

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YERYÜZÜ HAREKETLERİNİN SENTETİK AÇIKLI RADAR  
İNTERFEROMETRİSİ VE HİDROLOJİ VERİLERİYLE  
ANALİZİ: AFYON-AKŞEHİR VE KÜÇÜK MENDERES  
GRABENİ ÖRNEKLERİ**

**Mümin İMAMOĞLU**

DOKTORA TEZİ  
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı  
Uzaktan Algılama ve CBS Programı

Danışman  
Prof. Dr. Füsun BALIK ŞANLI

Eş-Danışman  
Prof. Dr. Ziyadin ÇAKIR

Temmuz, 2021

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YERYÜZÜ HAREKETLERİNİN SENTETİK AÇIKLI RADAR  
İNTERFEROMETRİSİ VE HİDROLOJİ VERİLERİYLE ANALİZİ:  
AFYON-AKŞEHİR VE KÜÇÜK MENDERES GRABENİ ÖRNEKLERİ**

Mümin İMAMOĞLU tarafından hazırlanan tez çalışması 14.07.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı Uzaktan Algılama ve CBS Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Füsün BALIK ŞANLI  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Danışman

Prof. Dr. Ziyadin ÇAKIR  
İstanbul Teknik Üniversitesi  
Eş-Danışman

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Füsün BALIK ŞANLI, Danışman  
Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Uğur DOĞAN, Üye  
Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Doç. Dr. Saygın ABDİKAN, Üye  
Hacettepe Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Dr. Öğr. Üye. Uğur ACAR, Üye  
Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Dr. Öğr. Üye. Fatih KAHRAMAN, Üye  
Bahçeşehir Üniversitesi

\_\_\_\_\_



Danışmanım Prof. Dr. Füsün BALIK ŞANLI sorumluluğunda tarafımda hazırlanan Yeryüzü Hareketlerinin Sentetik Açıklı Radar İnterferometrisi ve Hidroloji Verileriyle Analizi: Afyon-Akşehir ve Küçük Menderes Grabeni Örnekleri başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Mümin İMAMOĞLU

İmza

Bu alışmanın Bolvadin ile ilgili bölümü Türkiye Bilimsel Ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Bilişim Ve Bilgi Güvenliği İleri Teknolojiler Araştırma Merkezi (BİLGEM) tarafından desteklenmiştir. Proje No: B740-100289.

*Aileme*

## TEŞEKKÜR

---

Doktora sürecimin başından sonuna kadar hem teknik hem manevi anlamda verdiği destekten dolayı tez danışmanım Prof. Dr. Füsün BALIK ŞANLI'ya, interferometrik SAR konusundaki teknik desteklerinden dolayı tez eş-danışmanım Prof. Dr. Ziyadin ÇAKIR'a, tez izleme sürecindeki geribildirimleri ve olumlu yönlendirmeleri sebebiyle Prof. Dr. Uğur DOĞAN'a ve Doç. Dr. Saygın ABDİKAN'a, hem teknik hem de manevi bütün tavsiye ve yönlendirmeleri sebebiyle Dr. Fatih KAHRAMAN'a teşekkür ederim.

Mümin İMAMOĞLU

# İÇİNDEKİLER

---

|                                                                |              |
|----------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>SİMGE LİSTESİ</b>                                           | <b>viii</b>  |
| <b>KISALTMA LİSTESİ</b>                                        | <b>x</b>     |
| <b>ŞEKİL LİSTESİ</b>                                           | <b>xii</b>   |
| <b>TABLO LİSTESİ</b>                                           | <b>xv</b>    |
| <b>ÖZET</b>                                                    | <b>xvi</b>   |
| <b>ABSTRACT</b>                                                | <b>xviii</b> |
| <b>1 GİRİŞ</b>                                                 | <b>1</b>     |
| 1.1 Literatür Özeti . . . . .                                  | 1            |
| 1.2 Tezin Amacı . . . . .                                      | 4            |
| 1.3 Hipotez . . . . .                                          | 5            |
| 1.4 Tezin Yapısı . . . . .                                     | 6            |
| <b>2 SAR İNTERFEROMETRİSİ</b>                                  | <b>7</b>     |
| 2.1 SAR Verisi . . . . .                                       | 8            |
| 2.2 InSAR Yöntemi . . . . .                                    | 9            |
| 2.3 Çok Zamanlı InSAR Yöntemleri . . . . .                     | 14           |
| <b>3 ZAMAN SERİLERİ</b>                                        | <b>19</b>    |
| 3.1 Zaman Serisi Bileşenleri . . . . .                         | 19           |
| 3.2 Zaman Serisi Bileşenlerine Ayrıştırma Yöntemleri . . . . . | 21           |
| 3.2.1 Geleneksel Bileşenlerine Ayrıştırma . . . . .            | 22           |
| 3.2.2 X11 Bileşenlerine Ayrıştırma . . . . .                   | 24           |
| 3.2.3 X-13ARIMA-SEATS Bileşenlerine Ayrıştırma . . . . .       | 24           |
| 3.2.4 STL Bileşenlerine Ayrıştırma . . . . .                   | 25           |
| 3.3 Genel Değerlendirme . . . . .                              | 25           |
| <b>4 BOLVADİN DEFORMASYON ANALİZİ</b>                          | <b>27</b>    |
| 4.1 Çalışma Alanı . . . . .                                    | 29           |

|          |                                                              |           |
|----------|--------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.2      | Veri ve Yöntemler . . . . .                                  | 31        |
| 4.2.1    | Veri Seti . . . . .                                          | 31        |
| 4.2.2    | Çok Zamanlı InSAR İşlemleri . . . . .                        | 31        |
| 4.3      | Analiz Sonuçları . . . . .                                   | 33        |
| 4.3.1    | Çok Zamanlı InSAR Sonuçları . . . . .                        | 33        |
| 4.3.2    | Jeolojik Birimler ile Karşılaştırma . . . . .                | 37        |
| 4.3.3    | Eber Gölü Su Yüzey Alanı ile Karşılaştırma . . . . .         | 38        |
| 4.3.4    | Yer Altı Su Seviyesi ile Karşılaştırma . . . . .             | 41        |
| 4.4      | Bulgular ve Tartışma . . . . .                               | 42        |
| <b>5</b> | <b>K.MENDERES GRABENİ DEFORMASYON ANALİZİ</b>                | <b>46</b> |
| 5.1      | Çalışma Alanı . . . . .                                      | 47        |
| 5.2      | Veri ve Yöntemler . . . . .                                  | 49        |
| 5.2.1    | Veri Seti . . . . .                                          | 49        |
| 5.2.2    | Çok Zamanlı InSAR İşlemleri . . . . .                        | 50        |
| 5.2.3    | Düşey ve Yatay Bileşenlerine Ayırma . . . . .                | 51        |
| 5.2.4    | Zaman Serisi Bileşenlerine Ayırma . . . . .                  | 52        |
| 5.3      | Analiz Sonuçları . . . . .                                   | 53        |
| 5.3.1    | Ortalama Hız Haritaları . . . . .                            | 53        |
| 5.3.2    | Jeolojik Birimler ile Karşılaştırma . . . . .                | 53        |
| 5.3.3    | Deformasyon Zaman Serileri ve Yer Altı Su Seviyesi . . . . . | 56        |
| 5.4      | Bulgular ve Tartışma . . . . .                               | 57        |
| <b>6</b> | <b>SONUÇ VE ÖNERİLER</b>                                     | <b>63</b> |
|          | <b>KAYNAKÇA</b>                                              | <b>66</b> |
|          | <b>TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR</b>                             | <b>77</b> |

## SİMGE LİSTESİ

---

|                        |                                             |
|------------------------|---------------------------------------------|
| $\theta$               | Bakış açısı                                 |
| $B_R$                  | Bant genişliği                              |
| $\lambda$              | Dalga boyu                                  |
| $n$                    | Dalga boyu sayısı                           |
| $\partial \phi$        | Diferansiyel faz farkı                      |
| $\partial \phi_{defo}$ | Diferansiyel faz farkı (deformasyon etkisi) |
| $\Delta d$             | Düşey yer değiştirme miktarı                |
| $\Delta d_{el}$        | Düşey yer değiştirme miktarı (elastik)      |
| $\Delta d_{in}$        | Düşey yer değiştirme miktarı (inelastik)    |
| $d_{el}$               | Elastik deformasyon miktarı                 |
| $\phi$                 | Faz                                         |
| $\phi_{atmo}$          | Faz bileşeni (atmosfer etkisi)              |
| $\phi_{defo}$          | Faz bileşeni (deformasyon etkisi)           |
| $\phi_{flat}$          | Faz bileşeni (dünyanın şeklinin etkisi)     |
| $\phi_{grlt}$          | Faz bileşeni (diğer gürültülerin etkisi)    |
| $\phi_{orb}$           | Faz bileşeni (yörünge hatasının etkisi)     |
| $\phi_{sa}$            | Faz bileşeni (saçıcı etkisi)                |
| $\phi_{topo}$          | Faz bileşeni (yüksekti farkının etkisi)     |
| $\Delta \phi$          | Faz farkı (interferometrik faz)             |
| $ u $                  | Genlik                                      |
| $d_{in}$               | İnelastik deformasyon miktarı               |
| $v$                    | İnterferogram                               |
| $S_k$                  | İskelet depolama katsayısı                  |

|                    |                                                     |
|--------------------|-----------------------------------------------------|
| $S_{ke}$           | İskelet depolama katsayısı (elastik)                |
| $S_{kv}$           | İskelet depolama katsayısı (inelastik)              |
| $u$                | SAR sinyali                                         |
| $u^*$              | SAR sinyalinin eşleniği                             |
| $R$                | Sensör ile yeryüzü arasındaki mesafe                |
| $h$                | Topoğrafik yükseklik                                |
| $B$                | Uydu platformları arasındaki uzaklık                |
| $B_{\perp}$        | Uydu platformları arasındaki dikey uzaklık          |
| $B_{\perp,kritik}$ | Uydu platformları arasındaki kritik dikey uzaklık   |
| $\Delta hs$        | Yer altı su seviyesindeki değişim                   |
| $\Delta hs_{el}$   | Yer altı su seviyesindeki değişim (elastik)         |
| $\Delta hs_{in}$   | Yer altı su seviyesindeki değişim (inelastik)       |
| $\alpha$           | Yüzey açısı                                         |
| $\Delta R_{fark}$  | Yüzey hareketi                                      |
| $x$                | Zaman serisi sinyali                                |
| $x_{genel}$        | Zaman serisi sinyali (genel eğilim bileşeni)        |
| $\hat{x}_{genel}$  | Zaman serisi sinyali (genel eğilim bileşen tahmini) |
| $x_{mev}$          | Zaman serisi sinyali (mevsimsel bileşen)            |
| $\hat{x}_{mev}$    | Zaman serisi sinyali (mevsimsel bileşen tahmini)    |
| $x_{fark}$         | Zaman serisi sinyali (diğer bileşenler)             |



## KISALTMA LİSTESİ

---

|        |                                                                                                                                                |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| APS    | Atmosferik Faz Ekranı (Atmospheric Phase Screen)                                                                                               |
| ARIMA  | OtoRegresif Entegre Hareketli Ortalama (AutoRegressive Integrated Moving Average)                                                              |
| CLC    | CORINE Arazi Örtüsü (CORINE Land Cover)                                                                                                        |
| COMET  | Deprem, Volkan ve Tektonik Gözlem ve Modelleme Merkezi (the Centre for the Observation and Modelling of Earthquakes, Volcanoes, and Tectonics) |
| CORINE | Çevresel Bilginin Koordinasyonu (Coordination of Information on the Environment)                                                               |
| EAP    | Anten Yükseklik Modeli (Elevation Antenna Pattern)                                                                                             |
| ESA    | Avrupa Uzay Ajansı (European Space Agency)                                                                                                     |
| DS     | Dağıtık Saçıcı (Distributed Scatterer)                                                                                                         |
| GNSS   | Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (Global Navigation Satellite System)                                                                           |
| GPS    | Küresel Konumlama Sistemi (Global Positioning System)                                                                                          |
| IW     | Interferometric Wide                                                                                                                           |
| InSAR  | İnterferometrik Sentetik Açıklı Radar (Interferometric Synthetic Aperture Radar)                                                               |
| LOS    | Bakış Açısı Doğrultusu (Line of Sight)                                                                                                         |
| MGM    | Meteoroloji Genel Müdürlüğü                                                                                                                    |
| MTA    | Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü                                                                                                          |
| PS     | Sürekli Saçıcı (Persistent Scatterer)                                                                                                          |
| PSI    | Sürekli Saçıcı İnterferometrisi (Persistent Scatterer Interferometry)                                                                          |
| RADAR  | RADio Detection And Ranging                                                                                                                    |
| SAR    | Sentetik Açıklı Radar (Synthetic Aperture Radar)                                                                                               |

|        |                                                                                          |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| SEATS  | ARIMA Zaman Serilerinde Mevsimsel Ayırıştırma (Seasonal Extraction in ARIMA Time Series) |
| SBAS   | Küçük Uzaklık Alt Kümesi (Small Baseline Subset)                                         |
| SNAP   | Sentinel Application Platform                                                            |
| SLC    | Tek Bakışlı Kompleks (Single Look Complex)                                               |
| SRTM   | Shuttle Radar Topography Mission                                                         |
| StaMPS | The Stanfor Method for Persistent Scatterers                                             |
| STL    | Mevsimsel Trend Ayırıştırma (Seasonal and Trend decomposition using Loess)               |
| SYM    | Sayısal Yükseklik Modeli                                                                 |
| TOPSAR | The Terrain Observation with Progressive Scans SAR                                       |
| TRAIN  | Toolbox for Reducing Atmospheric InSAR Noise                                             |

