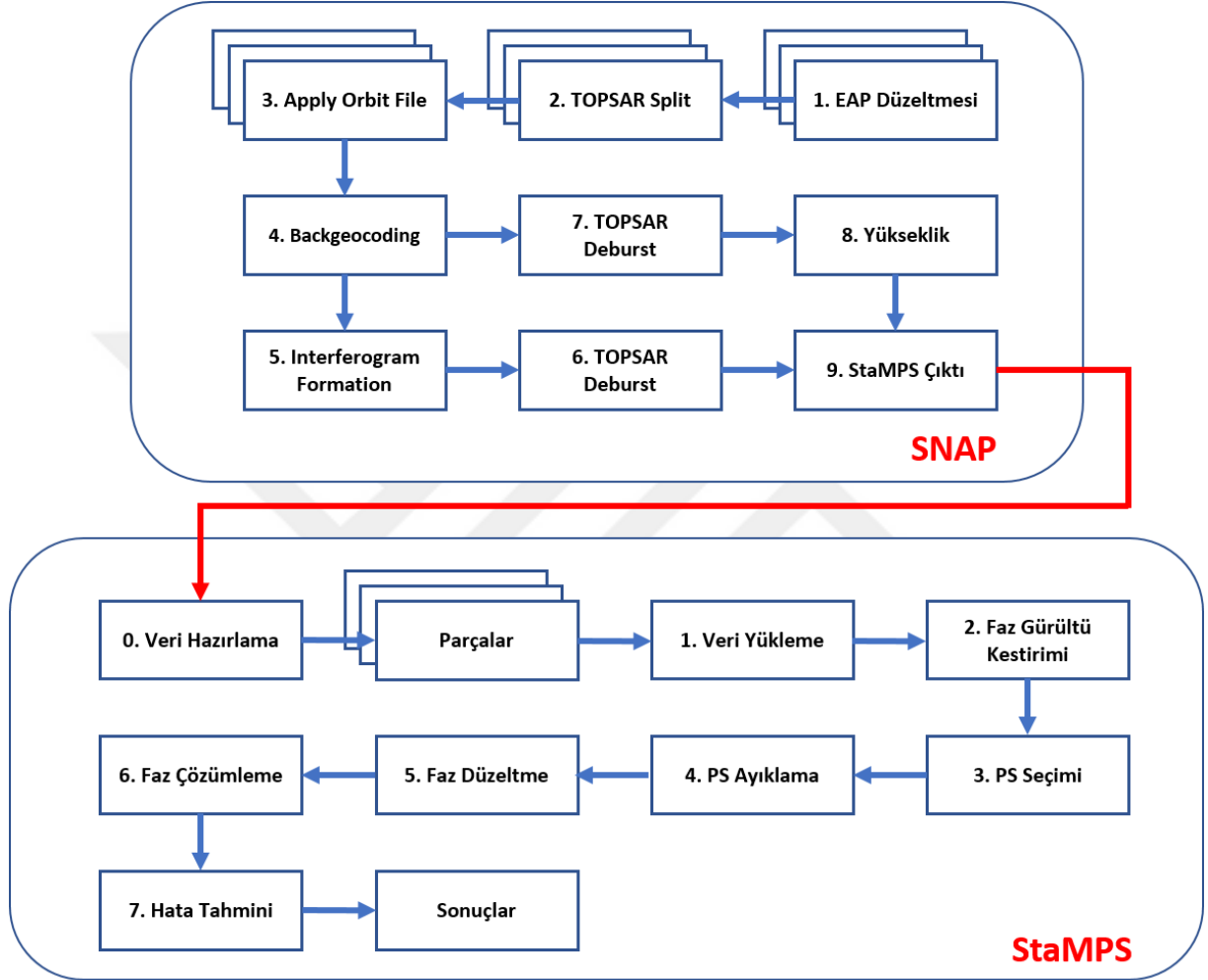
$$D_A = \frac{\sigma_A}{\mu_A} \quad (3.1)$$

Burada, D_A genlik dağılım dizisi, σ_A genlik görüntüsünün standart sapması ve μ_A genlik görüntülerinin ortalamasıdır.

PS adaylarının seçilmesinden sonra StaMPS, piksellerin neredeyse sıfır gürültüye sahip olduğu faz sabitliğini araştırır. Faz sabitliği deformasyonun mekansal ilişkiye sahip olduğu varsayımına dayanır. Bir faz gözlemi takip edilir ve bitişik PS adayları filtrelenerek düşük gürültülü PS noktaları olarak seçilir. Kentsel alanlarda bu PS noktaları, enerjinin çoğunun doğrudan yansıdığı bina, çatı, yol ve köprü gibi insan yapımı yapılar olabilir. Kırsal alanda kayalar veya ağaç gövdesi olarak meydana gelebilir.

Konumsal olarak ilişkili olmayan SYM hataları, harici bir SYM ile tahmin edilir ve ortadan kaldırılır. DEM hatası giderildikten sonra çözümleme işlemi uygulanır. Her bir interferogramın gürültüsü standart sapma tahminiyle elde edilebilir. Konumsal korelasyonlu yörünge hataları,

kesin yörünge bilgileri kullanılarak kaldırılır. Filtre, uzayda ve zamanda kullanıldığında, deformasyon fazı atmosferden ve gürültüden ayrılabilir. Son ürün, mm/yıl cinsinden LOS yönündeki ortalama hızdır. Şekil 3.2’te ise Sentinel-1 görüntüleri için kullanılan SNAP yazılımı ile elde edilmiş interferogramların StaMPS ile birlikte gerçekleştirilen iş adımları verilmiştir.



Şekil 3.2 StaMPS adımları (SNAP) (Imamoglu et al. 2018).

BÖLÜM 4

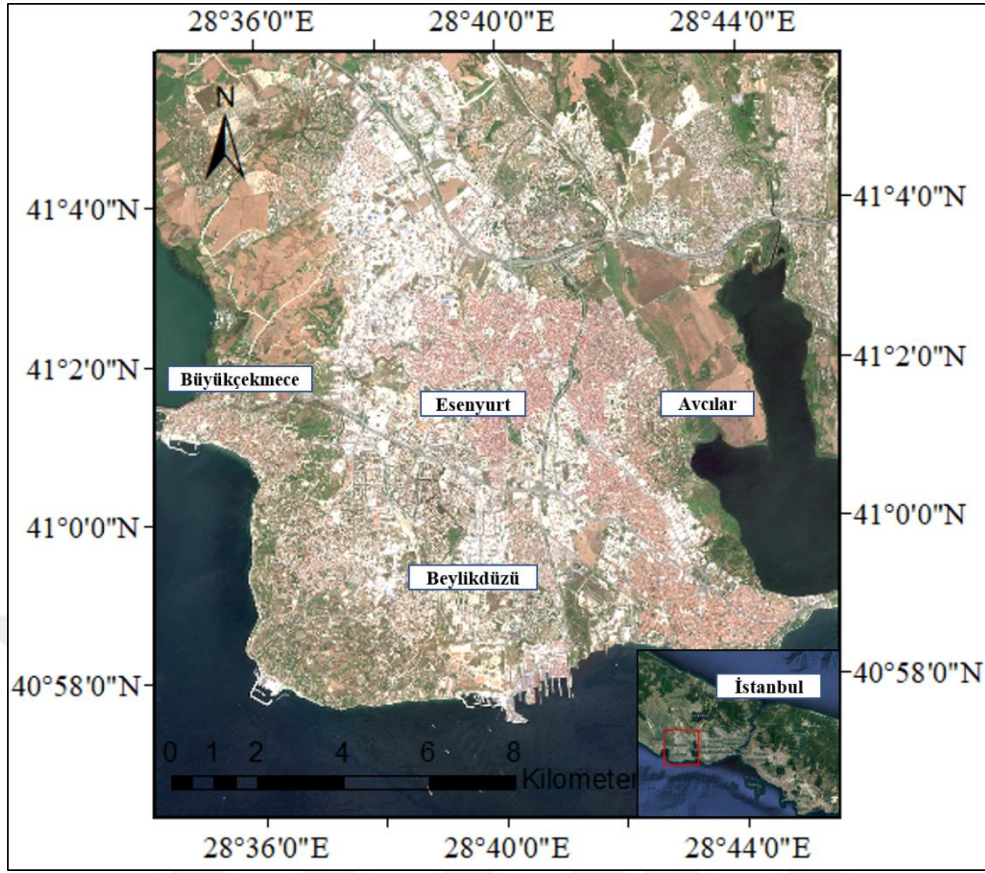
BEYLİKDÜZÜ-ESENYURT HEYELAN ALANI VE KULLANILAN VERİLER

4.1. ÇALIŞMA ALANI

Türkiye'nin en büyük şehri olan İstanbul yaklaşık 15 milyon nüfusu ile tüm Türkiye nüfusunun yaklaşık % 20'si gibi büyük bir bölümünü barındırmaktadır. Ülkenin Marmara Bölgesi'nde yer alan bu şehir Türkiye'nin sadece % 0,7 gibi ufak bir alanını kaplamasına rağmen ülkenin ekonomik, tarihi ve kültürel merkezi olarak kabul edilir. Nüfus büyüklüğü, büyük göçler nedeniyle % 3,45 ulusal ortalamadan daha hızlı bir oranda büyümektedir. Bu nüfus artışı sebebiyle şehirde büyük oranda bir kentleşme süreci başlamıştır ve bu kentleşme süreci, kentin batısında bulunan Beylikdüzü-Esenyurt bölgelerini de etkilemiştir (Şekil 4.1).

Bu yarımada, İstanbul'un batı eksenine doğru hızlı mekansal gelişmesiyle ortaya çıkan önemli yerleşim bölgelerinden bir tanesidir. Bu tez çalışmasında Beylikdüzü-Esenyurt bölgesinde meydana gelen heyelanlar araştırılmıştır. Araştırma alanı 40° 64'-41° 10' kuzey enlemleri ile 28° 55'-28° 76' doğu boylamları arasında bulunan bu yarımadadır.

Yer yüzeyinde meydana gelen heyelan hareketlerinin özellikle İstanbul'un Avrupa yakasının Marmara Denizi kıyı bölgesinde yoğunlaştığı bilinmektedir (Duman et al. 2006). Haramidere ve Büyükçekmece Körfezi ile Büyükçekmece Körfezi'nin doğu kıyılarını oluşturan kesim ile Marmara Denizi'ne yakın bölgelerin neredeyse tamamı heyelan alanlarıdır (Özgül vd. 2011) (Şekil 4.2). Bu bölge, 17 Ağustos 1999 Kocaeli ve 12 Kasım 1999 Düzce depremleri tarafından etkilendiği için özellikle ilgi çekicidir. Ayrıca son on yıl içinde kentsel alan miktarı %3'ten %25'e çıkarak (Maktav et al. 2000), ilçede yaşayanların sayısı yaklaşık 58.000'den yaklaşık 316.000'e çıkmıştır.



Şekil 4.1 Çalışma alanı.

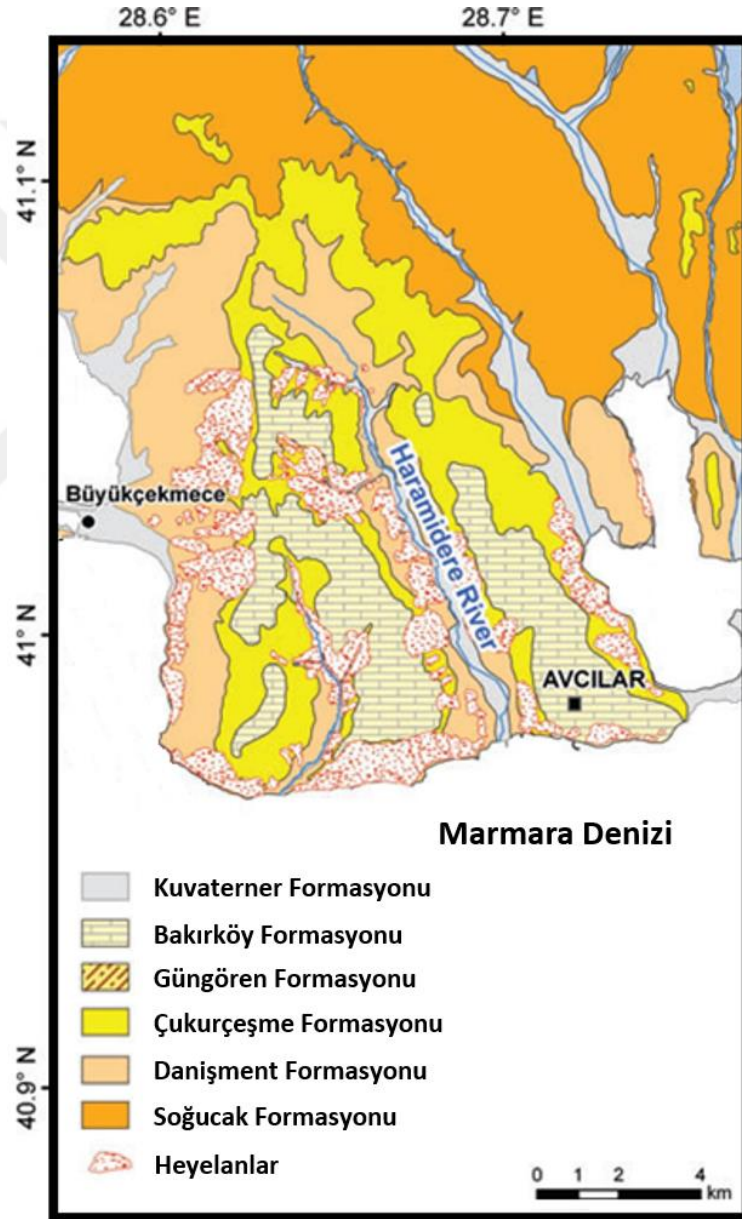
4.1.1. Jeolojik Yapı

Çalışma alanı jeolojik olarak Oligo-Miyosen yaşlı litolojik oluşumlar ve Kuvaterner yaşlı örtü birimleri ile kaplıdır. Stratigrafik olarak Oligosen yaşlı Çukurçeşme formasyonu Küçükçekmece ve Büyükçekmece gölleri arasındaki en eski kayalar olup göllerin doğu ve batı kesimlerinde gözlenmektedir. Bu oluşumda baskın litoloji, grimsi yeşil renkli kil, yüksek plastisite, konsolide ve sert kıvamdadır (Yıldırım and Savaşkan 2003, Özgül vd. 2011, Meral Ozel et al. 2016). Stratigrafik dizilim, Üst Miyosen yaşlı Güngören formasyonunun kireçtaşı ve kum mercekleri ile aralanmış kil ve marn ile devam etmektedir. Bu oluşum, kayda değer bir organik içerik ve şişme potansiyeli olan yüksek koyuluğa sahip siyah-koyu gri renkli kilden oluşmaktadır (Meral Ozel et al. 2016). Geç Miyosen yaşlı Bakırköy formasyonu kireçtaşı ve kil taşlarından oluşmakta ve bölgenin orta kısımlarını kesmektedir.

Bu formasyon, genellikle beyaz killi, beyaz renkli, düz tabakalı, orta derecede güçlü Mactra taşıyan kireç taşı ve genellikle yeşil killiyle kaplanmış zayıf ve orta şiddette marndan oluşmaktadır (Yıldırım and Savaşkan 2003, Özgül vd. 2011). Çalışma alanındaki en genç

birimler Kuvaterner yaşı alüvyonlar ve heyelan çökelleridir. Bu birimler sırasıyla Büyükçekmece ve Küçükçekmece göllerinin doğu ve batı kenarlarındaki en yaşlı kayaçları oluşturmaktadır. Bölgede jeofizik etütler ve jeolojik gözlemlerle bazı aktif olmayan fayların varlığı ortaya çıkmıştır (Yurtsever and Çağlayan 2002, Gökasan et al. 2003, Duman et al. 2005).

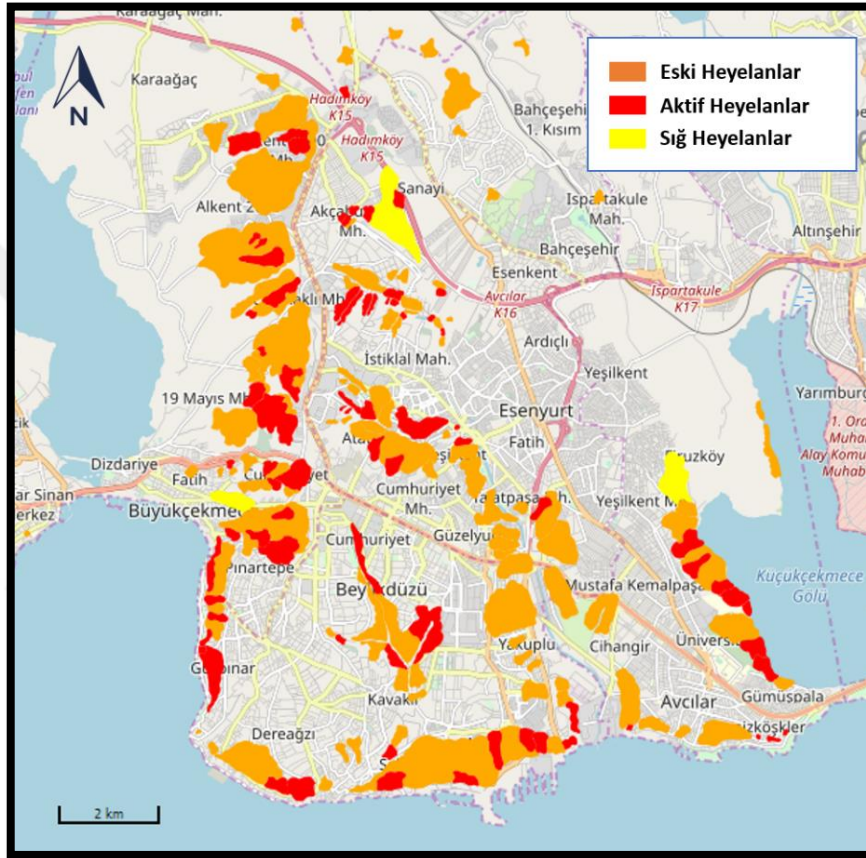
Bu fayların trendi genel olarak kuzeybatı-güneydoğu yönündedir ve çoğunlukla Çekmece göllerinin doğu ve batı kıyılarına paraleldir. Bölgedeki tortul birimlerin dipleri 5°-15° 'dir ve kısa mesafelerde yüksek bir değişime sahiptir (Duman et al. 2005, Duman et al. 2006).



Şekil 4.2 Çalışma alanına ilişkin jeolojik formasyonlar.

4.2. PROBLEM TANIMI VE HEYELANLAR

Küçükçekmece ve Büyükçekmece gölleri arasındaki alanda meydana gelen heyelan bölgeleri Şekil 4.3'te verilmiştir. Bu toprak kaymalarının çoğu, Küçükçekmece körfezinin batı tarafındaki Pliyosen'in kil seviyelerindeki iki küçük toprak kayması dışında, Gürpınar formasyonunun kil ve çeşitli yatak tabakalarında meydana gelmiştir (Duman et al. 2005).



Şekil 4.3 Çalışma alanındaki heyelan alanları (Duman vd. 2011).

Bu bölgelerde genellikle ortaya çıkan heyelan türleri derin tekrarlanan enkaz, kaya kaymaları, sığ heyelanlar ve akıntılardır (Duman et al. 2005). Bu oluşumların çoğu günümüzde aktif durumdadırlar. Genel olarak, heyelanların çatlak kısımları belirgindir ancak heyelanların ayak kısımları çok belirgin değildir. Bunun nedeni, Çukurçeşme formasyonunun erozyona dirençli kil ve kum taşıyan kısımlarının heyelanların çatlak bölümlerinin bulunduğu yerdedir.

Deniz seviyesi değişikliklerine bağlı olarak erozyon aktivitelerini arttıran nehirlerin aşındırmasına bağlı olarak değişen eğim koşullarının yamaçta etkili olduğu düşünülmektedir

(Arpar 1999). Günümüzde, toprak kaymaları eski toprak kaymalarının yeniden devreye girmesinden kaynaklanmaktadır. Çok düşük hzlara sahip olan derin yerleşimli heyelanların yanı sıra, bölgede nispeten yüksek hıza sahip olan ve çok yüksek zarar veren toprak akışı da söz konusudur. şekil 4.4 ve şekil 4.5'te bu hareketlerden dolayı yollarda ve binalarda meydana gelen güncel hasarlardan örnekler verilmiştir. Bu akışlar, Büyükçekmece'nin doğu kıyılarında çoğunlukla etkilidir.



şekil 4.4 çalışma alanında bulunan yollarda meydana gelen deformasyonlar.

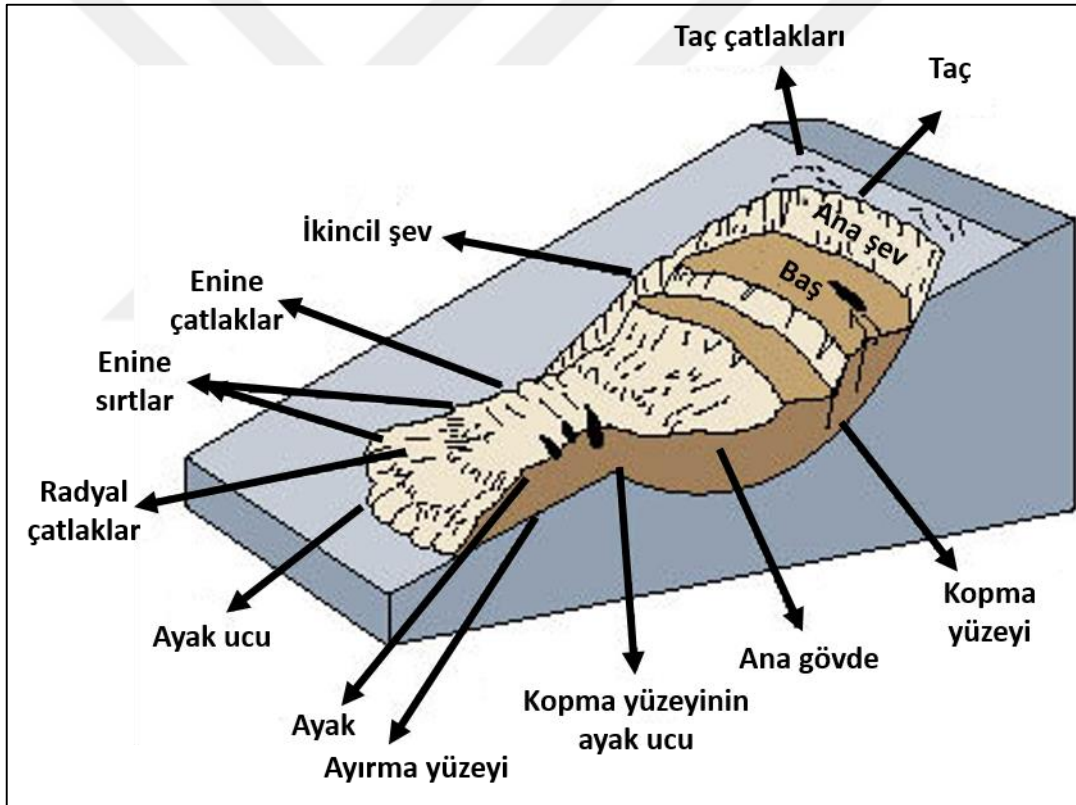


şekil 4.5 çalışma alanında bulunan binalarda meydana gelen deformasyonlar.

Aynı zamanda insan aktiviteleri ile birlikte ağır yağışlar, heyelan faktörleri olarak bilinmektedir. Ayrıca, tarihi bir kayıt olmamasına rağmen, depremler bölgedeki heyelanlar için potansiyel bir tetikleyici faktör olarak da düşünülmektedir.

4.2.1. Heyelanların Sınıflandırılması

"Heyelan" terim olarak kaya, toprak, suni dolgu veya bunların bir kombinasyonunu içeren eğimli yapıya sahip malzemelerin aşağı ve dışa doğru hareket etmesine neden olan çok çeşitli işlemleri tarif eder. Malzemeler düşerek, devrilerek, kayarak, yayılarak veya akarak hareket edebilir. Şekil 4.6'da heyelanın özelliklerini tanımlayan ve yaygın olarak kabul edilen terminoloji ile birlikte bir heyelanın yapısı ve bölümleri gösterilmektedir.



Şekil 4.6 Bir heyelanın yapısı ve bölümleri (Varnes 1978).

Çeşitli heyelan türleri, söz konusu malzeme türleri ve hareket şekli ile ayırt edilebilir. Bu parametrelere dayanan bir sınıflandırma sistemi Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Diğer sınıflandırma sistemleri, hareket hızı ve heyelan malzemesinin su, hava veya buz içeriği gibi ek değişkenleri içerir. Heyelanlar öncelikle dağlık bölgelerle ilişkilendirilse de, genellikle alçak kabartma alanlarında da oluşabilir. Heyelan alçak kabartmalı alanlarda toprak kaymaları, kazı

ve dolgu (karayolu ve bina kazıları), yanal toprak kaymaları, maden atık yığınlarının çökmesi (özellikle kömür) ve bununla ilişkili çeşitli sebeplerden ortaya çıkmaktadır. taş ocakları ve açık ocaklar. En yaygın heyelan türleri aşağıdaki şekilde tarif edilmiştir ve Şekil 4.7'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1 Heyelanların Sınıflandırılması (Varnes 1978, Öz 2009)

HAREKET TÜRÜ		MALZEME TÜRÜ	
		KAYAÇLAR	ZEMİNLER
			İri Daneli İnce Daneli
Düşme		Kaya Düşmesi	Moloz Düşmesi Zemin Düşmesi
Devrilme		Kaya Devrilmesi	Moloz Devrilmesi Zemin Devrilmesi
Akma		Kaya Akması	Moloz Akması Zemin Akması
Kayma	Ötelemeli	Kaya Kayması	Moloz ve Zemin Kayması
	Dairesel		
Yanal Yayılma		Kaya Yayılması	Moloz ve Zemin Akması
Karmaşık		Hareket Türü ve Malzeme Karışık	

Kaymalar: İyi tanımlanmış kesme düzlemlerinde hareket eden malzeme bloklarından oluşur. İçbükey bir yüzey boyunca hareket eden dairesel kaymalar ve yer yüzeyine paralel hareket eden ötelemeli kaymalar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Düşmeler: Kayaların veya toprakların ani salınımıdır. Düşme de malzemenin herhangi bir etkiye kadar diğer yüzeylerle çok az teması halinde serbestçe düşmektedir.

Devrilmeler: İlk hareketin kütlelerin ileri bir dönüşünü içermesi dışında düşmelere benzemektedir.

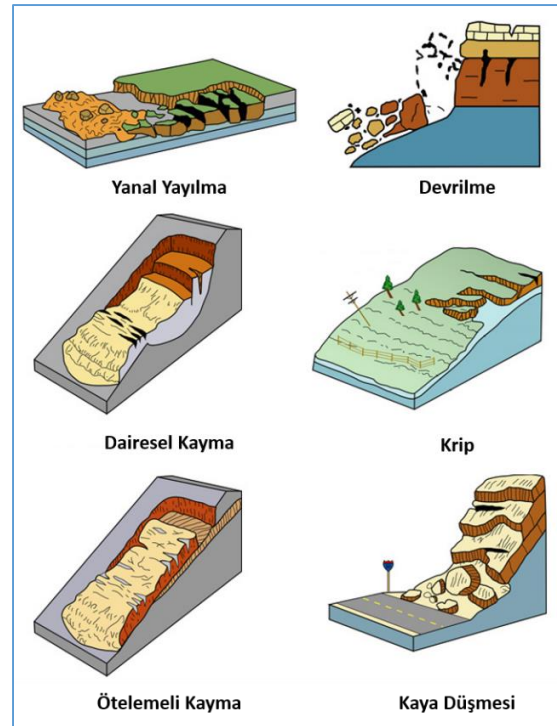
Akmalar: Taşınan kütle içerisinde kesilerek tamamen hareket eder ve akışkanlar gibi davranmaktadır.

Kripler: Malzemenin yokuş aşağı doğru neredeyse algılanamayan hareketidir.

Yanal yayılımlar: altta yatan malzemelerdeki sıvılaştırma yüzey kayalarının veya toprakların yumuşak eğimlerde aşağı hareket etmesine neden olduğunda meydana gelmektedir (Varnes 1978).

Malzemenin bu hareketlerin görülmesinin en büyük sebebi yamaçlardaki etkili yerçekiminden kaynaklanmaktadır. Yerçekimi gerilimleri kaya veya toprağın gücünü aştığında, eğim arızası meydana gelir. Birçok heyelan, stresi artıran ve şev malzemelerini zayıflatan faktörleri tetikleyerek başlamaktadır. Bu tetikleyiciler şunları içerir (URL-1):

- Zayıf, hassas veya yıpranmış malzemeler,
- Şiddetli yağışlar ve karın hızlı erimesi,
- Eğimi suyla yükleyen sulama faaliyetleri,
- Eğim açılarını artıran veya eğimlerin ayak uçlarını kesen doğal erozyon veya insan faaliyetleri,
- Depremler ve volkanik hareketler,
- Orman yangını, kuraklık veya yanlış tarım uygulamaları,
- Kaya, maden cevheri veya madencilik atıklarıyla yapılan yamaçların yüklenmesidir.



Şekil 4.7 Heyelan tipleri (URL-1).

4.3. KULLANILAN VERİLER

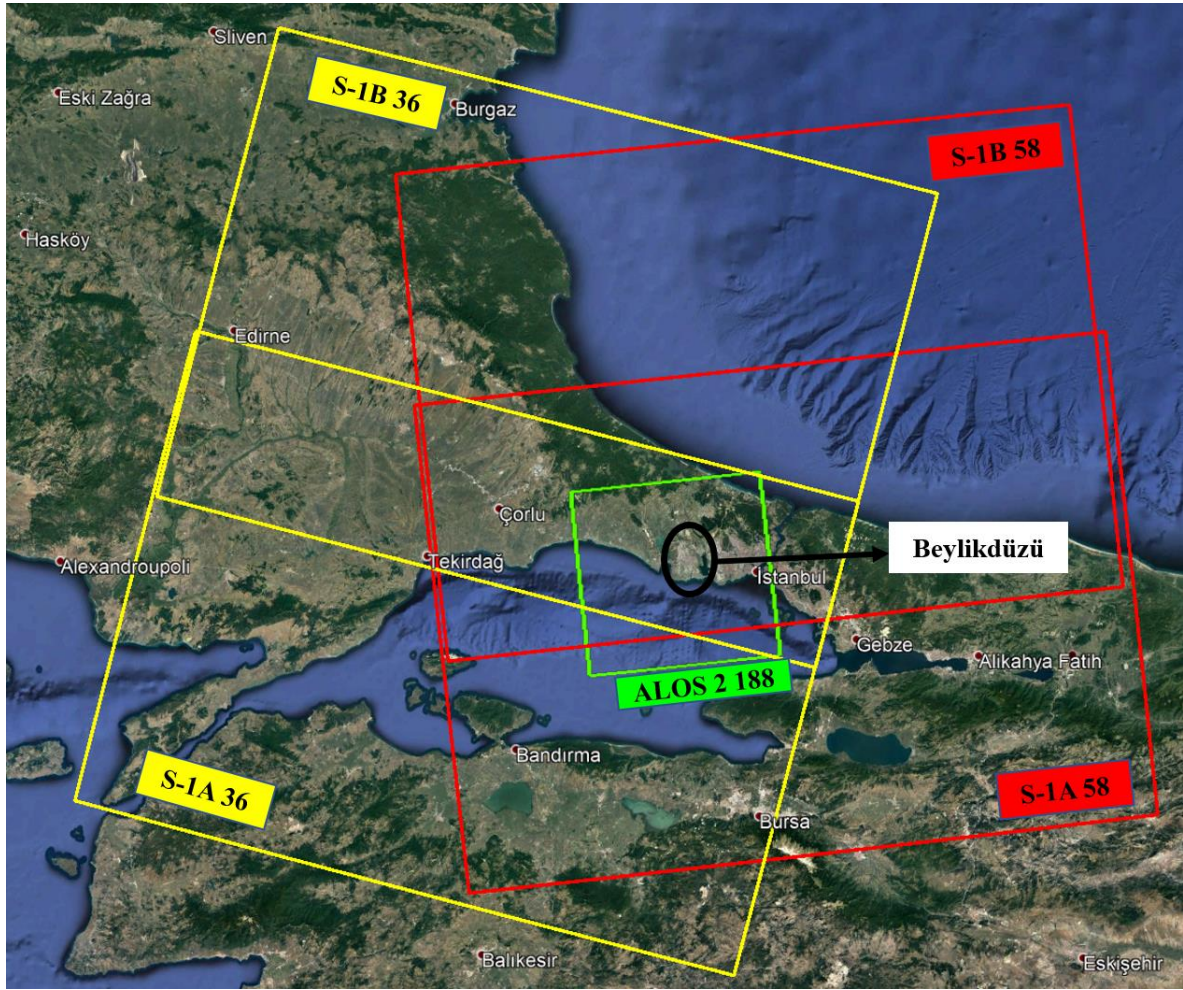
Bu tez çalışmasında elde edilen tüm SAR verileri tek periyot halinde elde edilmiş ve 2015-2018 yılları arasında meydana gelmiş olan hareketler incelenmiştir. Bu periyotta 2015-2018 yılları için Sentinel-1 SLC, 2016-2018 yılları için ALOS PALSAR-2 SLC görüntüleri tarihler çıkışacak şekilde kullanılmıştır.

Tüm görüntüler SLC olarak elde edilmiştir. Veriler seçilirken aynı çerçeve için olabildiğince çok görüntü içeren yörüngeler seçilmiştir (Şekil 4.8). Bunun sebebi ise mevsimsel ayrımın dikkate alınmamış olmasıdır. SAR ile yüzey hareketlerinin incelenmesi ve gözlemlenmesinin avantajlarından biri, alçalan ve yükselen yörüngelerde görüntü elde etme yeteneğine sahip olmasıdır. Yükselen yörüngeden elde edilen 19 adet ALOS PALSAR-2 L band görüntüsü bu çalışmada kullanılmıştır. Ayrıca, 174 adet yükselen ve 169 adet alçalan Sentinel-1 C band görüntüsü de her iki geçiştten elde edilmiştir. Polarizasyon olarak da Sentinel-1 için VV polarizasyon, ALOS PALSAR-2 için HH polarizasyonu tercih edilmiştir (Çizelge 4.2).

