



**FARKLI JEODEZİK YÖNTEMLERLE BOLVADİN'DEKİ YÜZEY
DEFORMASYONLARININ İZLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Eralp GÜRLEK

Danışman

Prof. Dr. İbrahim TİRYAKİOĞLU

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2023

Bu tez çalışması 20.FEN.BİL.22 numaralı proje ile AKÜ BAP Birimi tarafından ve
115Y246 numaralı proje ile TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

**FARKLI JEODEZİK YÖNTEMLERLE BOLVADİN'DEKİ YÜZEY
DEFORMASYONLARININ İZLENMESİ**

Eralp GÜRLEK

Danışman

Prof. Dr. İbrahim TİRYAKİOĞLU

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2023

ÖZET

Doktora Tezi

FARKLI JEODEZİK YÖNTEMLERLE BOLVADİN'DEKİ YÜZEY DEFORMASYONLARININ İZLENMESİ

Eralp GÜRLEK

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İbrahim TİRYAKİOĞLU

Bu çalışmanın amacı ASFS'nin (Akşehir Simav Fay Sistemi) içinde yer alan Bolvadin Fayı'nın devamında yerleşim alanında yıkıcı deprem olmaksızın oluşmuş ve oluşmaya devam eden asismik yüzey deformasyonlarının incelenmesidir. Bunun için Bolvadin ilçesi ve çevresindeki deformasyonların belirlenmesi amacıyla GNSS (Global Navigation Satellite System), Nivelman ve SAR (Synthetic Aperture Radar) yöntemleri kullanılmıştır. Üç farklı yöntemin kullanılması sayesinde düşey deformasyonlar karşılaştırmalı olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda Bolvadin'de yüzey deformasyonlarının aktif olduğu bölgeye bir tanesi 2017 diğer iki tanesi 2020 yılında olmak üzere kesintisiz gözlem yapan 3 sabit GNSS istasyonu kurulmuştur. Ayrıca faya dik profillerden oluşan nivelman ağı kurularak bu ağda 2016-2020 yılları arasında 5 kampanya hassas nivelman ölçümü yapılmıştır. Son olarak 2016-2020 yılları arasındaki Sentinel-1 uydu görüntüleri kullanılarak bölgedeki düşey deformasyonlar elde edilmiştir.

GNSS verilerinden elde edilen sonuçlara göre bölgedeki maksimum deformasyon hızı -94 mm/yıl (BLV1 istasyonu) olarak hesaplanmıştır. Hassas Nivelman sonuçlarına göre ise bu noktaya yakın nivelman noktalarındaki maksimum deformasyon hızı -78 mm/yıl'dır. Bu nokta için InSAR verilerinden elde edilen sonuçlara göre ise deformasyon hızı -82 mm/yıl olarak hesaplanmıştır. Üç yöntemden elde edilen sonuçlar uyum içerisindedir. Buna göre tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde BLV1 GNSS

istasyonu civarında yıllık düşey deformasyon hızlarının -80 ile -90 mm olduğu görülmektedir.

2023, xvi + 142 sayfa

Anahtar Kelimeler: InSAR, GNSS, Hassas Nivelman, Düşey Deformasyon, Asismik Yüzey Deformasyonu, Bolvadin Fayı.



ABSTRACT

Ph.D. Thesis

MONITORING OF SURFACE DEFORMATIONS IN BOLVADİN BY DIFFERENT GEODETIC METHODS

Eralp GÜRLEK

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Geomatics Engineering

Supervisor: Prof. İbrahim TİRYAKİOĞLU

The aim of this study is to examine the aseismic surface deformations that were formed and continue to occur in the settlement area without destructive earthquakes in the continuation of the Bovadin Fault, which is included in the ASFS (Akşehir Simav Fault System). For this, GNSS (Global Navigation Satellite System), Leveling and SAR (Synthetic Aperture Radar) methods were used to determine the deformations in and around Bolvadin district. Vertical deformations were determined comparatively by using three different methods. In this context, 3 continuous GNSS stations, one in 2017 and two in 2020, were established in the region where surface deformations are active in Bolvadin. In addition, a leveling network consisting of profiles perpendicular to the fault was established and 5 campaign precision leveling measurements were carried out in this network between 2016-2020. Finally, vertical deformations in the region were also obtained by using Sentinel-1 satellite images between the years 2016-2020.

According to the results obtained from the GNSS data, the maximum deformation rate in the region was calculated as -94 mm/yr (BLV1 station). Additionally, the precision leveling results shows the maximum deformation rate at the leveling points close to BLV1 GNSS station is -78 mm/yr. Consistent with the GNSS and Leveling results, the deformation rate was calculated as -82 mm/yr according to the results obtained from the InSAR data. All results obtained from the three methods are compaitable. Accordingly,

when all the results are evaluated, it is seen that the annual vertical deformation rates around the BLV1 GNSS station are -80 to -90 mm.

2023, xvi + 142 pages

Keywords: InSAR, GNSS, Precision Leveling, Vertical Deformation, Aseismic Surface Deformation, Bolvadin Fault.



TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusunun seçiminde, deneysel çalışmaların yönlendirilmesinde, sonuçların değerlendirilmesinde ve yazımı aşamasında yapmış olduğu değerli katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Prof. Dr. İbrahim TİRYAKİOĞLU'na, araştırma ve geliştirme süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Fatih POYRAZ'a, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim. Bu tez çalışmasını 20.FEN.BİL.22 numaralı proje ile destekleyen AKÜ BAP Birimine ve 115Y246 numaralı proje ile destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı eşime ve aileme teşekkür ederim.

Eralp GÜRLEK
Afyonkarahisar 2023

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xv
RESİMLER DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 Jeolojik Literatür.....	3
2.2 Jeodezik Literatür	4
2.2.1 GNSS.....	4
2.2.2 Hassas Nivelman.....	11
2.2.3 InSAR.....	14
3. BÖLGENİN TEKTONİĞİ	22
3.1 Afyon-Akşehir Grabeni	22
3.2 Depremsellik.....	23
3.3 Fay Yapısı	27
3.4 Bolvadin Yüzey Deformasyonları	27
4. ZAMAN SERİSİ ANALİZİ ve FİLTRELEME.....	33
4.1 Zaman Serisi	33
4.2 Stokastik Süreç	36
4.3 Korelasyon ve Otokorelasyon Fonksiyonları	37
4.4 Frekans Alanında Analiz ve Filtreleme	38
4.4.1 Fourier Analizi	38
4.4.2 Fourier Dönüşümleri	39
4.4.2.1 Ayırık Fourier Dönüşümü	39
4.4.2.2 Hızlı Fourier Dönüşümü.....	40
4.4.3 Sinyal Örnekleme Frekansının Seçimi.....	41
4.4.4 Sayısal Filtreler	42
4.4.4.1 Temel Filtreler	42

5. YER ve UYDU GÖZLEMLERİYLE DEFORMASYON BELİRLENMESİ	45
5.1 Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri.....	45
5.1.1 Küresel Konumlama Sistemi (GPS).....	46
5.1.2 Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema.....	46
5.1.3 Beidou (Compass) Uydu Konumlandırma Sistemi.....	46
5.1.4 Galileo Konumlandırma Sistemi.....	47
5.1.5 Hint Bölgesel Uydu Konumlandırma Sistemi (IRNSS).....	47
5.1.6 Quasi-Zenith Uydu Sistemi.....	48
5.1.7 GNSS’de Kullanılan Ölçme Teknikleri	49
5.1.7.1 Statik Ölçü Tekniği	50
5.1.7.2 Kinematik Ölçü Tekniği.....	50
5.2 Hassas Nivelman Yöntemi.....	50
5.2.1 Hassas Nivelman Yönteminde Kullanılan Alet ve Donanımlar	51
5.2.2 Ölçme Yöntemleri.....	52
5.2.3 Hata Kaynakları	52
5.3 InSAR	54
5.3.1 Radar	54
5.3.2 Yapay Açıklıklı Radar.....	55
5.3.3 İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar (InSAR)	58
5.3.4 InSAR’da Hata Kaynakları	61
5.3.4.1 Yüzey Topografyasından Kaynaklanan Faz Etkisi	61
5.3.4.2 Yüzey Deformasyonu.....	62
5.3.4.3 Atmosferik Etki	63
5.3.4.4 Yörünge Hataları	64
5.3.4.5 Korelasyonsuzluk Etkisi.....	64
5.3.5 InSAR’da Kullanılan Farklı Teknikler.....	64
5.3.5.1 Diferansiyel InSAR	64
5.3.5.2 Persistent Scatterers Interferometry (PSI).....	65
5.3.5.3 Small Baseline Subset Interferometry (SBAS)	66
6. UYGULAMA.....	68
6.1 Çalışma Alanı	68
6.2. GNSS Çalışmaları.....	71
6.2.1. GNSS Ölçüleri	71
6.2.2 GNSS Ölçülerinin Değerlendirilmesi	76

6.2.3 Zaman Serilerinin Üretilmesi ve Değerlendirilmesi	79
6.2.3.1 Uzun Dönem Zaman Serileri Yardımıyla Deformasyonların Belirlenmesi.....	82
6.3 Nivelman Çalışmaları	94
6.3.1 Nivelman Ölçüleri.....	94
6.3.3 Nivelman Ölçülerinin Değerlendirilmesi.....	100
6.4 InSAR Çalışmaları	103
6.4.1 Sentinel-1 Uydusu.....	103
6.4.2 Uydu Görüntülerinin Temini.....	106
6.4.3 Uydu Görüntülerinin Değerlendirilmesi	109
6.4.3.1 SNAP ve StaMPS.....	109
6.4.3.2 LICSAR ve LICSBAS.....	112
6.6 Jeodezik Verilerin Karşılaştırılması.....	117
7. SONUÇ.....	120
8. KAYNAKLAR.....	123
ÖZGEÇMİŞ.....	141

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

M	Magnitüd
M _w	Moment Büyüklüğü
σ	Sigma
σ^2	Varyans
T	Trend
C	Periyodik hareket
R	Rassal değişiklik
p	Periyot
n	Gürültü
f	Frekans
m	Metre
mm	Milimetre
ppm	Parts per million
cm	Santimetre
km	Kilometre
c	Işık hızı
L	Radar anteni uzunluğu
ϕ	İnterferometrik faz
λ	Dalga boyu
B	Baz uzunluğu
$B_{\perp}$	Dik Baz Uzunluğu
θ	Radarın bakış açısı
H_{amb}	Yükseklik belirsizliği
ppb	Parts per billion

Kısaltmalar

AAG	Afyon-Akşehir Grabeni
AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AFD	Ayrık Fourier Dönüşüm
ALOS	Advanced Land Observation Satellite
AO	Additive Outlier
AOE	Atmospheric and Orbit Errors
ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar
ASF	Alaska Satellite Facility
ASFS	Akşehir Simav Fay Sistemi
COMET	Centre for the Observation and Modelling of Earthquakes
CORS	Continuously Operating Reference Stations
COSMO-Skymed	COnstellation of small Satellites for Mediterranean basin Observation
ÇFZ	Çobanlar Fay Zonu
DGM	Delft Gravity Model
DInSAR	Differential SAR Interferometry
DSİ	Devlet Su İşleri

Kısaltmalar (Devam)

ENVISAT	European Environment Satellite
ERS	European Remote Sensing Satellite
ESA	European Space Agency
EW	Extra-Wide Swath
GACOS	Generic Atmospheric Correction Online Service
GAMIT	GPS Analysis at Massachussets Institute of Technology
GBAS	Ground Based Augmentation System
GHz	Gigahertz
GLOBK	Global Kalman Filter
GLONASS	Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment
HFD	Hızlı Fourier Dönüşüm
HH	Horizontal-Horizontal
HV	Horizontal-Vertical
İBTZ	İzmir-Balıkesir Transfer Zonu
IGS	International GNSS Service
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
IRNSS	Indian Regional Navigational Satellite System
IsFZ	Işıklar Fay Zonu
ISRO	Indian Space Research Organisation
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
IW	Interferometric Wide Swath
JERS	Japanese Earth Resource Satellite
KAF	Kuzey Anadolu Fayı
KB-GD	Kuzeybatı-Güneydoğu
KD-GB	Kuzeydoğu-Güneybatı
LiCS	Looking inside the Continents from Space
LOS	Line of Sight
MATLAB	MATrix LABoratory
MTSAT	Multi-Functional Transport Satellite
PALSAR	Phased Array L-band SAR (ALOS)
PS	Permanent/Persistent Scatterers
PSI	Permanent/Persistent Scatterers InSAR
PSInSAR	Permanent/Persistent Scatterers Interferometric Synthetic Aperture Radar
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System
RADAR	Radio Detection and Ranging
RADARSAT	Radio Detection and Ranging Satellite
RAR	Real Aperture Radar
RINEX	Receiver Independent Exchange
SAR	Synthetic Aperture Radar
SBAS	Satellite Based Augmentation System
SBAS	Small Baseline Subset
SCLA	Spatially-Correlated Look Angle
SLC	Single Look Complex

Kısaltmalar (Devam)

SLR	Satellite Laser Ranging
SLR	Satellite Long Range
SM	Stripmap
SNAP	Sentinels Application Platform
SNR	Signal Noise Ratio
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
StaMPS	Stanford Method for Persistent Scatterers
SULA	Spatially-Uncorrelated Look Angle
SVD	Singular Value Decompositon
SYM	Sayısal Yükseklik Modeli
TGFZ	Tuz Gölü Fay Zonu
TUSAGA	Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı
USGS	United States Geological Survey
VH	Vertical-Horizontal
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
VV	Vertical-Vertical
WAAS	Wide Area Augmentation System
WV	Wave Mode

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1 Afyon-Akşehir Grabeni jeoloji haritası. Kısaltmalar; BaF: Balmahmut Fayını, GgF: Gazlıgöl Fayını, EF: Erkmén Fayını, ÇFZ: Çobanlar Fay Zonunu, IsFZ: Işıklar Fay Zonunu, BF: Bolvadin Fayını, BkF: Büyük Karabağ Fayını, ÇuF; Çukurcak Fayını, PF: Piribeyli Fayını, YaF: Yavaşlı Fayını, IFZ: Ilgın Fay Zonunu, YF: Yarıkkaya Fayını, KuF: Kumdanlı Fayını, GeF: Gecek Fayını, GF: Gelendost Fayını, KoF: Koçbeyli Fayını, ArF: Arızlı Fayını, UF: Uluborlu Fayını, TF: Tatarlı Fayını, SaF: Sandıklı Fayını göstermektedir (Özkaymak vd. 2017).....	23
Şekil 3.2 Afyon-Akşehir Grabeni sismotektonik haritası (Özkaymak vd. 2017).	24
Şekil 3.3 Sultandağı Fayı'nda oluşan yıkıcı depremler (Özkaymak vd. 2017).....	25
Şekil 3.4 Bolvadin ve çevresinin diri fay haritası. Kısaltmalar; AAG: Afyon-Akşehir Grabenini, KG: Karamık Grabenini göstermektedir (Özkaymak vd. 2017). ..	26
Şekil 3.5 Bolvadin yerleşim alanında gözlenen yüzey faylanması ve yüzey yarığı (Özkaymak vd. 2017).	32
Şekil 4.1 Zaman serisinin bileşenleri (Yiğit 2010).....	34
Şekil 4.2 Eğrisel ve doğrusal trend şekilleri (Yiğit 2010).....	35
Şekil 4.3 Deterministik trend (I, II) ve stokastik trend (III) (Yiğit 2010).	35
Şekil 4.4 Alçak geçiren filtre.....	43
Şekil 4.5 Yüksek geçiren filtre.	43
Şekil 4.6 Band geçiren filtre.....	44
Şekil 4.7 Band söndüren filtre.	44
Şekil 5.1 GNSS uyduları (İnt. Kyn. 2).	45
Şekil 5.2 Uydu sistemlerinin karşılaştırılması (İnt. Kyn. 10).....	49
Şekil 5.3 Kullanılan ölçme teknikleri.....	49
Şekil 5.4 İnvar mira ile mira altlığı (Doğan 2019).....	52
Şekil 5.5 Mira eğiklik hatası (Ceylan 1993).....	54
Şekil 5.6 RAR ve SAR görüntülerinin çözünürlük farkı (Massonnet ve Feigl 1998)....	57
Şekil 5.7 SAR sisteminin geometrik açıklaması (Canaslan Çomut 2016).	58
Şekil 5.8 Deformasyon kaynaklı faz farkı (Kucur 2019).	59
Şekil 5.9 InSAR görüntüleme geometrisi (Abdikan 2012).	60
Şekil 5.10 InSAR deformasyon geometrisi (Orhan 2018).	62
Şekil 6.1 Afyonkarahisar ilinin haritadaki konumu.	68
Şekil 6.2 Bolvadin ilçesinin haritadaki konumu.	69
Şekil 6.3 Bolvadin'de kurulan GNSS istasyonları (Kırmızı çizgiler yüzey deformasyonlarını göstermektedir).	70

Şekil 6.4 Bolvadin’de kurulan nivelman ağı. (Kırmızı çizgiler yüzey deformasyonunu, yeşil çizgiler nivelman güzergahlarını, mavi ve sarı çizgiler bağlantı nivelman hatlarını göstermektedir)	71
Şekil 6.5 AKTC zaman serisi.	73
Şekil 6.6 GAMIT klasör yapısı.	77
Şekil 6.7 BMET istasyonunda yıllık çökme miktarı (~4 mm).	80
Şekil 6.8 BBEL istasyonunda yıllık çökme miktarı (~40 mm).	81
Şekil 6.9 BLV1 istasyonunda yıllık çökme miktarı (~94 mm).	82
Şekil 6.10 BMET istasyonu yükseklik bileşeni koordinat farkları.	85
Şekil 6.11 BBEL istasyonu yükseklik bileşeni koordinat farkları.	85
Şekil 6.12 BLV1 istasyonu yükseklik bileşeni koordinat farkları.....	86
Şekil 6.13 BMET istasyonu yükseklik bileşeni lineer + trigonometrik modeli.	86
Şekil 6.14 BBEL istasyonu yükseklik bileşeni lineer + trigonometrik modeli.	87
Şekil 6.15 BLV1 istasyonu yükseklik bileşeni lineer + trigonometrik modeli.	87
Şekil 6.16 BMET istasyonu yükseklik bileşeninde uyumsuz ölçüler ve boşluklar giderilmiş veri.....	88
Şekil 6.17 BBEL istasyonu yükseklik bileşeninde uyumsuz ölçüler ve boşluklar giderilmiş veri.....	89
Şekil 6.18 BLV1 istasyonu yükseklik bileşeninde uyumsuz ölçüler ve boşluklar giderilmiş veri.....	90
Şekil 6.19 BMET istasyonu yükseklik bileşeni lineer trend modeli.	91
Şekil 6.20 BBEL istasyonu yükseklik bileşeni lineer trend modeli.	91
Şekil 6.21 BLV1 istasyonu yükseklik bileşeni lineer trend modeli.	92
Şekil 6.22 BMET istasyonu yükseklik bileşeni trend + periyodik modeli.....	93
Şekil 6.23 BBEL istasyonu yükseklik bileşeni trend + periyodik modeli.	93
Şekil 6.24 BLV1 istasyonu yükseklik bileşeni trend + periyodik modeli.....	94
Şekil 6.25 Elektrik direklerinin kesit görüntüsü (Tiryakioğlu 2019).	95
Şekil 6.26 Örnek nivelman klişesi.....	97
Şekil 6.27 Kullanılan nivelman ağı (Tiryakioğlu 2019).....	98
Şekil 6.28 Deformasyonun hızlarının yıllara göre dağılımı (Tiryakioğlu vd. 2022). ..	101
Şekil 6.29 5 yıllık deformasyon hızları (Tiryakioğlu vd. 2022).....	102
Şekil 6.30 Sentinel-1 uydusu (İnt. Kyn. 13).....	104
Şekil 6.31 Sentinel-1 uydusu görüntüleme modları (İnt. Kyn. 14).	105
Şekil 6.32 Uydu görüntülerini indirmede kullanılan copernicus gözlem programı sitesi ekran görüntüsü.	107

Şekil 6.33 Uydu görüntülerini indirmede kullanılan ASF giriş sayfası ekran görüntüsü.	108
Şekil 6.34 Uydu görüntülerini seçmek için kullanılan filtreleme bölümü ekran görüntüsü.	109
Şekil 6.35 Uydu görüntülerinin işlenmesinde kullanılan SNAP yazılımı ekran görüntüsü.	110
Şekil 6.36 Verilerin değerlendirilmesinde kullanılan StaMPS yazılımı ekran görüntüsü.	111
Şekil 6.37 COMET-LiCS giriş sayfası ekran görüntüsü.	113
Şekil 6.38 LiCSBAS yazılımı iş akış grafiği (Morishita vd. 2020).	114
Şekil 6.39 Çalışma bölgesindeki PS noktaları, GNSS istasyonları ve yüzey deformasyonları. Renk aralığı yüzeyde meydana gelen yıllık yükselik değişimini göstermektedir.	116

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Asismik yüzey deformasyonlarının sınıflanması (Özkaymak vd. 2017)....	31
Çizelge 6.1 GNSS noktaları.	76
Çizelge 6.2 GNSS ölçü ekipmanları.....	76
Çizelge 6.3 Stabilizasyon için kullanılan IGS istasyonları.	79
Çizelge 6.4 İstasyonların yükseklik bileşeninde elde edilen sinyal tekrarlama periyotları.	90
Çizelge 6.5 Profildeki noktalar ve numaraları.....	99
Çizelge 6.6 Profil hata sınırları çizelgesi.....	99
Çizelge 6.7 Nivelmandan hesaplanan noktasal hızlar.	102
Çizelge 6.8 Sentinel-1 uydusunun özellikleri.....	104
Çizelge 6.9 Yararlanılan SAR görüntülerinin nitelikleri.....	108
Çizelge 6.10 Nivelman ve PS nokta hızlarının karşılaştırılması.	117
Çizelge 6.11 Nivelman, GNSS ve PS nokta hızları karşılaştırılması.	118

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 3.1 Bolvadin’de yapılan jeolojik saha çalışması (Özkaymak vd. 2017).....	27
Resim 3.2 Bolvadin ilçesinde gözlenen yüzey deformasyonları.	29
Resim 3.3 Bolvadin ilçesinde yapılarda gözlenen deformasyonlar.	30
Resim 6.1 AKTC noktasına kurulan sabit GNSS istasyonu.	72
Resim 6.2 BLV1 sabit GNSS istasyonu (Bolvadin’de şahıs bahçesi).	74
Resim 6.3 BBEL sabit GNSS istasyonu (Bolvadin belediye binası terası).	75
Resim 6.4 BMET sabit GNSS istasyonu (Bolvadin Meteoroloji Müdürlüğü bahçesi).	75
Resim 6.5 Nivelman duvar tesislerinde kullanılan araçlar (Tiryakioğlu 2019).	95
Resim 6.6 Beton elektrik direği üzerindeki nivelman araçları (Tiryakioğlu 2019).	96
Resim 6.7 Bolvadin ilçesinde 2020 yılında yapılan nivelman ölçümleri.....	98

1. GİRİŞ

Mühendislik ölçme çalışmalarından biri de deformasyon ölçmeleridir. Yer kabuğunda ya da herhangi bir mühendislik yapısında belirli bir zamana bağlı olarak oluşabilecek deformasyonların neticeleri, insanların yaşamıyla, can ve mal güvenliğiyle çok ilgilidir. Bu yüzden, tektonik hareketlerin olduğu alanlarda geometrik değişimler izlenmeli, belirlenmeli ve tanımlanmalıdır. Bunlar yapıldığında, tedbirler önceden alınabilecek büyük zararlar önlenilecek ya da en aza indirilebilecektir (Kalkan ve Alkan 2005).

Günümüzde, tektonik hareketlerin incelenmesiyle depremlerin birçoğunun nerelerde meydana geleceği tahmin edilmektedir. Faylarda oluşan yanal ve düşey yer değiştirmeleri, büyük depremlerin yinelenme aralıklarını belirlemek önemlidir (Gezgin 2020).

20. yüzyılın sonlarında ilerleme gösteren uzay jeodezisi, levha hareketlerini belirlemede büyük görevler üstlenmektedir. Bu alanda birçok yöntem uygulanmaktadır. Bu yöntemler; Very Long Baseline Interferometry (VLBI), Satellite Laser Ranging (SLR), Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), Permanent/Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar (PSInSAR) ve Global Navigation Satellite Systems (GNSS) vb. şeklinde tanınmaktadır. GNSS yöntemi, VLBI ve SLR yöntemlerine göre kullanım ve ekonomik yönden de daha uygundur. Bu yüzden deformasyon çalışmalarında genellikle tercih edilmektedir. Jeodezik yöntemlerden başka, yerbiliminin değişik alanlarında uygulanan daha farklı yöntemler de bulunmaktadır. Ancak bu yöntemler, zamansal çözüm ve doğruluk açısından uygulamalarda jeodezik yöntemlere göre dezavantajlara sahiptir (Tiryakioğlu 2012, Gezgin 2020).

Yer bilimlerinde, levha hareketlerinin belirlenmesi ve depremlerin kestirilmesi ancak farklı disiplinlerden gelen verilerin doğru bir şekilde birleştirilmesi ile mümkündür. Bir disiplinin ürettiği sonuç, başka bir disiplinin girdi verisi olarak kullanılabilir. Tektonik hareketlerin belirlenmesine yönelik çalışmalarda, tekrarlı jeodezik ölçmelerin incelenmesi ve bunların jeolojik araştırmalarla birlikte yorumlanmasıyla anlamlı sonuçlara ulaşılabilir. Bu kapsamda, uygulama bölgesinde ayrıntılı bir jeodezik

Çalışmanın yapılması daha sonra farklı disiplinlerin yapacağı çalışmalara bir alt basamak olarak yarar sağlayacaktır (Tiryakioğlu 2019).

Çalışma bölgesi olan Akşehir-Sultandağı fay zonunda (AKFZ) üzerinde kuzeybatı yönünde ilerleyen deprem hareketi vardır. Hareketin batı yönünde sürme ihtimali, Afyonkarahisar ve civarında haritalanan diri faylar ve bölgede mevcut sismik boşluk da bulunmaktadır. Bu yüzden gelecekte Afyonkarahisar ili çevresinde oluşabilecek büyük oranda yıkıcı bir deprem riskini göstermektedir. Bu durum, yani Bolvadin Fayı yüzey deformasyonları bölge hakkında da bir huzursuzluk, korku ve endişe yaratmıştır (Özden vd. 2002, Akyüz vd. 2006, Tiryakioğlu vd. 2015).

Bu tez için seçilen çalışma bölgesinde (Afyonkarahisar ilinin Bolvadin ilçesi) yer alan faylar yoğunlukla hem yanal hem de düşey harekete neden olan eğim/oblik atımlı faylardır (Özkaymak vd. 2017). Bu çalışma kapsamında düşey deformasyonlar belirlenmeye çalışılmıştır. Bolvadin Fayı'nda GNSS, Nivelman ve InSAR yöntemleri ile çökmeler ve yükselmeler yani düşey yöndeki hareketler tespit edilmiştir.

Bu çalışma ile bölgedeki deformasyona ilişkin bilgiler elde edilmiş, olaya bilimsel bir yaklaşım getirilmiştir. Üç farklı jeodezik yöntemle bölgede meydana yüzey deformasyonları izlenmiştir. GNSS, Nivelman ve InSAR yöntemleri düşey deformasyon miktarları hesaplanmıştır. Bölgede kurulan GNSS istasyonları sonuçlarına göre BLV1 istasyonunda -94 mm/yıl düşey yönde deformasyon hızı hesaplanmıştır. Hassas Nivelman sonuçlarına göre aynı noktada hızı -78 mm/yıl, InSAR sonuçlarına göre ise -82 mm/yıl olarak hesaplanmıştır. Üç yöntemden elde edilen sonuçlar uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Jeolojik Literatür

Fayın yerinin tespiti ve deprem sonrasında deformasyona uğrayan kütlenin önceki haline göre hareket yönünün ve miktarının hesaplanması deprem biliminde önemlidir (Hauksson 1991, Karagöz 2008). Fay hareketlerini incelemek özen ve sabır gerektirir. Düzenli gözlemlerde bulunmak, küçük hareketleri fark edebilmek kolay değildir. Uzun zaman zorlu arazi şartlarında çalışmak genelde bilim insanları için yorucu bir süreçtir (Sylvester 1984, 1986, 1995, Yalçın 2019).

Düşey yönde meydana gelen asismik yüzey deformasyonları günümüzde farklı şekilde tanımlanmaktadır. Çoğunlukla insan davranışları sebebiyle yer altı su düzeyinin azalması sonucunda, yeryüzü altındaki konsolide olmamış sedimanların sıkışmasıyla ortaya çıkan oturma bağlantılı deformasyonlar şeklinde açıklanır. Bunun dışında tektonik kaynaklı gerilmelere bağlı olarak fay zonlarında gözlenen belirli bir yönde, çok yavaş ve kesintisiz olan sürüklenme biçimi şeklinde de meydana gelmektedir. Bunlar yüzey yarıkları, yüzey faylanması biçiminde gözlenir. Deformasyonlar, yerleşim alanlarındaki yüzey altında bulunan su/doğalgaz borularına, kanalizasyon sistemlerine, gömülü boru hatlarına zarar vermektedir. Ayrıca yeryüzündeki binaları, duvarları, su kanallarını, karayollarını, demiryollarını yani insanoğlunun yaptığı tüm eserleri tahrip etmektedir. Yüzey yarıkları, genişleme gerilmesi sebebiyle oluşurlar. Yarık düzlemine dik yönlü açılma özellikleri taşırlar. Yer altı su düzeyinin azalmasıyla ortaya çıkan yüzey faylanmalarıysa, o çevrede eskiden beri bulunan faylar boyunca oluşurlar (Özkaymak vd. 2017).

Büyük depremler yaşanmadan oluşan asismik yüzey deformasyonları, Batı Anadolu Bölgesi'nde son yıllarda birçok alanda rapor edilmiştir. Bu alanlardan biri, 1969 yılındaki depremin (M:6.8) yüzey kırığına sebep olduğu Sarıgöl Fayı üzerindeki Manisa ili Sarıgöl ilçesidir. Bir diğeri de 2002 yılında Afyonkarahisar ilinin Çay ilçesinde yaşanan depremlerin (Mw: 6.0 ve 6.3) kuzeyinde Bolvadin Fayı boyunca güncel yüzey kırıklarının oluştuğu Bolvadin ilçesidir. Bu ilçelerdeki yüzey deformasyonları halen sürmektedir. Daha önce yapılmış çalışmalar, Bolvadin ilçesi ve çevresinde büyük bir deprem olmadan

oluşan yüzey deformasyonlarının, uzunlukları 1.5 km ile 3 km arasında değişen KD-GB (Kuzeydoğu-Güneybatı) yönlerinde üç koldan meydana geldiğini belirtmişlerdir. Bu çalışmalar, deformasyonların Bolvadin Fayında gözlemlendiğini, fayın ayırdığı iki bloktan güneydoğudaki bloğun günümüze dek 70 cm civarında alçaldığını da ifade etmişlerdir. Çalışmaların sonucunda alandaki son 5 yıllık deformasyon hızının 8,5 cm/yıl olduğu ortaya çıkmıştır (Bozkurt ve Sözbilir 2004, Kazancı vd. 2011, 2012, Emre vd. 2011, Hakyemez vd. 2013, Doğan 2019, Özkaymak vd. 2017, 2019, Tiryakioğlu vd. 2019).

2.2 Jeodezik Literatür

2.2.1 GNSS

Günümüzde, teknolojik ilerlemelerle orantılı olarak mühendislik yapılarındaki büyük artış, mühendislik ölçmelerinde deformasyon konusunu daha da önemli hale getirmiştir. Tarihi eserler, köprüler, barajlar, enerji santralleri, çok katlı binalar ve tüneller gibi yapılarda zamanla görülebilecek deformasyonların önceden tespiti büyük önem taşımaktadır. Mühendislik yapılarına ve onların çevrelerindeki zeminlerin özelliklerine bağlı olarak bu yapıların kendi ağırlıkları ile hareketli dış yük faktörleri, yapılarda ve çevrelerinde geometrik değişimlerin ortaya çıkmasına neden olur. Deformasyonların gözlenmesi, zamanında belirlenmesi, ardından alınacak tedbirler sayesinde zararların önüne geçilmesi veya en aza indirilmesi sağlanır (Kalkan ve Alkan 2005).

GNSS teknolojisi, geleneksel ölçme yöntemlerinin yanı sıra başarılı bir şekilde deformasyon belirleme çalışmalarında çok sık kullanılmaya başlanmıştır (Bruckl vd. 2006).

Türkiye'deki birçok araştırmaya temel oluşturan kayma hızlarıyla ilgili sayısal çalışmaların ilki Reilinger vd. (1997)'ne aittir. Araştırmada, Güney Rusya ve Gürcistan'ın Kafkas dağlarından, Ermenistan ve Türkiye'nin Ege kıyılarına uzanan doğu-batı yönlü ve Avrasya levhasının güney kıyısından Arap levhasının kuzey kıyısına değin kuzey-güney yönlü giden geniş bir bölgede GNSS yöntemiyle ölçümler gerçekleştirilmiştir. 1988 yılından 1994 yılına kadar olan sürede 54 noktaya ait GNSS

verileri elde edilmiştir. Bu veriler, Avrasya plakası sabit kalmak şartıyla GAMIT (GPS Analysis at Massachussets Institute of Technology)/GLOBK (Global Kalman Filter) yazılımıyla incelenmiş, levhaların hareketleriyle ilgili bilgilere ulaşılmıştır. Araştırma, Orta Anadolu'nun saat yönünün tersinde hareket ettiğini göstermiştir. Ayrıca yıllık 2 mm'den az olan içsel deformasyonu ortaya koymuştur.

McClusky vd. (2000) de 1988-1997 yılları arasındaki GNSS verilerini incelemiştir. Bu noktaların hız vektörlerini Avrasya plakasını sabit alarak GAMIT/GLOBK yazılımıyla değerlendirmiştir. Araştırma, Arap plakasının yıllık 18 mm hareket ederek Avrupa plakasına yaklaştığını göstermiştir. Türkiye'de görülen deformasyonun da düzenli ve saatin aksi yönünde olduğu ifade edilmiştir.

Hu vd. (2005) de Avustralya'daki CORS (Continuously Operating Reference Stations) ağı Victoria GPSnet'in deformasyon gözlemlerinde nasıl kullanılabileceğini incelemiştir. Deformasyon çalışmaları için GPSnet sisteminde 19 istasyon belirlemiştir. Değerlendirme sırasında GAMIT yazılımından ve IGS'nin (International GNSS Service) yayınladığı hassas yörünge bilgilerinden yararlanmışlardır. Çalışmalarının sonucu, CORS sistemiyle yapılan deformasyon analizinin doğru, kullanılabilir bir metot olduğunu ortaya koymaktadır.

Reilinger vd. (2006)'nin yaptığı çalışmada, 1988'den 2005'e kadar olan zaman dilimindeki GPS (Global Positioning System) verilerinden yararlanılmıştır. Nubia, Somali, Arap ve Avrasya plakalarının kesişme alanındaki hızları belirlenmiştir. Bu bilgi doğrultusunda Arabistan'ın, Anadolu'nun, Ege bölgesinin, Zagros'un ve İran'ın yakın çevresini kapsayan geniş bir alanın saatin tersi yönünde hareket ettiği belirtilmiştir.

Tiryakioğlu vd. (2010), Güneybatı Anadolu Bölgesi'ne yayılmış 12 farklı TUSAGA-Aktif (Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı-Aktif) istasyon noktasının verilerini kullanarak tektonik hareketlerin incelenmesi amacıyla uygun ölçü süresinin izlenmesi ve tekrarlılıkların nokta doğruluğunu nasıl etkilediği üzerine bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Veriler GAMIT/GLOBK yazılımı ile analiz edilmiştir. Gözlemler

ve testler, tektonik amaçlı GNSS ağılarındaki kampanya tipi ölçümlerde en az 8 saatlik ölçüm yapılması gerekliliğini ortaya koymuştur.

GNSS yöntemiyle doğruluğu yüksek konumlara ulaşılmasının neticesi olarak yer bilimi çalışmalarında, plaka hareketlerinde, deprem öncesiyle sonrası deformasyon araştırmalarında, aktif faylarda, volkanlarda, tsunami erken uyarı sistemlerinde, toprak kaymalarında ve çökmelerle ilgili zemin deformasyonlarının gözlenmesinde bu teknolojiden giderek daha sık yararlanılmaya başlanmıştır (Wang ve Soler 2014).

Jihyun vd. (2014), Kore yarımadasında 2011'de yaşanan, Kore'de ve Japonya'da yüzey deformasyonlarını tetikleyen Tohoku-oki depremini araştırmışlardır. Kabuk hareketi miktarını CORS ağılarındaki statik verilere göre hesaplamışlardır. Daha önceden gözlenen yüzey deformasyonları yeni çalışma ile karşılaştırılmıştır. Böylece Tohoku-oki depremiyle Kore yarımadasının nasıl etkilendiğini incelemişlerdir. Tohoku-oki depreminin, Güney Kore'yi ortalama 2.8 cm doğuya kaydırıldığını görmüşlerdir. Bu miktarın, kabuk hareketinin yıllık hızına denk olduğunu ortaya çıkarmışlardır.

Zhang vd. (2014) de, yüzeydeki deformasyonu gözlemek için GNSS yönteminden yararlanmışlardır. Çin'in Sichuan bölgesindeki Lushan depreminde ortaya çıkan sismik deformasyonları belirlenmek için CORS istasyonlarının statik verilerini kullanmışlardır. Bu yöntemle ulaşılan değerlerin, USGS'nin (United States Geological Survey) yayınladığı değerlerle birbirine uyduğunu görmüşlerdir. Sismik yer hareketlerinin incelenmesinde GNSS yönteminin başarılı olduğunu tespit etmişlerdir.

Ng vd. (2016) de araştırmalarında, 2007 yılından başlayarak 2011 yılına kadar olan sürede, Tayvan'ın başkenti Taipei City'de görülen deformasyon niteliklerini ortaya koymaya çalışmışlardır. Arazideki kabuk hareketlerinin tespiti için InSAR zaman serilerinden ayrıca CORS ağılarındaki 21 istasyondan statik yöntemle ulaşılan verilerden yararlanmışlardır. InSAR yönteminden ve CORS ağılarından elde edilen deformasyon sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Bu yöntemler arasındaki farkların standart sapmasını 3 mm/yıl ve ortalama hatasını ise 2 mm/yıl olarak bulmuşlardır.

Özdemir (2016) de yaptığı çalışmasında, 2011 yılında Van’da yaşanan deprem yüzünden bölgede görülen deformasyonları TUSAGA-Aktif sistemindeki 13 noktanın statik verilerini kullanarak araştırmıştır. Verileri değerlendirirken Bernese yazılımından yararlanmıştır. Ama 13 referans noktası deprem anında ve sonrasında oluşan deformasyonları belirlemede yeterli olmamıştır. Bu yüzden Van Tapu ve Kadastro Müdürlüğünün ayrıca özel harita bürolarının hazırladığı deprem öncesi GNSS verileri bulunan başka noktaları da çalışmasına eklemiştir. Noktalarda deprem sonrası GNSS ölçümleri yapmıştır. Bunları deprem öncesi verilerle karşılaştırmış, böylece deformasyon değerlendirmesi gerçekleştirmiştir. Deformasyon değerlendirmesinden ulaştığı sonuçlar doğrultusunda en fazla hareketin 46 cm (± 0.23 cm), en az hareketin ise 4 cm (± 0.22 cm) çıktığını bulmuştur.

Malezya yarımadasının Sumatra bölgesinde 2005 ve 2007 yıllarında büyük depremler yaşanmıştır. Wan vd. (2016) çalışmalarında, depremlerin deformasyon etkisini, CORS ağıının statik verilerinden yararlanarak incelemişlerdir. 2005-2012 yıllarındaki CORS verilerini esas alarak bölgenin hızla kaydığı neticesine ulaşmışlardır.

Yalvaç (2016), Konya kapalı havzasını çalışma bölgesi olarak seçmiştir. Burada 25 noktali jeodezik bir deformasyon ağı kurmuştur. Bu noktalarda 2011 yılından 2016 yılına kadar düzenli GNSS ölçümleri gerçekleştirmiştir. Çalışmadaki amacı, Konya kapalı havzası gibi geniş bir alanda 6 yıl içinde ortaya çıkan deformasyonları GNSS tekniğiyle belirlemektir. CORS ağıındaki verilere de ulaşarak havzadaki zemin çökmelerini incelemiştir. Çökmelerde yer altı suyu azalmasının nasıl bir rol oynadığına da zaman serileriyle değerlendirmiştir. Sonuçta, yerleşim alanında ve tarımsal sulamanın çok kullanıldığı yerlerde zemin çökmelerinin 50 mm’ye kadar düştüğünü ifade etmiştir.

Dört faal tektonik plakanın yakınsama etkisindeki Endonezya’nın Orta Java bölgesi güneyinde deformasyonlar oluşmuştur. Deformasyonların incelenmesinde 2013 yılından 2015 yılına kadar olan sürede Endonezya’nın CORS-INA ağıındaki 6 istasyonun statik verileri kullanılmıştır. Araştırmaların bitiminde 6 istasyonun da birbirine benzer şekilde güneydoğu yönünde kaydığı belirlenmiştir. İstasyonların yatay yöndeki hızları 9.1-12

mm arasında, düşey yöndeki hızları ise 11.5-43.5 mm arasında değişmektedir (Yusfania vd. 2016).

Awaluddin vd. (2017), Endonezya'nın Central Java'daki Jatibarang barajında iki değişik teknikle deformasyon incelemesi gerçekleştirmişlerdir. Tekniklerin ilkinde IGS istasyonlarını referans noktası kabul etmişlerdir. İkinci teknikte Endonezya'daki CORS-BIG sistemini kullanmışlardır. İnceleme bölgesindeki Sunda tektonik plakasının dönme etkisini devre dışı bırakmışlardır. Bunun sonucunda iki teknikle gerçekleştirilen deformasyon değerlendirmelerinin birbirine paralel olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca bölgede hareketliliğin olmadığı neticesine ulaşmışlardır.

Bilgen (2017), Konya Selçuk Üniversitesi Alaaddin Keykubat Kampüsünde yedi referans ve bir objeden oluşan toplam sekiz noktalı mikrojeodezik bir ağ hazırlamıştır. Bu ağla GNSS tekniğinin yatay deformasyonları belirleme doğruluğunu incelemiştir. Obje noktasına ölçü düzeneği kurmuştur. Düzenek, sanal deformasyon yapmaktadır. Düzenekle bir cm aralıklı, iki saat süreli statik oturumlar gerçekleştirmiştir. Ayrıca referans noktalarında eş zamanlı ölçümler yapmıştır. Ardından ikişer saatlik oturumları doksan, altmış ve otuz dakikalık sürelerle bölmüştür. Sonra da bu verileri Leica Geo Office 7.0 yazılımında analiz etmiştir. Çalışma bitiminde mikrojeodezik ağlarda gerçekleştirilecek otuz dakikalık GNSS ölçümleri ile, yatay deformasyonların izlenebileceği anlaşılmıştır.

Çin'in Hubei eyaletindeki Three Gorges bölgesinde, su seviyesinin artması ve eksilmesi sebebiyle yüzey deformasyonları ortaya çıkmıştır. Bunu incelemek için yöredeki CORS ağından yararlanılmıştır. 2011-2015 yılları arasında statik teknikle elde edilmiş veriler değerlendirilmiştir. Hesaplanan düşey hareketlerin GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) trendiyle paralel olduğu görülmüştür. Su değişimlerinden kaynaklı yüzey deformasyonları belirlenirken CORS ağlarından yararlanılabileceği kanısına ulaşılmıştır (Wang vd. 2017).

Endonezya'nın Central Java bölgesindeki Sayung yöresinde zemin çökmesi, heyelan ve sel gibi doğal afetler sıkça görülmektedir. Burada CORS-UDIP ve CORS-CSEM

ağlarından yararlanarak yeryüzü deformasyonu üzerine araştırma yapılmıştır. Araştırmada 2015-2016 yıllarının statik verileri kullanılmıştır. Verilerin analiz işlemi GAMIT 10.6 yazılımında gerçekleştirilmiştir. CORS-CSEM ağındaki, istasyonlar arası mesafeler kısadır. Bu yüzden, noktaların ortalama hata değerleri CORS-UDIP ağındakilerden daha iyi çıktığı neticesine varmışlardır. Bununla birlikte beş altı saatlik gözlemlerin incelemesinde CORS-CSEM ağının kullanılmasının, IGS istasyonları ile gerçekleştirilen değerlendirmelere nazaran daha iyi sonuçlandığı görülmüştür. Daha etkili bir doğruluk isteniyorsa IGS istasyonlarından elde edilen uzun süreli gözlem verilerinden yararlanılması düşüncesine ulaşılmıştır (Yuwono vd. 2017).

Mete (2019)'nin çalışmasının amacıysa, yapılardaki veya yer kabuğundaki deformasyonların tespitinde TUSAGA-Aktif noktalarının kullanılabilirliğini öğrenmektir. Bu nedenle iki basamaklı araştırma gerçekleştirmiştir. Araştırmanın başında, TUSAGA-Aktif sistemindeki noktaların yüzeyde ya da yapılarda deformasyon tespitindeki başarısını göstermeye çalışmıştır. TUSAGA-Aktif sistemindeki bir saniyelik ve otuz saniyelik verilerden yararlanarak yapılardaki ya da yüzeydeki ne kadar büyüklükte deformasyonların tespit edilebileceğini incelemiştir. Bununla birlikte en uygun ölçü süresinin ne olacağını da belirlemek istemiştir. Bu amaçla deformasyon miktarının önceden tespitini mümkün kılan bir düzenek hazırlamıştır. Düzenek üzerinde aldığı ölçülerden edindiği sonuçlara göre TUSAGA-Aktif noktalarından yararlanarak yatay yöndeki deformasyonları saptamakta altı ve on iki saatlik ölçüler yeterli olmuştur. Düşey deformasyonları saptamakta ise yirmi dört saatlik ölçülerin kullanılması gerekmiştir. Araştırmanın ikinci basamağında, KAF (Kuzey Anadolu Fayı) hattı çevresinde seçtiği TUSAGA-Aktif sistemindeki dokuz istasyonu kullanmıştır. 2009 yılından 2018 yılına kadar on yıl boyunca otuz saniye kayıt aralıklı verilerden yararlanmıştır. Böylece yedi IGS noktasına dayalı çözümler elde etmiştir. Devamında bu noktalarda art arda gelen yıllar boyunca anlamlı bir hareket olup olmadığını bağıl güven elipsoitleri tekniğiyle değerlendirmiştir. Bu incelemelerin sonucunda, KAF üzerinde belirlenen TUSAGA-Aktif noktalarının hepsinde anlamlı hareketler olduğunu gözlemiştir. Hareketlerin literatürdeki TUSAGA-Aktif nokta hızları ile benzer olduğu kanaatine varmıştır.

Kavak (2020) tarafından hazırlanan tez, Karaburun yarımadasında yapılan jeodezik bir çalışmadır. Bu çalışma sırasında Karaburun yarımadasını kapsayan ve altı noktadan oluşan GNSS ağı tasarlanmıştır. Altı noktada 2018 ve 2019 yıllarında iki kampanya ölçü gerçekleştirilmiştir. Toplanan verilere dayanarak bölgenin hız ve gerinim alanı tespit edilmiştir. Karaburun yarımadasında KD-GB baskın açılma izlenmiştir. Ayrıca KB-GD (Kuzeybatı-Güneydoğu) sıkışma rejiminin etkisi gözlenmiştir.

Bir diğer çalışmada, TGFZ'nin (Tuz Gölü Fay Zonu) güney kesimindeki deformasyonun jeodezik ölçmelerle en doğru şekilde ortaya konması hedeflenmiştir. Bu yüzden, TGFZ'nin güney kısmına yirmi dört nirengi noktası tesis edilmiştir. Ayrıca sürekli gözlem yapan iki GNSS istasyonu da kurulmuştur. Ağda 2018 yılından 2020 yılına kadar GNSS ölçüleri gerçekleştirilmiştir. GNSS ölçüleri GAMIT/GLOBK yazılımıyla analiz edilmiştir. Bölgenin güncel hız alanına ulaşılmıştır. GeodSuit yazılımından yararlanılarak bölgenin gerinim alanları hesaplanmıştır. Blok model çalışmaları da sürdürülmüştür. Ayrıca bölgenin 2014 ile 2020 yılları arasındaki otuz beş Sentinel-1 görüntüsü GMT5SAR yazılımında SBAS (Small Baseline Subset) yöntemiyle incelenmiştir. Alanda uydu bakış yönündeki yer değiştirmeler belirlenmiştir. Sonuç olarak yaklaşık yatayda 3.2 mm/yıl, düşeyde 1.5 mm/yıl kayma hızları elde edilmiştir. Bu kayma hızları jeolojik çalışmalardaki kayma değerleriyle karşılaştırılmıştır. Zondaki faal deformasyonun gerçekte daha yüksek olduğu anlaşılmıştır (Gezgin 2020).