## ŞEKİL LİSTESİ

|           |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1 | Yükseklik hesabı için kullanılan SAR çekim geometrisi [69] . . . . .                                                                                                                                                                                                                         | 10 |
| Şekil 2.2 | Dikey uzaklık farkının interferogram görüntüler üzerindeki etkisi [70] (a) $B_{\perp} = 63$ m, $h_{2\pi} = 145$ m. (b) $B_{\perp} = 434$ m, $h_{2\pi} = 21$ m . . . . .                                                                                                                      | 11 |
| Şekil 2.3 | Dalgaboyu farkının interferogram görüntüler üzerindeki etkisi [69] (Üstte) X-band: 2.4-3.75 cm dalga boyu. (Ortada) C-band: 3.75-7.5 cm dalga boyu. (Altta) L-band: 15-30 cm dalga boyu . . . . .                                                                                            | 12 |
| Şekil 2.4 | Yüzey hareketinin tespiti için kullanılan SAR çekim geometrisi [69]                                                                                                                                                                                                                          | 13 |
| Şekil 2.5 | Yeryüzünde farklı saçıcı özellik gösteren bölgelerde gözlemlenen tepki [11]. (a) Sürekli saçıcı. (b) Dağıtık saçıcı . . . . .                                                                                                                                                                | 16 |
| Şekil 2.6 | Çok zamanlı InSAR yöntemlerinde interferogram oluşturmak için kullanılan görüntü eşleştirmeleri [11]. (a) Sürekli saçıcı yöntemler. (b) Dağıtık saçıcı yöntemler . . . . .                                                                                                                   | 17 |
| Şekil 3.1 | K.Menderes bölgesine ait örnek bir deformasyon zaman serisi . . . . .                                                                                                                                                                                                                        | 21 |
| Şekil 3.2 | Klasik bileşenlerine ayrıştırma yöntemi . . . . .                                                                                                                                                                                                                                            | 23 |
| Şekil 3.3 | X11 bileşenlerine ayrıştırma yöntemi . . . . .                                                                                                                                                                                                                                               | 24 |
| Şekil 3.4 | X-13ARIMA-SEATS bileşenlerine ayrıştırma yöntemi . . . . .                                                                                                                                                                                                                                   | 25 |
| Şekil 3.5 | STL bileşenlerine ayrıştırma yöntemi . . . . .                                                                                                                                                                                                                                               | 26 |
| Şekil 4.1 | Bolvadin’de gözlemlenen yüzey deformasyonları ve bunların arazi, yol ve yapılara olan etkileri . . . . .                                                                                                                                                                                     | 28 |
| Şekil 4.2 | (a) Çalışma alanı (Bolvadin) ve çevresi, bölgedeki aktif fay hatları ve Sentinel-1 çerçeveleri. (b) Sentinel-2 görüntüsü üzerinde ziyaret edilen bölgeler ve çekilen fotoğrafların konumları. (c) MTA’dan alınan Bolvadin’in jeolojik haritası . . . . .                                     | 30 |
| Şekil 4.3 | Sentinel 1 verileri arasındaki zamansal ve geometrik uzaklık grafiği. Kırmızı yıldız referans (master) ürünü temsil eder. (a) Yükselen yörüngede (Asc-160) referans verinin tarihi 5 Mayıs 2017’dir. (b) Alçalan yörüngede (Desc-65) ise referans verinin tarihi 2 Temmuz 2017’dir . . . . . | 32 |
| Şekil 4.4 | Afyon-Akşehir Grabeni, (a) yükselen yörünge (Asc-160) ve (b) alçalan yörünge (Desc-65) için LOS ortalama hız haritaları . . . . .                                                                                                                                                            | 34 |

|                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |    |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.5</b>  | Bolvadin ve yakın çevresi için, <b>(a)</b> yükselen yörünge (Asc-160) ve <b>(b)</b> alçalan yörünge (Desc-65) için LOS'ta ortalama hız haritaları . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 35 |
| <b>Şekil 4.6</b>  | <b>(a)</b> Düşey ortalama hız haritası. Sıcak renkler (negatif değerler) çökmeyi temsil eder. <b>(b)</b> Yatay (D-B) ortalama hız haritası. Sıcak renkler (negatif değerler) batı, soğuk renkler (pozitif değerler) ise doğu yönündeki hareketi temsil etmektedir. Kesik kırmızı-beyaz çizgiler, aktif fay hattının olası uzantısını göstermektedir . . . . .                                                                                          | 36 |
| <b>Şekil 4.7</b>  | Asc-160 yörüngesi için <b>(a)</b> P1, <b>(b)</b> P2, <b>(c)</b> P3 ve Desc-65 yörüngesi için <b>(d)</b> P1, <b>(e)</b> P2 ve <b>(f)</b> P3 noktalarındaki LOS yer değiştirme miktarları gösterilmiştir. Ayrıca, P2 ve P3 noktaları arasındaki profile gerçekleşen LOS yer değiştirmelerin doğrusal uyumu da <b>(g)</b> Asc-160 ve <b>(h)</b> Des-65 yörüngeleri için gösterilmiştir. Nokta ve profil konumları Şekil 4.5'de gösterilmektedir . . . . . | 37 |
| <b>Şekil 4.8</b>  | Bolvadin bölgesindeki jeolojik birimler ile <b>(a)</b> düşey deformasyon hızı ve <b>(b)</b> yatay (D-B) deformasyon hızı arasındaki ilişki gösterilmiştir. Her jeolojik birim için ortalama (kırmızı noktalar), standart sapma (mavi çizgi), minimum ve maksimum (koyu gri) deformasyon değerleri gösterilmektedir . . . . .                                                                                                                           | 39 |
| <b>Şekil 4.9</b>  | <b>(a)</b> Afyon aylık ortalama yağış miktarı (mm), Eber Gölü'nün aylık ortalama su yüzey alan değişimi (%) ve yer altı su seviyesindeki mevsimsel değişimler (m). P1 noktasındaki mevsimsel yer değiştirme miktarları, Eber Gölü'nün yüzey alanındaki değişim ile birlikte <b>(b)</b> Asc-160 ve <b>(c)</b> Desc-65 yörüngeleri için gösterilmiştir . .                                                                                               | 40 |
| <b>Şekil 4.10</b> | P1 noktasındaki LOS yer değiştirme miktarı ile 28372 numaralı kuyudaki su seviyesinin zamansal değişimi <b>(a)</b> Asc-160 ve <b>(b)</b> Des-65 yörüngeleri için birlikte gösterilmiştir. Kuyunun yeri Şekil 4.5a,b'de gösterilmektedir . . . . .                                                                                                                                                                                                      | 41 |
| <b>Şekil 4.11</b> | <b>(a)</b> 28372 numaralı kuyuya ait yer altı su seviyesi değişimi ve aynı bölgeye ait düşey yer değiştirme zaman serisi. <b>(b)</b> Genel eğilim. <b>(c)</b> Mevsimsel değişim. <b>(d)</b> Mevsimsel değişimlerin wavelet(dalgacık) uyumluluk yöntemi ile karşılaştırılması . . . . .                                                                                                                                                                 | 43 |
| <b>Şekil 4.12</b> | Şekil 4.6'de gösterilen AA-DD' profilleri boyunca ortalama hız. <b>(a)</b> Düşey ortalama hız. <b>(b)</b> Yatay (D-B) ortalama hız . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 44 |
| <b>Şekil 5.1</b>  | <b>(a)</b> K.Menderes Grabeni, bölgedeki aktif fay hatları ve 1990-2019 arasında meydana gelen depremler. <b>(b)</b> Analizde kullanılan Sentinel-1 çerçeveleri . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                              | 47 |

|                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 5.2</b> | (a) Çalışma alanını gösteren Sentinel-2 optik görüntüsü ve (b) bölgeye ait Corine 2018 haritası. 212 etiket numarası ve sarı renk ile gösterilen sürekli sulanan topraklar, bölge genelinde çok geniş alanları kaplamaktadır . . . . .                                                             | 48 |
| <b>Şekil 5.3</b> | (a) Yükselen (Asc-131) ve (b) alçalan (Desc-36) yörüngelerde kullanılan interferogram çiftleri ve aralarındaki dikey uzaklık mesafesi. Kırmızı çizgiler, düşük kaliteli interferogramları göstermektedir . . . . .                                                                                 | 50 |
| <b>Şekil 5.4</b> | K.Menderes Grabeni için (a) yükselen (Asc-131) ve (b) alçalan (Desc-36) yörüngelerde LOS ortalama hız haritaları . . . . .                                                                                                                                                                         | 54 |
| <b>Şekil 5.5</b> | K.Menderes Grabeni düşey ortalama hız haritası . . . . .                                                                                                                                                                                                                                           | 54 |
| <b>Şekil 5.6</b> | (a) MTA'dan alınan veriler doğrultusunda K.Menderes Grabeni'ni oluşturan jeolojik birimler. (b) Jeolojik birimler üzerinde gerçekleşen ortalama düşey deformasyon hızı ile ilgili istatistikler . . . . .                                                                                          | 55 |
| <b>Şekil 5.7</b> | (a) 46050-Torbalı ve (b) 30663-Bayındır kuyuları için düşey yer değiştirme zaman serileri ve yer altı su seviyesi değişimleri. Zaman serileri genel eğilim ve mevsimsel değişim bileşenlerine ayrıştırılmıştır. Wavelet uyumluluk değerleri ile mevsimsel değişimler karşılaştırılmıştır . . . . . | 57 |
| <b>Şekil 5.8</b> | (a) 25527-Ödemiş ve (b) 55851-Ödemiş kuyuları için düşey yer değiştirme zaman serileri ve yer altı su seviyesi değişimleri. Zaman serileri genel eğilim ve mevsimsel değişim bileşenlerine ayrıştırılmıştır. Wavelet uyumluluk değerleri ile mevsimsel değişimler karşılaştırılmıştır . . . . .    | 58 |
| <b>Şekil 5.9</b> | $R$ değerleri ( $d_{el}/d_{in}$ ) ortalama düşey deformasyon hız eğrileri ile birlikte gösterilmiştir. $R$ değerlerinden sadece 0-1 arasındaki inelastik deformasyon aralığı gösterilmiştir . . . . .                                                                                              | 60 |

## TABLO LİSTESİ

---

|                  |                                                                                                                                                                                          |    |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 5.1</b> | Sentinel-1 SAR veri detayları. . . . .                                                                                                                                                   | 50 |
| <b>Tablo 5.2</b> | Her bir kuyu için inelastik iskelet depolama katsayısı ( $S_{kv}$ ), elastik iskelet depolama katsayısı ( $S_{ke}$ ) ve elastik deformasyon/inelastik deformasyon oranı ( $R$ ). . . . . | 62 |

# **Yeryüzü Hareketlerinin Sentetik Açıklı Radar İnterferometrisi ve Hidroloji Verileriyle Analizi: Afyon-Akşehir ve Küçük Menderes Grabeni Örnekleri**

Mümin İMAMOĞLU

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Füsün BALIK ŞANLI

Eş-Danışman: Prof. Dr. Ziyadin ÇAKIR

Son yirmi yıl boyunca, Türkiye'nin batısında yer alan Ege Bölgesi'nin farklı noktalarında, herhangi bir yıkıcı deprem olmaksızın çökme, çatlama ve kırılma gibi yüzey deformasyonları gözlemlenmiştir. Bu yüzey deformasyonları, tektonik hareketlere ve/veya yer altı suyunun aşırı kullanılmasına bağlanmıştır. Ege Bölgesi'nde gerçekleşen yüzey deformasyonlarının detaylı zaman-mekânsal analizi ile oluşum mekanizmalarının anlaşılmasına katkı sağlamak adına Afyon-Akşehir Grabeni ve Küçük (K.) Menderes Grabeni çalışma alanları olarak seçilmiştir.

Birinci vakada, Afyon-Akşehir Grabeni ve Bolvadin bölgesi, Sentinel-1 sentetik açıklıklı radar (SAR) verileri ve çok zamanlı interferometrik SAR (InSAR) yöntemi ile analiz edilmiştir. Ekim 2014 ile Ekim 2018 arasında, yükselen ve alçalan yörüngelerde elde edilen Sentinel-1 tek bakışlı kompleks (SLC) veriler Persistent Scatterer Interferometry (PSI) yöntemi ile işlenmiştir. Deformasyon hız haritaları ve zaman serileri üretilmiş sonuçlar jeoloji, yer altı su seviyesi ve Bolvadin yakınında yer alan Eber Gölü'nün su yüzey alanı ile karşılaştırılmıştır. Deformasyon hız haritaları, Bolvadin kasabası ve çevresinde önemli ölçüde çökme olduğunu ortaya koymaktadır. Bölgeye gerçekleştirilen saha gezisi ile yerleşim yerlerinde ve altyapıda gözlemlenen hasarlar, analiz sonucu elde edilen deformasyon bulgularını doğrulamaktadır. Yumuşak alüvyon çökeltileri ile karakterize edilen Bolvadin'in güney kesimi, 35 mm/yıl'a varan deformasyon hızı ile çökmenin en şiddetli olduğu bölge olarak öne çıkmaktadır.