Ayrıca yer değiştirme hareketlerini belirlemek ve PSI sonuçlarımızı doğrulamak için çalışma bölgesinde belirlenen 13 adet noktada (1 noktada son kampanya gerçekleştirilemedi) 3 kampanya olacak şekilde GNSS ölçmeleri gerçekleştirilmiştir. Kampanya ayları sırasıyla Nisan, Temmuz ve Ekim'dir. Bunun yanında SAR verilerinin işlenmesi için SYM olarak SRTM verisi kullanılmıştır. PSI yönteminde birincil (master) görüntüyü belirlemek için meteorolojik veriler de kullanılmıştır.

Çizelge 4.2 Kullanılan SAR görüntülerinin özellikleri.

Algılayıcı	Yör.	Mod	Çerçeve	Kull.Pol.	Periyot
Sentinel-1	Yükselen	IW	58	VV	20150101- 20181030
Sentinel-1	Alçalan	IW	36	VV	20150103- 20181029
ALOS PALSAR-2	Yükselen	SM3	138	HH	20160724- 20181014



Şekil 4.8 Çalışma alanını kapsayan mevcut SAR veri çerçeveleri.

4.3.1. Sentinel-1 Görüntü Alımı

Sentinel-1 uydusu, ESA (Avrupa Uzay Ajansı) ve Avrupa Komisyonu tarafından ortaklaşa oluşturulmuş bir yer gözlem misyonudur (Şekil 4.9). Sentinel-1, 5.405 GHz'lik frekansı ile çalışan tekil C band SAR algılayıcısına sahiptir. Çizelge 4.3'te bu uydunun detaylı bilgileri gösterilmektedir. Sağ bakış aktif faz dizi anteni ile range (aralık) ve azimutta hızlı tarama sağlayabilir. C band SAR algılayıcı, arazi örtüsü sınıflandırmak ve buz analizi için uygun çift polarizasyonda (HH + HV, VV + VH) verileri desteklemektedir. Sentinel-1, dört alım moduna sahiptir: Stripmap (SM), Interferometric Wide swath (IW), Extra-Wide swath (EW), Wave mode (WV) (Şekil 4.10). Stripmap modu, 5x5 m çözünürlük ve 80 km'lik şerit genişliğine sahiptir. Interferometric Wide Swath modu, 250 metrelik geniş bir şerit genişlik aralığı sağlar ve 5x20 m çözünürlük ile orta çözünürlüktedir. IW modu ile bu tez çalışmasında yer alan yüzey hareketlerinin belirlenmesi ve izlenmesi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Wide swath modu, bir alanı görüntülemek için üç alt şerit (sub-swath) gözlem yeteneğine sahiptir. Extra Swath modu

deniz, buz ve kutup bölgesi gibi geniş alanlarda araştırmalar yapılmasına imkan sağlar. Bu mod, 25x100 m çözünürlüğe, 400 km'lik bir şerit genişliğine ve beş alt şeride sahiptir. Ayrıca IW modunda olduğu gibi interferometri için kullanılma kabiliyetine de sahiptir. WV modu, dalga yüksekliğinin ve okyanus dalgalarının yönünün elde edilmesine yardımcı olabilir. Çözünürlük 5x20 m, şerit genişliği ise 20x20 km'dir. Sentinel-1 uydu görüntüleri ile aşağıda verilen çalışmalar gerçekleştirilebilir:

- Yer kabuğu hareketlerinin belirlenmesi ve izlenmesi,
- Doğal afetlerden (orman yangını, sel, deprem, volkanik faaliyetler vb.) yönetimi için acil haritalama,
- Orman, su, toprak ve tarım gibi farklı arazi tür ve örtülerini izleme,
- Deniz buzulu ve buzdağının izlenmesi, deniz veya okyanus koşullarının tahmin edilmesi,
- Deniz gözlemleri,
- Gemi tespiti,
- İklim değişikliğinin izlenmesi.

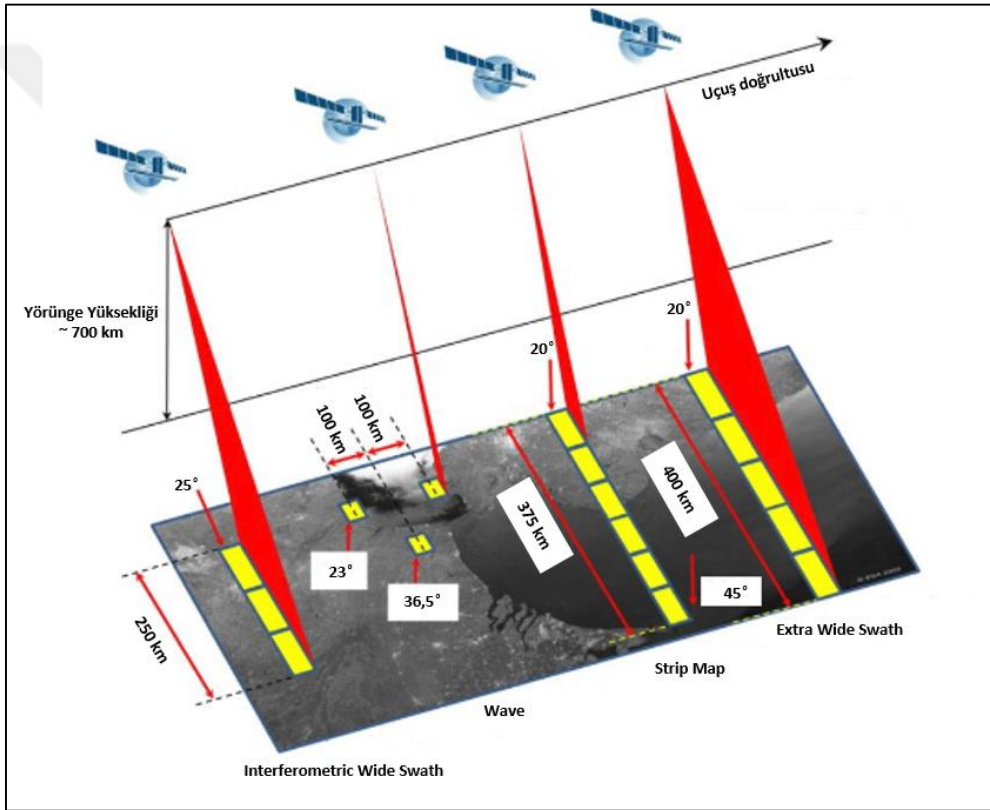


şekil 4.9 Sentinel-1 uydusu (URL-2).

Sentinel-1 görüntüleri dört tip olarak kullanıcıya sunulmuştur. Ham veri olan Level 0 özel amaçlar içindir. Ürün seviyesi Level 1 ise genlik görüntüsü ve faz görüntüsü dahil olduğu SLC görüntülerdir. Yoğunluk görüntüsü de (intensity) Level 1 seviyesindedir. Okyanusun jeofizik parametrelerini içeren ürün ise Level 2 Ocean görüntüleridir.

Çizelge 4.3 Sentinel-1 uydusu genel özellikleri (URL-3).

Yörünge	Güneş eşzamanlı tekrar yörünge
İrtifa	693 km
Eğim açısı	98,18°
Tekrar görüntüleme	6 gün (1A-1B)
Kütle	2300 kg
Ömrü	7 yıl 3 ay
Band	C Band
Fırlatma tarihi	Nisan 2014



Şekil 4.10 Sentinel-1 görüntü alım modları (URL-3).

4.3.2. ALOS PALSAR-2 Görüntü Alımı

ALOS-2, Japon yer gözlem uydularından en son geliştirilen ve göreve başlayan uydudur (Şekil 4.11). Bu uydu, 1.2 GHz frekans aralığını kullanan aktif bir mikrodalga radarıdır. Uyduya ait diğer temel özellikler Çizelge 4.4’de verilmiştir. Japonya Uzay Ajansı (JAXA) tarafından işletilmektedir. ALOS-2, 24 Mayıs 2014’te geliştirilmiş bir L band SAR algılayıcısıdır. Uyduya

monte edilmiş faz dizi tipi L bandı (PALSAR-2) ile piyasaya sürülmüştür. PALSAR-2, Şekil 4.12'de gösterildiği gibi üç moda sahiptir. Bunlar Spotlight, Strip Map ve ScanSAR modlarıdır. Spotlight modu, 1x3 m çözünürlük ve 25 km şerit genişliği ile en detaylı gözlem modudur. Strip Map modu 3 m, 6 m ve 10 m metre yüksek çözünürlükte ve şerit genişliği 50 veya 70 km'dir. ScanSAR modu, gözlem genişliği 350 km veya 490 km olan geniş bir alanı ve sırasıyla 60 m veya 100 m çözünürlükleri ile geniş alanlarda gözlem imkanı sağlamaktadır. ALOS-2 uydu görüntüleri ile aşağıda verilen çalışmalar gerçekleştirilebilir:

- Farklı ölçeklerdeki afetlerin izlenmesi,
- Doğal kaynak arama (doğal kaynakları ve enerji tedarikini kolaylaştırmak),
- Arazi türünün ve örtüsünün sürekli gözlenmesi,
- Ekili alanların etkin izlenmesi,
- Tropikal yağmur ormanlarının küresel olarak izlenmesi (küresel ısınma).

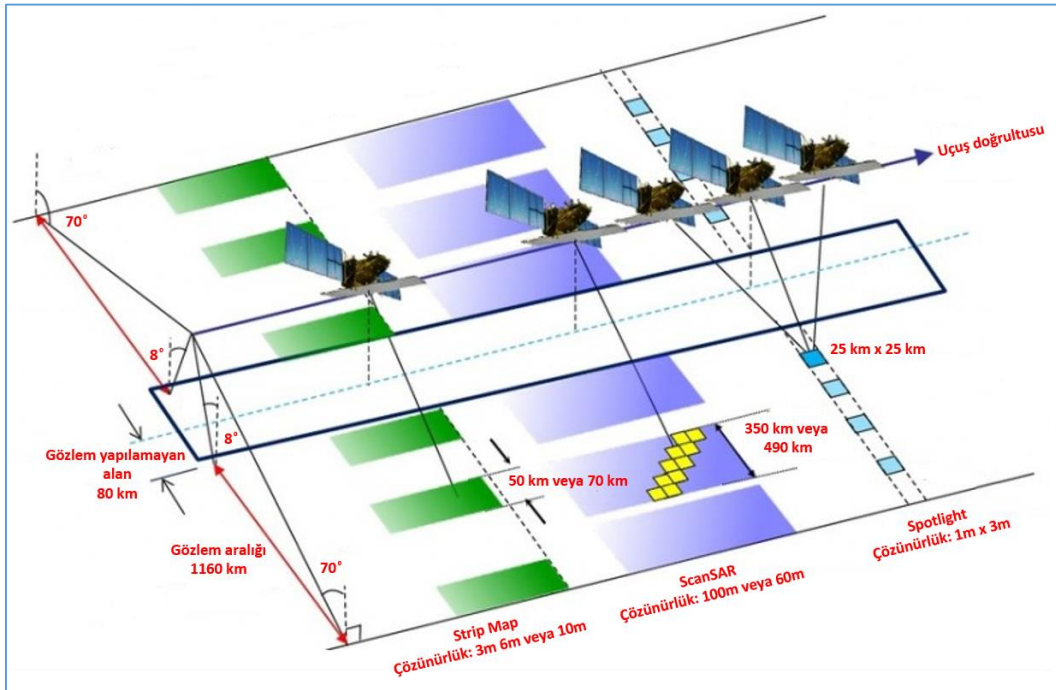


Şekil 4.11 ALOS PALSAR-2 uydusu (URL-4).

PALSAR-2 görüntüleri farklı işleme seviyeleri ile dört tip olarak kullanıcıya sunulur: Level 1.1, Level 1.5, Level 2.1 ve Level 3.1. Level 1.1, eğik mesafeki karmaşık sayı verisidir. Bu ürün tekil bakış verisidir ve faz bilgisi içerir. ScanSAR modunda, her tarama için görüntü dosyaları oluşturulur. Level 1.5, sıkıştırılmış aralık (range) ve azimut ile eğik mesafe genlik verisidir. Level 2.1, Level 1.1'deki sayısal yükseklik verilerini kullanarak geometrik olarak düzeltilmiştir (ortorektifiye). Level 3.1, Level 1.5 görüntüsünün gürültüsü giderilmiş ve düzeltilmiş verisidir.

Çizelge 4.4 ALOS PALSAR-2 uydusu genel özellikleri (URL-5).

Yörünge	Güneş eşzamanlı tekrar yörünge
İrtifa	628 km
Eğim açısı	97,9°
Tekrar görüntüleme	14 gün
Kütle	2100 kg
Ömrü	5-7 yıl
Band	L Band
Fırlatma tarihi	Mayıs 2014



Şekil 4.12 ALOS PALSAR-2 görüntü alım modları (URL-5).

BÖLÜM 5

BULGULAR VE TARTIŞMA

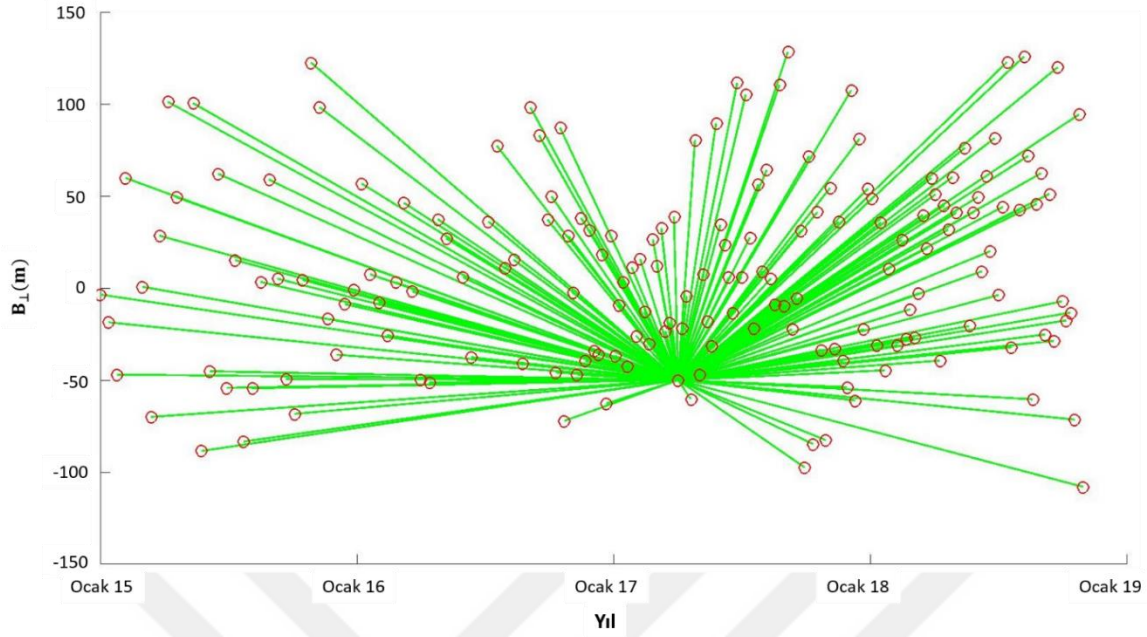
5.1. SENTINEL-1 ÇOK ZAMANLI INSAR ANALİZİ

Beylikdüzü-Esenyurt bölgesinde meydana gelen heyelanın belirlenmesi ve izlenmesi için yapılan çok zamanlı InSAR analizinde 2 farklı yörüngede (alçalan ve yükselen) Sentinel-1 C band görüntüleri elde edilmiştir. Sırasıyla yükselen ve alçalan yörüngede 174 görüntü ve 169 görüntü toplanmıştır. Görüntülerin hepsi IW mode SLC görüntüsü şeklinde elde edilmiştir. Interferogram üretimi için SNAP programı kullanılmış, PSI sonuçları StaMPS tarafından üretilmiştir. Baz mesafesi ile ilgili herhangi bir korelasyon bozukluğu gözlenmemiştir. Atmosferik gecikme nedeniyle oluşan faz, her bir işlem için yörünge ve DEM hataları tahmin edilmiş ve gerekli görülen çoklu interferogramlar kaldırılmıştır.

5.1.1. Sentinel-1 Yükselen Yörünge PSI Sonuçları

Sentinel-1 çerçevelerinin yükselen yörüngeleri hem çalışma yapılan alan ile hem de meydana gelmiş olan heyelanların zamanları ile çakışmaktadır. Sentinel-1 görüntülerinin en önemli özelliklerinin başında küresel anlamda geniş alanları 6 gün gibi kısa sürede tarayabilmesidir. Bu avantaj sayesinde 2015-2018 yılları arasında yüksek sayıda görüntü bulunmaktadır. Böylece 174 adet görüntü elde edilmiş ve bunların yalnızca 15 adetinin PSI analizleri için uygun olmadığı tespit edilmiştir.

Genel olarak görüntülerin standart sapma değerleri, atmosfer ve yörünge hata miktarları göz önünde bulundurularak 20150101, 20150922, 20151016, 20160120, 20160904, 20170108, 20170508, 20170731, 20180602, 20160618, 20180626, 20180801, 20180813, 20180819 ve 20180924 tarihli görüntüler PSI analiz işleminden çıkarılmıştır. Master görüntü ve veri kümesi bilgileri Ek-A Çizelge A.1’de verilmiştir. 2 Nisan 2017 tarihinin master görüntü seçildiği 159 veri kümesinin baz mesafe şeması Şekil 5.1’de verilmiştir.

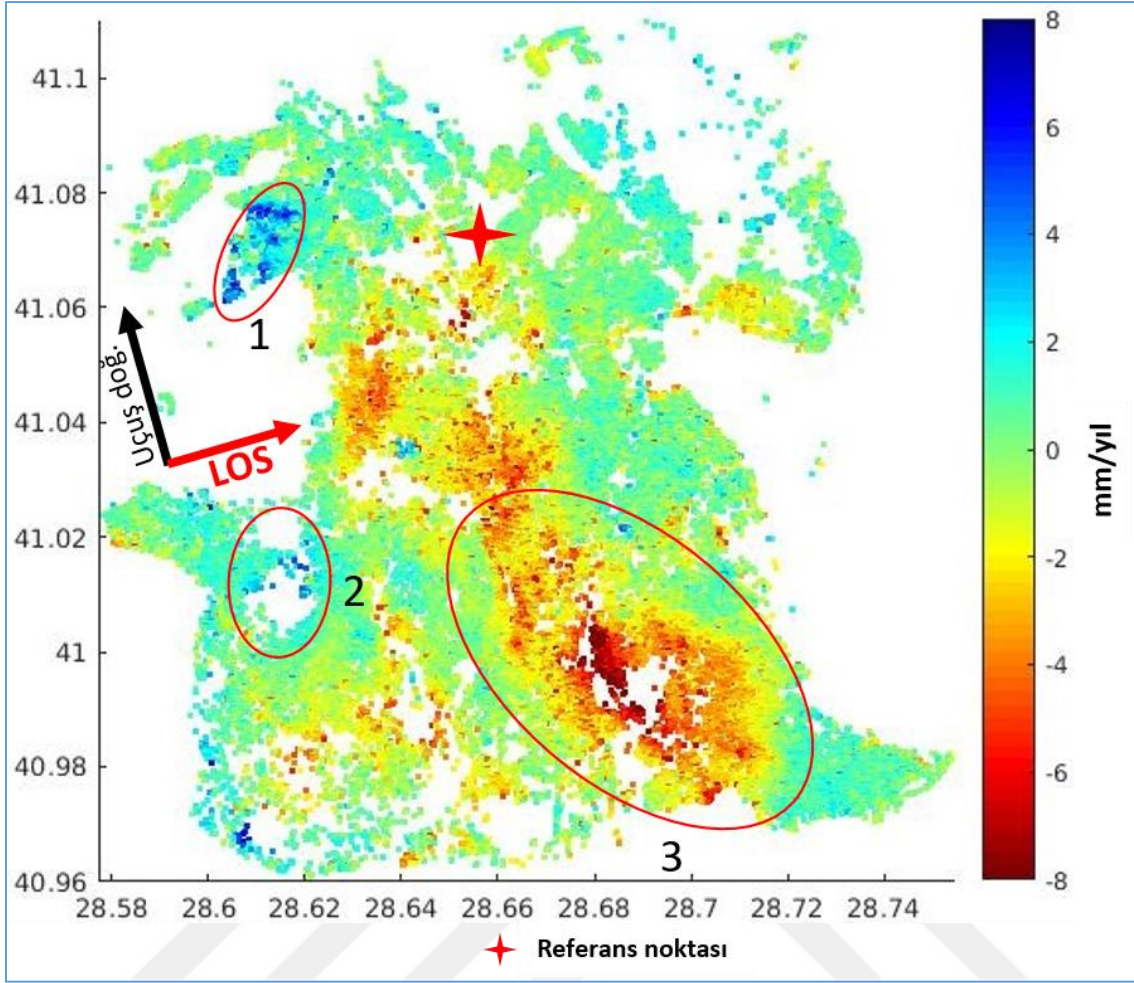


Şekil 5.1 Sentinel-1 yükselen yörünge baz mesafeleri.

Heyelanın bulunduğu alanın tamamında yapılan PSI analiz sonucunda yükselen yörünge için 35546 kalıcı saçılım noktası elde edilmiştir. Bu noktalar PSI analizinin genel sonucu olarak çoğunlukla kentleşmiş bölgelerde tespit edilmiştir (Hooper et al. 2004, Osmanoğlu et al. 2016). Deformasyonun meydana geldiği bazı bölgeler kırsal alanlarda bulunduğu için bu bölgelerde meydana gelen yer yüzeyi hareketleri nokta olmadığı için belirlenememiştir. Bunun diğer sebebi de C bandının L bandına oranla bitkilere derin nüfuz edememesi ve daha kısa dalga boyu ile ilgili korelasyon bozukluğu etkilerine karşı direnç gösterememesidir (Yang et al. 2018).

Analiz sonucunda yükselen yörünge için elde edilen yıllık hız miktarları aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre atmosfer, yörünge ve yükseklikten kaynaklanan etkilerin çıkarılmadığı durumlarda yıllık -8,4-5,5 mm/yıl arasında bir hareket görülmektedir (Şekil 5.2). Elde edilen değerler bakış açısı (LOS) yönünde hesaplanmaktadır.

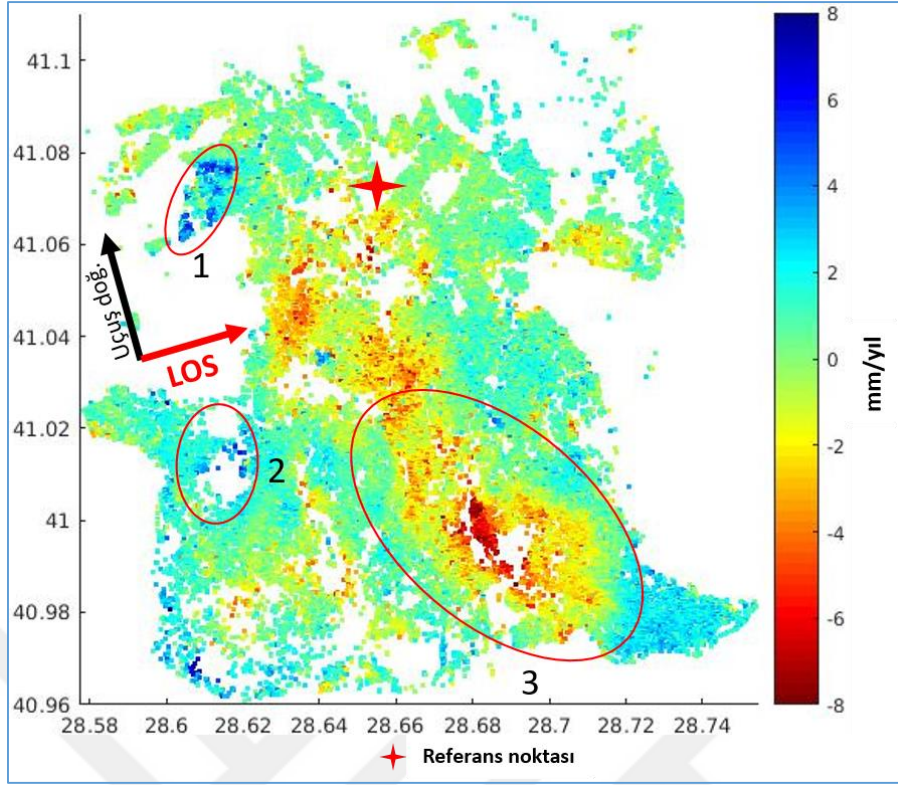
Şekil 5.2’de görüldüğü gibi 1 numaralı bölge olan Alkent ve 2 numaralı bölge Pınartepe mevkillerinde 5-8 mm/yıl arası yükselmeler görülmektedir. Aynı zamanda Dereağzı bölgesinin sahil kısımlarında da yükselmeler belirlenmiştir. 3 numaralı bölge de ise Yakuplu’dan Esenyurt’a kadar olan geniş bir alanda -8 mm/yıl’a kadar çökmeler tespit edilmiştir.



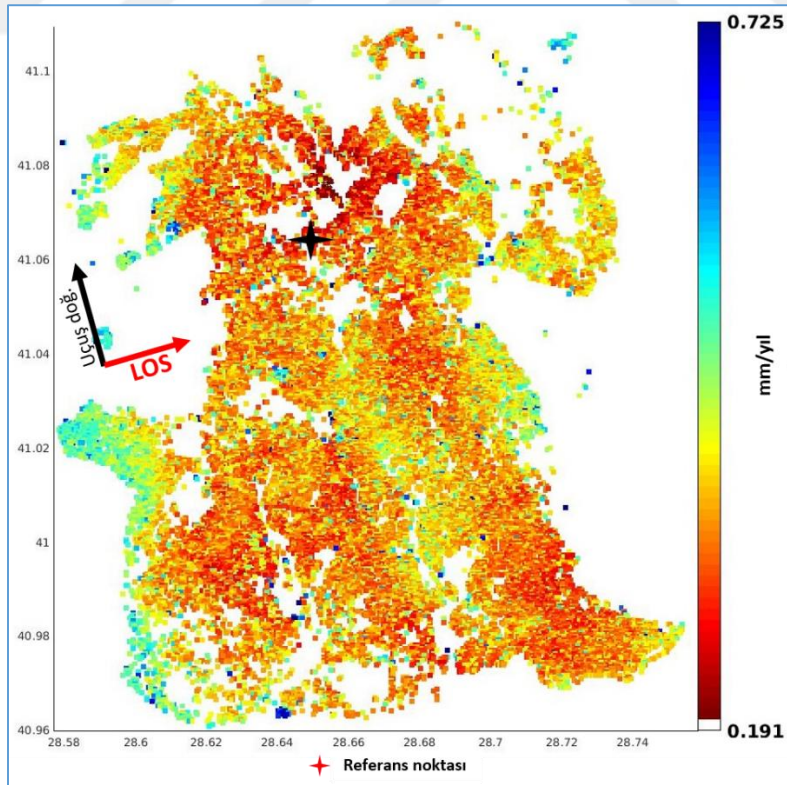
Şekil 5.2 Sentinel-1 yükselen yörünge verilerinden elde edilen hız alanı (atmosfer, yörünge ve SYM hataları çıkarılmamıştır.)

Benzer şekilde değerlendirmeler mevcut hızdan atmosfer, yörünge ve yükseklikten kaynaklanan etkilerin çıkarılması ile de belirlenmiştir. Bu etkilerin çıkarılmasıyla deformasyon miktarı yıllık -7,3-5,5 mm/yıl arasında bir değişime uğramıştır (Şekil 5.3).

Yapılan analizlerde dikkat çeken bir nokta da, StaMPS programında gerçekleştirilen 8. adım olan slave görüntülere ait atmosfer ve yörüngelere ait yüksek frekanslı faz değerlerinin çıkarılması ile yıllık deformasyon değerinin -5,1-4,2 mm/yıl değerlerine düşmesidir. Bu tez çalışmasında 8. adımın deformasyon değerini çok etkilemesi nedeniyle sonuç hesaba etkisi katılmamıştır. Bu analizlerin dışında Şekil 5.4'te deformasyonun standart sapma değeri verilmiş ve 0,19-0,73 mm/yıl arasında belirlenmiştir.



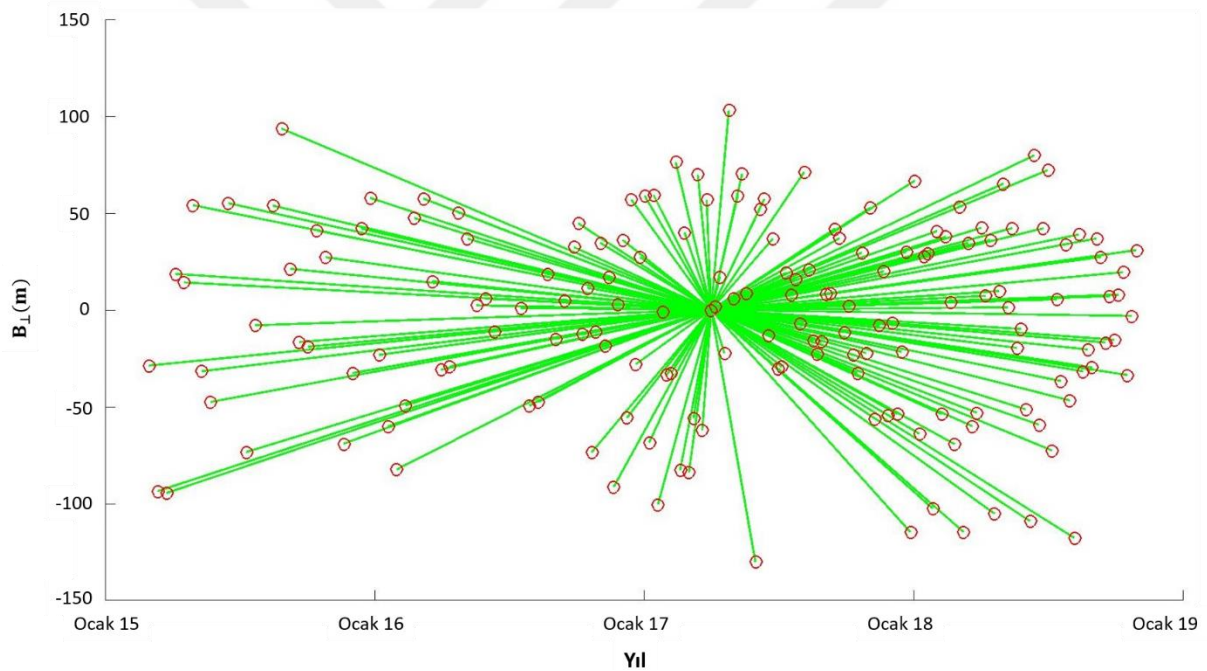
Şekil 5.3 Sentinel-1 yükselen yörünge verilerinden elde edilen hız alanı (atmosfer, yörünge ve SYM hataları çıkarılmıştır.)



Şekil 5.4 Sentinel-1 yükselen yörünge verilerinden elde edilen hız alanının standart sapma değerleri.

5.1.2. Sentinel-1 Alçalan Yörünge PSI Sonuçları

Sentinel-1 çerçevelerinin alçalan yörüngesi yükselen yörünge gibi hem çalışma yapılan alan ile hem de meydana gelmiş olan heyelanların zamanları ile çakışmaktadır. Bunun vermiş olduğu fırsat ile yükselen yörünge de olduğu gibi aynı periyot içinde yüksek sayıda görüntü elde edilmiştir. 169 adet görüntü elde edilmiş ve bunlardan 13 tanesi PSI analizlerine katılmamıştır. Görüntüler analize katılmamasının sebebi standart sapma değerleri, atmosfer ve yörünge hata miktarlarının uygun olmamasıdır. Çıkarılan görüntüler: 20150418, 20150723, 20160119, 20160810, 20170107, 20170612, 20170712, 20170811, 20170922, 20180619, 20180731, 20180806 ve 20180818 tarihli görüntülerdir. Master görüntü ile verilen veri kümesi bilgileri Ek-A Çizelge A.2’de verilmiştir. Bu analizde 1 Nisan 2017 görüntü tarihi master görüntüsü seçilmiş ve baz mesafeleri analiz için oldukça uygun bulunmuştur (Şekil 5.5).

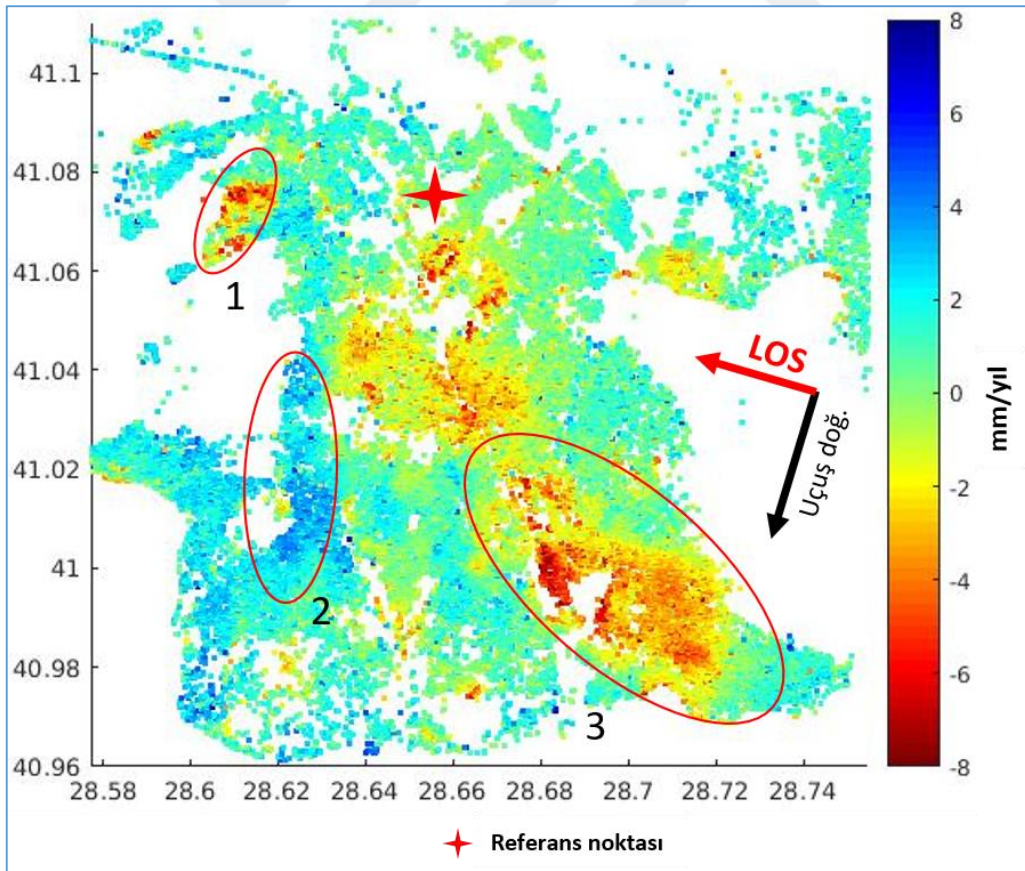


Şekil 5.5 Sentinel-1 alçalan yörünge baz mesafeleri.