Başka bir çalışmada da İBTZ (İzmir-Balıkesir Transfer Zonu) ve etrafının deformasyonunu araştırmak için altmış iki noktalık GNSS ağı tasarlanmıştır. GNSS ağında bulunan noktaların geçmiş yıllardaki ölçülerine ulaşılmıştır. Gereken noktalarda 2018 yılında ve 2019 yılında iki GNSS kampanyası yapılmıştır. Bu veriler GAMIT/GLOBK yazılımıyla incelenmiştir. Bölgenin Avrasya sabit ITRF2008 (International Terrestrial Reference Frame) hız alanı hesaplanmıştır. Bu hız alanı ile önceki çalışmaların hız alanları dönüşüm yapılarak birleştirilmiştir. Yüz on bir noktalık geniş hız alanı meydana getirilmiştir. Güncellenen bu hız alanıyla bölgenin gerinim alanı bulunmuştur. $M_w \geq 5.5$, $M_w \geq 6$, $M_w \geq 6.5$ ve $M_w \geq 7$ büyüklüğündeki depremlerin jeodezik deprem tekrarlama periyotları da elde edilmiştir. Önceki çalışmaların blok modelleri

incelenmiştir. Bölge için yeni bir blok model geliştirilmiştir. Ayrıca bölgedeki fayların deprem üretme potansiyelleri hesaplanmıştır (Solak 2020).

Bir bölgedeki düzenli GNSS ölçümleriyle büyük levhalara göre rölatif olarak hızlar belirlenebilir. Bu yolla tektonik hareketleri tespit etmek de günümüzde mümkündür. Çalışmalarda ulaşılmak istenen sonuç, büyük levhalar referans kabul edilerek küçük levhaların hareketlerinin belirlenmesidir. GNSS yönteminin, levha hareketlerinin belirlenmesinde doğru bir yöntem olduğu, yapılan çalışmalarla ortaya konmuştur (Yavaşoğlu 2009, Tiryakioğlu 2013, Tiryakioğlu vd. 2018, Doğan vd. 2021).

2.2.2 Hassas Nivelman

Hassas nivelman; Avrupa'da, Amerika'da ve Japonya'da deprem sebebiyle oluşan düşey deformasyonların gözlenmesinde kullanılır. Ülkemizde ise son yıllara kadar ilgi görmemiştir. Bu durumun nedenlerinden biri yöntemin zahmetli oluşudur. Türkiye'de hassas nivelman yöntemiyle yüzey deformasyonlarını araştıran çalışma, literatürde az sayıdadır (Karagöz 2008).

Yüzey deformasyonlarının gözlenmesinde kullanılan çeşitli yöntemler vardır. Hassas nivelman bu yöntemlerden biridir. Bu yöntemde ortalama hata $0,5 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$ 'dir. Ölçüm işleminde kullanılacak araçlar hassas nivelman aleti ve invar miradır. Çalışmada, yüzey kırıklarının dışında kalan bölümlerde RS (yardımcı nivelman) noktaları seçilir. Değişik zamanlarda gerçekleştirilen ölçümler arasındaki fark bulunur. Oluşan çökmelere ya da yükselmelere göre deformasyon miktarı hesaplanır. Deformasyon miktarlarındaki farklar bölgenin değişim hızını gösterir (Ceylan 1993, Kaygusuz 2021).

Ünver (1988) tarafından gerçekleştirilen araştırmada, düşey yer kabuğu hareketlerinin ölçümü, duyarlıklı nivelman yöntemiyle yapılmıştır. 1977, 1980, 1983, 1985 yıllarında Burunköy-Söke, Sultanhisar-Yenipazar bölgelerinde gerçekleştirilen duyarlıklı nivelman ölçüleriyle ve kinematik model yardımıyla, parametreler hesaplanmış ve hipotez testleriyle de hareket olup olmadığı ve olan hareketin yönü belirlenmiştir. Burunköy-Söke nivelman geçkisinde hareket miktarının yıllara göre oranı min:0,03 mm/yıl, max:20,02

mm/yıl olarak tespit edilmiştir. Bazı noktalarda yükselme hareketi görülmüştür. Sultanhisar-Yenipazar nivelman geçkisinde hareket miktarının yıllara göre oranı min:0,02 mm/yıl, max:12,36 mm/yıl olarak bulunmuştur. Bazı noktalarda da çökme hareketi saptanmıştır.

Karagöz (2008)'ün çalışma alanı, Afyonkarahisar ilinin Dinar ilçesi ile Denizli ilinin Çivril ilçesi arasındaki yaklaşık 55 km uzunluğundaki Dinar Fayı'dır. Çalışma amacı ise bu fayın Dinar ilçesi ve civarındaki hareketinin şeklini ve büyüklüğünü ortaya çıkarmaktır. Bunun için Dinar yerleşim alanından geçen fay üzerinde birbirine yaklaşık bir, iki km uzaklıkta üç güzergâh hazırlanmıştır. Güzergâhlar, fayı KD-GB yönünde kesecek şekilde kurulmuştur. Böyle yapılarak KB-GD yönündeki fayın horst ve graben kısımlarındaki rölatif hareketin belirlenmesi istenmiştir. Bundan dolayı üç güzergâhta 172 nokta tesisi yapılmıştır. Hassas nivelman yöntemiyle gerçekleştirilen düzenli ölçmeler, horst-graben yapısının düşey hareket miktarının ortaya konmasını sağlamıştır. Üç kampanya nivelman sonucunda bölgenin tektonik hareketleri hakkında fikir sahibi olunmuştur. Oluşan deformasyonun belirlenmesinde iki veya üç yıl boyunca yılda bir kez ek ölçümlerin gerçekleştirilmesi fayın karakterini ortaya çıkarmada önem taşımaktadır.

Manisa ilinin Sarıgöl ilçesinde hassas nivelman ölçü noktaları tasarlanmıştır. Oluşan yüzey deformasyonlarını içerecek şekilde nivelman ağı hazırlanmıştır. Hassas nivelman ölçmeleri, 2017-2019 yılları arasında yedi kampanya halinde yapılmıştır. 1,5 yıl süren ölçümlerle doğru ve hassas sonuçlara ulaşılmıştır. Ölçümler bitiminde yüzey deformasyonlarının miktarları hesaplanmıştır. 100 ile -120 mm arasında düşey deformasyonların olduğu görülmüştür. Ölçüm her mevsimde bir kez gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Yaz ve sonbahar mevsimlerinde deformasyon miktarının arttığı görülmüştür. Deformasyonun yer altı suları ile bağlantılı olduğu düşünülmüştür. Bölgedeki tarım sulamaları, yaz mevsiminde yer altı su düzeyinin azalmasına sebep olmaktadır. Yaz mevsiminde deformasyon miktarındaki yükselmenin sebebi bu durum olabilir. Kış ve bahar mevsimlerinde yağışların artmasıyla yer altı su düzeyleri yükselmektedir. Ama deformasyonun sürmesi, bunun temelinde tektonik krip hareketinin yer aldığı kanısını uyandırmıştır (Doğan 2019).

1969 yılında Alaşehir depreminin meydana getirdiği yeryüzü kırıkları hassas nivelman yöntemiyle izlenmiştir. Yer altı sularının faya etkisi incelenmiştir. Araştırma alanındaki nivelman ağı, yüzey deformasyonlarını dik kesecek şekilde 2017 yılında kurulmuştur. Ağ, iki nivelman hattından ve on dört referans noktasından oluşmaktadır. Alanda on bir kampanya ölçüm gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler, bölgede tarım sulamalarının çok olmasından dolayı dört mevsimde de yapılmıştır. 2017 yılındaki ilk ölçümle 2020 yılındaki son ölçüm arasındaki fark 240 mm'dir. Bölgedeki DSİ'nin açtığı yer altı kuyularının su seviyelerini gösteren verilere ulaşılmıştır. Bu verilere bakıldığında ilkbahar ve yaz mevsimlerinde su düzeylerinde azalmalar, sonbahar ve kış mevsimlerindeyse artmalar gözlenmiştir. Yaz ve kış geçişlerinde su düzeylerinde on m değişim tespit edilmiştir. Genellikle yer altı su düzeylerindeki artma ve azalmalara karşın deformasyonların devamlı olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak mevsim geçişlerinde de yeryüzü deformasyonunun sürdüğü anlaşılmıştır (Kaygusuz 2021).

Bolvadin yerleşim alanında, Bolvadin Fayı'na paralel önceden bulunmayan yeryüzü deformasyonları meydana gelmiştir. Deformasyonların halen sürmekte olduğu tespit edilmiştir. Bundan dolayı ilçedeki yapıların bazılarında çatlamlar, yer altı yapılarında ise kırılmalar olduğu saptanmıştır. Yeryüzü deformasyonları haritalanmıştır. Harita doğrultusunda deformasyonlara dik gelecek şekilde dokuz profil tasarlanmıştır. Nivelman ağı meydana getirilmiştir. Ölçümler 2016 ve 2017 yıllarında gerçekleştirilmiştir. Noktalar arasındaki yükseklik farklarına bakıldığında sekiz aylık sürede 18-24 mm arasında yüzey deformasyonları meydana geldiği izlenmiştir. Ölçümler sonucunda oluşan deformasyon geometrisinin, Bolvadin Fayı'nın geometrisi ve kinematik nitelikleriyle uyumlu olduğu anlaşılmıştır (Tiryakioğlu vd. 2017).

Bozkuş (2019) çalışmasında, Bolvadin ilçesindeki nivelman ağını yeryüzü deformasyonlarına dik olacak şekilde dokuz profilden oluşturmuştur. 2016 yılı ağustosundan 2018 yılı ağustosuna kadar on iki kampanya nivelman ölçümü gerçekleştirmiştir. Ölçümler neticesinde bölgede iki yılda 100 mm'ye ulaşan deformasyonlar görülmüştür. Sonra bölgedeki DSİ (Devlet Su İşleri) kuyularından yer altı su düzeylerini gösteren verilere ulaşılmıştır. Yer altı su düzeylerinin yirmi dört ayda beş metre azaldığı belirlenmiştir. Yer altı su düzeyleriyle deformasyonlar arasındaki

korelasyonu incelemek için Kendal, Sperman ve Pearson korelasyon yöntemlerinde yararlanılmıştır. Sonuçlar, iki kuyu dışında yüzey deformasyonlarıyla yer altı su düzeylerindeki azalma arasında orta seviyede korelasyon olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Yalçın (2019)'ın yüksek lisans tezinde, Bolvadin çevresinde oluşan yüzey deformasyonlarının sebebini ve miktarını öğrenmek için üç ayrı bölgede toplam iki km tutan hatlardaki elektrik direklerine pirinçten aparatlar monte edilmiştir. 2016 yılı ağustos ayında, 2017 yılı ağustos ayında olmak üzere iki ölçüm yapılmıştır. Veriler doğrultusunda bölgede, 5 ile 65 mm/yıl arasında değişen düşey deformasyon hızı belirlenmiştir.

Bu çalışmada, Bolvadin ilçesinde oluşan yüzey deformasyonlarının hassas nivelman yöntemiyle araştırılması hedeflenmiştir. Bu nedenle Bolvadin'de sekiz profil, seksen bir noktadan oluşan nivelman ağı hazırlanmıştır. 2019 ve 2020 yıllarında, gerçekleştirilen 5 kampanya ölçü sonuçları incelenmiştir. İncelemeler neticesinde 360 mm'ye yakın deformasyon olduğu ortaya çıkmıştır. Bu deformasyonun sebebini yer altı su düzeylerindeki azalmaya bağlı olabileceği gibi tektonik kökenli olabileceği de ifade edilmektedir. Ölçümler sonucundaki inceleme, deformasyon hızının 2016 yılından 2020 yılına kadar artarak sürdüğünü göstermiştir. 2019 ve 2020 yıllarına ait dengelenmiş yükseklik farklarına bakıldığında önceki deformasyon hızının iki kat arttığı anlaşılmıştır (Çalışkan 2021).

Yapılan diğer çalışmalarla Bolvadin ilçesinde oluşan yüzey deformasyonları için 2016 yılı ile 2020 yılları arasında beş kampanya hassas nivelman ölçüsü gerçekleştirilmiştir. Elde edilen verilere göre deformasyon hızları hesaplanmıştır (Tiryakioğlu vd. 2019, 2020, 2022).

2.2.3 InSAR

Son yıllarda fay hareketleri belirlenirken jeodezik çalışmalar öne çıkarak ayrı bir önem kazanmaktadır. GNSS tekniği için yatay konum bileşenlerinin belirlenme doğruluğu yüksektir. InSAR için ise düşey konum bileşeninin belirlenme doğruluğu yüksektir (Hanssen 2001). GNSS ve InSAR yöntemleri birlikte de kullanılabilir. Böylece düşey ve

yatay deformasyonlar daha hassas, daha doğru elde edilebilmektedir. InSAR yöntemi, birbirine çok yakın görüntüleme geometrileriyle elde edilen iki değişik radar görüntüsü arasındaki faz farkını hesaplar (Massonnet ve Feigl 1998, Hanssen 2001).

SAR görüntüleri ve DInSAR (Differential SAR Interferometry), yeryüzünde volkanik aktiviteler, yer altı su değişimleri, depremler, toprak kaymaları ve benzer etkilerle oluşan deformasyonların ölçülmesinde, gözlenmesinde ve incelenmesinde yararlanılan etkili birer araçtır (Hanssen 2001). Yüksek kaliteli diferansiyel interferogramlar, iki uydu geçişi sırasında yaklaşık 100 km² genişliğindeki alanlarda görülen kabuk deformasyonlarının haritasını oluştururlar. DInSAR teknikleri; sismik aktiviteler (Funning vd. 2005, Çakır vd. 2005, Atzori vd. 2009), volkanik aktiviteler (Lanari vd. 1998, Francis ve Rothery 2000), heyelanlar (Squarzone 2003, Bulmer vd. 2006), yer altı madenciliği (Baek vd. 2008, Ng vd. 2009) ve yer altı suyu çekilmeleri (Hoffmann vd. 2001, Strozzi vd. 2001) sebebiyle oluşan yer kabuğu deformasyonlarının gözlenmesinde başarıyla uygulanmıştır.

InSAR yönteminde çözünürlük temel kavramlardandır. Çözünürlük, iki objenin birbirinden ayırt edilecek şekilde kaydedildiği yer yüzeyindeki en kısa uzaklık şeklinde ifade edilebilir (Çakır 2003). Azimut ve menzil adları verilen iki önemli bileşeni vardır. Azimut ve menzil adlandırmaları yönlendirme için de kullanılmaktadır. Azimut, hava aracının uçuş yönünü belirtmektedir. Menzil ise hava aracından gerçekleştirilen kayıta gözlem yönünü göstermektedir. Diferansiyel SAR interferometri tekniğinden, bakış yönünde oluşan küçük hareketlerin tespit edilmesinde yararlanır.

Kentsel alanlardaki çeşitli yapılar, zamanla bir değişime uğramazlar. Kentsel alanlar zamansal dekorelasyon açısından kırsala göre daha sağlamdır. 1992 Landers, ABD (Amerika Birleşik Devletleri) depreminin meydana getirdiği yüzey deformasyonunun araştırılmasında Yapay (sentetik) Açıklık Radar İnterferometrisi ilk kez kullanılmıştır. Günümüzde ise yaygın bir şekilde çeşitli sebeplerle meydana gelen yeryüzü hareketlerini belirleyen uzay bazlı jeodezik bir tekniktir (Massonnet vd. 1993).

DInSAR tekniği, Avrupa Uzay Ajansı'na ait ERS-1 (European Remote Sensing Satellite) uydusunun fırlatıldığı 1992 yılından bu yana; başta depremler olmak üzere, volkanik

aktivitelerde, buzul çalışmalarında ve heyelan gibi diğer yer olaylarının araştırılmasında sıklıkla kullanılmaktadır. Aynı yöntemin kullanıldığı SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) araştırması sayesinde ise Dünya'nın 60° kuzey enlemiyle 60° güney enlemi arasındaki alanının SYM'si (Sayısal Yükseklik Modeli) oluşturulmuştur (Farr vd. 2007).

InSAR, yeryüzü deformasyonlarını ölçmede etkin bir yöntem olsa da kullanılabilirliği radar sinyalinin korelasyonuna ve atmosferik etkilere bağlıdır. Buna bağlı olarak, uzun sürede yavaş yavaş meydana gelen yüzey hareketlerinin geleneksel InSAR yöntemleriyle ölçülmesi kolay olmayabilir (Akarvardar vd. 2009). Ulaşılan SAR verileriyle gözlem yapılan yörede, faz korelasyonunun yeterli olmadığı şartlarda uygun görüntü çiftleri oluşmamaktadır. Uzun zamanda ağır ağır oluşan yeryüzü deformasyonlarının doğru gözlenebilmesi güçleşmektedir. Görüntü çiftleri değerlendirilirken bu duruma etki eden önemli faktörler; yörünge, zamansal değişim, geometrik dik baz uzunlukları, hava koşulları ile topografyadır. Zorlukların giderilmesi için çok zamanlı elde edilen görüntüler kullanılmış, Permanent/Persistent Scatterers InSAR (PSI) tekniği geliştirilmiştir.

Daimi Yansıtıcı InSAR (PSI), farklı zamanlarda toplanmış SAR verilerinin zaman serisi analiziyle yapılan en yeni InSAR inceleme tekniklerinden biridir (Ferretti vd. 2000, 2001). Bu tekniğin amacı, uydu verisi alınan farklı zaman dilimlerinde, devamlı yüksek yansıtıcı özelliği taşıyan noktaları yani PS'leri (Permanent/Persistent Scatterers) belirleyip, cm altı hassasiyetle gözlemek ve bağlı topografik yükseklikleri/deformasyonları kestirmektir. Her bir PS ölçümünün yüksek duyarlılıkla, bir referans noktaya göre konumu verilmesine rağmen gerçek ölçümün düşük ve belirsiz çıkma nedenleri; uydu yörüngesindeki belirsizlikler, aletsel problemler, radar sinyali yolundaki gecikmeler ve saçıcı noktanın merkez belirsizliğidir. PSInSAR, yüzey deformasyonlarının (heyelanlar, çökmeler gibi) belirlenmesine ve zaman içinde gözlenmesine yönelik güçlü bir yöntemdir. PS noktaları, binaların sağlamlığını, yer altı suyu düzeyindeki değişimlerin yüzeye yansımaları (çökme/kabarma), heyelanlar sebebiyle meydana gelen deformasyonları gösterebilir.

Tekrarlı geçiş interferometri yöntemi, geniş alanların yükseklik modelini oluşturmada ve yüzey deformasyonu görüntülemeye kullanılan bir tekniktir. Teknik, değişik zamanlarda alınmış, farklı baz uzunluklarındaki interferometrik SAR fazlarını kıyaslayarak m doğruluğunda SYM ve mm doğruluğunda deformasyonu tespit etmede kullanılır (Zebker vd. 1994, Gens ve van Genderen 1996). Ancak bitki örtüsünün olduğu yerler ve yeryüzündeki nesnelerin zaman içinde değişmesi zamansal korelasyon bozukluğuna sebep olmaktadır.

İnterferometrik yöntemi etkileyecek sınırlamaları elimine etmek için geliştirilen PSInSAR yönteminde n tane görüntü kullanılarak n-1 tane interferogram oluşturulmaktadır. Bu durumda mm/yıl doğruluğunda sonuçlara ulaşılabilmektedir (Colesanti vd. 2001). Yüksek uyumluluk taşıyan hedefleri tespit etmek için çoklu interferogram kümesi meydana getirilir. Bir adet master görüntüyle oluşturulan diferansiyel interferogram kümesi tasarlanır. İnterferogramlar oluşturulurken topografya etkisini kaldırabilmek amacıyla SYM kullanılmalıdır. Eş yükseklik eğrileriyle ya da stereo yöntemle üretilen SYM'ler bunun dışında InSAR görüntülerinden de oluşturulabilir. Ancak burada baz uzunluğu önemlidir. Çünkü SYM için kısa baz uzunluğu kullanılırken, PSInSAR tekniğinde kritik değere kadar baz uzunluğunun artması, piksel çözünürlüğün altında kalan saçıcıların faz ölçümüne olanak sağlar (Perrisin ve Rocca 2006).

Colesanti vd. (2003a) tarafından yapılan çalışmada, aynı bölgeye ait RADARSAT (Radio Detection and Ranging Satellite) ve ERS uyduları kullanılmıştır. PSInSAR araştırması yapılmış, bunlar karşılaştırılarak RADARSAT görüntülerinin PS analizi için kullanılabilirliği incelenmiştir. RADARSAT uygulamasında 2001-2002 yıllarında yalnız 12 standart ışın modunda (S1) görüntü kullanılmış, aynı bölgede 1992–2000 yıllarında 40 adet de ERS görüntüsü değerlendirilmiştir. Görüntüler Tokyo şehrinde 6.5 x 9 km²'lik geniş bir alanı kapsamaktadır. PSInSAR analizi neticesinde 25-35 PS/km² üretilmiştir. RADARSAT görüntüsünden 1300 PS noktasına ve ERS görüntüsünden 2000 PS noktasına ulaşılmıştır. Yeterli RADARSAT görüntüsü bulunmamasına karşın sonuçlar, deformasyon çalışmalarında RADARSAT'ın güvenle kullanılabileceğine işaret etmektedir.

Hooper vd. (2007), PS İnterferometri tekniğine değişik bir bakış açısıyla yaklaşmışlardır. Gerçekleştirdikleri yüzey deformasyonu değerlendirmesinde StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers) tekniğini 2007 yılında ilerletmişlerdir. Teknik, bina tipi yapılar olsa da olmasa da, bütün arazileri inceleyebilmek için düşük faz değişimindeki pikselleri tanımda interferometrik fazın mekânsal korelasyonundan yararlanmaktadır. Çalışma alanı olarak Galapagos adasındaki tek aktif volkan olan Alcedo volkanı seçilmiştir. 1992-1999 yılları arasında yükselen yörüngede alınmış 14 ERS-2 ile alçalan yörüngede alınmış 14 ERS-2 ve 1 ERS-1 olmak üzere 29 adet görüntü üzerinde çalışılmıştır. Alçalan konumda -15 ile +30 arasında mm/yıl çökme, yükselen konumda ise 0-20 mm/yıl çökme belirlenmiştir. Hooper vd. (2007) ayrıca 12 interferogramın PS değerlendirmeleri için yeterli olduğunu da ifade etmişlerdir.

Değişik yörüngelerin izlerinde alınan görüntüleri incelemek için Perissin vd. (2007) Şanghay bölgesindeki ERS ve ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) görüntülerinden yararlanmışlardır. Bölgenin ASAR görüntülerinin yetersiz olması sebebi ile tek yörünge izinde alınan ERS görüntüleri ile iki değişik yörünge izinde alınan 14 ve 12 ASAR görüntüsü değerlendirilmiş, ERS-ASAR kombinasyonu kullanılarak şehir alanının yer değiştirme konusu üzerinde durulmuştur. Seçilen bir ERS görüntüsü birinci görüntü kabul edilerek ERS ve ASAR görüntüleri bu görüntüyle birleştirilmiştir. Bu yöntemin bir dezavantajı, farklı algılayıcılardan elde edilen görüntüler olduğu için korelasyonun düşük çıkmasıdır. İki veri kümesi korelasyonlu bir şekilde birleştirilemediği durumlarda veri kümeleri tek tek değerlendirilir. Bu araştırmada da ASAR verileri için iki adet birinci (master) görüntü kullanılmıştır. Farklı yörüngelerde alınan ASAR verileri kendi aralarında incelenmiştir. Alçalan yörüngede kaydedilmiş ERS görüntüleri ile yaklaşık 30000 PS noktasına ulaşılmıştır. Yükselen yörüngede alınmış iki ASAR izinden oluşturulan PS uygulamasında 400 km²'lik alanda 5000 nokta belirlenmiştir. İki uygulamada da 0 ile -28 mm/yıl arasındaki yer değiştirmeye korelasyonlu biçimde ulaşılmıştır. Bu araştırmada, çoğunlukla tek yörünge izinde alınan görüntülerle uygulanan PSInSAR yöntemine karşı çoklu yörüngede alınan görüntülerin de kullanılabileceği ifade edilmiştir.

İran'ın Haraz vadisindeki Kahrod heyelanında görülen yüzey hareketlerinin zaman içerisindeki değişimi incelenmiştir (Pevret vd. 2008). Araştırmada, GNSS yöntemi ile 3 değişik set halinde ölçüler yapılmıştır. Önce sekiz noktalı bir ağ, 1 yıllık periyotlar halinde 4 kez ölçülmüştür. Bu ölçümlerle heyelandaki kayma miktarları doğru bir şekilde hesaplanmış ve heyelanın mekanizması belirlenmiştir. Ardından 57 nokta ile ağ sıkılaştırılmış ve 6 ayda 2 kere hızlı statik yöntem ile ölçülmüştür. Bu işlemlerle heyelan alanındaki yüzey deformasyonu ortaya çıkarılmıştır. Son çalışma olarak 1 yıl devamlı GNSS ölçümü yapılmış, yağmur suları ile deformasyon miktarı kıyaslanmıştır. GNSS çalışmasıyla birlikte aynı tarihleri içindeki ENVISAT (European Environment Satellite) radar diferansiyel interferogramlar değerlendirilmiştir. Bu jeodezik veri, güncel kayma zonunun ve yüzey hareketlerinin zamansal ve uzaysal olarak hassas bir biçimde belirlenmesine imkân vermektedir. Saha gözlemleri ve jeodezi kombinasyonu ile Kahrod heyelanının geçmişteki ve günümüzdeki hareketi duyarlı bir şekilde belirlenmiştir. Ölçümler sırasında deformasyon çok az olduğundan yağmur suları ile deformasyon arasındaki ilişki için gelecekteki verilere de ihtiyaç duyulmuştur. Bu yüzden elde edilen verilerle sağlıklı bir değerlendirme yapılamamıştır. Araştırmada, GNSS'in ve InSAR'ın birlikte kullanılması kütle kaymalarının gözlenmesinde yararlı olsa da asıl yararının büyük aktivitelerin (deprem vb.) gözlenmesinde ortaya çıktığı vurgulanmıştır.

InSAR tekniği; deprem kaynaklı yüzey hareketlerinin incelenmesinde, şehir alanlarında oluşan çökmeler gibi uzun zamanda meydana gelen hareketlerin tanımlanmasında son yıllarda tercih edilmektedir. Bu nedenle daha fazla görüntü olduğu için ERS-1 ve ERS-2 görüntüleri kullanılmaktadır. Bunları ENVISAT-ASAR, JERS (Japanese Earth Resource Satellite) ve RADARSAT-1 algılayıcıları takip etmektedir. Günümüzde ise bu uydu görüntülerinin yerini alan ALOS (Advanced Land Observation Satellite), RADARSAT-2, PALSAR (Phased Array L-band SAR), TerraSAR ve COSMO-SkyMed (Constellation of small Satellites for Mediterraneanbasin Observation) uydu verilerinden yararlanılmaya başlanmıştır (Arıkan vd. 2010, Yen vd. 2011).

Yapılan çalışmalarda fay boyunca biriken yüzey deformasyonu ile orta büyüklükteki depremlerin yüzey deformasyonu Yapay Açıklık Radar İnterferometrisi (InSAR) tekniğiyle ortaya çıkartılmıştır. InSAR sonuçlarının modellenmesi ile fayların ve

depremlerin parametrelerine ulaşılmıştır. Bu çalışmaların ortaya koyduğu önemli sonuçlardan biri de yüzey kırığı oluşturmeyen depremlerin; mekanizmaları, yerleri ve diğer parametreleri konusunda yeterli sismik ağların bulunmadığı bölgelerde belirlenememesidir. Bundan dolayı orta-büyük ölçekteki depremlerin kaynak parametrelerini ortaya çıkarmak ve bölgede yarattığı gerilme değişimlerini hesaplayabilmek için InSAR yönteminden yararlanılabilir (Çakır vd. 2005, Atzori vd. 2009).

Kısa baz uzunluğu (SBAS) teknikği, bir ana görüntüyü değil görüntü çiftlerini belirler. SBAS'ın PSI tekniğinden farkı, çözümleme hatalarını azaltmak amacıyla küçük zamansal ve uzaysal baz uzunluklarından yararlanmasıdır (Hooper 2008, Crosetto vd. 2013, Calò vd. 2015, Hu ve Wu 2018).

Deformasyon araştırmalarında, üç InSAR yönteminden yararlanılmaktadır. Bunlar DInSAR, PSInSAR ve SBAS yöntemleridir. Deprem sebebiyle meydana gelen deformasyon araştırmalarında deprem öncesi, deprem anı ile deprem sonrası aşamalarında InSAR yöntemiyle çok sayıda araştırma yapılmıştır. Örneğin; Landers depreminde (Massonnet vd. 1993), İzmit depreminde (Ergintav vd. 2002, Şengün 2009), Tibet depreminde (Ryder vd. 2007), Bam depreminde (Fialko vd. 2005) ve başka araştırmalarda (Atzori ve Antonioli 2011, Elliot vd. 2012, Shirzaei ve Bürgmann 2013). Bu araştırmalarda InSAR ölçülerinden yararlanarak yer kabuğu hareketleri belirlenebilmiştir.

Yer altı suyunun akifer sistemlerinden aşırı miktarda çıkarılması, arazi yüzeyi deformasyonlarına sebep olmaktadır. Bu jeolojik durum otoyollar, binalar ve yer altı yapıları gibi yerleşim yeri bileşenlerine önemli zararlar verebilecek uzun, yavaş ve kalıcı bir süreçtir. Son zamanlarda yapılan birçok araştırma, bazı yerleşim yerlerinde, yer altı suyunun fazla kullanımından kaynaklı önemli zemin oturması yaşandığının belgesi niteliğindedir (Aslan vd. 2019). Zemin oturması, genellikle, geçirimli hazne kayanın sıkışmasının bir sonucudur. Konsolide olmayan alüvyon veya havza dolgulu akifer sisteminden çok fazla yer altı suyu çekildiğinde meydana çıkar. Endonezya'daki (Du vd. 2018), İran'daki (Motagh vd. 2008, Khorrami vd. 2020) ve İtalya'daki (Peduto vd. 2015,

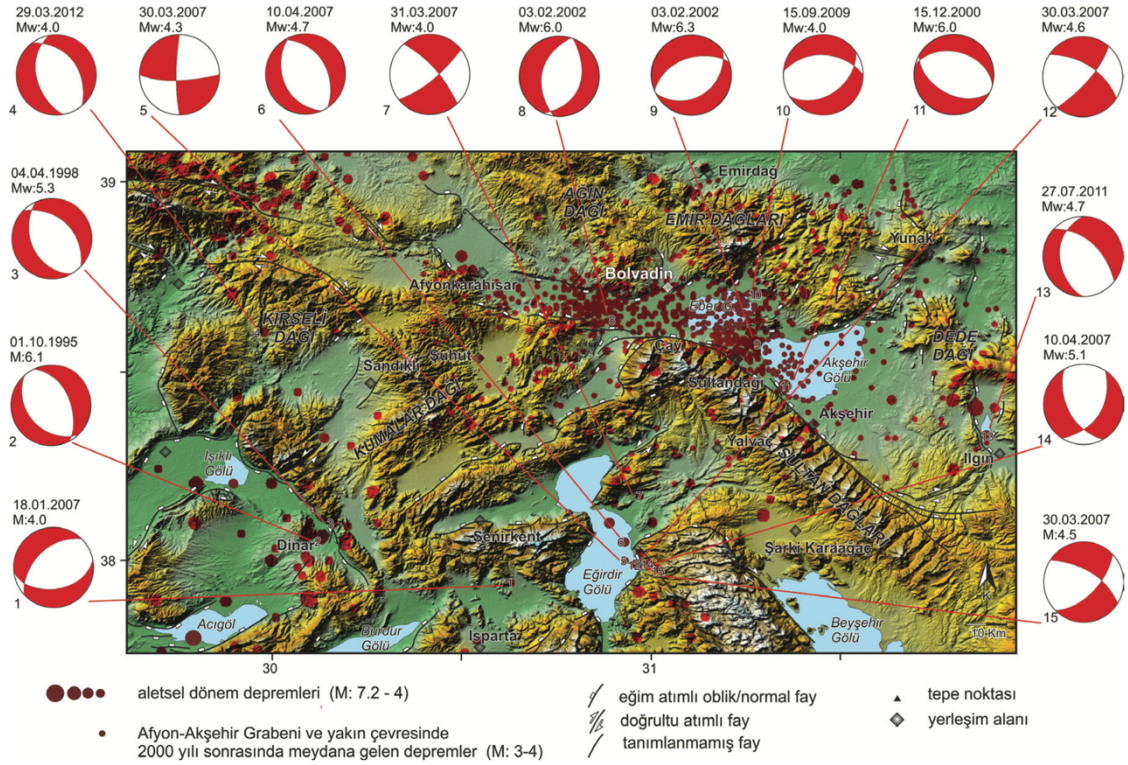
Rosi vd. 2016) şehirlerde yer altı suyuyla ilgili birçok zemin oturması durumu gözlenmiştir. Meksika (Castellazzi vd. 2017, Figueroa-Miranda vd. 2018), ABD (Bekaert vd. 2017, Riel vd. 2018), İspanya (Fernandez vd. 2018) ve Türkiye (Aslan vd. 2019, İmamoğlu vd. 2019, Orhan 2021) de yer altı suyunun çekilmesiyle zemin oturması sorununu yaşayan ülkeler arasındadır. Zemin oturmalarının mekânsal ve zamansal boyutları hakkında bilgi edinmek, su yönetimi programlarını geliştirmek, arazi yerleşimleri ve altyapısı ilgili tehlikeleri azaltmaya yönelik önlemler almak için gereklidir (Haghshenas ve Motagh 2019). Türkiye'de İstanbul, Afyon ve Bursa şehirleri için yer altı suyunun fazla kullanılmasına bağlı oluşan yüzey deformasyonları yani zemin oturması ve kırıklar gibi olumsuzluklar araştırmacılar tarafından bildirilmiştir (Özkaymak vd. 2017, Aslan vd. 2019, İmamoğlu vd. 2019).

Yeryüzünde oluşan değişikliklerin zamanla ve uydu bakış yönüyle yani LOS'la (Line of Sight/radarın bakış yönü) ilgili sorunlar ortaya çıkarması, InSAR'ın kullanılabilirliğini kısıtlamaktadır. Ölçüm yapmanın elverdiği şartlarda yer değiştirme miktarını hesaplamak amacıyla sinyaller kullanılmaktadır. Atmosferik olaylardaki değişiklikler sebebiyle iki uydu yörüngesinde ve yüzey yüksekliğinin tespiti sırasında sinyallerde gürültü meydana gelmektedir (Hooper 2008). Hataların miktarını öğrenmek ve çok zamanlı InSAR teknikleriyle ulaşılan neticeleri doğrulamak gerekmektedir. Bunun için neticelerle araştırma bölgesinde yapılmış GNSS ölçmeleri kıyaslanmaktadır (Gourmelen vd. 2010, Çakır vd. 2012, Mirzaee vd. 2017).

3. BÖLGENİN TEKTONİĞİ

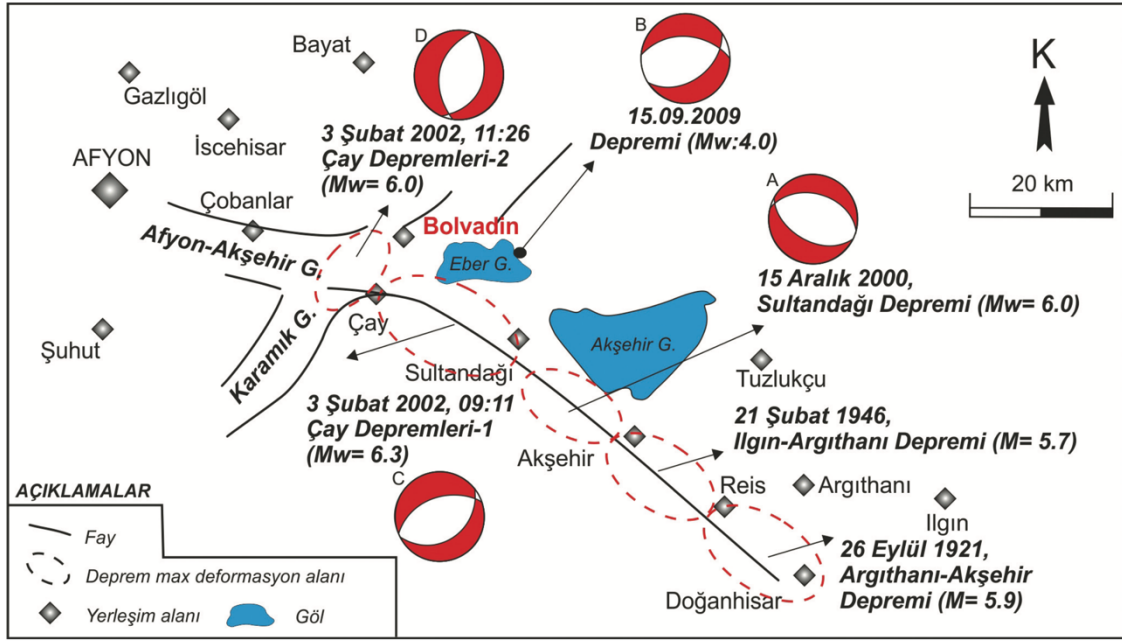
3.1 Afyon-Akşehir Grabeni

ASFS'nin güneydoğu yönünde bulunan AAG (Afyon-Akşehir Grabeni), kuzeydoğudaki Orta Anadolu ile güneybatıdaki Isparta açısını birbirinden ayırmaktadır. Faal şekilde büyüyen kıtasal bir rift olan bu alan 4 km ile 20 km arası genişlikte ve 130 km uzunluktadır (Koçyiğit ve Özacar 2003). Faylar, AAG'yi kuzeyden ve güneyden sınırlandırmaktadır. 2011 yılında, Türkiye Diri Fay Haritası'nda, grabenin kıyısındaki faylar diri fay grubunda yer almıştır (Emre vd. 2011). Yaklaşık 30 km uzunluğundaki ÇFZ (Çobanlar Fay Zonu), Afyonkarahisar ilinin doğusundaki kuzey sınır faylarındandır. Bu fay Akçin Mahallesi'nin doğusundan başlar, Bolvadin ilçesinin batısına kadar BKB-DGD yönünde devam eder. Fay, Akçin Mahallesi ile Çobanlar ilçesi arasında çizgisel uzanımdadır. İyi muhafaza edilmiş çok sayıdaki fay düzlemi, zonun eğim atımlı normal karakterini de göstermektedir. AAG'yi güneyden sınırlandıran IsFZ (Işıklar Fay Zonu) da birbirine paralel, basamaklı görünümde faylardan meydana gelir (Şekil 3.1). Bu fay zonu, Büyük Kalecik kasabasından başlar Çobanlar ilçesindeki Heybeli kaplıcasına kadar yaklaşık 35 km boyunca sürer. Normal/oblik atımlı faylardan oluşur. AAG ve yakın çevresinin jeoloji haritası aşağıda verilmiştir (Şekil 3.1).



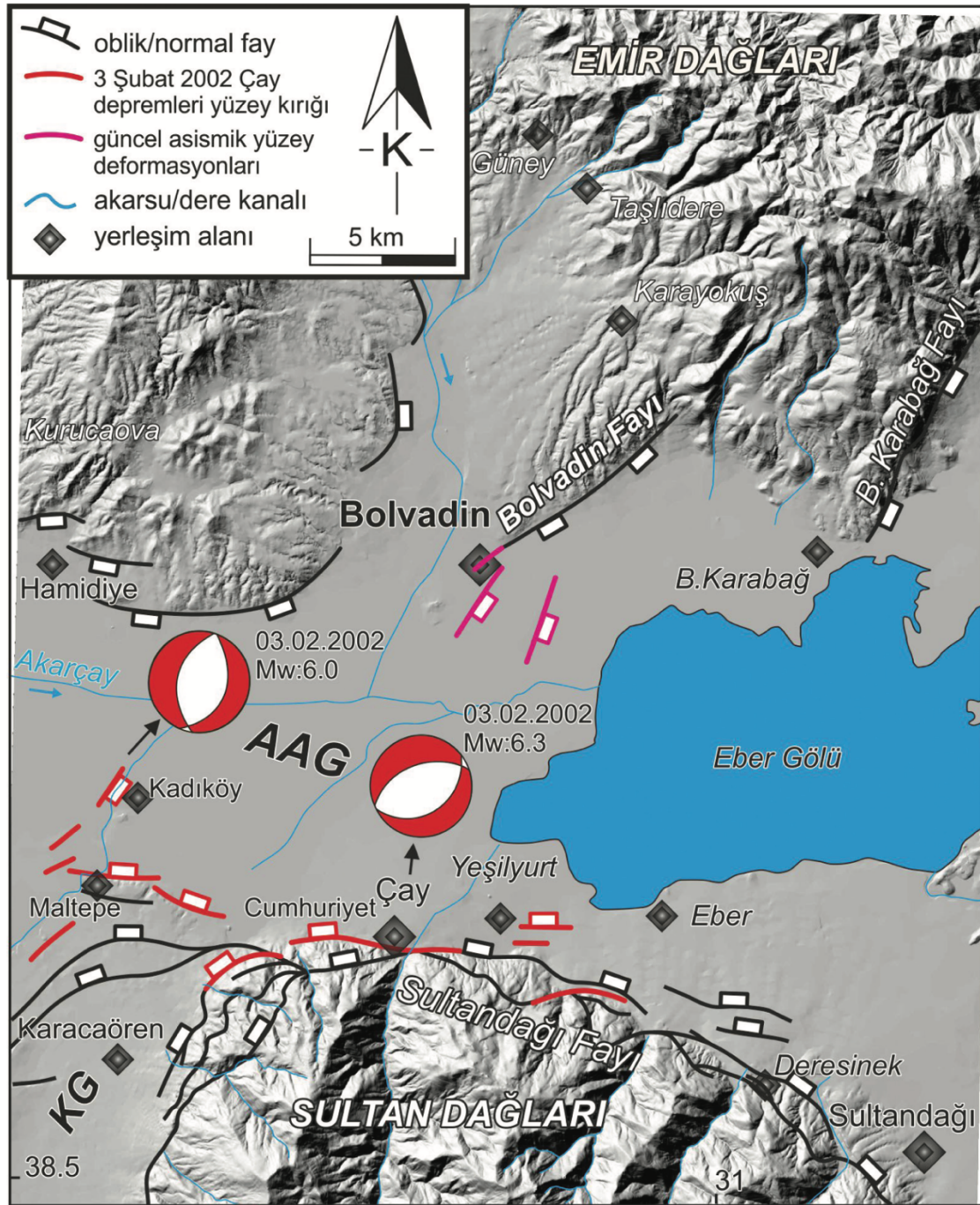
Şekil 3.2 Afyon-Akşehir Grabeni sismotektonik haritası (Özkaymak vd. 2017).

AAG'de, 1911'de yaşanan ve Bolvadin ilçesi ile Çay ilçesine zarar veren deprem sebebiyle Heybeli Kaplıcası'ndan daha önce bulunmayan sıcak su çıktığı ifade edilmektedir (Pınar ve Lahn 1952). Belgeler incelendiğinde bu depremin şiddetinin VIII olduğu anlaşılmaktadır (Ergin vd. 1967). İlerleyen zamanda AAG'de görülen orta büyüklükteki depremlerin zaman ve dışmerkez dağılımlarına bakıldığında, Sultandağı Fayı'nda deprem hareketliliği olduğu görülmektedir (Tiryakioğlu vd. 2015). 1921, 1946, 2000 ve 2002 yıllarında Argıthanlı-Akşehir, Sultandağı ve Çay ilçelerinde yaşanan depremler nedeniyle yüzey kırıkları meydana gelmiştir. Geçtiğimiz yüzyıldaki yıkıcı depremlerin Sultandağı Fayı'nda GD yönünden KB yönüne zamanla ilerleyişini gösteren harita aşağıdadır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Sultandağı Fayı'nda oluşan yıkıcı depremler (Özkaymak vd. 2017).

2002 yılındaki Çay depremlerinde, 30 cm'e ulaşan düşey yönlü yer değiştirme gözlenmiştir. Ayrıca ortalama 26 km'lik yüzey kırığı meydana gelmiştir (Akyüz vd. 2006). Depremlerin ilki 6.3 büyüklüğünde, ikincisi 6 büyüklüğündedir. Yaşanan depremlerdeki odak mekanizma çözümleri incelendiğinde sahadaki verileri desteklediği anlaşılmıştır (Özden vd. 2002). Bu çözümler, iki depremi üreten fayın da eğim atımlı normal karakterde çalıştığını göstermektedir. Birinci depremin DKD-BGB; ikinci depremin ise KKD-GGB yönlü fayların kırılmasıyla geliştiğine işaret etmektedir (Şekil 3.4).

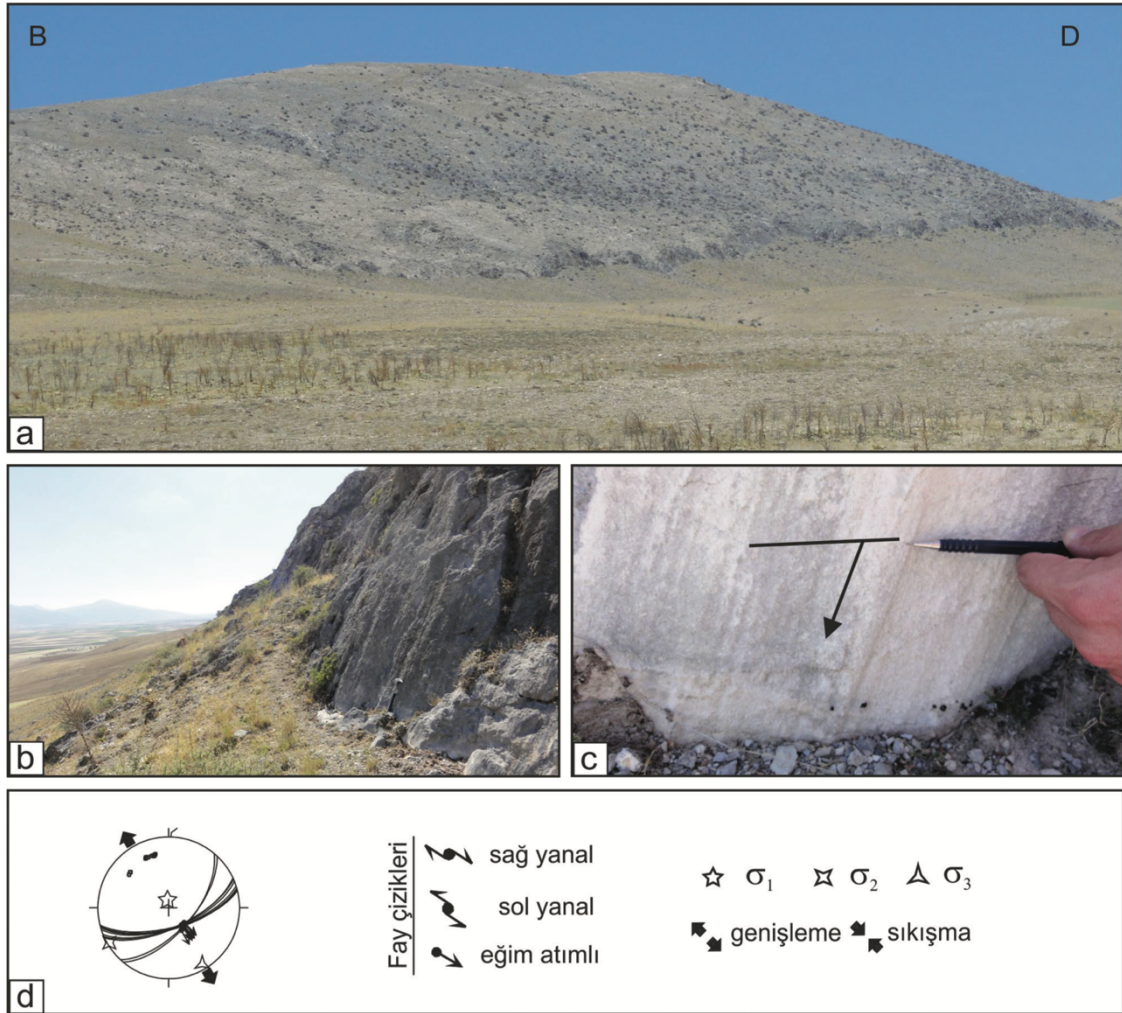


Şekil 3.4 Bolvadin ve çevresinin diri fay haritası. Kısaltmalar; AAG: Afyon-Akşehir Grabenini, KG: Karamık Grabenini göstermektedir (Özkaymak vd. 2017).