Yamaç molozu/talusu ve konglomeradan oluşan bölgenin kuzeydoğu kısmında ise nispeten daha düşük bir çökme hızı bulunmaktadır. Deformasyon zaman serileri ile yer altı su seviyesi arasında, hem kısa hem de uzun vadede güçlü bir ilinti mevcuttur. Ayrıca, deformasyon zaman serilerindeki kısa vadeli değişimler, şehrin birkaç km güneydoğusunda yer alan Eber Gölü'nün su yüzey alanındaki mevsimsel değişimlerle de yüksek benzerlik göstermektedir. Sonuç olarak, çökmenin litolojik birimlerle güçlü ilişkisi, deformasyon hızı ve yer altı su seviyesi değişimleri arasındaki benzerlik, deformasyonun su yüzeyindeki mevsimsel değişimler ile uyumlu olması ve son olarak Bolvadin Fay'ının çevresinde belirgin deformasyon hız farklılıklarının gözlemlenmemesi sebebiyle, çökmenin birincil nedeninin büyük olasılıkla yer altı suyunun aşırı kullanımı ve hidrolojik değişiklikler olduğunu göstermektedir.

İkinci çalışmada ise en şiddetli yüzey deformasyonlarının rapor edildiği Ödemiş ilçesi ve K.Menderes Grabeni, çok zamanlı InSAR yöntemleri ve Sentinel-1 SAR verileri kullanılarak analiz edilmiştir. 2015 ve 2018 (dahil) yılları arasında, yükselen ve alçalan yörüngelerde elde edilen Sentinel-1 SLC görüntüleri, Small Baseline Subset (SBAS) yöntemi kullanılarak işlenmiştir. Elde edilen deformasyon hız haritaları, K.Menderes Graben'in 29 cm/yıl'a varan hızlarda yoğun bir çökme yaşadığını ortaya koymaktadır. Bu deformasyon hızı Ödemiş ve çevresini, dünyanın en hızlı çöken bölgelerinden biri haline getirmektedir. Çökme bölgeleri ile alüvyon gibi konsolide olmayan tortullar arasındaki uzamsal ilinti ve InSAR zaman serileri ile yer altı su seviyesi değişimleri arasındaki güçlü zamansal korelasyon, çökmenin büyük olasılıkla yer altı suyunun aşırı kullanılmasına bağlı olduğunu göstermektedir. InSAR zaman serileri ve yer altı su seviyesine ait mevsimsel değişimler, bir yıllık zaman dilimlerinde yüksek tutarlılık göstermektedir. Deformasyon zaman serileri, yaklaşık 30 günlük bir gecikmeyle yer altı su seviyesindeki değişimleri takip etmektedir. Elastik/inelastik deformasyon oranları, inelastik deformasyonun bölgede baskın bileşen olduğunu ve bölgede geri dönüşü olmayan bir deformasyona işaret ettiğini göstermektedir. Kuyu konumlarında hesaplanan iskelet depolama katsayıları da inelastik deformasyon fikrini desteklemektedir. Bununla birlikte, şiddetli bir inelastik deformasyon çok yaygın değildir ve etkili yer altı su yönetimi ile bölge çökme olgusundan kurtarılabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Çok-zamanlı InSAR, zaman serisi analizi, yüzey deformasyonu, zemin çökmesi, Afyon-Akşehir Grabeni, Bolvadin, K. Menderes Grabeni, Ödemiş



## ABSTRACT

---

# **Analysis of Ground Movements with Synthetic Aperture Radar Interferometry and Hydrology Data: The Case Studies of Afyon-Akşehir and Küçük Menderes Grabens**

Mümin İMAMOĞLU

Department of Geomatic Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Füsün BALIK ŞANLI

Co-supervisor: Prof. Dr. Ziyadin ÇAKIR

Over the past few decades, surface deformations have been observed in many places all over the world, including Turkey. Surface deformations like subsidence, fissuring, and fracturing have been observed in different parts of the Aegean Region, western Turkey, without any destructive earthquakes. Surface deformations in some of these regions have been attributed to aseismic slip-on faults and/or to excessive pumping of groundwater. In order to contribute to the understanding of the deformation mechanism with detailed temporal and spatial analysis, Afyon-Akşehir Graben and Küçük (K.) Menderes Graben were selected as study regions.

In the first study case, the Afyon-Akşehir Graben with a focus on the Bolvadin region is analyzed by means of Sentinel-1 synthetic aperture radar (SAR) data and multi-temporal interferometric SAR (InSAR) technique. Sentinel-1 single look complex (SLC) data acquired in ascending and descending orbits between October 2014 and October 2018 are processed with Persistent Scatterer Interferometry (PSI) method. Deformation velocity maps and line-of-sight (LOS) displacement time series are produced and compared with geology, groundwater level, and the water surface area of Eber Lake nearby. Deformation velocity maps reveal significant subsidence in most of the town and surrounding regions, which is confirmed by field observations that show severe damage to the settlements and infrastructure of the town. The most severe subsidence is observed to be in the southern part of Bolvadin with rates up to 35 mm/year, which is characterized by the presence of soft alluvial deposits. Composed

of slope debris/talus and conglomerate, the northeastern part of the deforming region experiences a relatively lower rate of subsidence. A strong correlation between LOS displacement time series and groundwater level exists both in the short and long term. Moreover, short term variations in LOS displacement time series also show high similarity with seasonal variations in the water surface area of Eber Lake located a few km southeast of the town. We conclude that the primary cause of subsidence is most probably the overexploitation of groundwater and hydrological changes because of the strong correlation of subsidence with lithological units, the similarity between deformation rate and groundwater level changes, the correspondence of seasonal variations in water surface area, and short-term deformation rate oscillations, and the absence of InSAR velocity contrast across the active faults.

In the second case, we report our investigation on the ground subsidence in Ödemiş town located in the K.Menderes Graben where one of the most severe and widespread surface fracturings has been reported. The entire K.Menderes Graben is analyzed using Sentinel-1 SAR data with multi-temporal InSAR techniques. A total of 342 Sentinel-1 SLC images acquired both in ascending and descending orbits between 2015 and 2018 inclusive are processed using the Small Baseline Subset (SBAS) method. LOS velocity fields reveal that K.Menderes Graben is experiencing extensive subsidence at rates reaching as much as 29 cm/yr, making it one of the fastest subsiding regions in the world. The spatial correlation between the subsiding regions and the unconsolidated sediments such as alluvium and alluvial fans suggests that the subsidence is most probably due to over drafting of the groundwater, which is confirmed by the strong temporal correlation between InSAR time series and groundwater level changes. Wavelet coherence analysis of seasonal changes extracted from the InSAR time series shows high coherence around one year. Displacement time series follow groundwater variations with a time lag of about 30 days. Elastic/inelastic deformation ratios calculated for the entire graben suggest that inelastic deformation is the dominant component in the region, implying an irreversible deformation. Calculated skeletal storage coefficients at corresponding well locations also support the idea of inelastic deformation. However, severe inelasticity is not extensive, and the region may still recover from subsidence with correct groundwater management.

**Keywords:** Multi-temporal InSAR, time series analysis, ground deformation, subsidence, Afyon-Akşehir Graben, Bolvadin, K. Menderes Graben, Ödemiş

### 1.1 Literatür Özeti

Yüzey deformasyonu dünya genelinde birçok bölgeyi etkileyen ve oldukça sık gözlemlenen genel jeolojik bir olgudur [1]. Yeryüzü deformasyonları tektonik hareketler ve volkanik patlamalar gibi doğal süreçlerin bir sonucu oluşabileceği gibi yer altı sularının aşırı kullanılması, madencilik faaliyetleri, metro yapımı ve diğer yer altı inşaatları gibi insan kaynaklı sebeplerden ötürü de gerçekleşebilir [2]. Yeryüzü deformasyonlarının heyelanlar, zeminde oluşan çatlaklar, yarıklar ve açılmalar, altyapı tesislerinde oluşan hasarlar gibi doğrudan gözlemlenebilen sonuçları olabileceği gibi bölgede sel riskini arttırması ve olumsuz sosyo-ekonomik sonuçlara sebebiyet vermesi gibi kolay öngörülemeyen sonuçları da olabilir [3, 4]. Bu nedenle; yüzey hareketleri gözlemlenen bölgede deformasyon sınırlarının tespit edilmesi, yer değiştirme miktarının ve hızının zamansal olarak izlenmesi, deformasyonun temel sebebinin belirlenebilmesi için oldukça önemlidir [5]. Yer yüzeyinde deformasyon sebebiyle oluşabilecek kısa ve uzun vadeli olumsuz etkileri en aza indirebilmek için zamansal ve mekânsal gözlem sonucu elde edilen bulgular politik karar vericiler ile hızlı bir şekilde paylaşılmalıdır.

Yeryüzünde meydana gelen hareketlerin detayı GNSS, nivelman ağı ve interferometrik sentetik açıklıklı radar (InSAR) gibi izleme yöntemleri ile belirlenebilmektedir. GNSS ve nivelman ağı gibi geleneksel yersel ölçme yöntemleri ile milimetre seviyesinde yüksek hassasiyetli sonuçlar elde etmek mümkün olsa da, sadece önceden belirlenmiş noktalarda ya da çok küçük alanlarda ölçümler yapılabilmektedir [6]. Bu yöntemler geniş bölgelerde, yüzey hareketleri ile ilgili ayrıntılı mekânsal bilgi sağlayamazlar. Ayrıca, geleneksel yöntemler çoğunlukla saha çalışması da gerektirdiği için uzun sürer ve insan emeği açısından oldukça pahalıdır [7].

InSAR yöntemi ise yüzey hareketlerini çok geniş bir alanda, yüksek zaman-mekânsal çözünürlükte ve yüksek hassasiyet ile ölçme yapan bir yöntemdir [8, 9]. Ayrıca, InSAR yönteminin maliyeti, kilometrekareye düşen ölçüm noktaları açısından, GNSS ve

nivelman ağı gibi diğer deformasyon ölçme yöntemlerinden çok daha düşüktür [10]. Gelişmiş InSAR yöntemleri, birden farklı zaman diliminde elde edilen sentetik açıklıklı radar (SAR) verilerinin analizini mümkün kılmakta ve yer yüzeyinde gerçekleşen deformasyonların ölçümü için milimetre hassasiyetinde sonuçlar sağlamaktadır [11–14]. Uydu tabanlı SAR sistemleri tüm hava koşullarında, gündüz ve gece farkı olmaksızın zaman-mekânsal çözünürlüğü yüksek veri sağlamaktadır. TanDEM-X, CosmoSkyMed, ALOS-2 ve Sentinel-1 gibi yeni nesil radar uydularının geliştirilmesi ve işlevsel hale gelmesiyle birlikte, InSAR yöntemi yüzey hareketlerinin izlenmesi konusunda neredeyse standart bir yöntem haline gelmiştir [15].

Birçok çalışmada, oldukça farklı alanlarda gerçekleşen yüzey hareketlerinin tespit edilmesi, zamansal ve mekânsal olarak izlenmesi için gelişmiş InSAR yöntemleri yaygın olarak kullanılmıştır. Madencilik faaliyetlerinin gerçekleştiği alanlarda meydana gelen yüzey deformasyonları [16–20], metro inşaatlarının sebebiyet verdiği zemin çökmeleri [21–23], köprü ve demiryolları gibi yapıların dengesi [24–26], yerleşim bölgelerinde meydana gelen yüzey hareketleri [27–30], toprak kayması olayları [31–36], obrukların tespit edilmesi [37, 38], petrol çıkarma ve üretim bölgelerinin takibi [39, 40], yer altı sularının aşırı kullanımı sebebiyle oluşan zemin çökmeleri [41–45] ve tektonik hareketler [46–50] çok zamanlı InSAR yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Özellikle Sentinel-1 SAR verilerinin bedava olması, dağıtım kolaylığı ve oldukça geniş alanları kapsamaması sebebiyle, bütün ülke genelinde meydana gelen yüzey hareketleri tespit edilmiş [51–55] ve hatta kıta seviyesinde bile yüzey deformasyon haritaları üretilmiştir [56, 57].