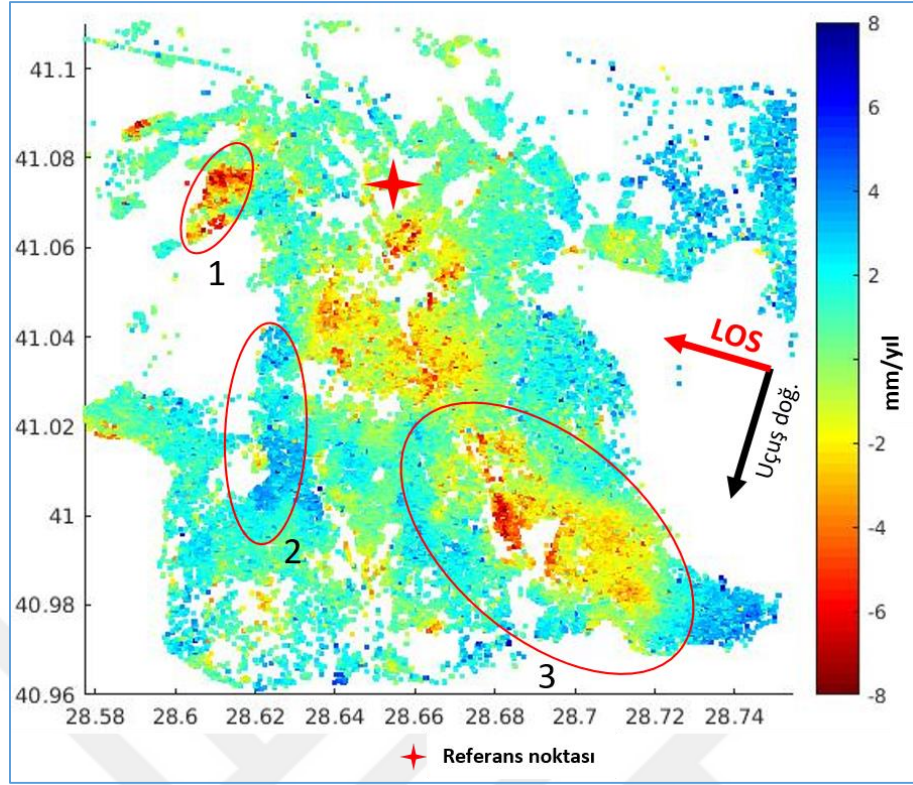
Alçalan yörünge görüntüleri ile yapılan PSI analiz sonucunda 35008 kalıcı saçılım noktası elde edilmiştir. Genel olarak nokta sayısı yükselen yörüngedeki sayıya yakındır. Noktalar yükselen yörünge sonuçlarında olduğu gibi çoğunlukla kentleşmiş bölgelerde tespit edilmiştir. Analiz sonucunda tespit edilen sonuçlara göre atmosfer, yörünge ve yükseklikten kaynaklanan etkilerin çıkarılmadığı durumlarda yıllık -7,2-5,9 mm/yıl arasında bir hareket görülmektedir (Şekil 5.6). Değerler aynı şekilde bakış açısı (LOS) yönünde hesaplanmaktadır.

Yükselen yörüngede yükselme gösteren 1 numaralı bölge olan Alkent bölümleri bu yörüngede çökme şeklinde tespit edilmiştir. Bu da bölgede yatay hareket olduğu bilgisini vermektedir. Benzer olan 2 numaralı bölge ve Pınartepe bölgelerinde yine yükselmeler gözlemlenmiştir. Burada yapılacak olan yorum bölgede düşey yönünde bir hareketin olduğudur. Bir sonraki bölümde anlatılacak olan yükselen ve alçalan görüntülerden yatay ve düşey yönlerde hareketin tespit edilmesi teorisinin matematiksel ve geometrik açıklaması yapılacaktır. 3 numaralı bölge olan Yakuplu ve Esenyurt'a kadar olan alanda da benzer olarak çökme tespit edilmiş ve teoriye göre düşey yönde bir hareket olduğu düşünülmektedir.

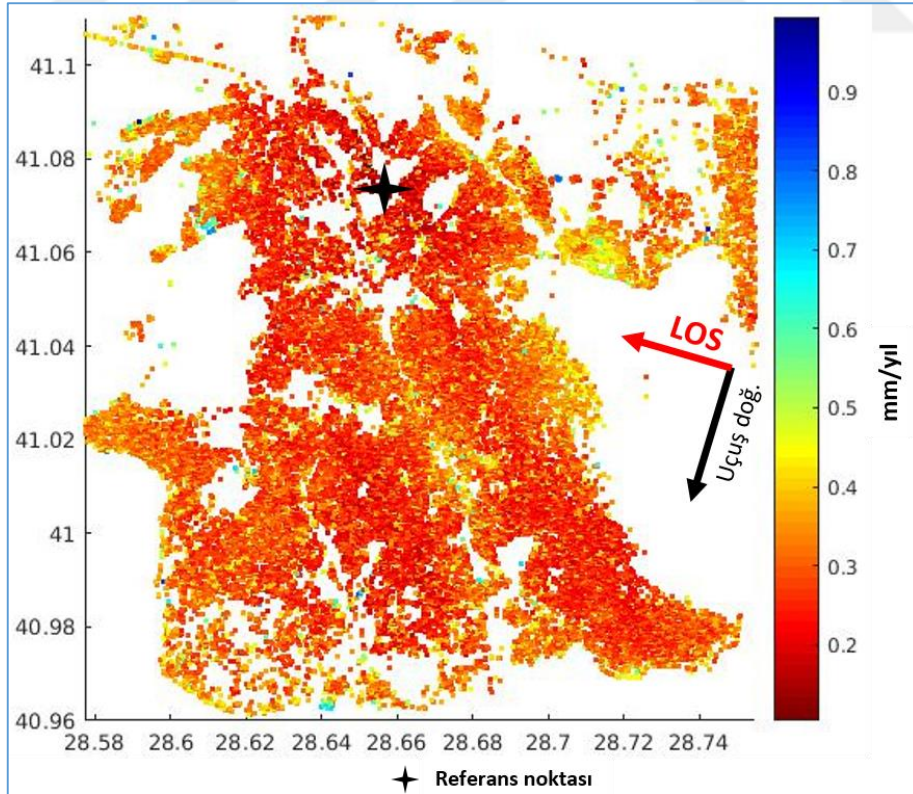
Atmosfer, yörünge ve yükseklikten kaynaklanan etkilerin çıkarılmasıyla elde edilen deformasyon miktarı yıllık -6,7-6 mm/yıl arasında bir değişime uğramıştır (Şekil 5.7). Bu yörünge de StaMPS 8. Adımında değerler çok düştüğünden bu düzeltme ihmal edilmiştir. Analize ait standart sapma değerleri Şekil 5.8'de gösterilmiş ve 0,1-10 mm/yıl arasında değişmektedir.



Şekil 5.6 Sentinel-1 alçalan yörünge verilerinden elde edilen hız alanı (atmosfer, yörünge ve SYM hataları çıkarılmamıştır.)



Şekil 5.7 Sentinel-1 alçalan yörünge verilerinden elde edilen hız alanı (atmosfer, yörünge ve SYM hataları çıkarılmıştır.)

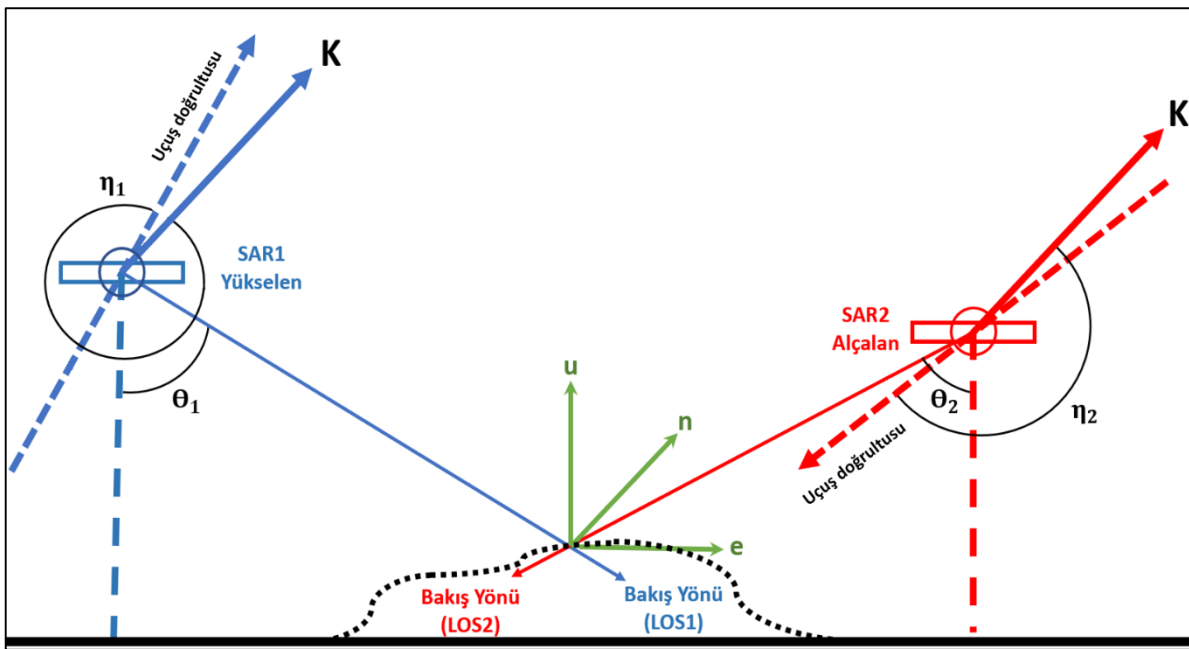


Şekil 5.8 Sentinel-1 alçalan yörünge verilerinden elde edilen hız alanının standart sapma değerleri.

5.1.3. Sentinel-1 Yatay ve Düşey Yöndeki Hareketlerin Belirlenmesi

Şekil 5.9, yükselen ve alçalan yörüngeler boyunca SAR uydusunun görüntüleme geometrisi ve LOS yönündeki yer değişimleri ile 3B hareket bileşenleri arasındaki yansıtma ilişkisini göstermektedir. Bir yer hedefi için LOS yönündeki yer değiştirme oranı, 3B hareket hızlarının ve SAR görüntüleme açısal parametrelerinin bir fonksiyonu olarak temsil edilebilir. Yani LOS yönündeki deformasyon aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Dai et al. 2015).

$$\varphi_{LOS} = U_u \cos \theta - U_e \cos \eta \sin \theta + U_n \sin \eta \sin \theta \quad (5.1)$$



Şekil 5.9 Yükselen ve alçalan yörüngeler boyunca SAR uydusunun görüntüleme geometrisi ve LOS yönündeki yer değişimleri ile 3B hareket bileşenleri arasındaki yansıtma ilişkisi.

Burada, U_u düşey yöndeki hareket, U_e doğu-batı yönündeki yatay hareket ve U_n ise kuzey-güney yönündeki yatay hareketi göstermektedir. θ geliş açısı, η ise azimut açısıdır. Bu üç tip LOS yönündeki yer değiştirme miktarlarının oranının (yani D_I , D_{II} ve D_{III}), yükselen ve alçalan yörünge SAR görüntülerinin kullanımı ile elde edilebilmektedir. Buna göre (Dai et al. 2015);

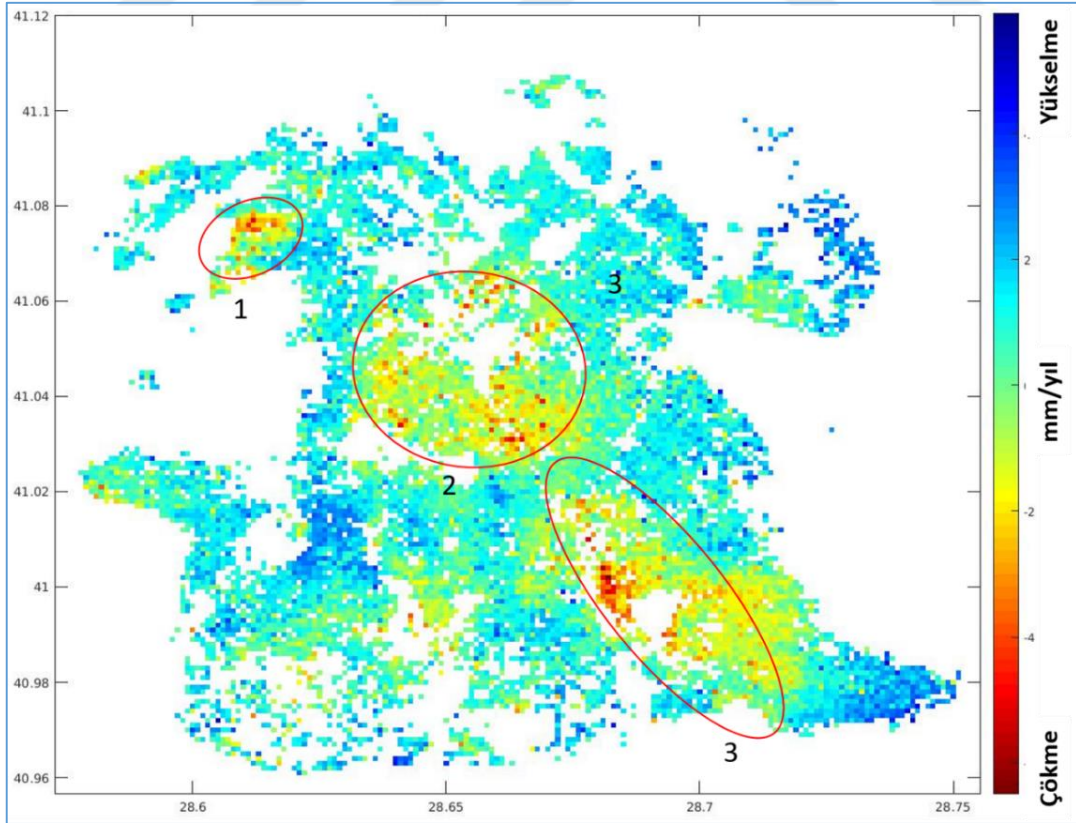
$$\begin{bmatrix} D_I \\ D_{II} \\ D_{III} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} U_u \\ U_e \\ U_n \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Burada;

$$A = \begin{bmatrix} a_I & b_I & c_I \\ a_{II} & b_{II} & c_{II} \\ a_{III} & b_{III} & c_{III} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

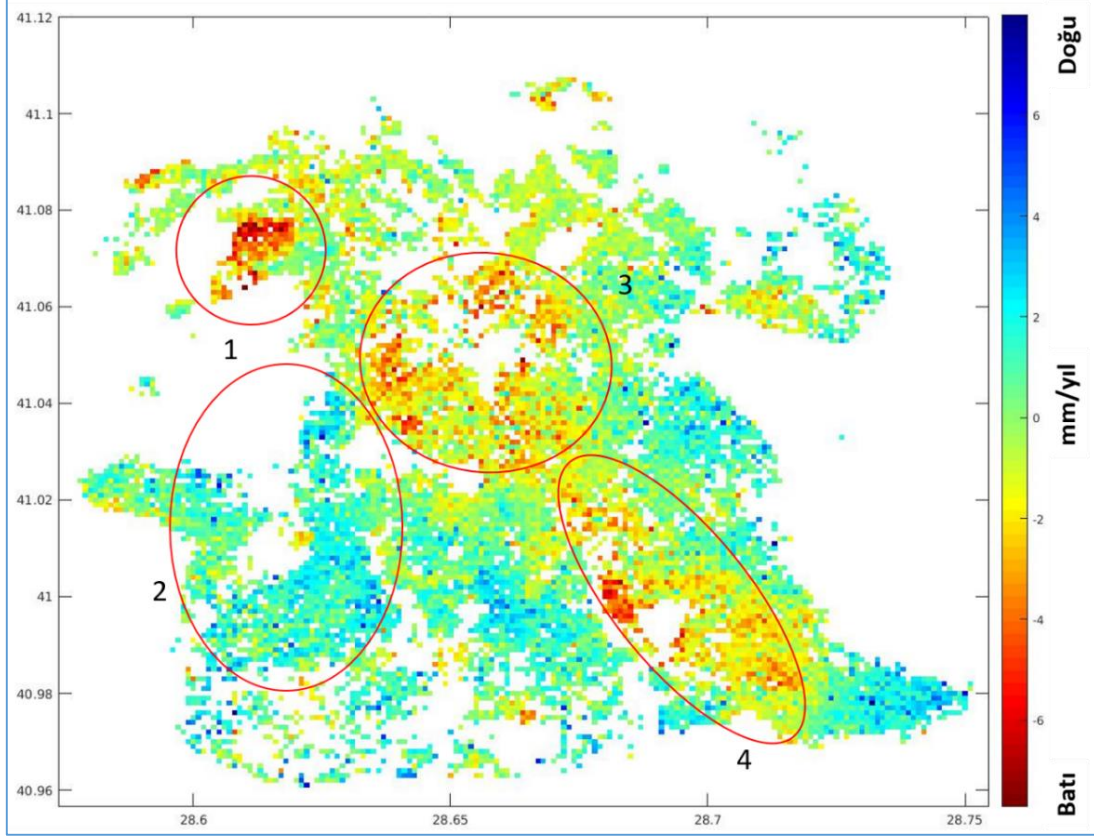
ve $a_i = \cos \theta_i$, $b_i = -\cos \eta_i \sin \theta_i$ ve $c_i = \sin \eta_i \sin \theta_i$ 'dir ($i=I,II,III$).

Alçalan ve yükselen LOS sonuçlarının kesişmesi için LOS değerleri yaklaşık olarak 10mx10m boyutunda gride dönüştürülmüştür. Daha önce de belirtildiği üzere iki farklı yörünge görüntüsü birbirleriyle karşılaştırıldığında aynı gridler iki görüntüde ortak renkte iseler o alanda düşey yönde hareket olduğu, farklı renkte iseler yatay yönde bir hareket olduğu şeklinde yorumlanabilir. Gridlemenin ardından yukarıdaki matematiksel ve geometrik bilgiler ışığında çalışma alanında meydana gelen düşey hareketler (Şekil 5.10) ve batı-doğu yönü hareketler (Şekil 5.11) belirlenmiştir. Uydu hareketinin kuzey-güney ya da güney- kuzey olması sebebiyle bu yönde belirlenen hareketlerin miktarları yeterince hassas elde edilememektedir (Arıkan et al. 2010, Dai et al. 2015).



Şekil 5.10 Deformasyonun düşey hız alanı.

Düşey hareket bileşenleri incelendiğinde 1 numaralı bölge olan Alkent'te ve 2 numaralı bölge Esenyurt Yeşilkent'te çökme tespit edilmiştir. Aynı şekilde 3 numaralı bölge Yakuplu'da da çökme gözlenirken yarımadaının genelinde yükselme hareketi belirlenmiştir.



Şekil 5.11 Deformasyonun yatay hız alanı.

Yatay hareket bileşenleri incelendiğinde 1 numaralı bölge olan Alkent'te ve 3 numaralı bölge Esenyurt Yeşilkent'te batı yönünde hareket tespit edilmiştir. Aynı zamanda 4 numaralı bölge Yakuplu'da da batı yönünde hareket bulunurken vadinin karşı tarafı olan bölgelerde ise doğu yönünde bir hareket belirlenmiştir. 2 numaralı bölge Beylikdüzü Pınartepesi ve kuzeyinde doğu yönünde hareketler gözlenmiştir. Ayrıca Marmara Denizi kıyıları ve Küçük Çekmece gölü kıyılarında genel olarak doğu yönlü bir kayma hareketi belirlenmiştir.

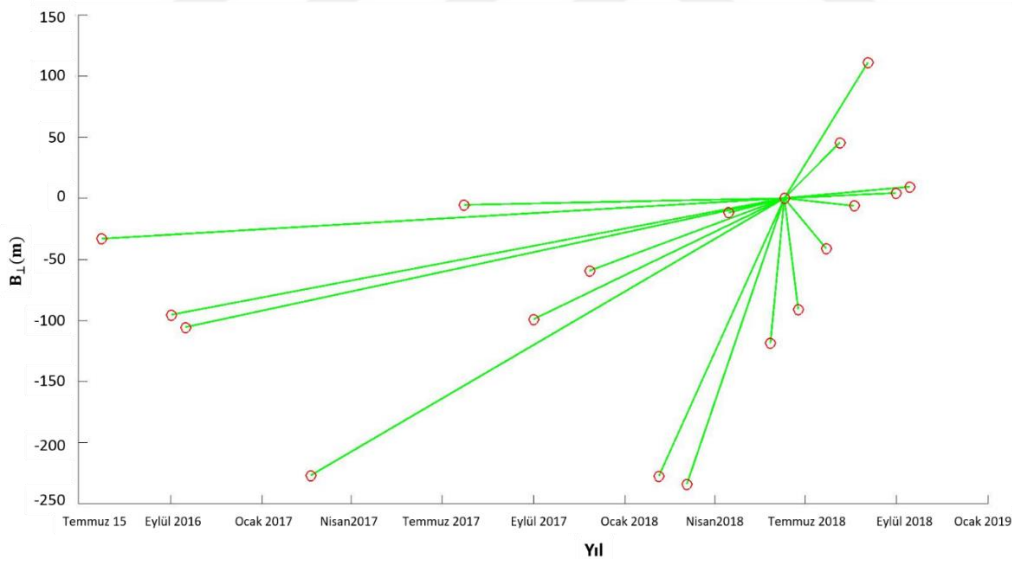
5.2. ALOS/PALSAR-2 ÇOK ZAMANLI INSAR ANALİZİ

ALOS-2'nin StripMap3 modunda 18 adet yükselen yörüngede SLC görüntüsü elde edilmiştir. 24 Temmuz 2016-14 Ekim 2018 tarihinde alınan görüntüler Sentinel-1 görüntüleriyle zamansal ve mekansal olarak karşılaştırılmaktadır. StripMap3 modu 10 m çözünürlüğü ile Sentinel-1

görüntüsüne oldukça yakın bir çözünürlük vermektedir. Atmosferik gecikme sonucu ortaya çıkan faz, yörünge hataları ve DEM hataları belirlenmiş olup gerekli görülen çoklu interferogramlar kaldırılmıştır. Bu analiz sırasında elde edilen sonuçlara göre ALOS-2 uydu görüntülerinden elde edilen sonuçlarda özellikle yörünge hataları elde edilen sonuçları büyük ölçüde etkilemiş olduğu görülmüştür.

5.2.1. ALOS/PALSAR-2 Yükselen Yörünge PSI

ALOS-2 görüntüleri, Sentinel-1 yörüngeleri ile yükselen yörüngede örtüşmektedir. 10 Haziran 2018 tarihli görüntü master olarak seçilmiş ve bu master 16 interferogramla ilişkili olarak hesaplanmıştır (Ek-A Çizelge A.3). 20180527 ve 20180624 tarihli görüntülerin zamansal ve konumsal bazları uygun olmasına rağmen düşük uyuşum ve yörüngelerinde bulunan yüksek hatalar nedeniyle PSI analizi işlemine katılmamış ve 17 görüntü ile analiz gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.12’de master görüntü ve 16 slave görüntü ile olan zamansal ve konumsal bazlar verilmiştir.

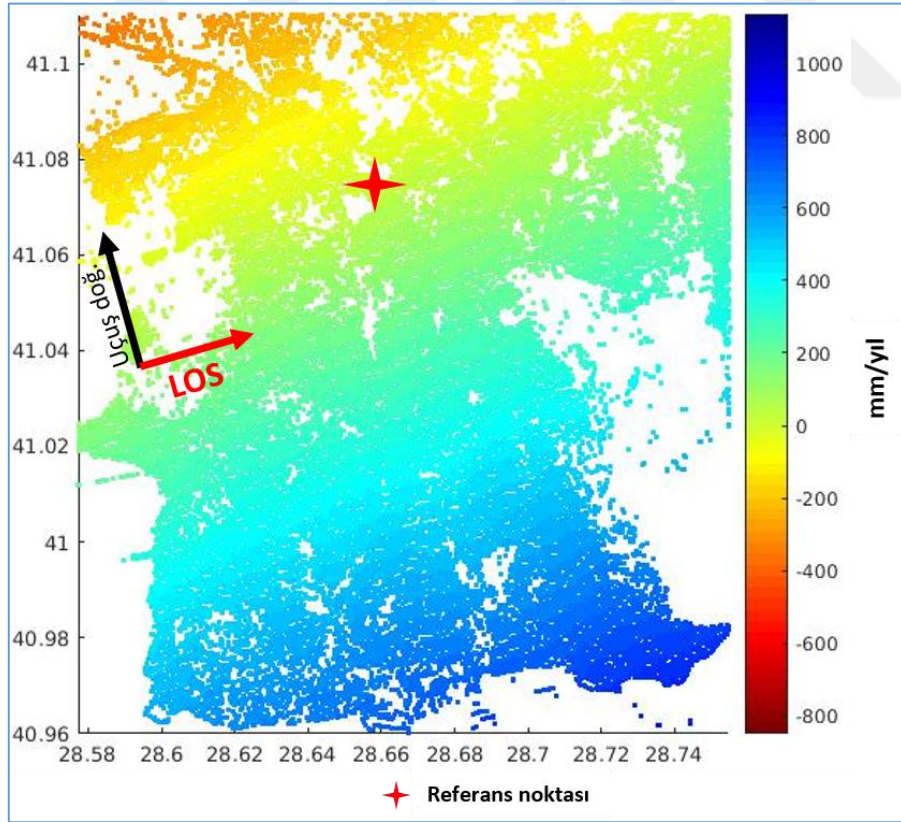


Şekil 5.12 ALOS-2 yükselen yörünge baz mesafeleri.

ALOS-2 yükselen yörünge görüntüleri ile yapılan PSI analiz sonucunda 24139 kalıcı saçılım noktası elde edilmiştir. Noktalar Sentinel-1 sonuçlarına göre miktar ve yoğunluk olarak daha azdır. Ancak L bandın C banda göre daha yüksek dalga boyuna sahip olması sebebiyle kırsal alanlarda bulunan bitki vb. yapılara daha iyi nüfuz edebilmektedir. Böylelikle çalışma alanında Sentinel-1 ile PS üretilmemiş, kırsal alanlarda ALOS-2 ile PS noktası elde edilmiştir. Sentinel-

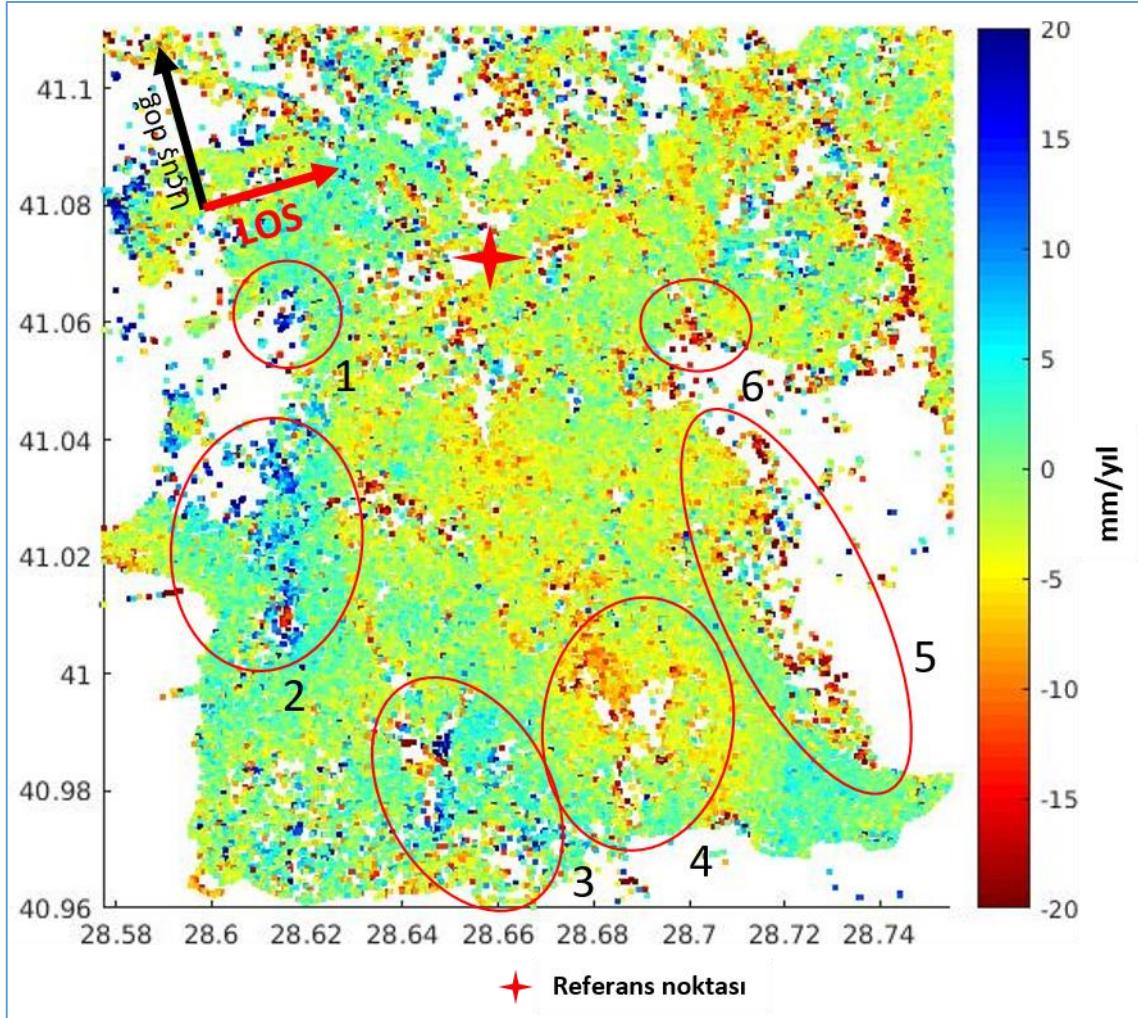
1 sonuçlarına bakıldığında özellikle Alket'in güneyi, Çakmaklı ve Firuzköy bölümünde bulunan ve yapının olmadığı kırsal arazide hiç bir PS noktası bulunmamaktadır. ALOS-2 sonuçların da ise, bu bölgelerde PS noktalarının bulunduğu tespit edilmiştir. ALOS-2 sonuçlarının L bandtan dolayı sağladığı avantajlarının yanında bazı dezavantajları da barındırdığı söylenebilir. Analizlerin 16 gibi PSI için az sayılabilecek bir sayıda yapılması dezavantaj olarak söylenebilir. ALOS-2 sağlayıcılarının öncelikli alanları içinde bulunmayan çalışma alanında 2014-2015 tarihi aralıklarında sadece 6 görüntü bulunmaktadır. Bu görüntüler oluşturulan görüntü yığınının birleştirilemediği (coregister) için görüntü sayısı 16 görüntüde kalmıştır. Literatürde bu birleştirme işlemi için az da olsa bir kaç bilgi elde edilmiştir. SLC görüntülerde master ve slave görüntü kaydı için mevcut programların InSAR işlemleri aşamalarında elde edilen çapraz korelasyon eşik değerinin neden olduğu dönüşüm katsayı problemi olarak değerlendirilmektedir (Lindsey et al. 2015, Natsuaki et al. 2016).

Bu hatalara geometrik, yörüngesel ve atmosferik etkiler de eklenince analiz sonucunda yıllık hızlarda -802,1-1082,6 mm/yıl arasında bir değer elde edilmiştir (Şekil 5.13).



Şekil 5.13 ALOS-2 alçalan yörünge verilerinden elde edilen hız alanı (atmosfer, yörünge ve SYM hataları çıkarılmamıştır.)

Sonuçlar bu kadar büyük olduğundan dolayı bu aşamada yorum yapılamamıştır. Atmosfer, yörünge ve geometrik hataların elemine edilmesiyle sonuçlarda büyük ölçüde düzeltilmeler meydana gelmiştir. Kaynaklanan etkilerin çıkarılmasıyla elde edilen deformasyon miktarı yıllık -47,3-26,7 mm/yıl arasında bir değişime uğramıştır (Şekil 5.14).