Son depremler, deprem ilerleyişinin nasıl devam edeceğini tartışmaya açmıştır. Araştırmacılar, yakın zamanda, fayın Çay'ın batısındaki bölümünde yaşanabilecek sismik riskin yüksek ve önemli olduğunu vurgulamışlardır (Özden vd. 2002, Akyüz vd. 2006).

3.3 Fay Yapısı

Bolvadin Fayı, Eber Gölü'nün bulunduğu graben tabanı kuzeyden sınırlandıran kıyı faylardan biridir. Bu fayın uzunluğu 10 km'dir. KD-GB doğrultulu faal bir faydır. Bolvadin Fay'ı kuzeydoğu yönünde morfolojik olarak belirgin bir çizgisellikte sürer (Resim 3.1 a ve b). Güneybatıda ise Bolvadin ilçesinden geçer. Sonrasında izlenemez. Fay düzlemlerindeki kinematik göstergeler, Bolvadin fayının eğim atımlı normal fay yapısına vurgu yapmaktadır. Elde edilen sonuçlar, Bolvadin Fayı'nı etkileyen gerilme rejiminin KB-GD yönlü saf genişleme biçiminde olduğunu göstermektedir.



Resim 3.1 Bolvadin'de yapılan jeolojik saha çalışması (Özkaymak vd. 2017).

3.4 Bolvadin Yüzey Deformasyonları

Alüvyon zeminde kurulmuş olan Bolvadin ilçesinde, bazı imarlı alanlarla bazı imarsız kesimlerde, dört yıldan bu yana önceden bulunmayan deformasyonların meydana geldiği, gelmeyi de sürdürdüğü izlenmiştir. Bu bölgedeki çalışmaların sonucunda, yıkıcı deprem meydana gelmese de 300 m ile 2 km arasında değişen uzunluklarda, çizgi biçiminde giden çatlak ve yarıklar belirlenmiştir. İncelemeler, yüzey deformasyonu hattında, güneydoğu yönündeki bloğun 10 cm ile 40 cm arasında düştüğünü göstermektedir. Yerleşim alanında görülen deformasyonların kuzeyde kalanı Bolvadin Fayı'nın GB yönünde devamını oluşturmaktadır (Şekil 3.4). Deformasyonlar, bazen 2 cm ile 70 cm arasında değişen genişliktedir. Bazen de iki metreye ulşan derinlikteki yarıklar biçiminde ilerlemektedir. Bolvadin yerleşim alanında izlenen yüzey deformasyonları aşağıda yer almaktadır (Resim 3.2) (Özkaymak vd. 2017).



Resim 3.2 Bolvadin ilçesinde gözlenen yüzey deformasyonları.

Saha araştırmalarında, yerleşim yerlerindeki yüzey deformasyonları üzerinde bulunan bazı yapılarda önemli hasarlar olduğu, yer altı yapılarının bozularak kırıldığı görülmüştür. Zondaki yapılarda izlenen deformasyonlar; çoğunlukla düşen blok yönünde

eğilmeler, duvarlarda çatlaklar ve yarıklar ile rotasyonel hareketler biçiminde tespit edilmiştir (Resim 3.3).



Resim 3.3 Bolvadin ilçesinde yapılarda gözlenen deformasyonlar.

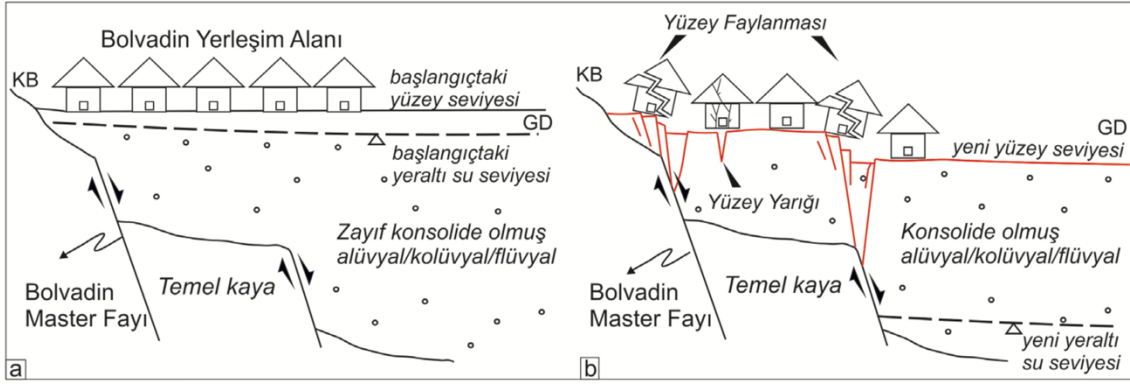
Deprem olmadan oluşan yüzey deformasyonları, araştırmalarda yüzey faylanması ve yüzey yarıkları olarak ikiye ayrılmıştır (Pacheco-Martínez vd. 2013, Hernández-Madrigal

vd. 2014). Araştırmalara bakıldığında, yüzey faylanmaları sebebiyle oluşan deformasyon, su çekilmeden önce bulunan bir fayı izler. Yüzey yarıkları ise çoğunlukla drenaj kanallarına paralel bir ilerleme gösterir. Yüzey faylanmaları düşey yer değiştirmeye yol açar. Yüzey yarıklarında düşey yer değiştirme olmaz ama deformasyon derinlere gider. Bu yarıklara dik yönde açılmalar olur. Ayrıca yarıklar derine gitmeden yüzey yakınlarında sönümlenir. Deformasyonun iki türünde de meydana gelen kırıklara ve yarıklara dolan yüzey suları nedeniyle erozyonel süreçler ortaya çıkar. Yüzey faylanmaları boyunca yer altı suyunun azalmasına bağlı olarak gelişen oturmalar nedeniyle oluşan düşey yer değiştirmelerde tektonik krip etkili olabilir. Yüzey yarıklarında ise tektonik krip görülmez. Bolvadin ilçesinde izlenen asismik yüzey deformasyonlarının sınıflanması gösterilmiştir (Çizelge 3.1). Deformasyon hattı 1 km'den, meydana gelen sarplıkların yüksekliği ise 0.5 metreden fazladır.

Çizelge 3.1 Asismik yüzey deformasyonlarının sınıflanması (Özkaymak vd. 2017).

Bolvadin İlçesinde İzlenen Asismik Yüzey Deformasyonları	
Yüzey Faylanması	Yüzey Yarıkları
Deformasyon, var olan fayı izler.	Derinlere inmezler.
Düşey yer değiştirme görülür.	Drenajlara paralel ilerlerler.
Tektonik krip gelişebilir.	Düşey yer değiştirme görülmez.
Sarplıklar 0.5 m'den fazladır.	Yarıklara dik yönde açılmalar olur.
Deformasyon uzunluğu 1 km'den fazladır.	Tektonik krip gözlenmez.
Borulanma olabilir.	Borulanma olabilir.

Bolvadin ilçesi ile civarında, son zamanlarda yaşanan kuraklığın yanında aşırı miktarda yer altı su çekimleri yapılmıştır. Yer altı su düzeyinin 10 yıl içinde ortalama 20 m azaldığı ifade edilmektedir. Graben kıyısında bulunan Bolvadin Fayı'nın düşen bloğunda, yer altı su düzeyinin azalmasıyla ilişkili güçsüz konsolide olmuş alüvyal çökellerde izlenen sıkışmalar ve oturmalar deformasyonların sebebidir. Toplanan veriler, Bolvadin ilçesinde izlenen yüzey deformasyonlarının asismik yüzey faylanması biçiminde olduğunu göstermektedir. Bazen de yüzey yarıklarının geliştiğini ortaya koymaktadır (Şekil 3.5) (Özkaymak vd. 2017).



Şekil 3.5 Bolvadin yerleşim alanında gözlenen yüzey faylanması ve yüzey yarığı (Özkaymak vd. 2017).

4. ZAMAN SERİSİ ANALİZİ ve FİLTRELEME

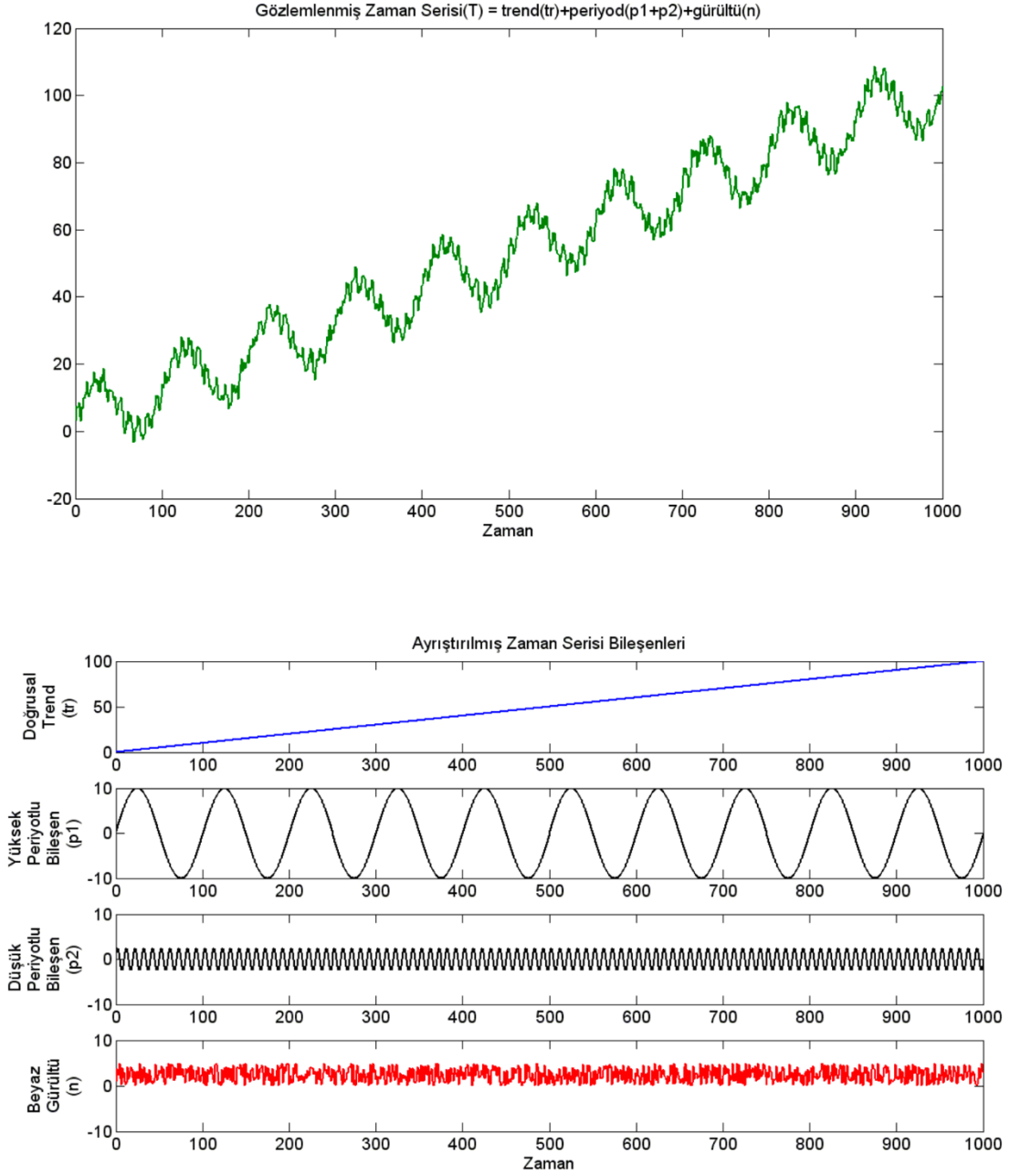
4.1 Zaman Serisi

Yapıları ve yeryüzündeki deformasyonları konu edinen araştırmalar, değişik araçlarla geometrik değişimlerin ölçülmesini esas alır. Temelleri matematiğe ve istatistiğe dayanan zaman serileri, yapılan ölçümlerin değerlendirilmesini sağlar (Pytharouli vd. 2004).

Zaman serisi, belli zamanda yapılan ölçümler sırasındır. Zaman serisinden elde edilen veriler, değişkenlerin dönemden döneme art arda izlendiği sayı değerleri konusunda fikirler verir. İzlenen verilerin zaman akışında art arda gelmesi gerekmez. Düzenli zaman dilimlerinde sıranın ilerleyişini gözlemek sağlıklı değerlendirme bakımından önem taşımaktadır (Sevütekin ve Nargeleçekenler 2005).

Zaman serileri, ortalamadan gösterdikleri sapmalar açısından iki başlıkta sınıflandırılmaktadır. Bunlar, durağan ve durağan olmayan serilerdir. Analizi yapılan zaman serisinin trendi ve varyansı benzer değişme göstermeyebilir. Periyodik iniş çıkışlardan arınmış olabilir. Bu özelliklerden birini taşıyan serilere durağan zaman serileri denir. Durağanlık kavramı, zaman serilerinde çok önemlidir. İstatistiki sonuçlara durağan zaman serileriyle ulaşılabilir. Durağan olmayan zaman serileri ise değerlendirme yapılabilmek için öncelikle durağan hale getirilir (Akdi 2003).

Zaman serilerinde, farklı zaman noktalarındaki gözlemler arasında bulunan ilişki incelenmektedir. Buna göre, bir zaman serisini meydana getiren bileşenler belirlenmelidir. Bir zaman serisinde üç bileşen vardır. Bunlar; trend, periyodik ve stokastik bileşendir.

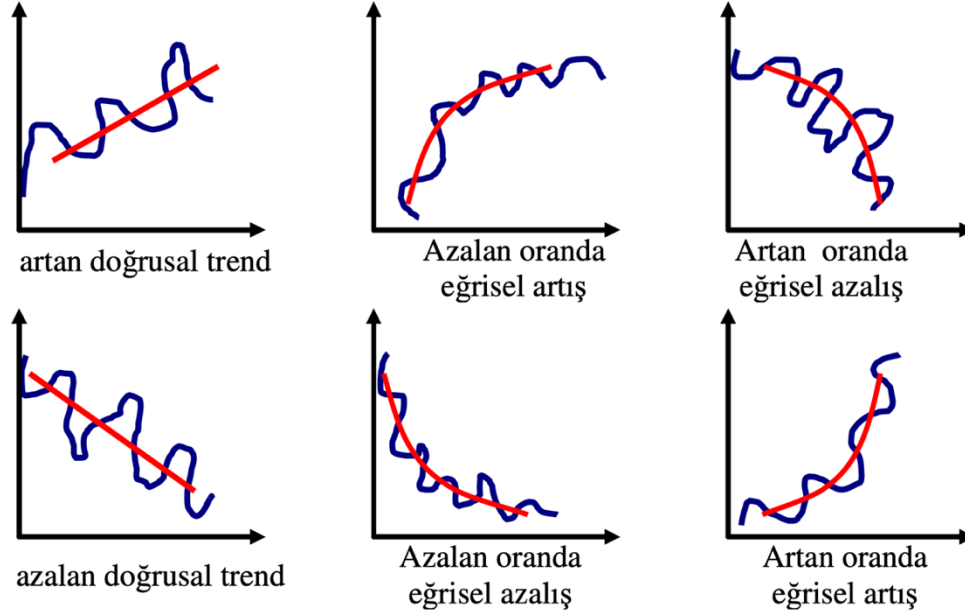


Şekil 4.1 Zaman serisinin bileşenleri (Yiğit 2010).

Gözlenen bir zaman serisinin ayrıştırılmış bileşenleri Şekil 4.1’de gösterilmektedir. Üstteki çizim orijinal zaman serisini, alttaki çizimler ise serideki ayrıştırılmış trendi, periyodik sinyali ve rasgele gürültüleri belirtmektedir.

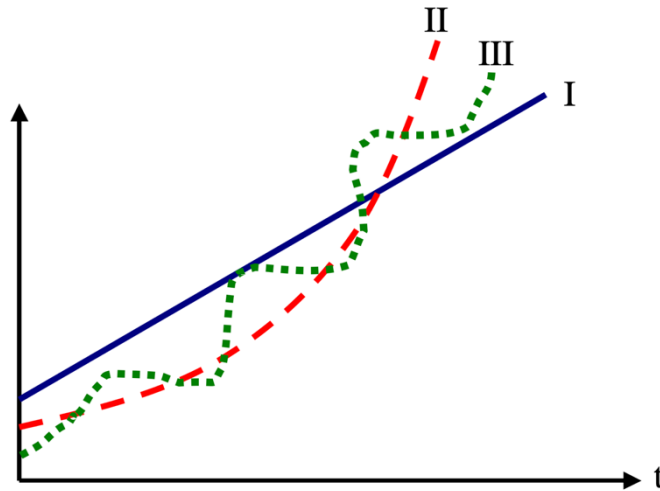
Trend bileşeni, değişkenin uzun dönem hareketini temsil eder. Trend etkisini bulunduran seri, ilerleyen zamanda çoğalan ya da eksilen görüntü taşır. Trend, zamanın çoğalan veya

eksilen fonksiyonudur. Fonksiyon, zamana bağlı olarak ya doğrusal olabilir ya da doğrusal olmaz. Şekil 4.2, gerçekleşebilecek eğrisel ve doğrusal birkaç trend şeklini göstermektedir (Özek 2010).



Şekil 4.2 Eğrisel ve doğrusal trend şekilleri (Yiğit 2010).

Bir zaman serisindeki trendle, iki durumda karşılaşabiliriz. Deterministik trend, devamlı artış ya da devamlı azalış belirtir. Zaman içinde artış eğiliminde olan ama düşüşlerin de görüldüğü trend ise stokastik trend adını alır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Deterministik trend (I, II) ve stokastik trend (III) (Yiğit 2010).

Periyodik hareketler, uzun dönemli trend eğrisi çevresindeki artış ve azalışlarla meydana gelen iniş çıkışlardır. Rassal değişiklikler ise zaman serisinde trend ve periyodik bileşenler çıkarılınca kalan değişimlerdir.

Bir zaman serisi üç bileşenden meydana gelmektedir. Bunlar; (T) trend, (C) periyodik hareketler ve (R) rassal değişikliklerdir. Üç bileşene göre toplamsal model ya da çarpımsal model bulunmaktadır. Eşitlik (4.1) ve (4.2)'de modeller gösterilmiştir.

$$X = T + C + R \quad (4.1)$$

$$X = T \cdot C \cdot R \quad (4.2)$$

Bileşenlerin biri tespit edildiğinde, bu bileşeni zaman serisinden çıkarmak modelin toplamsallığı ya da çarpımsallığı açısından değişiklik meydana getirecektir (Yiğit 2010).

4.2 Stokastik Süreç

Stokastik süreçler, zaman serilerindeki olasılık modellerinin farklı bir şeklidir. Rassal süreç ile stokastik süreç anlamdaş kavramlardır.

İzlenen zaman serisi $y_t, t = 1, 2, \dots, T$ stokastik süreç adı verilen teorik sürecin oluşması biçiminde kabul edilir. Zaman serisi değerlendirmelerinin asıl hedefi, izlenen serideki bilgiler kullanılarak stokastik sürecin nitelikleri ya da temel unsurları ile ilgili sonuçlara ulaşmaktır. Değerlendirmedeki başlangıç noktası çoğunlukla belli özet istatistikleri formül haline getirmek, ama esas hedefse verilerden bir model oluşturarak serinin yapısı hakkında bilgi vermektir.

Stokastik süreci anlatmanın bir şekli, $t_1, \dots, t_n$ herhangi bir seti için $y_{t_1}, \dots, y_{t_n}$ birleşik olasılık dağılımını tanımlamaktır. Stokastik süreci anlatmanın diğer şekli momentlerini oluşturmaktır. Ortalama, varyans ve otokovaryans fonksiyonları adları verilen birinci ve ikinci momentler önemlidir. y_t değişkeninin birinci ve ikinci momentleri ya da ortalama ve varyansı,

$$\mu_t = E(y_t) \quad (4.3)$$

$$\sigma_t^2 = Var(y_t) = E(y_t - \mu_t)^2 \quad (4.4)$$

y_{t_1} ve y_{t_2} arasındaki otokovaryansı,

$$\gamma_{t_1, t_2} = Cov(y_{t_1}, y_{t_2}) = E[(y_{t_1} - \mu_{t_1})(y_{t_2} - \mu_{t_2})] \quad (4.5)$$

biçiminde gösterilebilir.

Bir serinin durağan seri olabilmesi için zaman serisinin ortalamasında ve varyansında sistematik bir değişimin bulunmaması, zaman serisinin düzenli periyodik değişimler göstermemesi gerekmektedir. Durağan bir süreçte iki dönem arasında kovaryans hesaplanır.

Durağan zaman serileri, zaman serilerindeki olasılık teorilerinin önemli bölümüdür. Zaman serisinde modelleri daha iyi hale getirebilmek, belli stokastik sürecin zamanla değişiklik gösterip göstermediğinin bilinmesini gerektirir. Süreç durağan değilse, stokastik süreç zaman içinde özelliklerini değiştiriyorsa, serinin geçmişte olsun gelecekte olsun zaman dilimlerini basit cebirsel modelde ortaya koymak genellikle güçtür. Süreç durağansa, stokastik süreç zaman içinde değişiklik göstermiyorsa, önceki bilgilerden çıkarılabilecek sabit katsayılı denklem sayesinde süreç modeli oluşturulabilir (Yiğit 2010).

4.3 Korelasyon ve Otokorelasyon Fonksiyonları

Korelasyon, iki rassal değişken arasındaki bağı yönünü, gücünü gösterir. Korelasyon katsayısı ise bağımsız değişkenler arasındaki bağı yönünü, büyüklüğünü ifade eder. Eksi bir ile artı bir arasında bir değer alır. Direk yönlü doğrusal bağı artı değerler, ters yönlü doğrusal bağı eksi değerler gösterir. Değişkenler arasında doğrusal bir bağı olmadığı durumda korelasyon katsayısı sıfırdır. Bağımsız değişken x ve y arasındaki korelasyon katsayısı,

$$\rho_{x,y} = \frac{cov(x,y)}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{E[(x - \mu_x)(y - \mu_y)]}{\sigma_x \sigma_y} \quad (4.6)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada, μ_x, μ_y sırasıyla x ve y'nin beklenen değerlerini, $\sigma_x \sigma_y$ varyanslarını tanımlamaktadır.

Korelasyon, iki değişken arasındaki bağı gösterir. Değişkenlerden biri zaman serisinde gözlemlenirken gecikmeli değerler varsa kovaryans ya da korelasyon katsayısı ortaya çıkarılabilir. Zaman serisi değişkeninin gecikmeli değerleri arasındaki değişme ölçüsü otokovaryans, otokorelasyon adlarını alır. Bunlar, seri değerlendirmelerinde önemli araçlardır. Fonksiyonlardan zaman serisi değerlendirilmesinde ve durağanlığın incelenmesinde yararlanılmaktadır. Eşitlik (4.5)'te bir y_t zaman serisinde otokovaryans formülü gösterilmiştir. μ serinin ortalamasını, k gecikmeyi tarif etmek üzere, ρ_k otokorelasyon fonksiyonu,

$$\rho_k = \frac{cov(y_t, y_{t+k})}{\sqrt{var(y_t)var(y_{t+h})}} \quad (4.7)$$

biçimindedir (Yiğit 2010).

4.4 Frekans Alanında Analiz ve Filtreleme

4.4.1 Fourier Analizi

Periyodik bir sinyal, farklı genlik ve frekanstaki çok sayıda sinüs ve kosinüs sinyalinin toplamı biçiminde düşünülebilir. Oluşturulan seri, fourier serisi adını alır. Fourier analizi, fourier serisi oluşturma işleminin adıdır. Sinüzoidal olmayan bir periyodik işaretin fourier analizinden sonra zaman bölgesindeki eşitliği 4.8'deki gibidir.

$$f(t) = A_0 + A_1 \sin(t) + \dots + A_n \sin(nt) + B_1 \cos(t) + \dots + B_n \cos(nt) \quad (4.8)$$

A_0, A_n ve B_n katsayıları;

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cdot dt \quad (4.9)$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cdot \sin(n \cdot t) \cdot dt \quad (4.10)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cdot \cos(n \cdot t) \cdot dt \quad (4.11)$$

eşitlikleriyle hesaplanmaktadır. Sinüzoidal olmayan zaman serisinin özelliği açısından katsayıların bir bölümü sıfır değerinde olacaktır (Ertürk 2005).

4.4.2 Fourier Dönüşümleri

Fourier Dönüşümü, zamandaki bir işaretin frekans kapsamını değerlendirmek için mühendislik bilimlerinde güvenle yararlanılan bir yöntemdir. Dönüşüme, zaman fonksiyonunu frekans fonksiyonuna dönüştürerek ilk adım atılır. Ardından sinyalin frekans içeriğine bakılır. Dönüştürülen fonksiyonun katsayıları, frekans değerlerine karşı sinüs ve kosinüs fonksiyonlarının katsayılarını belirtir. Veriler, frekans alanından zaman alanına dönüştürülerek Ters Fourier Dönüşümü yapılmış olur.

Fourier analizinde entegral alma işleminden yararlanılması, inceleme süresinin çok uzamasına sebep olmaktadır. Periyodik olmayan sinyallerin harmonik incelemesini gerçekleştirmek için, sayısal işlemci tabanlı AFD (Ayrık Fourier Dönüşüm) metodu ortaya çıkarılmıştır. Algoritması yüzünden, AFD metodu fourier analizinde olduğu gibi uzun sürede gerçekleşmektedir. İlerleyen zamanda dönüşümü kısaltmak amacıyla HFD (Hızlı Fourier Dönüşüm) metodu bulunmuştur. Fourier analizinde, periyodik sinyalin fonksiyonu kullanılmaktadır. AFD ve HFD metotları ise periyodik olan ya da olmayan sinyalin örneklenmiş verilerinden yararlanmaktadır (Ertürk 2005).

4.4.2.1 Ayrık Fourier Dönüşümü

Bir işaretin frekans spektrumu hesaplanırken 2π ile periyodik olan ayrık zamanlı frekansın bir periyoduna dikkat etmek yeterli olur. Frekans spektrumu hesaplanırken N adet frekans değeri için hesaplama yapılacaksa bu frekans değerlerinin 2π temel frekans bölgesinde N adet eşit aralıklı frekans değeri,

$$\Omega = \frac{2\pi}{N}k \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4.12)$$

biçiminde elde edilmektedir. Ayrık frekans dönüşümünün N adet ayrık frekans değeri için hesaplanma şekli,

$$X[k] = X(e^{j\Omega}) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\Omega n} \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4.13)$$

gibidir. Ters ayrık fourier dönüşümü,

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j\Omega n} \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4.14)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Ertürk 2005).

4.4.2.2 Hızlı Fourier Dönüşümü

Hızlı fourier dönüşümü, ayrık fourier dönüşümünün süratle hesaplanmasını gerçekleştiren yöntemdir. HFD, AFD'nin işaret işleme uygulamalarından yaygın bir şekilde yararlanılabilmesine olanak sağlamaktadır.

Bir işaretin ayrık fourier dönüşümü, 4.13 eşitliği ile hesaplanabilmektedir. Buna göre, dönüşümün her k değeri için N adet karmaşık çarpma ve N-1 adet karmaşık toplama işlemi yapılmalıdır. N noktalı bir AFD için N^2 ile orantılı bir hesap yükü demektir. AFD'deki faz faktörü,

$$W_N = e^{-j(2\pi/N)} \quad (4.15)$$

biçiminde ifade edilmektedir. Faz faktörünün simetri ve periyodiklik özelliklerinden yararlanılarak, AFD daha doğru hesaplanabilir. Faz faktörünün simetri özelliği,

$$W_N^{k+N/2} = -W_N^k \quad (4.16)$$

faz faktörünün periyodiklik özelliği de,

$$W_N^{k+N} = W_N^k \quad (4.17)$$

ilişkisini ortaya koymaktadır.

HFD, faz faktörünün simetri ve periyodiklik niteliğinden yararlanarak ayrık fourier adına hızlı bir hesaplama yapabilmektedir. HFD metotları ikiye ayrılır. Bunlar, zamanda örnek seyreltme ve frekansta örnek seyreltme adlarını alır (Ertürk 2005).

4.4.3 Sinyal Örnekleme Frekansının Seçimi

Bir sistemin çıkış sinyallerinin zaman ve frekans alanındaki değerlendirmelerini gerçekleştirilebilmek amacıyla, art arda gelen sinyaller arasındaki süre öncelikle eşit alınmalıdır. Ardından ölçme sisteminin zaman hatasına bağlı frekans dalgalanmalarını belli matematiksel enterpolasyon metotları ile düzelterek gidermelidir. Art arda gelen sinyaller arasındaki süre, örnekleme periyodu (T_s), örnekleme periyodunun tersi ise örnekleme frekansı ($f_s = 1/T_s$) şeklinde adlandırılır.

Sinyalden doğru örnek alınamaması durumunda veri eksikliği meydana gelecektir. Sinyallerde veri eksikliğinin önüne geçmek, örnekleme frekansının seçiminde Nyquist kriterine uyulmasına bağlıdır. Frekans bileşenin maksimum frekans değerine eşit ya da büyük olması durumunda Nyquist kriteri oluşur. f_m sinyalin band genişliği, f_s örnekleme sinyali;

$$f_s \geq 2 \cdot f_m \quad (4.18)$$

biçiminde Nyquist kriterine uygun seçilmelidir. Bu durumda, örneklenmiş sinyalin frekans spektrumunda bir çakışma olmayacaktır. Bant sınırlı bir işarete veri eksikliği görülmeyecektir (Ertürk 2005).

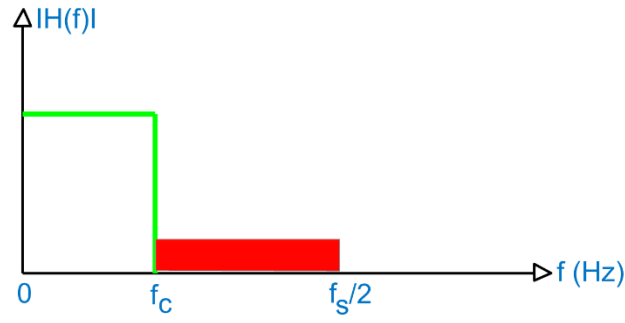
4.4.4 Sayısal Filtreler

Ölçme araçları, belli düzeyde ölçme hatası barındırır. Sinyallerdeki istenmeyen gürültüler, ölçülmekte olan büyüklükler arasına karışır. Filtreleme, bir gürültü azaltma durumudur. Ayrıca istenmeyen bileşenlerin sinyalden ayıklanmasıdır. Bir de istenen frekans bandının güçlendirilmesi için çoğunlukla başvuru olan yöntemdir. Filtreleme, ölçme sistemlerinde, yapıların izlenmesinde ve tektonik hareketlerin belirlenmesinde özellikle kullanılmaktadır. Sinyal çok yolluluk veya atmosferik etkilere bağlı gürültülerin zaman serilerinden uzaklaştırılmasında da yararlanılmalıdır (Carrion ve Spencer 2007). Yalnız gürültüleri ortadan kaldırırken değil aynı ortamdaki çok sayıda sinyalin ayrıştırılmasında da filtreler büyük yarar sağlamaktadır.

4.4.4.1 Temel Filtreler

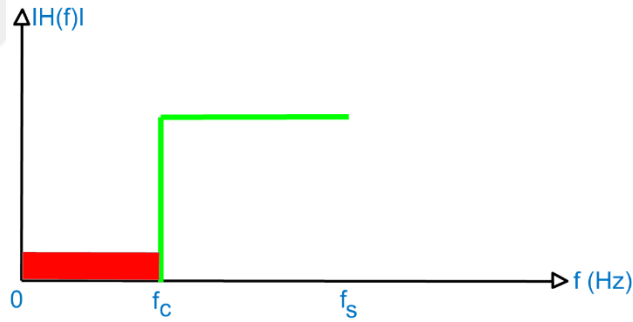
Filtre kullanma amacı, istenen ve istenmeyen frekansları ayıklamaktır. Filtreler genelde izin verdikleri ve engelledikleri frekans bandı açısından gruplandırılmaktadır. Sıklıkla yararlanılan temel filtreler; alçak geçiren, yüksek geçiren, band geçiren ve band söndüren filtreler adlarını alır (Yiğit 2010).

Alçak geçiren filtreler, istenmeyen yüksek frekansları engeller. Düşük frekansların geçmesini sağlamak için yapılır. Bu filtreler, zaman alanında zaman serilerinin kısa dönemli hareketlerini ortadan kaldırır. Uzun dönemli salınımları açığa çıkarır. Zaman serisinin doğru görünmesini sağlayan, kayan ortalamalar yöntemi benzerinde bir görev üstlenir. Yöntemlerin ikisinde de kısa dönemli salınımları ortadan kaldırmak, uzun dönemli bileşeni meydana çıkarmak amacı vardır. f_c kesme frekansını, f_s ise örneklem frekansını göstermektedir (Şekil 4.4, 4.5).



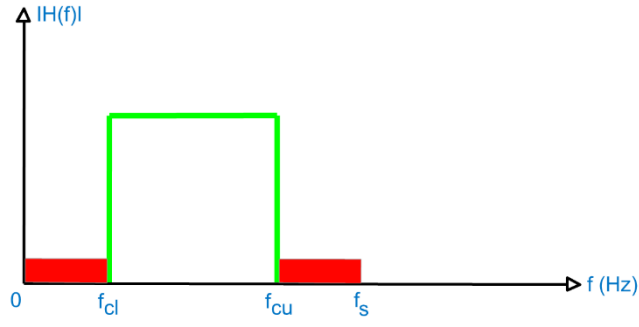
Şekil 4.4 Alçak geçiren filtre.

Yüksek geçiren filtre ise istenmeyen düşük frekansların engellenmesi ve yüksek frekans bileşenin geçirilmesinde kullanılmak amacıyla hazırlanır. Yüksek geçiren filtreden, zaman serilerinde uzun dönemli salınımları yok ederek kısa dönemli bileşenlerin öne çıkmasını sağlayacak şekilde yararlanılmaktadır. GNSS zaman serilerinde, sinyal yansıma hatası nedeniyle ortaya çıkan etkilerin giderilmesinde yüksek geçiren filtre kullanılmaktadır (Li 2006).



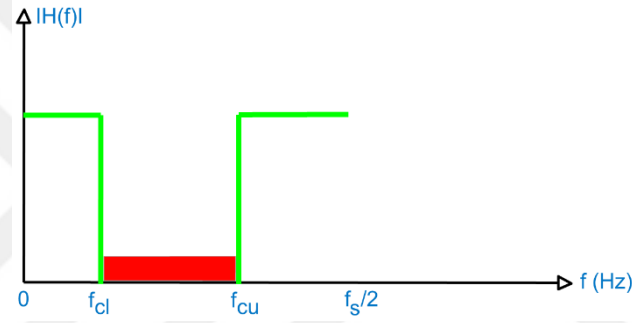
Şekil 4.5 Yüksek geçiren filtre.

Band geçiren filtreler, belirlenen bandın altındaki ve üstündeki frekansları engeller. İstenen frekans bandının geçişine müsaade eder. Yüksek ve alçak geçiren filtrelerin birleşimine band geçiren filtreler denir. f_{cl} ve f_{cu} , geçişine müsaade edilen bandın alt ve üst frekans değerlerini ifade eder (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 Band geçiren filtre.

Band söndüren filtreler, istenmeyen frekans bandının engellenmesi için yapılır. f_{cl} ve f_{cu} , engellenmek istenen bandın alt ve üst frekans değerlerini göstermektedir (Şekil 4.7).

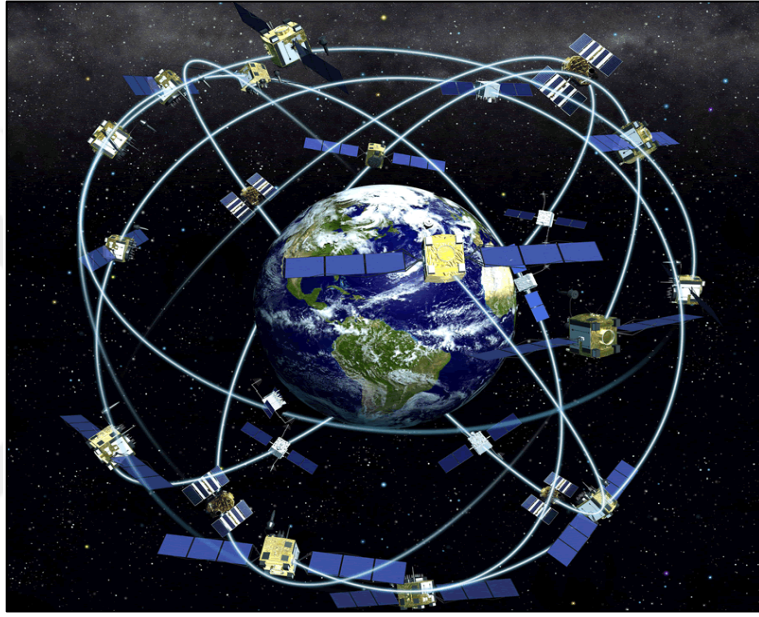


Şekil 4.7 Band söndüren filtre.

5. YER ve UYDU GÖZLEMLERİYLE DEFORMASYON BELİRLENMESİ

5.1 Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri

GNSS kavramı, küresel uydu navigasyon sistemlerini ifade eder. GNSS uydularından gönderilen sinyaller, GNSS alıcılara gelir. Böylece bir noktanın enlemi, boylamı ve yüksekliği hesaplanır (İnt. Kyn. 1).



Şekil 5.1 GNSS uyduları (İnt. Kyn. 2).

1978’de Amerika ilk GPS uydusunu uzaya göndermiştir. Ardından bu sahadaki araştırmalar artarak sürmüştür. Araştırmalar sonucunda yeni sinyaller ve sistemler ortaya çıkarılmıştır. Rusya, AB (Avrupa Birliği), Çin gibi ülkelerde uydu sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemler GLONASS (Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema), Galileo ve Beidou’dur. Bu sistemler yaygın ve etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Küresel ve bölgesel bütün uydu sistemleri Küresel Uydu Navigasyon Sistemleri adını taşır (Kahveci 2009). GPS ve GLONASS sistemlerinin yanında Beidou, Galileo, QZSS (Quasi-Zenith Satellite System), IRNSS (Indian Regional Navigational Satellite System), SBAS (Satellite Based Augmentation System) ve GBAS (Ground Based Augmentation System) uydu takımlarıyla genişleyen Multi-GNSS terimi meydana gelmiştir. Japonya QZSS’yi, Hindistan da IRNSS’yi bölgesel sistem şeklinde hayata

geçirmiştir. Ayrıca destekleyici sistemler biçiminde uydu bazlı SBAS ve yer bazlı GBAS sistemleri kurulmuştur. Uydu sistemlerinin artmasıyla, alıcı daha çok uydudan yararlandığından, bir GNSS alıcısıyla gerçekleştirilen ölçümlerin konum belirleme doğruluğu yükselmiştir. Bilimsel alanlardaki, mühendislik araştırmalarındaki uydu sistemlerinin kullanılabilirliği de gittikçe yaygın hale gelmiştir. GNSS uyduları Şekil 5.1’de gösterilmiştir (İnt. Kyn. 3).

5.1.1 Küresel Konumlama Sistemi (GPS)

GPS, dünyadaki herhangi bir noktada, en az dört uyduyla bütün hava şartlarında konum ve zaman bilgisi verir. Bu sistem, düzenli sinyaller gönderen uydu takımından meydana gelir. Uydularla alıcı arasındaki uzaklığı ölçer. Ayrıca dünyadaki alıcının konumunu saptar. Dünya çapındaki sistemlerin ilki olma özelliğini taşımaktadır. ABD Savunma Bakanlığı’nın bir sistemidir. Yörüngelerinde devamlı hareket halinde olan uydular topluluğudur. GPS alıcısı olan herkes kullanabilir. Uydu takımı, radyo sinyali yollar. Dünyadaki alıcılar sinyallerden yararlanarak konum belirler (İnt. Kyn. 4).

5.1.2 Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema

Rusya GLONASS’ı geliştirmiştir. GLONASS sistemi, 1976 yılında hizmet vermeye başlamıştır. 1995 yılında, uydu takımlarına yapılan roket eklemeleriyle sistemin gelişimi tamamlanmıştır. GLONASS, gerçek zamanlı uydu verileri kullanır. Dünyadaki alıcının konumunu koordinat sisteminde bulabilir. Rusya’nın ekonomisi bozulduğu için 2001 yılına değin yedi uydu çalışmaktaydı. 2011 yılından itibaren ise GPS gibi etkili bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Yirmi dört uydudan oluşan bir uydu ağı ile küresel konumlama sistemi olma özelliği kazanmıştır (İnt. Kyn. 5).

5.1.3 Beidou (Compass) Uydu Konumlandırma Sistemi

Çin, Beidou uydu sistemini kullanmaktadır. Bu sistemde 2000 yılından itibaren testler gerçekleştirilmektedir. Çin, tam ölçekli bir küresel navigasyon uydu sistemi kurmuştur. Beidou sistemi, üç aşamalıdır. Beidou-1 üç uydudan oluşmaktadır. Bu yüzden dar bir

bölgeye hizmet vermektedir, uygulamaları sınırlıdır. 2000'den itibaren Çin'e ve çevresine, konumlandırma hizmeti sunmuştur. BeiDou-1, BeiDou-2 sistemi faaliyete geçtikten sonra 2012 yılı sonunda hizmet dışı bırakılmıştır.

Sistemin ikinci aşaması, COMPASS veya Beidou-2 adında, 35 uydudan oluşacak şekilde planlanmıştı. 2011 yılında yapımına başlanmıştı. Çin'de 2011 yılı sonunda 10 uydu çalışır duruma gelmişti. Asya-Pasifik bölgesinde de ise 2012 sonundan itibaren hizmet vermeye başlamıştı.

Beidou-3 denilen sistemin üçüncü aşamasında, yeni sinyaller ve yeni uydular eklenerek sistem 2020 yılında tamamlanmıştır. Beidou-2 sistemi sadece Asya Pasifik bölgesi için hizmet sağlayabilirken BeiDou-3 sistemi, uydularıyla birlikte dünya çapında hizmet vermektedir (İnt. Kyn. 6).

5.1.4 Galileo Konumlandırma Sistemi

Galileo, AB'nin kurduğu uydu sistemidir. Sistem, Avrupa ülkelerinden gelen önerilerin değerlendirilmesiyle 1999 yılında planlanmıştır. AB ve ESA bu tasarımı 26 Mayıs 2003 tarihinde resmen uygulamaya koymuştur. Galileo sistemi 30 uydudan oluşur. 24 etkin ve 6 yedek uydu olarak düşünülmüştür. 2020 yılında tamamlanmıştır. Yeni nesil uyduların 2025 yılından sonra faaliyete geçmesi beklenilmektedir.

GPS, Amerika ordusu tarafından kullanılmaktadır. Amerika, savaş sırasında uyduları kullanım dışı bırakabilmektedir. AB ve ESA ise Galileo'da bu uygulamayı yapmamaya karar vermiştir (İnt. Kyn. 7).

5.1.5 Hint Bölgesel Uydu Konumlandırma Sistemi (IRNSS)

Hindistan hükümetinin kontrolündeki IRNSS, ISRO (Indian Space Research Organisation) tarafından yürütülmektedir. IRNSS iki hizmet vermektedir. Bunların ilki, askeri kullanıcıların yararlandığı şifreli konumlandırma hizmetidir. İkincisi de halkın yararlandığı sınırlandırılmış hizmettir.

ISRO, 2010'dan itibaren tasarladığı, yürürlüğe koyduğu projeyle uyduları kontrol merkezi kurmuştur. Uydu sisteminin 2011 yılında başlatılması düşünülmüş ancak 2015 yılından itibaren aktif hale gelmiştir. Hindistan'da yirmi bir istasyon ağı vardır. İstasyonlar, konum tespiti amacıyla yörüngede bulunan uyduları takip eder, veri toplar (İnt. Kyn. 8).

5.1.6 Quasi-Zenith Uydu Sistemi

QZSS, Japonya için tasarlanmış olan uydu tabanlı konum ve zamanlama sistemidir. Birinci uydu, 2010 yılında uzaya gönderilmiştir. 2017 yılının ekim ayında uydu sayısı üçten dörde yükselmiştir. Dört uydulu sistem, 2018 yılının kasım ayında faaliyete geçmiştir. 2021 yılının ekim ayında beşinci uydu fırlatılmıştır. 2024 yılının sonuna kadar toplam uydu sayısının 7 olması planlanmaktadır.

QZSS'den, taşınabilir cihaz uygulamalarındaki iletişim servislerinde yararlanılmaktadır. Konum belirleyen servisleri de bulunmaktadır. QZSS, konum bulmada kısıtlı doğruluk verebilmektedir. Bundan dolayı tek başına kullanmada yetersiz kalmaktadır. Sadece GNSS'i destekleme ve güçlendirme servisi olarak kabul görmektedir. QZSS ve GNSS birlikte kullanılırsa yararlanılan bölgede yüksek doğruluklu konum sağlamaktadır. Japonya'nın kurduğu MTSAT (Multi-Functional Transport Satellite), uydu tabanlı bir başka güçlendirme sistemidir. MTSAT, Amerika'nın kontrolündeki WAAS (Geniş Alan Güçlendirme Sistemi) benzeri bir sistem özelliği taşır (İnt. Kyn. 9). Şekil 5.2'de uydu sistemlerinin karşılaştırılması yer almaktadır (İnt. Kyn. 10).

Sistem	GPS	GLONASS	BeiDou	Galileo	QZSS	IRNSS
Sahibi	Amerika Birleşik Devletleri	Rusya Federasyonu	Çin	Avrupa Birliği	Japonya	Hindistan
Kapsama Alanı	Küresel	Küresel	Küresel	Küresel	Bölgesel	Bölgesel
Kodlama	CDMA	FDMA, CDMA	CDMA	CDMA	CDMA	CDMA
Yörünge Rakımı	20180 km	19130 km	21150 km	23222 km	32600 km-39000 km	36000 km
Tam Periyot Süresi	11 sa 58 dk	11 sa 16 dk	12 sa 38 dk	14 sa 5 dk	23 sa 56 dk	23 sa 56 dk
Yörüngedeki Uydu Sayısı	30	24	43	24	4	8
Durumu	İşletimde	İşletimde	İşletimde	İşletimde	İşletimde	İşletimde

Şekil 5.2 Uydu sistemlerinin karşılaştırılması (İnt. Kyn. 10).

5.1.7 GNSS’de Kullanılan Ölçme Teknikleri

Bilimsel araştırmalarda, mühendislik çalışmalarında doğru neticelere ihtiyaç duyulduğu için faz gözlemlerine başvurulur. Bağlı konum belirlerken faz gözlemlerinde yararlanılan ölçü teknikleri beşe ayrılır (Şekil 5.3). Statik, hızlı statik, tekrarlı, dur-git ve kinematik ölçü teknikleridir.



Şekil 5.3 Kullanılan ölçme teknikleri.

5.1.7.1 Statik Ölçü Tekniği

Statik ölçü tekniği, çok sayıdaki alıcıyla aynı zamanda yapılır. Ölçü süresi noktalar arası mesafeye göre değişir. Oldukça hassas neticeler verir. Bu teknik; yüksek hassasiyet gerektiren araştırmalarda kullanılır. Bağlı değerlendirmeye uydu ve alıcı saat hataları giderilir. Atmosferik hatalar da en aza indirilir. Teknikte, 30-60 dakikalık ölçüyle baz vektörü uzunluğuna göre milimetre seviyesinde doğruluğa ulaşılabilir. Genellikle yöntemin doğruluğu 5 mm+1 ppm civarındadır. Yer kabuğu hareketlerinin incelenmesinde, mühendislik yapılarındaki deformasyonların ortaya çıkarılmasında ve var olan uydu geometrisi başka bir ölçüm yöntemine imkân bırakmadığında statik ölçü tekniği en uygunudur (Kahveci ve Yıldız 2009).

5.1.7.2 Kinematik Ölçü Tekniği

Bu teknikte, gezici alıcının takip ettiği güzergâh belirlenmektedir. Kinematik ölçü tekniğinde de önce faz belirsizliği çözülür, sonra ölçmeye başlanır. Bu ölçme tekniği, hızlı ve ekonomiktir. Hareket eden araçların izlenmesinde ve hidrografik ölçümlerde yararlanılmaktadır. Yaklaşık 1-2 cm+1 ppm doğruluk taşımaktadır (Kahveci ve Yıldız 2009).

5.2 Hassas Nivelman Yöntemi

Hassas nivelman yöntemi, düşey yer kabuğu hareketlerinin saptanmasında kullanılır. Yöntemden mühendislik yapıları deformasyonlarının belirlenmesinde yararlanır. Yönteme ülke nivelman ağının kurulmasında ve yüksek duyarlılık gerektiren uygulamalarda başvurulur. Yöntemin yaklaşık hatası ± 0.5 mm/km olmaktadır. Yüksek doğruluk elde etmek için kullanılan aletler, kontrolleri yapılarak duyarlılığı artıracak şekilde olmalıdır (Ünver 1988).