Yer altı su seviyesindeki değişiklikler, birçok nedenden dolayı yüzey hareketlerini tetikleyebilmektedir [42]. En etkili sebeplerden biri yer altı su seviyesindeki düşüşün, deforme olabilen topraklarda stres seviyesinde değişikliklere neden olmasıdır. Yer altı su seviyesindeki azalma, konsolide olmayan tortular üzerinde çökmeye neden olmaktadır [58]. Bu nedenle, yer altı su seviyesindeki değişimler, yüzey deformasyonunu tetikleyebilecek en önemli faktörlerden biridir. Yer altı su seviyesindeki değişimlere bağlı olarak gerçekleşen yüzey deformasyonlarını gelişmiş InSAR yöntemleri ile tespit eden ve izleyen birçok farklı çalışma bulunmaktadır. Nevada Las Vegas Vadisi'nde, uzun vadeli ve mevsimsel yer altı su seviyesindeki değişimlere bağlı olarak gerçekleşen yüzey hareketleri çok zamanlı InSAR yöntemi ile izlenmiştir [41]. Güney İspanya'da yer alan Alto Guadalentín Havzası'nda gözlemlenen şiddetli çökme olgusu, gelişmiş InSAR yöntemleri ve farklı SAR verileri ile analiz edilmiş ve çökmenin büyük olasılıkla yer altı su seviyesinde 100-200 m düzeyinde gerçekleşen azalma sonucu gerçekleştiği vurgulanmıştır [42]. Yer altı sularının aşırı kullanımı sebebiyle 1935 yılından beri çökme olgusuna maruz kalan Pekin şehri, gelişmiş InSAR yöntemi ile analiz edilmiş ve sonuçların yer altı su

seviyesindeki değişim ile ilişkisi gösterilmiştir [43]. Kaliforniya Santa Clara Vadisi'nde gerçekleştirilen yer altı su yönetimi ile ilgili çalışmaların yüzey hareketlerine nasıl yansıdığı InSAR yöntemi ile detaylı bir şekilde incelenmiştir [44]. İran'da bulunan su havzalarının birçoğu şiddetli bir şekilde çökmekte ve çökme olgusunun temel sebebinin yer altı sularının aşırı kullanımı olduğu gelişmiş InSAR yöntemlerinin de yardımıyla gösterilmiştir [45].

Son 10-20 yılda Ege Bölgesi'nin farklı yerlerinde, herhangi bir yıkıcı deprem olmaksızın yüzeyde gerçekleşen çatlaklar, açılmalar ve kırılmalar gözlenmiştir [59]. Manisa ilinde Sarıgl, İzmir'de demiş, Aydın'da Söke ve Germencik, Afyon'da obanlar ve Bolvadin, Burdur'da Yassıgme yüzey deformasyonlarının gözlemlendiği yerlerden sadece birkaçıdır [59]. Oluşan yüzey deformasyonları insanlarda büyük bir korku yaratmakla birlikte yerleşim yerlerinde altyapı ve binalara da büyük zararalar vermektedir. Yukarıda bahsedilen bölgelerde gözlemlenen yüzey deformasyonlarına sebep olabilecek iki temel mekanizma öngörülmektedir: tektonik hareketler ve yer altı su seviyesindeki değişimler. Özellikle aktif fay hatlarının olduğu bölgelerde gözlemlenen yüzey deformasyonları, bölge halkı tarafından deprem habercisi gibi algılanabilmektedir. Bu yüzden, yüzey deformasyonlarına sebep olabilecek etkenlerin tespit edilmesi ve bu doğrultuda önlemler alınması, daha fazla oluşabilecek hasarların en aza indirgenmesi açısından oldukça önemlidir.

Sarıgl'n içinde bulunduğu Gediz Grabeni daha önce GNSS ve InSAR yöntemleri kullanılarak incelenmiş ve tektonik hareketlerle birlikte yer altı suyu seviyesindeki mevsimsel değişimlerin de yüzey deformasyonlarını tetiklemiş olabileceği bildirilmiştir [60]. Bolvadin yerleşim alanında, yüzeyde oluşan kırılmalar ve çatlakların sebebini araştırmak için kazılar yapılmış ve yüzey deformasyonlarının temel sebebinin hidrolojik değişikliklerden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır [61]. Bununla birlikte, Bolvadin ve çevresinde bulunan karmaşık aktif fay ağının varlığı [62] ve gerçekleştirilen jeodezik gözlemler dikkate alındığında, tüm yüzey deformasyonunun sadece yeraltı su seviyesindeki düşüş ile açıklanamayacağı ve tektonik hareketlerin de kısmen sorumlu olduğu da ileri sürülmüştür [63]. Küçük (K.) Menderes Grabeni'nde yer alan demiş ilçesinde zeminde gözlemlenen yarıklar, açılan araştırma çukurları ile araştırılmış ve elde edilen bulgular sonucunda yarıkların oluşmasının temel sebebinin yer altı sularının aşırı kullanımı olduğu sonucuna varılmıştır [64].

## 1.2 Tezin Amacı

Ege Bölgesi'nde gerçekleşen yüzey deformasyonlarının zamansal ve mekânsal olarak detaylı bir şekilde analiz edilmesine ve oluşum mekanizmalarının belirlenmesine katkı sağlamak adına Afyon-Akşehir Grabeni ve içerisinde yer alan Bolvadin yerleşim alanı ile K.Menderes Grabeni ve içerisinde yer alan Ödemiş ve çevresi çalışma alanı olarak seçilmiştir. [61, 63, 65].

Bolvadin ve çevresinde gözlemlenen yüzey açılmaları, yarıkları ve kırıklarını incelemek adına, bölgeye 2015 Ocak ayında noktasal ölçüm sonuçları veren GNSS ağı kurulmuştur [63]. GNSS istasyonunun kurulduğu noktada, 3,5 yıllık bir zaman diliminde toplam 25 cm'lik bir yer değiştirme tespit edilmiştir. Yüzey deformasyonlarının gözlemlendiği bölgede, 9 farklı profilde ölçüm alınmasını sağlayan nivelman ölçüm ağı da kurulmuştur [65]. 2016 Ağustos ve 2017 Mayıs aylarında yapılan ölçümler sonucunda, 9 profil çizgisi üzerinde ortalama 18-24 mm arasında yer değiştirme tespit edilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda, noktasal anlamda oldukça yüksek hassasiyet ile ölçümler elde edilmiştir. Fakat, elde edilen ölçümler sadece ilgili noktalar ile sınırlı kalmış ve bölge genelinde gerçekleşen yüzey hareketleri ile ilgili detaylı bir bilgi elde edilememiştir. Bu tez çalışması ile Afyon-Akşehir Grabeni'nin tamamını içeren deformasyon analizi ilk defa gerçekleştirilmiştir.

Bolvadin'de gözlemlenen yüzey deformasyonlarının oluşum mekanizması ile ilgili iki farklı yaklaşım bulunmaktadır. Yüzey deformasyonlarının büyük ölçüde yer altı su seviyesindeki azalma sebebiyle oluştuğu genel olarak kabul görmektedir. Fakat, bölgede yer alan aktif fay hatları sebebiyle, gerçekleştirilen jeodezik ölçümler ve jeolojik analizler sonucunda tüm yüzey deformasyonunun sadece yer altı su seviyesindeki düşüş ile açıklanamayacağı ve tektonik hareketlerin de kısmen sorumlu olduğu ileri sürülmüştür [63, 65]. Bunun aksine, bölgede 2 farklı noktada gerçekleştirilen kazı çalışmaları sonucunda, [61] yüzeydeki deformasyonların fay yüzeyinde oluşan kayma veya diğer tektonik hareketlerden değil, sadece hidrolojik değişikliklerden kaynaklanan yer altı su seviyesindeki azalmaya bağlı gerçekleştiği sonucuna varmıştır. Bu tez çalışması ile Bolvadin aktif fay bölgesi çevresinde gerçekleştirilen çok zamanlı InSAR analizleri ile yüzey deformasyonlarının oluşum mekanizmasının anlaşılmasına katkı sağlanmıştır.

K.Menderes Grabeni içerisinde bulunan Ödemiş ilçesi ve güneyinde, 3 farklı bölgede oluşan yüzey yarıkları gözlemlenmiştir. Bölgede açılan araştırma çukurları ile oluşan yüzey yarıklarının oluşum mekanizmaları incelenmiştir [64]. Gerçekleştirilen kazılar sonucunda, oluşan yarıkların tektonik kökenli olabileceğine dair herhangi bir bulguya rastlanmamıştır. Yumuşak alüvyon zeminde oluşan yüzey yarıklarının büyük

ihtimalle yer altı sularının aşırı kullanımı sebebiyle olduğu sonucuna varılmıştır. Gerçekleştirilen kazı çalışmaları, oluşan yarıklar ile ilgili oldukça detaylı bilgi sağlamasına rağmen bu yaklaşım ile sadece noktasal sonuçlar elde etmek mümkündür. Daha önce, Ödemiş ilçesini de içerisine alan K.Menderes Grabeni'nin bütünü kapsayan bir deformasyon analiz çalışması gerçekleştirilmemiştir. Bu tez çalışması ile, gelişmiş çok zamanlı InSAR yöntemleri kullanılarak K.Menderes Grabeni'nin tamamını içeren bir deformasyon analiz çalışması ilk defa gerçekleştirilmiştir.

### 1.3 Hipotez

Çalışma bölgeleri olarak seçilen Afyon-Akşehir Grabeni ve Bolvadin ilçesi ile K.Menderes Grabeni ve Ödemiş ilçesinde,

1. Yüzey hareketleri ile ilgili detaylı zaman-mekânsal ölçüm gerçekleştiren InSAR yöntemi, gözlemlenen yüzey deformasyonlarının oluşum mekanizmaları hakkında aydınlatıcı bilgi sağlar.
  - Gözlemlenen yüzey deformasyonları, bölge genelini etkileyen daha büyük bir yer yüzü hareketinin sonucu mudur, yoksa sadece ilgili bölgedeki yerel yüzey hareketlerinden mi kaynaklanmıştır?
  - Aktif fayların bulunduğu bölgelerde, fayın özellikleri doğrultusunda yüzeye yansımaları muhtemel yer hareketleri gözlemlenmiştir midir?
2. Yer altı sularının aşırı kullanımı sebebiyle oluşan yüzey deformasyonları yumuşak zeminlerde gerçekleşir.
  - Yüzey deformasyonlarının gözlemlendiği bölgeler ile jeolojik birimler arasında nasıl bir bağlantı vardır?
  - Yüzey hareketleri sadece yumuşak zeminlerde mi gözlemlenmiştir yoksa sert zeminlerde de yüzey hareketleri mevcut mudur?
3. Yüzey deformasyonlarının gözlemlendiği bölgelerde, yüzey hareketleri ile yer üstü/yer altı su seviyelerinin değişimi arasında doğrusal bir ilişki vardır.
  - Yüzey hareketleri ile yer altı su seviyesinin değişimi arasındaki ilişki ne düzeydedir?
  - Yer altı su seviyesi ile ilgili verinin bulunmadığı bölgelerde, yer üstü su kaynaklarındaki su seviye değişimi yüzey hareketleri ile ilişkilendirilebilir mi?

4. Yüzey hareketi zaman serileri gerçekleşen deformasyon türü hakkında tanımlayıcı bilgi sağlar.

- Yüzey hareketleri, uzun ve kısa zaman dilimlerinde nasıl değişmiştir? Gözlemlenen örüntüler nasıldır?
- Gerçekleşen deformasyon elastik mi yoksa inelastik midir? Geri döndürülemez bir deformasyon gerçekleşmiş midir?

## 1.4 Tezin Yapısı

Bu tezin ana hatları şu şekilde oluşmaktadır:

- SAR verisi, InSAR yöntemi ve çok zamanlı InSAR yöntemleri hakkında temel bilgiler Bölüm 2’de verilmiştir.
- Zaman serisinin özellikleri ve zaman serisi bileşenlerine ayrıştırma yöntemleri Bölüm 3’te detaylandırılmıştır.
- Bölüm 4’te Afyon-Akşehir Grabeni ve içerisinde yer alan Bolvadin yerleşim yerini kapsayan InSAR deformasyon analiz sonuçları anlatılmış ve temel bulgular tartışılmıştır.
- K.Menderes Grabeni ve içerisinde yer alan Ödemiş ilçesini içeren InSAR deformasyon analiz sonuçlarının detayları Bölüm 5’te aktarılmıştır.
- Son olarak, Bölüm 6’da, çalışma alanı olarak seçilen bölgelerde elde edilen bulgular özetlenmiştir.



## 2 SAR İNTERFEROMETRİSİ

---

SAR ileriye doğru hareket eden bir platform üzerinde bulunan radar sensörüne dayalı, yana bakan görüntüleme geometrisine sahip bir uzaktan algılama sistemidir [66]. Radar sistemleri, anten üzerinden elektromanyetik sinyaller gönderir ve nesneler ile etkileşim içerisine girip geri dönen sinyalleri tekrar kaydeder. SAR görüntüsü ise hareket halinde bulunan radarın ürettiği sinyallerin yeryüzü ile etkileşimi sonrası oluşan yansımaların kaydedilip uygun sinyal işleme adımları sonrasında birleştirilmesi ile oluşturulur. Kendi enerji kaynağını barındırması sebebiyle, SAR aktif bir uzaktan algılama sistemidir. Bu nedenle, elektro-optik sistemlerin aksine hem gündüz hem gece görüntüleme yeteneğine sahiptir. Sinyal üretiminde elektromanyetik spektrumun mikrodalga bölümünde yer alan frekanslar kullanılmaktadır. Mikrodalga bölümünde yer alan sinyallerin dalga boyları, görünür bölgedeki dalga boylarına göre yaklaşık yüz bin kere daha uzundur [67]. Bu nedenle, görüntüleme esnasında bulutların varlığı elektro optik sistemlerde olduğu gibi sistemi olumsuz etkilemez. Gece ve gündüz görüntüleme yeteneği, görüntü oluşturma esnasında bulutların varlığından etkilenmemesi gibi özellikler SAR sistemlerinin önemli avantajları arasında yer almaktadır.