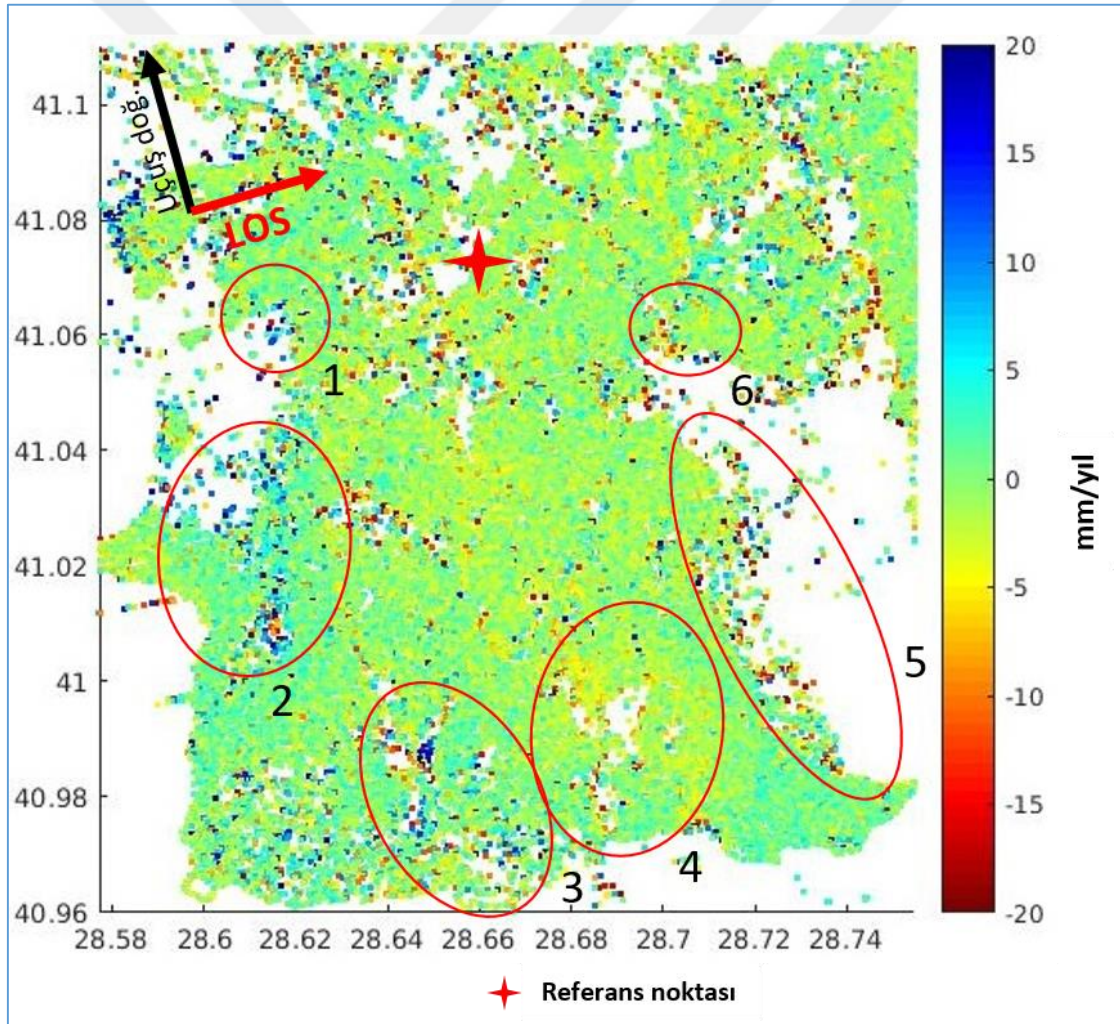


Şekil 5.14 ALOS-2 yükselen yörünge verilerinden elde edilen hız alanı (atmosfer, yörünge ve SYM hataları çıkarılmıştır.)

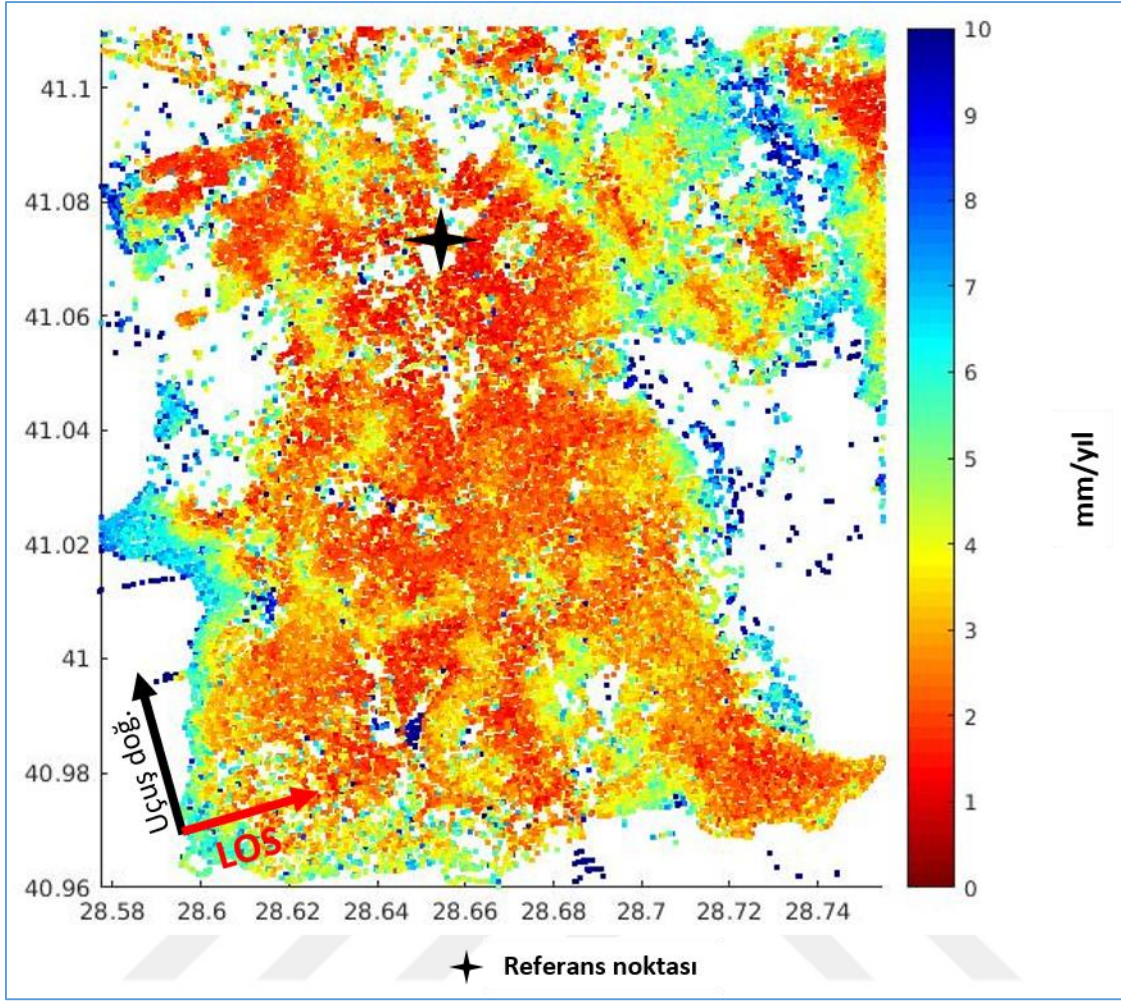
Yapılan değerlendirmeler sonucunda Sentinel 1 yükselen yörünge sonuçlarında olduğu gibi 1 numaralı bölge Alkent ve 2 numaralı bölge Pınartepe’de yükselmeler, 4 numaralı bölge Yakuplu da ise çökmeler gözlemlenmektedir. Sentinel-1 görüntüsünün aksine 2 numaralı bölge Pınartepe kuzeyinde bulunan kırsal bölümlerde PS noktaları elde edilmiş ve bu bölgelerde yükselme tespit edilmiştir. Ayrıca ALOS-2 L band özelliğinin sağladığı avantaj sayesinde 5 numaralı bölge Firuzköy, Kuzeyde 6 numaralı bölge Ispartakule’de yükselme ve çökmelerin meydana geldiği görülmektedir. Sentinel-1 ile 3 numaralı Kavaklı-Sahil bölgesinde ufak

ökmeler tespit edilirken ALOS-2 ile bu bölgede yüksek miktarda yükselme ve yer yer çökmeler elde edilmiştir.

Sentinel-1 yörüngelerinin analizinde StaMPS yazılımında gerçekleştirilen 8. adımda slave görüntülere ait atmosfer ve yörüngelere ait yüksek frekanslı faz değeri çıkarılmasıyla elde edilen sonuçlar, hesaplanan deformasyon miktarlarına göre oldukça büyük değeri belirlenmiştir. Bu sebeple analizlerden bu etki çıkarılmamıştır. Ancak, ALOS-2 ile yapılan analizlerde deformasyon miktarına oranla daha makul bir değeri özlendi. Bu işlemin sonucunda deformasyon değeri LOS yönünde -37,5-23,9 mm/yıl'a kadar gerilemiştir (Şekil 5.15). Aynı zamanda analize ait standart sapma değeri Şekil 5.16'da gösterilmiş ve 0-10 mm/yıl arasında değişmektedir.



Şekil 5.15 ALOS-2 yükselen yörünge verilerinden hız alanı (atmosfer, yörünge, SYM hataları ve StaMPS 8. adımı ile elde edilen etkiler çıkarılmıştır.)



Şekil 5.16 ALOS-2 yükselen yörünge verilerinden elde edilen hız alanının standart sapma değerleri.

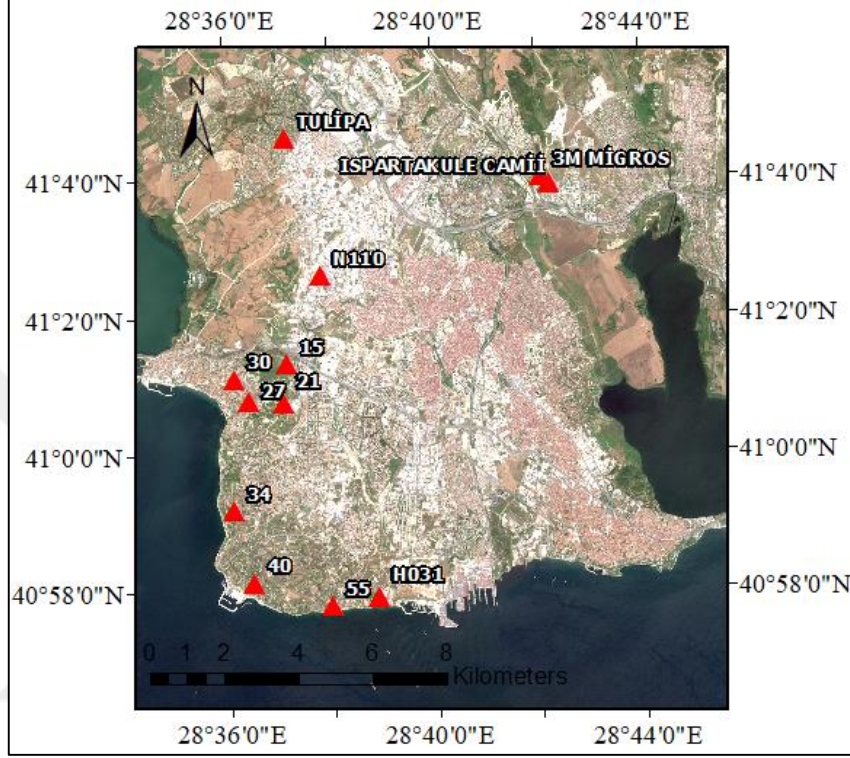
5.3. GNSS ÖLÇMELERİ VE SONUÇLARI

5.3.1. GNSS Ölçmelerinin Değerlendirilmesi

Bölgeye ait geçmiş çalışmalar incelendiğinde gerçekleşmiş olan heyelanlar için birçok gelişmiş InSAR ve GNSS tekniği kullanılmış ve hemen hepsinde bölgeye ait yer kabuğu hareketleri tespit edilmiştir (Diao et al. 2006a; Akarvardar et al. 2009, Walter et al. 2010, Aslan et al. 2018). Bu çalışmada, Beylikdüzü ve Esenyurt'ta meydana gelen heyelanları belirlemek için tüm yarımadada PSI yöntemi kullanılmış ve elde edilen sonuçlar, doğrulanması ve daha iyi yorumlanabilmesi için GNSS ölçmelerinden elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır.

Bundan dolayı yapılan arazi çalışmaları ile uygun bulunan 12 adet GNSS noktası belirlenmiş ve ölçmeler gerçekleştirilmiştir. Noktaların dağılımı Şekil 5.17'de verilmiştir. Ölçme periyodu

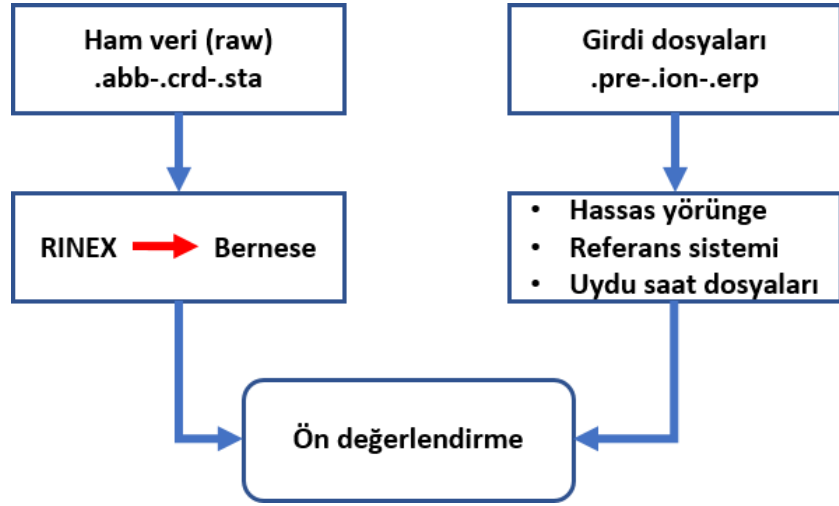
3 ay olacak şekilde 3 kampanya yapılmıştır. Ölçmeler 2018 yılı Nisan, Temmuz ve Ekim aylarında gerçekleştirilmiş ve yeterli doğrulukta GNSS verisi toplanmıştır (≥ 5 saat). Çalışma kapsamında çift frekanslı Trimble, Satlab ve Topcon GNSS alıcıları kullanılarak 10° yükseklik açısı ve 30 saniyelik aralık ile veri toplanmıştır.



Şekil 5.17 Çalışmada kullanılan GNSS noktalarının dağılımı.

Ölçmeler sonucu elde edilen veriler, IGS'nin (International GNSS Service) yayınladığı yer dönme parametreleri ve hassas GNSS yörüngeleri kullanılarak SOPAC (Scripps Orbit and Permanent Array Center) tarafından sağlanan küresel GNSS istasyonlarının verileriyle birlikte değerlendirilmiştir. Değerlendirme işlemleri Bern Üniversitesi tarafından geliştirilen Bernese v5.2 (Dach et al. 2015) yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen verilerin ön değerlendirme adımından önce istasyonlar arası bazı oluşturacak dosyalar hazırlanmıştır. Bu dosyalar genel olarak istasyon kısaltmalarını içeren, yaklaşık koordinatların bulunduğu ve anten özelliklerini (anten tipi, yüksekliği vb.) içeren dosyalardır. Bu dosyalar hazırlandıktan sonra ham veriler Bernese yazılımında kullanılacak olan formata dönüştürülmüş; sonrasında IGS'ten elde edilen hassas yörünge bilgileri ve yer dönme parametreleri kullanılarak yörünge dosyaları ve uydu saat dosyaları oluşturulmuştur. Bu işlemlerin ardından ön değerlendirme aşamasına geçilmiştir (Şekil 5.18).



Şekil 5.18 Bernese iş akış şeması-I (Özdemir 2016).

İlk aşamada elde edilen saat hataları CODSPP programı yardımıyla GNSS zamanına senkronize edilmiştir. Bu işlem sonucu elde edilen değerler kod ve faz gözlem dosyalarına aktarılmaktadır. Sonrasında bu faz ölçüleri belirlenen strateji (STAR) ile seçilen referans istasyonuna göre tekli-faz ölçüleri oluşturulmuştur. Ölçü epoğu koordinatları, yörünge ve yer dönme parametrelerine ön değerlendirme aşaması gerçekleştirilerek MAUPRP programı yardımıyla faz sıçramaları belirlenmiştir. Böylelikle iyileşen ölçü epoğu koordinatları dengelemeye sokulmuş ve iyonosferden bağımsız (L3) düzeltme değerleri elde edilmiştir. Düzeltmeler hesaplanırken farklı datumlara göre referans istasyonu seçilmiş ve sıkı koşul (constrained) uygulanmıştır. Bu hesaplamaların ardından istasyon ve baz düzeltmeleri için istatistiksel bilgiler elde edilmiştir (Şekil 5.19). Bu bilgiler yardımıyla ön değerlendirme işlemi tamamlanmış ve parametre kestirimi adımına geçilmiştir.

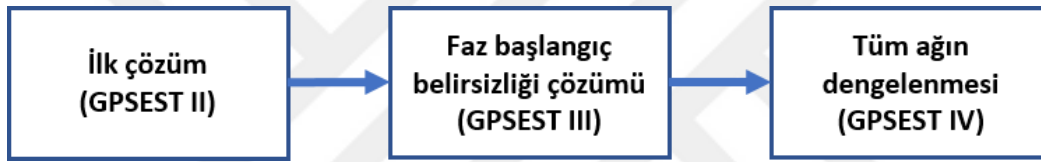


Şekil 5.19 Bernese iş akış şeması-II (Özdemir 2016).

Parametre kestiriminde öncelikle L3 frekansı kullanılarak istasyon koordinatları ve troposferik gecikme miktarları elde edilmiştir. Ardından faz kesikliklerinin düzeltilmesi için hatalı ölçüler çıkarılmıştır. Düzeltilemeyen faz kesiklikleri için faz başlangıç belirsizliği (ambiguity) kullanılmıştır.

Sonraki adımda ise, sonuçların kalite arttırımı için her bazın çözülen faz belirsizliği sayısının fazla olma ilkesine göre faz belirsizliği çözümü yapılmıştır. Bu işlem için önceki aşamada elde edilen troposfer ve koordinatlar kullanılarak faz belirsizliği çözümü gerçekleştirilir.

Son adımda ise, tüm tam sayı belirsizliklerini çözülerek dengeleme işlemi yapılmıştır. Sonuç olarak normal eşitlik dosyası, istasyon koordinatları ve kofaktör matrisi elde edilmiştir (Şekil 5.20).

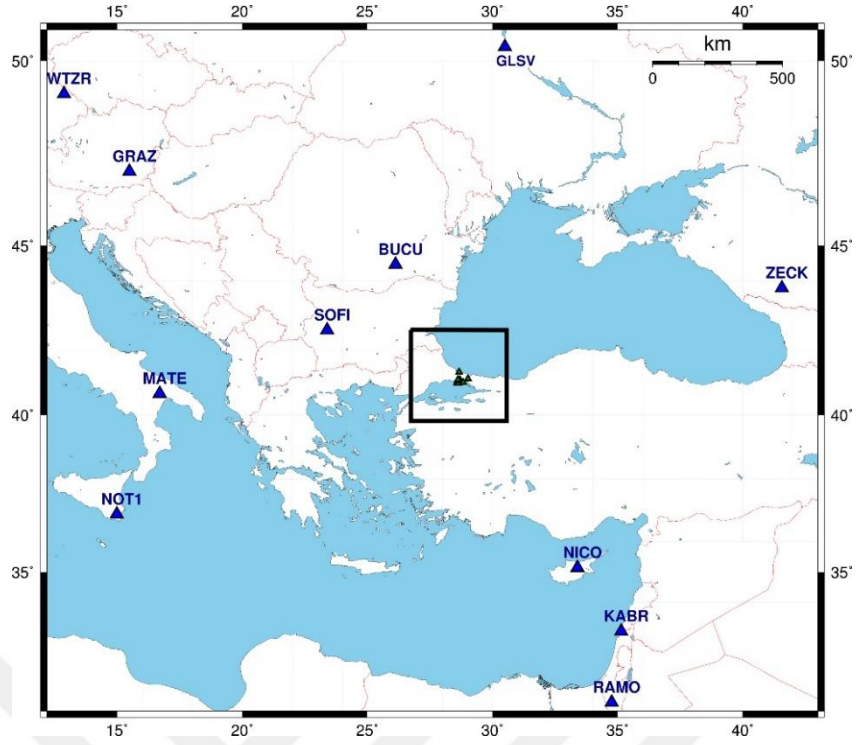


Şekil 5.20 Bernese iş akış şeması-III (Özdemir 2016).

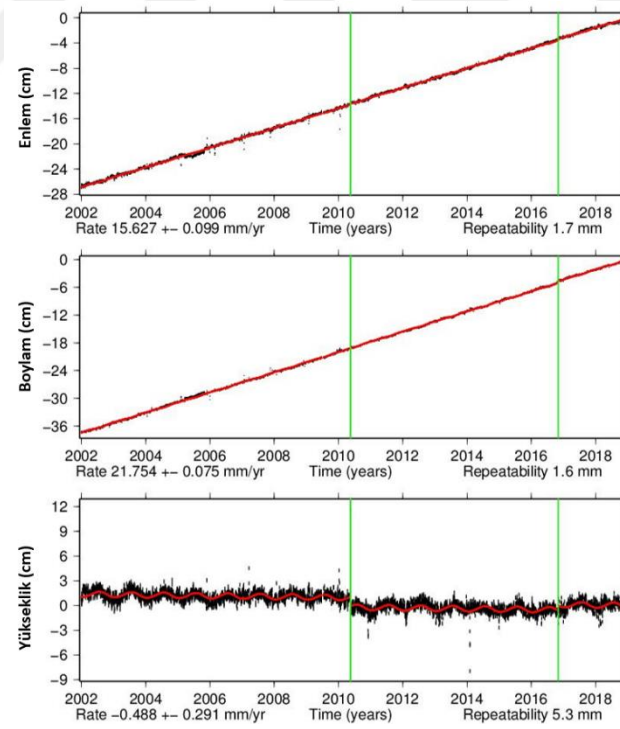
5.3.2. GNSS Ölçülerinin Analizi

Bölgedeki deformasyonların araştırılmasında referans istasyonu olarak seçilecek istasyonlardaki kaba hataların kampanya ölçümü gerçekleştirilen noktalara yansımaması için öncelikle kullanılacak referans istasyonlarının test edilmesi gerekmektedir.

Bu çalışma kapsamında, bölgenin uzak çevresinden dokuzu Avrasya ve ikisi Arap plakasında bulunan 11 IGS referans istasyonu (Şekil 5.21), kampanyalar süresince düzenli veri toplayıp toplamadıkları göz önüne alınarak seçilmiştir. IGS istasyonlarında kampanya ölçümlerinin gerçekleştirildiği zaman aralığında anlamlı bir yer değiştirme olup olmadığını test etmek amacıyla ITRF2008 (International Terrestrial Reference Frame 2008) referans sisteminde 2018.32 ölçü epoğunda GRAZ istasyonu sabit (fixed) kabul edilerek değerlendirilmiştir (Şekil 5.21).



Şekil 5.21 IGS referans istasyonları.



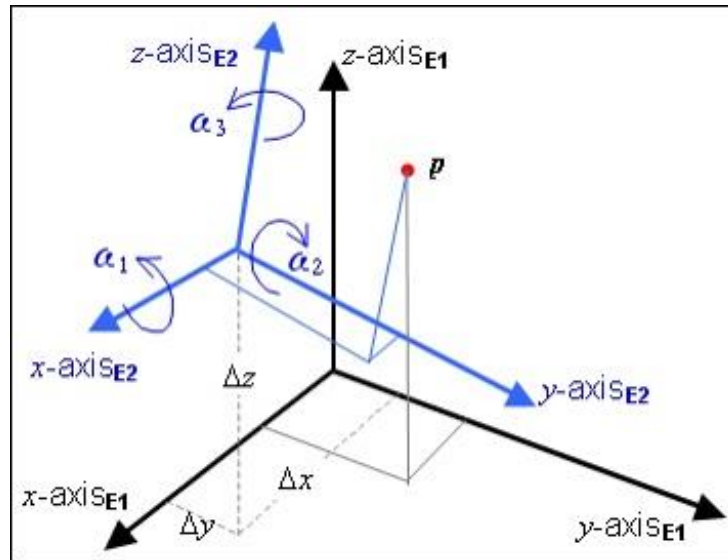
Şekil 5.22 GRAZ istasyonuna ait zaman serisi.

Şekil 5.22'e göre, GRAZ istasyonunun yatay bileşeninin tekrarlılık değeri 1,7 mm ve yükseklik bileşeninin tekrarlılığı ise 5,3 mm olarak belirlenmiştir. 2018.32 ölçme epogunda değerlendirme sonucu elde edilen koordinatlar ile IGS'ten sağlanan ITRF2008 referans sisteminde epok

2005'te Çizelge 5.1'de verilen istasyon hızları kullanılarak ölçme epoğuna taşınarak elde edilen koordinatlar arasında 3 boyutlu benzerlik dönüşümü (Bursa-Wolf Modeli) (Şekil 5.23) uygulanarak istasyonlar için uyuşum testi yapılmıştır (Kutoglu et al. 2001).

Çizelge 5.1 11 IGS istasyonuna ait ITRF2008 epok 2005 koordinat ve hızları.

NN	X(m)	Y(m)	Z(m)	V _x (mm/yıl)	V _y (mm/yıl)	V _z (mm/yıl)
BUCU	4093760,8647	2007793,8057	4445129,9749	2,51	1,21	0,94
GLSV	3512888,9576	2068979,8752	4888903,2095	0,26	-0,53	-0,05
GRAZ	4194423,8212	1162702,6932	4647245,4148	-0,3	0,90	0,64
KABR	4377283,0619	3081551,6056	3456136,8844	-1,23	-5,70	7,01
MATE	4641949,5420	1393045,4261	4133287,4793	-2,71	0,42	3,39
NICO	4359415,7094	2874117,0697	3650777,8198	1,97	-5,72	2,44
NOT1	4934546,2296	1321265,0086	3806456,1236	-2,87	-2,00	3,25
RAMO	4514721,8548	3133507,8409	3228024,7162	-0,72	-3,60	7,30
SOFI	4319372,0885	1868687,7818	4292063,9376	0,88	1,36	-1,56
WTZR	4075580,5529	931853,7972	4801568,1359	-0,23	0,38	-0,09
ZECK	3451174,7036	3060335,4306	4391955,6450	0,31	0,06	1,55



Şekil 5.23 Bursa-Wolf Modeli (Kutoglu et al. 2001, URL-6).

Şekil 5.23'ten, X, Y, Z sisteminden X₁, Y₁, Z₁ sistemine dönüşüm;

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} + (1 + k) R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

bağıntısı ile verilir (Kutoglu et al. 2001, Doğan 2011). Burada R dönüşüm matrisi;

$$R = \begin{bmatrix} 1 & \varepsilon_z & -\varepsilon_y \\ -\varepsilon_z & 1 & \varepsilon_x \\ \varepsilon_y & -\varepsilon_x & 1 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

şeklinde tanımlanır. 5.4 ve 5.4 eşitliklerinde geçen t_x , t_y ve t_z parametreleri eksenler boyunca ötelemeler, ε_x , ε_y ve ε_z eksenler etrafındaki dönüklükler ve k ölçek faktörüdür (Doğan 2011). 5.4 ve 5.5 eşitlikleri birleştirilirse;

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{X_1} \\ V_{Y_1} \\ V_{Z_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -z & y & x \\ z & 0 & -x & y \\ -y & x & 0 & z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ k \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

olarak fonksiyonel model elde edilir (Doğan 1996, Kutoglu et al. 2001).

IGS istasyonlarının hesaplanan koordinatları ile ölçme epoğuna taşınan koordinatları arasında 5.4 eşitliğinde verilen 3B benzerlik dönüşümü yapılarak koordinat setleri arasında sistematik bir ilişkinin olup olmadığı üç kampanyanın yapıldığı günlerde GNSS ölçüleri için araştırılmıştır.

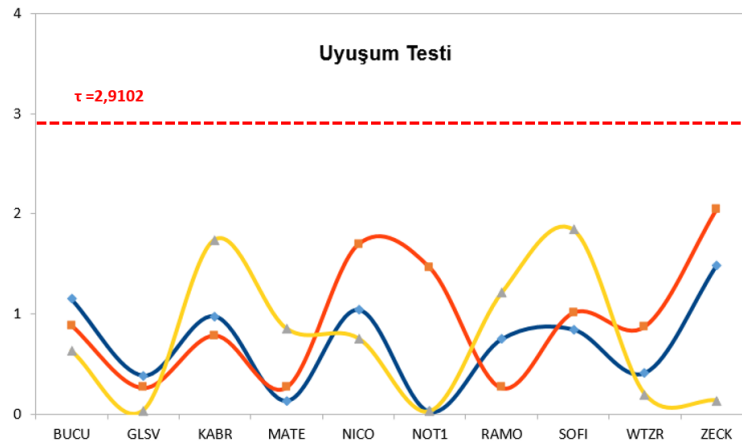
Elde edilen sonuçlara göre noktaların kaba hata bakımından uyumlu olup olmadıkları gösterilerek değerlendirmenin dış doğruluğu hakkında bilgi elde edilmiştir. 2018 yılının 116. GNSS gününe (1.kampanya 1.gün) ilişkin IGS istasyonlarının belirlenen koordinatları arasında yapılan dönüşümler sonucu elde edilen nokta testi sonuçları Çizelge 5.2 ve Şekil 5.24'te verilmiştir. Burada V_x , V_y ve V_z dönüşüm sonucu elde edilen düzeltmeleri, T_x , T_y ve T_z test değerlerini (örnek olarak) göstermektedir. Anlamlılık düzeyi $\alpha=0.05$ için tau dağılımının güven sınırı değeri $\tau_{f,1-\alpha/2}=2,9102$ olarak hesaplanmıştır. Buna göre, tüm istasyonların T_x , T_y ve T_z test

değerleri $\tau_{f,1-\alpha/2} = 2,9102$ güven sınırı değerinden küçük olduğu için tüm noktalar uyuşumlu olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.2 2018 116. GNSS günü uyuşum testi.

NN	V _x (m)	T _x	Sonuç	V _y (m)	T _y	Sonuç	V _z (m)	T _z	Sonuç
BUCU	0,0266	1,147	Uyuş.	0,0206	0,885	Uyuş.	-0,0146	0,629	Uyuş.
GLSV	-0,0081	0,384	Uyuş.	0,0057	0,261	Uyuş.	-0,0007	0,034	Uyuş.
KABR	-0,0210	0,975	Uyuş.	-0,0171	0,783	Uyuş.	0,0374	1,738	Uyuş.
MATE	-0,0029	0,133	Uyuş.	0,0060	0,265	Uyuş.	0,0188	0,852	Uyuş.
NICO	0,0233	1,040	Uyuş.	-0,0381	1,689	Uyuş.	-0,0169	0,755	Uyuş.
NOT1	-0,0005	0,022	Uyuş.	-0,0314	1,457	Uyuş.	0,0006	0,027	Uyuş.
RAMO	-0,0153	0,747	Uyuş.	0,0055	0,260	Uyuş.	0,0249	1,207	Uyuş.
SOFI	0,0197	0,843	Uyuş.	0,0236	1,010	Uyuş.	-0,0428	1,834	Uyuş.
WTZR	0,0083	0,411	Uyuş.	-0,0182	0,874	Uyuş.	-0,0039	0,194	Uyuş.

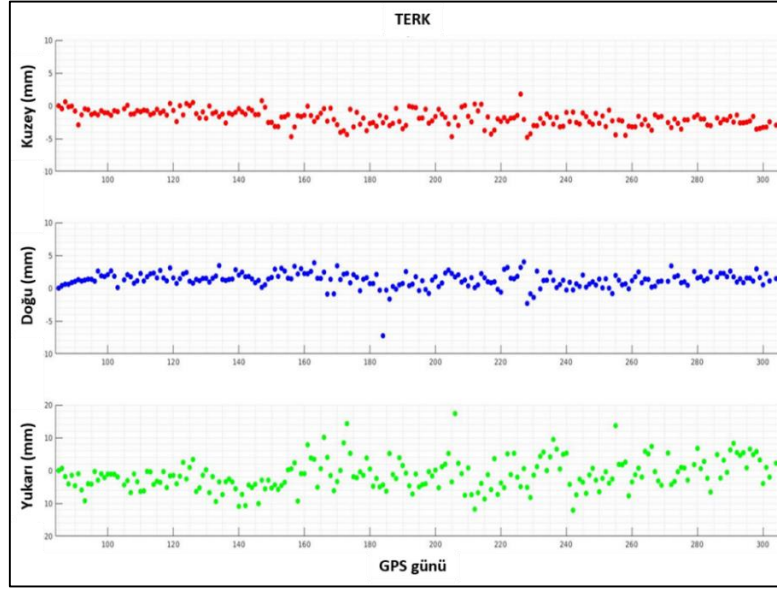
Uyuş.=Uyuşumlu



Şekil 5.24 İstasyonlara ait T_x , T_y ve T_z test değerlerinin grafiksel gösterimi.

Elde edilen uyuşum testi sonuçlarına göre Çizelge 5.1’de yer alan istasyonların ITRF2008 epok 2018.32 koordinatları sabit alınarak Avcılar-Beylikdüzü yakın çevresinde yer alan IGS ISTA, TUSAGA-Aktif ISTN, İSKİ USKB (İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi Uydulardan Konum Belirleme Sistemi) KCEK ve TERK istasyonlarının 1. kampanyanın 30 gün öncesinden (2018.85 GNSS günü) itibaren 220 günlük verisi değerlendirilmiş ve ilgili istasyonlara ait zaman serileri elde edilmiştir. Elde edilen zaman serilerine göre, yatay ve düşey bileşenlerde

en stabil davranışa sahip olan TERK istasyonu kampanya noktalarının değerlendirilmesinde kullanılmıştır (Şekil 5.25).

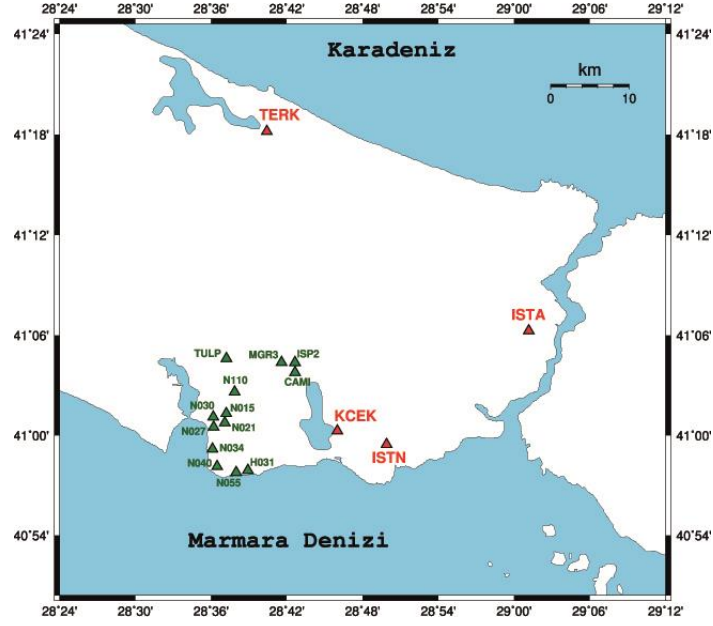


Şekil 5.25 TERK istasyonuna ait zaman serileri.