Bu yöntemde yüksek doğruluk ön plandadır. Alet hatalarını en aza indirebilmek, cihaz kalibrasyonlarının yapılmasına bağlıdır. Kullanılacak invar miraların, üzerlerindeki

düzeçlerle dik durmaları sağlanmalıdır. Şu ölçme kurallarına da dikkat edilmelidir (Ceylan 1988).

- Sabahlar ve akşamüstleri ölçme zamanları olarak tercih edilmelidir. Çünkü bu sırada refraksiyon hatası minimum olmaktadır.
- Kullanılacak mira çarıkları, hareket etmeyecek şekilde sağlam yerlere yerleştirilmelidir. Ardından miralar altlıkların üzerine tutulmalıdır.
- Aletler çift kurulursa miralardaki sıfır hatası giderilir.
- Nivo ile mira arasındaki mesafe, 35-40 m olmalıdır. Bu mesafe belli aralıklarla ilerlemelidir. Hava koşulları elverişsizse mesafenin en fazla 25 m olmasına dikkat edilmelidir. Hassasiyeti arttırmak amacıyla bu mesafenin yaklaşık 20 m olması sağlanmalıdır.
- Miranın düzeçte tutulması güçleşeceği için rüzgârlı havalarda çalışma yapılmamalıdır.
- Nivo ve mira 0.60 m'den daha yüksek değerler okunacak biçimde kurulmalıdır. Böyle yapılıncı refraksiyon etkisi giderileceği için okumalar hatalı olmaz.

5.2.1 Hassas Nivelman Yönteminde Kullanılan Alet ve Donanımlar

İnvar miralar, sayısal nivolar, miraları düzeçte tutmaya yarayan aparatlar, mira çarıkları hassas nivelman ölçmelerinde kullanılan aletlerdir.

Bu yöntemde çift bölümlü invar miralara yer verilmektedir (Şekil 5.4). Bunlara yer verilme nedeni, invar şerit kullanıldığı için genleşme katsayısının az çıkmasıdır. Tercih edilmelerinin amacı ise miralar açılıp kapanırken ortaya çıkabilecek hataların yanı sıra nem, sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan hata oranını en aza indirmektir. Böylece hassasiyet artmış olacaktır. İnvar miralar, kullanım amacına göre iki veya üç metre uzunluğunda olabilir. Miralar, üretildikleri malzemeye dikkat edilerek seçilmelidir. İnvar miralarda duyarlılığın düşmemesi için genleşme daima göz önünde bulundurulmalıdır. Miraların barkodlu bölümlerinin zarar görmemesi sağlanmalıdır.



Şekil 5.4 İnvar mira ile mira altlığı (Doğan 2019).

Sayısal nivoların içinde hatayı gideren kompensatör vardır. Kompensatör, gözle fark edilemeyen düzeçleme kusurlarını otomatik şekilde giderir. Bu aletler, elektronik bölümlerinin bulunması yönüyle klasik nivolardan ayrılır. Bu elektronik algılayıcılar, barkod miralardaki barkod şeritleri tespit eder. Ölçme bitiminde, miradaki düşey mesafe okuması ve gözlenen düzlem uzaklığı elde edilir. Bu dijital aletler; yükseklik verilerini kaydedip depolayan, işleyen ve düzeltmeler getirebilen programlarla donatılmıştır.

5.2.2 Ölçme Yöntemleri

Hassas nivelmanda kullanılan ölçme yöntemleri; G=geri okuma, I=ileri okuma olmak üzere GIIG, IGGI, GGII ve IIGG şeklindedir. Bunların haricindeki GIGI ve IGIG yöntemleri, kullanılabilirlik açısından elverişli değildir.

En çok başvurulanan GIIG yöntemidir. Yöntemde gidiş nivelmanı ile iki değer okuması gerçekleştirilir. Ardından değerlerin aritmetik ortalaması alınır. Ayrıca anında müdahale edilerek hatalar ortadan kaldırılır. Gidiş ve dönüş nivelmanı ile dört ayrı okuma değeri elde edilir. Böylece duyarlılık üst düzeye çıkarılır (Ünver 1988).

5.2.3 Hata Kaynakları

Hassas nivelman ölçümlerindeki hatalar, yükseklik farkları sonuçlarını etkilediği gibi doğruluk parametrelerini de etkiler. Bundan dolayı hataların nedenlerinin öğrenilmesi gerekir. Bu durum göz önüne alınmazsa hassas ve güvenilir sonuca ulaşmak zorlaşır. Bu

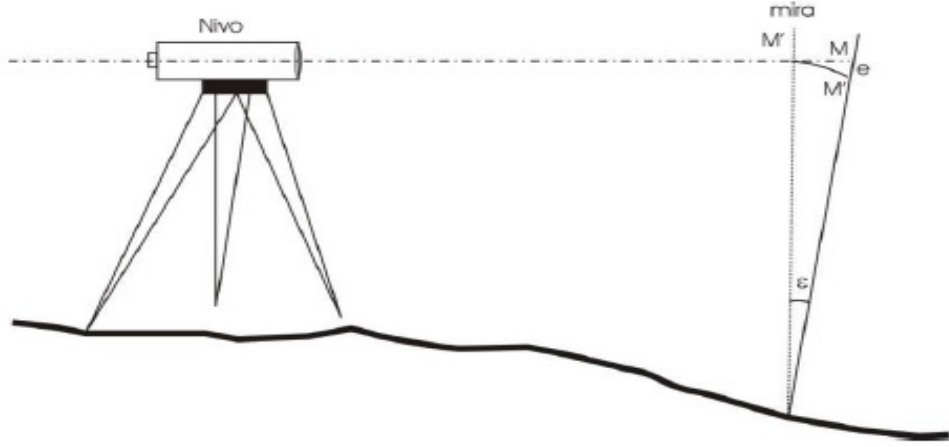
durumda da bilimsel yargılara ve sonuçlara varılamaz. Ölçümü etkileyen hatalar şunlardır (Ceylan 1993). Nivoların, miraların ve dış ortamın sebep olduğu hatalar.

Aletin sebep olduğu hataların önüne geçmek için, hassas nivelman ölçmelerinde nivo, sehpa üzerine sabitlenmeli ve düzeğe olmalıdır. Bu koşulun sağlanamamasının nedenleri; kompensatörlü nivolarda kompensatörün kalibre hatası, nivo gözleme ekseni kayıklığı, küresel düzeğin düz ve yatay eksen şartının yerine getirilememesidir. Aşağıda nivoya bağlı hatalar verilmiştir;

- Nivo gözleme ekseni koşulunun düzensizliği hatası
- Kompensatörlü nivolarda artık kompanzasyon hatası
- Küresel düzeğ eksen koşulunun düzensizliği hatası

Hassas nivelman yöntemiyle yapılan ölçüm işlemlerinde miradan kaynaklanan hatalar bulunmaktadır. Bunlar ölçüm sonucunu olumsuz etkiler. Hatalar; miranın eğik tutulması, mira çifti sıfır konumu, mira tabanının düzlem olmaması ve mira bölümlendirme hataları şeklinde sınıflandırılır.

Ölçmelerde, miralar çekül doğrultusuna paralel ve düzeğe olmalıdır. Havanın rüzgârlı, mirayı tutan kişinin dalgın ve yorgun olması sonucunda mira, düşey doğrultudan sapabilir. Sapmalar, uzaklıkla birlikte miranın düşeyden ε kadar kaymasına ve mira okumalarında hataya neden olur (Şekil 5.5). Hataların meydana gelmemesi, mirada yararlanılan küresel düzeğlerin sürekli gözlenmesine bağlıdır.



Şekil 5.5 Mira eğiklik hatası (Ceylan 1993).

Ölçmelerde yararlanılan invar miralarda, sıfır konum hatası olma nedenleri invar şeridin mira kasasına iyi yerleştirilmemesi ya da mira tabanının düzgünlüğünü yitirmesidir. Hatayı gidermek için ölçme sırasında gidiş ve dönüşte istasyon sayısı çift olmalıdır. Böylece hatanın etkisi elimine edilir.

Ölçümde yararlanılan miraların alt bölümlerinin hasar almamış olması gerekir. Ayrıca yatay düzleme dik olması sağlanmalıdır. Miranın alt bölümü düz olmazsa sıfır konum hatası görülür. Tutulan mira, sürekli çarığın aynı noktasına denk gelmelidir. Ölçümler yeryüzünde yapıldığı için oluşan fiziksel değişiklikler, dış ortamdan kaynaklanan hatalara neden olmaktadır. Bu hatalar; manyetik alanların kompansatörlü nivoları etkisi, nivo ve miranın çökme hatası, sıcaklığın nivo ve miraya etkisi, gravite alanının etkisi ve düşey refraksiyon etkisidir.

5.3 InSAR

5.3.1 Radar

İlk kez ABD'de görüntüleme hedefli radar sisteminin tanıtımı yapıldı. Bu sistem, Radio Detecting and Ranging sözcüklerinin ilk harflerinden meydana gelen bir ölçme ve algılama tekniğidir. 1940 yılında ABD Donanması sayesinde bulundu. Böylece radar

kavramı dünya geneline yayıldı. II. Dünya Savaşı'nda, gece bombardımanlarına yardımcı olmak için askeri keşif amacıyla hedefteki objelerin belirlenmesi ve takip edilmesi düşüncesiyle geliştirildi. Hedefi algılama ve mesafe tespiti anlamındaki sistem günün her saatinde çalışabilir. Hava koşulları da fark etmeksizin radyo sinyalleriyle dünyadaki nesnelerin mesafeleri, konumları, yükseklikleriyle ilgili bilgiler sağlar. Bu sistem, yeryüzünden geri dönen radar sinyalinin gücü doğrultusunda piksel değeriyle ifade edilen görüntü oluşturur (Akabalı 2002).

Radar sisteminde, uydudan gönderilen sinyal hedefe çarparak geri döner. Sinyali, hassas bir alıcı toplayıp depolar (Hanssen 2001). Radar, faal algılama sistemidir. Geri dönen sinyalin şiddetinden hedefteki objelerin nitelikleriyle ilgili bilgiler edinir. Ayrıca gönderilen sinyalin zamanı ile dönen sinyalin zamanı arasındaki farktan da uzaklıklarını ölçer (Balık 2004).

Radar görüntüleri, gri tondadır. Bu renk tonu, yeryüzündeki objelerden yansıyan sinyalin genlik görüntüsünü belirtir. Renk tonu değişiklikleri, görüntüdeki bazı niteliklerin yorumlanabilmesini mümkün kılar. Bu konuda birkaç örnek verilebilir. Durgun ve berrak suların olduğu bölgelerde radar sinyallerinden görüntüler elde edilir. Uydu platformundan gönderilen sinyaller, yansıma bölgesine düşük açıyla değişik bölgelere ulaştırıldığında koyu renkte yani siyaha yakın bir tonda görülür. Mühendislik yapıları gibi yapay unsurları gösteren radar görüntülerinde uydu platformundan gönderilen sinyaller daha yakın yerlere ulaştırıldığında parlak noktalar yani açık gri ton halinde yansır. Tepelerde ve yamaçlarda, sinyallerin eriştiği alanlar parlak, ulaşamadığı alanlarda koyu renkli olur (Canaslan Çomut 2016).

5.3.2 Yapay Açıklıklı Radar

Yapay açıklıklı radar (Synthetic Aperture Radar) sistemi, uyduya ya da hava aracına yerleştirilen sensörlerle, 1–10 GHz arası frekanslarda çalışan mikrodalga ışınlarını dünyaya gönderir ve geri alır. Ayrıca anten görevini üstlenen bu sensörler, yeryüzünden geri dönen sinyalleri toplar. Gerçek açıklıklı radarda (Real Aperture Radar) büyük

antenler yer alır. Yapay açıklıklı radarda ise küçük ama çözünürlüğü yapay tekniklerle daha iyi hale getirilmiş antenler bulunur.

Uydunun ilk ve son gözlemleri arasında geçen zaman boyunca aldığı mesafeye yapay açıklık denir. Dünyanın belli bir bölümünün bu mesafe boyunca algılanmasıyla SAR görüntüsü elde edilir. SAR sistemlerinde konumsal çözünürlük bağı; azimut ve mesafe çözünürlüğüdür. Azimut çözünürlüğü;

$$\delta R_a = \frac{L}{2} \quad (5.1)$$

Mesafe çözünürlüğü;

$$\delta R_R = \frac{c}{2B_{BW}} \quad (5.2)$$

biçiminde hesaplanır. L radar anteni uzunluğunu, c ışık hızını, B_{BW} ise yollanan radar sinyalinin frekans band genişliğini ifade etmektedir.

Yapay, gerçek açıklıklı radar sistemleriyle ulaşılan görüntülerle ilgili çözünürlük farkı, SAR lehine olmak üzere azimut ve uzaklık yönünde yaklaşık bin kat çözünürlük iyileşmesi şeklinde görülmektedir.

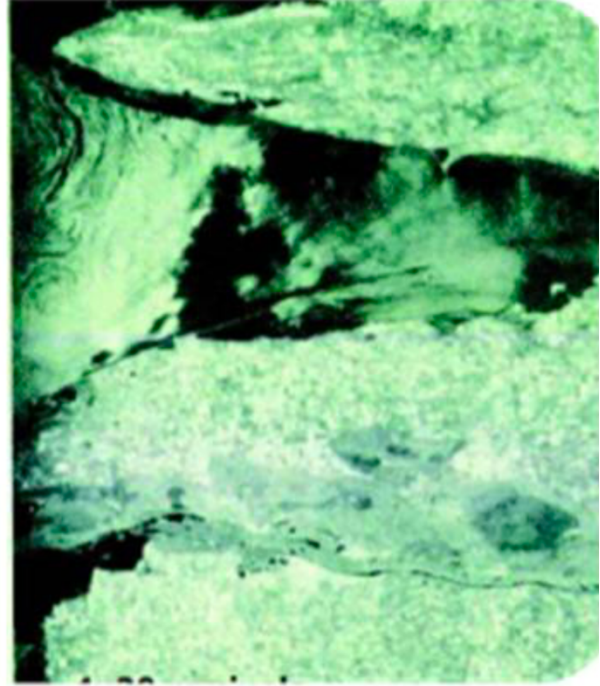
SAR, uydunun güzergâhından yararlanarak anten yüzey açıklığının elektronik benzetimini gerçekleştirebilen bir sistemdir. Radar sinyalini gönderme ve geri alma dönüşümleri, uydunun duyarlı bağıl konum koordinatlarıyla elektronik donanıma işlenir. Dönüşümlerde görülen farklı Doppler frekansı, hedefin geometrisi çizilirken hesaplama eklenir. Böyle yapılarak gerçek bir antenin açıklık açısının verebildiğinden daha iyi çözünürlüklü radar görüntüsüne ulaşılır (Şekil 5.6) (Canaslan Çomut 2016).

Gerçek Açıklıklı Radar



5x14 km piksel

Yapay Açıklıklı Radar

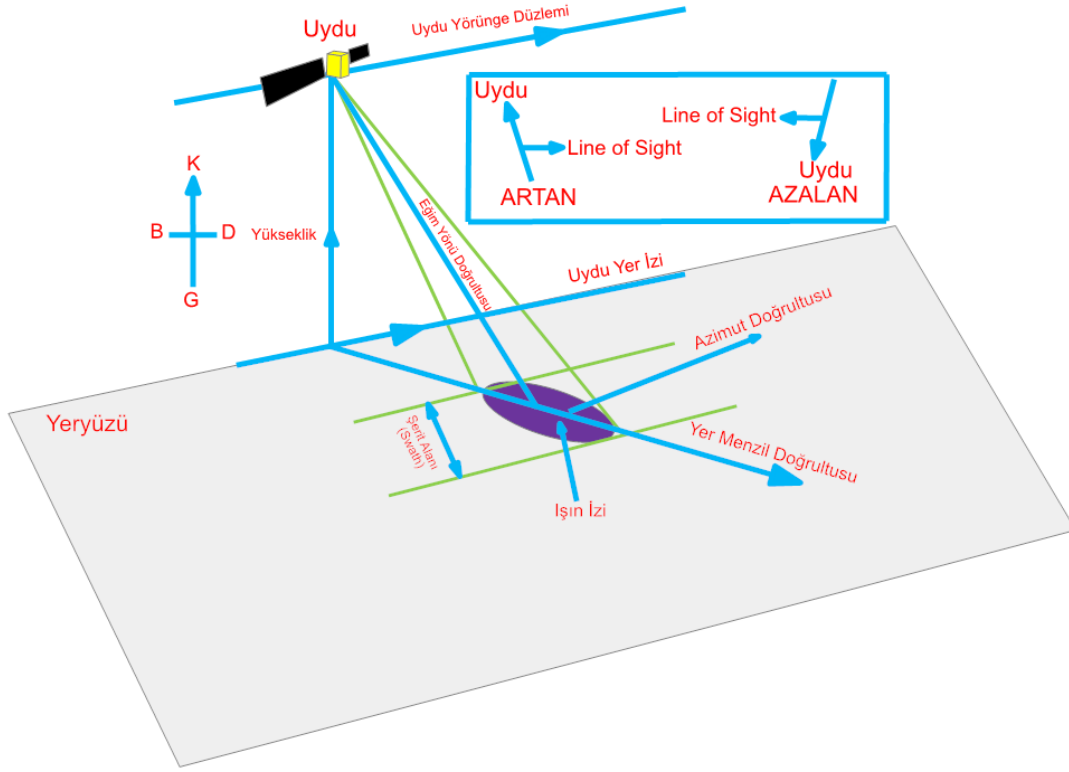


4x20 m piksel

Şekil 5.6 RAR ve SAR görüntülerinin çözünürlük farkı (Massonnet ve Feigl 1998).

Mikrodalga ışınlar, uydu platformundaki antenlerle kısa sinyaller biçiminde yayılırlar. Sinyallerde dalga boyu, genlik ve polarizasyon vardır. Yeryüzündeki hedefe yollanan sinyallerin yapılarında, atmosferde gerçekleşen gönderme ve geri alma süresinde bazı değişiklikler olur. Sinyalleri aynı anten geri alır. Elektrik donanımına polarizasyon, faz ve genlik türünden işlenir. Uydu sensörüne göre görüntü boyutu değişir. Sonuç olarak hedef alanını içeren görüntü üretimi gerçekleşir.

Radarın bakış yönü ya da eğik uzunluk, uydu yörüngesine dik olan sensör hedef doğrultusuna denir. Bir radar görüntüsünün koordinatları, hedef sensör uzaklığından ve sensörün yörüngesindeki konum bileşeninden meydana gelmektedir. Şekil 5.7'de SAR sisteminin geometrik açıklaması geometrik elemanlar ile gösterilmiştir (Canaslan Çomut 2016).



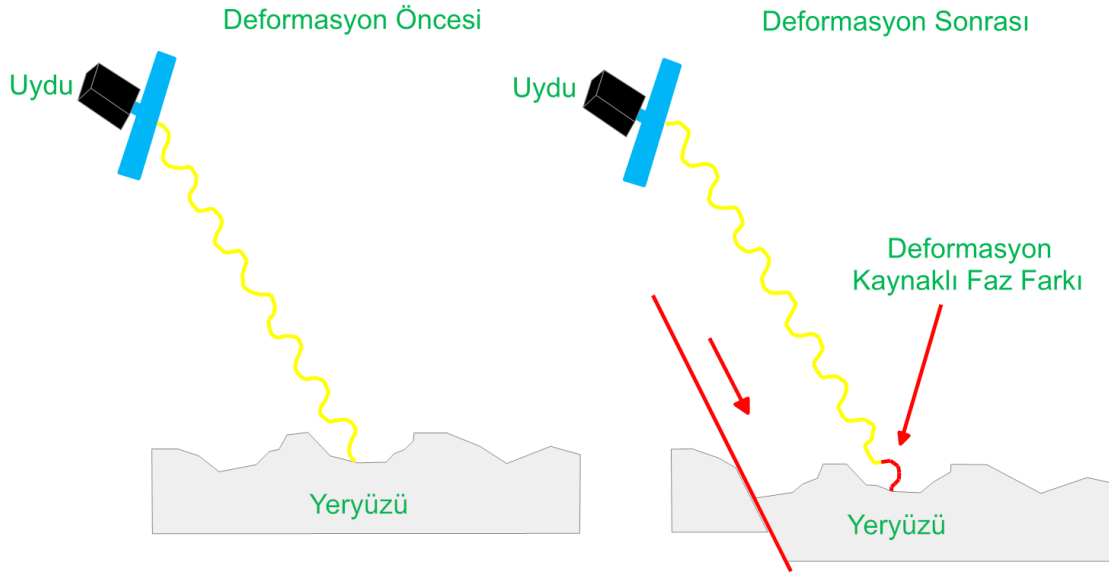
Şekil 5.7 SAR sisteminin geometrik açıklaması (Canaslan Çomut 2016).

Azimut ve eğik mesafe SAR koordinat sistemi bileşenleridir. Yer koordinat sistemi x ve y eksenleri ile coğrafi koordinat sistemi ise enlem ve boylamla gösterilir. Bundan dolayı SAR koordinat sistemi diğerlerinden farklıdır.

5.3.3 İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar (InSAR)

İnterferometrik SAR, jeodezideki çalışmalarla kıyaslanabilecek ölçme doğruluğu taşır. Buna karşın üç boyuttaki bütün bileşenleri gösterememektedir. Bu yöntemle, oluşan deformasyonun yalnızca radarın bakış doğrultusundaki bileşeni bulunabilmektedir.

Bu yöntemle elde edilen radar görüntüsü, yansımaların genliklerini ve fazlarını taşıyan iki boyutlu kayıt şeklindedir. Genlik bilgisi, yeryüzünün yansıtma özelliğini gösterir. Faz bilgisiyse yeryüzündeki objelerin radara uzaklığını gösterdiği gibi yeryüzündeki hareketlerin de kaydedicisidir. Yöntemde, ikiden az olmamak koşuluyla SAR görüntüsü faz farkları dikkate alınır. Bu şekilde interferogram ortaya çıkarılır (Şekil 5.8).

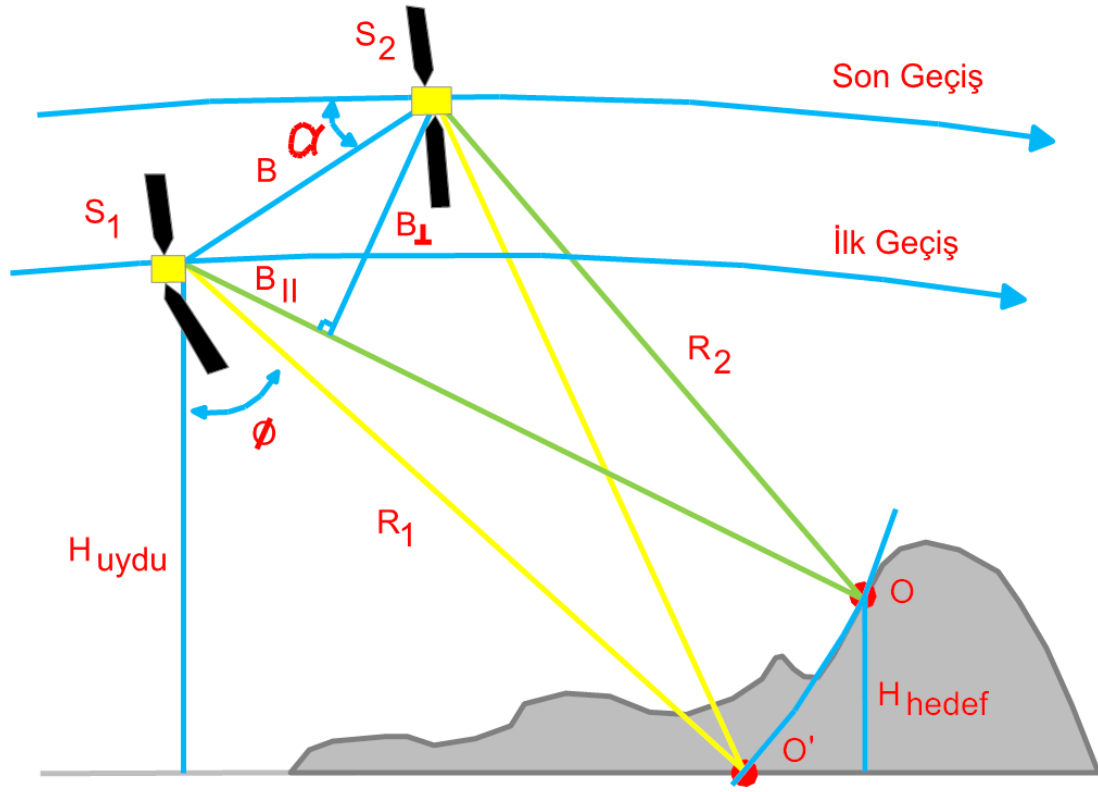


Şekil 5.8 Deformasyon kaynaklı faz farkı (Kucur 2019).

İnterferogramın başarısı piksel genişliğinden daha duyarlı bir biçimde 2 görüntünün hizalanmasına bağlıdır. Böylece 2 görüntüdeki noktaların birbirlerine göre rölatif faz farkları hesaplanabilir. Değişik bakış açılarıyla elde edilen 2 görüntü arasındaki rölatif faz farkıyla yeryüzündeki objelerin bakış açısı mesafelerindeki değişiklikler gözlenebilir. Görüntüleme geometrisi de bilinmek koşuluyla SAR görüntüsünün eş çözünürlüklü yeryüzü topoğrafyası bulunabilir.

Aynı noktadan, farklı zamanlarda alınan 2 görüntü arasında faz farkı olur. Çünkü yeryüzünden yansıyan sinyal fazlarında gecikmeler olabilir. Bunlar, faz farklarıyla duyarlı olarak hesaplanabilir. 2 görüntünün alındığı tarihler arasında dünyadaki noktalar radardan uzaklaşıp ona yaklaşırlarsa faz değişimleri olur. Bunlar da santimetre altı doğruluk düzeyinde belirlenebilir.

İnterferometrik radar, önceleri topoğrafik çalışmalarda kullanılmıştır. Örneğin, Gabriel vd. (1989) çalışmasında, 1cm yükseklik değişimi ile yeryüzündeki hareketin yani deformasyonun tespit edilebileceğini ortaya koymuşlardır. InSAR görüntüleme geometrisi, Şekil 5.9'da gösterilmiştir (Abdikan 2012).



Şekil 5.9 InSAR görüntüleme geometrisi (Abdikan 2012).

Şekil 5.9’da, iki radar algılayıcısı $S_{1,2}$, iki geçiş sırasında da aynı noktaya sinyal gönderir. Uydular, B baz mesafesiyle ayrılır. B ’nin 2 bileşeni vardır. Bunlar; baz mesafesine paralel olan bileşen $B_{||}$, dik olan bileşense $B_{\perp}$ ’dir. Algılayıcıyla obje arasındaki uzaklıklar R_1 ve R_2 , uydu yüksekliği H , geliş açısı ϕ biçiminde gösterilir. İnterferometrik faz;

$$\varphi_{InSAR} = \frac{4\pi\Delta R}{\lambda} \quad (5.3)$$

şeklinde ifade edilir. Burada ΔR , Şekil 5.9’da verildiği biçimde yol uzunluklarının geometrik farkını belirtir. ΔR , yaklaşık;

$$\Delta R = B \sin(\phi - \alpha) \quad (5.4)$$

şeklinde gösterilir (Hanssen 2001).

InSAR ölçümleri; yer hareketi, topoğrafya, atmosfer şartları, yeryüzünün elektriksel nitelikleri ve uydular arasındaki konum değişiklikleri gibi faktörlerde duyarlıdır. PSInSAR yönteminin matematiksel temeli bu faktörlerle meydana gelir (Ferretti vd. 2001, Colesanti vd. 2003b). InSAR faz gözlemleri, faktörlerin tümünde yaklaşık değişiklikleri gösterir. Geriye kalanlarsa gürültü kabul edilir. Araştırma konusu bakımından, faz denklemi bileşenleri değişik şekillerde açıklanabilir. Örneğin, amaç SYM meydana getirmekse deformasyon, gürültü olarak nitelendirilebilir. Bu durumun tersine göre ise yeryüzü değişikliği incelenirken topografik faz bileşeni gözlemden çıkarılmalıdır. Bu açıdan InSAR gözlem denklemi;

$$\varphi_{InSAR} = \varphi_{defo} + \varphi_{topo} + \varphi_{yör} + \varphi_{düz} + \varphi_{atm} + \varphi_{yan} + \varphi_{gür} \quad (5.5)$$

φ_{InSAR} interferometrik fazı, φ_{defo} yüzey deformasyonu ile ilgili faz etkisini, φ_{topo} topografik faz etkisini, $\varphi_{yör}$ yörünge faz etkisini, $\varphi_{düz}$ düzleştirilmiş yeryuvarı fazını, φ_{atm} atmosferik faz etkisini, φ_{yan} yansıtıcıların elektriksel özellikleri ile ilişkili faz etkisini, $\varphi_{gür}$ bileşke gürültüsünü göstermektedir.

5.3.4 InSAR’da Hata Kaynakları

İnterferometrik fazı etkileyen bileşenler kaldırıldığında deformasyon fazına doğru bir şekilde ulaşmak mümkündür. Hesaplanan faz farkı; topoğrafya etkisinden, yer kabuğu deformasyonundan, atmosfer ve yörünge hatalarından, termal durumdan, saçılma karakteristiğinden, zamansal ve baz mesafesinden oluşan gürültülerin toplamıdır.

5.3.4.1 Yüzey Topografyasından Kaynaklanan Faz Etkisi

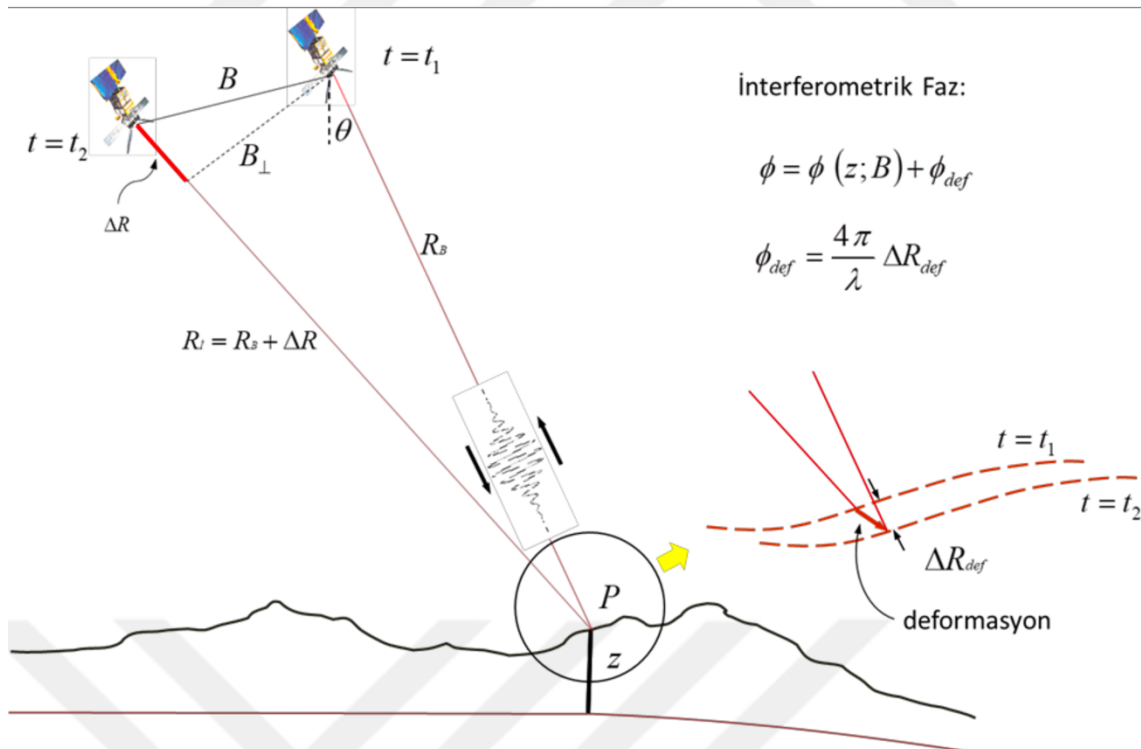
InSAR araştırmalarında, çalışma alanının yüzey yükseklik değişikliği küçükse ve alana ait meydana getirilen görüntü çifti arasında baz mesafesi de kısaysa yüzey topoğrafyasından kaynaklanan faz önemsenmeyebilir. Araştırma alanı engebeliyse bu durumun sonuç interferogramını etkileyecektir. Sonuç interferogramını 2π büyüklüğünde etkileyecek topoğrafya yüksekliği, yükseklik belirsizliği Hight Ambiguity (H_{amb}) adını alır.

$$H_{amb} = \frac{\lambda R \sin(\theta)}{2B_{\perp}} \quad (5.6)$$

Örneğin, Cosmo-Skymed uydusundan alınan görüntü çifti arasındaki dik baz mesafesi yüz metre varsayılırsa sonuç interferogramında 2π oranında değişiklik, ortalama 28,44 m’de bir topoğrafik örüntü oluşturacaktır. SYM oluşturulurken faz belirsizliği dikkate alınır. Bu faktör, deformasyon çalışmalarında faz bilgisini olumsuz etkiler. Bu nedenle bir SYM eklenerek sonuç interferogramından çıkartılır (Orhan 2018).

5.3.4.2 Yüzey Deformasyonu

Uydunun iki geçişi arasında yeryüzünde bir değişiklik oluşabilir. Bu durumda, faz bilgisinde algılama geometrisinden kaynaklanan ve yüzeydeki deformasyon sebebiyle ortaya çıkan değişiklikler görülebilir. Alanın aynı atmosfer koşullarında izlenildiği varsayılırsa yüzeye ait deformasyon Şekil 5.10’daki gibi meydana gelecektir.



Şekil 5.10 InSAR deformasyon geometrisi (Orhan 2018).

Faz bilgisiyle ulaşılan yüzey topoğrafyasında, görüntüleme geometrisi ve atmosfere bağlı gecikme nedeniyle oluşan tüm etkiler ortadan kaldırılırsa faz bilgisinde sadece yüzey deformasyonu sebebiyle ortaya çıkan faz farkı görülecektir. Yer değiştirme miktarı, uydunun bakış yönünde $\phi = 2\pi$ büyüklüğünde bir değişiklik, görüntüde $\lambda/2$ büyüklüğünde bir örüntü şeklinde meydana gelecektir. Yüzey deformasyonunun öğrenilmek istendiği araştırmalarda, faz bilgisinden deformasyonun haricindeki diğer olumsuz etkiler çıkarılmalıdır.

5.3.4.3 Atmosferik Etki

İnterferometrik fazı etkileyen diğer bir unsur da atmosferdeki değişikliklerdir. Değişik zamanlardaki görüntüleme ait atmosferik şartların durağan ve homojen olmamasından kaynaklanan farklılıklar oluşabilir. Uydu ve algılanan nesne arasındaki faz bilgisi, troposferik ve iyonosferik etkiler nedeniyle gecikmeye uğrayabilir. Bundan dolayı sonuç interferogramında olumsuz etkiye sebep olur ve doğruluk azalır. Delacourt vd. (1998)'nin gerçekleştirdiği Etna Yanardağı'yla ilgili araştırmada, atmosferik bozucu etkinin yaklaşık 6 ± 3 cm olabileceği ifade edilmiştir. Atmosferdeki su buharı miktarı ile uydu sinyalinin takip ettiği uzaklık arasında doğru orantı bulunmaktadır. Su buharı miktarı arttığı zaman sinyal daha çok gecikecek, sinyal mesafesi de uzayacaktır. Atmosferik faz etkisi ve yüzey topoğrafyası birbiriyle bağlantılıdır (Abdikan 2012). Gündüz gerçekleştirilen algılamalara göre gece gerçekleştirilen algılama işlemlerinde daha az atmosferik etki belirlenmektedir. Bunun sebebi, geceler gündüze oranla istatistiksel açıdan daha stabildir (Massonnet ve Feigl 1995).

Atmosferin neden olduğu gecikmeyi tespit etmek, bu olumsuz etkiyi interferogramlardan bütünüyle ortadan kaldırmak son derece zordur. GNSS'de iki frekanslı sinyal gönderimi yapılabilmektedir. SAR sistemlerinde iki frekanslı sinyal gönderilemediğinden atmosfere bağlı gecikme etkileri de ortadan kaldırılamamaktadır. Atmosfere bağlı etkinin giderilmesi için gerçekleştirilecek araştırmalarda uygun atmosferik modellerden yararlanılır. Ayrıca meydana getirilen zaman serisi interferogramlarıyla da bu olumsuz etki ortadan kaldırılabilir (Orhan 2018).

5.3.4.4 Yörünge Hataları

Uyduların yeryüzünü izlediği süredeki hassas konumlarının belirlenmesi, 2 geçiş arasında meydana gelen baz uzunluğunun hesaplanması ve elde edilen görüntünün referans elipsoidiyle bağdaştırılması bakımından önemlidir. Yörünge bilgisinin tam belirlenememesinden kaynaklanan hata, interferogram görüntülerinde hatalı örüntülerin meydana gelmesine neden olur (Yılmaztürk 2015). Yörünge hataları üçe ayrılır. Bunlar, açısal, uçuş yörüngesine paralel, uçuş yörüngesine dik hata adlarını alır. Uçuş yörüngesine paralel hata, görüntüler eşleştirilirken giderilir. Böylece hata kaynağı 2 boyutlu duruma getirilir (Hanssen 2001). Yörünge bilgisi kaynaklı ve 2 boyutlu hata, sonuç interferogramında faz hatasına sebep olabilir. Hassas yörünge bilgileri incelemeye eklenerek hatanın etkisi ortadan kaldırılabilir. Jeodezik bir sistem olan SLR (Satellite Long Range) ve DGM-E04 (Delft Gravity Model) gravite modelinden yararlanılarak hassas yörünge bilgileri elde edilebilir (Yavaşoğlu 2009).

5.3.4.5 Korelasyonsuzluk Etkisi

Sonuç interferogramında her bir piksele karşı bir uyuşum değeri vardır. Bu değer 0 ve 1 arasında değişir. Değerler 0'a yakınsa görüntü uyuşumsuz, 1'e yakınsa görüntü uyumlu değerlendirilir. Değerler, sonuç interferogramlarının niteliğiyle ve doğruluğuyla ilgilidir. İnterferometrik faz bilgisi değişik faktörlerden etkilenebilir. İnterferometrik fazda korelasyonsuzluk gürültüye neden olur. Elde edilmek istenen deformasyon bilgilerine ulaşma yeteneğini sınırlar (Hanssen 2001). Bu kavramın; geometrik korelasyonsuzluk, zamansal korelasyonsuzluk, termal korelasyonsuzluk ve doppler merkezi korelasyonsuzluk çeşitleri bulunmaktadır.

5.3.5 InSAR'da Kullanılan Farklı Teknikler

5.3.5.1 Diferansiyel InSAR

InSAR veri işleme sırasında, N sayılı interferogram, master görüntüyle uyumlu tüm N+1 görüntülerden yararlanılarak meydana getirilir. Örnek bir SYM'den yararlanılarak,

topoğrafik fazın elimine edilmesiyle de DInSAR sonuçları ortaya çıkar. Diferansiyel InSAR veri işleme safhaları; görüntü çiftlerinin seçiminden, görüntülerin birbiriyle bağdaştırılmasından, SYM'nin meydana getirilmesi amacıyla veri eklenmesinden, interferogram oluşturmastan ve iyileştirmesinden, faz çözümlemesinden, SYM üretiminden ve yer değişim modelinin ortaya konmasından, coğrafi referanslamadan ibarettir. Zaman farkına dikkat edildiğinde, DInSAR rölatif yer değışiklikleri ölçümünde, santimetre altı hassasiyeti olan verimli bir tekniktir (Agram 2010). DInSAR tekniğinin bazı eksiklikleri de vardır. Örneğın, atmosfer kaynaklı hatalar, yörünge hataları ve başka görüntüler bu teknikle giderilemeyebilir. Bu ihtimaller, yer değışimi ölçümlerinde, lineer olan, lineer olmayan hareketleri ayırt etmeyi zorlaştırır (Zebker vd. 1997, Ferretti vd. 2000). Bu etkilerin azaltılması veya giderilmesi amacıyla birden çok SAR görüntüsünden yararlanarak uzun sürede oluşan deformasyonların rahatça gözlenebilmesi için farklı teknikler geliştirilmiştir.

5.3.5.2 Persistent Scatterers Interferometry (PSI)

Persistent Scatterers Interferometry (Daimi Yansıtıcı İnterferometre) veya kısaca PSI, uydu bazlı çoklu radar görüntülerinin incelenmesiyle, yer yüzeyinde oluşan deformasyonların yüksek doğrulukla ölçülmesini mümkün kılan ileri bir InSAR tekniğidir. Bu teknikte, belli bir zaman farkındaki sinyal faz değışimleri, sabit radar yansıtıcılarıyla ölçülür.

Çoklu interferogramları esas alan PSI tekniğı, çok sayıda ham SLC (Single Look Complex) formatında elde edilen SAR verilerinden üretilir. Tekniğı başarıyla uygulayabilmek amacıyla en azından 15–20 görüntü kullanılmalıdır (Ferretti vd. 2000, Hanssen 2001). Kullanılan görüntü çoğaldıkça teknik de o ölçüde başarılı olur.

İnterferogramlarda, değışik sayısal ve istatistiksel incelemeler yapıldığı zaman karşılaşılabilecek bazı belirsizlikler ortadan kaldırılabilir. Sinyal fazındaki atmosfer kaynaklı bozulma ya da ters geometri edinimi, erozyon veya değışik bitki dokusu gibi diğer bozucu faktörlerin belirlenerek elimine edilmesi amacıyla bu incelemeler

yapılmalıdır. Olumsuzlukların giderilmesiyle, yer değiştirme büyüklükleri güvenle belirlenebilmektedir.

PS (Daimi Yansıtıcı), yeryüzündeki özellikleri yansıtmak amacıyla kullanılan noktalardır. Noktalar, değişik iklim ve atmosfer şartlarına ve uydu açısındaki küçük değişikliklere karşı dayanıklıdır, her zaman aynı elektromanyetik hareketleri yapar.

PS noktaları, yapay ve doğal nesnelerdir. Bu nesnelerin hepsi nokta davranışı yapmalıdır. Bu nokta deformasyon etkisindeyse yer değiştirmenin büyüklüğü, görüntünün çözünürlüğünden daha küçük olmalıdır Bir başka deyişle yararlanılan uydu sinyalinin dalga boyunun yarısından küçük olmalıdır.

PS noktaları, yüksek frekanslı GPS istasyonlarından meydana gelen GPS ağlarına benzetilebilir. PS tekniğini kullanabilmek amacıyla her kilometrekarede en azından 4–5 PS noktası bulunmalıdır (Perissin vd. 2009). Yoksa atmosfer etkisini elimine etmede güçlük çekilir. Her PS'nin yapı özelliklerini bilmek, PSInSAR incelemelerinin ve deformasyon ölçümlerinin daha doğru anlaşılmasını sağlar. Binaların, köprülerin, barajların, su boru hatlarının, büyük antenler benzeri yapay unsurların ya da büyük kayaların karşılaştığı güçler ve deformasyon davranışları birbirinden ayrıdır. PSInSAR'da yer hareketi, sabit yansıtıcı noktalarla ölçülür. Hareketin büyüklüğü mm hassasiyetinde izlenebilir (Ferretti vd. 2000, 2001).

5.3.5.3 Small Baseline Subset Interferometry (SBAS)

DInSAR tekniğı ile bir deformasyon bilgisi elde edilebilirken, ileri InSAR tekniğı adı verilen Small Baseline Subset Interferometry (Kısa Baz Uzunluğu İnterferometre) tekniğı ile yeryüzünde oluşan deformasyonların zamansal değişimini gözlemek mümkündür. Bu teknikle meydana getirilen görüntü çiftlerinin hassasiyetini etkileyen faktörler vardır. Bunlar; zamana bağlı değişim, topografya, geometrik dik baz uzunluğu ve bitki dokusundan kaynaklanan hata ve atmosfer etkileridir. Bu faktörlerin ortaya çıkardığı güçlükleri azaltmak için elde edilen çok zamanlı görüntülerden yararlanılarak SBAS algoritması geliştirilmiştir (Orhan 2018).

SBAS tekniği ile deformasyon trendinin belirlenmesi sırasında, görüntünün bütünü değerlendirilerek yüksek korelasyonlu hedefler birlikte araştırılmaktadır. Bu teknikte; aynı alanda ama değişik zaman dilimlerinde gözlenen $(t_0, \dots, t_N)$ N+1 adet görüntü, görüntülerin azimut ve menzil doğrultusunda kaymanın olmadığı master görüntü adındaki veri ile eşleştirilmektedir. Ardından N+1 adet SAR görüntüleri arasındaki mekânsal korelasyonsuzluğun etkisini azaltan uygun zamansal, doppler frekansı ve geometrik dik baz değerleri sınırlandırılarak M adet görüntü çifti meydana getirilmektedir. Görüntü çiftleri interferogram görüntülerine ulaşmayı sağlar. Görüntülerdeki yüksek korelasyona sahip hedeflere, SVD (Singular Value Decompositon- tekil değer ayrışımı) yöntemi bazlı bir uygulamayla deformasyondaki trend ortaya konmaktadır (Berardino vd. 2002).

6. UYGULAMA

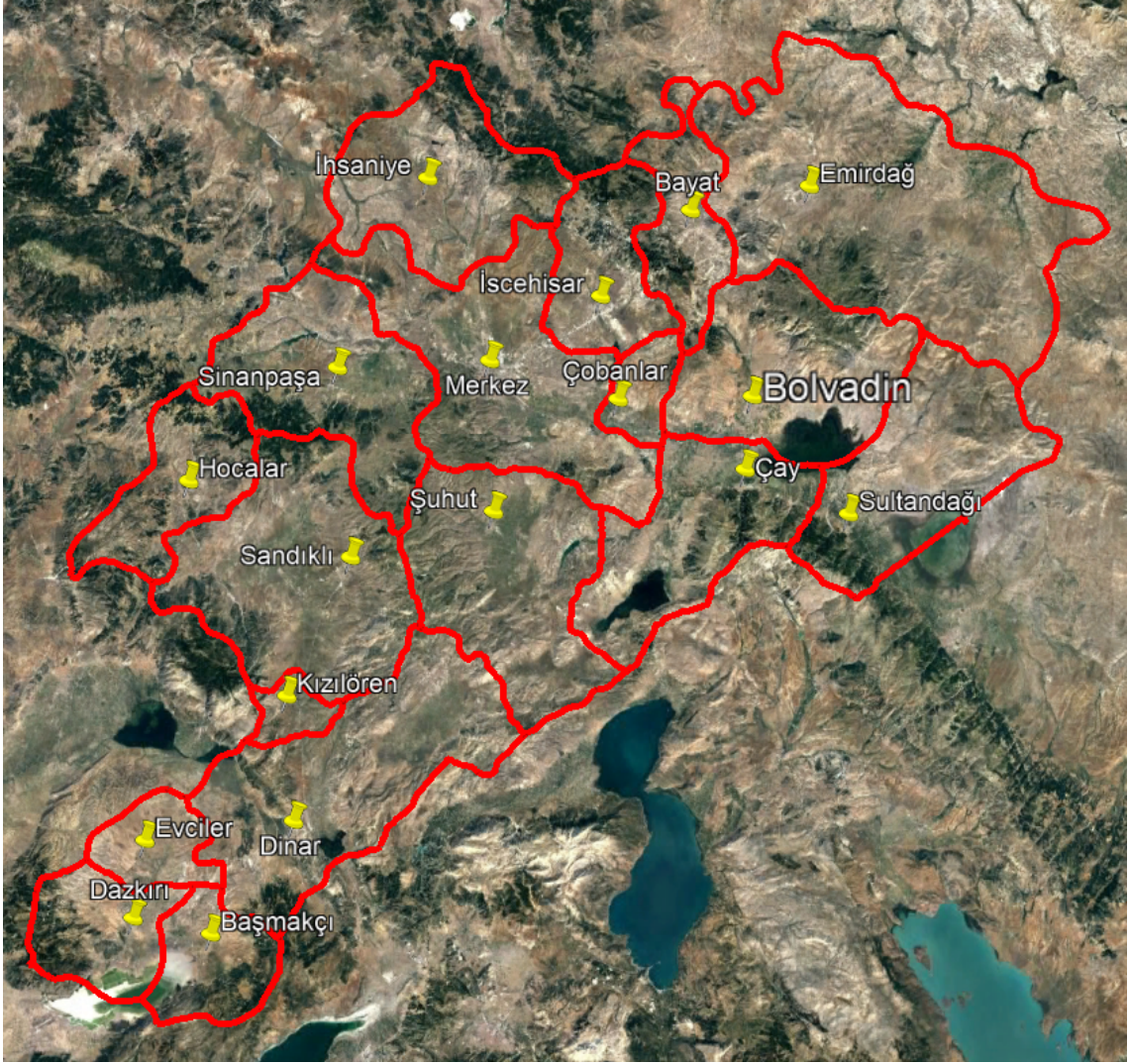
6.1 Çalışma Alanı

Afyonkarahisar, Türkiye'nin 81 ilinden biridir Anadolu'nun batıya yakın ortasında ve Ege Bölgesi'nin iç kısmında bulunur. İç Anadolu yaylasının Ege'ye doğru bir geçidi gibidir. Etrafında Konya, Eskişehir, Denizli, Isparta, Kütahya ve Uşak illeri yer alır. Kuzeydoğudan güneybatıya yöneldikçe Orta Anadolu'dan olduğu gibi Ege Bölgesi'nden de kabul edilir (İnt. Kyn. 11). Afyonkarahisar, Batı Anadolu'da bütün yolların kesiştiği bir kavşaktır (Şekil 6.1).