SAR sistemlerinin bir diğer önemli avantajı ise elektro optik sistemlerde olduğu gibi sadece sinyalin genlik bilgisine dayalı bir görüntüleme sistemi olmamasıdır. Yeryüzüne gönderilen sinyale ait frekans bilgisi bilindiği için, sensöre geri dönen sinyale ait faz bilgisini de kaydetmek mümkündür [68]. Sensörde üretilen referans sinyalin frekansı ve dolayısıyla dalgaboyu bilinmektedir. Sinyalin yeryüzünde nesnelerle etkileşimi sonrası tekrar sensöre dönmesi süresince ne kadar mesafe katettiği ve tam olarak kaç dalgaboyunu tamamlayarak geri döndüğü bilinmemektedir. Fakat, en son kaydedilen sinyalin referans sinyale göre bir periyot içerisinde ne kadar gecikme yaşadığı bilinebilmektedir. Bu gecikme, faz bilgisi olarak kaydedilmektedir. Yeryüzüne gönderilen sinyallerin sensöre dönme zamanında meydana gelen değişimler faz bilgisinde de değişime sebebiyet verecektir [67]. İnterferometrik SAR yöntemi, faz bilgisinde meydana gelen bu değişimden anlamlı bilgiler çıkarılması ile ilgili

geliştirilen bir yöntemdir.

## 2.1 SAR Verisi

Bir SAR sinyali, genlik ve faz bilgisinin bulunduğu karmaşık bir sayıdır. Piksel başına ölçülen SAR sinyali,  $u$

$$u = |u|exp(j\phi) \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada genlik,  $|u|$ , radara geri gelen sinyalin gücünü, faz,  $\phi$ , ise tam sinüs dalga çevriminden (SAR dalga boyu) arta kalan değeri temsil eder. SAR görüntüsündeki herhangi bir pikselin faz değeri en basit hali ile şu şekilde ifade edilebilir:

$$\phi = -\frac{2\pi}{\lambda}2R + \phi_{sa} - 2\pi n \quad (2.2)$$

$R$  radar ve yeryüzü arasındaki mesafe,  $\lambda$  radar sinyalinin dalga boyu,  $\phi_{sa}$  ise sinyalin yeryüzüne ulaştığı bölgedeki nesnelerin fiziksel özelliklerinin ( saçıcılıklarının) faz bilgisine yaptıkları katkı,  $n$  ise sinyalin katettiği tam dalga boyu sayısını ifade etmektedir. SAR sistemleri uzaklığa bağlı olan  $n$  değerini tam olarak ölçemez iken, faz bilgisini çok hassas şekilde ölçebilmektedir. SAR görüntüsündeki faz bilgisi,  $[0-2\pi]$  arasında tekdüze (uniform) dağılım sergilemektedir. Dolayısıyla, tek SAR görüntüsü üzerindeki faz verisinden anlamlı bilgiler çıkarmak mümkün değildir.

Faz verisinden anlamlı bilgiler elde edilmesi için en az iki SAR verisinin kullanılması gerekmektedir. Aynı bölgeyi kapsayan, benzer çekim geometrileri ile elde edilmiş iki farklı SAR görüntüsündeki faz farkı bilgi içermektedir. Faz farkı interferometrik faz,  $\Delta\phi$ , olarak tanımlanmaktadır. İnterferometrik faz, bir karmaşık SAR sinyali ile diğer karmaşık SAR sinyalinin eşleniğinin çarpılması sonucu şu şekilde elde edilir:

$$v = u_1 u_2^* = |u_1||u_2|exp(j\Delta\phi) \quad (2.3)$$

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta R \quad (2.4)$$

$v$  iki SAR görüntüsünden elde edilen interferogramı,  $u_1$  birinci karmaşık SAR verisini,  $u_2^*$  ikinci karmaşık SAR verisinin eşleniğini,  $\Delta\phi$  interferometrik faz bilgisini,  $\Delta R$  iki

SAR sinyalinin katettiği mesafe arasındaki farkı tanımlamaktadır.

## 2.2 InSAR Yöntemi

InSAR, aynı yörüngeden ve aynı yönden çekimi yapılmış iki karmaşık SAR görüntüsü kullanılarak hesaplanan faz farkından anlamlı veri çıkartılmasını sağlayan bir yöntemdir. InSAR yöntemi temel olarak iki farklı amaç için kullanılmaktadır: analiz edilen bölgenin yükseklik haritasının oluşturulması ve bölgede meydana gelen yüzey hareketlerinin tespit edilmesidir.

Yükseklik haritasının oluşturulması için aynı bölgenin iki farklı görüntü çekim geometrisi ile elde edilmiş SAR görüntüsünün olması gerekmektedir. Şekil 2.1’de aynı bölgenin iki farklı zaman diliminde elde edilen SAR görüntüleri ile ilgili interferometrik SAR çekim geometrisi gösterilmiştir. Şekil 2.1’de,  $R$  uydu platformunun yeryüzüne olan uzaklığını,  $B$  iki uydu platformu arasındaki uzaklığı (taban çizisi),  $B_{\perp}$  iki uydu platformunun bakış açıları doğrultusundaki dikey uzaklığı (dikey taban çizisi),  $\theta$  ise uydunun yeryüzüne bakış açısını göstermektedir. Şekil 2.1’deki görüntü alım geometrisi kullanılarak topoğrafik yükseklik miktarı ( $h$ ) aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [67]:

$$h = -\frac{\lambda R \sin \theta}{4\pi B_{\perp}} \partial \phi \quad (2.5)$$

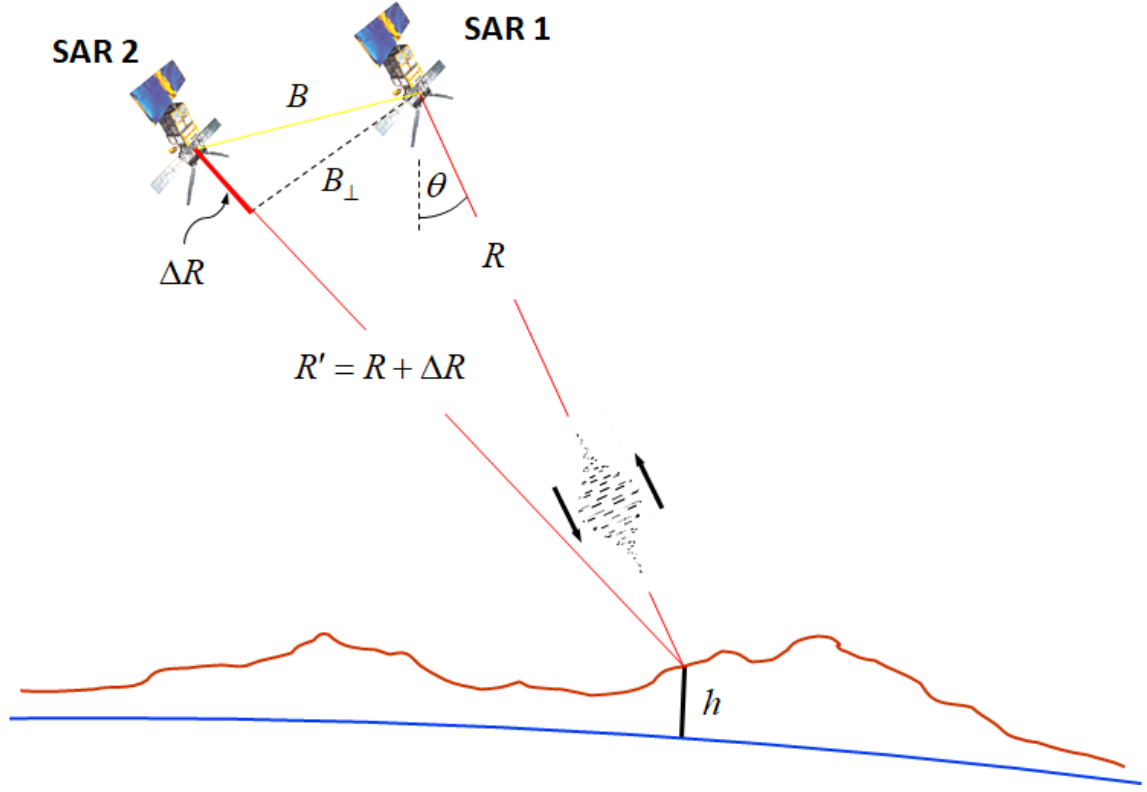
(2.5) eşitliğinde,  $\partial \phi$  diferansiyel faz farkını ifade etmektedir. Dalga boyu ( $\lambda$ ), uydu bakış açısı ( $\theta$ ) ve iki uydu platformunun birbirine olan dikey uzaklığı ( $B_{\perp}$ ) sistem parametreleridir ve görüntü oluşturma esnasında bilinmektedir. Bilinen bu değerler ile interferometrik görüntü üzerindeki faz farkı kullanılarak ilgili noktadaki yükseklik,  $h$ , hesaplanabilmektedir.

Hesaplanan yükseklik değerinin hassasiyeti ya da başka bir deyişle bir faz periyoduna ( $2\pi$ ) denk gelen yükselti farkı

$$h_{2\pi} = -\frac{\lambda R \sin \theta}{2B_{\perp}} \quad (2.6)$$

olarak hesaplanır. Burada, görüntü elde edilen iki farklı zaman diliminde uydular arasındaki dikey uzaklık arttıkça elde edilen yükseklik değerinin daha hassas olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle, daha hassas yükseklik ölçümü yapılabilmesi için iki uydu arasındaki mesafenin daha fazla olması gerekmektedir. Dikey uzaklık farkının elde edilen interferogramlar üzerinde nasıl etki oluşturduğu Şekil 2.2’te gösterilmiştir.

Uydu platformları arasındaki dikey uzaklık arttıkça, interferogramlar üzerinde oluşan bir periyotluk faz değişimi daha hassas yükseklik değişimlerine karşılık gelmektedir. Şekil 2.2a'da dikey uzaklık 63 m iken bir periyotluk faz değişimi 145 m yüksekliğe karşılık gelirken, 2.2b'de gösterildiği gibi dikey uzaklık 434 m olduğunda yükselti farkı 21 m olmaktadır.

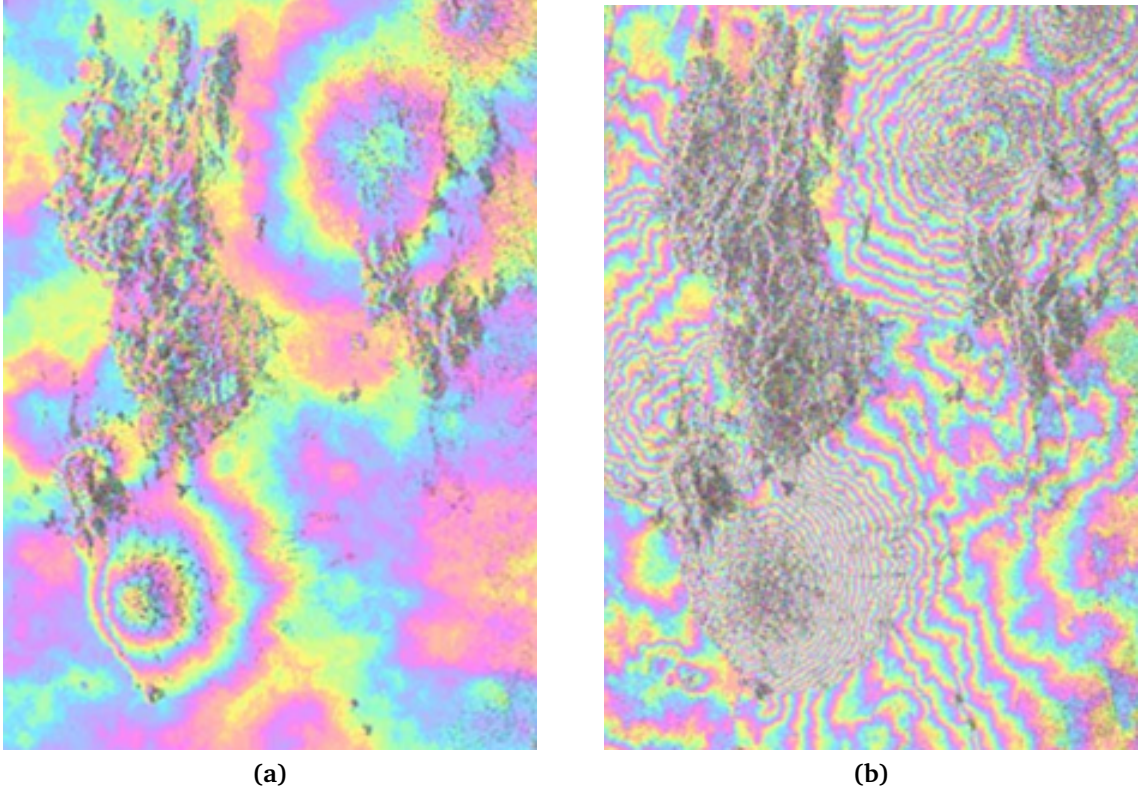


**Şekil 2.1** Yükseklik hesabı için kullanılan SAR çekim geometrisi [69]

İki uydu arasındaki dikey uzaklık arttıkça ölçülen yüksekliğin belirsizliği de artmaktadır. Başka bir ifadeyle, elde edilen yükselti değerinin hassasiyeti ile yükselti değerinin belirsizliği arasında ters bir orantı bulunmaktadır. Ayrıca, interferogramlar hesaplanırken kullanılan SAR görüntülerinin uyumlu olması için iki uydu arasındaki mesafenin de bir üst limiti bulunmaktadır. Kritik dikey uzaklık olarak ifade edilen maksimum uzaklıktan daha yüksek dikey uzaklık değerlerinde görüntüler arasındaki uyumluluk azalmakta ve bu görüntüler interferometrik faz üretimi için kullanılamamaktadır. Kritik dikey uzaklık

$$B_{\perp, \text{kritik}} = \lambda \frac{B_R}{c} R \tan(\theta - \alpha) \quad (2.7)$$

olarak tanımlanır [71]. Burada,  $B_R$  sinyalin bant genişliğini,  $\alpha$  ise sinyalin yer yüzeyi ile yapmış olduğu açıyı ifade etmektedir. Envisat ( $\lambda=5.62$  cm,  $B_R=16$  MHz) uydusu için kritik uzaklık 1100 m iken Terrasar-X ( $\lambda=3.11$  cm,  $B_R=150$  MHz) uydusu için