Beylikdüzü-Esenyurt bölgesinde heyelan hareketinden kaynaklanan deformasyonların belirlenmesi amacıyla bölgede 9'u TÜBİTAK tarafından heyelan izleme çalışmaları amacıyla tesis edilmiş, 4'ü ise yer noktası olarak tesis edilmiş toplam 13 noktadan oluşan bir ağ tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ölçmeler 25-26 Nisan, 27-31 Temmuz ve 24-26 Ekim tarihlerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.26). Oluşturulan bu ağdaki nokta isimleri Şekil 5.27'de verilmiştir.

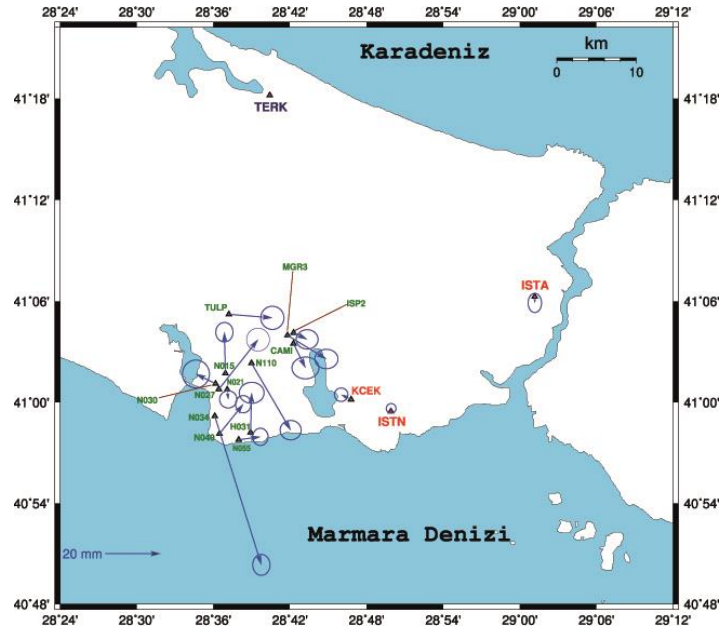


Şekil 5.26 Gerçekleştirilen ölçümlerden örnekler.



Şekil 5.27 GNSS noktaları.

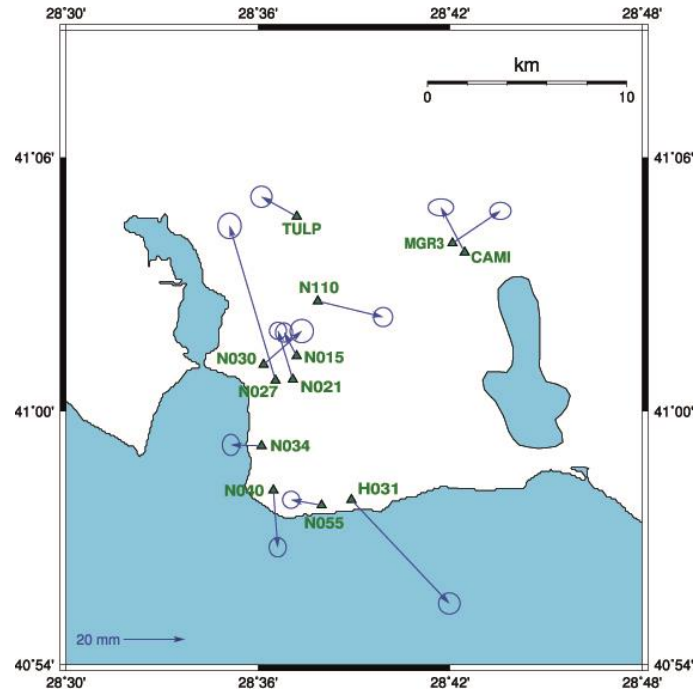
GNSS kampanya ölçümlerinden elde edilen veriler kullanılarak TERK istasyonunun ITRF08 epok 2018.32'deki koordinatları sabit kabul edilerek kampanya noktalarının 2018.32 epogundaki ITRF08 koordinatları hesaplanmıştır. Hesaplanan koordinat değerlerinden noktalara ait deformasyonlar her kampanya aralığında belirlenmiştir. Noktalara ait yatay yer değiştirme değerleri ve hata elipsleri Şekil 5.28, Şekil 5.29 ve Şekil 5.30'da; düşey yer değiştirme değerleri ve standart sapmaları ise Şekil 5.31, Şekil 5.32 ve Şekil 5.33'de verilmiştir.



Şekil 5.28 1. ve 2. kampanya aralığında yatay yer değiştirme vektörleri ve hata elipsleri.

Şekil 5.28'e göre 1. ve 2. kampanya zaman aralığında yatay yönde en büyük yer değiştirme N034 noktasında, yatay yönde en küçük yer değiştirme ise N021 noktasında meydana gelmiştir. N034 noktasında kuzey-güney doğrultusunda yaklaşık olarak $-54 \pm 1,30$ mm, doğu-batı doğrultusunda ise yaklaşık $17 \pm 1,60$ mm yer değiştirme hesaplanmıştır. N021 noktasında ise kuzey-güney doğrultusunda yaklaşık olarak $4 \pm 1,3$ mm, doğu-batı doğrultusunda ise yaklaşık olarak $0.4 \pm 1,3$ mm olarak yatay yer değiştirmeler belirlenmiştir.

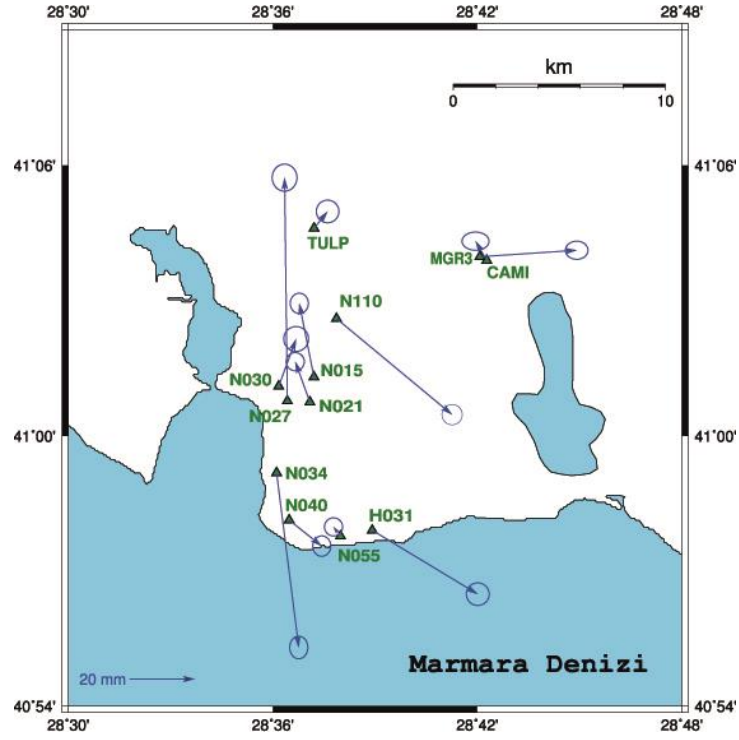
Şekil 5.29'a göre 2. ve 3. kampanya zaman aralığında yatay yönde en büyük yer değiştirme N027 noktasında, yatay yönde en küçük yer değiştirme ise N015 noktasında meydana gelmiştir. N027 noktasında kuzey-güney doğrultusunda yaklaşık olarak $51 \pm 1,60$ mm, doğu-batı doğrultusunda ise yaklaşık olarak $-15 \pm 1,70$ mm yer değiştirme hesaplanmıştır. N015 noktasında ise kuzey-güney doğrultusunda yaklaşık olarak $8 \pm 1,1$ mm, doğu-batı doğrultusunda ise yaklaşık olarak $-4 \pm 1,3$ mm yatay yer değiştirmeler belirlenmiştir.



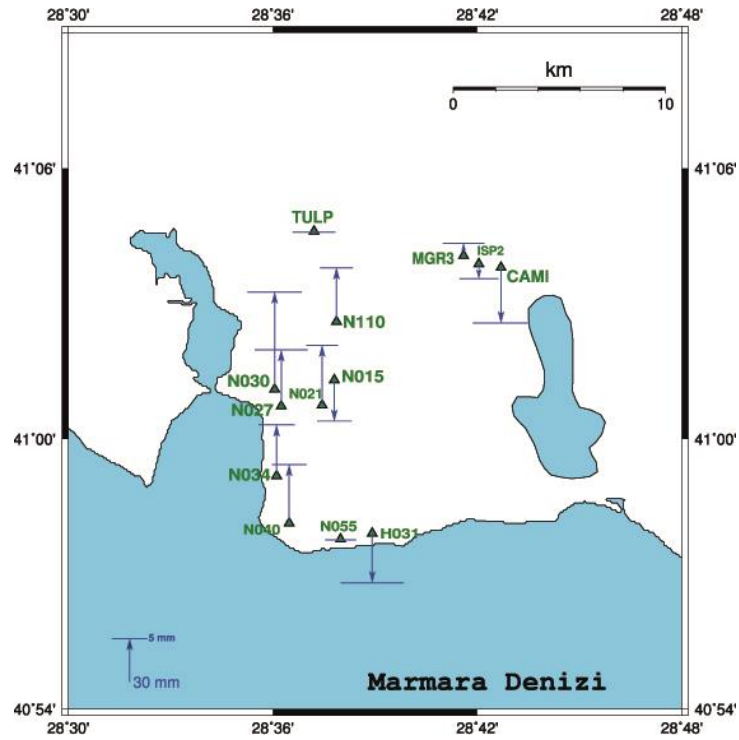
Şekil 5.29 2. ve 3. kampanya aralığında yatay yer değiştirme vektörleri ve hata elipsleri.

Şekil 5.30'a göre 1. ve 3. kampanya zaman aralığında yatay yönde en büyük yer değiştirme N027 noktasında, yatay yönde en küçük yer değiştirme ise N055 noktasında meydana gelmiştir. N027 noktasında kuzey-güney doğrultusunda yaklaşık olarak $68 \pm 1,60$ mm, doğu-batı doğrultusunda ise yaklaşık olarak $-1 \pm 1,7$ mm yer değiştirme hesaplanmıştır. N055 noktasında

ise kuzey-güney doğrultusunda yaklaşık olarak $3\pm 1,1$ mm, doğu-batı doğrultusunda ise yaklaşık olarak $-2\pm 1,1$ mm yatay yer değiştirmeler belirlenmiştir.

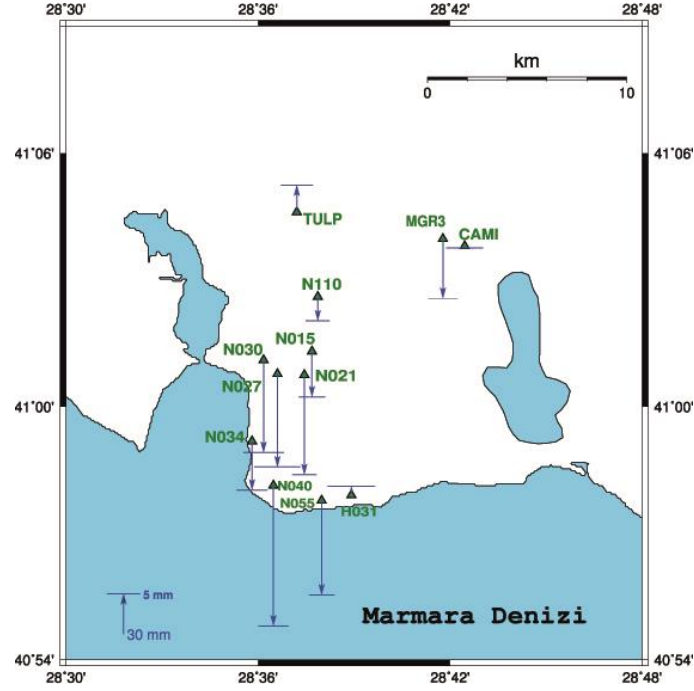


Şekil 5.30 1. ve 3. kampanya aralığında yatay yer değiştirme vektörleri ve hata elipsleri.

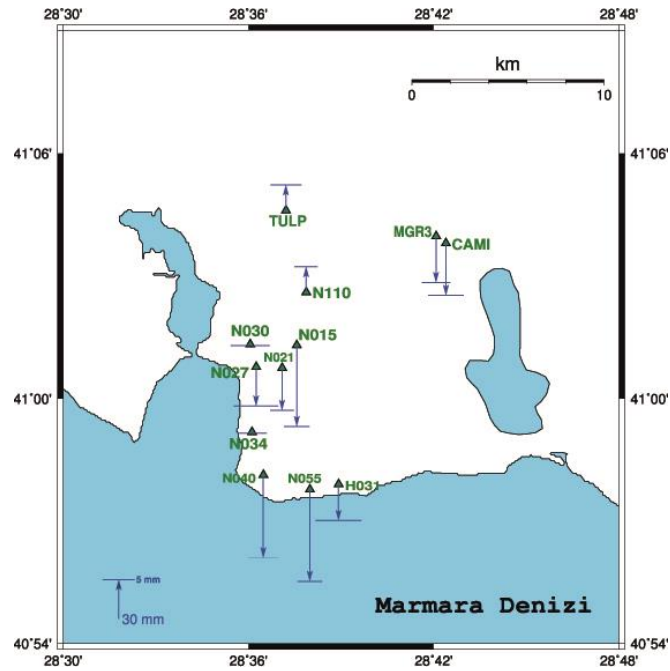


Şekil 5.31 1. ve 2. kampanya aralığında düşey yer değiştirme vektörleri ve standart sapmaları.

Şekil 5.31'e göre 1. ve 2. kampanya zaman aralığında düşey yönde en büyük yer değiştirme N030 noktasında, düşey yönde en küçük yer değiştirme ise N055 noktasında meydana gelmiştir. N030 noktasında düşey yönde yaklaşık olarak $67 \pm 5,74$ mm, N055 noktasında ise yaklaşık olarak $-0,4 \pm 3,3$ mm düşey yönde yer değiştirmeler belirlenmiştir.



Şekil 5.32 2. ve 3. kampanya aralığında düşey yer değiştirme vektörleri ve standart sapmaları.



Şekil 5.33 1. ve 3. kampanya aralığında düşey yer değiştirme vektörleri ve standart sapmaları.

Şekil 5.32'ye göre 2. ve 3. kampanya zaman aralığında düşey yönde en büyük yer değiştirme N040 noktasında, düşey yönde en küçük yer değiştirme ise CAMI noktasında meydana gelmiştir. N040 noktasında düşey yer değiştirme yaklaşık olarak $-103\pm3,40$ mm, CAMI noktasında ise yaklaşık olarak $-1.4\pm4,14$ mm düşey yer değiştirmeler belirlenmiştir.

Şekil 5.33'e göre 1. ve 3. kampanya zaman aralığında düşey yönde en büyük yer değiştirme N055 noktasında, düşey yönde en küçük yer değiştirme ise N034 noktasında meydana gelmiştir. N055 noktasında düşey yer değiştirme yaklaşık olarak $-70\pm2,87$ mm, N034 noktasında ise yaklaşık olarak $-1\pm3,50$ mm düşey yer değiştirmeler belirlenmiştir.

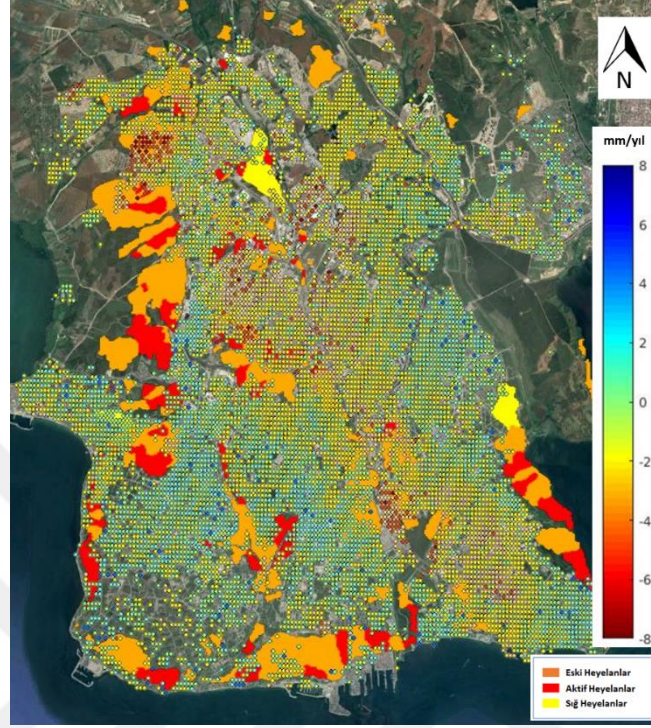
5.4. PSI VE GNSS SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

1980'lerden beri GNSS ve InSAR gibi iki modern teknik, deformasyon belirlenmesi ve izlenmesinde devrim yaratmıştır. Bu teknikler, ilgili alandaki deformasyon öncesinde, sırasında ve sonrasında deformasyon büyüklüklerini belirlemiş ve süreçleri anlamak için fiziksel modellerin araştırılmasını sağlamıştır.

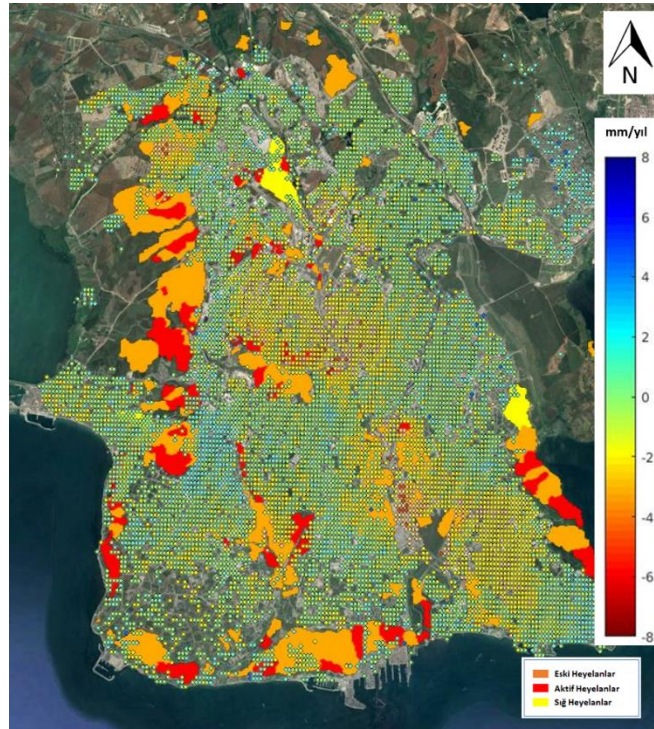
İki teknik, hem uydular hem de yer hedefleri arasındaki kesin mesafeyi çözmek için elektromanyetik dalgaların fazlarını kullanarak dikkat çekici derecede benzer bir şekilde çalışır. İki tekniğin yetenekleri, GNSS'in her GNSS istasyonunda birkaç milimetrelik bir hassasiyetle 3 boyutlu bir deformasyon vektörünü sağlayabildiği diğer yandan da InSAR'ın geniş bir alan üzerindeki deformasyonunun LOS bileşeni yönünde görüntüleyebileceği şekilde birbirlerini tamamlamaktadır. GNSS gözlemlerinde, çift frekans dalga ve zamansal ortalama alma yeteneğiyle InSAR deformasyon ölçümlerinin maruz kaldığı iyonosferik ve troposferik etkilerin giderilmesine imkan sağlar. Ayrıca InSAR ölçümleri bitki örtüsü, kar, buz vb. çevresel faktörlerin neden olduğu yüzey özelliklerinin etkilerinden dolayı interferometrik tutarlılık kaybına maruz kalmaktadır. Tüm bu olumsuzluklara rağmen hem GNSS ölçümleri hem de InSAR deformasyon görüntülerinin kombinasyonu, yer yüzeyinde meydana gelen deformasyonunun haritalandırılmasını, modellenmesini ve yorumlanmasını geliştirebilir.

Bu bilgiler ışığında GNSS sonuçlarından elde edilen yatay (kuzey-güney, doğu-batı) ve düşey (yukarı-aşağı) yönde oluşan değişim miktarları ile PSI sonuçlarından elde edilen yatay ve düşey yönde oluşan değişim miktarları karşılaştırılmıştır. Sentinel-1 için yükselen ve alçalan

yörüngelerde görüntü elde edildiğinden Bölüm 5.1.3'te verilen matematiksel ve geometrik bilgiler yardımıyla yatay (Şekil 5.34) ve düşey (Şekil 5.35) sonuçları elde edilmiştir.

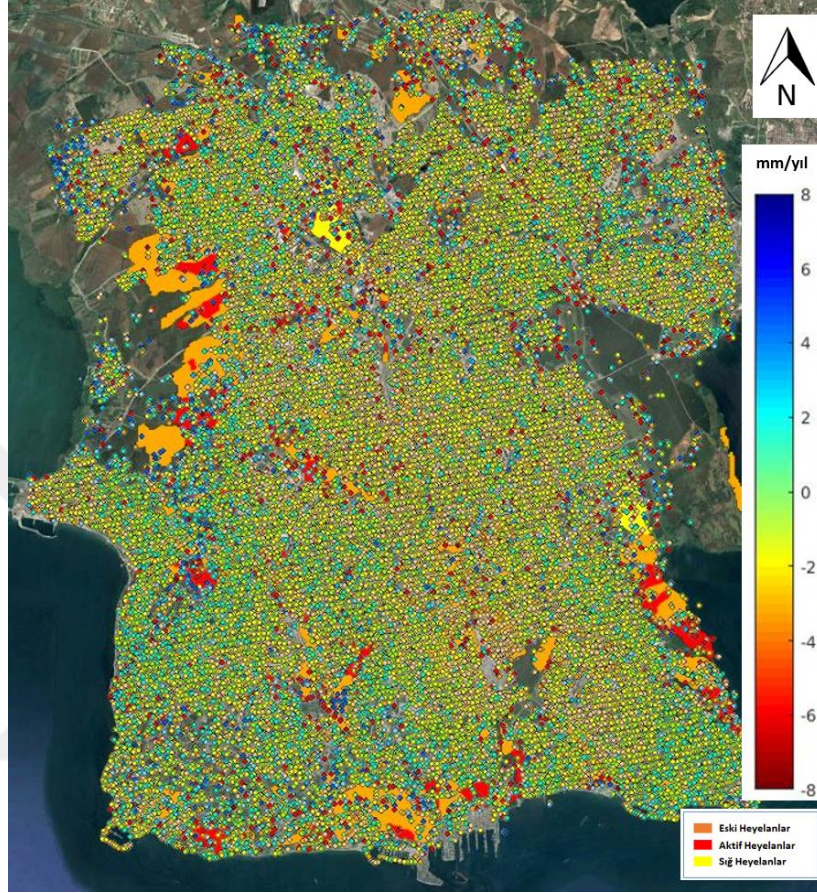


Şekil 5.34 Sentinel-1 görüntülerinden elde edilen yatay (doğu-batı) hız alanı.



Şekil 5.35 Sentinel-1 görüntülerinden elde edilen düşey (çökme-yükselme) hız alanı.

ALOS-2 için ise yalnızca yükselen yörüngede görüntü elde edildiğinden yatay ve düşey hareketler elde edilememiştir. Bu görüntülerden LOS yönünde elde edilen değerlerden düşey (up) hareketler belirlenmiştir (Şekil 5.36).

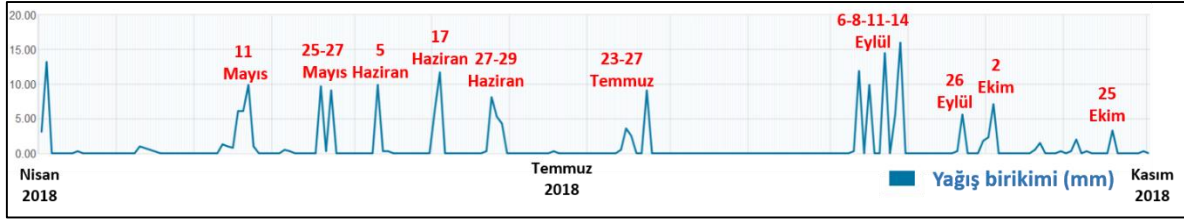


Şekil 5.36 ALOS-2 görüntülerinden elde edilen LOS yönünde düşey (çökme-yükselme) hareketler.

InSAR sonuçları karşılaştırıldığında ALOS-2 ve Sentinel-1 verilerinin eğim yönünde benzer hareketler verirken L band sonuçlarının daha büyük değerler olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar yaklaşık 4 yıl gibi uzun zaman aralığında meydana gelen hareketleri vermektedir. GNSS çalışması ise sadece son altı aylık ölçümlere ait sonucunu verdiği için değerler daha büyük çıkmaktadır. GNSS InSAR sonuçları karşılaştırıldığında bazı noktalarda benzer yöne doğru hareket verirken çoğunda farklı yönde hareket olduğu gözlenmiştir.

Bunun da olası nedenleri GNSS noktalarının InSAR noktaları ile birebir aynı konumda olmaması ve olası lokal hareketlerin yer almasıdır. Heyelan hareketleri, jeolojik formasyon, yağış ve eğim gibi parametrelere bağlı olarak geliştiği için lokal alanlarda farklı değişimlerin olması beklenen bir durum olarak değerlendirilmektedir. Şekil 5.37’de bölgeye ait GNSS

kampanya tarihleri olan Nisan ve Kasım ayları arasındaki yağış miktarları verilmiştir. Şekilde kampanyalar arasında yüksek miktarda yağış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Yağış miktarlarına bakıldığında bölgede önemli bir şekilde deformasyona neden olduğu ve bunun da GNSS sonuçlarında yansıdığı görülmektedir.



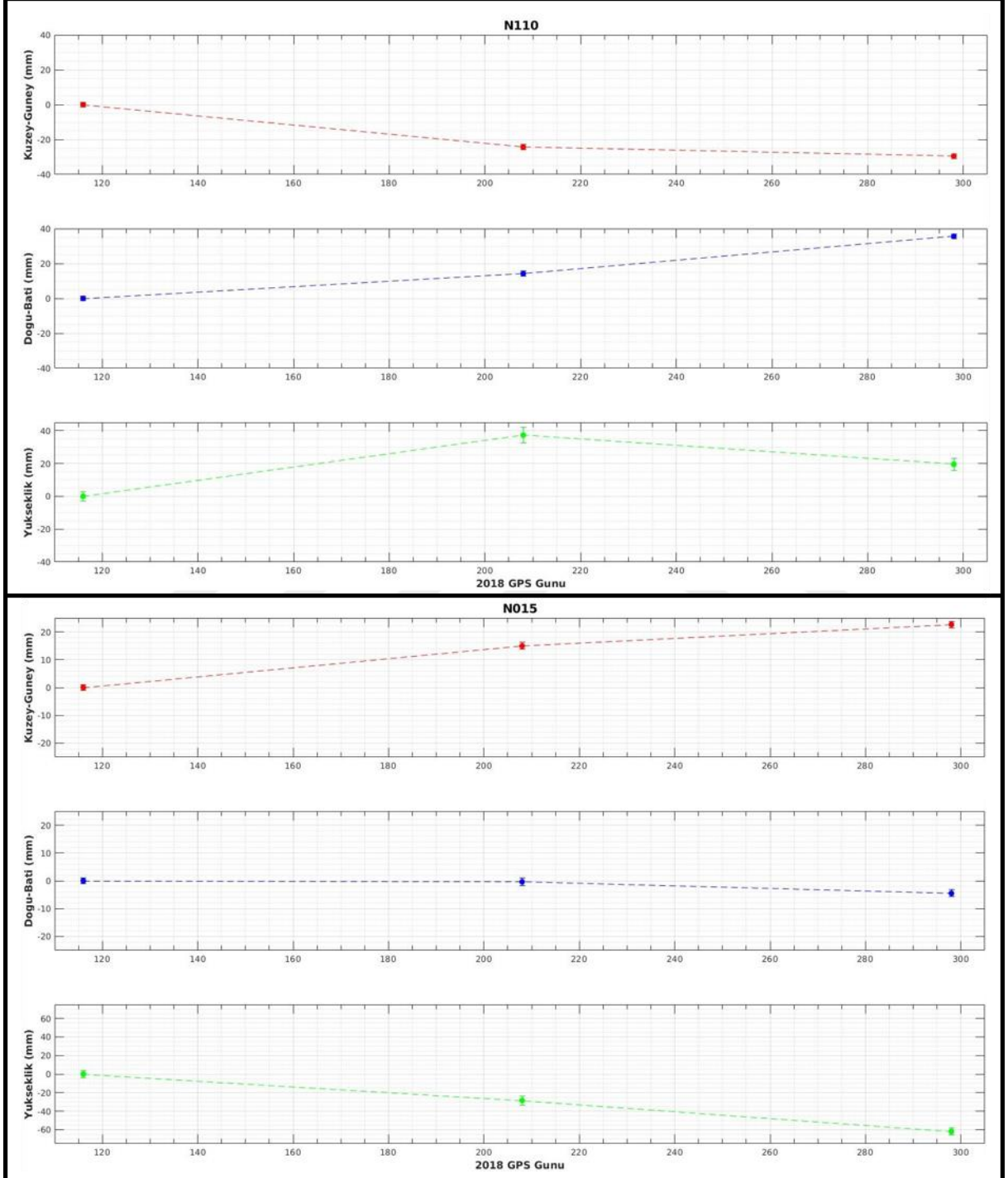
Şekil 5.37 Çalışma bölgesine ait yağış miktarları.

GNSS sonuçlarının yatay bileşenine bakıldığında birçok noktanın hareket yönünün kuzey doğrultusunda olduğu görülmektedir. Bir kısmında ise hareket yön bileşeninin kuzey doğrultusu olduğu görülmektedir. GNSS ölçümlerinde yatay hareket bileşenlerinden kuzey-güney yönlü hareketlerin diğer bileşen doğu-batı yönlü hareketlere göre miktar olarak daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bu da teknik yapısı dolayısıyla kuzey-güney ve tam tersi yönde hareket yeteneğine sahip SAR uydularının bu yöndeki hareketleri hassas bir şekilde tespit edememesine neden olmaktadır. Hastaoglu et al. (2017) çalışmalarında benzer şekilde PSI sonuçlarının bölgesel deformasyonu belirlemede başarılı olduğunu ancak GNSS ile karşılaştırıldığında korelasyonun düşük olduğunu belirtmiştir.

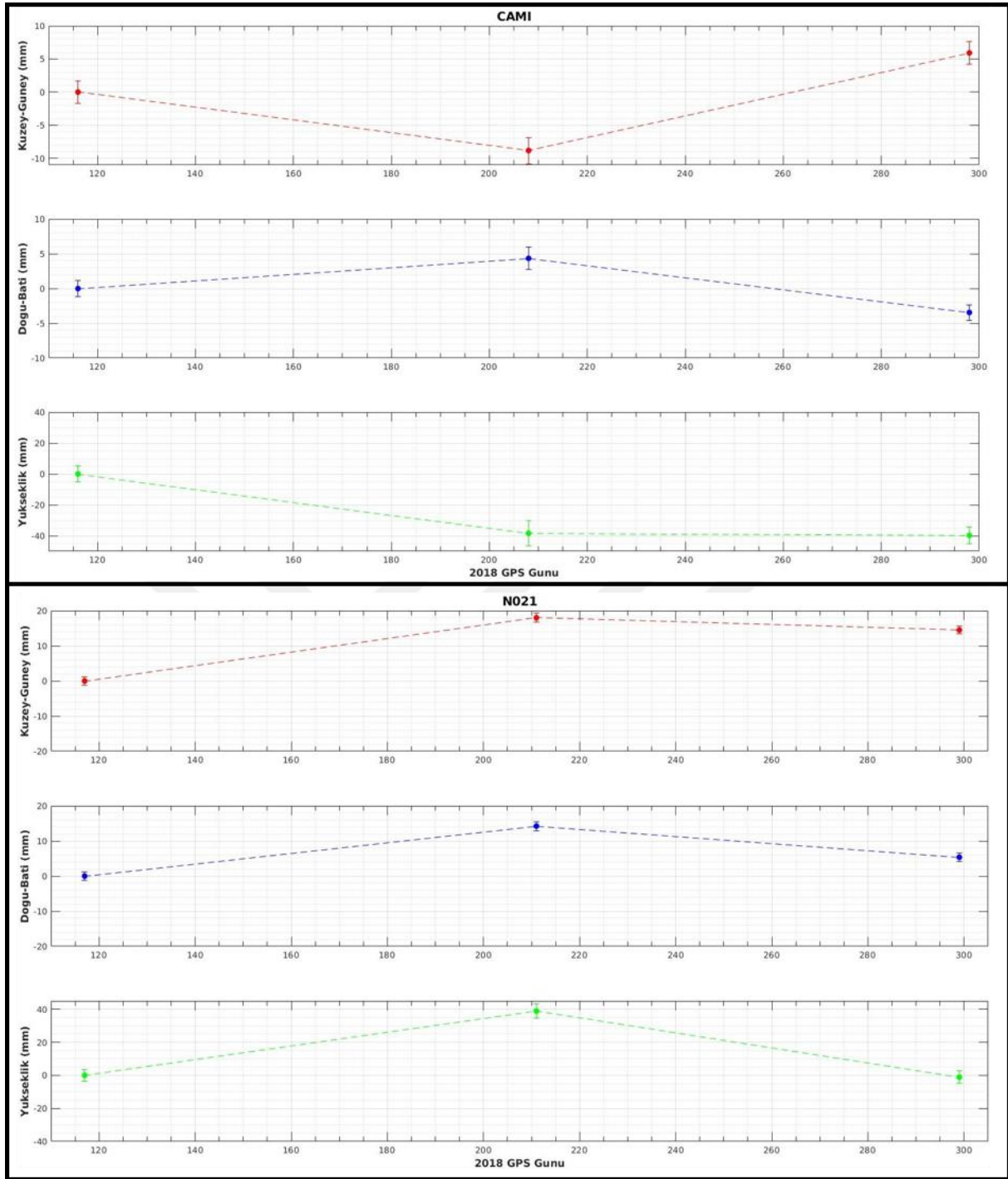
Heyelan bölgelerindeki nokta hareketlerinin homojen olmadığı ve hareketlerin karmaşık bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, GNSS ölçmelerinden elde edilen verinin yetersiz oluşu, bölgenin davranışının incelenmesini zorlaştırmaktadır. Bundan dolayı, GNSS noktalarında oluşan deformasyonları daha sağlıklı yorumlayabilmek için ölçme periyot sayısının artırılmasına gerek duyulmaktadır. Böylece, periyotlar arasındaki deformasyon bilgileri ile daha kesin sonuçlar elde edilecek ve noktalarda oluşan deformasyonlar daha sağlıklı yorumlanabilecektir.