Şekil 6.1 Afyonkarahisar ilinin haritadaki konumu.

Afyonkarahisar ilinin Bolvadin ilçesi, alüvyon bir ova üzerinde yer almaktadır. İlçe, Ege Bölgesi'nin İç Batı Anadolu kesiminde yer alır. Güneyden Sultandağları, kuzeydoğudan Emirdağlarıyla çevrilmiştir (Şekil 6.2). Ulaşım bakımından Ege, İç Anadolu ve Akdeniz bölgelerini bağlayan bir kilit gibidir. Deniz seviyesinden yüksekliği 1016 metre'dir. Yüzölçümü ise 1108 km²'dir. Bolvadin, Afyonkarahisar yüzölçümünün %12.85'ini kaplar (İnt. Kyn. 12).

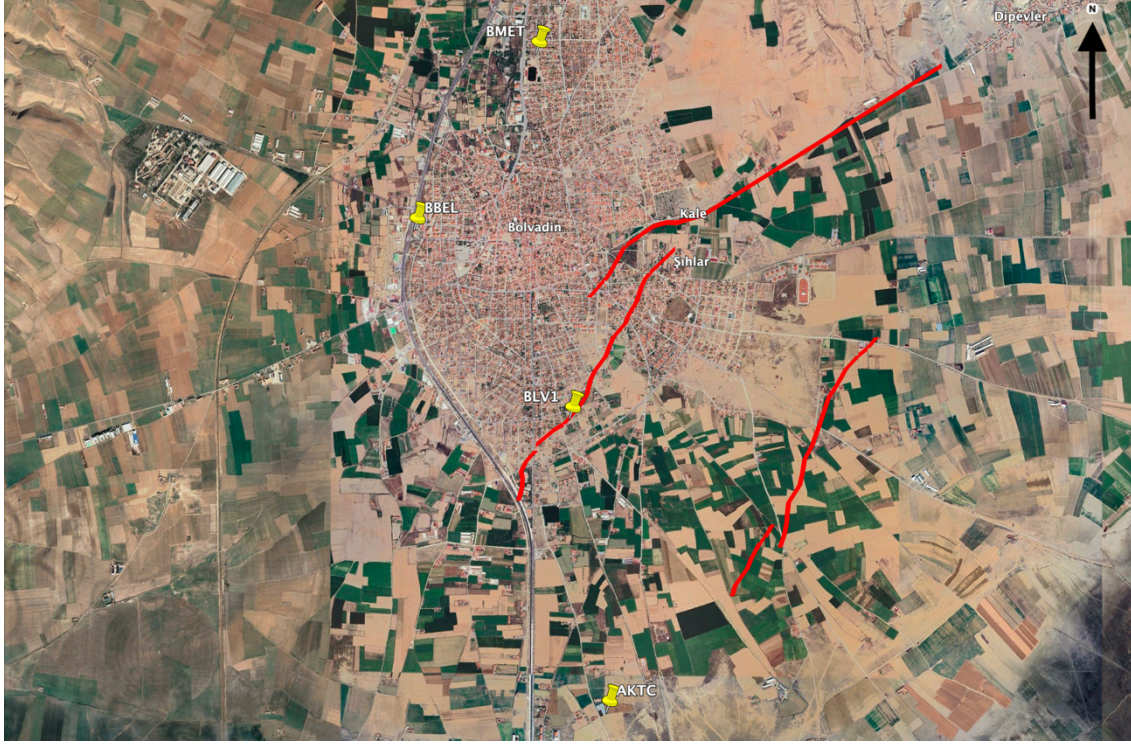


Şekil 6.2 Bolvadin ilçesinin haritadaki konumu.

Bakanlar Kurulunun 22.01.2018 tarihli ve 2018/11275 sayılı kararıyla onaylanan Türkiye Deprem Bölgesi Haritası'nda, Bolvadin ilçesi yüksek riskli deprem bölgesinde bulunmaktadır.

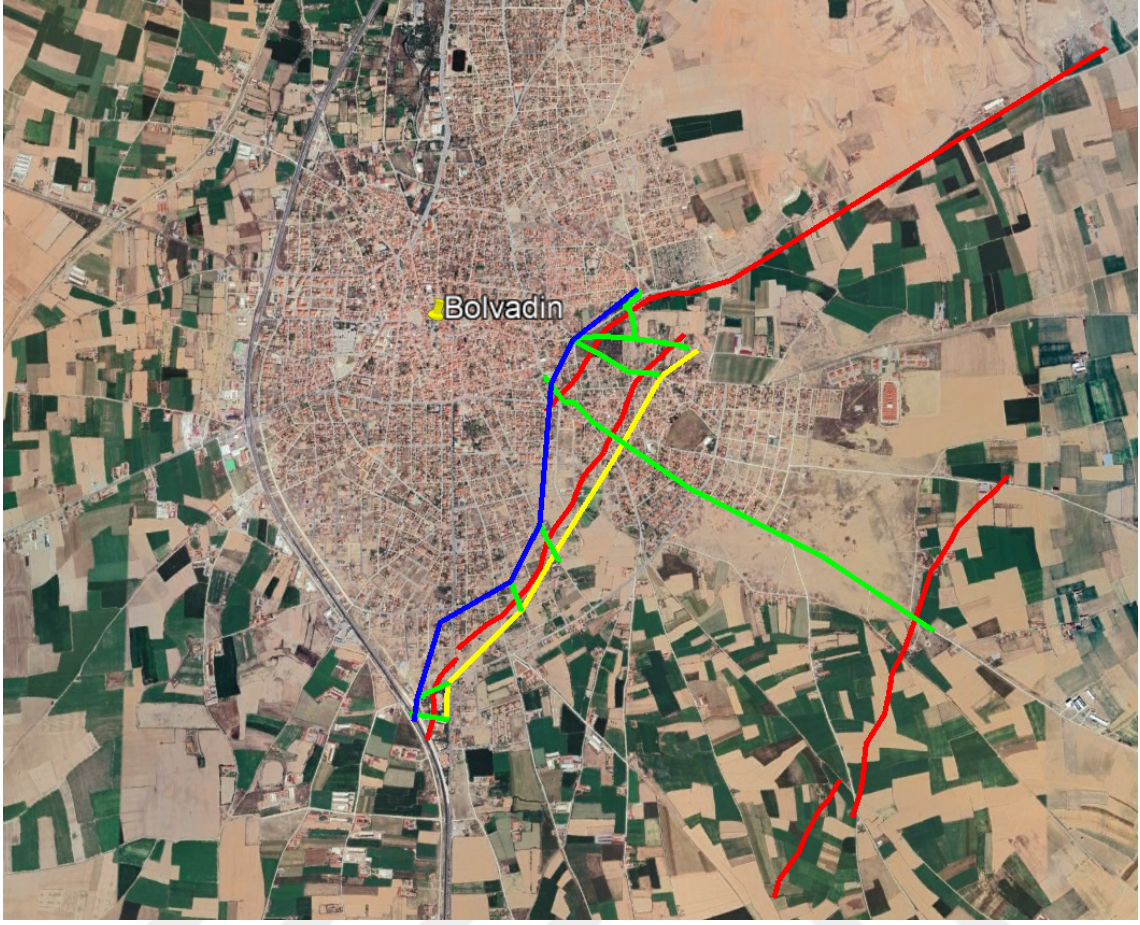
Bölüm 3'te anlatıldığı gibi Bolvadin ilçe merkezinde asismik yüzey deformasyonları meydana gelmiştir. 2 Şubat 2002 yılında Sultandağı civarında meydana gelen 6.0 ve 6.2 büyüklüğündeki iki depremden sonra meydana gelmeye başlayan bu yüzey deformasyonları günümüzde de devam etmektedir. Bu çalışmada bu yüzey deformasyonlarının büyüklüğüne belirlemek amacıyla GNSS ve Nivelman ölçüleri ile uydu görüntülerinden yararlanılmıştır. İlk olarak yüzey deformasyonlarının haritalanması için 115Y246 nolu TÜBİTAK projesi kapsamında Bolvadin yerleşim merkezinde istikşaf

alışmaları yapılarak yüzey deformasyonları haritalanmıştır. Bu yüzey deformasyonlarına göre daha sonra Sabit GNSS noktalarını yerleri belirlenmiş ve nivelman ağı kurulmuştur (şekil 6.3, 6.4).



şekil 6.3 Bolvadin’de kurulan GNSS istasyonları (Kırmızı çizgiler yüzey deformasyonlarını göstermektedir).

Oluşan yüzey deformasyonlarının miktarını tespit etmek için bölgeye nivelman ağı kurulmuştur. Bu nivelman ağı, haritalanan yüzey deformasyonlarını dik kesecek profiller biçiminde planlanmıştır. Oluşan yüzey deformasyonlarını kırmızı hatlar, nivelman gzerghlarını yeşil hatlar, bağlantı nivelmanını sarı ve mavi hatlar belirtmektedir (şekil 6.4).



Şekil 6.4 Bolvadin’de kurulan nivelman ağı. (Kırmızı çizgiler yüzey deformasyonunu, yeşil çizgiler nivelman güzergahlarını, mavi ve sarı çizgiler bağlantı nivelman hatlarını göstermektedir)

6.2. GNSS Çalışmaları

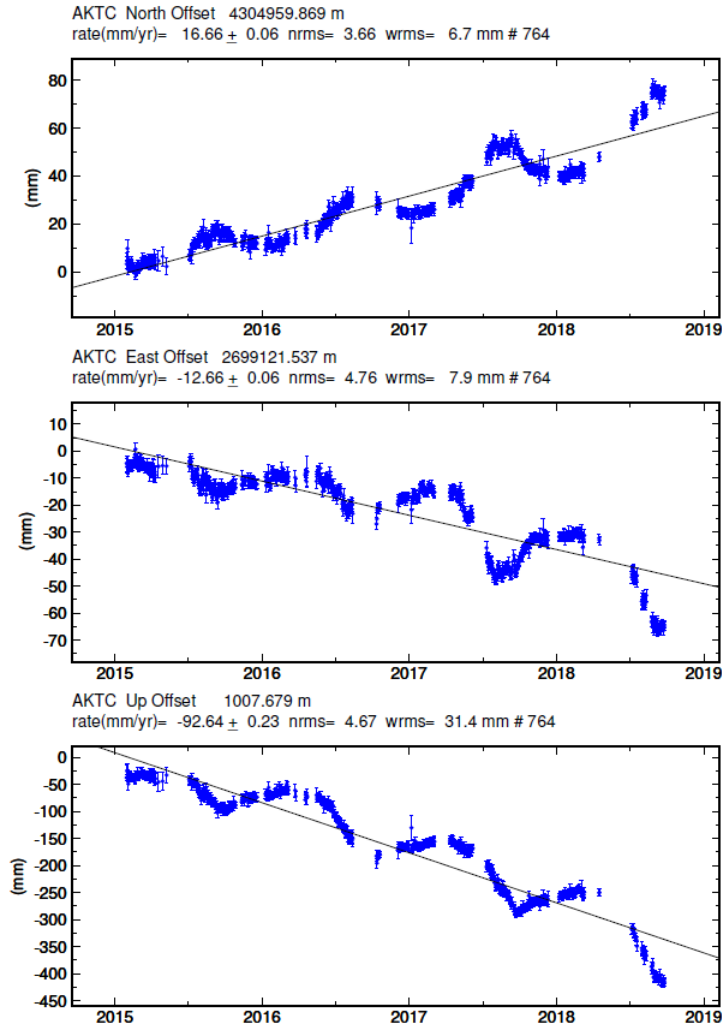
6.2.1. GNSS Ölçüleri

Bolvadin Fayı’nın neden olduğu deformasyonların zamansal değişimini araştırmak için bölgeye 3 adet sabit GNSS istasyonu kurulmuştur. 2015 yılında, daha önceki projelerde kampanya noktası olarak kullanılan ve düşen blok üzerinde yer alan AKTC noktasında sabit GNSS istasyonu (CORS) kurularak 30 saniye kayıt aralığıyla ölçü toplanmıştır (Resim 6.1). Bu istasyon ile 2015-2019 yılları arasında veriler toplanmış ve bölgede yüzey deformasyonlarına ait ilk bilgiler elde edilmiştir. Daha sonra bu istasyondan elde edilen veriler ile 115Y246 nolu TUBİTAK Projesi oluşturulmuştur. Bu istasyon pandemi

döneminde tahrip edilmiş olması nedeniyle verileri günümüze kadar ulaşamamıştır. Bu nedenle zaman seri analizinde kullanılmamıştır (Şekil 6.5).



Resim 6.1 AKTC noktasına kurulan sabit GNSS istasyonu.



Şekil 6.5 AKTC zaman serisi.

Diğer sabit GNSS istasyonu ise Bolvadin ilçe merkezinde yüzey deformasyonlarına yakın bir noktaya tesis edilmiştir. Bu istasyon 115Y246 nolu TÜBİTAK projesi kapsamında kurulmuştur. BLV1 adı verilen bu istasyon da 1 saniye ve 30 saniye veri toplayacak şekilde ayarlanmıştır (Resim 6.2). 2017 yılı nisan ayı itibariyle veri toplanmaya başlanmış ve hala veri toplamaya devam etmektedir.



Resim 6.2 BLV1 sabit GNSS istasyonu (Bolvadin’de şahıs bahçesi).

Kalan iki istasyon, yeni veriler toplamak için taban ve tavan bloklarına 2020 yılı içinde kurulmuştur. Sabit GNSS istasyonlarından ilki ilçe belediye binası terasına, ikinci istasyon ise Bolvadin Meteoroloji Müdürlüğü bahçesine tesis edilmiştir (Resim 6.3, 6.4). İstasyonlar 30 saniye veri toplayacak şekilde ayarlanmıştır. İstasyon yerleri, öncül SAR verileri değerlendirilerek zemindeki deformasyon büyüklüğü dikkate alınarak seçilmiştir.



Resim 6.3 BBEL sabit GNSS istasyonu (Bolvadin belediye binası terası).



Resim 6.4 BMET sabit GNSS istasyonu (Bolvadin Meteoroloji Müdürlüğü bahçesi).

Dört istasyonun da enerji ihtiyacı güneş panellerinden elde edilerek istasyonların aralıksız ölçü almaları sağlanmıştır. GNSS noktaları tesis cinsi ve konum bilgileri aşağıda gösterilmiştir (Çizelge 6.1). GNSS ölçülerinde kullanılan donanımların bilgileri de aşağıda verilmiştir (Çizelge 6.2).

Çizelge 6.1 GNSS noktaları.

Nokta Adı	Tesis Cinsi	Enlem	Boylam	İlk Ölçü	Son Ölçü	Durum
AKTC	Pilye (Zemin)	38.6722°	31.0559°	2015.0	2018.8	Tahrip
BLV1	Pilye (Zemin)	38.6966°	31.0519°	2017.6	2023.1	Aktif
BBEL	Pilye (Çatı)	38.7122°	31.0354°	2020.9	2023.1	Aktif
BMET	Pilye (Zemin)	38.7267°	31.0484°	2020.9	2023.1	Aktif

Çizelge 6.2 GNSS ölçü ekipmanları.

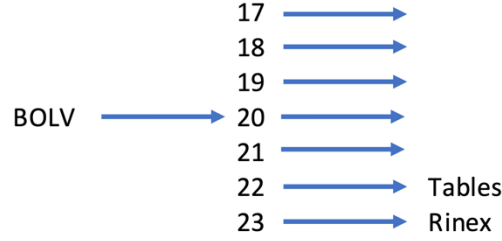
GNSS Alıcısı	Anten Bilgileri	Adedi
THALES	THAZMX-THA_ZMAX+RCVR	3
Leica GR10	Choke Ring	1

6.2.2 GNSS Ölçülerinin Değerlendirilmesi

GNSS ölçüleri GAMIT/GLOBK yazılım takımı ile değerlendirilmiştir. İlk olarak GAMIT yazılımı RINEX (Receiver Independent Exchange) formatına çevrilmiş gözlem dosyalarından faz ve pseudorange ölçülerini çeşirli modellemelerle değerlendirir. GLOBK yazılımı ise GAMIT yazılımının çıktıları değerlendirerek Kalman filtresi uygulayarak koordinat çözümlerini elde eder. Kalman filtreleme yöntemi, parametrelerin ardışık olarak kestirimini sağlayan bir çözüm sağlamaktadır.

Verilerin değerlendirilmesi amacıyla öncelikle programın çalışması için gerekli olan klasör yapısı oluşturulmuştur. Örnek bir klasör yapısı aşağıda verilmiştir (Şekil 6.6). Burada oluşturulacak en dış klasöre proje adı verilerek başlanmalıdır. Proje klasörü proje adını ifade eden 4 karakterden oluşmaktadır. Bu klasörün içine ölçüm yıllarına ait

klasörler, her yıl klasörünün içine ise bir tane RİNEX klasörü açılmıştır. Her yıl klasörünün içinde ayrıca tables klasörü oluşturulmuştur.



Şekil 6.6 GAMIT klasör yapısı.

Tables klasörü, GAMIT yazılımının temel yapı dosyasıdır. Bu dosya içinde veri değerlendirmede kullanılacak olan ay ve güneş efemeris bilgileri (luntap, soltab files), istasyon bilgileri (anten ve alıcı tipi, anten yüksekliği, başlangıç koordinatları) bulunmaktadır. RİNEX klasörü ise GNSS gözlem dosyasları olan “o” uzantılı RİNEX verilerini içermektedir (Poyraz 2009, Tiryakioğlu 2012, Herring vd. 2018).

Genel olarak GAMIT ile değerlendirme işlemine başlamadan önce Tables klasörü içinde 3 dosyada düzenlemeler yapmak gerekmektedir. Bu dosyalar “**station.info**, **process.defaults**, **site.defaults**” dır. GAMIT programı, ara yüzü olmadan sadece komut satırında çalışan bir yazılım takımıdır. Diğer yandan çözüm dosyasına başlamadan sinyal türü (L1&L2, L2_ONLY, L1_ONLY vb.), çözüm algoritması (Baseline, Relax, Orbit), iyonosfer dosyaları vb. gerekli olan model parametreleri, **sestbl** dosyasında tanımlanmaktadır. Çözüm amacıyla kurulan modelin doğruluğunu kontrol etmek için **postfit.nrms** değerleri elde edilmiştir. Bu değer $0.15 < nrms < 0.25$ arasında olduğu zaman kurulan modelin doğruluğu ve ölçülerin gürültü seviyelerinin kabul edilebilir seviyede olduğu anlaşılır. Kurulan model için diğer bir kontrol aşaması da tüm çözümlerin özet dosyası olan **autcln.post.sum.XXXX** dosyasının incelenmesidir. Bu dosya içinde GNSS ölçüsü yapılan noktalara ait mesafe ve saat gürültü istatistikleri (clock and range noise), çiftli fark sapmaları (double difference), ölçü noktalarının uydulardan aldıkları verileri, istatistikleri vardır. İlk yapılacak kontrol **Allan SD@100** değeridir. Bu değer her GNSS ölçümü yapılan nokta için 50 ppb’den (parts per billion = milyarda bir), atomik osilatörlü saatlere sahip alıcılarda ise 1 ppb’den küçük olması beklenir. Çünkü sezyum, rubidyum ve hidrojen maser gibi atomik osilatörlü saatler de 10^{-13} – 10^{-15} değerinde yüksek

hassasiyetlere sahiptir. Bu değerin beklenen değerlerden büyük olması kötü faz ölçüsü anlamına gelmemektedir. Fakat bu değerlerin yüksek olduğu noktalarda faz kesikliklerinin (cycle slips) olma ihtimali düşünülmekte ve bu faz kesikliklerinin düzeltilmemeye ihtimalini arttırdığı bilinmektedir (Poyraz 2009, Tiryakioğlu 2012, Herring vd. 2018).

Diğer bir kontrol, istasyonların **Range rms** değeridir. P kod için Anti-spoofing olmadan alıcılarda bu değerin metre altında olması beklenir. Anti-spoofing altında bu değer 1000-2000 m olmalıdır. Bu değerlerin üzerinde bir değer varsa o nokta için öncül nokta koordinatlarının gerçek koordinatlarından 10 m daha hatalı olduğu ya da noktaya ait RINEX dosyasında hata olduğu düşünülmelidir. GAMIT, bu noktayı hesaba katmayacak ve ilerleyen safhalarda koordinatları hesaplamayacaktır. Bu durumda hatalı olan noktanın koordinatları düzeltilerek o güne ait tekrarlar, özellikle aynı ölçü noktasında farklı günlerde yapılan ölçülerin yorumlanmasında önemli rol oynamaktadır. Günlük tekrarlardan elde edilen nrms ve wrms sonuçlarına bakılarak tekrarlı ölçüler hakkında yorum yapılabilmektedir. Koordinat belirsizlikleri, 24 saatlik ölçümlerle yatay konum için wrms değeri 1-2 mm, yüksekliklerde ise 2-4 mm olarak elde edilebilir. 8 saatlik ölçümlerde, yatay konum için wrms değeri 2-4 mm, yüksekliklerde ise, 10-15 mm olmalıdır. Yapılan bir periyot ölçü içinde bu belirsizlikler bazı noktalar için belirtilen değerlerden yüksek ise o noktalara ait RINEX verileri kontrol edilmelidir. Bu kontrollerde herhangi bir sıkıntı görünmüyorsa GNSS'nin farklı günlerde aynı nokta üstüne kurulmamasının bir sonucu olduğu düşünülmelidir. Noktalara ait günlük tekrar grafiklerine bakılarak gerekirse ilgili bozuk güne ait RINEX verisi silinerek yeniden değerlendirme işlemi yapılmalıdır. Yıllık tekrarları ürettikten sonra stabilizasyon ve hız belirleme aşamalarına geçilir (Poyraz 2009, Tiryakioğlu 2012, Herring vd. 2018). Bu çalışmada Anadolu plakası merkez olacak şekilde yaklaşık 1000 km çapındaki daire içinde bulunan 29 IGS istasyonundan yıllık tekrarları istikrarlı olan (yatay konum için wrms değeri 1-2 mm, nrms değeri 1 mm) 20 tanesi kullanılmıştır. Stabilizasyonda kullanılan IGS istasyonları Çizelge 6.3'te verilmiştir.

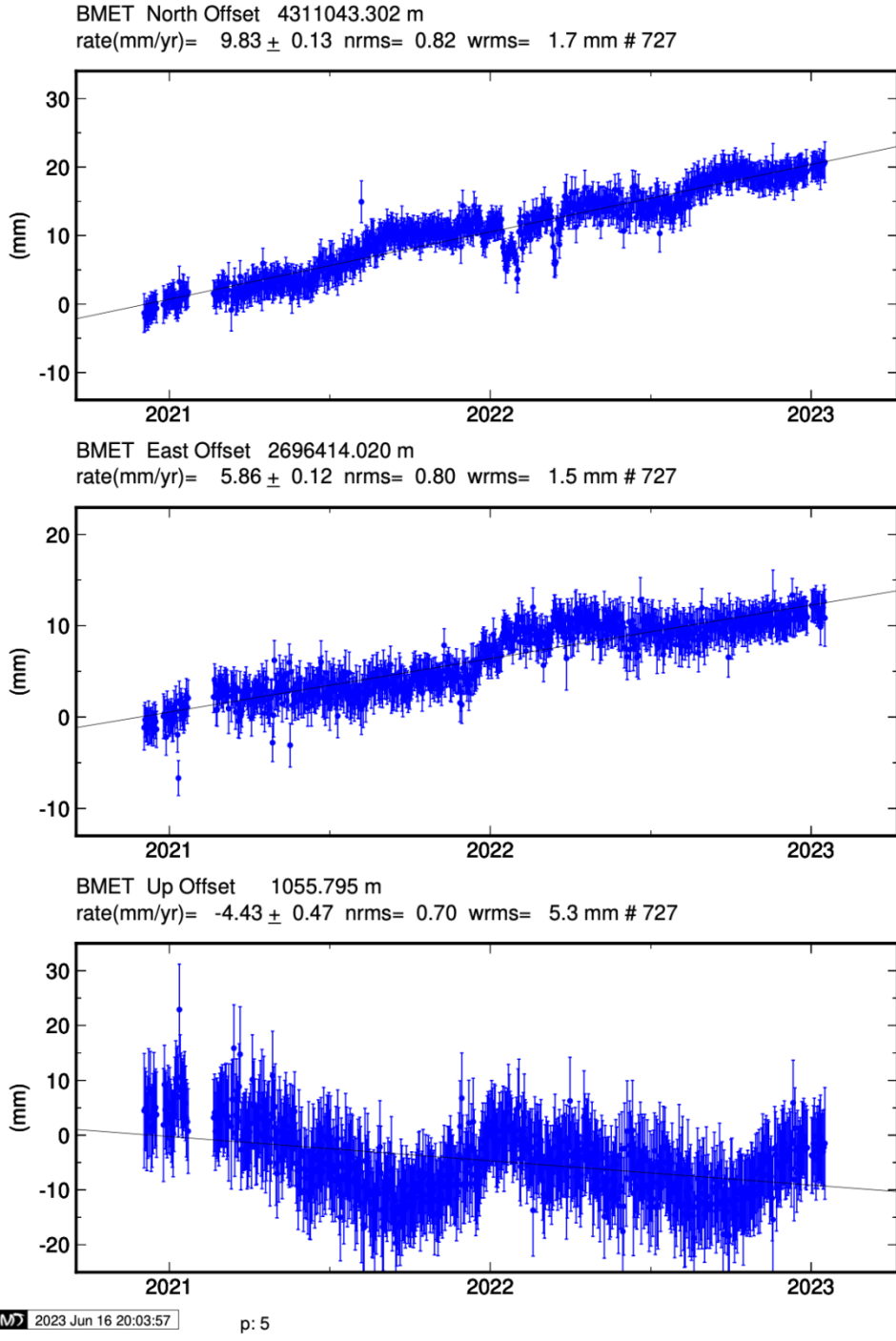
Çizelge 6.3 Stabilizasyon için kullanılan IGS istasyonları.

Nokta Adı	Nokta Adı	Nokta Adı
VILL	TELA	SOFI
TEHN	RAMO	BOR1
BAHR	POLV	MATE
BAKU	ANKR	GRAZ
KUWT	CRAO	NOT1
NSSP	NICO	POTS
ZECK	ISTA	ONSA
ADIS	TUBI	GRAS
LAUG	GLSV	KOSG
DRAG	BUCU	

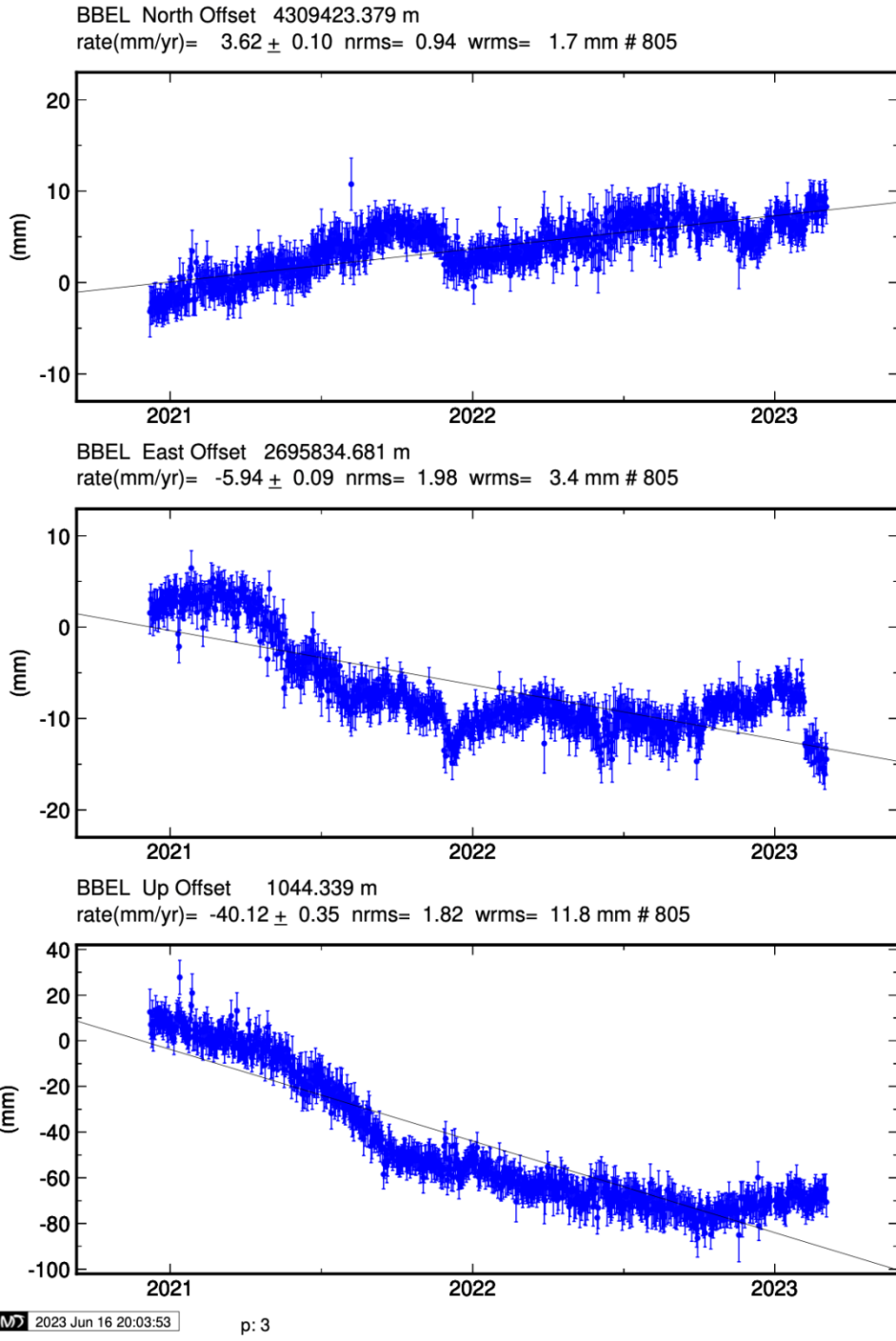
Verilerin değerlendirilmesi işlemi GAMIT/GLOBK ile yapılmıştır. Tüm veriler hassas yörünge bilgileri ile (IGS Final) yapılmıştır.

6.2.3 Zaman Serilerinin Üretilmesi ve Değerlendirilmesi

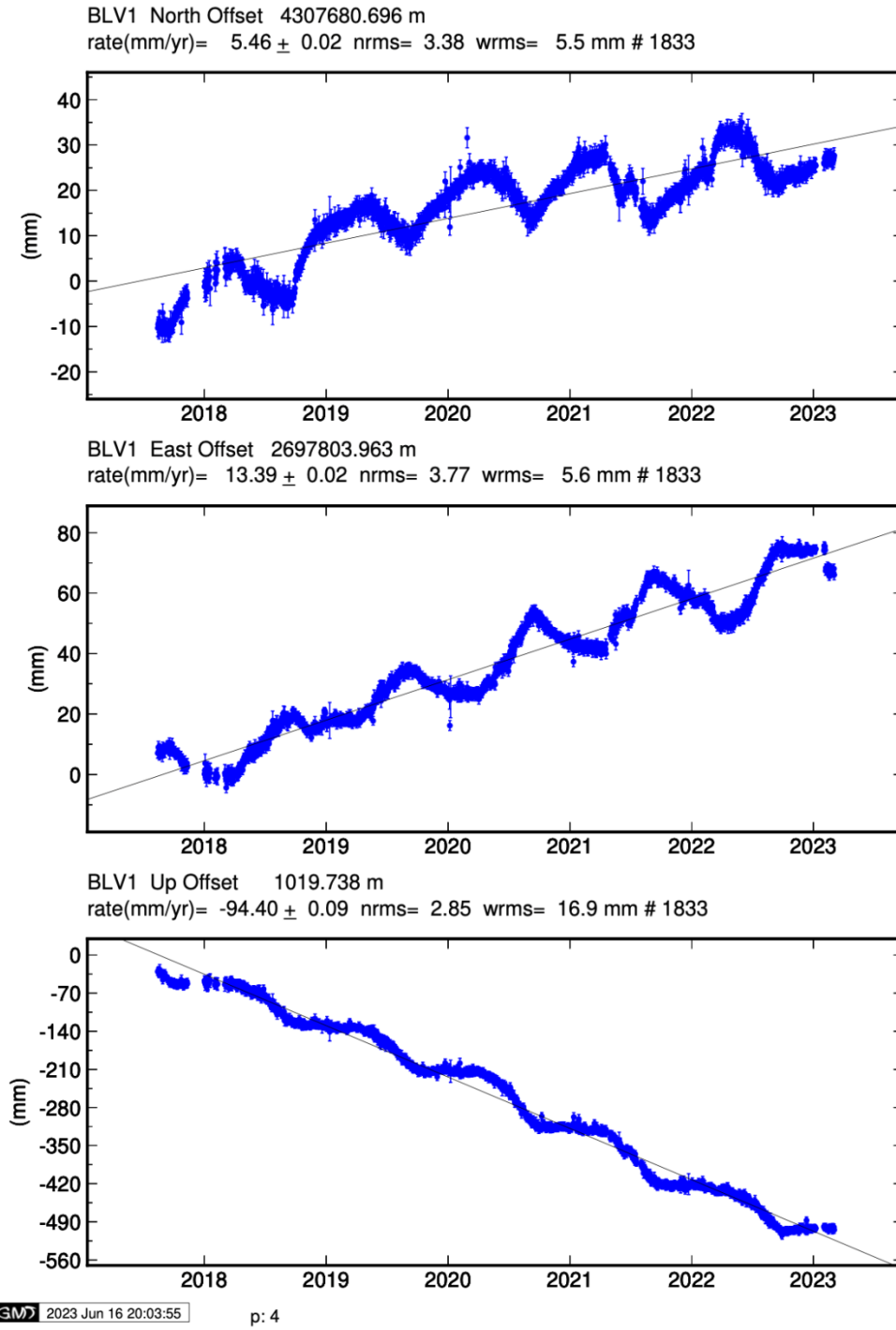
Verilerin indirilmesi, kontrolü, düzenlenmesi ve değerlendirilmesi aşamalarından sonra zaman serisi ve istasyon hızlarının üretilmesi işlemine başlanır. Bu aşamada önce **sh_glred** komutu ile yılın birinci gününden başlayarak değerlendirilen son gün arasındaki veriler toplanır ve her bir istasyona ait günlük zaman serileri elde edilir. Sonrasında ise **sh_plotcrd** ve **globk** komutları ile istasyonlara ait hızlar ve uzun dönem zaman serileri üretilir. Bu çalışmada 3 adet sabit GNSS istasyonunun 30.01.2023 tarihine kadar olan verileri değerlendirilerek günlük çözümleri yapılmış ve uzun dönem zaman serileri üretilmiştir (Şekil 6.7, 6.8, 6.9).



Şekil 6.7 BMET istasyonunda yıllık çökme miktarı (~4 mm).



Şekil 6.8 BBEL istasyonunda yıllık çökme miktarı (~40 mm).



Şekil 6.9 BLV1 istasyonunda yıllık çökme miktarı (~94 mm).

6.2.3.1 Uzun Dönem Zaman Serileri Yardımıyla Deformasyonların Belirlenmesi

Zaman serisi analizi istasyonların ilk ölçü almaya başladığı andan 30.01.2023 tarihine kadar olan ve GAMIT yazılımı ile elde edilen koordinatlar kullanılmıştır (ITRF14).

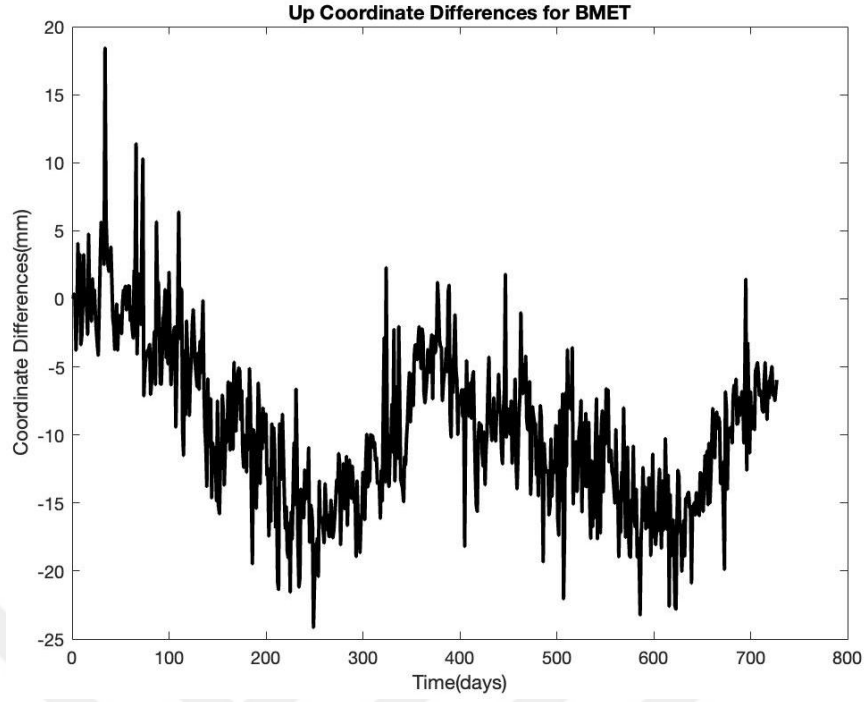
Referans istasyonlarının lineer, periyodik ve düzensiz hareketleri zaman serileri analiziyle ortaya çıkarılabilir. İstasyonların kuzey, doğu ve yükseklik koordinatları için $\bar{x}(t_i)$ zaman serileri t_i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) zamanına göre aşağıdaki gibi gösterilebilir (Gülal vd. 2013, 2015, Blewitt ve Lavalée 2002, Wdowinski vd. 1997).

$$\begin{aligned} \bar{x}(t_i) = & \underbrace{\sum_{k=1}^m a_k t_i^{k-1}}_{\text{Trend Bileşeni}} + \underbrace{\sum_{s=1}^r [b_s \cos(2\pi f_s t_i) + c_s \sin(2\pi f_s t_i)]}_{\text{Periyodik Bileşen}} \\ & + \underbrace{\sum_{j=1}^p a_j \bar{x}(t_{i-j}) + \sum_{jj}^q \beta_{jj} v(t_{i-j})}_{\text{Stokastik Bileşen}} + \underbrace{v(t_i)}_{\text{resudial}} \end{aligned} \quad (6.1)$$

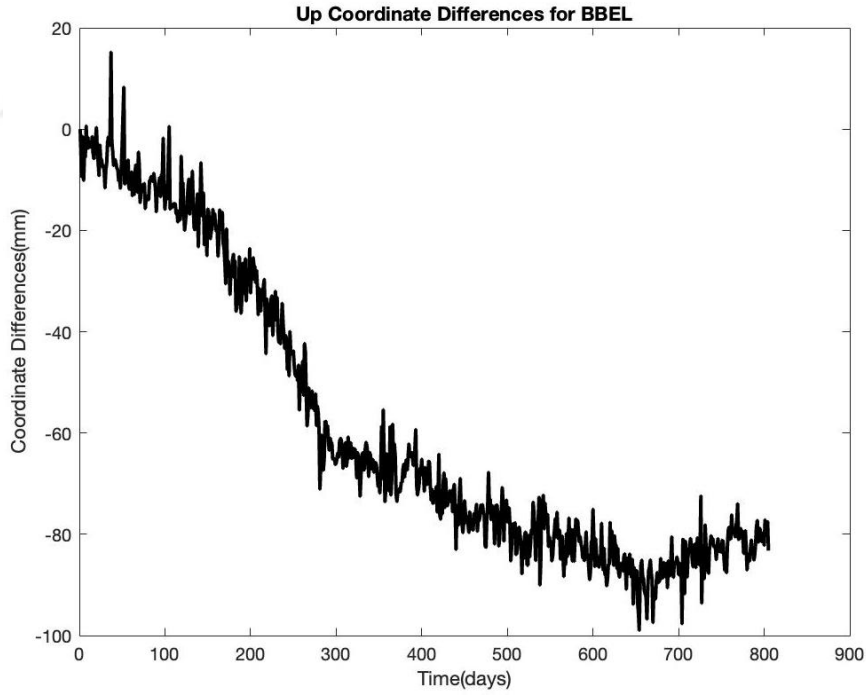
Bu denklemde a_k trend bileşeni parametrelerini, b_s, c_s periyodik bileşen parametrelerini, f_s frekansı, a_j otoregresif (AR(p)) modelin parametrelerini, β_{jj} ortalama hareket (MA(q)) modelin parametrelerini, $v(t_i)$ ortalaması sıfır ve varyansı σ^2 olan rastlantısal hataları belirtir. $\bar{x}(t_i)$ zaman serilerinin analizini gerçekleştirebilmek için verinin düzenli ve doğru olması gerekmektedir. Zaman serilerinin analizinde önce serinin zamana bağlı grafiği çizilir ve serinin genel durumu görsel açıdan yorumlanır. Araştırma bölgesindeki istasyonların zaman serileri meydana getirildiğinde anlık ve genellikle tekrar etmeyen sıçramaların olduğu ölçüler görülmüştür. Bu ölçülere uyuşumsuz ölçüler denir. Bunlar serideki ölçü değerlerinden ortalama olarak ya çok küçüktür veya çok büyüktür. Bu araştırmada, ölçü değerlerinden ortalama olarak çok büyük ve Fox (1972)'un tanımladığı toplamsal 1. tip AO (Additive Outlier/uyuşumsuz ölçüler) üzerinde durulmuştur. Toplamsal uyuşumsuz ölçüler, genellikle hatalı veri girişi ve hatalı ölçümler sebebiyle görülür ve sadece bir ölçüyü etkiler. Beklenenden daha büyük veya küçük değeri olan bu ölçüler seriden çıkarılınca seri normal haline döner. $\bar{x}(t_i)$ serisinin bazı ölçüleri $AO(t_i)$ t_i zamanındaki toplamsal uyuşumsuz veri kirletilmiş ise bu durumda yeni seri $y(t_i)$ ile gösterilebilir.

$$y(t_i) = AO(t_i) + \bar{x}(t_i) \quad (6.2)$$

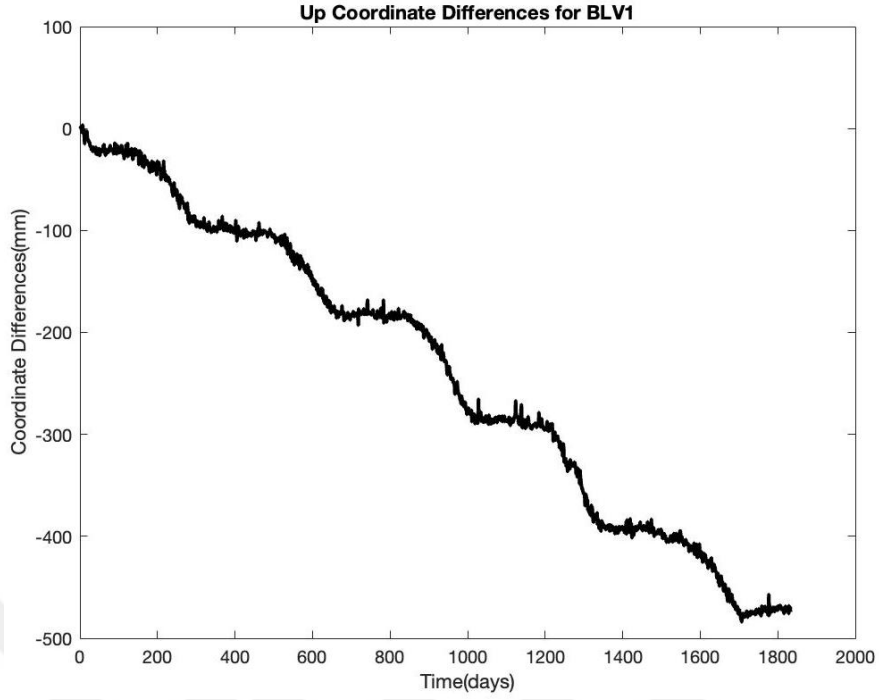
Zaman serilerinde uyuşumsuz ölçüler, genellikle seriye uygun bir fonksiyon kullanarak saptanır. Yukarıda $y(t_i)$ serisindeki uyuşumsuz ölçüleri ortadan kaldırmak için yararlanılan fonksiyon, lineer ve trigonometrik fonksiyonların (periyodik hareket) toplamıdır (Erdoğan 2012). GNSS istasyonlarının zaman serileri analizlerinde, trend bileşenindeki doğrusal hareketler, yer bilimlari bakımından çok önemlidir. Bu önem, eğilim bileşenindeki a_k ve t zaman birimine ve yön birimine bağlı plaka hareketini ya da hızını belirlemek için kullanılmasından kaynaklanmaktadır (Gülal vd. 2013). Ayrıca, zaman serisinde karşılaşılabilen bu yıllık periyodik etkinin, atmosferik ve hidrolojik yükleme etkisine bağlı olduğu da düşünülmektedir. Bir de, Van Dam vd. (2001) ile Romagnoli vd. (2003) araştırmalarında, antenlerde ve anten kalkanlarında buz birikimi gibi iklimsel etkiler sebebiyle sinyallerde yıllık, yarım yıllık ve üç aylık periyodik hareketler görüldüğünü ifade etmişlerdir. Uyuşumsuz ölçüler incelemesinde, yararlanılan fonksiyonu karmaşık hale getirmemek için fonksiyona stokastik bileşen dahil edilmemiştir. $y(t_i)$ zaman serisindeki uyuşumsuz ölçüler incelenirken yararlanılan fonksiyon konusunda geniş bilgi Gülal vd. (2015)'nde bulunmaktadır. Bu uyuşumsuz ölçüler, Gülal vd. (2015)'nde verilen metotlarla belirlenerek seriden çıkartılmıştır. Seriden çıkartılan uyuşumsuz ölçünün yerine ise aynı fonksiyondan yeni değeri hesaplanmıştır. Ayrıca, bu fonksiyon ile serideki veri kayıpları da belirlenebilmektedir. MATLAB (MATrix LABoratory) programıyla geliştirilen yazılım kullanılarak GNSS istasyonunun zamansal hareketini tespit etmek amacıyla seriye uyan doğrusal fonksiyonun katsayıları kestirilmiştir (Şekil 6.19, 6.20, 6.21). Bu katsayılar sayesinde noktaların (ITRF14) hızları elde edilmiştir. Bu çalışmada düşey yöndeki deformasyonlar incelendiği için sadece yükseklik bileşeni için zaman serileri üretilmiştir (Şekil 6.10, 6.11, 6.12).



Şekil 6.10 BMET istasyonu yükseklik bileşeni koordinat farkları.

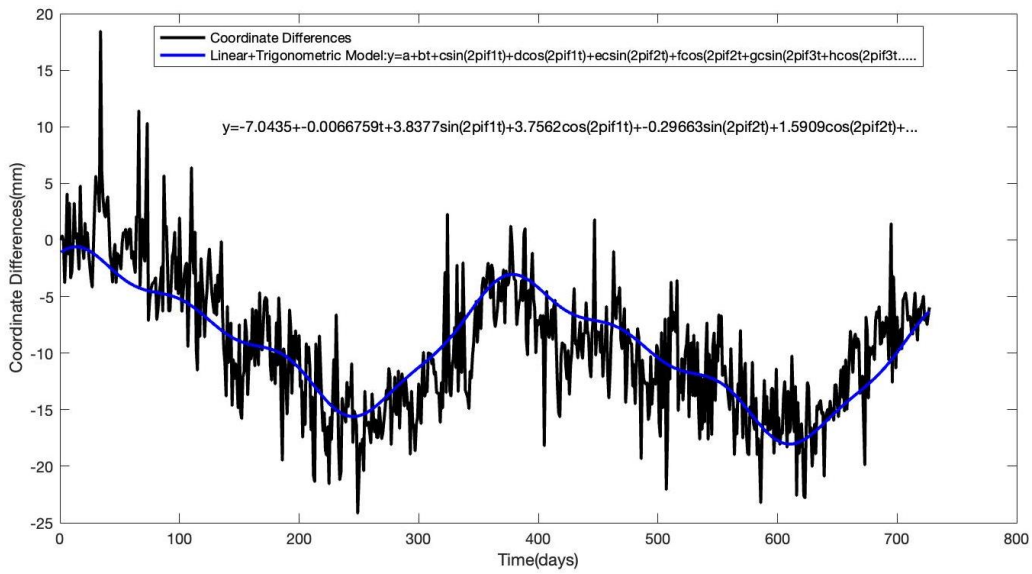


Şekil 6.11 BBEL istasyonu yükseklik bileşeni koordinat farkları.