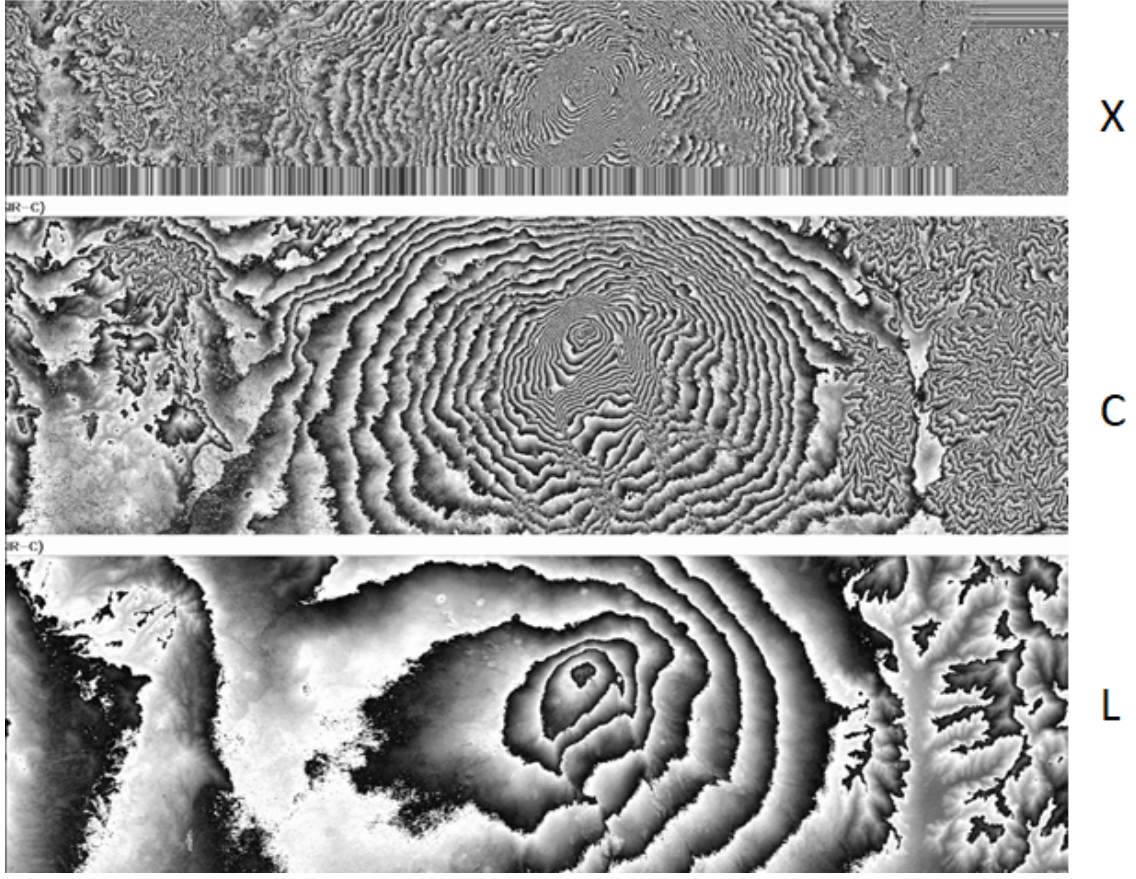


**Şekil 2.2** Dikey uzaklık farkının interferogram görüntüler üzerindeki etkisi [70] **(a)**  $B_{\perp} = 63$  m,  $h_{2\pi} = 145$  m. **(b)**  $B_{\perp} = 434$  m,  $h_{2\pi} = 21$  m

8300m Alos Palsar ( $\lambda=23.61$  cm,  $B_R=28$  MHz) uydusu için ise 15000 m dir. Yeni uydu sistemlerinde bulunan sensörlerde kullanılan yüksek bant genişliği sebebiyle yükseklik ölçümündeki duyarlılık artmıştır [72].

Dalga boyu ile yükselti ölçümü hassasiyeti arasında ise doğru orantı bulunmaktadır. Dalga boyu daha küçük olan platformlardan elde edilen interferometrik görüntüler ile daha hassas yükseklik ölçümleri yapılabilmektedir. Farklı dalga boyuna sahip sistemler ile oluşturulmuş interferogram örnekleri Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Şekil 2.3'e göre artan dalga boyu ile birlikte  $2\pi$  faz değişimine denk gelen yükselti değerlerinin arttığı gözlemlenmektedir. Faz periyotları arasındaki yükseklik farkının düşük olması daha hassas, fazla olması ise daha kaba yükseklik ölçümleri yapıldığı anlamına gelmektedir. Daha hassas ölçümler sonucunda elde edilen sayısal yükseklik modelindeki hata oranı da daha az olacaktır.

Sayısal yükseklik modelinin oluşturulması dışında, InSAR yönteminin bir diğer önemli kullanım alanı ise yüzey hareketlerinin tespit edilmesi ve izlenmesidir. Yüzey hareketlerinin tespit edilebilmesi için yakın uzaklığa sahip yörüngelerden elde edilmiş SAR verilerinin kullanılması gerekmektedir (Şekil2.4). Yüzey hareketlerinin en doğru şekilde tespit edilebilmesi için uydu platformları arasındaki uzaklığın sıfır

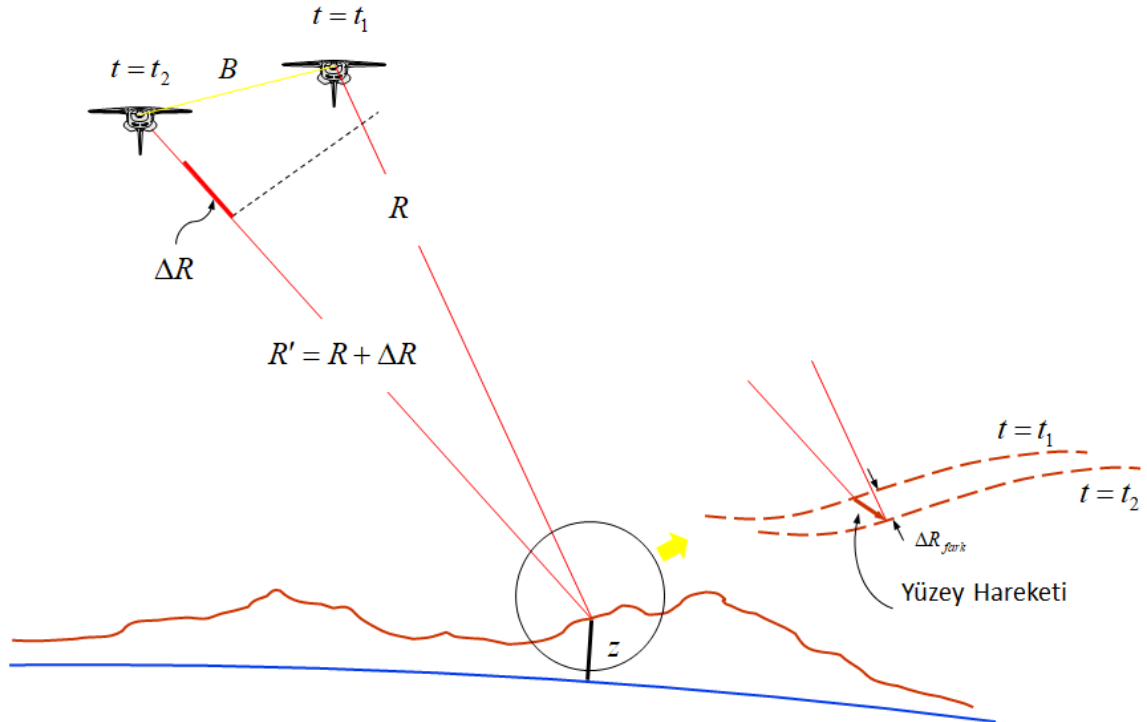


**Şekil 2.3** Dalgaboyu farkının interferogram görüntüler üzerindeki etkisi [69]  
(**Üstte**) X-band: 2.4-3.75 cm dalga boyu. (**Ortada**) C-band: 3.75-7.5 cm dalga boyu.  
(**Altta**) L-band: 15-30 cm dalga boyu

olması ideal durumdur. Fakat, sıfır uzaklığın sağlanması pratikte gerçekleştirilebilir bir durum değildir ve genelde uydu yörüngeleri arasında bir mesafe bulunmaktadır. Bu mesafe sebebiyle, bölgedeki yükseltiden kaynaklanan bir faz farkı da interferometrik faza etki etmektedir. Sonuç olarak, yüzey hareketlerinin tespit edilebilmesi için yükseltinin interferometrik faza olan etkisi toplam faz değerinden çıkarılmalıdır. Yüzey hareketinin interferometrik faza olan etkisi

$$\partial \phi_{defo} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_{fark} \quad (2.8)$$

olarak belirlenir [67].  $\Delta R_{fark}$  uydunun bakış açısı doğrultusunda yer yüzünde meydana gelen hareketi (deformasyonu),  $\partial \phi_{defo}$  ise yüzey hareketinin faza olan etkisini ifade etmektedir. () eşitliği detaylı bir şekilde incelendiğinde interferometrik fazdaki bir periyotluk faz değişiminin, sinyalin dalga boyunun yarısı kadar olduğu anlaşılmaktadır. Dalga boyu 5.6 cm olan uydu platformlarından elde edilen görüntüler ile oluşturulan interferogramlarda, bir periyotluk faz farkı 2.8 cm lik yüzey hareketine karşılık gelmektedir.



**Şekil 2.4** Yüzey hareketinin tespiti için kullanılan SAR çekim geometrisi [69]

Sayısal yükseklik modelinin oluşturulması ile yüzey hareketinin (deformasyonun) tespit edilmesinde iki temel farklılık bulunmaktadır. Yükseklik haritasının daha hassas oluşturulması için uydu platformları arasındaki uzaklığın daha fazla olması gerekirken, yüzey hareketinin daha hassas tespit edilebilmesi için en ideal durum ise



uydu platformlarının aynı yörüngeden geçmiş olmasıdır. Diğer önemli farklılık ise InSAR yöntemi ile yüzey hareketlerinin yükseklik ölçümüne göre 1000 kat daha hassas bir şekilde ölçülebilmesidir [68]. InSAR yöntemi ile mm seviyesinde gerçekleşen yüzey hareketlerinin tespit edilmesi mümkündür.

Sadece iki karmaşık SAR görüntüsü kullanılarak oluşturulan interferogramlar ve elde edilen faz farkından anlamlı bilgi çıkarılmasını sağlayan yöntem geleneksel InSAR olarak bilinmektedir. Görüntüler arasındaki çekim zamanı arttıkça ilintisizliğin artması ve atmosfer farklılıklarının faz değişimini olumsuz etkilemesi gibi durumlar geleneksel InSAR yönteminin kısıtlarını oluşturmaktadır [11–14]. Bu kısıtlamalar, geleneksel InSAR yönteminin daha yaygın olarak kullanılmasını engellemektedir. Özellikle yavaş gelişen yüzey hareketlerinin tespit edilmesi neredeyse imkansız hale gelmektedir. Bu kısıtların giderilmesi için çok zamanlı SAR görüntülerinin analizi ile daha gülbüz ölçümler yapılabilmesine yönelik yeni yöntemler geliştirilmiştir. Çok zamanlı InSAR (multi-temporal InSAR) olarak bilinen bu yöntemler ile zaman serisi analizleri mümkün hale gelmiş ve InSAR yöntemi çok farklı uygulama alanlarında kullanılmaya başlanmıştır. Bundan sonraki bölümde, çok zamanlı InSAR yöntemlerinin genel bir değerlendirmesi yapılacaktır.