InSAR sonuçlarının GNSS sonuçları ile korelasyonunun bu kadar az olmasına karşılık InSAR sonuçlarının kendi aralarındaki ilişkisi oldukça benzerdir. Bu ilişkinin araştırılması için GNSS sonuçlarında benzerlik gösteren ya da göstermeyen noktalarda InSAR sonuçlarının zaman serileri incelenmiştir. Aynı zamanda GNSS gözlemlerine ait trendler de bu karşılaştırma için

gözden geçirilmiştir. Zaman serilerine göre belirlenen ve trendini koruyan örnek iki nokta Şekil 5.37’de, trendini koruyamayan örnek iki nokta ise Şekil 5.38’de verilmiştir. Ayrıca ölçüm gerçekleştirilen tüm noktalara ait zaman serileri Ek-B’de verilmiştir.



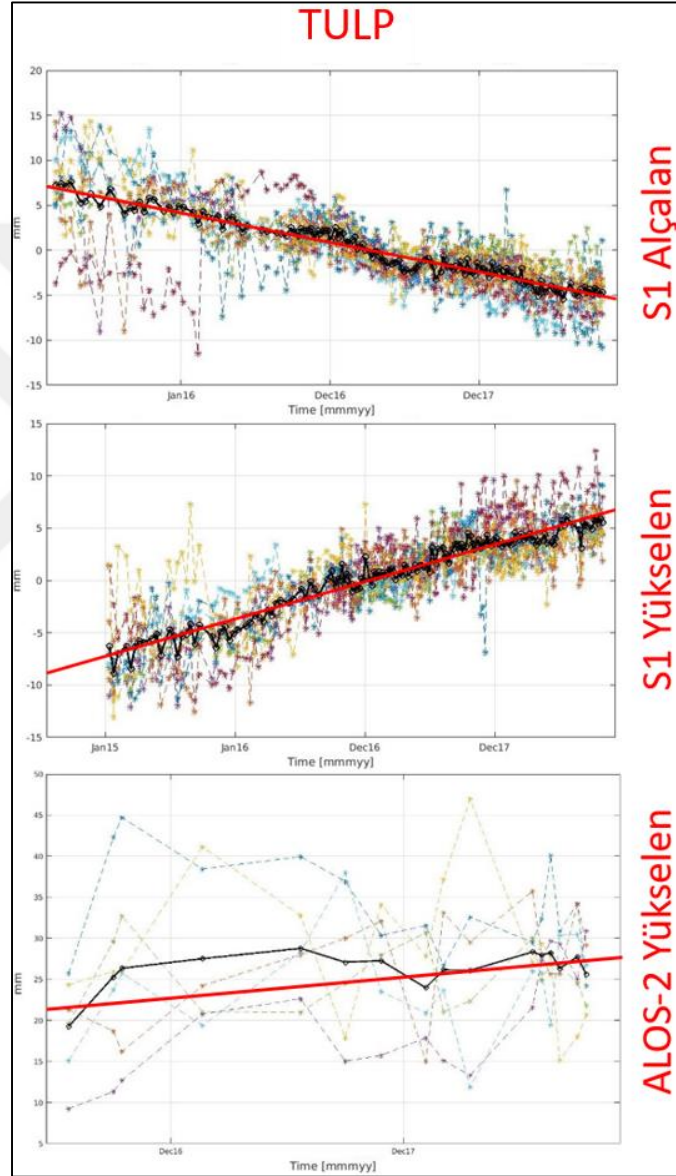
Şekil 5.37 Ölçümlerde hareket trendini koruyan 2 noktaya ait zaman serisi.



Şekil 5.38 Ölçümlerde hareket trendini koruyamayan 2 noktaya ait zaman serisi.

GNSS ölçmelerinin zaman serisinin dışında PSI analizinde belirli noktalar için de zaman serileri incelenmiştir. Şekil 5.39'da TULP noktasının bulunduğu bölgeden üç görüntüde de analiz sonucu elde edilmiş zaman serileri verilmiştir. Zaman serilerinde, GNSS noktası merkez olacak şekilde 100 m çap içerisine düşen noktalar ve bu noktaların ortalama LOS değerleri (kırmızı çizgi ile) ele alınmıştır.

Zaman serileri incelendiğinde noktanın davranışı ALOS-2 ve Sentinel-1 yükselen yörünge görüntüleri için benzerdir. Sentinel-1 alçalan yörünge görüntüsünde ise ters yönde bir davranış belirlenmiştir. Çok frekanslı analizlerde zaman serilerinin incelenmesi ve benzerlik göstermesi, özellikle PS ve GNSS noktalarının birbir örtüşmediği durumlarda önemli bir değerlendirme aracı olabilmektedir. Mevcut GNSS noktalarına yakın olan PS noktalarının zamansal davranışları kolayca elde edilmektedir. Böylece kıyaslama için önemli bir bilgi kaynağıdır.

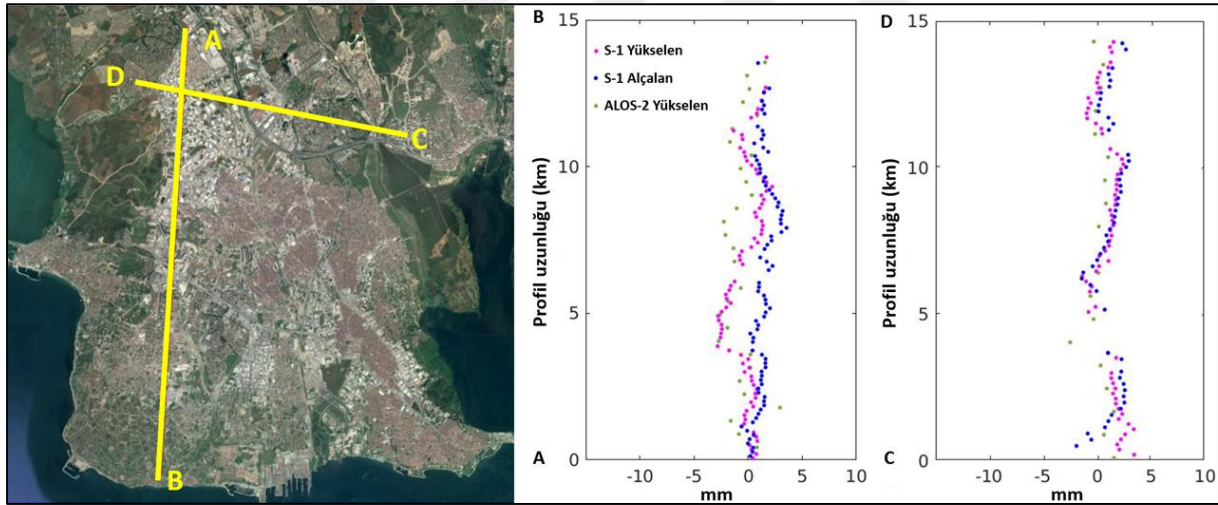


Şekil 5.39 Ölçümlerde hareket trendini koruyamayan 2 noktaya ait zaman serisi.

Bunun yanında çalışma alanında kuzey-güney ve doğu-batı yönünde olacak şekilde iki adet profil elde edilerek InSAR sonuçlarının karşılaştırması yapılmıştır (Şekil 5.40). Yapılan değerlendirmede Sentinel-1 ve ALOS-2 yükselen yörüngelerinin benzer davranışlar sergilediği

belirlenmişti. Sentinel-1 alçalan yörünge de ise Sentinel-1 yükselen yörünge davranışlarına zıt yönde davranışlar tespit edilmiştir. Bu da sonuçların tutarlılığı açısından bilgi vermektedir.

Bir diğer karşılaştırma ise çalışma alanının bölümler halinde değerlendirilmesidir. Çalışma alanının güneyinde ve sahile yakın yerlerinde bulunan N034, N040, N055 ve H031 GNSS noktalarının yatay doğrultudaki hareket değerleri -2 mm ile 32 mm arasında değişmektedir. Aynı bölgede InSAR'dan elde edilen değerler ise -4-5 mm/yıl arasındadır. Büyükçekmece bölgesinde bulunan N030, N015, N027 ve N021 noktalarının yatay değişimleri -4 mm ile 5 mm arasında iken InSAR sonuçları -8-6 mm/yıl arasında belirlenmiştir. GNSS sonuçlarına göre TULP ve N110 noktalarının bulunduğu Alkent'te ise 4 mm ile 35 mm gibi yüksek değerler görülürken InSAR için bu değerler -2--6 mm/yıl arasında değişmektedir. Ispartakule de ise -3 mm ile 30 mm arasındaki GNSS değerlerine karşılık -8-2 mm/yıl değerleri bulunmuştur. Bölgesel olarak bakıldığında GNSS ile InSAR yöntemlerinin yatay sonuçlarının minimum ve maksimum değerlerinin N110 noktası hariç örtüştüğü görülmektedir.



Şekil 5.40 InSAR sonuçlarının profili.

Düşey hareketler de ise aynı bölgeler incelendiğinde GNSS noktalarında genel olarak çökmeler bulunurken InSAR için çökmeler ve yükselmeler mevcuttur. Güney bölümlerinde bulunan dört noktada -70 mm ile 0 mm arasında yüksek değerlere sahipken InSAR için bu değerler -2-6 mm/yıl arasındadır. Büyükçekmece'deki dört nokta için ise güney noktalarına benzer değerler olan -61 mm ile -1 mm olarak elde edilmiştir. InSAR sonuçlarında 2-6 mm/yıl gibi yükselme değerleri mevcuttur. Alkent'te ise durum biraz farklıdır. Bölgede bulunan her iki noktada da 19,46 mm değeri varken InSAR da sonuçlar iki yönde -6-6 mm/yıl arasındadır. Son olarak

Ispartakule bölgesindeki iki nokta da -40 mm ile -35 mm gibi yüksek çökme değerleri elde edilirken InSAR da -6-2 mm/yıl arasında iki yönlü hareket değerleri mevcuttur.



BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında İstanbul'un son 15 yılda gelişim gösteren ilçeleri Beylikdüzü ve Esenyurt'ta yer kabuğu hareketlerinin sebep olduğu uzun süreli heyelan belirleme ve izleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. InSAR verileri ile yapılan çok zamanlı ve çok frekanslı analizler sonucunda konumsal ve zamansal açıdan değerlendirmeler yapılmış ve meydana gelen heyelanların gelişimi hakkında sonuçlar elde edilmiştir. InSAR verileri PSI tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca InSAR'dan elde edilen sonuçların daha iyi yorumlanabilmesi için bölgede periyodik olarak yapılan GNSS gözlemleri ile karşılaştırılmıştır.

Heyelanlar PSI tekniği ile Büyükçekmece ve Küçükçekmece gölleri arasında kalan yarımada için izlenmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Beklendiği gibi Sentinel-1 görüntüleri ile yapılan analizlerde elde edilen PS noktaları çoğunlukla yarımada bulunan kentsel alanlarda elde edilmiştir. Bu sonuçlarla kentsel alanlarda meydana gelen hareketlerin çıkarılması başarılı bir şekilde gerçekleşmiştir. ALOS-2 ile yapılan analizlerde L band yardımı ile Sentinel-1 sonuçlarından elde edilemeyen, kentleşmenin az olduğu ve kırsal kabul edilebilecek bazı alanlarda PS noktası elde edilmiştir. Böylelikle farklı sensörlerle (Sentinel-1 ve ALOS-2) izlenen heyelanlar, farklı frekanslarla (C ve L band), farklı yörünge geçiş modları ile (yükselen ve alçalan) ve farklı polarizasyonlarla (VV ve HH) tespit edilmiştir. Bunun yanında bölgede yapılan periyodik GNSS ölçmeleri de elde edilen sonuçların karşılaştırılması ve yorumlanması açısından çalışmaya destek vermiştir.

Çalışma öncesinde yapılan bazı araştırmalar sonucunda Beylikdüzü ve Esenyurt'ta meydana gelen bu sürekli hareketler ve bu hareketler hakkında yapılan çalışmalar bu tez çalışmasının yapılmasına öncü olmuştur. Bu çalışmalarda etkin InSAR yöntemleri olan PSI ve SBAS teknikleri başı çekmektedir. ERS 1, ERS 2 ve ENVISAT verileri kullanılarak 1992-2010 yılları arasında İstanbul'da bulunan beylikdüzü ve Esenyurt'un da içinde bulunduğu yerleşim alanları için ortalama hızlar belirlenmiştir (Walter et al. 2010). Yine aynı bölge için ERS 1, ERS 2,

ENVISAT ve Sentinel-1 uydu verileri kullanılarak 1992-2017 yılları arasında geniş bir zaman aralığında İstanbul'da zaman serisi analizi yapılmış ve çalışma bölgemize ait bazı bölgelerde 8-15 mm/yıl arasında değerler elde edilmiştir (Aslan et al. 2018). Başka bir çalışmada benzer veri ve teknikler kullanılarak 1992-1999 yılları arasında 12 mm/yıl deformasyon elde etmişlerdir (Akarvardar et al. 2009). Diao et al. (2016a) tarafından yapılan çalışmada 1999 İzmit-Düzce depremlerinin etkilerini araştırılmıştır. Araştırma için yarımada fay hareketleri için PSI yöntemi ile 2002-2005 yılları arasında 5 mm/yıl gibi bir değer belirlenmiştir. Devamı niteliğindeki çalışmada Diao et al. (2016b) InSAR sonuçlarına GNSS ölçümleri de eklenmiş ve 19 mm/yıl bir kayma tespit edilmiştir.

Bu çalışmalarının dışında bölgede yalnızca GNSS tekniği kullanılarak elde edilen sonuçlar bulunmaktadır (Ergintav et al. 2011, Dogan et al. 2013, Coccia et al. 2014, Bourdeau et al. 2017). Çalışmalarda genel olarak İzmit-Düzce depremlerinin etkileri araştırılmış ve çalışma bölgemizde 1992-2015 yılları arasında yapılan periyodik ölçümler sonucunda 8-20 mm/yıl arasında hareketler belirlenmiş ve davranışları tanımlanmıştır.

Bu tezde PSI tekniği ile elde edilmiş sonuçlar daha önce bölgede yapılan çalışmalar ile uyumludur. Yalnız farklı zaman dilimlerinde yapılan çalışmalar ile kesin olarak karşılaştırmak zordur. Bunun yanında zaman dilimi açısından benzerlik gösteren ve Aslan et al. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada belirlenen hareket yön ve miktarları büyük benzerlik göstermektedir. Yapılan InSAR uygulamalarında SYM hatası, yörünge hatası ve atmosferik faz kaldırılmıştır. Sonuçlarda yalnızca Sentinel-1 için StaMPS yazılımında gerçekleştirilen slave görüntülere ait atmosfer ve yörünge hataları çıkarılmamıştır. Elde edilen sonuç miktarlarına bakıldığında yüksek bir değişim sağlamasından dolayı bu düzeltme yapılmamıştır.

Genel olarak bu çalışmada aşağıdaki amaç ve araştırma sorularına yanıt aranmış ve gerekli sonuçlar bulunmuştur:

- InSAR tekniği ile elde edilen zaman serilerinin analizi ile güncel heyelanlar belirlenmiştir. Bunun yanında deformasyonun yönü ve miktarları elde edilmiştir.
- Sentinel-1 ve ALOS-2 görüntüleriyle çok zamanlı ve çok frekanslı analizler yapılmıştır. Sonuçların birbirleri ile uyumlu olduğu belirlenmiş yalnızca miktar açısından farklılıklar olduğu gözlenmiştir.

- Çalışma alanlarının hareketlerinin belirlenmesi için yeterli sayıda PS noktası elde edilmiştir. Sentinel-1 yükselen yörüngede 35546, alçalan yörüngede 35008 ve ALOS-2 yükselen yörüngede 24139 adet PS noktası elde edilmiştir.
- Sentinel verileri C band olduğundan dolayı PS noktaları kentsel alanlarda elde edilmiştir. Bunun yanında ALOS-2 algılayıcısında bulunan L bandın yüksek dalga boyu sayesinde kentsel alanların yanı sıra kentleşmenin az olduğu ve kırsal bazı alanlarda da PS noktaları elde edilmiştir.
- Beylikdüzü ve Esenyurt bölgelerinin heyelan haritaları başarılı bir şekilde üretilmiş ve sonuçları yorumlanmıştır.
- 2015-2018 yılı arasında yapılan analiz sonuçlarına göre Sentinel-1 iki yörüngesi için alınan ortalama değerlere bakıldığında -4 mm ile 3 mm arasında yatay hareketler belirlenirken -2 mm ile 4 mm arasında düşey hareketler belirlenmiştir. ALOS-2 ve Sentinel-1 verilerinin sonuçları eğim yönünde benzer hareketler göstermiştir. Yalnız ALOS-2 verilerinde L band sonuçlarının daha büyük değerler olduğu görülmektedir. ALOS-2 görüntülerinde tek yörüngeden veri sağlanabildiği için sadece bakış yönündeki (LOS) düşey hareketler belirlenmiştir. Bu hareketlerin miktarı -6 mm ile 10 mm arasında belirlenmiştir.
- PSI ve GNSS teknikleriyle elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır. Öncelikli olarak belirtilmesi gereken husus PSI analizlerinin uzun periyotlu verilerle yapılırken, GNSS ölçümleri yalnızca 6 aylık bir periyotta elde edilmiştir. GNSS çalışması yalnızca son altı aylık ölçümlere ait sonuçlara göre değerlendirildiğinden dolayı InSAR değerlerinden daha farklı çıkmaktadır. GNSS InSAR sonuçları karşılaştırıldığında GNSS noktalarına yakın yerlerden alınan ve zaman serisi analiziyle belirlenen PS noktalarının bazı noktalarda benzer yöne doğru hareketleri tespit edilirken çoğunda farklı yönde harekete sahip olduğu gözlenmiştir. Bunun başlıca sebeplerinden biri de GNSS noktalarının PS noktaları ile birebir aynı konumda olmamasıdır. Ayrıca olası lokal hareketlerin heyelan, jeolojik formasyon, yağış ve eğim gibi parametrelere bağlı olarak gerçekleşmesidir.
- Çok zamanlı InSAR çalışmalarında GNSS ölçümlerinden yararlanabilmek için öncelikle periyotlarının benzer olması gerekmektedir. Bu tekniklerin heyelan çalışmalarında birlikte kullanılması ise oldukça yoruma açık bir olgudur. Yapılan çalışmalarda heyelanın genel davranışları jeolojik olarak incelenmeli ve lokal hareketlerin çoğunlukta olduğu bölgelerde GNSS noktası tesis edilmemelidir.

- Genel bir ifade ile heyelan bölgelerindeki nokta hareketlerinin homojen olmadığı (lokal ve dağınık) ve hareketlerin düzenli bir yapıya sahip olmadığı görülmektedir. Ayrıca, GNSS ölçmelerinin periyodunun az oluşu, bölgenin davranışının belirlenmesini zorlaştırmaktadır. Bundan dolayı, GNSS noktalarında oluşan deformasyonları daha anlamlı hale gelebilmesi için ölçme periyodunun artırılmasına gerekmektedir.