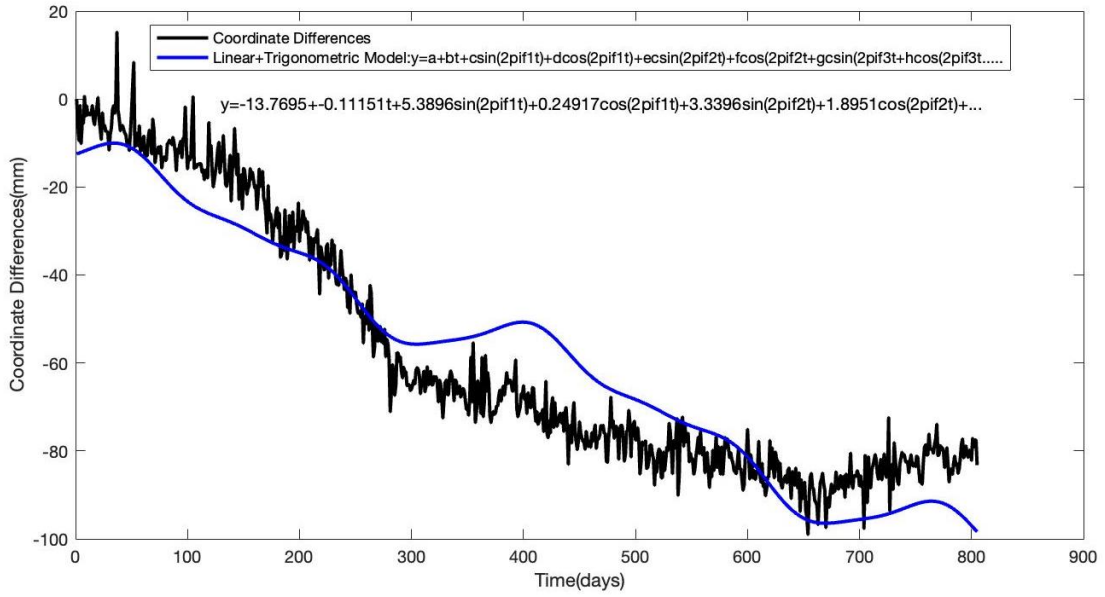


Şekil 6.12 BLV1 istasyonu yükseklik bileşeni koordinat farkları.

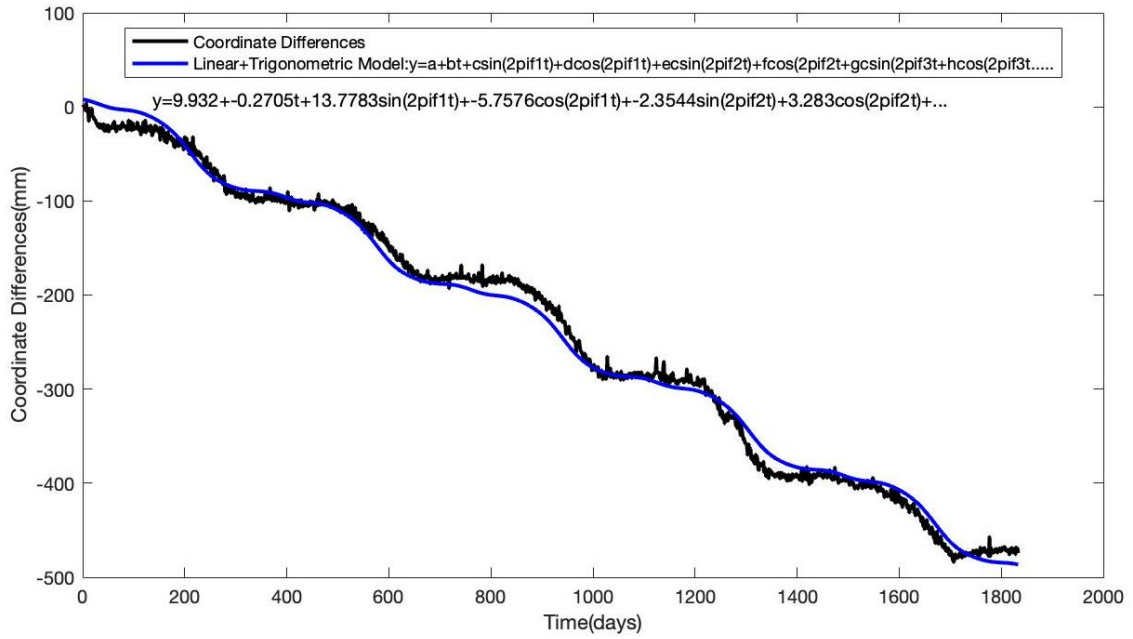
İncelemelerde, istasyonların ham koordinatlarının başlangıca nazaran ne kadar değiştiğini anlamak için bütün koordinat değerlerinden başlangıç gününün koordinat değeri çıkartılmıştır. Böylece zaman serileri yeniden meydana getirilmiştir. Ardından istasyonlara, lineer ve trigonometrik (mevsimlik, yarıyıllık ve yıllık) bileşenlerden meydana gelen bir model düşünülmüştür (Şekil 6.13, 6.14, 6.15).



Şekil 6.13 BMET istasyonu yükseklik bileşeni lineer + trigonometrik modeli.



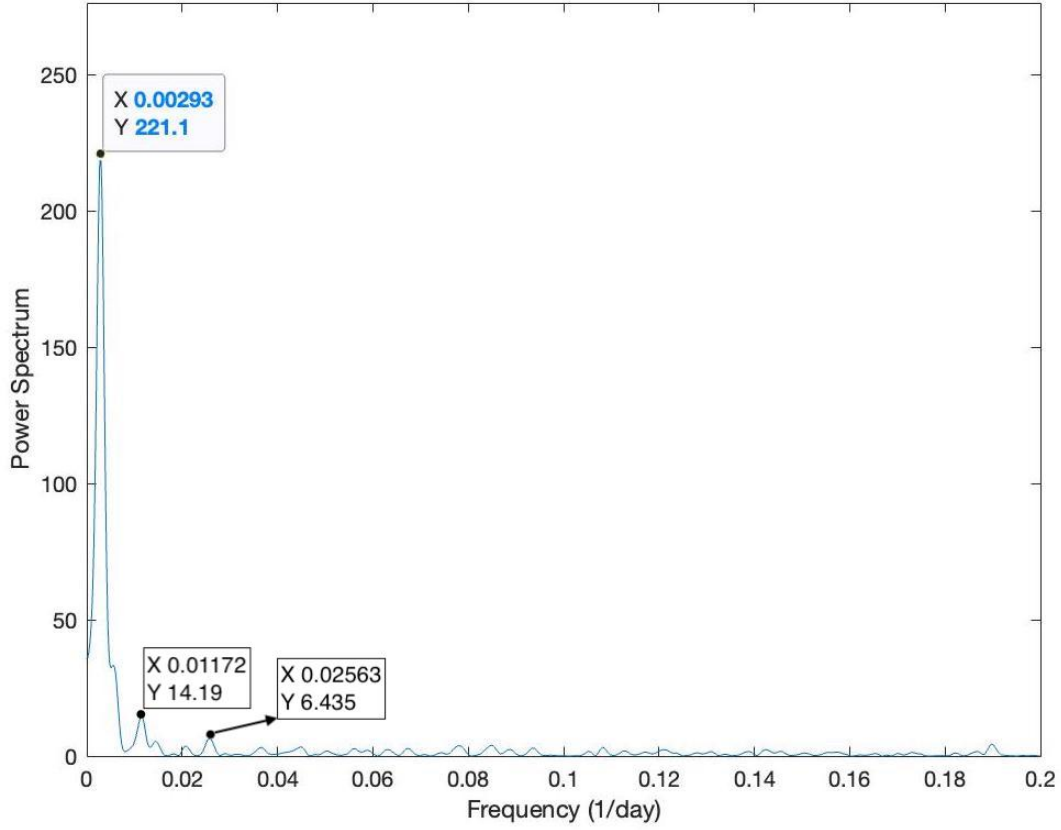
Şekil 6.14 BBEL istasyonu yükseklik bileşeni lineer + trigonometrik modeli.



Şekil 6.15 BLV1 istasyonu yükseklik bileşeni lineer + trigonometrik modeli.

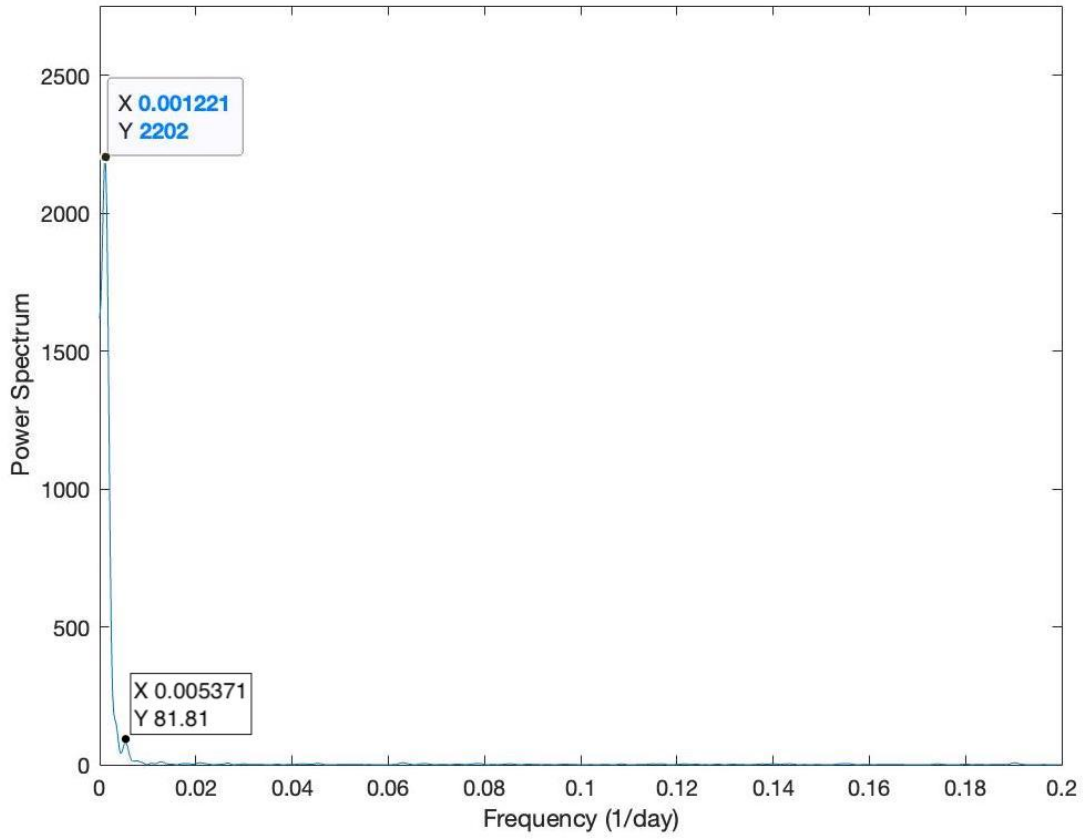
İstasyonların, uyuşumsuz ölçüler çıkartılıp boşluklar modele göre hesaplanmış ve daha sonra trend bileşeni giderilmiş yükseklik zaman serilerine HFD uygulanarak, serilerin içerdikleri frekanslar ve bu frekansların karşılık geldiği periyot değerleri hesaplanmıştır. Analizlerde incelenen frekans aralığı 0-0.2 (1/gün) arasındadır. Grafiklerde pik yapan

değerler farklılık gösterdiğinden grafiklerde uygunluk durumuna göre frekans aralığı değiştirilmiştir.



Şekil 6.16 BMET istasyonu yükseklik bileşeninde uyuşumsuz ölçüler ve boşluklar giderilmiş veri.

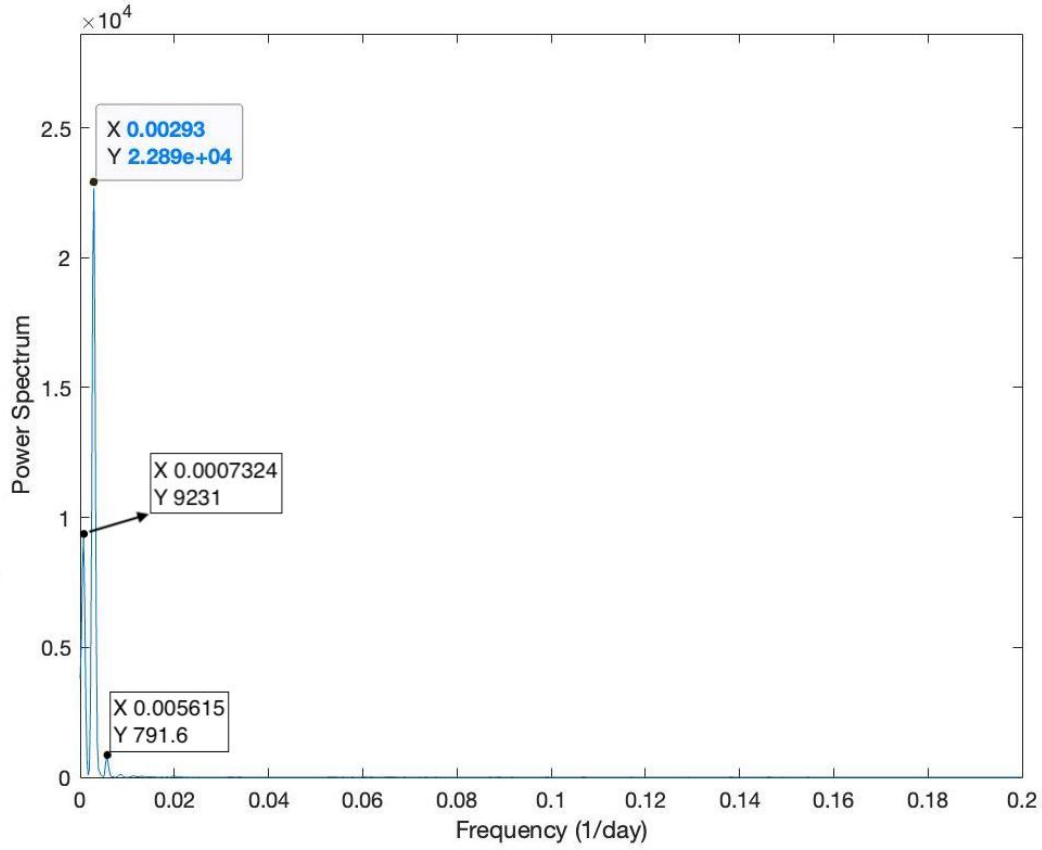
Şekil 6.16’da verilen BMET yükseklik zaman serilerinin güç-frekans değişimleri grafiğinde en baskın frekans 0.00293 (1/gün), 0.01172 (1/gün) ve 0.02563 (1/gün) değerleri elde edilmiştir.



Şekil 6.17 BBEL istasyonu yükseklik bileşeninde uyuşumsuz ölçüler ve boşluklar giderilmiş veri.

Şekil 6.17’de verilen BBEL yükseklik zaman serilerinin güç-frekans değişimleri grafiğinde en baskın frekans 0.001221 (1/gün) ve 0.005371 (1/gün) değerleri elde edilmiştir.

Şekil 6.18’de verilen BLV1 yükseklik zaman serilerinin güç-frekans değişimleri grafiğinde en baskın frekans 0.00293 (1/gün), 0.0007324 (1/gün) ve 0.005615 (1/gün) değerleri elde edilmiştir.

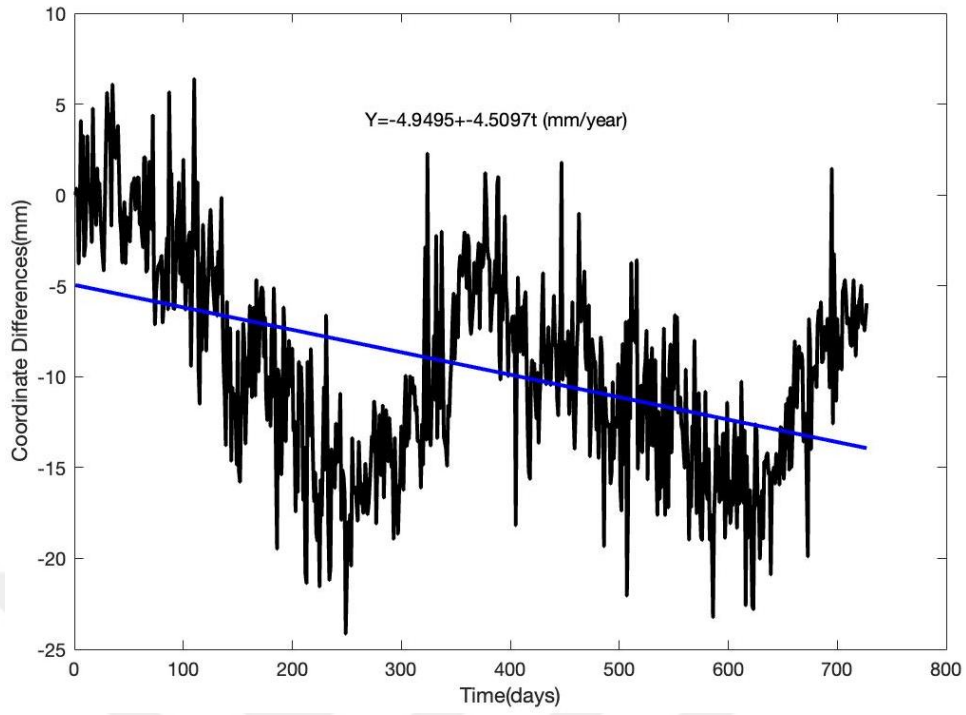


Şekil 6.18 BLV1 istasyonu yükseklik bileşeninde uyuşumsuz ölçüler ve boşluklar giderilmiş veri.

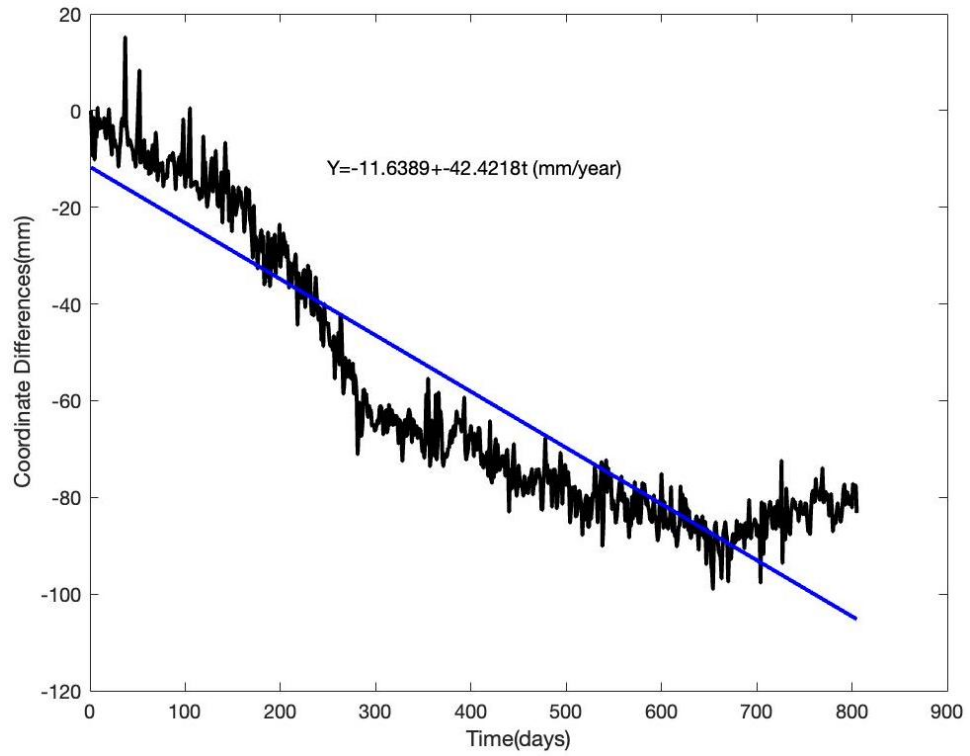
Elde edilen sonuçların daha iyi anlaşılabilmesi ve yorumlanabilmesi amacıyla istasyonların güç-frekans grafiklerinde güç değerinin yüksek olduğu frekanslardan $f = 1/T$ denklemi kullanılarak her bir zaman serisinin içerdiği periyotlar hesaplanmıştır. İstasyonların yükseklik zaman serilerinin içerdikleri periyotlar aşağıda verilmiştir (Çizelge 6.4). İstasyonların yükseklik zaman serilerinin içerdiği periyot değerleri 2 gün ile 1365 gün arasında değişmektedir. Elde edilen periyot değerleri aylık (39 gün), mevsimsel (85 gün), yarıyılık (178, 186 gün), yıllık (341 gün vb.) ve 819 ve 1365 günlük olarak gruplandırılabilir.

Çizelge 6.4 İstasyonların yükseklik bileşeninde elde edilen sinyal tekrarlama periyotları.

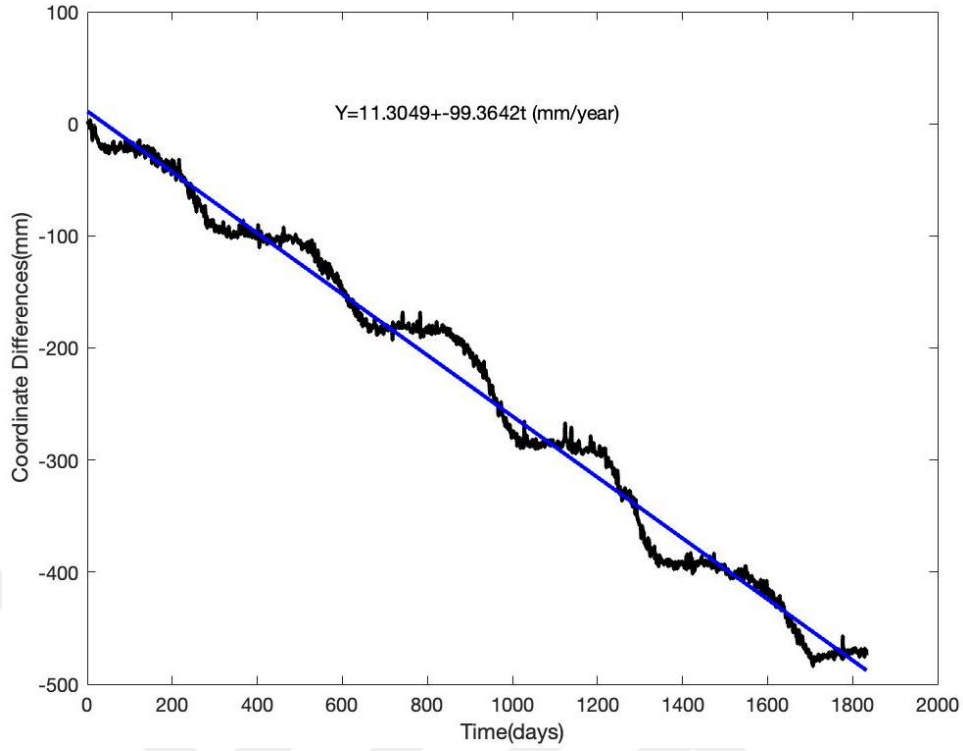
İstasyon	Yükseklik Bileşeni Periyotları (Gün)		
BMET	341	85	39
BBEL	819	186	
BLV1	1365	341	178



Şekil 6.19 BMET istasyonu yükseklik bileşeni lineer trend modeli.

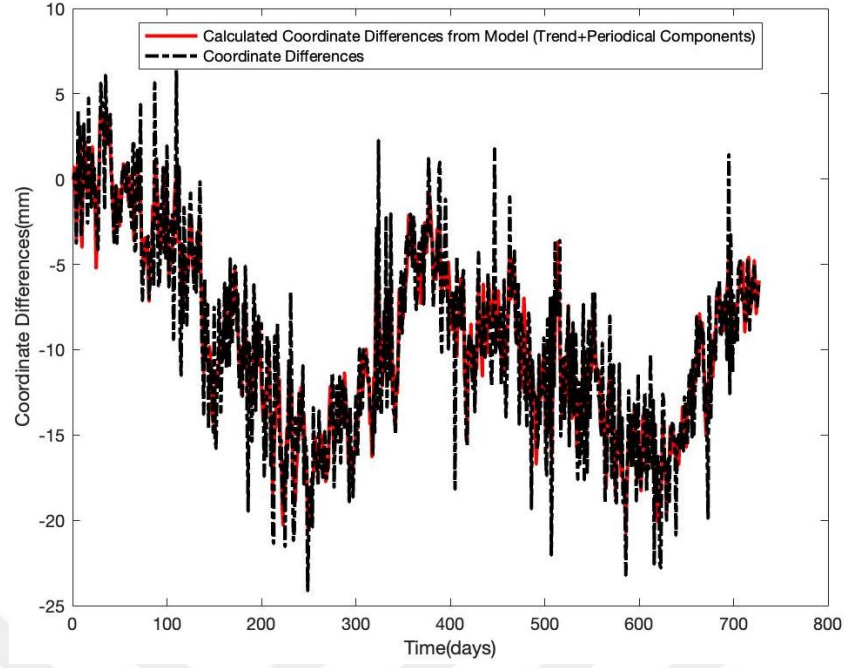


Şekil 6.20 BBEL istasyonu yükseklik bileşeni lineer trend modeli.

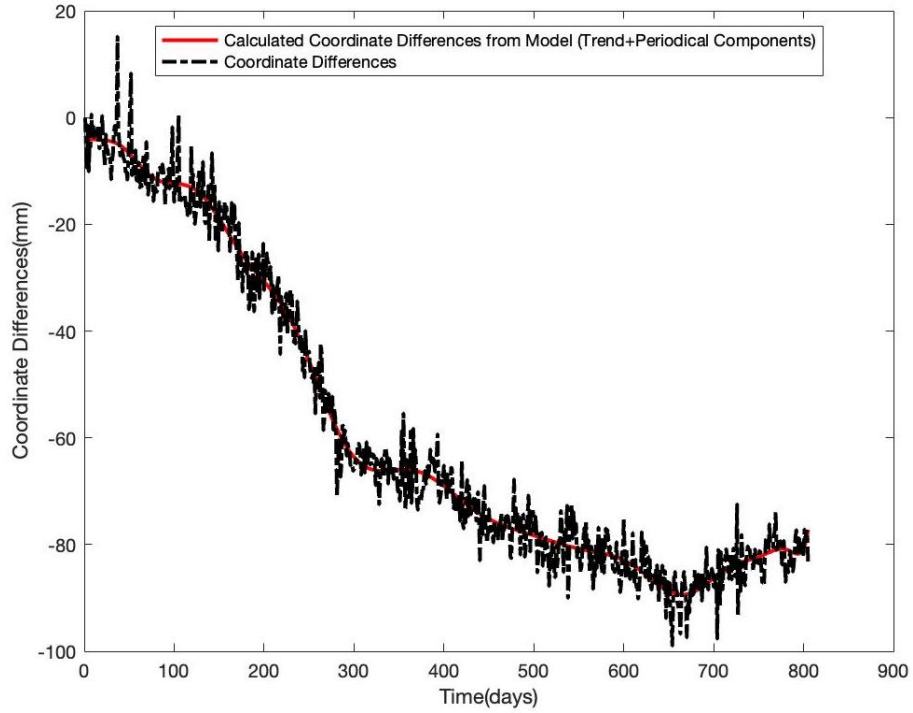


Şekil 6.21 BLV1 istasyonu yükseklik bileşeni lineer trend modeli.

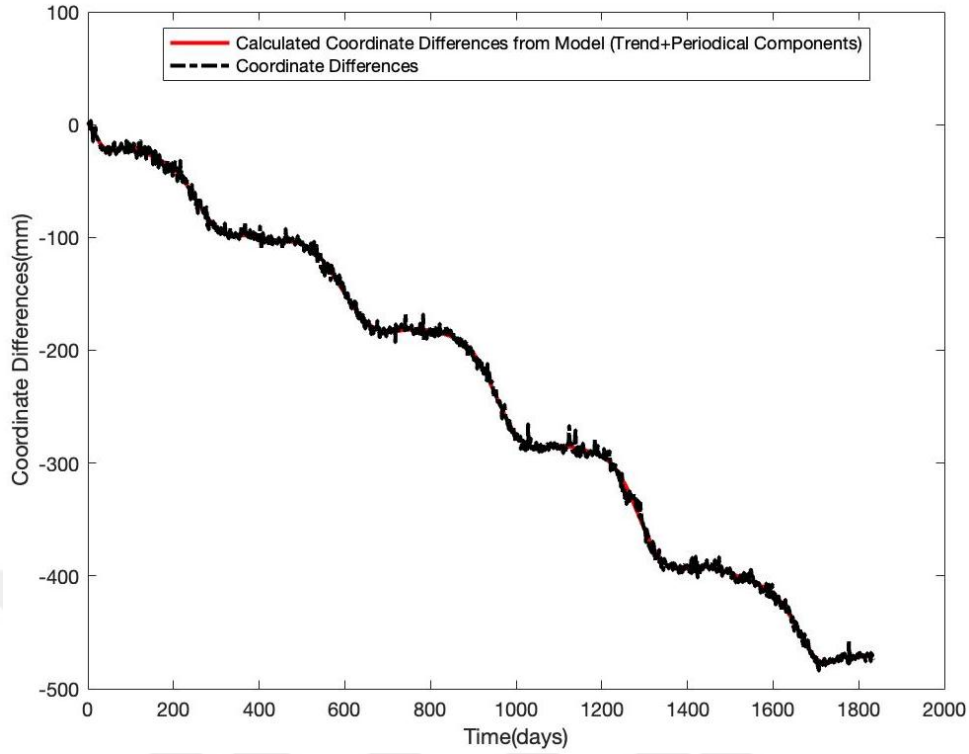
Zaman serilerinde yer alan trend bileşenleri ile periyodik bileşenler bir araya getirilerek istasyonların koordinat bileşenlerinin modelleri meydana getirilmiştir. Ardından modellerle istasyonların ilk güne göre değişimini belirten koordinat farkları aynı grafiklerde çizilerek modellerin zaman serilerine ne kadar uyduğu incelenmiştir (Şekil 6.22, 6.23, 6.24).



Şekil 6.22 BMET istasyonu yükseklik bileşeni trend + periyodik modeli.



Şekil 6.23 BBEL istasyonu yükseklik bileşeni trend + periyodik modeli.



Şekil 6.24 BLV1 istasyonu yükseklik bileşeni trend + periyodik modeli.

6.3 Nivelman Çalışmaları

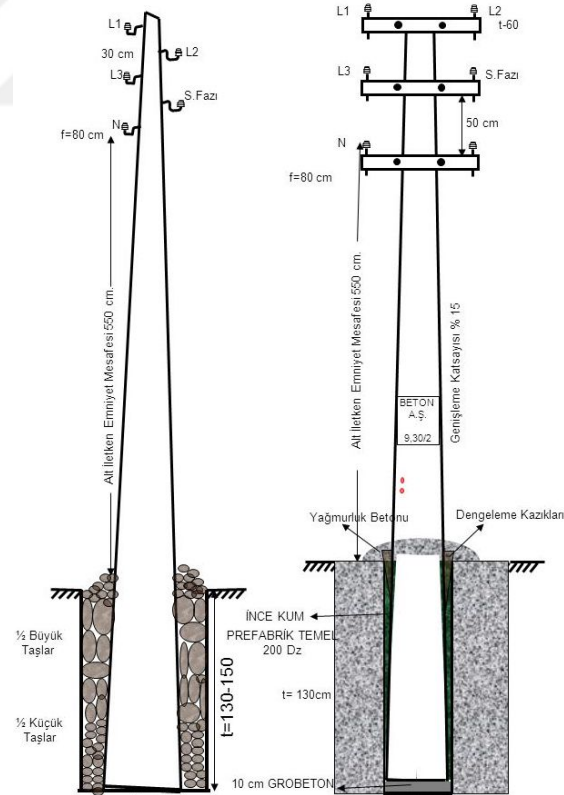
6.3.1 Nivelman Ölçüleri

Alüvyon zemin üzerinde bulunan Bolvadin yerleşim alanında, 2012 yılından başlayarak yüzeyde daha önceden olmayan deformasyonların meydana geldiği izlenmiştir. Oluşan düşey yöndeki yüzey deformasyonlarının miktarını hesaplamak amacıyla bölgeye nivelman ağı kurulmuştur. Bu nivelman ağı, yüzey deformasyonlarını dik kesecek profiller biçiminde planlanmıştır. Nivelman için yurt dışından özel duvar araçları getirtilmiştir (Resim 6.5).



Resim 6.5 Nivelman duvar tesislerinde kullanılan araçlar (Tiryakioğlu 2019).

Araçlar, bölgedeki beton elektrik direklerine monte edilmiştir. Direklerin temelleri direk yüksekliğine bağlı olarak değişmektedir. Bu temeller, zeminden yaklaşık 1.3-1.5 metre aşağıda yer almaktadır (Şekil 6.25).



Şekil 6.25 Elektrik direklerinin kesit görüntüsü (Tiryakioğlu 2019).

Her elektrik direğine, birbirine dik doğrultuda, direğin kendi içinde oluşacak deformasyonları da hesaplayabilmek amacıyla ikişer adet duvar aracı yerleştirilmiştir (Resim 6.6). Bu araçların bir özelliği, ölçüm sonunda çıkarılıp gerektiğin yeniden kullanılabilmesidir. Bu özellik, noktaların zarar görmesinin önüne geçmiştir.



Resim 6.6 Beton elektrik direği üzerindeki nivelman araçları (Tiryakioğlu 2019).

İlçede yüzey deformasyonlarına dik olarak 9 nivelman güzergâhı planlanmıştır (Şekil 6.27). Nivelman ağının ölçümleri 2016-2017-2018-2019-2020 yıllarında yapılmıştır. Ölçümler, 2019 yılında temmuz ayında, diğer yıllarda ise ağustos ayında gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sırasında iki yazıcı, iki alet operatörü, iki miracı, toplam altı kişi görevlendirilmiştir. Nivelman ölçümlerinde iki adet TOPCON DL-101C dijital nivodan, iki de barkodlu invar miradan yararlanılmıştır. Kampanyalar başlamadan önce cihazların kalibrasyonlarını, firma servisi kontrol etmiştir. Uygulama, GİİG ölçü tekniğiyle gerçekleştirilmiştir. Dijital nivo ile mira okumalarında, okumaların her biri üçer kez yapılmıştır. Okumalar arasındaki fark 0.4 mm'yi geçtiğinde ölçüler tekrarlanacak şekilde düzenlenmiştir. Belirlenen sınırlar içinde kalan okumaların ortalaması alınmış ve ölçüler elde edilmiştir (Şekil 6.26). Ölçü (deformasyon) noktaları olarak elektrik direkleri seçilmesi nedeniyle mira payandasına ve mira altlığına ihtiyaç duyulmamıştır. Payandadan ve altlıktan ise bağlantı ölçülerinde yararlanılmıştır (Resim 6.7).

ÖLÇÜ YERİ: BOLVADİN

125,158	106,897
---------	---------

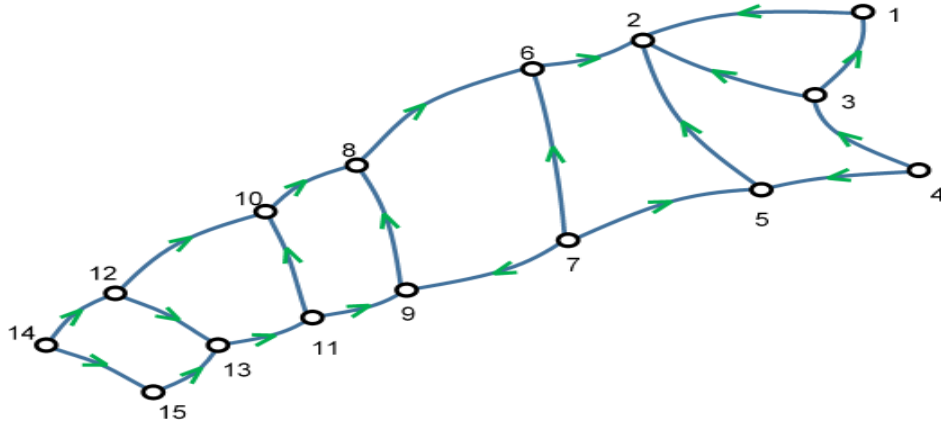
h= -1,26303
x= 232,055

Şekil 6.26 Örnek nivelman klişesi.

Mira ile nivo arası uzaklık en çok 30 m olacak biçimde eşit alınmış ve mira okumaları gerçekleştirilmiştir. Böylece yer küresellik eğriligi, refraksiyon etkisi, kolimasyon vb. hatalar en baştan giderilmiştir. Ölçümler sırasında nivolar, gözlem çizgileri yerden en az 70 cm yukarıda olacak biçimde kurulmuştur. Duyarlı nivelman ölçülerinde tek parçalı alet sehпасından yararlanılmıştır. Ölçülerin hepsi gidiş dönüş şeklinde yapılmış, oluşturulan güzergâhların başlangıç ve bitiş noktaları nivelman ölçümleriyle birbirine bağlanmıştır.



Resim 6.7 Bolvadin ilçesinde 2020 yılında yapılan nivelman ölçümleri.



Şekil 6.27 Kullanılan nivelman ağı (Tiryakioğlu 2019).

8 profilde 79 RS noktası tesis edilmiştir (Çizelge 6.5). Şekil 6.4'te Bolvadin ilçesinde kurulan nivelman ağı gösterilmiştir.

Çizelge 6.5 Profildeki noktalar ve numaraları.

Profil Numarası	Profil Üzerindeki Defromasyonun Takip Edildiği Nokta Numaraları
Profil 1	1-101-102-103-104-105-106-107-3
Profil 2	2-201-202-203-204-205-206-207-3-301-302-303-304-305-4
Profil 3	2-401-402-403-404-405-406-407-408-409-410-411-412-413-414-5
Profil 4	6-501-502-503-504-505-506-507-508-509-510-511-512-513-514-515-7
Profil 5	8-601-602-603-604-605-9
Profil 6	10-701-702-703-11
Profil 7	12-801-802-803-804-13
Profil 8	14-901-902-903-904-15

Çizelge 6.6 Profil hata sınırları çizelgesi.

Profil Numarası	Profil Mesafeleri	Gidiş Dönüş Farkları(mm)					Hata Sınırı(mm)	Sonuç
		2016	2017	2018	2019	2020		
1	300	0.8	0.6	0.7	0.1	1	2.1	Uygun
2	800	0.8	0.7	0.6	0.5	0.5	3.6	Uygun
3	550	0.5	0.4	0.7	0.6	2.7	3.0	Uygun
4	250	0.5	0.6	0.9	0.5	1.2	2.0	Uygun
5	200	0.6	0.2	1.0	0.5	1.4	1.8	Uygun
6	150	0.5	1.0	0.1	0.7	0.3	1.5	Uygun
7	600	1.2	0.2	2.4	1	3.1	3.1	Uygun
9	250	1.1	1.1	0.1	1	0.9	2.0	Uygun

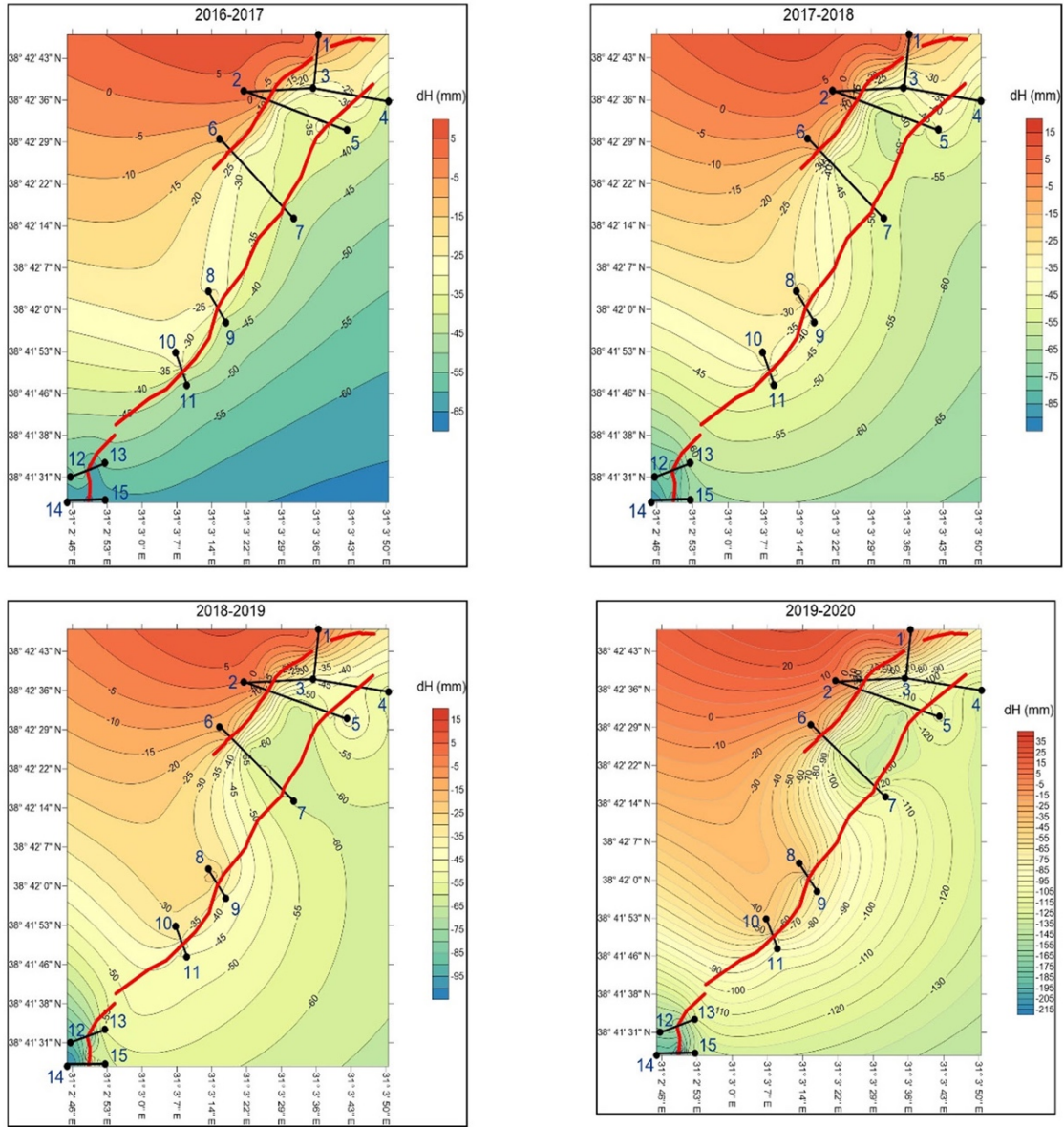
Bütün hatlarda gidiş dönüş ölçümleri arasındaki farklar $4\sqrt{S}$ formülüyle hesaplanan hata sınır değerini aşmamıştır. Türkiye’de hassas nivelman yöntemiyle ilgili hata sınır değeri oranları olmadığından Almanya standartlarındaki (DIN/18710) değerlerden yararlanılmıştır (Bozkuş 2019). Bulunan gidiş dönüş fakları gösterilmiştir (Çizelge 6.6).

6.3.3 Nivelman Ölçülerinin Değerlendirilmesi

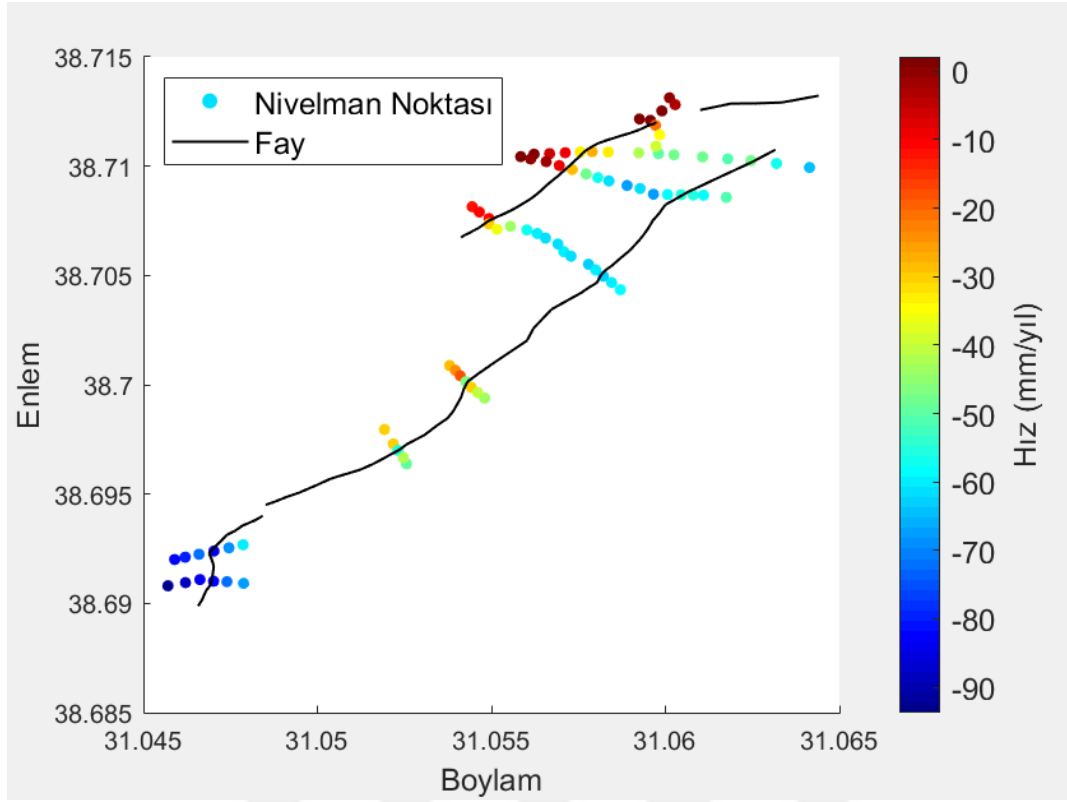
Nivelman ölçülerinin incelenmesinde, ağ önce serbest dengelenmiş, ardından uyuşumsuz ölçü testi yapılmıştır. Uyuşumsuz ölçü testi POPE metoduyla olmuştur. Test sonucunda bütün ölçülerin uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca aynı jeodezik ağda, ana ağ noktalarında S-transformasyonu deformasyon değerlendirmesi de gerçekleştirilmiştir. GLOBAL TEST neticesinde deformasyon olduğu belirlenmiştir. Yöntemin detayları Çalışkan (2021)’da anlatılmıştır. Her kampanya 1 nolu noktaya dayalı olarak zorlamasız, en küçük kareler yöntemiyle dengelenmiştir. Jeodezik ağdaki herhangi bir noktanın değişim miktarı Δh ’dır. Δh ; bir sonraki yılın dengelenmiş yüksekliklerinden, bir önceki yılın dengelenmiş yüksekliklerinin farkı alınmıştır. Örneğin; 2019 yılının dengelenmiş yükseklikleri (h_{2019}), 2020 yılının dengelenmiş yükseklikleri (h_{2020})’dir.

$$\Delta h = h_{2020} - h_{2019} \quad (6.3)$$

Elde edilen farklardan 2016-2020 yılları arası deformasyon haritaları elde edilmiştir (Şekil 6.28). Her bir deformasyon noktasının yıllara göre meydana gelen deformasyonlara göre tüm noktaların deformasyon hızları hesaplanmıştır. Hesaplama işlemleri için kalman filtreleme yöntemi kullanılmıştır. Bu sonuçlar çalışma kapsamında üretilen makaleden alınmıştır. Tiryakioğlu vd. (2022)’de yayınlanmış ve yöntem detayları Tiryakioğlu vd. (2022)’de hesaplanmıştır.



Şekil 6.28 Deformasyonun hızlarının yıllara göre dağılımı (Tiryakioğlu vd. 2022).



Şekil 6.29 5 yıllık deformasyon hızları (Tiryakioğlu vd. 2022).

1 numaralı nokta nivelman ölçümlerinin başlangıç noktasıdır. Şekil 6.29 ve Çizelge 6.7 incelendiğinde, özellikle bölgenin güneyinde deformasyon değerlerinin yaklaşık -9 cm/yıl ile -7 cm/yıl arasında değiştiği görülmektedir (çökme). Bu çökme değerleri kuzeye gidildikçe azalmakta ve bölgenin ortasında -3 cm/yıl ile -5 cm/yıl arasında izlenmektedir. Bölgenin doğusunda ise batı-doğu doğrultusunda çökme değerleri artmakta ve -1 cm/yıl ile -6 cm/yıl arası değişkenlik göstermektedir. Genel olarak çalışma alanında güneydoğu yönünde çökme değerlerinde bir artış gözlenmektedir. Deformasyon hızları ile ilgili detaylı analizler Tiryakioğlu vd. (2022)'de yer almaktadır.