### 2.3 Çok Zamanlı InSAR Yöntemleri

İnterferometrik fazın uzaklığa bağılı olarak nasıl değiştiğı, basit olarak (2.4) eşitliğinde gösterilmiştir. Fakat, faz değişimini etkileyen birden çok etken bulunmaktadır. Yüzey hareketi (deformasyon) olan bir bölgede, interferometrik faz,  $\Delta\phi$ , genel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\Delta\phi = 2\pi n + \phi_{flat} + \phi_{topo} + \phi_{defo} + \phi_{atmo} + \phi_{sa} + \phi_{orb} + \phi_{grlt} \quad (2.9)$$

Burada,  $n$  SAR sinyalinin katettiğı toplam dalga boyu sayısını ifade etmektedir.  $\phi_{flat}$  dünyanın elipsoit şeklinin,  $\phi_{topo}$  yer yüzeyindeki yükselti farkının,  $\phi_{defo}$  bölgede oluşan yüzey hareketinin,  $\phi_{atmo}$  atmosfer sebebiyle sinyalde meydana gelen gecikmenin,  $\phi_{sa}$  sinyalin yeryüzüne ulaştığı bölgenin fiziksel özelliğinin,  $\phi_{orb}$  uydunun yörüngesi ile ilgili oluşan hatanın ve son olarak  $\phi_{grlt}$  ise elektronik cihazdaki gürültü gibi tüm diğer gürültülerin faz farkına yaptığı katkıyı göstermektedir. Bölgede meydana gelen deformasyon miktarının faz değişimine olan etkisinin,  $\phi_{defo}$ , ölçülebilmesi için interferometrik faza etki eden diğer tüm faz bileşenlerinin giderilmesi gerekmektedir. Dünyanın referans elipsoit şekli ve datum bilgisi kullanılarak  $\phi_{flat}$ , bölgenin sayısal yükseklik modeli kullanılarak ise  $\phi_{topo}$  bileşeni



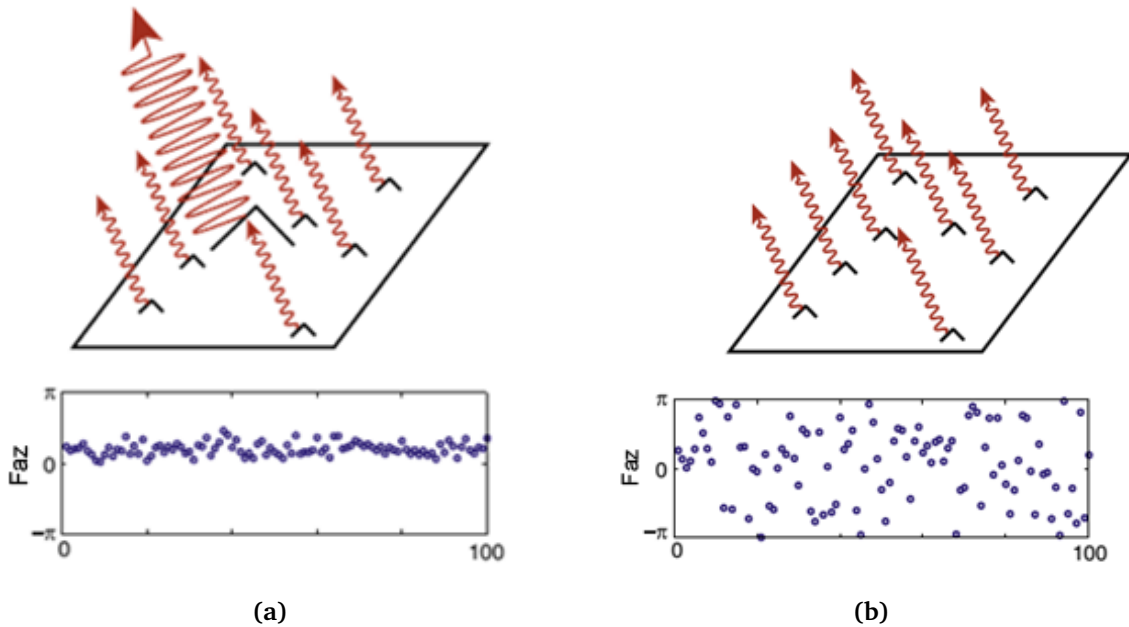
hesaplanabilmektedir. Yörünge bilgisinde oluşacak olan hata,  $\phi_{orb}$ , uydular arasındaki dikey uzaklık bilgisini doğrudan etkileyeceği için  $\phi_{topo}$  bileşeni de doğal olarak etkilenecektir.  $\phi_{grlt}$  bileşeni ise uyumluluk (coherence) ile ilgili olup uydular arasındaki dikey uzaklık sebebiyle oluşan geometrik ilintisizlik, termal sebeplerle oluşan ilintisizlik, doppler etkisi ile oluşan ilintisizlik gibi alt kategoriler altında daha detaylı şekilde incelenmektedir [12].

Atmosferdeki farklılıklar sebebiyle interferometrik fazda oluşan değişim,  $\phi_{atmo}$ , hesaplanması en zor bileşenlerden biridir. Deprem ve volkan patlaması gibi afetler sonrasında, bölgede meydana gelen yüzey hareketinin interferometrik faza olan etkisi atmosfer sebebiyle yaşanan gecikmeye göre çok daha fazladır. Yüzey hareketi sebebiyle oluşan faz farkı, atmosfer sebebiyle oluşan faz farkından görece fazla ise atmosferik etki ihmal edilebilir. Bu gibi durumlarda, atmosferik etki ihmal edilerek geleneksel InSAR yöntemi ile yüzey hareketinin tespit edilmesi mümkündür. Fakat, deprem öncesi tektonik hareketler, volkan patlaması öncesi ve sonrasında meydana gelen yüzey hareketleri, yeraltı sularının aşırı kullanılması ile zeminde meydana gelen çökmeler, maden ocaklarının çevresinde meydana gelen deformasyonlar, şehirlerde metro kazıları sonrası meydana gelen oturmalar gibi yavaş seyir gösteren yüzey hareketlerinde atmosferik etkinin yok sayılması mümkün değildir. Bu gibi durumlarda, atmosfer sebebiyle oluşan faz farkı InSAR analiz sonuçlarını olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, yavaş gelişen yüzey hareketlerinin analizinde atmosferik etki muhakkak giderilmelidir. Atmosfer etkisinin giderilmesi ve yavaş gelişen deformasyonun tespit edilebilmesi için çok zamanlı InSAR yöntemleri geliştirilmiştir [11–14]. Atmosfer etkisinin giderilmesi için atmosferden kaynaklanan gecikmenin farklı tarihlerde elde edilen görüntülerde ilintisiz, aynı görüntü üzerindeki farklı uzamsal bölgelerde ise ilişkili olduğu öngörülmektedir [67]. Bu temel prensip doğrultusunda, çok zamanlı SAR verileri analiz edilerek atmosfer etkisi tespit edilmekte ve interferometrik fazdan çıkarılmaktadır.

İnterferometrik faza etki eden diğer önemli bileşen,  $\phi_{sa}$ , ise yüzeydeki saçıcı karakteristiğinin değişmesi sebebiyle oluşan faz farkıdır. Sinyalin yeryüzüne ulaştığı bölgede meydana gelen değişim, sinyalin yeryüzündeki etkileşimini de tamamen değiştirmektedir. Saıcı karakteristiğinin değişmesi, iki farklı SAR görüntüsündeki uyumluluk değerinin düşmesine sebep olmaktadır. Bu gibi durumlarda elde edilen interferometrik faz bilgisin güvenilirlik değeri de düşmektedir. Özellikle yavaş gelişen deformasyonların analizi için kullanılan çok zamanlı SAR verilerinde bu problem daha sık gözlemlenmektedir. Yeryüzündeki saçıcı karakteristiğine göre oluşan faz değişimini en aza indirmek için farklı yaklaşımlar izlenmektedir.

Yeryüzünde iki temel saçıcı karakteristiği bulunmaktadır (Şekil 2.5). İnsan yapıları,

kayalık ve taşlık alanlar gibi uzun süre boyunca çok fazla değişmeden sabit kalabilen nesneler, SAR sinyalinin etkileşimi açısından bölgenin baskın karakteristiğini oluşturmaktadır. Sürekli saçıcı (persistent scatterer, PS) olarak ifade edilen bu noktalar, farklı zamanlarda elde edilen SAR görüntülerinde oldukça benzerdir. Başka bir ifade ile sürekli saçıcı karakteristiği gösteren bölgelerde uyumluluk değeri yüksek çıkmaktadır. Diğer saçıcı karakteristiğinde ise bölgede oluşan farklılıklar sebebiyle sinyalin etkileşimi zaman içerisinde sürekli değişmektedir. Dağıtık saçıcı (distributed scatterer, DS) olarak ifade edilen bu bölgelere en güzel örnek olarak tarım alanları ve bitkilerin bulunduğu doğal bölgeler gösterilebilir. Bu bölgelerden farklı zamanlarda elde edilen SAR verilerinde, faz bilgisi sürekli değişmekte ve uyumluluk değeri çok düşük çıkmaktadır.

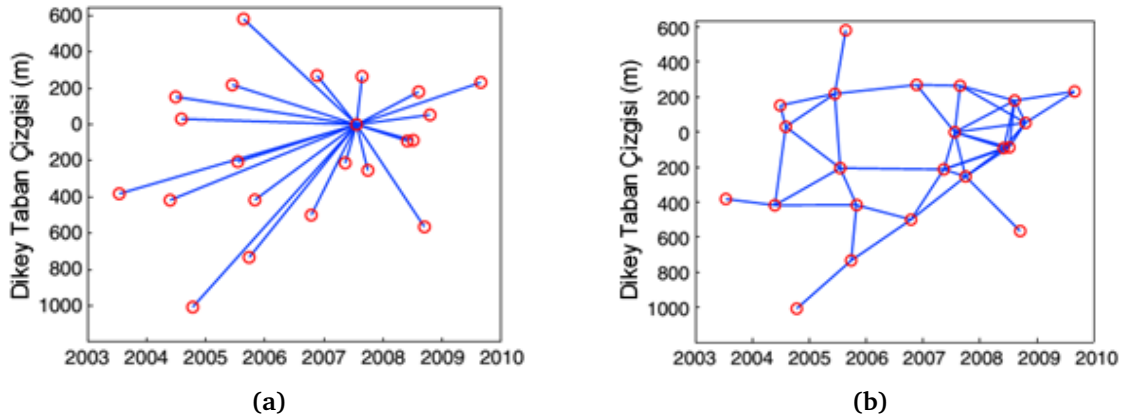


**Şekil 2.5** Yeryüzünde farklı saçıcı özellik gösteren bölgelerde gözlemlenen tepki [11]. **(a)** Sürekli saçıcı. **(b)** Dağıtık saçıcı

Yavaş gelişen deformasyonların tespiti için kullanılan çok zamanlı InSAR yöntemlerinde, saçıcı karakteristiği sebebiyle oluşan faz farkını en aza indirmek için sadece uyumluluk değeri yüksek olan pikseller incelenmektedir. Ölçüm noktaları olarak ifade edilen bu noktalarda, uyumluluk değeri yüksek olduğu için daha güvenilir sonuçlar elde edilmektedir. Bu noktaların belirlenmesinde, saçıcı karakteristiğine göre iki temel yaklaşım bulunmaktadır. Birinci temel yaklaşımda, sürekli saçıcıların göstermiş olduğu özellikten faydalanılması hedeflenmektedir. Sürekli saçıcıların bulunduğu bölgelerde, uzun zaman aralıklarında bile oldukça benzer sinyallerin kaydedilmesi mümkündür. Bu nedenle, interferogram oluşturulurken tek bir referans (master) SAR verisinin kullanılması yeterlidir. Diğer tüm SAR verileri, Şekil 2.6a'da gösterildiği gibi referans SAR verisi ile eşleştirilerek interferogramlar oluşturulur. Bütün interferogramlar içerisinde, uyumlu piksel değerleri genlik değerine bakılarak

bulunur. Görüntünün tamamı yerine, uyumluluk değeri yüksek olan sürekli saçıcı noktalar analiz işleminde kullanılır. Bu yöntem ile sürekli saçıcıların oldukça yoğun bulunduğu şehirlerde ve kayalık gibi doğal alanlarda meydana gelen deformasyonlar ölçülebilmektedir. Fakat, dağıtık saçıcıların yoğun olarak bulunduğu tarım alanları ve orman bölgeleri gibi doğal alanlarda meydana gelen deformasyonlar tespit edilememektedir.

Dağıtık saçıcıların yoğun olarak bulunduğu bölgelerde farklı bir yaklaşım sergilenmektedir. Çok zamanlı InSAR yöntemlerindeki temel yaklaşım, uyumluluk değeri yüksek olan noktaların belirlenip analiz edilmesidir. Dağıtık saçıcıların bulunduğu bölgelerde, uzun zaman aralıklarında uyumluluk değeri düşmektedir. Bu nedenle, sadece zamansal olarak birbirine yakın SAR verileri arasında interferogramlar oluşturulur. Yakın zaman dilimlerinde, bölgede daha az değişim olduğu farz edilmektedir. Şekil 2.6b’de gösterildiği gibi belirli bir zaman ve dikey uzaklık eşliğinin altındaki tüm SAR verileri birbirleri ile eşleştirilerek interferogramlar oluşturulur. İnterferogram çiftleri birbirlerine daha yakın olduğu için uyumluluk değeri yüksek daha fazla noktanın elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bütün interferogramlar analiz edilerek uyumluluk değeri yüksek olan noktalar ölçüm noktaları olarak kullanılır.