Bu çalışmanın sonuçlarına göre, son yıllarda sanayi gelişimi ile insanların ilgi alanı haline gelen ve sürekli gelişim gösteren bölgesi konumundaki Beylikdüzü ve Esenyurt ilçelerinde meydana gelebilecek doğal afetlere hazırlıklı olunması gerekmektedir. Bunun için önemli doğal afetlerden birisi olan heyelanın sürekli ve etkin olarak izlenmesi sürdürülebilir yönetim için kesinlikle gereklidir. Heyelanların yalnızca belirlenmesi değil jeolojik ve jeomorfolojik yönleriyle araştırılması ve yeni nesil SAR misyonlarıyla izlemeye devam edebilmek için ilave çalışmalar yapılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdikan S** (2007) Quality Assessment of DEMs Generated from Interferometric SAR and Stereo SAR, *Master Thesis*, Yıldız Technical University, Institute of Science and Technology, Istanbul, 97 pp.
- Abdikan S** (2012) Monitoring of Land Surface Subsidence in Zonguldak Coal Mining Field in The Northern Turkey Using Multi Temporal SAR Interferometry, *PhD Thesis*, Yıldız Technical University, Institute of Science and Technology, İstanbul, 132 pp.
- Arıkan M, Hooper A and Hanssen R** (2010) Radar Time Series Analysis Over West Anatolia. *European Space Agency*, (Special Publication) ESA SP-677.
- Arpar E** (1999) Büyükçekmece ile Küçükçekmece (İstanbul) Heyelanlarının Genel Özellikleri ve Yarattıkları Başlıca Sorunlar: 70. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiriler Kitabı, Ankara, 17-23 (Türkçe).
- Akarvardar S, Feigl K L and Ergintav S** (2009) Ground Deformation in an Area Later Damaged by an Earthquake: Monitoring the Avcılar District of Istanbul, Turkey, By Satellite Radar Interferometry 1992–1999. *Geophysical Journal International*, 178: 976-988.
- Akcin H, Kutoglu S H, Kemaldere H, Deguchi T and Koksall E** (2010) Monitoring Subsidence Effects in the Urban Area of Zonguldak Hardcoal Basin of Turkey by InSAR-GIS Integration. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10: 1807.
- Angeli M G, Pasuto A and Silvano S** (2000) A Critical Review of Landslide Monitoring Experiences. *Engineering Geology*, 55: 133-147.
- Aslan G, Cakir Z, Ergintav S, Lasserre C and Renard F** (2018) Analysis of Secular Ground Motions in Istanbul from a Long-Term InSAR Time-Series (1992–2017). *Remote Sensing*, 10: 408.
- Bamler R and Hartl P** (1998) Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Inverse Problems*, 14:4, R1.
- Bayer B, Schmidt D and Simoni A** (2017) The Influence of External Digital Elevation Models on PS-InSAR and SBAS Results: Implications for the Analysis of Deformation Signals Caused by Slow Moving Landslides in the Northern Apennines (Italy). *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, 55: 2618-2631.
- Berardino P, Fornaro G, Lanari R and Sansosti E** (2002) A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing*, 40: 2375-2383.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Bianchini S, Cigna F, Righini G, Proietti C and Casagli N** (2012) Landslide Hotspot Mapping by Means of Persistent Scatterer Interferometry. *Environmental Earth Sciences*, 67: 1155-1172.
- Biggs J, Wright T, Lu Z and Parsons B.** (2007) Multi-Interferogram Method for Measuring Interseismic Deformation: Denali Fault, Alaska. *Geophysical Journal International*, 170: 1165-1179.
- Blanco-Sanchez P, Mallorquí J J, Duque S and Monells D** (2008) The Coherent Pixels Technique (CPT): An Advanced DInSAR Technique for Nonlinear Deformation Monitoring. *Earth Sciences and Mathematics*, Springer, 1167-1193.
- Bourdeau C, Lenti L, Martino S, Oguz O, Yalcinkaya E, Bigarrè P and Coccia S** (2017) Comprehensive Analysis of The Local Seismic Response in The Complex Büyükçekmece Landslide Area (Turkey) by Engineering-Geological and Numerical Modelling. *Engineering Geology*, 218: 90-106.
- Calò F, Abdikan S, Görüm T, Pepe A, Kiliç H and Balık Şanlı F** (2015) The Space-Borne SBAS-DInSAR Technique as a Supporting Tool for Sustainable Urban Policies: The Case of Istanbul Megacity, Turkey. *Remote Sensing*, 7: 16519-16536.
- Calvello M, Peduto D and Arena L** (2017) Combined Use of Statistical and DInSAR Data Analyses to Define the State of Activity of Slow-Moving Landslides. *Landslides*, 14: 473-489.
- Carnec C, Massonnet D and King C** (1996) Two Examples of the Use of SAR Interferometry on Displacement Fields of Small Spatial Extent. *Geophysical Research Letters*, 23: 3579-3582.
- Casu F, Manzo M and Lanari R** (2006) A Quantitative Assessment of the SBAS Algorithm Performance for Surface Deformation Retrieval from DInSAR data. *Remote Sensing of Environment*, 102: 195-210.
- Cheloni D, De Novellis V, Albano M, Antonioli A, Anzidei M, Atzori S, Avallone A, Bignami C, Bonano M and Calcaterra S** (2017) Geodetic Model of the 2016 Central Italy Earthquake Sequence Inferred from InSAR and GNSS Data. *Geophysical Research Letters*, 44: 6778-6787.
- Chen Y, Zhang K, Tan K, Feng X and Li H** (2018) Long-Term Subsidence in Lava Fields at Piton de la Fournaise Volcano Measured by InSAR: New Insights for Interpretation of the Eastern Flank Motion. *Remote Sensing*, 10: 597.
- Chen Z, Zhang J M, Ho K, Wu F Q and Li Z K** (2008) The Use of PSInsar™ Data in Landslide Detection and Monitoring: The Example of the Piemonte Region (Northern Italy), Landslides and Engineered Slopes. *From the Past to the Future*, CRC Press, p. 1277-1284.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Cigna F, Bateson L B, Jordan C J and Dashwood C** (2014) Simulating SAR Geometric Distortions and Predicting Persistent Scatterer Densities for ERS-1/2 and ENVISAT C-band SAR and InSAR Applications: Nationwide Feasibility Assessment to Monitor the Landmass of Great Britain with SAR Imagery. *Remote Sensing of Environment*, 152: 441-466.
- Coccia S, Coccia S, Theoleyre F, Bigarre P, Ergintav S, Ozel O and Özalaybey S** (2014) Advancements in Near Real Time Mapping of Earthquake and Rainfall Induced Landslides in the Avcilar Peninsula, Marmara Region, In: *Proceedings Egu General Assembly Conference Abstracts 2014*, Volume 16.
- Corominas J, Moya J, Lloret A, Gili J, Angeli M, Pasuto A and Silvano S** (2000) Measurement of Landslide Displacements using a Wire Extensometer. *Engineering Geology*, 55: 149-166.
- Costantini M, Falco S, Malvarosa F and Minati F A** (2008) New Method for Identification and Analysis of Persistent Scatterers in Series of SAR Images, *Proceedings Geoscience And Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. IEEE International 2008*, Volume 2, IEEE, 2:449-452.
- Costantini M, Malvarosa F and Minati F** (2012) A General Formulation for Redundant Integration of Finite Differences and Phase Unwrapping on a Sparse Multidimensional Domain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50: 758-768.
- Crosetto M, Arnaud A, Duro J, Biescas E and Agudo M** (2003) Deformation Monitoring Using Remotely Sensed Radar Interferometric Data, in *Proceedings Proc., 11th FIG Symposium on Deformation Measurements*, Santorini, Greece, 2003
- Crosetto M, Biescas E, Duro J, Closa J and Arnaud A** (2008) Generation of Advanced ERS and Envisat Interferometric SAR Products Using the Stable Point Network Technique. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 74: 443-450.
- Crosetto M, Gili J, Monserrat O, Cuevas-González M, Corominas J and Serral D** (2013) Interferometric SAR Monitoring of the Vallcebre landslide (Spain) Using Corner Reflectors. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13: 923-933.
- Çakir Z, Ergintav S, Özener H, Dogan U, Akoglu A M, Meghraoui M and Reilinger R** (2012) Onset of Aseismic Creep on Major Strike-Slip Faults. *Geology*, 40: 1115-1118.
- Dai K, Liu G, Li Z, Li T, Yu B, Wang X and Singleton A** (2015) Extracting vertical displacement rates in Shanghai (China) with multi-platform SAR images. *Remote Sensing*, 7(8): 9542-9562.
- Dallemand J, Lichtenegger J, Raney R and Schumann R** (1993) *Radar Imagery: Theory and Interpretation*. Remote Sensing Center, Research and Technology Development Division, Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Dandan Y, Kan W and Qiang H** (2014) Coal Mine Subsidence Monitoring Based on D-In SAR Technology. *Metal Mine*, 11 (35).
- Dach R, Lutz S, Walser P and Fridez P** (2015) *Bernese GNSS Software Version 5.2. User manual*, Astronomical Institute, University of Bern, *Bern Open Publishing*, Switzerland, DOI: 10.7892/boris.72297; ISBN: 978-3-906813-05-9, 884 p.
- Delacourt C, Allemand P, Squarzoni C, Picard F, Raucoules D and Carnec C** (2003) Potential and Limitation of ERS-Differential SAR Interferometry for Landslide Studies in the French Alps and Pyrenees. *Fringe 2003*, Frascati, Italy, 1 – 5 December 2003.
- Delouis B, Giardini D, Lundgren P and Salichon J** (2002) Joint Inversion of InSAR, GNSS, Teleseismic, and Strong-Motion Data for the Spatial and Temporal Distribution of Earthquake Slip: Application to the 1999 Izmit Mainshock. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92: 278-299.
- Diao F, Walter T R, Minati F, Wang R, Costantini M, Ergintav S, Xiong X and Prats-Iraola P** (2016a) Secondary Fault Activity of the North Anatolian Fault near Avcılar, Southwest of Istanbul: Evidence from SAR Interferometry Observations. *Remote Sensing*, 8: 846.
- Diao F, Walter T R, Solaro G, Wang R, Bonano M, Manzo M, Ergintav S, Zheng Y, Xiong X and Lanari R** (2016b) Fault Locking near Istanbul: Indication of Earthquake Potential from InSAR and GNSS Observations. *Geophysical Supplements to the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 205: 490-498.
- Doğan U** (1996) GNSS Ölçüleri İle Yersel Ölçülerin Birlikte Dengelenmesi Üzerine Bir Araştırma , *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 93s.
- Doğan U** (2011) Dengeleme Hesabı, *YTÜ Lisans Ders Notları*, İstanbul, 147 s.
- Dogan U, Oz D and Ergintav S** (2013) Kinematics of Landslide Estimated by Repeated GNSS Measurements in the Avcılar Region of Istanbul, Turkey. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 57: 217-232.
- Dreger D S, Huang M H, Rodgers A, Taira T A and Wooddell K** (2015) Kinematic Finite-Source Model for the 24 August 2014 South Napa, California, Earthquake from Joint Inversion of Seismic, GNSS, and InSAR Data. *Seismological Research Letters*, 86: 327-334.
- Duman T Y, Çan T and Emre Ö** (2011) *1/1.500.000 Türkiye Heyelan Envanteri Haritası, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Özel Yayınlar Serisi -27*, Ankara, Türkiye. ISBN:978-605-4075-85-3.
- Duman T Y, Can T, Gokceoglu C, Nefeslioglu H A and Sonmez H** (2006) Application of Logistic Regression for Landslide Susceptibility Zoning of Cekmece Area, Istanbul, Turkey. *Environmental Geology*, 51: 241-256.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Duman T Y, Can T, Ulusay R, Ke er M, Emre O, Ate  S and Gedik I.** (2005) A Geohazard Reconnaissance Study Based on Geoscientific Information for Development Needs of the Western Region of Istanbul (Turkey). *Environmental Geology*, 48: 871-888.
- Elliott J** (2009) Strain Accumulation & Release on the Tibetan Plateau Measured Using InSAR. *PhD Thesis*. Oxford University.
- Ergintav S, Demirba  E, Ediger V, Saat ılar R, Inan S, Cankurtaranlar A, Dikba  A and Ba  M** (2011) Structural Framework of Onshore and Offshore Avcılar, Istanbul Under The Influence of the North Anatolian Fault. *Geophysical Journal International*, 185: 93-105.
- Farina P, Colombo D, Fumagalli A, Marks F and Moretti S** (2006) Permanent Scatterers for Landslide Investigations: Outcomes from the ESA-SLAM Project. *Engineering Geology*, 88: 200-217.
- Farr T G, Rosen P A, Caro E, Crippen R, Duren R, Hensley S, Kobrick M, Paller M, Rodriguez E and Roth L** (2007) The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2).
- Fattahi H and Amelung F** (2013) DEM Error Correction in Insar Time Series. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51: 4249-4259.
- Ferretti A, Prati C and Rocca F** (2000) Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38: 2202-2212.
- Ferretti A, Fumagalli A, Novali F, Prati C, Rocca F and Rucci A** (2011) A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49: 3460-3470.
- Ferretti A, Novali F, Fumagalli A, Prati C, Rocca F and Rucci A** (2009) Beyond PSInSAR: the SQUEESAR Approach. in *Proceedings AGU Fall Meeting Abstracts*. 2009. 14–18 December, San Francisco, California, USA, 1 (2).
- Ferretti A, Prati C and Rocca F** (1999) Permanent Scatterers in SAR Interferometry, in *Proceedings Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS'99 Proceedings*. Volume 3, IEEE, 1528-1530.
- Ferretti A, Savio G, Barzaghi R, Borghi A, Musazzi S, Novali F, Prati C and Rocca F** (2007) Submillimeter Accuracy of Insar Time Series: Experimental Validation. *IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing*, 45: 1142-1153.
- Fialko Y, Simons M and Agnew D** (2001) The Complete (3-D) Surface Displacement Field in the Epicentral Area of the 1999 Mw 7.1 Hector Mine Earthquake, California, From Space Geodetic Observations. *Geophysical Research Letters*, 28: 3063-3066.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Fournier T, Pritchard M E and Finnegan N** (2011) Accounting for Atmospheric Delays in InSAR Data in a Search for Long-Wavelength Deformation in South America. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49: 3856-3867.
- Franceschetti G and Lanari R** (1999) *Synthetic Aperture Radar Processing*. 1351412019, CRC press.
- Frangioni S, Bianchini S and Moretti S** (2015) Landslide Inventory Updating by Means of Persistent Scatterer Interferometry (PSI): the Setta Basin (Italy) Case Study. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 6: 419-438.
- Frey H, Strozzi T, Caduff R, Huggel C, Klimes J, Vilímek V, Wiesmann A, Kääb A, Cochachin A and Plummer S** (2016) Slope Deformations in High-Mountain Regions as Observed by InSAR: Examples from the Cordillera Blanca, Peru, EGU General Assembly Conference, 23–28 April 2017, Vienna, Austria, Volume 18, 6455 p.
- Fujiwara S, Nishimura T, Murakami M, Nakagawa H, Tobita M and Rosen P A** (2000) 2.5-D Surface Deformation of M6. 1 Earthquake near Mt Iwate Detected by SAR Interferometry. *Geophysical Research Letters*, 27: 2049-2052.
- Gaber A, Darwish N and Koch M** (2017) Minimizing the Residual Topography Effect on Interferograms to Improve DInSAR Results: Estimating Land Subsidence in Port-Said City, Egypt. *Remote Sensing*, 9 (752).
- Gens R** (1998) *Quality Assessment of SAR Interferometric Data*. ITC, 142 p.
- Gens R and Van Genderen J L** (1996) Review Article SAR interferometry—Issues, Techniques, Applications. *International Journal of Remote Sensing*, 17: 1803-1835.
- Goldstein R** (1995) Atmospheric Limitations to Repeat-Track Radar Interferometry. *Geophysical Research Letters*, 22: 2517-2520.
- Gong W, Meyer F, Webley P and Morton D** (2013) Performance of the High-Resolution Atmospheric Model HRRR-AK for Correcting Geodetic Observations from Spaceborne Radars. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118 (11): 611-624.
- Gourmelen N, Amelung F and Lanari R** (2010) Interferometric Synthetic Aperture Radar–GNSS Integration: Interseismic Strain Accumulation Across the Hunter Mountain Fault in the Eastern California shear zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115.
- Gökaşan E, Ustaömer T, Gazioğlu C, Yücel Z Y, Öztürk K, Tur H, Ecevitoglu B and Tok B** 2003 Morpho-Tectonic Evolution of the Marmara Sea Inferred from Multi-Beam Bathymetric and Seismic Data. *Geo-Mar. Letters*, 23(1):19-33.
- Hanssen R F** (1998) Atmospheric Heterogeneities in ERS TanDEM SAR Interferometry.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Hanssen R F** (2001) *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. 0792369459, Springer Science & Business Media, 307 p.
- Hastaoglu K O, Poyraz F, Turk T, Yilmaz I, Kocbulut F, Demirel M, Sanli U, Duman H and Balik Sanli F** (2017) Investigation of the Success of Monitoring Slow Motion Landslides Using Persistent Scatterer Interferometry and GNSS Methods. *Survey Review*, 50(363): 475-486.
- Henderson F M and Lewis A J** (1998) *Principles and Applications of Imaging Radar. Manual of Remote Sensing: Volume 2*.
- Hlaváčová I** (2008) Interferometric Stacks in Partially Coherent Areas. *PhD thesis*. Prague: ČVUT Praha, 170 p.
- Hoën E W and Zebker H A** (2000) Penetration Depths Inferred from Interferometric Volume Decorrelation Observed over the Greenland Ice Sheet. *IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing*, 38: 2571-2583.
- Hooper A** (2008) A Multi-Temporal Insar Method Incorporating Both Persistent Scatterer and Small Baseline Approaches. *Geophysical Research Letters*, 35.
- Hooper A, Bekaert D, Spaans K and Arikan M** (2012) Recent Advances In SAR Interferometry Time Series Analysis For Measuring Crustal Deformation. *Tectonophysics*, 514: 1-13.
- Hooper A, Segall P and Zebker H** (2007) Persistent Scatterer InSAR for Crustal Deformation Analysis, with Application to Volcán Alcedo, Galápagos. *Journal of Geophysical Research*, 112 (19).
- Hooper A, Zebker H, Segall P and Kampes B** (2004) A New Method for Measuring Deformation on Volcanoes and Other Natural Terrains Using Insar Persistent Scatterers. *Geophysical Research Letters*, 31.
- Hooper A** (2006) Persistent Scatter Radar Interferometry for Crustal Deformation Studies and Modeling of Volcanic Deformation. *Ph.D. Thesis*, Stanford University, Stanford, CA, USA, 2006.
- Hu B and Wu Y** (2018) Time-Series Displacement of Landslide In Danba County (China) Monitored By the Small Baseline Subset (SBAS) Technique. 1-14.
- Imamoglu M, Kahraman F and Abdikan S** (2018) Preliminary Results of Temporal Deformation Analysis in Istanbul Using Multi-Temporal InSAR with Sentinel-1 SAR *IGARSS 2018*.-22-27 July, Valencia, Spain, 1352-1355.
- Kampes B M** (2005) Displacement Parameter Estimation Using Permanent Scatterer Interferometry. *PhD thesis*, Delft Univ. of Technol., Delft, Netherlands, 170 p.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Kampes B M** (2006a) The Permanent Scatterer Technique. *Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique*, Dordrecht, The Netherlands:Springer-Verlag, vol. 12: 5-30.
- Kampes B M** (2006b) The stun algorithm. *Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique*, Springer: Dordrecht, The Netherlands, 43(69).
- Kampes B M, Hanssen R F and Perski Z** (2003) Radar Interferometry with Public Domain Tools, *FRINGE 2003*, 1-5 December 2003, Frascati, Italy, Volume 3.
- Kohlhase A, Feigl K and Massonnet D** (2003) Applying Differential InSAR to Orbital Dynamics: A New Approach for Estimating ERS Trajectories. *Journal of Geodesy*, 77: 493-502.
- Kuehn F, Albiol D, Cooksley G, Duro J, Granda J, Haas S, Hoffmann-Rothe A and Murdohardono D** (2010) Detection of Land Subsidence in Semarang, Indonesia, Using Stable Points Network (SPN) Technique. *Environmental Earth Sciences*, 60: 909-921.
- Kutoglu H S, Mekik C and Akcin H** (2001) A Comparison of Two Well Known Models for 7-Parameter Transformation. *The Australian Surveyor*, 47(1): 24-30.
- Lanari R, Casu F, Manzo M, Zeni G, Berardino P, Manunta M and Pepe A** (2007) *An Overview of the Small Baseline Subset Algorithm: A DInSAR Technique for Surface Deformation Analysis, Deformation and Gravity Change: Indicators of Isostasy, Tectonics, Volcanism, and Climate Change*, Springer, 637-661.
- Lanari R, Mora Sacristan Ó, Manunta M, Mallorquí Franquet J J, Berardino P and Sansoti E** (2004) A Small-Baseline Approach for Investigating Deformations on Full Resolution Differential SAR Interferograms, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 42 (7): 1377–1386.
- Lazecký M** (2011) Monitoring of Terrain Relief Changes using Synthetic Aperture Radar Interferometry: Application of SAR Interferometry Techniques in a Specific Undermined Ostrava-Karviná District. *PhD thesis*, Ostrava.
- Li Z, Muller J P, Cross P and Fielding E J** (2005) Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) Atmospheric Correction: GNSS, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), and InSAR integration. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110.
- Lindsey E O, Natsuaki R, Xu X, Shimada M, Hashimoto M, Melgar D and Sandwell D T** (2015) Line-of-Sight Displacement from ALOS-2 Interferometry: Mw 7.8 Gorkha Earthquake and Mw 7.3 Aftershock. *Geophysical Research Letters*, 42(16): 6655-6661.
- Lippl S, Vijay S and Braun M** (2018) Automatic Delineation of Debris-Covered Glaciers Using Insar Coherence Derived from X-, C-and L-band Radar Data: a Case Study of Yazgyl Glacier. *Journal of Glaciology*, 1-11.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Maktav D, Sunar F, Taberner M and Akgün H** (2000) Monitoring Urban Expansion in the Büyükçekmece District of Istanbul Using Satellite Data. *Proceedings of the ISPRS, Amsterdam, Holland*, 1484-1492.
- Malet J P, Maquaire O and Calais E** (2002) The Use of Global Positioning System Techniques for the Continuous Monitoring of Landslides: Application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Geomorphology*, 43: 33-54.
- Massonnet D and Feigl K L** (1995) Discrimination of Geophysical Phenomena in Satellite Radar Interferograms. *Geophysical Research Letters*, 22: 1537-1540.
- Massonnet D and Feigl K L** (1998) Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of Geophysics*, 36: 441-500.
- Meisina C, Zucca F, Fossati D, Ceriani M and Allievi J** (2006) Ground Deformation Monitoring by Using the Permanent Scatterers Technique: the Example of the Oltrepo Pavese (Lombardia, Italy). *Engineering Geology*, 88: 240-259.
- Meral Ozel N, Necmioglu Ö, Ergintav S, Ozel O, Favali P, Bigarre P, Çakir Z, Ozeren S, Geli L and Douglas J** (2016) New Directions in Seismic Hazard Assessment Through Focused Earth Observation in the MARmara SuperSITE-Project Achievements, *EGU General Assembly 2017*, 23–28 April 2017, Vienna, Austria, Volume 18, 15122 p.
- Meyer F J** (2011) Performance Requirements for Ionospheric Correction of Low-Frequency SAR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49: 3694-3702.
- Mirzaee S, Motagh M and Akbari B** (2017) Landslide Monitoring Using InSAR Time-Series and GNSS Observations, Case Study: Shabkola Landslide in Northern Iran. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences-ISPRS Archives 42 (2017), Nr. 1W1*, 42: 487-492.
- Natsuaki R, Nagai H, Motohka T, Ohki M, Watanabe M, Thapa R B, Tadono Y, Shimada M and Suzuki S** (2016) SAR Interferometry Using ALOS-2 PALSAR-2 Data for the Mw 7.8 Gorkha, Nepal Earthquake. *Earth, Planets and Space*, 68(1): 15.
- Nengwu M, Weiyan C, Shuangping L, Min Z, Ping H, Zonghuang J, Wenhao W and Tao L** (2012) Landslide Monitoring by PS-InSAR Along Qing River, in *Proceedings Earth Observation and Remote Sensing Applications (EORSA), 2012 Second International Workshop on 2012*, IEEE, 235-239.
- Neri M, Sansosti E, Casu F, Leonardi A, Pepe A, Pepe S and Solaro G** (2015) Geological and InSAR Surveys Highlight Tectonic Hazard in Densely Inhabited Areas on the Lower Southeastern Flank of Mount Etna Volcano, Italy, in *Proceedings EGU General Assembly Conference Abstracts 2015*, Volume 17.
- Osmanoğlu B, Sunar F, Wdowinski S and Cabral-Cano E** (2016) Time Series Analysis of InSAR Data: Methods and Trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115: 90-102.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Öz D** (2009) Avcılar Heyelan Bölgesindeki Deformasyonların Kinematik Modellerle Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 101 s.
- Özdemir A** (2016) 23 Ekim 2011 Van Depreminin Yakın Alan Deprem Anı Deformasyonlarının GNSS ile Belirlenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul, 87 s.
- Özgül N, Özcan İ, Akmeşe İ, Üner K, Bilgin İ, Korkmaz R, Yıldırım Ü, Yıldız Z, Akdağ Ö and Tekin M** (2011) İstanbul İl Alanının Jeolojisi. *İstanbul Büyükşehir Belediyesi*, 308 s.
- Perissin D and Wang T** (2012) Repeat-pass SAR Interferometry with Partially Coherent Targets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50: 271-280.
- Qiu D, Wang L, Luo D, Huang H, Ye Q and Zhang Y** (2018) Landslide Monitoring Analysis of Single-Frequency BDS/GNSS Combined Positioning with Constraints on Deformation Characteristics. *Survey Review*, 1-9.
- Rodríguez E, Morris C, Belz J, Chapin E, Martin J, Daffer W and Hensley S** (2005) An assessment of the SRTM topographic products. *Tech. Rep. D-31639*, Jet Propul. Lab., Pasadena, California.
- Rosen P A, Hensley S, Peltzer G and Simons M** (2004) Updated repeat Orbit Interferometry Package Released. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 85: 47-47.
- Rosi A, Tofani V, Tanteri L, Stefanelli C T, Agostini A, Catani F and Casagli N** (2018) The New Landslide Inventory of Tuscany (Italy) Updated with PS-InSAR: Geomorphological Features and Landslide Distribution. *Landslides*, 15: 5-19.
- Ryder I, Parsons B, Wright T J and Funning G J** (2007) Post-Seismic Motion Following the 1997 Manyi (Tibet) Earthquake: InSAR Observations and Modelling. *Geophysical Journal International*, 169: 1009-1027.
- Sandwell D T and Price E J** (1998) Phase Gradient Approach to Stacking Interferograms. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103: 30183-30204.
- Scharroo R and Visser P** (1998) Precise Orbit Determination and Gravity Field Improvement for the ERS Satellites. *Journal Of Geophysical Research: Oceans*, 103: 8113-8127.
- Schmidt D A and Bürgmann R** (2003) Time-Dependent Land Uplift and Subsidence in The Santa Clara Valley, California, from a Large Interferometric Synthetic Aperture Radar Data Set. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108.
- Simons M, Fialko Y and Rivera L** (2002) Coseismic Deformation from the 1999 Mw 7.1 Hector Mine, California, Earthquake as Inferred from InSAR and GNSS Observations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92: 1390-1402.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Soergel U** (2010) *Review of Radar Remote Sensing on Urban Areas*, Radar Remote Sensing of Urban Areas, Springer, 1-47.
- Susaki J, Maeda N and Akatsuka S** (2017) Estimation of phase delay due to precipitable water for DInSAR-based land deformation monitoring. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (2017), IV-2/W4: 477-484
- Dai K, Liu G, Li Z, Li T, Yu B, Wang X and Singleton A** (2015) Extracting Vertical Displacement Rates in Shanghai (China) with Multi-Platform SAR Images. *Remote Sensing*, 7 (8): 9542-9562.
- Tarayre H and Massonnet D** (1996) Atmospheric Propagation Heterogeneities Revealed by ERS-1 Interferometry. *Geophysical Research Letters*, 23: 989-992.
- Tofani V, Raspini F, Catani F and Casagli N** (2013) Persistent Scatterer Interferometry (PSI) Technique for Landslide Characterization and Monitoring. *Remote Sensing*, 5: 1045-1065.
- Trouvé E, Vasile G, Gay M, Bombrun L, Grussenmeyer P, Landes T, Bolon P, Petillot I, Nicolas J-M and Julea A** (2007) Combining Airborne Photographs and Spaceborne SAR Data to Monitor Temperate Glaciers, Potentials and Limits. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45: 905-924.
- Ulaby F, Moore R and Fung A** (1982) *Microwave Remote Sensing, Active and Passive, Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory*, Adison, Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Massachusetts, 2 (9).
- Van der Kooij M, Hughes W, Sato S and Poncos V** (2005) Coherent Target Monitoring at High Spatial Density: Examples of Validation Results. *ESA Fringe 2005*, Workshop, ESA, Frascati, Italy, 28 November–2 December 2005.
- Varnes D J** (1978) Slope movement types and processes. In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.). *Transportation and Road Research Board*, National Academy of Science, Washington D. C., 11-33.
- Walter T, Manzo M, Manconi A, Solaro G, Lanari R, Motagh M, Woith H, Parolai S, Shirzaei M and Zschau J** (2010) Satellite Monitoring of Hazards: A Focus on Istanbul, Turkey. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 91: 313-314.
- Wei M and Sandwell D T** (2010) Decorrelation of L-band and C-band Interferometry over Vegetated Areas in California. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48: 2942-2952.
- Werner C, Wegmuller U, Strozzi T and Wiesmann A** (2003) Interferometric Point Target Analysis for Deformation Mapping, in *Proceedings Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS'03. Proceedings*. Volume 7, 4362-4364.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Wright T J, Parsons B E and Lu Z** (2004) Toward Mapping Surface Deformation in Three Dimensions using Insar. *Geophysical Research Letters*, 31.
- Yang M, Yang T, Zhang L, Lin J, Qin X and Liao M** (2018) Spatio-Temporal Characterization of a Reclamation Settlement in the Shanghai Coastal Area with Time Series Analyses of X-, C-, and L-Band SAR Datasets. *Remote Sensing*, 10(2).
- Yildirim M and Savaşkan E** (2003) A New Approach to the Stratigraphy of the Tertiary Sedimentary Formations in Istanbul and Their Engineering Properties, in *Proceedings of National Symposium on Istanbul's Geology*. Kadir Has University, Cibali-Istanbul 2003, 87-102.
- Yue L, Shen H, Zhang L, Zheng X, Zhang F ve Yuan Q** (2017) High-Quality Seamless DEM Generation Blending SRTM-1, ASTER GDEM V2 and ICESat/GLAS Observations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 123: 20-34.
- Yurtsever A and Çağlayan A** (2002) *Geological Maps of Turkey, 1/100 000 Scale, Istanbul F21 and G21 Sheet and Explanatory Text*. Ankara: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara, 30 p.
- Zebker H A and Goldstein R M** (1986) Topographic Mapping from Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91: 4993-4999.
- Zebker H A, Rosen P A, Goldstein R M, Gabriel A and Werner C L** (1994) On the Derivation of Coseismic Displacement Fields using Differential Radar Interferometry: The Landers Earthquake. *Journal Of Geophysical Research: Solid Earth*, 99: 19617-19634.
- Zebker H A, Rosen P A and Hensley S** (1997) Atmospheric Effects in Interferometric Synthetic Aperture Radar Surface Deformation and Topographic Maps. *Journal Of Geophysical Research: Solid Earth*, 102: 7547-7563.
- Zebker H A and Villasenor J** (1992) Decorrelation in Interferometric Radar Echoes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30: 950-959.
- URL-1** <<https://www.idahogeology.org/landslide-hazards>>, Ziyaret Tarihi: 17.12.2018.
- URL-2** <[http:// http://copernicus.eu/main/sentinels](http://http://copernicus.eu/main/sentinels)>, Ziyaret Tarihi: 30.08.2018.
- URL-3** <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides>>, Ziyaret Tarihi: 30.08.2018.
- URL-4** <<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/>>, Ziyaret Tarihi: 11.09.2018.
- URL-5** <<http://en.alos-pasco.com/alos-2/palsar-2/>>, Ziyaret Tarihi: 11.09.2018.
- URL-6** <<http://standards.sedris.org/18026/text/ISOIEC>>, Ziyaret Tarihi: 29.11.2018.

EK AÇIKLAMALAR

EK A: Haritalar

Çizelge A.1 Sentinel-1 Yükselen yörünge Master görüntü ve veri kümesi bilgileri.

No	Gün	B _⊥ (m)	σ _{gür.} (°)	No	Gün	B _⊥ (m)	σ _{gür.} (°)
1	01-Jan-2015	46	58,010	36	20-Mar-2016	48	34,066
2	13-Jan-2015	31	54,854	37	01-Apr-2016	0	35,529
3	25-Jan-2015	3	53,293	38	13-Apr-2016	-1	34,523
4	06-Feb-2015	110	53,591	39	25-Apr-2016	87	33,510
5	02-Mar-2015	51	51,998	40	07-May-2016	77	32,905
6	14-Mar-2015	-20	56,918	41	31-May-2016	56	33,054
7	26-Mar-2015	79	49,729	42	12-Jun-2016	12	33,258
8	07-Apr-2015	151	51,496	43	06-Jul-2016	86	32,215
9	19-Apr-2015	99	49,210	44	18-Jul-2016	127	31,049
10	13-May-2015	150	47,392	45	30-Jul-2016	61	35,203
11	25-May-2015	-39	47,090	46	11-Aug-2016	65	34,600
12	06-Jun-2015	5	46,635	47	23-Aug-2016	9	32,199
13	18-Jun-2015	112	47,591	48	04-Sep-2016	148	34,420
14	30-Jun-2015	-4	46,346	49	16-Sep-2016	133	32,437
15	12-Jul-2015	65	45,953	50	28-Sep-2016	87	29,041
16	24-Jul-2015	-33	44,389	51	04-Oct-2016	100	28,264
17	05-Aug-2015	-5	44,351	52	10-Oct-2016	4	27,887
18	17-Aug-2015	53	44,443	53	16-Oct-2016	137	29,634
19	29-Aug-2015	109	42,846	54	22-Oct-2016	-22	26,974
20	10-Sep-2015	55	41,848	55	28-Oct-2016	78	27,254
21	22-Sep-2015	1	40,892	56	03-Nov-2016	48	26,262
22	04-Oct-2015	-18	39,611	57	09-Nov-2016	3	26,700
23	16-Oct-2015	54	37,912	58	15-Nov-2016	88	27,984
24	28-Oct-2015	172	40,001	59	21-Nov-2016	10	26,904
25	09-Nov-2015	148	38,957	60	27-Nov-2016	81	27,967
26	21-Nov-2015	33	36,563	61	03-Dec-2016	16	25,496
27	03-Dec-2015	14	36,370	62	09-Dec-2016	14	25,773
28	15-Dec-2015	41	35,280	63	15-Dec-2016	68	26,384
29	27-Dec-2015	49	35,613	64	21-Dec-2016	-13	27,285
30	08-Jan-2016	107	38,695	65	27-Dec-2016	78	27,363
31	20-Jan-2016	57	54,746	66	02-Jan-2017	13	34,582
32	01-Feb-2016	42	35,228	67	08-Jan-2017	41	73,151
33	13-Feb-2016	24	35,681	68	14-Jan-2017	53	33,938
34	25-Feb-2016	53	35,422	69	20-Jan-2017	7	31,160
35	08-Mar-2016	96	34,750	70	26-Jan-2017	61	32,509

Çizelge A.1 (devam ediyor)

No	Gün	B_⊥ (m)	σ_{gür.} (°)	No	Gün	B_⊥ (m)	σ_{gür.} (°)
71	01-Feb-2017	24	27,247	110	23-Sep-2017	81	25,733
72	07-Feb-2017	66	25,456	111	29-Sep-2017	-47	28,163
73	13-Feb-2017	37	29,746	112	05-Oct-2017	122	25,929
74	19-Feb-2017	20	25,018	113	11-Oct-2017	-35	27,463
75	25-Feb-2017	77	29,754	114	17-Oct-2017	91	25,518
76	03-Mar-2017	62	26,801	115	23-Oct-2017	16	25,120
77	09-Mar-2017	83	31,145	116	29-Oct-2017	-33	27,719
78	15-Mar-2017	27	26,492	117	04-Nov-2017	104	26,348
79	21-Mar-2017	31	25,587	118	10-Nov-2017	17	24,411
80	27-Mar-2017	89	26,992	119	16-Nov-2017	86	24,918
81	02-Apr-2017	0	26,443	120	22-Nov-2017	10	28,665
82	08-Apr-2017	28	27,568	121	28-Nov-2017	-4	24,899
83	14-Apr-2017	46	26,924	122	04-Dec-2017	157	31,556
84	20-Apr-2017	-10	37,141	123	10-Dec-2017	-11	26,970
85	26-Apr-2017	130	26,423	124	16-Dec-2017	131	29,998
86	02-May-2017	3	26,572	125	22-Dec-2017	28	33,619
87	08-May-2017	57	28,894	126	28-Dec-2017	104	26,657
88	14-May-2017	32	27,105	127	03-Jan-2018	99	29,096
89	20-May-2017	18	26,649	128	09-Jan-2018	19	26,601
90	26-May-2017	139	25,154	129	15-Jan-2018	86	25,077
91	01-Jun-2017	84	25,094	130	21-Jan-2018	5	30,866
92	07-Jun-2017	73	25,975	131	27-Jan-2018	61	25,593
93	13-Jun-2017	56	27,484	132	08-Feb-2018	19	28,854
94	19-Jun-2017	36	24,585	133	14-Feb-2018	76	30,652
95	25-Jun-2017	161	25,824	134	20-Feb-2018	22	26,351
96	01-Jul-2017	56	28,770	135	26-Feb-2018	38	28,971
97	07-Jul-2017	155	31,225	136	04-Mar-2018	23	35,118
98	13-Jul-2017	77	26,824	137	10-Mar-2018	47	26,500
99	19-Jul-2017	28	31,982	138	16-Mar-2018	90	25,397
100	25-Jul-2017	106	25,974	139	22-Mar-2018	72	27,661
101	31-Jul-2017	59	32,826	140	28-Mar-2018	110	26,872
102	06-Aug-2017	114	29,531	141	03-Apr-2018	101	26,596
103	12-Aug-2017	55	30,879	142	09-Apr-2018	11	27,782
104	18-Aug-2017	41	33,003	143	15-Apr-2018	95	26,724
105	24-Aug-2017	160	29,817	144	21-Apr-2018	82	27,959
106	30-Aug-2017	40	26,659	145	27-Apr-2018	110	27,416
107	05-Sep-2017	178	26,584	146	03-May-2018	91	27,387
108	11-Sep-2017	28	27,397	147	15-May-2018	126	27,434
109	17-Sep-2017	45	27,356	148	21-May-2018	29	30,131

Çizelge A.1 (devam ediyor)

No	Gün	B _⊥ (m)	σ _{gür.} (°)	No	Gün	B _⊥ (m)	σ _{gür.} (°)
149	27-May-2018	91	29,332	162	19-Aug-2018	-10	41,106
150	02-Jun-2018	99	29,734	163	25-Aug-2018	96	34,774
151	08-Jun-2018	59	30,582	164	31-Aug-2018	112	40,885
152	14-Jun-2018	111	29,909	165	06-Sep-2018	25	35,253
153	20-Jun-2018	70	35,914	166	12-Sep-2018	101	32,472
154	26-Jun-2018	131	30,994	167	18-Sep-2018	21	32,559
155	02-Jul-2018	46	32,513	168	24-Sep-2018	170	31,904
156	08-Jul-2018	94	31,157	169	30-Sep-2018	43	32,271
157	14-Jul-2018	173	40,135	170	06-Oct-2018	32	31,651
158	20-Jul-2018	18	34,084	171	12-Oct-2018	37	33,259
159	01-Aug-2018	93	33,547	172	18-Oct-2018	-21	32,745
160	07-Aug-2018	176	37,458	173	24-Oct-2018	144	32,579
161	13-Aug-2018	122	35,809	174	30-Oct-2018	-58	35,364

Çizelge A.2 Sentinel-1 Alçalan yörünge Master görüntü ve veri kümesi bilgileri.

No	Gün	B _⊥ (m)	σ _{gür.} (°)	No	Gün	B _⊥ (m)	σ _{gür.} (°)
1	01-Mar-2015	-29	54,330	22	26-Dec-2015	58	38,065
2	13-Mar-2015	-94	53,870	23	07-Jan-2016	-23	38,371
3	25-Mar-2015	-95	53,944	24	19-Jan-2016	-60	73,476
4	06-Apr-2015	19	51,989	25	31-Jan-2016	-82	36,138
5	18-Apr-2015	14	52,008	26	12-Feb-2016	-49	38,464
6	30-Apr-2015	54	52,330	27	24-Feb-2016	47	35,269
7	12-May-2015	-32	48,121	28	07-Mar-2016	58	36,354
8	24-May-2015	-47	48,679	29	19-Mar-2016	15	37,046
9	17-Jun-2015	55	47,997	30	31-Mar-2016	-31	36,426
10	11-Jul-2015	-73	45,669	31	12-Apr-2016	-29	35,140
11	23-Jul-2015	-8	45,202	32	24-Apr-2016	50	33,759
12	16-Aug-2015	54	44,542	33	06-May-2016	37	37,657
13	28-Aug-2015	94	42,094	34	18-May-2016	2	32,458
14	09-Sep-2015	21	42,278	35	30-May-2016	6	32,043
15	21-Sep-2015	-17	40,568	36	11-Jun-2016	-11	31,339
16	03-Oct-2015	-19	40,380	37	17-Jul-2016	1	31,942
17	15-Oct-2015	41	40,564	38	29-Jul-2016	-49	31,652
18	27-Oct-2015	27	39,394	39	10-Aug-2016	-48	31,992
19	20-Nov-2015	-69	38,751	40	22-Aug-2016	19	32,686
20	02-Dec-2015	-33	39,975	41	03-Sep-2016	-15	31,292
21	14-Dec-2015	42	37,892	42	15-Sep-2016	5	28,739

Çizelge A.2 (devam ediyor)

No	Gün	B _⊥ (m)	σ _{gür.} (°)	No	Gün	B _⊥ (m)	σ _{gür.} (°)
43	27-Sep-2016	32	28,021	82	19-May-2017	9	24,714
44	03-Oct-2016	45	28,559	83	31-May-2017	-130	29,092
45	09-Oct-2016	-13	26,960	84	06-Jun-2017	52	25,666
46	15-Oct-2016	11	27,227	85	12-Jun-2017	57	26,154
47	21-Oct-2016	-74	27,010	86	18-Jun-2017	-13	25,773
48	27-Oct-2016	-11	26,344	87	24-Jun-2017	37	26,232
49	02-Nov-2016	35	26,624	88	30-Jun-2017	-30	28,936
50	08-Nov-2016	-19	26,954	89	06-Jul-2017	-29	25,914
51	14-Nov-2016	17	28,087	90	12-Jul-2017	19	25,324
52	20-Nov-2016	-91	27,779	91	18-Jul-2017	8	28,277
53	26-Nov-2016	3	26,185	92	24-Jul-2017	16	25,503
54	02-Dec-2016	36	27,643	93	30-Jul-2017	-7	27,010
55	08-Dec-2016	-56	26,366	94	05-Aug-2017	71	26,653
56	14-Dec-2016	57	27,855	95	11-Aug-2017	21	26,964
57	20-Dec-2016	-28	26,136	96	17-Aug-2017	-16	29,201
58	26-Dec-2016	27	25,892	97	23-Aug-2017	-23	25,653
59	01-Jan-2017	59	44,818	98	29-Aug-2017	-16	24,410
60	07-Jan-2017	-69	74,354	99	04-Sep-2017	8	25,710
61	13-Jan-2017	59	36,877	100	10-Sep-2017	9	26,985
62	19-Jan-2017	-100	33,011	101	16-Sep-2017	42	29,196
63	25-Jan-2017	-1	29,060	102	22-Sep-2017	37	29,889
64	31-Jan-2017	-33	27,747	103	28-Sep-2017	-12	25,981
65	06-Feb-2017	-33	30,725	104	04-Oct-2017	2	23,589
66	12-Feb-2017	76	29,304	105	10-Oct-2017	-23	24,188
67	18-Feb-2017	-83	27,999	106	16-Oct-2017	-32	23,647
68	24-Feb-2017	40	25,530	107	22-Oct-2017	30	25,629
69	02-Mar-2017	-84	28,882	108	28-Oct-2017	-22	24,528
70	08-Mar-2017	-56	26,969	109	03-Nov-2017	53	25,065
71	14-Mar-2017	70	30,749	110	09-Nov-2017	-56	23,929
72	20-Mar-2017	-62	29,422	111	15-Nov-2017	-8	24,383
73	26-Mar-2017	57	25,869	112	21-Nov-2017	20	26,456
74	01-Apr-2017	0	28,892	113	27-Nov-2017	-54	24,174
75	07-Apr-2017	2	25,856	114	03-Dec-2017	-7	28,641
76	13-Apr-2017	17	26,177	115	09-Dec-2017	-54	24,141
77	19-Apr-2017	-22	27,833	116	15-Dec-2017	-22	23,978
78	25-Apr-2017	103	26,259	117	21-Dec-2017	30	27,517
79	01-May-2017	6	26,065	118	27-Dec-2017	-115	26,012
80	07-May-2017	59	24,779	119	02-Jan-2018	67	26,257
81	13-May-2017	70	24,582	120	08-Jan-2018	-64	25,739

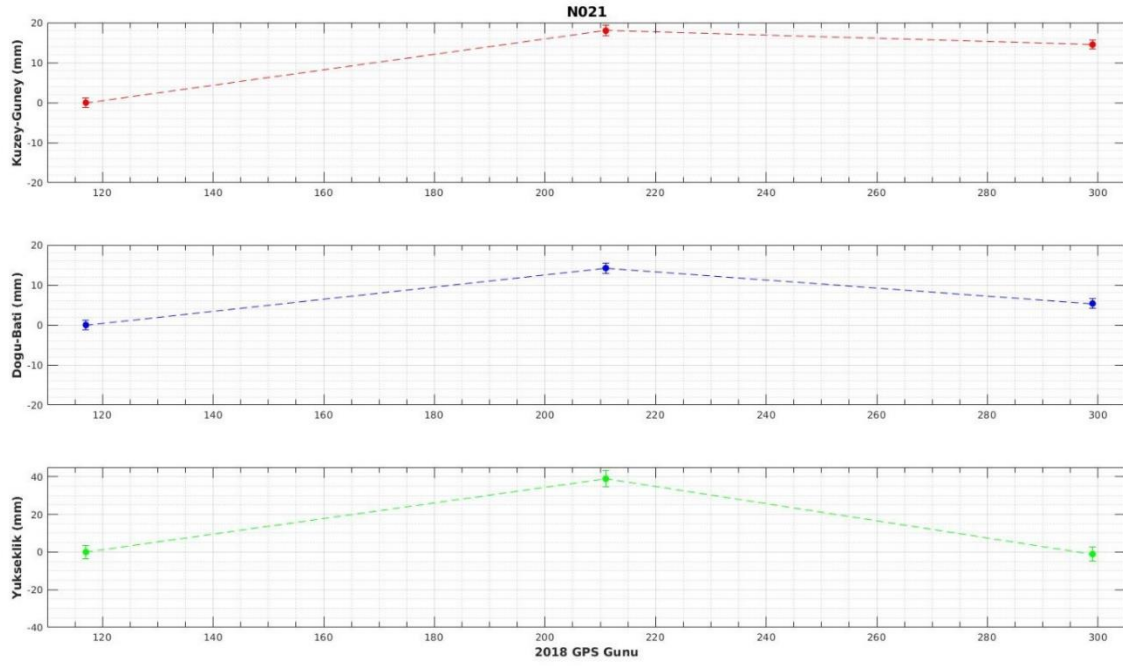
Çizelge A.2 (devam ediyor)

No	Gün	$B_{\perp}$ (m)	$\sigma_{gür.}$ (°)	No	Gün	$B_{\perp}$ (m)	$\sigma_{gür.}$ (°)
122	20-Jan-2018	29	25,723	146	13-Jun-2018	80	29,250
123	26-Jan-2018	-103	25,964	147	19-Jun-2018	-59	30,713
124	01-Feb-2018	41	29,811	148	25-Jun-2018	42	28,140
125	07-Feb-2018	-54	24,564	149	01-Jul-2018	72	30,099
126	13-Feb-2018	38	27,038	150	07-Jul-2018	-73	29,846
127	19-Feb-2018	4	24,822	151	13-Jul-2018	5	29,473
128	25-Feb-2018	-69	36,457	152	19-Jul-2018	-37	30,624
129	03-Mar-2018	53	30,207	153	25-Jul-2018	34	31,022
130	09-Mar-2018	-115	33,077	154	31-Jul-2018	-47	31,070
131	15-Mar-2018	35	25,694	155	06-Aug-2018	-118	33,065
132	21-Mar-2018	-60	29,149	156	12-Aug-2018	39	30,853
133	27-Mar-2018	-53	32,937	157	18-Aug-2018	-32	31,233
134	02-Apr-2018	42	34,316	158	24-Aug-2018	-20	30,980
135	08-Apr-2018	7	28,545	159	30-Aug-2018	-30	32,366
136	14-Apr-2018	36	28,364	160	05-Sep-2018	37	33,554
137	20-Apr-2018	-105	33,299	161	11-Sep-2018	27	30,996
138	26-Apr-2018	10	27,391	162	17-Sep-2018	-17	31,118
139	02-May-2018	65	27,370	163	23-Sep-2018	7	31,170
140	08-May-2018	1	28,790	164	29-Sep-2018	-15	29,918
141	14-May-2018	42	27,206	165	05-Oct-2018	8	30,955
142	20-May-2018	-20	27,757	166	11-Oct-2018	19	32,228
143	26-May-2018	-10	27,669	167	17-Oct-2018	-34	31,690
144	01-Jun-2018	-51	29,482	168	23-Oct-2018	-3	32,085
145	07-Jun-2018	-109	29,565	169	29-Oct-2018	31	32,386

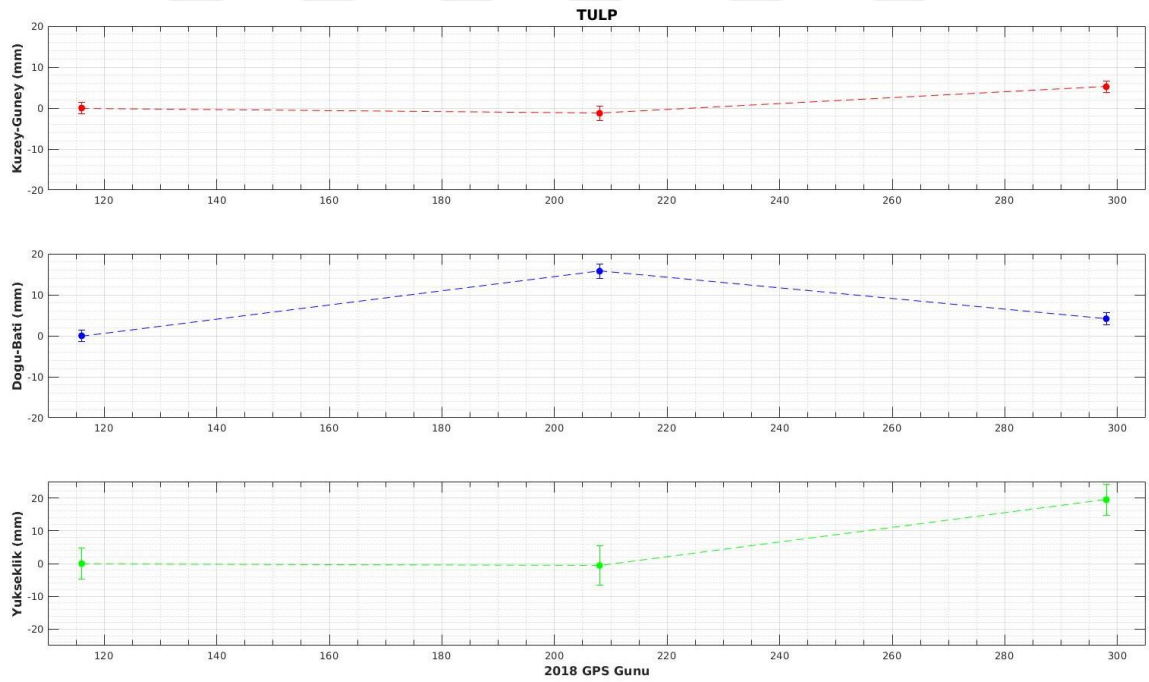
Çizelge A.3 ALOS-2 Yükselen yörünge Master görüntü ve veri kümesi bilgileri.