Çizelge 6.7 Nivelmandan hesaplanan noktasal hızlar.

Nivelman Nokta No	Hız (mm/yıl)	Standart Sapma (mm/yıl)	Karar	No	Hız (mm/yıl)	Standart Sapma (mm/yıl)	Karar
1	-	-	-	401	0	10.4	Anlamsız
2	1.7	9.7	Anlamsız	402	-1.7	11.0	Anlamsız
3	-48.9	9.9	Anlamlı	403	-9.2	11.5	Anlamsız
4	-63.8	12.6	Anlamlı	404	-29.3	12.0	Anlamlı
5	-51.3	13.2	Anlamlı	405	-48.2	12.4	Anlamlı

Çizelge 6.7 (Devam) Nivelmandan hesaplanan noktasal hızlar.

6	-12.1	13.9	Anlamsız	406	-56.5	12.7	Anlamlı
7	-58.7	15.5	Anlamlı	407	-61.8	12.9	Anlamlı
8	-28.6	17.1	Anlamlı	408	-67.3	13.1	Anlamlı
9	-43.5	17.3	Anlamlı	409	-62.1	13.3	Anlamlı
10	-30.6	18.7	Anlamsız	410	-66.8	13.4	Anlamlı
11	-49.7	18.8	Anlamlı	411	-58.8	13.4	Anlamlı
12	-82.5	21.1	Anlamlı	412	-56.1	13.4	Anlamlı
13	-60.1	20.9	Anlamlı	413	-55.6	13.4	Anlamlı
14	-93.7	21.6	Anlamlı	414	-57.9	13.3	Anlamlı
15	-68.2	21.7	Anlamlı	501	-11.3	14.3	Anlamsız
101	-3.1	5.3	Anlamsız	502	-10.9	14.6	Anlamsız
102	1.7	6.6	Anlamsız	503	-30.3	14.9	Anlamlı
103	2.1	7.6	Anlamsız	504	-36.1	15.2	Anlamlı
104	1.3	8.3	Anlamsız	505	-43.5	15.4	Anlamlı
105	-21.3	8.9	Anlamlı	506	-57.5	15.6	Anlamlı
106	-33.9	9.3	Anlamlı	507	-60.6	15.7	Anlamlı
107	-38.5	9.7	Anlamlı	508	-62	15.8	Anlamlı
201	1.9	10.1	Anlamsız	509	-62	15.9	Anlamlı
202	-6	10.3	Anlamsız	510	-60.3	15.9	Anlamlı
203	-9.4	10.5	Anlamsız	511	-61.3	15.9	Anlamlı
204	-33.2	10.6	Anlamlı	512	-63	15.9	Anlamlı
205	-26.6	10.6	Anlamlı	513	-59.6	15.8	Anlamlı
206	-33.3	10.5	Anlamlı	514	-62.3	15.7	Anlamlı
207	-42.5	10.2	Anlamlı	515	-60	15.6	Anlamlı
301	-47.6	10.6	Anlamlı	601	-24	17.3	Anlamsız
302	-47.4	11.1	Anlamlı	602	-18	17.4	Anlamsız
303	-50.7	11.6	Anlamlı	603	-46.3	17.4	Anlamlı
304	-47.7	12.0	Anlamlı	604	-30.2	17.4	Anlamlı
305	-56.5	12.3	Anlamlı	605	-40.3	17.4	Anlamlı
801	-79.8	21.2	Anlamlı	701	-29.5	18.8	Anlamsız
802	-71.7	21.2	Anlamlı	702	-56.1	18.9	Anlamlı
803	-83.6	21.1	Anlamlı	703	-42	18.8	Anlamlı
804	-69.6	21.0	Anlamlı	903	-81.8	21.8	Anlamlı
901	-89.2	21.7	Anlamlı	904	-72.2	21.8	Anlamlı
902	-84	21.8	Anlamlı				

6.4 InSAR Çalışmaları

6.4.1 Sentinel-1 Uydusu

Sentinel-1 uydusu, 5.405 GHz merkez frekansında çalışan C-bandı SAR sensörü taşımaktadır (Şekil 6.30). Çevreyle ve güvenlikle ilgili bilgiler veren bir Avrupa

teknolojisi. Dünya gözlem uydularından alınan verilerden yararlanmaktadır. Sentinel-1 uydusunun özellikleri aşağıda verilmiştir (Çizelge 6.8).

Çizelge 6.8 Sentinel-1 uydusunun özellikleri.

Yörünge	Güneş eş zamanlı tekrar yörünge
İrtifa	693 km
Eğim açısı	98.18°
Görüntüleme tekrarı (1A-1B)	6 gün
Kütle	2300 kg
Band	C band
Fırlatma Tarihi	Nisan 2014

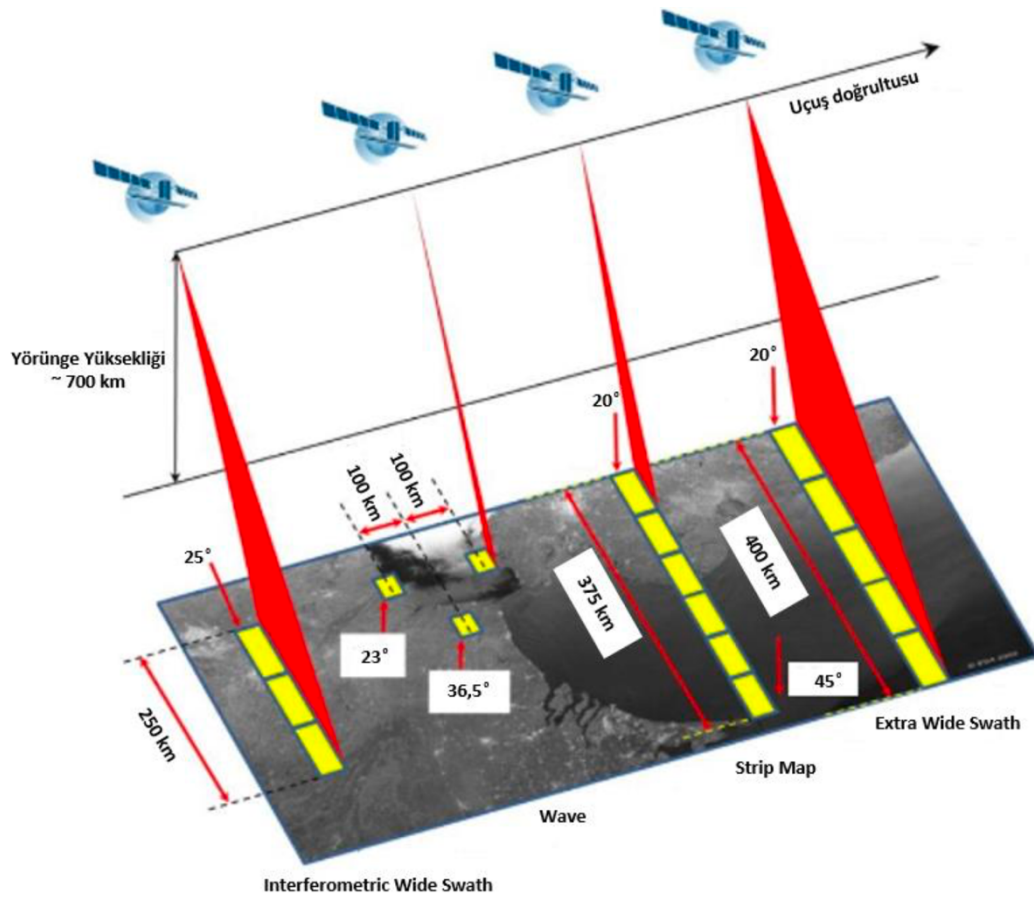
Sentinel-1 uydusundan doğal afet durumunda acil durum haritalama desteğinde; orman, su, toprak ve tarım arazilerinin izlenmesinde; denizlerin ve buzulların incelenmesinde; petrol sızıntılarının haritalanmasında; yeryüzü deformasyonlarının belirlenmesinde; iklim değişikliklerinin tespitinde yararlanılmaktadır.



Şekil 6.30 Sentinel-1 uydusu (İnt. Kyn. 13).

Sentinel-1 uydusu, 5 m'ye kadar farklı çözünürlüğe ve 400 km'ye kadar kapsama alanına sahip dört görüntüleme modunda çalışır ve C-band görüntülemeyi de içerir (Şekil 6.31).

- Stripmap (SM)
- Interferometric Wide swath (IW)
- Extra-Wide swath (EW)
- Wave mode (WV)



Şekil 6.31 Sentinel-1 uydusu görüntüleme modları (İnt. Kyn. 14).

Stripmap modunun 5x5 m çözünürlüğü ve 80 km gelen şerit genişliği vardır. Interferometric Wide swath modu, 250 m'lik geniş bir şerit aralığına sahiptir. Ayrıca 5x20 m çözünürlükle orta çözünürlükte kabul edilir. Bu tez çalışmasında, IW modu ile yüzey deformasyonları belirlenmiş ve takip edilmiştir. Wide swath modunun, bir bölgeyi görüntülemeye 3 alt şerit izleme özelliği vardır. Extra-Wide swath modu ise denizlerde,

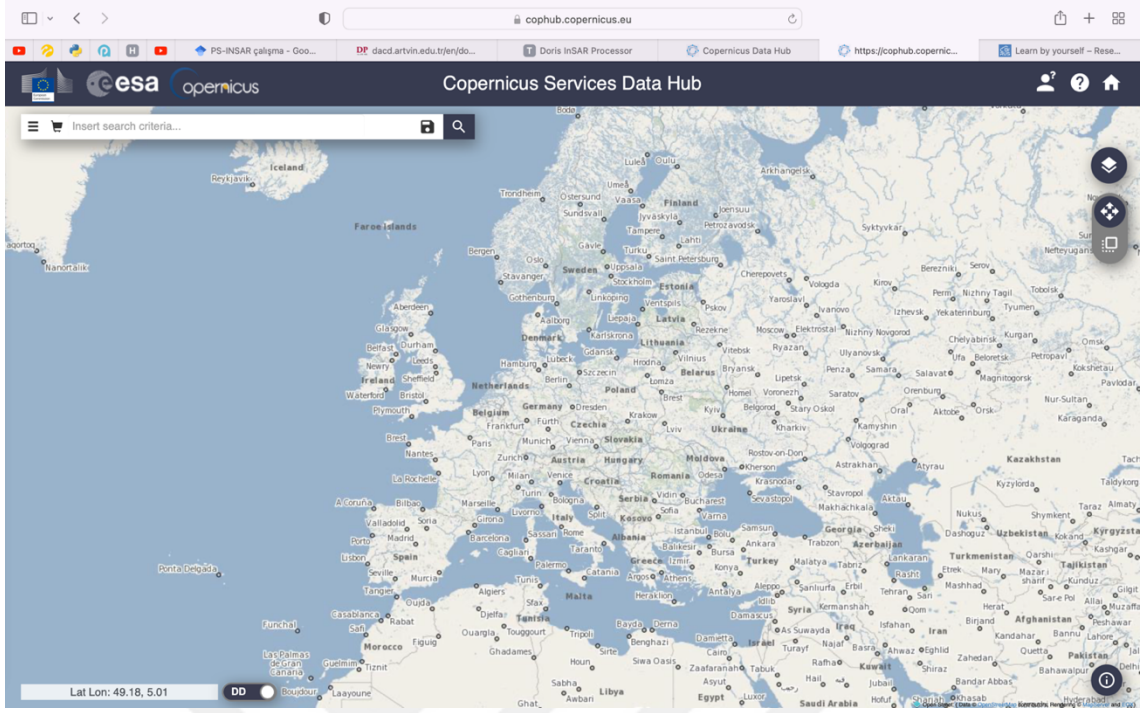
buzlu yerlerde ve kutup bölgesi gibi geniş alanlarda incelemeler yapılmasını mümkün kılar. Bu modun, 25x100 m çözünürlüğü, 400 km tutan şerit genişliği, 5 alt şeridi vardır. Bununla birlikte IW modundaki gibi interferometride yararlanılma yeteneğini de içermektedir. WV moduysa, okyanus dalga yüksekliğini ve yönünü belirlemektedir. Bu mod, 5x20 m çözünürlüğünde ve 20x20 km şerit genişliğindedir.

Çift polarizasyon yeteneği, çok kısa yineleme süreleri ve hızlı ürün teslimatı sağlar. Bunlar; HH (Horizontal-Horizontal), VV (Vertical-Vertical), HV (Horizontal-Vertical), VH (Vertical-Horizontal) adlarını alır. Çift polarizasyon verileri, arazi örtüsünün sınıflandırılmasında ve deniz-buz uygulamalarında kullanışlıdır. Her gözlemde, uzay aracı konumunun ve hareketinin kesin ölçümleri bulunmaktadır. SAR, açık ve kapalı her hava koşulunda, aydınlık ve karanlık her zaman diliminde çalışabilir ve veri elde edebilir. Sentinel-1, C-SAR aracının güvenli, yinelenen özelliğiyle geniş alanları izleme hizmeti verebilir (İnt. Kyn. 15).

6.4.2 Uydu Görüntülerinin Temini

Sentinel-1 uydu görüntülerinden yararlanarak, değerlendirme işlemi yapılmıştır. Bu uydu görüntülerini ücretsiz olarak sunan iki internet sitesi mevcuttur. Bu internet sitelerinin birinden uydu görüntüleri indirilebilir. Sitelerden birinin internet adresi : <https://cophub.copernicus.eu/dhus/#/home> dir.

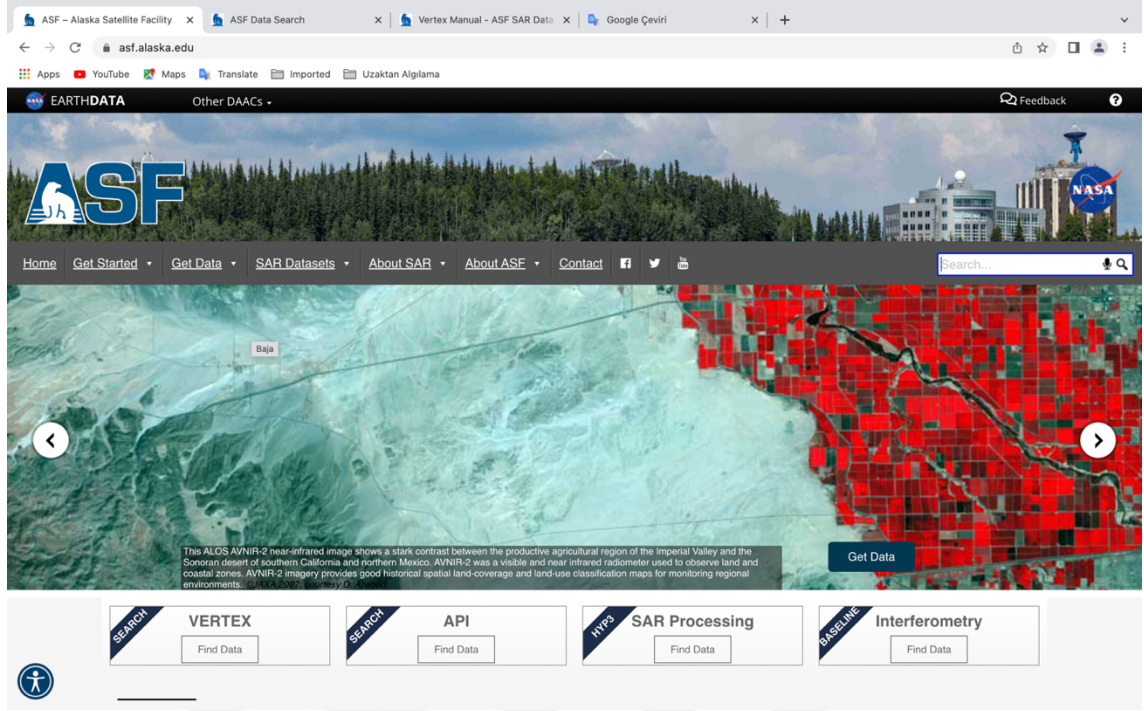
Copernicus, Avrupa Birliği'nin tüm Avrupa vatandaşlarına fayda sağlamak için kurduğu, gezegenimize ve çevresine bakan dünya gözlem programıdır. Uydu gözlemi verilerinden yararlanarak bilgi hizmetleri sunar. Verileri indirebilmek için bu siteye üye olmak gerekmektedir. Şekil 6.32, Copernicus gözlem programı sitesini göstermektedir.



Şekil 6.32 Uydu görüntülerini indirmede kullanılan copernicus gözlem programı sitesi ekran görüntüsü.

Diğer internet sitesinin adresi de şöyledir: “<https://asf.alaska.edu>”. Şekil 6.33, ASF (Alaska Satellite Facility) giriş sayfasını göstermektedir. Bu sitede veri indir sekmesinden ASF Vertex sekmesi tıklanır. Açılan yeni sekmeden veri indirebilmek için bu siteye de üye olunması gerekmektedir. Ağustos 2016-Ağustos 2020 yılları arasındaki sentinel-1 uydularının elde ettiği görüntüler sözü edilen siteden indirilmiştir.

Alaska Uydu Tesisi, uzaktan algılama verilerini erişilebilir hale getirmiştir. ASF, Alaska Fairbanks Üniversitesi Jeofizik Enstitüsünün bir parçasıdır. ASF, uzaktan algılama verilerini dünya çapındaki bilimsel kullanıcılara dağıtır. ASF, ulusal ve uluslararası yer bilimleri araştırmalarını, saha operasyonlarını ve ticari uygulamaları desteklemek için uzaktan algılamanın gelişimini teşvik etmiş ve kolaylaştırmıştır. ASF, en yüksek kalitede verileri ve hizmetleri zamanında sağlamaya çalışmaktadır.

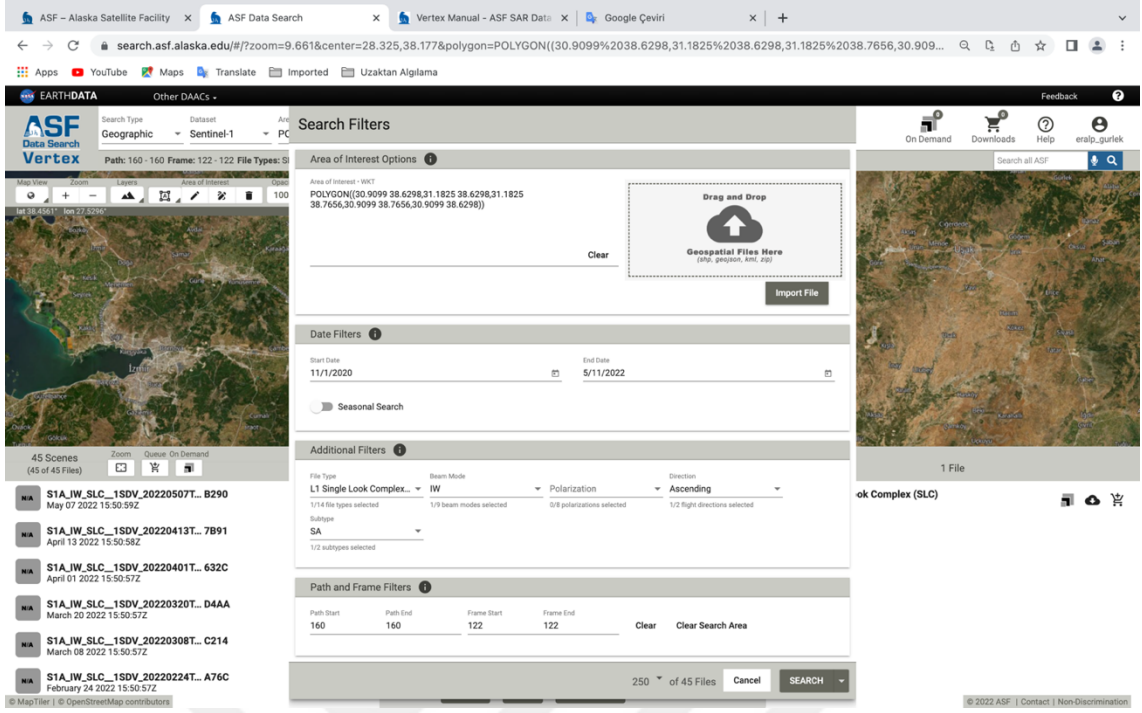


Şekil 6.33 Uydu görüntülerini indirmede kullanılan ASF giriş sayfası ekran görüntüsü.

Siteye üye olunduktan sonra çalışma yapılacak bölge seçilir. Yapacağımız uygulama alanı Afyonkarahisar ilinin Bolvadin ilçesidir. Çalışma bölgesi seçilince o bölgede çekilen uydu görüntüleri sıralanır. Bu görüntüler istenilen kriterlere göre filtrelenebilmektedir (Şekil 6.34). Kullanılan SAR görüntülerinin özellikleri aşağıda verilmiştir (Çizelge 6.9).

Çizelge 6.9 Yararlanılan SAR görüntülerinin nitelikleri.

Algılayıcı	Yörünge	Mod	Yol	Çerçeve	Polarizasyon	Periyot
Sentinel-1	Alçalan	IW	65	464	VV	Ağustos 2016- Ağustos 2020
Sentinel-1	Yükselen	IW	160	122	VV	Ağustos 2016- Ağustos 2020



Şekil 6.34 Uydu görüntülerini seçmek için kullanılan filtreleme bölümü ekran görüntüsü.

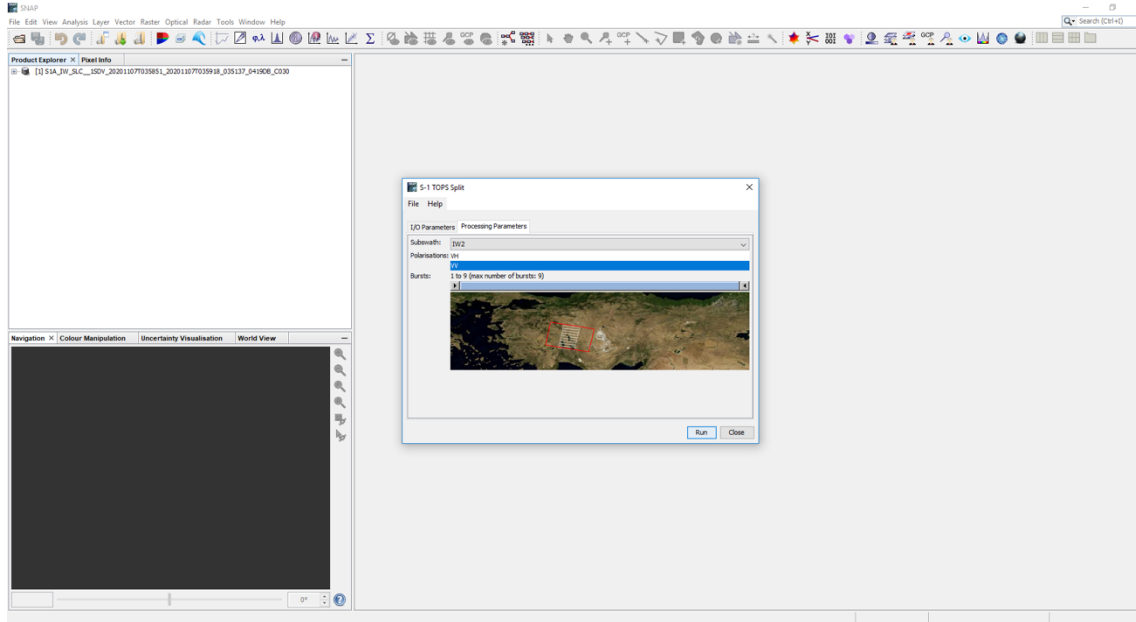
Süzülen görüntüler indirme bölümüne eklenir. Sağ alt köşede indirme seçenekleri vardır. Uydu görüntüleri tek tek indirilebileceği gibi farklı programlama dilleri ile geliştirilecek scriptler kullanılarak çok sayıda görüntü tek seferde de indirilebilir.

6.4.3 Uydu Görüntülerinin Değerlendirilmesi

6.4.3.1 SNAP ve StaMPS

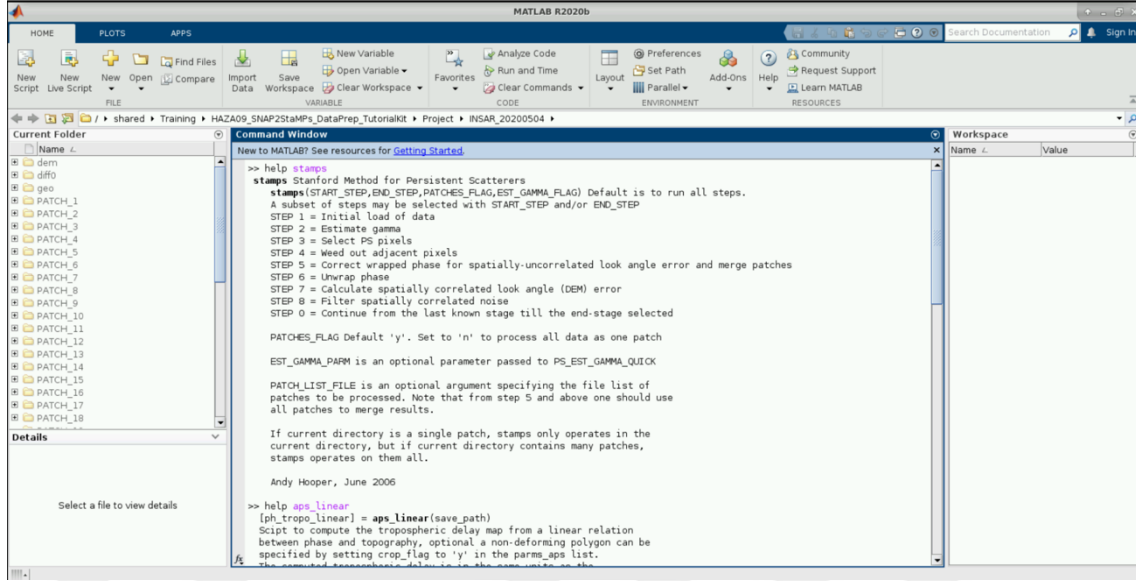
ESA'nın geliştirdiği SNAP (Sentinels Application Platform- Sentinel Uygulama Platformu), değişik dünya gözlem uydularından alınan verilerin işlenmesini gerçekleştiren bir yazılımdır (Şekil 6.35). Kullanıcılar bu yazılımdan ücretsiz olarak yararlanmaktadırlar. SNAP'ta bulunan Sentinel-1 araç kutusu, SAR verilerinin işlenmesinde kullanılmaktadır. SNAP yazılımı, Sentinel-1 uydu verilerinden yararlanarak deformasyon amaçlı araştırmalarda interferogramlar oluşturur. Bununla birlikte, StaMPS yazılımında PSInSAR ya da SBAS değerlendirmelerini yapabilmek için dosyaların yazılım formatına uygun dışa aktarılmasını da sağlamaktadır. SNAP yazılımının işlem adımları aşağıdadır.

- 1- Split
- 2- Apply Orbit File
- 3- InSAR Stack Overview
- 4- Coregistration
- 5- Deburst
- 6- Make Subset
- 7- Interferogram Formation
- 8- Topographic Phase Removal
- 9- StaMPS Export



Şekil 6.35 Uydu görüntülerinin işlenmesinde kullanılan SNAP yazılımı ekran görüntüsü.

Yukarıdaki işlemler sonucunda ulaşılan veriler, StaMPS yazılımında kullanılmak amacıyla dışarı aktarılır. StaMPS yazılımıyla PS işleme başlamış olur (Şekil 6.36). Genlik dağılımı, menzilde ve azimutta nasıl çalışılacağı konuları saptanır. StaMPS yazılımı, MATLAB programlama diliyle hazırlanmış kodlardan oluşur. MATLAB başlayınca StaMPS yazılımının kodları çalıştırılır. StaMPS yazılım kılavuzunda açıklanan işlemler aşağıda gösterilmiştir (Hooper vd. 2018).



Şekil 6.36 Verilerin değerlendirilmesinde kullanılan StaMPS yazılımı ekran görüntüsü.

Veri yükleme: Veriler, PS işleme için belli formatlara dönüştürülür. MATLAB çalışma alanında depolanır.

Faz gürültüsü kestirimi: Daha sonra, interferogramlardaki aday piksellerin faz gürültüsü iteratif şekilde tahmin edilir. Bu adımda, SYM hatası yüksek pikselleri ayıklamak amacıyla bir eşik değerden yararlanılabilir. Aday pikseller, konumsal açıdan korelasyonlu fazı tespit etmek amacıyla bir gride göre yeni baştan örneklenirler. Bu işlem için grid boyutu metre olarak ifade edilebilir. Ağırlıklandırma tekniğinde de P square ya da SNR (Signal Noise Ratio) biçiminde olabilir. Bu işlemin kaç iterasyonda tamamlanacağına kullanıcı karar verir.

PS seçimi: Tahmin işleminden sonra, PS pikselleri gürültü nitelikleri bakımından belirlenir. Bu işleme interferogramların hepsi eklenir. Kullanıcı istemediği interferogramları çıkarabilir.

PS ayıklama: Belirlenen PS pikselleri, yakındaki yer çözünürlük elemanlarından kaynaklanan sinyal katkıları ve fazla gürültülü olanlar nedeniyle elenir. Bu safhada, tüm pikseller için faz gürültüsündeki standart sapma belirlenir. Standart sapması yardımcı eşik değerden yüksek çıkanlar ayıklanır. Benzer işlem, interferogramlardaki bütün piksellerde hesaplanan gürültülerde de yapılır. Başka bir eşik değerle, gürültüsü eşik değerden daha yüksek pikseller de çıkarılır. PS seçimindeki gibi, kullanan kişi istemediği interferogramları bu işleme eklemeyebilir.

Faz doğrulama: Belirlenen piksellerin sarılı fazı, SULA (Spatially-Uncorrelated Look Angle/konumsal olarak korelasyonsuz bakış açısı) hatasını gidermek amacıyla doğru hale getirilir. Araştırılan bölgede parça parça çalışıldıysa, parçalar bir araya toplanır. Sarılı faz ancak bu safhadan itibaren görüntülenebilir.

Faz açma: Ardından faz açma yöntemi belirlenerek faz açma işlemi yapılır. Goldstein filtresi için faz açma yöntemiyle pencere büyüklüğü seçilir. Ayrıca kullanıcının işleme katmayı düşünmediği interferogramlar belirlenir.

SCLA hatası kestirimi: Belirlenen SULA hatası, faz doğrulama aşamasında giderilir. Bu aşamada ise yalnızca konumsal olarak korelasyonlu SYM hatasından kaynaklanan SCLA (Spatially-Correlated Look Angle/konumsal olarak korelasyonlu bakış açısı) hatası bulunur. Birincil AOE (Atmospheric and Orbit Errors/atmosfer ve yörünge hatası) fazı aynı zamanda tahmin edilir. Konumsal açıdan korelasyonlu SYM hatası, SYM'nin kendisinde bulunan hatayı ve SYM'nin radar koordinatlarına yanlış eşleştirilmesini barındırır.

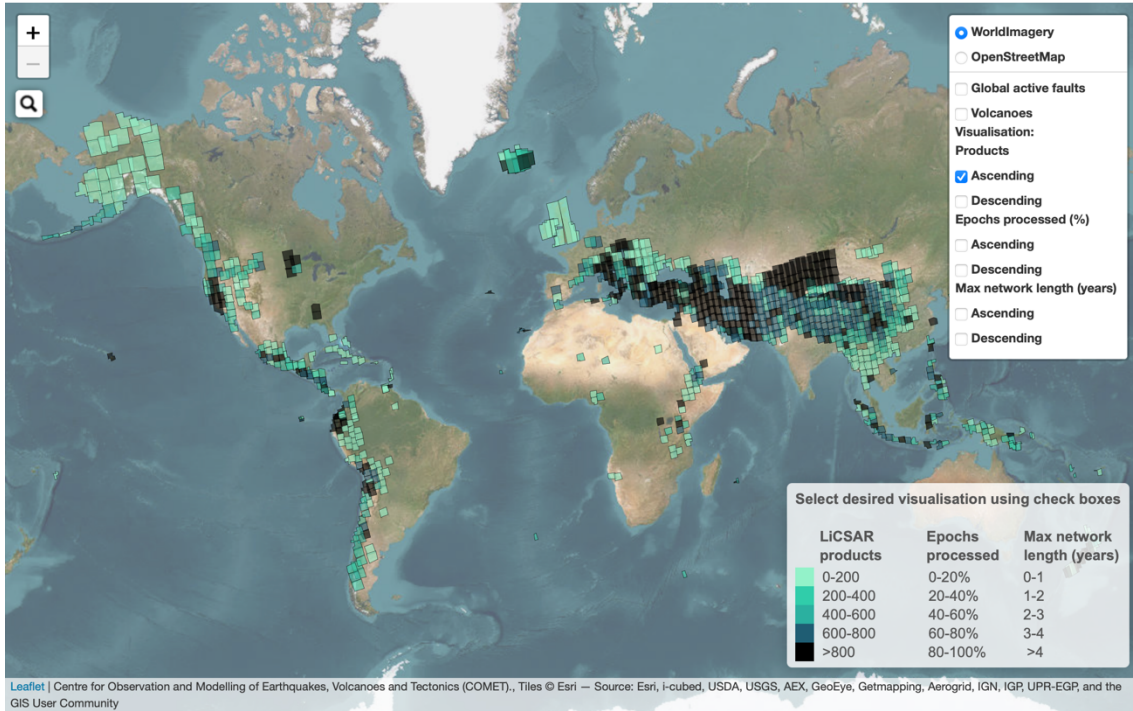
Atmosferik filtreleme: Bu aşama tercihe bağlıdır. Aykırı değerlerin filtrelenmesi beklenen durumlarda uygulanır.

Sentinel-1 uydu görüntüleri öncelikle SNAP ve StaMPS yazılımlarıyla değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonucunda elde edilen PS nokta hızları ile GNSS ve Nivelman yöntemlerinden hesaplanan hızlar arasındaki farkların yüksek çıkmasından dolayı uydu görüntülerinin değerlendirilmesinde kullanılan LİCSAR ve LİCSBAS yazılımları ile değerlendirme aşamasına geçilmiştir.

6.4.3.2 LİCSAR ve LİCSBAS

LiCSAR, Sentinel-1 verilerinde kullanılan otomatik bir InSAR işleme sistemidir. COMET'in (Centre for the Observation and Modelling of Earthquakes, Volcanoes and Tectonics/deprem, volkan ve tektonik gözlem ve modelleme merkezi) LiCS (Looking inside the Continents from Space/uzaydan kıtaların içine bakmak) projesi doğrultusunda ortaya çıkmıştır.

LiCS projesi, uzayda ve zamanda sismik tehlikenin nasıl dağıldığını öğrenmek için deprem deformasyon döngüsünü gözlemler. Kıtaların bütün uzamsal ve zamansal ölçeklerde nasıl deforme olduğunu anlamayı amaçlar. LiCSAR bu amaç kapsamında geliştirilmiştir. LiCSAR, yapay açıklıklı radar verilerini işlemek amacıyla ticari yazılım olan GAMMA'ya ait özel araçlar ve algoritmalar kullanmaktadır (Lazecky vd. 2020). Sistemin hazırladığı sonuç ürünlerine çevrim içi bir portal olan COMET-LiCS web yardımıyla ücretsiz olarak ulaşılabilir ve bu ürünler indirilebilir (Şekil 6.37).



Şekil 6.37 COMET-LiCS giriş sayfası ekran görüntüsü.

COMET-LiCS web'de çerçeve kimlikleri, çerçevelerin alanı ve kullanılabilir interferogramların sayısı görülebilir. Bu web sayfasında indirilmek istenen dosyalar da incelenebilir.

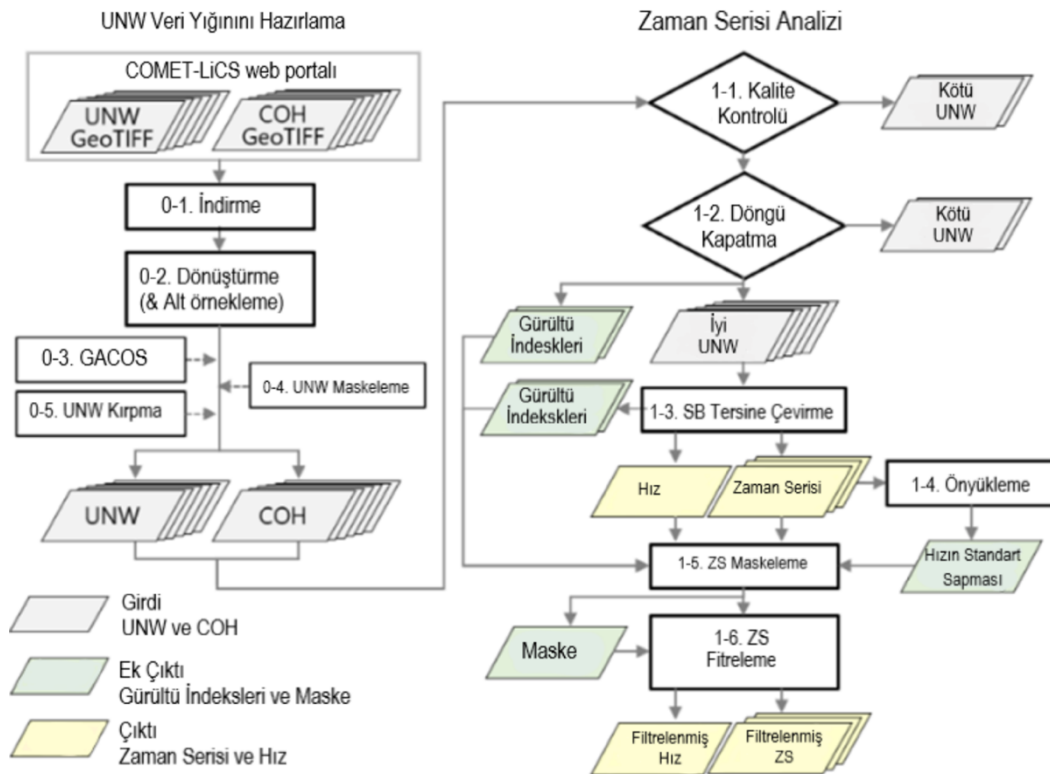
LiCSAR çerçevelerinin adları OOOO_AAAAA_BBBBBB olmak üzere üç bölümden meydana gelmektedir. Birinci bölümde OOO yörünge numarasını, P azalan (D) veya artan (A) olduğunu belirtmektedir. İkinci bölümde AAAAA çerçevenin coğrafi konumunu ifade etmektedir. Son bölümde ise BBBBBB birinci, ikinci ve üçüncü basamak çiftlerinin sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü alt taramadaki bursts sayısını

tanımladığı durumda, bursts sayısını göstermektedir (İnt. Kyn. 16). Bu tez çalışmasında 160A_05207_131313 ve 065D_05087_131313 çerçeveleri kullanılmıştır.

LiCSBAS, LiCSAR ürünleriyle bütünleşmiş açık kaynaklı bir InSAR zaman serisi analiz paket yazılımıdır. Araştırma alanında yeterli LiCSAR ürünü bulunuyorsa, bu yazılımla yer değiştirmenin zaman serisine ve hızına en kısa zamanda ulaşılabilir (Morishita vd. 2020).

LiCSBAS yazılımıyla değerlendirme yapmanın iki basamağı vardır. İlk basamakta inceleme alanını kapsayacak biçimde LiCSAR portalında önceden işlenmiş veriler indirilerek bu veriler değerlendirme için hazırlanır. İkinci basamakta ise LiCSAR portalından indirilen çerçeveler değerlendirilerek hız ve zaman serisi hesaplanır. Şekil 6.38’de LiCSBAS yazılımı iş akış grafiği gösterilmiştir.

LiCSBAS yazılımında inceleme gerçekleştirmek amacıyla önce COMET-LiCS Sentinel-1 InSAR portalı üzerinden çalışma alanını kapsayan çerçeve kimliği belirlenmelidir.



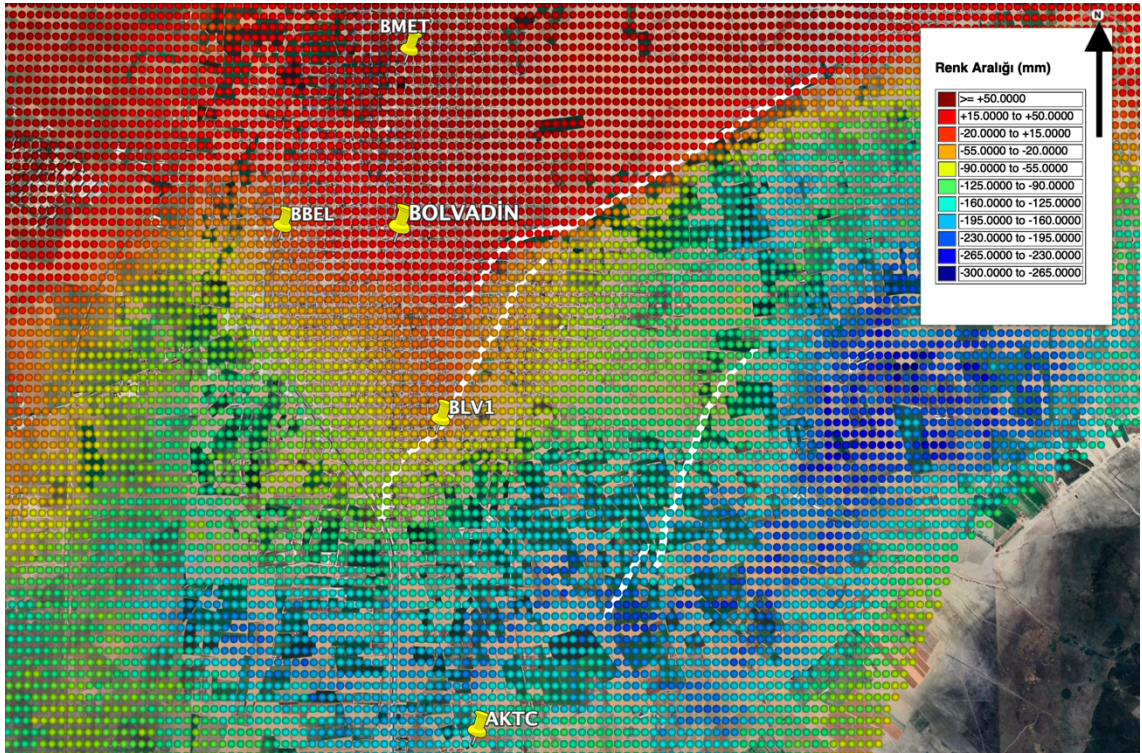
Şekil 6.38 LiCSBAS yazılımı iş akış grafiği (Morishita vd. 2020).

LiCSBAS yazılımında veriler beş aşamada hazırlanmaktadır. İlk aşamada COMET-LiCS portalında tespit edilen çerçeve kimliği için unw yani açılmamış interferogram ve cc yani tutarlılık GeoTIFF dosyaları istenilen tarih aralığında indirilir. İkinci aşamada indirilen GeoTIFF dosyaları, yazılımın işleyebileceği veri formatına çevrilerek alt örneklerle indirgenir. Kalan üç aşama ise kullanıcının isteğine göre yapılmaktadır. Üçüncü aşamada GACOS (Generic Atmospheric Correction Online Service/genel atmosferik düzeltme çevrimiçi hizmeti) verilerinden yararlanılarak paketlenmemiş verilerde troposferik düzeltmeler gerçekleştirilmektedir. Dördüncü aşamada istenmeyen ya da düşük tutarlıktaki alanların maskelenmesi sağlanır. Son aşamada ise yaklaşık 250 km genişliğinde olan LiCSAR çerçeveleri, kesme işlemi ile küçültülerek işlem daha çabuk sonuçlanabilir (İnt. Kyn. 17). Verileri hazırlamak için LiCSBAS yazılımında işlem sırası şu şekildedir.

1. GeoTIFF dosyalarının indirilmesi.
2. GeoTIFF formatının dönüştürülmesi.
3. GACOS ile troposferik düzeltme (isteğe bağlı).
4. Hatalı UNW maskeleme (isteğe bağlı).
5. Çerçevelerin kesilmesi (isteğe bağlı).

LiCSBAS yazılımında zaman serisi analizi altı basamakta yapılmaktadır. İlk basamakta sarılmamış verilerin kalitesi ve tutarlılığı kontrol edilir. Yazılım uyumsuz verileri belirleyip ayıklar. İkinci basamakta üç interferogram setinden döngü kapanmaları hesaplanır ve kapanma hatası görülen interferogramlar saptanır. Üçüncü basamakta NSBAS yaklaşımından yararlanılarak zaman serileri ve hız elde etmek amacıyla small baseline tersine çevrilir. Dördüncü basamakta bootstrap metoduyla hızların standart sapması hesaplanır. Beşinci basamakta çeşitli gürültü indeksleri kullanılarak zaman serileri ve hız için bir maske meydana getirilir. Bir piksel için gürültü indekslerinin değerlerinden biri belirtilen eşikten daha büyük ya da daha küçükse, piksel maskelenir. Altıncı basamakta filtrelenmiş zaman serilerini ve hızı türetmek için zaman serisine bir uzay-zamansal filtre uygulanır (İnt. Kyn. 17). LiCSBAS yazılımında zaman serisi analizi için işlem sırası aşağıdaki gibidir.

1. Kalite kontrolü ile uyumsuz verilerin belirlenmesi
2. Döngü kapatma.
3. Small Baseline tersine çevirme
4. Bootstrap ile hızların standart sapmasının hesaplanması
5. Zaman serilerinin maskelenmesi
6. Zaman serilerinin filtrelenmesi



Şekil 6.39 Çalışma bölgesindeki PS noktaları, GNSS istasyonları ve yüzey deformasyonları. Renk aralığı yüzeyde meydana gelen yıllık yükselik değişimini göstermektedir.

Yapılan değerlendirmeye göre elde edilen PS noktalarındaki deformasyon büyüklüğü, GNSS ve hassas nivelman ölçümlerindeki sonuçlarla benzerlik göstermektedir. GNSS istasyonlarının yanında seçilen PS noktalarının düşey yer değiştirme miktarları; BMET GNSS istasyonunda -9 mm, BBEL GNSS istasyonunda -65 mm, BLV1 GNSS istasyonunda -82 mm ve AKTC GNSS istasyonunda -167 mm'dir (Şekil 6.39). Beyaz renkli çizgiler yüzeyde meydana gelen deformasyonları ifade etmektedir. Yüzey deformasyonları, PS noktalarının renk değişimi (yükselik farkı) olduğu bölgelerle uyumludur.

6.6 Jeodezik Verilerin Karşılaştırılması

Elde edilen GNSS, Nivelman ve SAR verilerinin karşılaştırılması için her bir nivelman ve GNSS noktalarındaki hızlar belirlenmiştir. Her bir nivelman noktasına bir PS noktası düşmediği için en yakın (birkaç metre) PS noktası ile GNSS ve Nivelman verileri karşılaştırılmıştır. Bu amaçla her bir nivelman noktasına karşılık gelen PS noktaları güzergâh güzergâh karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma esnasında nivelman başlangıç noktası olarak kabul edilen noktada da düşey yönde yaklaşık 22 mm’lik bir deformasyon olduğu görülmüştür. Bu amaçla her bir büyüklüğün birbiri ile kıyaslanması için bu 22 mm’lik offset nivelman noktalarında eklenmiştir. Elde edilen offsetli yükseklikler öncelikle PS ile daha GNSS hızları ile karşılaştırılmıştır (Çizelge 6.10).

Çizelge 6.10 Nivelman ve PS nokta hızlarının karşılaştırılması.

Nivelman Nokta No	Nivelman Nokta Hızı (mm/yıl)	PS Nokta Hızı (mm/yıl)	Fark	Nivelman Nokta No	Nivelman Nokta Hızı (mm/yıl)	PS Nokta Hızı (mm/yıl)	Fark
1	-21.9	-21.9	0	401	-21.9	-28.6	6.7
2	-42.1	-28	-14.1	402	-23.6	-33.9	10.3
3	-70.8	-62.5	-8.3	403	-31.1	-39.1	8
4	-85.7	-95	9.3	404	-51.2	-49.7	-1.5
5	-73.2	-88.7	15.5	405	-70.1	-54.2	-15.9
6	-34	-45	11	406	-78.4	-61.8	-16.6
7	-80.6	-82.1	1.5	407	-83.7	-69.3	-14.4
8	-50.5	-61	10.5	408	-89.2	-77	-12.2
9	-65.4	-75.2	9.8	409	-84	-79.8	-4.2
10	-52.5	-69	16.5	410	-88.7	-82.7	-6
11	-71.6	-84.4	12.8	411	-80.7	-83.5	2.8
12	-104.4	-124.2	19.8	412	-78	-84.2	6.2
13	-82	-118.2	36.2	413	-77.5	-85.3	7.8
14	-115.6	-125.1	9.5	414	-79.8	-86.3	6.5
15	-90.1	-102.8	12.7	501	-33.2	-48.1	14.9
101	-25	-25.5	0.5	502	-32.8	-55.2	22.4
102	-20.2	-26.6	6.4	503	-52.2	-55.5	3.3
103	-19.8	-27.4	7.6	504	-58	-58.2	0.2
104	-20.6	-29	8.4	505	-65.4	-59.3	-6.1
105	-43.2	-31.4	-11.8	506	-79.4	-64	-15.4
106	-55.8	-42.1	-13.7	507	-82.5	-69.6	-12.9
107	-60.4	-52	-8.4	508	-83.9	-75.2	-8.7

Çizelge 6.10 (Devam) Nivelman ve PS nokta hızlarının karşılaştırılması.