No	Gün	$B_{\perp}$ (m)	$\sigma_{gür.}$ (°)	No	Gün	$B_{\perp}$ (m)	$\sigma_{gür.}$ (°)
1	24-Jul-2016	-33	33,459	11	27-May-2018	-119	24,115
2	02-Oct-2016	-95	31,482	12	10-Jun-2018	0	24,368
3	16-Oct-2016	-106	30,719	13	24-Jun-2018	-91	21,146
4	19-Feb-2017	-227	31,882	14	22-Jul-2018	-41	20,924
5	23-Jul-2017	-5	26,118	15	05-Aug-2018	46	18,471
6	01-Oct-2017	-99	27,158	16	19-Aug-2018	-6	19,888
7	26-Nov-2017	-59	26,516	17	02-Sep-2018	111	20,990
8	04-Feb-2018	-227	30,818	18	30-Sep-2018	4	24,023
9	04-Mar-2018	-234	25,402	19	14-Oct-2018	9	22,114
10	15-Apr-2018	-12	26,857				

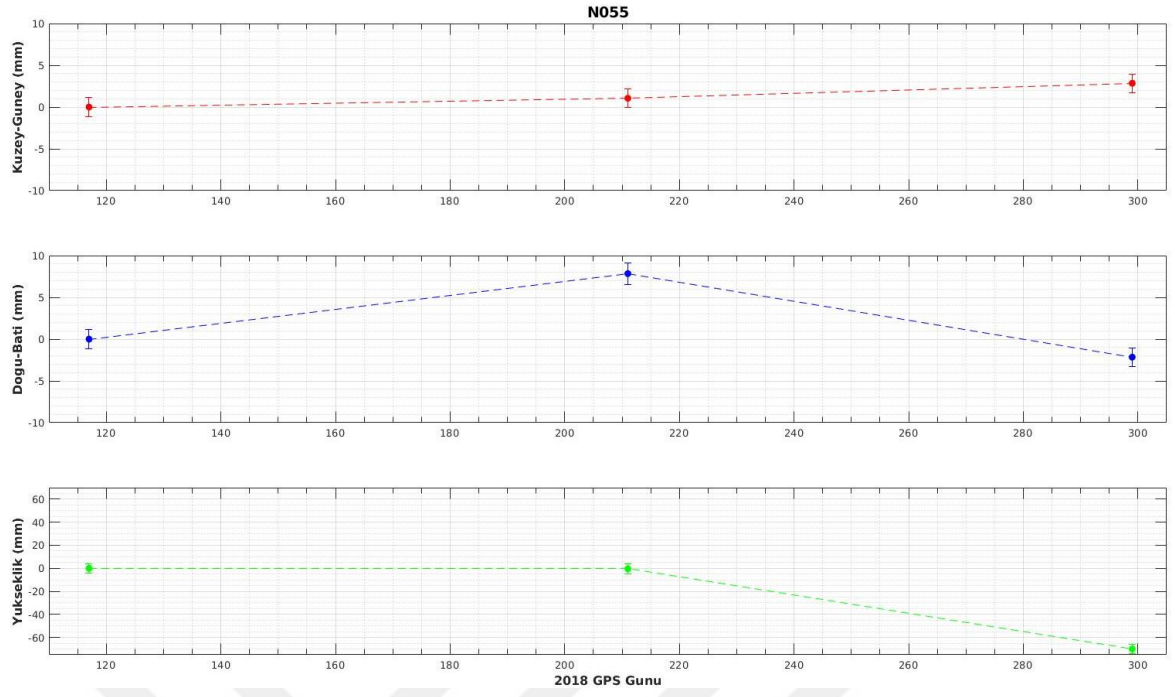
EK B: GNSS Noktalarına Ait Zaman Serileri



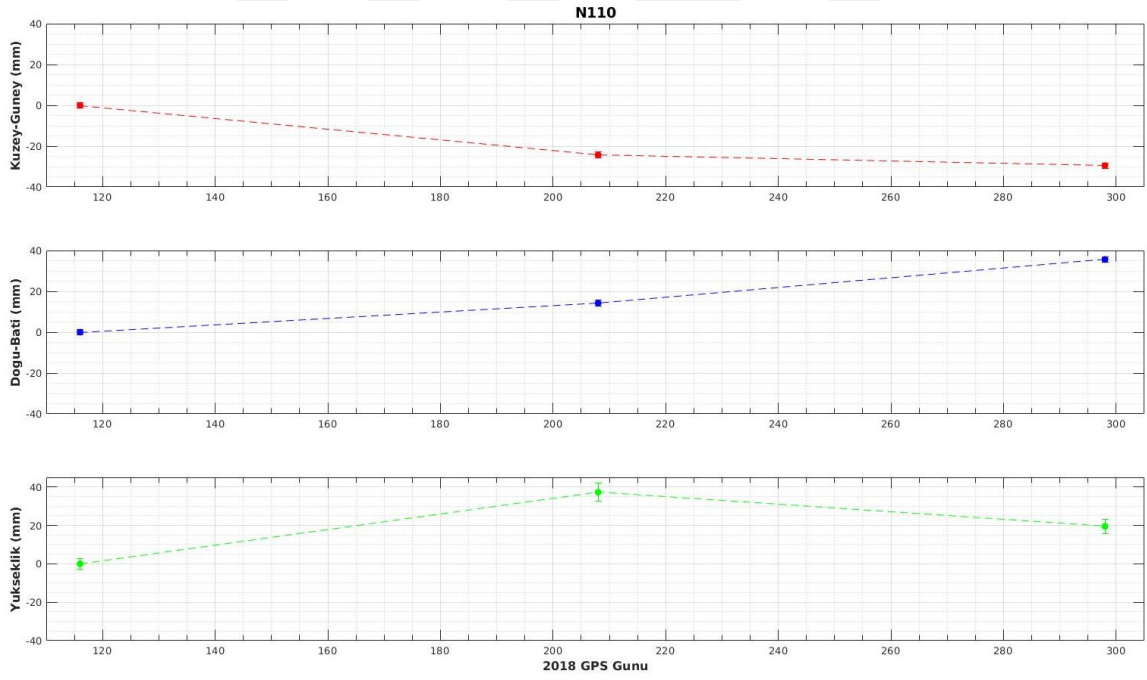
Şekil B.1 N021 noktasına ait GNSS ölçümü zaman serisi.



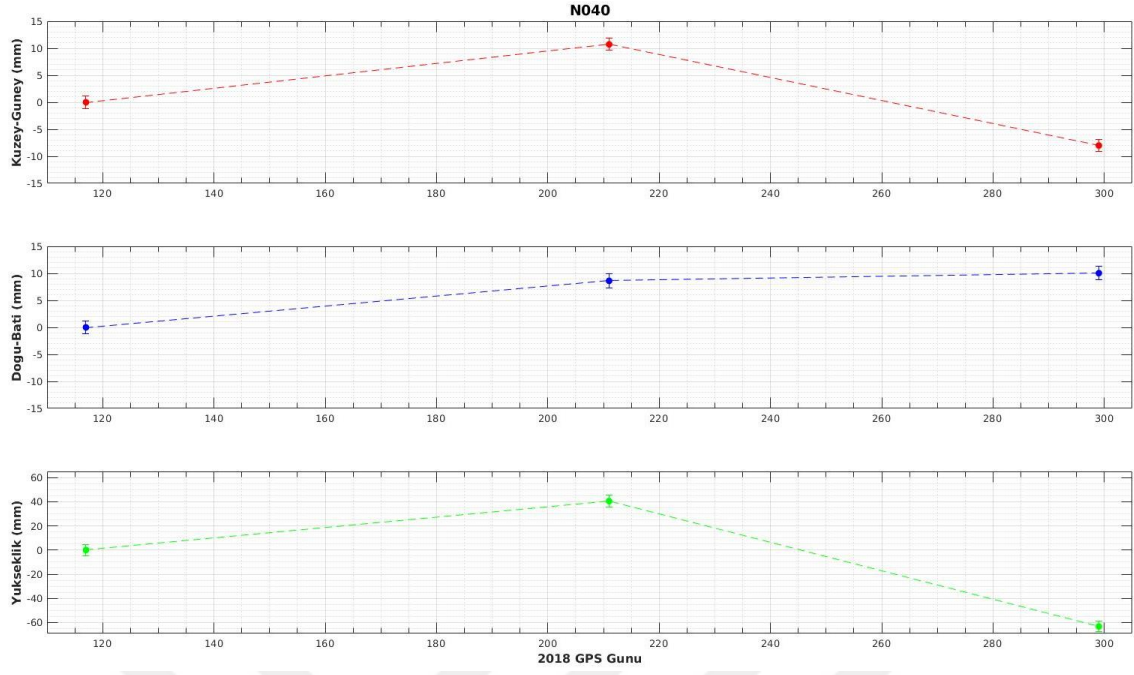
Şekil B.2 TULP noktasına ait GNSS ölçümü zaman serisi.



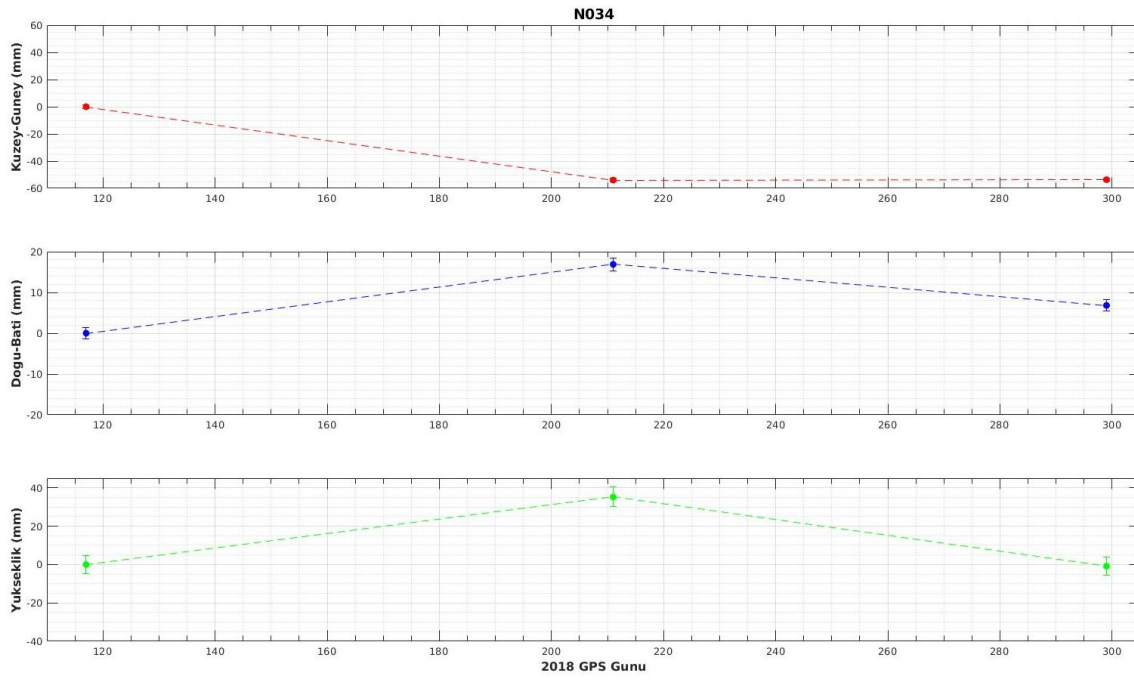
Şekil B.3 N055 noktasına ait GNSS ölçümü zaman serisi.



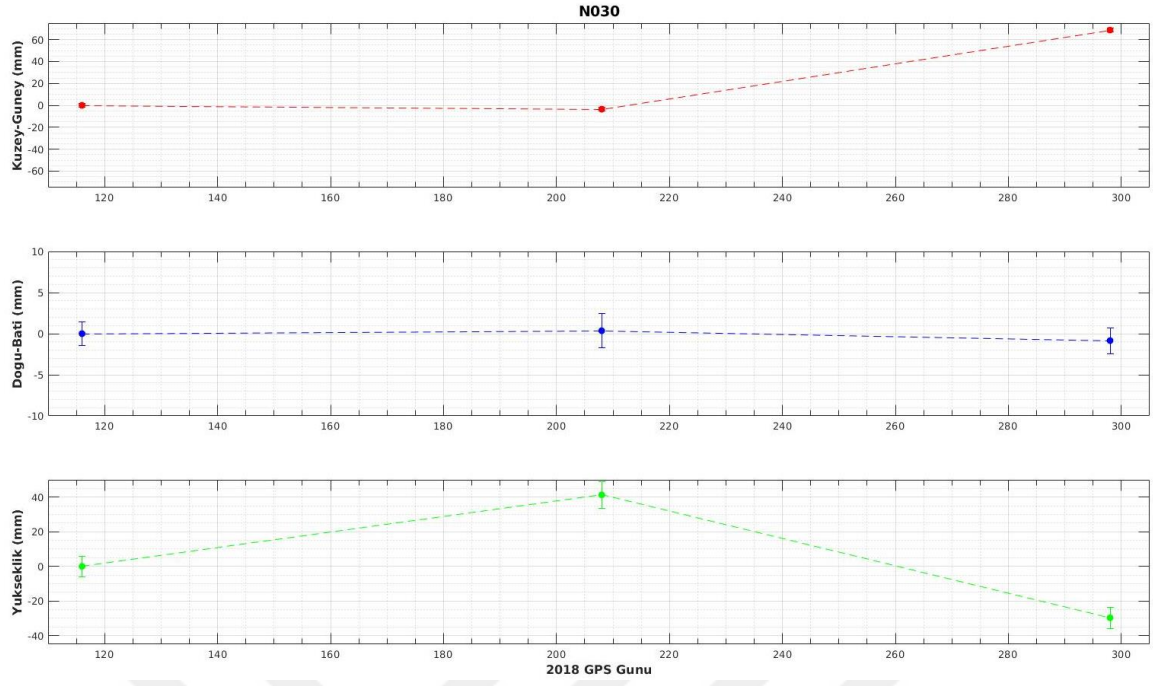
Şekil B.4 N110 noktasına ait GNSS ölçümü zaman serisi.



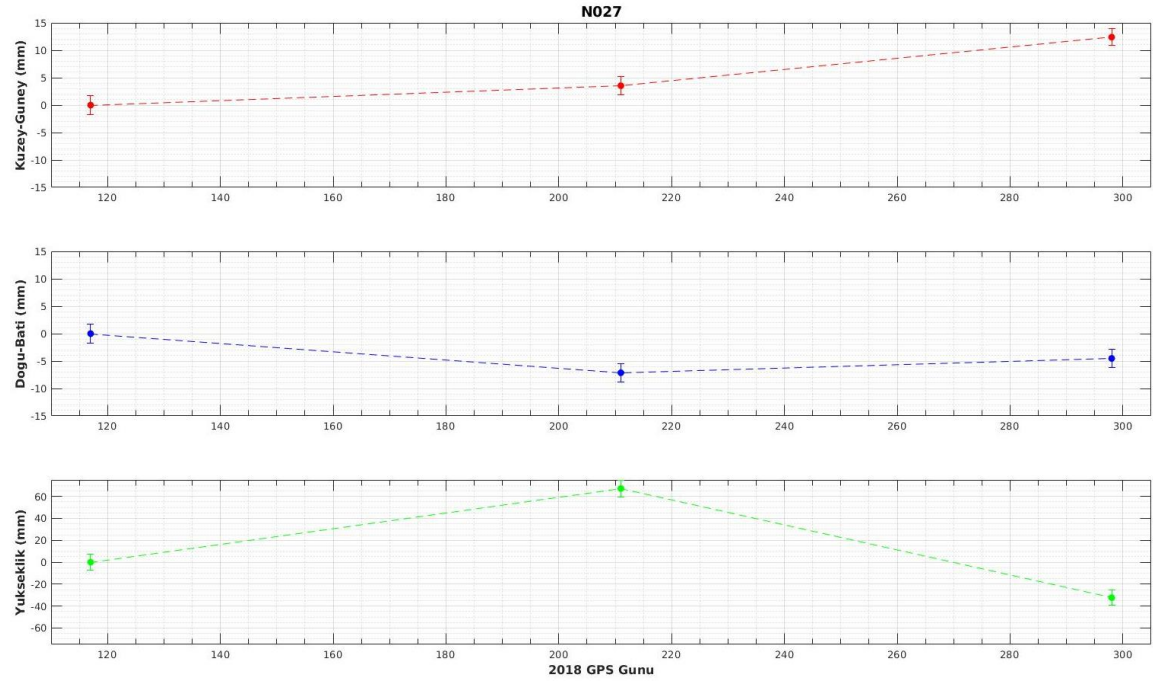
Şekil B.5 N040 noktasına ait GNSS ölçümü zaman serisi.



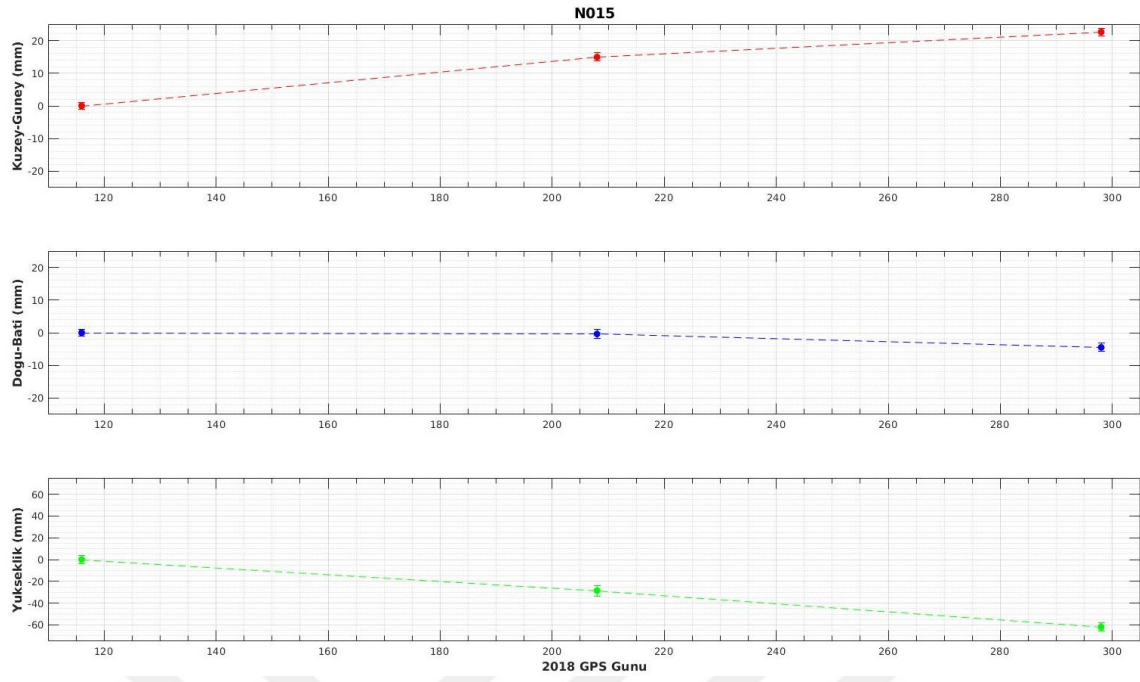
Şekil B.6 N034 noktasına ait GNSS ölçümü zaman serisi.



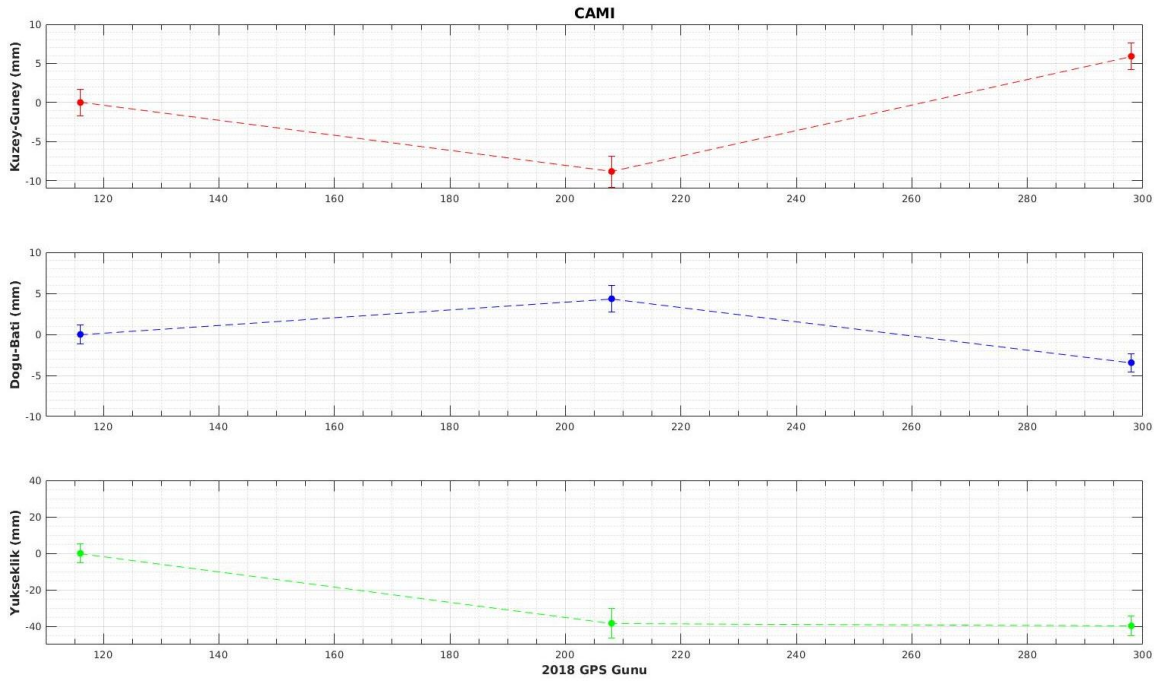
Şekil B.7 N030 noktasına ait GNSS ölçümü zaman serisi.



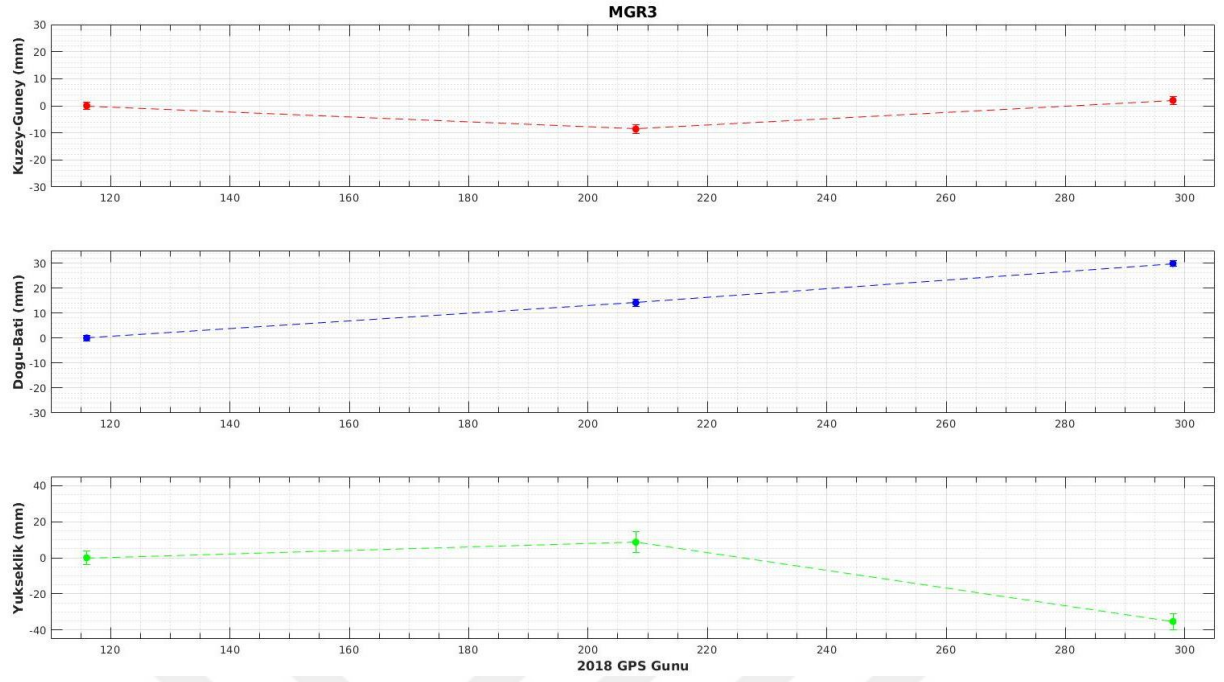
Şekil B.8 N027 noktasına ait GNSS ölçümü zaman serisi.



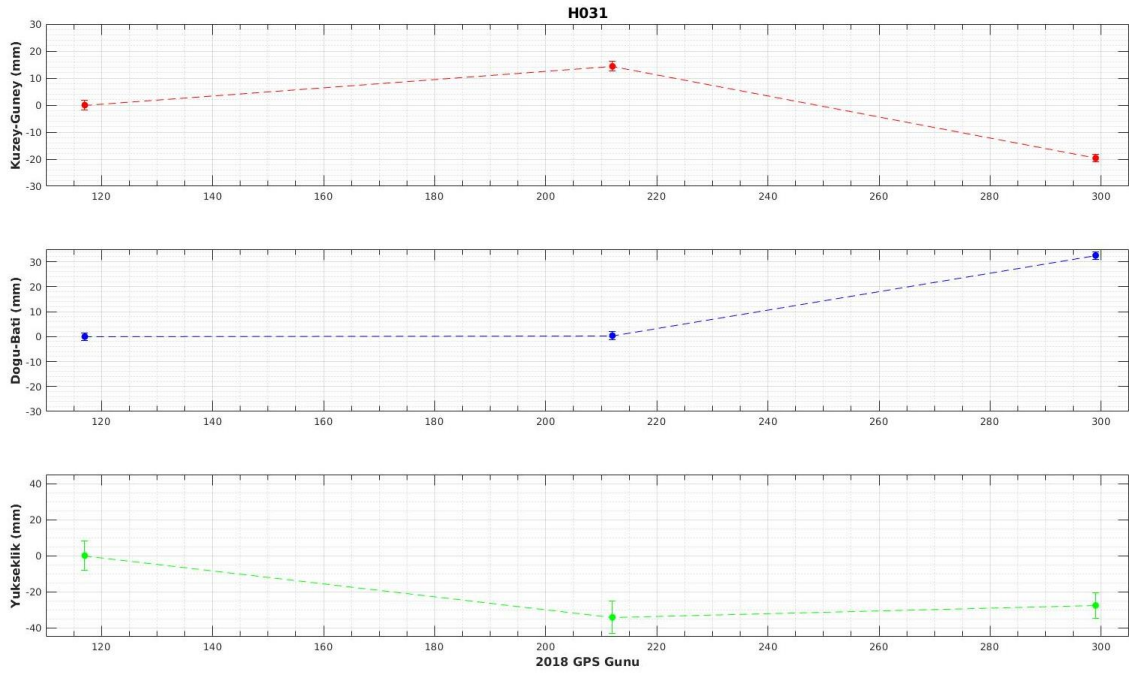
Şekil B.9 N015 noktasına ait GNSS ölçümü zaman serisi.



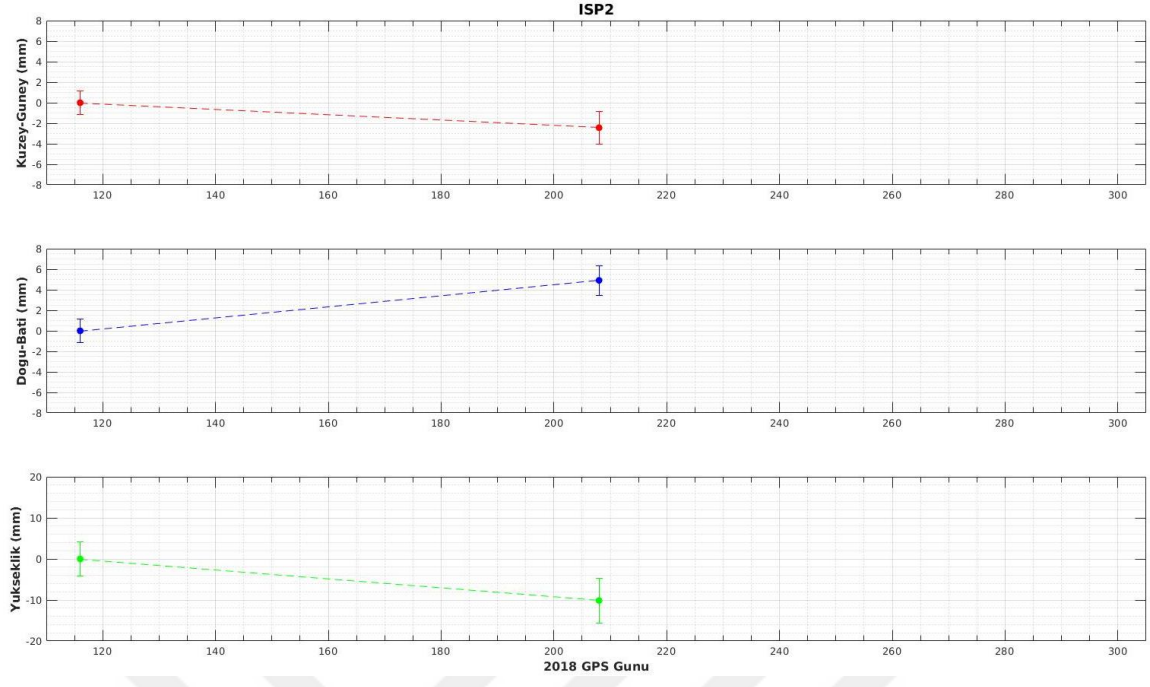
Şekil B.10 ISPT noktasına ait GNSS ölçümü zaman serisi.



Şekil B.11 MGR3 noktasına ait GNSS ölçümü zaman serisi.



Şekil B.12 H031 noktasına ait GNSS ölçümü zaman serisi.



Şekil B.13 ISPT2 noktasına ait GNSS ölçümü zaman serisi.

ÖZGEÇMİŞ

Çağlar Bayık 1986 yılında Hatay’da doğdu. Liseyi Zonguldak Atatürk Anadolu Lisesi’nde tamamlayarak 2005 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümünü’nü kazandı. 2010 yılında mezun olarak aynı yıl Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans eğitime başladı. 2012 yılında yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2012 yılında Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda doktora eğitime başladı. 2011 yılından bu yana Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Geomatik Mühendisliği Bölümü’nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.

ADRES BİLGİLERİ:

Adres: Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Geomatik Mühendisliği Bölümü, 67100.

Tel: (+90) 506 243 0550

E-posta: caglarbayik@beun.edu.tr