201	-20	-28.7	8.7	509	-83.9	-81	-2.9
202	-27.9	-31.6	3.7	510	-82.2	-81.6	-0.6
203	-31.3	-34.5	3.2	511	-83.2	-81.9	-1.3
204	-55.1	-37.3	-17.8	512	-84.9	-84.9	0
205	-48.5	-40.2	-8.3	513	-81.5	-84.1	2.6
206	-55.2	-46.7	-8.5	514	-84.2	-83.3	-0.9
207	-64.4	-57.9	-6.5	515	-81.9	-82.5	0.6
301	-69.5	-66.5	-3	601	-45.9	-61.8	15.9
302	-69.3	-74	4.7	602	-39.9	-62.7	22.8
303	-72.6	-82.2	9.6	603	-68.2	-63.5	-4.7
304	-69.6	-86.8	17.2	604	-52.1	-71.9	19.8
305	-78.4	-89.8	11.4	605	-62.2	-72.7	10.5
801	-101.7	-122.3	20.6	701	-51.4	-73.2	21.8
802	-93.6	-122.2	28.6	702	-78	-82	5
803	-105.5	-121.4	15.9	703	-63.9	-80.5	16.6
804	-91.5	-120.2	28.7	903	-103.7	-125.4	21.7
901	-111.1	-124.5	13.4	904	-94.1	-124.1	30
902	-105.9	-125	19.1				

Yapılan incelemeler sonucunda niveman hızlarının standart sapmaları 5 ile 22 mm arasında olduğu görülmüştür. InSAR hızlarının standart sapmaları incelendiğinde ise 1 ile 2 mm civarında olduğu görülmüştür. Nivelman hızları ile InSAR hızları arasındaki farkların 3 sigmadan küçük olması sebebiyle hız farklarının standart sapmaların anlamsız olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 6.11 Nivelman, GNSS ve PS nokta hızları karşılaştırılması.

Nokta Adı	GNSS Nokta Hızı (mm/yıl)	PS Nokta Hızı (mm/yıl)	Nivelman Nokta Hızı (mm/yıl)
AKTC	-93	-167	-
BLV1	-94	-82	-78
BBEL	-40	-65	-
BMET	-4	-9	-

Nivelman noktaları ile GNSS noktalarının hızlarının karşılaştırılması için jeodezik ağlar incelendiğinde BLV1 GNSS istasyonuna 50 metre yakınlıkta bir adet nivelman noktası bulunmaktadır. Diğer iki istasyon nivelman profillerinden yaklaşık 2 km uzaktadır. Elde

edilen hızlar karşılaştırıldığında BLV1 GNSS istasyonuna en yakın Nivelman noktası ve PS noktası birbiriyle uyumlu çıkmışığı gözlenmiştir (Çizelge 6.11).



7. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında Bolvadin ilçe merkezinde meydana gelen asismik yüzey deformasyonlarının farklı jeodezik yöntemlerle belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla bölgeye 115Y246 nolu TÜBİTAK projesi kapsamında Nivelman-GNSS ağı ve 1 adet Sabit GNSS istasyonu kurulmuştur. Bu tez çalışması kapsamında 2 adet daha sabit GNSS istasyonu kurularak bölgede meydana gelen deformasyonlar hakkında bilgiler elde edilmiştir. 2016 yılı ağustos ayı ile 2020 yılı ağustos ayı arasında Sentinel-1 alçalan ve yükselen yörünge uydu görüntüleri indirilerek LİCSAR ve LİCSBAS yazılımlarında değerlendirmeler yapılmıştır. Daha sonra üç farklı yöntemden elde edilen sonuçlar birbiri ile karşılaştırılmıştır. Her bir yöntemde yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar ayrı ayrı aşağıda özetlenmiştir.

Nivelman çalışmaları için bölgeye 79 adet noktadan oluşan nivelman ağı kurulmuştur. nivelman ağı kurulurken 2017 yılında haritalanan Bolvadin ilçe merkezinde meydana gelen yüzey deformasyonlarına dik profiller olacak şekilde tesis edilmiştir. Bu ağda 2016-2020 yılları arasında 5 kampanya nivelman ölçüsü gerçekleştirilmiştir. Tüm profiller üzerinde hassas nivelman tekniği kullanılarak gidiş dönüş ölçüleri yapılmış ve nivelman ölçülerinin sonuçları Tiryakioğlu vd. (2022)'nde yayınlanmıştır. Kampanya ölçüleri yıllara göre serbest ağ dengelenmesi yapılarak her nokta için dengelenmiş yükseklikleri hesaplanmıştır. Ağın serbest dengelenmesi en küçük kareler yöntemine göre yapılmıştır. Serbest ağ dengelenmesinden sonra uyuşumsuz ölçü testi Pope yöntemine göre yapılmıştır. Ölçülerin değerlendirilmesiyle birlikte uyuşumsuz ölçü olmadığı görülmüştür. Nivelman ağı noktalarında S-transformasyonu deformasyon analizi yapılmıştır. GLOBAL TEST sonucunda ağda deformasyon olduğunu tespit edilmiştir. Her kampanya 1 numaralı noktaya dayalı olarak zorlamasız, en küçük kareler yöntemiyle dengelenmiştir. Elde edilen farklardan 2016-2020 yılları arası deformasyon haritaları elde edilmiştir. 2016-2017 yılları arasında jeodezik ağda deformasyon gözlemlenmiş olup bu yıllar arasında deformasyon miktarı 0-55 mm olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.28 incelediğinde yüzey deformasyonları boyunca; kuzeybatıdaki bloğun yükseldiği veya sabit kaldığı, güneydoğu yönündeki bloğun ise düşüşe geçtiği görülmüştür. 2017-2018 ve 2018-2019 yılları arasında jeodezik ağdaki deformasyonun devam ettiği ve maksimum deformasyon

miktarının 65 mm olduğu belirlenmiştir (Şekil 6.28). 2019-2020 yılları arasında jeodezik ağda deformasyonun devam ettiği ve 2019-2020 yılları arasındaki deformasyon hızı diğer yıllar arasındaki deformasyon hızıyla benzerlik göstermeyip, nerdeyse 2 katına çıktığı belirlenmiştir. 2019-2020 yılları arasındaki deformasyon hızı 80-95 mm'dir. Her bir noktadaki deformasyonlar ile noktaların 5 yıllık toplam deformasyon miktarı elde edilmiştir. Bu deformasyon miktarlarına göre; tüm noktalarda yıllık 5-95 mm hızlar hesaplanmıştır (Şekil 6.29).

GNSS çalışmaları kapsamında bölgeye 3 adet GNSS istasyonu kurulmuştur. İstasyonların konumlarının belirlenmesinde InSAR analizlerinden yararlanılmıştır. Bu 3 istasyondan BLV1 2017 yılı mart ayı BMET ve BBEL ise 2021 yılı aralık ayında kurulmuştur. Bu istasyonların 2023 yılı ocak ayına kadarki olan veriler elde edilerek GAMIT/GLOBK yazılımı ile değerlendirilmiş ve zaman serileri elde edilmiştir. Zaman serileri analizinde bölgede yıllık, yarıyıllık ve mevsimlik periyotlar hesaplanmıştır. Elde edilen zaman serilerinden düşey yöndeki yıllık deformasyon hızları hesaplanmıştır. BLV1 istasyonu en yüksek deformasyon hızına sahip istasyon olup bu hız 94 mm/yıl'dır. BBEL istasyonu için 40 mm/yıl ve BMET istasyonu içinse 4 mm/yıl hız değerleri hesaplanmıştır.

Çalışma kapsamında GNSS ve Nivelman'a ek olarak uydu görüntüleri değerlendirilmiştir. Bunun için LiCSAR ve LİCSBAS yazılımlarında 2016-2020 yılları arasındaki Sentinel-1 verileri kullanılarak InSAR değerlendirmesi yapılmış ve PS noktaları üretilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre PS noktalarındaki deformasyon büyüklüğü, GNSS ve hassas nivelman ölçümlerindeki sonuçlarla uyum içerisindedir. GNSS istasyonlarının yanında seçilen PS noktalarının düşey yer değiştirme miktarları; BLV1 istasyonunda 82 mm, BBEL istasyonunda 65 mm ve BMET istasyonunda 9 mm'dir.

Bolvadin ilçesi Akarçay havzasında yer almaktadır. Yüzey deformasyonları ile yeraltı suları arasındaki bağlantıyı bulmak için bölgede bulunan beş adet yer altı suyu gözlem kuyularının verileri Devlet Su İşleri (DSİ) 18. Bölge müdürlüğünden güncel veriler henüz okumalar yapılmadığı için temin edilememiştir. Ancak gözlem kuyularının konumlarından çalışma alanı içinde kalan Bolvadin Merkez (28372) kuyusunun 1999-

2018 yılları arasındaki verileri daha önce temin edilmiş ve (Tiryakioğlu ve Bozkuş 2020) çalışmasında kullanılmıştır. Bu kuyuların 2016 yılı ağustos ayı ile 2018 yılı ağustos arası verileri nivelman çalışmalarından elde edilen yükseklik farkları ile ilişkilendirilmiş ve mevsimsel dalgalanmaların GNSS zaman serisindekine benzer olduğu ve veriler arasında orta seviyede korelasyon olduğu görülmüştür (Bozkuş 2019).

Batı Anadolu’da son yıllarda diri faylar üzerine kurulu bazı kentlerde gözlenen asismik yüzey deformasyonları, diri faylar üzerinde kurulu binaların yıkıcı deprem olmaksızın da deformasyona uğrayabileceği gerçeğini göstermiştir. Batı Anadolu’daki bu tip deformasyonların en belirgin örnekleri, Gediz Grabeni doğusundaki Sarıgöl ve Afyon Akşehir Grabeni Orta bölümünde yer alan Bolvadin yerleşim alanlarında gözlenmektedir. Bu deformasyonlar Sarıgöl yerleşim alanında, 1969 Alaşehir depremi (M:6.9) sonrası oluşan yüzey kırığı üzerinde, Bolvadin yerleşim alanında ise, 2002 Çay Depremlerinin (Mw:6.3 ve 6.0) meydana geldiği bölgede yer alan Bolvadin Fayı’nın güneybatı devamı üzerinde meydana gelmektedir. Bununla beraber her iki bölgede de yoğun tarımsal sulama nedeniyle yeraltı su seviyesinde düşmeler meydana gelmiştir. Yeraltı su seviyesinin düşmesine bağlı olarak konsolide olmamış ya da az konsolide olmuş alüvyal çökellerin yenilmesi ile bölgede yeralan faylar boyunca asismik yüzey faylanması şeklinde deformasyonların meydana geldiği uluslararası birçok çalışmada belirtilmektedir. Ancak birçok bölgede yeraltı sularında düşmeler meydana gelmesine rağmen bu asismik hareketlerin sadece bu bölgelerde olmaktadır. Bolvadin Fayının her an deprem üretebilecek diri bir fay olması (Emre vd. 2011), bölgede son yıllarda meydana gelen yüzey kırığı oluşturan yıkıcı depremlerin (3 Şubat 2002 Çay depremleri Mw:6.3-6.0) meydana gelmesi, deformasyonları kış aylarında da devam etmesi nedeniyle deformasyonun kökeninin yeraltı su seviyesiyle beraber tektonik kökenlere dayandığı düşünülmektedir.

8. KAYNAKLAR

- Abdikan S, 2012, Monitoring of Land Surface Subsidence in Zonguldak Coal Mining Field in The Northern Turkey Using Multi Temporal SAR Interferometry, Yıldız Technical University, Institute of Science and Technology, Ph.D. Thesis, 132p, İstanbul.
- Agram P S, 2010, Persistent Scatterer Interferometry in Natural Terrain, Stanford University, Ph.D. Thesis, 163p, Stanford.
- Akabalı A, 2002, Stereo Yapay Açıklıklı Radar Görüntülerinden Otomatik Sayısal Yükseklik Modeli Üretilmesi ve Doğruluğunun Araştırılması, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 107s, İstanbul.
- Akarvardar S, Örmeci C, Feigl K, 2009, Uzun Sürede ve Sabit Hızda Oluşan Yer Hareketlerinin Uydu Radar İnterferometrisiyle Ölçülmesi: Avcılar Örneği, itüdergisi/d Mühendislik Dergisi, 8, 131-141.
- Akdi Y, 2003, Zaman Serileri Analizi (Birim Kökler ve Kointegrasyon), Bıçaklar Kitabevi, 298s, Ankara.
- Akyüz S, Uçarkuş G, Şatır D, Dikbaş A, Kozacı Ö, 2006, 3 Şubat 2002 Çay Depreminde Meydana Gelen Yüzey Kırığı Üzerinde Paleosismolojik Araştırmalar, Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Dergisi, 27, 41-52.
- Arıkan M, Hooper A, Hanssen R, 2010, Radar Time Series Analysis Over West Anatolia, Fringe 2009 Proceedings, 677, 1-6.
- Aslan G, Çakır Z, Lasserre C, Renard F, 2019, Investigating Subsidence in the Bursa Plain, Turkey, Using Ascending and Descending Sentinel-1 Satellite Data, Remote Sensing, 11, 1-17.
- Atzori S, Hunstad I, Chini M, Salvi S, Tolomei C, Bignami C, vd., 2009, Finite Fault Inversion of DInSAR Coseismic Displacement of the 2009 L'Aquila Earthquake (Central Italy), Geophysical Research Letters, 36, 1-6.
- Atzori S, Antonioli A, 2011, Optimal Fault Resolution in Geodetic Inversion of Coseismic Data, Geophysical Journal International, 185, 529-538.

- Awaluddin M, Sudarsono B, Amarrahman F J, 2017, The Monitoring of 2017 Jatibarang Dam Deformation Using GNSS Technology, International Symposium on Earth Hazard and Disaster Mitigation, 20-21 November, Bandung.
- Baek J, Kim S W, Park H J, Jung H S, Kim K D, Kim J W, 2008, Analysis of Ground Subsidence in Coal Mining Area Using SAR Interferometry, Geosciences Journal, 12, 277-284.
- Balık F, 2004, Elektro-Optik ve SAR Uydu Görüntüleri ile Arazi Bitki Örtüsünün Belirlenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 233s, İstanbul.
- Bayrak T, 2011, Dengeleme Hesabı-II Ders Notları, Harita Mühendisliği Bölümü Mühendislik Fakültesi Gümüşhane Üniversitesi, 115s, Gümüşhane.
- Bekaert D P S, Hamlington B D, Buzzanga B, Jones C E, 2017, Spaceborne Synthetic Aperture Radar Survey of Subsidence in Hampton Roads, Virginia (USA), Scientific Reports, 7, 1-9.
- Berardino P, Fornaro G, Lanari R, 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.
- Bilgen B, 2017, GNSS Tekniği ile Yatay Yöndeki Deformasyonların Araştırılması, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 68s, Konya.
- Blewitt G, Lavallee D, 2002, Effect of Annual Signals on Geodetic Velocity, Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 107, 1-11.
- Bozdemir N, 2006, Jeodezik Ağların Üç Boyutlu Dengelenmesi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 96s, Samsun.
- Bozkurt E, Sözbilir H, 2004, Tectonic Evolution of the Gediz Graben: Field Evidence for an Episodic, Two-Stage Extension in Western Turkey, Geological Magazine, 141, 63-79.

- Bozkuş H B, 2019, Bolvadin Fayındaki Yüzey Deformasyonlarının Yer Altı Suları ile İlişkisinin Araştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 61s, Afyonkarahisar.
- Bruckl E, Brunner F K, Kraus K, 2006, Kinematics of a Deep-seated Landslide Derived from Photogrammetric, GPS and Geophysical Data, Engineering Geology, 88, 149-159.
- Bulmer M H, Petley D N, Murphy W, Mantovani, F, 2006, Detecting Slope Deformation Using Two-Pass Differential Interferometry: Implications for Landslide Studies on Earth and Other Planetary Bodies, Journal of Geophysical Research: Planets, 111, 1-10.
- Calò F, Abdikan S, Görüm T, Pepe A, Kiliç H, 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.
- Canaslan Çomut F, 2016, Farklı Yeryüzü Özelliklerinde İleri INSAR Teknikleri Kullanılarak Yüzey Deformasyonlarının Belirlenmesi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 201s, Konya.
- Carrion J E, Spencer B F, 2007, Model-Based Strategies for Real-Time Hybrid Testing, NSEL Report Series Report No: NSEL-006, 212s.
- Caspary W F, 1988, Concepts of Network and Deformation Analysis, Monograph 11 School of Surveying, The Univesity of New South Wales, 183s, Sydney.
- Castellazzi P, Garfias J, Martel R, Brouard C, Rivera A, 2017, InSAR to Support Sustainable Urbanization Over Compacting Aquifers: The Case of Toluca Valley, Mexico. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 63, 33-44.
- Ceylan A, 1988, Duyarlı Nivelmanda Önemli Sistemik Hata Kaynakları Üzerine Bir Çalışma, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans tezi, Konya.
- Ceylan A, 1993, Presizyonlu Nivelman Yerine Trigonometrik Nivelman Yönteminin Kullanılabilirliği Üzerine Bir Çalışma, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 112s, Konya.

- Colesanti C, Ferretti A, Prati C, Rocca F, 2001, Comparing GPS, Optical Leveling and Persistent Scatterers, IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 9-13 July, Sydney, 2622–2624.
- Colesanti C, Ferretti A, Prati C, Rocca F, 2003a, Monitoring Landslides and Tectonic Motions with Permanent Scatterers Technique, Engineering Geology, 68, 3-14.
- Colesanti C, Ferretti A, Novali F, Prati C, Rocca F, 2003b, SAR Monitoring of Progressive and Seasonal Ground Deformation Using the Permanent Scatterers Technique, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41, 1685-1701.
- Crosetto M, Gili J, Monserrat O, Cuevas-González M, Corominas J, Serral D, 2013, Interferometric SAR Monitoring of the Vallcebre Landslide (Spain) Using Corner Reflectors, Natural Hazards and Earth System Sciences, 13, 923-933.
- Çakır Z, 2003, 1999 İzmit ve Düzce Depremlerinin neden Olduğu Kabuk Deformasyonunun Sentetikaçıklık Radar İnterferometrisi ile İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 138s, İstanbul.
- Çakır Z, Akoğlu A M, Belabbes S, Ergintav S, Meghraoui M, 2005, Creeping Along the İsmetpaşa Section of the North Anatolian Fault (Western Turkey): Rate and Extent from InSAR, Earth and Planetary Science Letters, 238, 225-234.
- Çakır Z, Ergintav S, Özener H, Dogan U, Akoglu A M, Meghraoui M, vd., 2012, Onset of Aseismic Creep on Major Strike-Slip Faults, Geology, 40, 1115-1118.
- Çalışkan K, 2021, Bolvadin/Afyonkarahisar Kent Merkezinde Meydana Gelen Düşey Deformasyon Hızlarının Belirlenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 95s, Afyonkarahisar.
- Delacourt C, Briole P, Achache, J, 1998, Tropospheric Corrections of SAR Interferograms with Strong Topography, Application to Etna, Geophysical Research Letters, 25, 2849-2852.
- Doğan A, 2019, Yüzey Deformasyonlarının Hassas Nivelman Tekniği ile Belirlenmesi: Sarıgöl Örneği, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 62s, Afyonkarahisar.

- Doğan O, Solak H İ, Eyübagil E, Özkaymak Ç, Tiryakioğlu İ, 2021, Bozkurt (Denizli) Depremi Sonrası (Mw=6.0, 08.08.2019) GNSS Ölçüleri ile Kosismik Deformasyonların Belirlenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 21, 362-373.
- Du Z, Ge L, Ng A H M, Zhu Q, Yang X, Li L, 2018, Correlating the Subsidence Pattern and Land Use in Bandung, Indonesia with Both Sentinel- 1/2 and ALOS-2 Satellite Images, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 67, 54-68.
- Elliott J R, Nissen E K, England P C, Jackson J A, Lamb S, Li Z, vd., 2012, Slip in the 2010-2011 Canterbury Earthquakes, New Zealand, Journal Of Geophysical Research, 117, 1-36.
- Emre Ö, Duman T Y, Özalp S, Olgun Ş, Elmacı H, 2011, 1:250.000 Scale Active Fault Map Series of Turkey, Afyon (NJ 36-5) Quadrangle, Serial number: 16, General Directorate of Mineral Research and Exploration, 1s, Ankara.
- Erdoğan H, 2012, The Effects of Additive Outliers on Time Series Components and Robust Estimation: A Case Study on the Oymapinar Dam, Turkey, Experimental Techniques, 36, 39-52.
- Ergin K, Güçlü U, Uz Z, 1967, Türkiye ve Civarının Deprem Kataloğu (MS. 11-1964), Maden Fakültesi Arz Fiziği Entitüsü, 169s, İstanbul.
- Ergintav S, Bürgmann R, McClusky S, Çakmak R, Reilinger R E, Barka, A., vd., 2002, Postseismic Deformation Near The Izmit Earthquake (08/17/1999, M =7.5) Rupture Zone, Bulletin of the Seismological Society of America, 92, 194-207.
- Erol S, 1999, Karasu Viyadüğünde GPS ile Deformasyon Ölçmeleri ve Analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 100s, İstanbul.
- Ertürk S, 2005, Sayısal İşaret İşleme, Birsan Yayınevi L, 371s, İstanbul,
- Farr T G, Rosen P A, Caro E, Crippen R, Duren R, Hensley S, vd., 2007, The Shuttle Radar Topography Mission, Reviews of Geophysics, 45, 1-43.

- Fernandez J, Prieto J F, Escayo J, Camacho A G, Luzón F, Tiampo K F, vd., 2018, Modeling the Two- and Three-Dimensional Displacement Field in Lorca, Spain, Subsidence and the Global Implications, *Scientific Reports*, 8, 1-14.
- Ferretti A, Prati C, 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, Prati C, Rocca F, 2001, Permanent Scatterers in SAR Interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39, 8-20.
- Fialko Y, Sandwell D, Simons M, Rosen P, 2005, Three-Dimensional Deformation Caused by the Bam, Iran, Earthquake and the Origin of Shallow Slip Deficit, *Nature*, 435, 295-299.
- Figueroa-Miranda S, Tuxpan-Vargas J, Ramos-Leal J A, Hernández- Madrigal V M, Villaseñor-Reyes C I, 2018, Land Subsidence by Groundwater Over-Exploitation from Aquifers in Tectonic Valleys of Central Mexico: A Review, *Engineering Geology*, 246, 91-106.
- Fox A J, 1972, Outliers in Time Series, *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 34, 350-363.
- Francis P, Rothery D, 2000, Remote Sensing of Active Volcanoes, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28, 81-106.
- Funning G J, Parsons B, Wright T J, Jackson J A, Fielding E J, 2005, Surface Displacements and Source Parameters of the 2003 Bam (Iran) Earthquake from Envisat Advanced Synthetic Aperture Radar Imagery, *Journal of Geophysical Research*, 110, 1- 23.
- Gabriel A K, Goldstein R M, Zebker H, 1989, Mapping Small Elevation Changes Over Large Areas: Differential Radar Interferometry, *Journal of Geophysical Research*, 94, 9183-9191.
- Gens R, van Genderen J L, 1996, SAR Interferometry: Issues, Techniques, Applications, *International Journal of Remote Sensing*, 17, 1803–1835.

- Gezgin C, 2020, GNSS ve INSAR Teknikleri ile Tuz Gölü Fay Zonu'nun (TGFZ) Kinematik Analizi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 171s, Aksaray.
- Gündüz A M, 2019, TUSAGA-Aktif Noktalarının Deformasyon Belirlemede Kullanılabilirliği, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Doktora Tezi, 118s, Konya.
- Gourmelen N, Amelung F, Lanari R, 2010, Interferometric Synthetic Aperture Radar–GPS Integration: Interseismic Strain Accumulation Across the Hunter Mountain Fault in the Eastern California Shear Zone, *Journal of Geophysical Research*, 115, 1-16.
- Gülal E, Erdoğan H, Tiryakioğlu İ, 2013, Research on the Stability Analysis of GNSS Reference Stations Network by Time Series Analysis, *Digital Signal Processing*, 23, 1945-1957.
- Gülal E, Dindar A A, Akpınar B, Tiryakioğlu İ, Aykut N O, Erdoğan H, 2015, Analysis and Management of GNSS Reference Station Data, *Tehnicki Vjesnik*, 22, 407-414.
- Haghshenas H M, Motagh M, 2019, Ground Surface Response to Continuous Compaction of Aquifer System in Tehran, Iran: Results from a Long-Term Multi-Sensor InSAR Analysis, *Remote Sensing of Environment*, 221, 534-550.
- Hakyemez H Y, Göktaş F, Erkal T, 2013, Gediz Grabeninin Kuvaterner Jeolojisi ve Evrimi, *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 56, 1-26.
- Hanssen R F, 2001, *Radar Interferometry Data Interpretation and Error Analysis*, Kluwer Academic Publishers, 318s, Dordrecht.
- Hauksson E, 1991, Seismotectonics, *Reviews of Geophysics*, 29, 721-733.
- Hernández-Madrigal V M, Muñiz-Jauregui J A, Garduño-Monroy V H, Flores-Lázaro N, Figueroa-Miranda S, 2014, Depreciation Factor Equation to Evaluate the Economic Losses from Ground Failure due to Subsidence Related to Groundwater Withdrawal, *Natural Science*, 6, 108-113.

- Herring T A, King R W, Floyd M A, McClusky S C, 2018, Introduction to GAMIT/GLOBK, Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, 54p, Massachusetts.
- Hoffmann J, Zebker H A, Galloway D L, Amelung, F, 2001, Seasonal Subsidence and Rebound in Las Vegas Valley, Nevada, Observed by Synthetic Aperture Radar Interferometry, *Water Resources Research*, 37, 1551-1566.
- Hooper A, Segall P, Zebker H A, 2007, Persistent Scatterer InSAR for Crustal Deformation Analysis, with Application to Volcán Alcedo, Galápagos, *Journal of Geophysical Research*, 112, 1-21.
- Hooper A, 2008, A Multi-Temporal Insar Method Incorporating Both Persistent Scatterer and Small Baseline Approaches, *Geophysical Research Letters*, 35, 1-5.
- Hooper A, Bekaert D, Hussain E, Spaans K, 2018, StaMPS/MTI Manual, School of Earth and Environment University of Leeds, 44s, Leeds.
- Hu Y, Zhang K, Liu G, Deakin R, Wu F, 2005, An Investigation of Medium to Long Term Crustal Deformation Using Regional GPS Permanent Tracking Station Networks, *International Journal of Science and Research*, 1, 43- 52.
- Hu B, Wu Y 2018, Time-Series Displacement of Landslide in Danba County (China) Monitored by the Small Baseline Subset (SBAS) Technique, *Preprints*, 1-14.
- İmamoglu M, Kahraman F, Cakır Z, Şanlı F B, 2019, Ground Deformation Analysis of Bolvadin (W. Turkey) by Means of Multi-Temporal InSAR Techniques and Sentinel-1 Data, *Remote Sensing*, 11, 1-17.
- Jihyun H, Kwan P, Jihye W, Moon B H, 2014, Investigations into Co-seismic Deformation and Strain in South Korea Following the 2011 Tohoku-oki Earthquake using GPS CORS Data, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18, 634-638.
- Kahveci M, Yıldız F, 2009, GPS/GNSS Uydularla Konum Belirleme Sistemleri Teori ve Uygulama, Nobel Yayıncılık, 286s, Ankara.

- Kalkan Y, Alkan R M, 2005, Mühendislik Yapılarında Deformasyon Ölçmeleri, Mühendislik Ölçmeleri STB Komisyonu 2. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, 23-25 Kasım, İstanbul, 64-74.
- Karagöz B Ç, 2008, Dinar Fayı Tektonik Hareketlerinin Presizyonlu Nivelman Yöntemiyle Belirlenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 121s, Afyonkarahisar.
- Kavak U S, 2020, GNSS Ölçüleriyle Fayların İzlenmesi: Karaburun Fayı Örneği, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 58s, Afyon.
- Kaygusuz Ç, 2021, Sarıgöl'de Meydana Gelen Yüzey Deformasyonlarının Jeodezik Yöntemlerle İncelenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 65s, Afyonkarahisar.
- Kazancı N, Gürbüz A, Boyraz S, 2011, Büyük Menderes Nehri'nin Jeolojisi ve Evrimi Türkiye Jeoloji Bülteni, 54, 25-55.
- Kazancı N, Boyraz S, Özkul M, Alçiçek M C, Kadioğlu Y K, 2012, Late Holocene Terrestrial Tephra Record at Western Anatolia, Turkey: Possible Evidence of an Explosive Eruption Outside Santorini in the Eastern Mediterranean, Global and Planetary Change, 80, 36–50.
- Khorrami M, Abrishami S, Maghsoudi Y, Alizadeh B, Perissin D, 2020, Extreme Subsidence in a Populated City (Mashhad) Detected by PSInSAR Considering Groundwater Withdrawal and Geotechnical Properties, Scientific Reports 10, 1-16.
- Koca, M Y, Sözbilir H, Üzel B, 2011, Sarıgöl Fay Zonu Boyunca Meydana Gelen Deformasyonların Nedenleri Üzerine Bir Araştırma, Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 35, 151-174.
- Koçyiğit A, Özacar A, 2003, Extensional Neotectonic Regime Through the NE Edge of Outer Isparta Angle, SW Turkey: New Field and Seismic Data, Turkish Journal of Earth Sciences, 12, 67–90.
- Köklü N, Büyüköztürk Ş, Bökeoğlu Ö Ç, 2006, Sosyal Bilimler için İstatistik, Pegem Akademi Yayıncılık, 280s, Ankara.

- Kucur S, 2019, PS-INSAR ile Yerkabuğu Hareketlerinin Belirlenmesi: Bolvadin Örneği, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 78s, Afyon.
- Lanari R, Lundgren P, Sansosti E, 1998, Dynamic Deformation of Etna Volcano Observed by Satellite Radar Interferometry, *Geophysical Research Letters*, 25, 1541-1544.
- Lazecký M, Spaans K, González P J, Maghsoudi Y, Morishita Y, Albino F, vd., 2020, LiCSAR: An Automatic InSAR Tool for Measuring and Monitoring Tectonic and Volcanic Activity, *Remote Sensing*, 12, 1-29.
- Li X, 2006, Optimal Integrated Multi-Sensor System for Full-Scale Structural Monitoring Based on Advanced Signal Processing, The University of New South Wales, Ph.D. Thesis, 221p, Sydney.
- Massonnet D, Feigl K L, 1995, Discrimination of Geophysical Phenomena in Satellite Radar Interferograms, *Geophysical Research Letters*, 22, 1537-1540.
- Massonnet D, Feigl K L, 1998, Radar Interferometry and Its Application to Changes in the Earth's Surface, *Reviews of Geophysics*, 36, 441-500.
- McClusky S, Balassanian S, Bark A, Demir C, Ergintav S, Georgiev I, vd., 2000, Global Positioning System Constraints on Plate Kinematics and Dynamics in The Eastern Mediterranean and Caucasus, *Journal of Geophysical Research*, 105, 5695-5719.
- Mirzaee S, Motagh M, 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*, 6-9 June, 487-492.
- Morishita Y, Lazecky M, Wright T J, Weiss J R, Elliott J R, Hooper A, 2020, LiCSBAS: An Open-Source Insar Time Series Analysis Package Integrated with the LiCSAR Automated Sentinel-1 InSAR Processor, *Remote Sensing*, 12, 1-29.
- Motagh M, Walter T R, Sharifi M A, Fielding E, Schenk A, Anderssohn J, vd., 2008, Land Subsidence in Iran Caused by Widespread Water Reservoir Overexploitation, *Geophysical Research Letters*, 35, 1-5.

- Ng A H, Chang H, Ge L, Rizos C, Omura M, 2009, Assessment of Radar Interferometry Performance for Ground Subsidence Monitoring due to Underground Mining, Earth, Planets and Space, 61, 733-745.
- Ng A H, Ge L, Li X, 2016, Land Deformation Mapping With Alos Palsar Data: A Case Study Of Taipei City, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 10-15 July, Beijing, 6051-6054.
- Orhan O, 2018, Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri ile Muhtemel Obruk Alanlarının Belirlenmesi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 182s, Konya.
- Orhan O, 2021, Monitoring of Land Subsidence due to Excessive Groundwater Extraction Using Small Baseline Subset Technique in Konya, Turkey, Environmental Monitoring and Assessment, 193, 1-17.
- Özdemir A, 2016, 23 Ekim 2011 Van Depreminin Yakın Alan Deprem Anı Deformasyonlarının GPS ile Belirlenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 102s, İstanbul.
- Özden S, Kavak K Ş, Koçbulut F, Över S, Temiz H, 2002, 3 Şubat 2002 Çay (Afyon) Depremleri, Türkiye Jeoloji Bülteni, 45, 49-56.
- Özek T, 2010, Zaman Serisi Modelleri Üzerine Bir Simülasyon Çalışması, Yüksek Lisans tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 64s, Konya
- Özkaymak Ç, Sözbilir H, Tiryakioğlu İ, Baybura T, 2017, Bolvadin'de (Afyon- Akşehir Grabeni, Afyon) Gözlenen Yüzey Deformasyonlarının Jeolojik, Jeomorfolojik ve Jeodezik Analizi, Türkiye Jeoloji Bülteni, 60, 169-188.
- Özkaymak Ç, Sözbilir H, Geçievi M, Tiryakioğlu İ, 2019, Afyon Akşehir Grabeni Bolvadin Fayı Üzerinde Geç Holosen kosismik Kırılma ve Asismik Sünme, Batı Anadolu, Türk Yer Bilimleri Dergisi, 28, 787-804.
- Pacheco-Martínez J, Hernandez-Marín M, Burbey T J, González-Cervantes N, Ortiz-Lozano J Á, Zermeño-De-Leon M E, vd., 2013, Land Subsidence and Ground Failure Associated to Groundwater Exploitation in the Aguascalientes Valley, México, Engineering Geology, 164, 172– 186.

- Peduto D, Cascini L, Arena L, Ferlisi S, Fornaro G, Reale D, 2015, A General Framework and Related Procedures for Multiscale Analyses of DInSAR Data in Subsiding Urban Areas, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 105, 186-210.
- Perissin D, Rocca F, 2006, High Accuracy Urban DEM Using Permanent Scatterers, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 3338–3347.
- Perissin D, Prati C, Rocca F, 2007, ASAR Parallel-Track PS Analysis in Urban Sites, *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 23-28 July, Barcelona, 1167-1170.
- Perissin D, Prati C, Rocca F, Wang T, 2009, PSInSAR Analysis Over the Three Gorges Dam and Urban Areas in China, 2009 Joint Urban Remote Sensing Event, 20-22 May, Shanghai, 1-5.
- Peyret, M, Rolandone F, Dominguez S, Djamour Y, Meyer B, 2008, Source Model for the Mw 6.1, 31 March 2006, Chalan–Chulan Earthquake (Iran) from InSAR, *Terra Nova*, 20, 126–133.
- Pınar N, Lahn E, 1952, Türkiye Depremleri İzahlı Kataloğu, Bayındırlık Bakanlığı, Yapı ve İmar İşleri Reisliği, 150s, Ankara.
- Poyraz F, 2009, Kuzey Anadolu Fay Zonu Doğu Kesiminde Yatay Yerkabuğu Hareketleri Ve Gerilme Birikiminin Araştırılması, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 140s, İstanbul.
- Pytharoulis S, Kontogianni V, Psimoulis P, Stiros S, 2004, Spectral Analysis Techniques in Deformation Analysis Studies, *INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying*, 11-13 November, Bratislava, 1-10.
- Reilinger R, McClusky S C, Oral M B, King W, Toksöz M N, 1997, Global Positioning, System Measurements of Present-Day Crustal Movements in the Arabian–Africa–Eurasia Plate Collision Zone, *Journal of Geophysical Research*, 102, 9983–9999.
- Reilinger R, McClusky S, Vernant P, Lawrance S, Ergintav S, Cakmak R, vd., 2006, GPS Constraints on Continental Deformation in the Africa-Arabia-Eurasia Continental

- Collision Zone and Implications for the Dynamics of Plate Interactions, *Journal of Geophysical Research*, 111, 1-26.
- Riel B, Simons M, Ponti D, Agram P, Jolivet R, 2018, Quantifying Ground Deformation in the Los Angeles and Santa Ana Coastal Basins due to Groundwater Withdrawal, *Water Resources Research*, 54, 3557-3582.
- Romagnoli C, Zerbini S, Lago L, Richter B, Simon D, Domenichini F, vd., 2003, Influence of Soil Consolidation and Thermal Expansion Effects on Height and Gravity Variations, *Journal of Geodynamics*, 35, 521-539.
- Rosi A, Tofani V, Agostini A, Tanteri L, Stefanelli C T, Catani F, vd., 2016, Subsidence Mapping at Regional Scale Using Persistent Scatters Interferometry (PSI): The Case of Tuscany Region (Italy). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 328-337.
- Ryder I, Parsons B E, Funning G, 2007, Postseismic Motion Following the 1997 Manyi (Tibet) Earthquake: InSAR Observations and Modeling, *Geophysical Journal International*, 169, 1009-1027.
- Shirzaei M, Bürgmann R, 2013, Time-Dependent Model of Creep on the Hayward Fault from Joint Inversion of 18 Years of InSAR and Surface Creep Data, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118, 1733-1746.
- Sevütekin S, Nargeleçekenler M, 2005, Zaman Serileri Analizi, Nobel Yayıncılık, 341s, Ankara
- Solak H İ, 2020, İzmir-Balıkesir Transfer Zonu ve Çevresindeki Güncel Deformasyonların GNSS Yöntemi ile İncelenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 163s, Afyon.
- Squarzoni C, Delacourt C, Allemand P, 2003, Nine Years of Spatial and Temporal Evolution of the La Valette Landslide Observed by SAR Interferometry, *Engineering Geology*, 68, 53-66.
- Strozzi T, Wegmuller U, Tosi L, Bitelli G, Spreckels V, 2001, Land Subsidence Monitoring with Differential SAR Interferometry, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67, 1261-1270.

- Sylvester A G, 1984, Leveling Precision and Benchmark Motions, Journal of Geophysical Research, 89, 7949-7956.
- Sylvester A G, 1986, Near-field Tectonic Geodesy, Active Tectonics, 1, 164-180.
- Sylvester A G, 1995, Nearfield Vertical Displacement in the Creeping Segment of the San Andreas Fault, Central California 1975 to 1994, Tectonophysics, 247, 4-25.
- Şengün Y S, 2009, GPS ve Insar Ölçülerini Birlikte Kullanarak İzmit Depreminde Oluşan Deformasyonların Belirlenmesi: Nokta Seyrekleştirmede Yeni Bir Algoritma, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 113s, İstanbul.
- Tekdal E, 2007, Deprem Sonrası Meydana Gelen Deformasyonların Jeodezik Yöntemlerle Belirlenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 118s, İstanbul.
- Tiryakioğlu İ, Dereli M A, Güllal E, Erdoğan S, 2010, Tektonik Hareketlerin Belirlenmesine Yönelik Ölçü Kampanyalarında GNSS Gözlem Sayı ve Sürelerinin Konum Doğruluğuna Olan Etkilerinin Araştırılması, Harita Teknolojileri Elektronik Dergi, 1, 32-38.
- Tiryakioğlu İ, 2012, GNSS Ölçüleri ile Güneybatı Anadolu'daki Blok Hareketleri ve Gerilim Alanlarının Belirlenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 155s, İstanbul.
- Tiryakioğlu İ, 2013, Geodetic Aspects of the 19 May 2011 Simav Earthquake in Turkey, Geomatics, Natural Hazards and Risk, 6, 76-89.
- Tiryakioğlu İ, Baybura T, Özkaymak Ç, Sözbilir H, Sandıkçıoğlu A, Erdoğan S, vd., 2015, Sultandağı Fayı Batı Kısmı Fay Aktivitelerinin Multidisipliner Çalışmalarla Belirlenmesi, Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi, 7, 7-16.
- Tiryakioğlu İ, Uğur M A, Yalçın M, Baybura T, Yılmaz M, Özkaymak Ç, vd., 2017, Akşehir Simav Fay Sistemindeki Güncel Tektonik Hareketlerinin İzlenmesi: Nivelman Çalışmaları, 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 11-13 Ekim 2017, Eskişehir.

- Tiryakioğlu İ, Uğur M A, Özkaymak Ç, 2018, Determination of Surface Deformations with Global Navigation Satellite System Time Series, *International Journal of Geological and Environmental Engineering*, 12, 719-722.
- Tiryakioğlu İ, 2019, Akşehir Simav Fay Sisteminin Güncel Tektonik Hareketlerinin İzlemesi, TÜBİTAK, Proje No: 115Y246, Final Raporu, 141s
- Tiryakioğlu İ, Yiğit C O, Özkaymak Ç, Baybura T, Yılmaz M, Uğur M A, vd., 2019, Active Surface Deformations Detected by Precise Levelling Surveys in the Afyon-Akşehir Graben Western Anatolia, Turkey, *Geofizika*, 36, 33–52.
- Tiryakioğlu İ, Bozkuş H B, 2020, Determination of Surface Deformations in Bolvadin Fault by the Precision Levelling Method and Investigation of the Relationship with Underground Water, *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 61, 499-516.
- Tiryakioğlu İ, Çalışkan K, Yiğit C Ö, Hastaoğlu K, Poyraz F, Baybura T, vd., 2022, The Velocity of Aseismic Surface Deformations Between 2016-2020 Detected by Precise Leveling Surveys of the Akşehir Simav Fault System in the Bolvadin District, Western Anatolia, *Annal of Geophysics*, 65, 1-17.
- Turan F, 2007, Dolgu Tipli Barajlarda Düşey Değişimlerin Hassas Trigonometrik Nivelman Yöntemiyle Belirlenmesi Üzerine Bir İnceleme, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 107s, İstanbul.
- Ünver M, 1988, Düşey Yöndeki Yerkabuğu Hareketlerinin Duyarlıklı Nivelman Ölçüleri ile Belirlenmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 116s, Trabzon.
- Van Dam T, Wahr J, Milly P C D, Shmakin A B, Blewitt G, Lavallee D, vd., 2001, Crustal Displacements due to Continental Water Loading, *Geophysical Research Letters*, 28, 651-654.
- Wan A W A, Tajul A M, Kamaludin O, 2016, Estimation of Co- and Postseismic Deformation After the Mw 8.6 Nias-Semeulue and Mw 8.5 Bengkulu Earthquakes from Continuous GPS Data, *International Conference on Geomatic and Geospatial Technology*, 42, 61-64.

- Wang G, Soler T, 2014, Measuring Land Subsidence Using GPS: Ellipsoid Height Versus Orthometric Height, *Journal of Surveying Engineering*, 141, 1-12.
- Wang W, Dang Y, Zhang C, 2017, Monitoring of Crustal Deformation and Gravity Variation from Terrestrial Water Loading in the Three Gorges Region by the CORS Network, *Chinese Journal of Geophysics*, 60, 962-971.
- Wdowinski S, Bock Y, Zhang J, Fang P, Genrich J, 1997, Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Spatial Filtering of Daily Positions for Estimating Coseismic and Postseismic Displacements Induced by the 1992 Landers Earthquake, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102, 18057-18070.
- Yalçın M, 2019, Bolvadin Fayı Yüzey Deformasyonlarının Hassas Nivelman Ölçüleri ile İzlenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 69s, Afyonkarahisar.
- Yalvaç S, 2016, Konya Kapalı Havzasında Düşey Yönlü Zemin Hareketlerinin GNSS Zaman Serileri Yardımıyla Belirlenmesi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 121s, Konya.
- Yavaşoğlu H, 2003, Kuzey Anadolu Fayının Orta Anadolu Bölümünün Kinematığının 2001 ve 2002 GPS Ölçmeleri İle Belirlenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 76s, İstanbul.
- Yavaşoğlu H, 2009, Kuzey Anadolu Fayının Orta Anadolu Bölümündeki Güncel Tektonik Aktivitenin Jeodezik Yöntemler ve Elastik Yarı Uzay Modelleme ile Belirlenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 205s, İstanbul.
- Yen J Y, Lu C H, Chang C P, Hooper A, Chang Y H, Liang W T, vd., 2011, Investigating Active Deformation in the Northern Longitudinal Valley and City of Hualien in Eastern Taiwan Using Persistent Scatterer and Small-Baseline SAR Interferometry, *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 22, 291-304.
- Yiğit C Ö, 2010, Yüksek Yapıların Farklı Sensörler ile Tam Ölçekli İzlenmesi ve Dinamik Parametrelerin Belirlenmesi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 148s, Konya.

- Yılmaztürk S, 2015, Sbas-Insar Yöntemiyle Düşey Yönlü Yüzey Deformasyonlarının Belirlenmesi: Bursa-Orhaneli Linyit Madeni Örneği, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 116s, İstanbul.
- Yusfania M, Anjasmara I M, Hadi A L, Pramudya B, 2016, Central Java Southern Part Area Deformation Analysis by Using GPS-CORS 2015, International Symposium on Earth Hazard and Disaster Mitigation, 11-12 October, Bandung, 1-6.
- Yuwono B D, Awaluddin M, Kun F H, Lutfi E R, 2017, Evaluation of Base Station CORS UDIP and CSEM for Monitoring Ground Deformation Sayung Demak Indonesia, The 5th Geoinformation Science Symposium, 27–28 September, Yogyakarta, 1-10.
- Zebker H A, Werner C L, Rosen P A, Hensley S, 1994, Accuracy of Topographic Maps Derived from ERS-1 Radar Interferometry, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 32, 823–836.
- Zebker H A, Rosen P A, Hensley S, 1997, Atmospheric Effects in Interferometric Synthetic Aperture Radar Surface Deformation and Topographic Maps, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 102, 7547-7563.
- Zhang X, Huang D, Liao H, 2014, Real-Time Monitoring of Strong Ground Motion Using 50 Hz GNSS Data of Continuous Operation Reference Station (CORS), China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2014 Proceedings, 3, 101-110.

İnternet Kaynakları

- 1- https://tr.wikipedia.org/wiki/Küresel_uydu_seyrüsefer_sistemi, 15.02.2023
- 2- <https://www.gislounge.com/benefits-of-satellite-based-augmentation-systems/>, 15.02.2023
- 3- <https://www.squaregps.com/wp-content/uploads/2015/10/space2.png>, 15.02.2023
- 4- <https://tr.wikipedia.org/wiki/GPS>, 15.02.2023
- 5- <https://tr.wikipedia.org/wiki/GLONASS>, 15.02.2023

- 6- <https://en.wikipedia.org/wiki/BeiDou>, 15.02.2023
- 7- [https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_\(satellite_navigation\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_(satellite_navigation)), 15.02.2023
- 8- https://tr.wikipedia.org/wiki/Hint_Bölgesel_Uydu_Konumlandırma_Sistemi, 15.02.2023
- 9- https://en.wikipedia.org/wiki/Quasi-Zenith_Satellite_System, 15.02.2023
- 10- https://en.wikipedia.org/wiki/Satellite_navigation, 15.02.2023
- 11- [https://tr.wikipedia.org/wiki/Afyonkarahisar_\(il\)](https://tr.wikipedia.org/wiki/Afyonkarahisar_(il)), 20.05.2023
- 12- <https://tr.wikipedia.org/wiki/Bolvadin>, 20.05.2023
- 13- [http:// http://copernicus.eu/main/sentinels](http://http://copernicus.eu/main/sentinels), 22.05.2023
- 14- <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides>, 22.05.2023
- 15- <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1>, 05.04.2023
- 16- <https://comet.nerc.ac.uk/comet-lics-portal/>, 05.04.2023
- 17- <https://github.com/yumorishita/LiCSBAS>, 05.04.2023

Oltu Taşı Potansiyel Minimum Rezervin Tespit Edilmesi ve Haritalanması, Atatürk Üniversitesi, KUDAKA (Proje No: TRA1/15/DFD/0021), Projede Araştırmacı, 2015, (Tamamlandı).

Worldview-3 Multispektral Uydu Görüntüsü Analizi ile Oltu Taşı Minimum Potansiyel Rezervinin Belirlenmesi, Atatürk Üniversitesi, BAP (Proje No: PRJ2015/231), Projede Araştırmacı, 2015, (Tamamlandı).