**Şekil 2.6** Çok zamanlı InSAR yöntemlerinde interferogram oluşturmak için kullanılan görüntü eşleştirmeleri [11]. **(a)** Sürekli saçıcı yöntemler. **(b)** Dağıtık saçıcı yöntemler

Literatürde, çok zamanlı InSAR yöntemi ilk olarak [73] tarafından önerilmiştir. Uyumluluk değeri yüksek ölçüm noktalarının tespiti için sürekli saçıcı karakteristiğini kullanılmış, genlik değeri yüksek ve benzer olan noktalar seçilmiştir. Daha fazla ölçüm noktası elde etmek için genlik değeri ile birlikte faz bilgisi de [74] tarafından kullanılmıştır. Birden çok referans(master) SAR verisinin kullanılması ile interferogramlardaki uyumluluğun artırılması hedeflenmiştir [75]. Bu yöntemler genel olarak Sürekli Saçıcı İnterferometrisi (Persistent Scatterer Interferometry,

PSI) olarak isimlendirilmektedir. Sürekli saçıcı yöntemler, doğal alanlardaki yüzey hareketinin tespitinde çok başarılı değildir. Bu bölgelerde bulunan dağıtık saçıcıların da analizlerde kullanılabilmesi için Küçük Uzaklık Alt Kümesi (Small Baseline Subset, SBAS) başlığı altında toplanabilecek diğer yöntemler önerilmiştir [76]. Son yıllarda, sürekli ve dağıtık saçıcıların aynı anda analiz edilebilmesine olanak sağlayan yeni yöntemler de önerilmiştir [77]. Çok zamanlı InSAR yöntemleri ile ilgili daha detaylı incelemeler literatürde bulunmaktadır [11–14].

# 3

## ZAMAN SERİLERİ

---

Ekonomi, ticaret, mühendislik, tıp ve çevre bilimlerinde elde edilen birçok veri zaman serisi şeklinde toplanmaktadır. Zaman serisi, saatlık sıcaklık, günlük hisse senedi fiyatları, haftalık trafik hacmi, aylık su tüketimi ve yıllık büyüme oranları gibi düzenli zaman aralıklarında alınan gözlemler dizisidir [78]. Bu bağlamda zaman serileri, kronolojik sıraya göre düzenlenmiş bir dizi nicel gözlemdir [79]. Zaman serileri ardışık ve genellikle saat, gün, ay ve yıl gibi eşit zaman aralıklarında alınan örneklemeler ile oluşturulmaktadır. Zaman serilerinde ardışık şekilde alınan örneklemelerin birbirine genellikle bağımlı olduğu kabul edilir ve örneklemeler arasındaki bu bağımlılığın ne düzeyde olduğu araştırılmaktadır [80]. Bu bağımlılık zaman serilerinin temel özelliklerinden biridir ve ardışık olarak alınan örneklerin bağımsız bir şekilde ortaya çıktığı düşünülemez [81].

Zaman serisi analizleri oldukça farklı uygulama alanlarında, farklı problemleri çözmek için kullanılsa da genel olarak zaman serisindeki karakteristik özelliklerin, örüntülerin (desen, patern), anlaşılması ve gelecek değerlerin tahmin edilmesinde kullanılır [80–83]. Bu tez çalışmasında kullanılacak olan zaman serisi analizlerinde, deformasyon zaman serilerindeki değişimin daha iyi anlaşılması ve diğer yardımcı zaman serileri ile daha kolay karşılaştırılabilmesi için zaman serileri kendilerini oluşturulan bileşenlerine ayrıştırılacaktır. Zaman serisi bileşenlerine ayrıştırma ya da mevsimsel düzeltme isimleri ile adlandırılan bu yöntemlerin detaylarına geçmeden önce, zaman serilerini oluşturan muhtemel bileşenlerin nasıl tanımlandığına daha detaylı bakmak faydalı olacaktır.

### 3.1 Zaman Serisi Bileşenleri

Zaman serilerini oluşturan bileşenleri daha iyi anlayabilmek adına belirli tanımların yapılması gerekmektedir. [83] tarafından yapıldığı şekilde,

- **Genel Eğilim (Trend):** Zaman serisi verisinde uzun dönemi etkileyen genel

bir düşme(azalma) ya da yükselme(artma) eğilimi var ise zaman serisinde genel bir eğilimin varlığından söz edilebilir. Genel eğilim doğrusal olmak zorunda değildir. Zaman serilerinde üstel ya da logaritmik genel eğilim görmek mümkündür.

- **Mevsimsel Değişim (Seasonal):** Zaman serisi yılın belli bölümlerinde mevsimsel değişimlerin etkisinde kalıyor ve buna göre değişim gösteriyor ise zaman serisinde mevsimsel değişimlerin etkili olduğu söylenebilir. Mevsimsel ifadesi genel bir ifadedir. Mevsim periyodu haftalık, aylık, çeyrek yıl gibi zaman dilimlerini kapsayabilir. Mevsimsel değişim periyodunun sabit olduğu ve bilindiği kabul edilir.
- **Döngüsel (Cyclic):** Zaman serisinde sabit bir periyot döngüsünde değilse, önceden öngörülmeleyen zaman dilimlerinde ani değişimler görülüyor ise bu etkiler döngüsel etki olarak ifade edilir. Mevsimsel değişimlerde olduğu gibi sabit bir periyodu yoktur. Belirli bir dönem etkisini gösterir ve kaybolur. Tanımda kullanılan isim çelişkili gibi görünse de etki periyodunun sabit olup olmamasına göre mevsimsel bileşenlerden kolaylıkla ayrılabilir.

Yukarıdaki tanımlar doğrultusunda, bir zaman serisini oluşturan bileşenler, en genel hali ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$x = x_{genel} + x_{mev} + x_{dongu} + x_{fark} \quad (3.1)$$

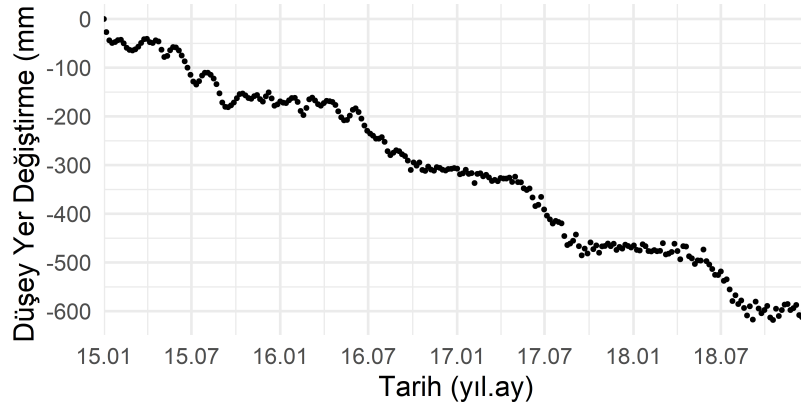
$x_{genel}$  genel eğilimi,  $x_{mev}$  mevsimsel değişimi,  $x_{dongu}$  döngüsel etkiyi ve  $x_{fark}$  ise geriye kalan bileşenleri gösterir. Burada zaman serisi, alt bileşenlerinin toplamı olarak ifade edilmiştir. Mevsimsel değişimlerin büyüklüğü veya genel eğilim etrafındaki varyasyon, zamana göre değişmiyorsa, zaman serisi alt bileşenlerinin toplamı olarak ifade edilebilir. Eğer mevsimsel değişimler ve genel eğilimde görülen varyasyonlar zamana göre artma ya da azalma eğiliminde ise alt bileşenler aşağıdaki gibi çarpımsal şekilde zaman serisini oluşturmaktadır.

$$x = x_{genel} \cdot x_{mev} \cdot x_{dongu} \cdot x_{fark} \quad (3.2)$$

Zaman serilerinde yukarıda tanımlanan bileşenlerin hepsi bulunmayabilir. Döngü bileşeni,  $x_{dongu}$ , genellikle genel eğilim bileşeni,  $x_{genel}$ , ile birlikte değerlendirilmektedir. Zaman serisi incelendiğinde kolaylıkla görülemeyen örgüler, zaman serisi alt bileşenleri ile ifade edildiğinde daha anlaşılır duruma gelebilmektedir.

Zaman serisi bileşenlerine ayrıştırma, mevsimsel düzeltme gibi isimler adı altında oldukça fazla yöntem bulunmaktadır. Zaman serisinin içeriğine, karakteristiğine ve etkilendiği durumlara bağlı olarak, işlem süresi de dikkate alınarak en uygun yöntem seçilerek kullanılır.

Bundan sonraki bölümde, zaman serisi bileşenlerine ayrıştırma yöntemleri içerisinde en yaygın olarak kullanılanlar hakkında genel bir bilgi verilecektir. Bölüm 5'te detayları anlatılan K.Menderes Grabeni deformasyon analiz çalışmasına ait Şekil 3.1'de gösterilen deformasyon zaman serisi, ilgili yöntemler kullanılarak bileşenlerine ayrıştırılacak ve sonuçlar gösterilecektir. Deformasyon zaman serisindeki örnekleme aralığı 6 gündür. Fakat, kullanılacak yöntemler içerisinde bazıları sadece aylık veriyi işlemeye göre geliştirilmiştir. Bu nedenle, yöntemler arası daha kolay karşılaştırma yapılabilmesi adına, deformasyon zaman serisi aylık ortalama değerlere göre güncellenerek yöntemlere girdi olarak verilecektir. Örnek deformasyon zaman serisinde, mevsimsel değişimlerin büyüklüğü ve genel eğilim etrafındaki varyasyonlar zamana bağlı olarak çok fazla değişmediği için zaman serisine ait bileşenlerde toplamsal ayrıştırma yöntemi kullanılacaktır. Ayrıca döngü bileşeni,  $x_{dongu}$ , ayrı bir bileşen olarak hesaplanmayacak ve bir çok diğer uygulamada olduğu gibi genel eğilim bileşeni,  $x_{genel}$ , ile birlikte değerlendirilecektir.



**Şekil 3.1** K.Menderes bölgesine ait örnek bir deformasyon zaman serisi

### 3.2 Zaman Serisi Bileşenlerine Ayrıştırma Yöntemleri

Bu bölümde, öncelikle klasik bileşenlerine ayrıştırma yöntemi uygulama şekli ve dezavantajları ile birlikte anlatılacaktır. Daha sonra yaygın olarak kullanılan diğer bileşenlerine ayrıştırma yöntemlerine kısaca değinilecektir. Tüm yöntemlere ait sonuçlar, örnek bir deformasyon zaman serisi üzerinde gösterilecektir.

### 3.2.1 Geleneksel Bileşenlerine Ayırıştırma

Zaman serisi geleneksel bileşenlerine ayırıştırma yöntemi basit bir yaklaşım olmakla birlikte uzun yıllardır kullanılmakta ve geliştirilen diğer yöntemlerin birçoğu için de temel oluşturmaktadır [83]. Geleneksel bileşenlerine ayırıştırma yöntemi, temel olarak şu adımları içermektedir:

1. Hareketli ortalama filtre kullanılarak zaman serisinde genel eğilim tespit edilir ( $\hat{x}_{genel}$ ). Kullanılacak olan filtrenin boyutu, zaman serisinde etkili olan mevsim uzunluğu ile yakından ilgilidir. Filtre uzunluğu mevsim süresi boyunca elde edilen toplam veri sayısı (n) kadar olmalıdır (n çift ise filtre boyutu n+1 seçilir). Örneğin zaman serisinde aylık veri bulunuyorsa ve mevsimsel etki yıllık olarak belirlenmişse filtre boyutu 13 olarak seçilir.
2. Genel eğilimden arındırılmış zaman serisi hesaplanır:  $x - \hat{x}_{genel}$ .
3. Mevsimsel bileşeni ( $\hat{x}_{mev}$ ) elde etmek için genel eğilimden arındırılmış zaman serisinin ortalaması alınır. Mevsimsel dönem yıllık olarak belirlenmişse, her yıl aynı dönemde toplanan veriler ortalamaya dahil edilir. Aylık veri bulunuyor ise her ayın kendi içinde ortalaması alınır ve mevsimsel bileşende o döneme ait veri hesaplanmış olur. Bütün yılların verisi ortalamaya dahil edildiğinde yıllara ait mevsimsel değişim her zaman aynı bulunmuş olur. Mevsimsel ortalamaya dahil edilecek veri sayısı, toplam mevsime göre daha az seçilirse her yıl etki eden mevsimsel bileşen de farklı çıkacaktır.
4. Genel eğilim ve mevsimsel değişim bileşenleri zaman serisinden çıkarılarak geriye kalan fark bileşeni bulunur:  $\hat{x}_{fark} = x - \hat{x}_{genel} - \hat{x}_{mev}$

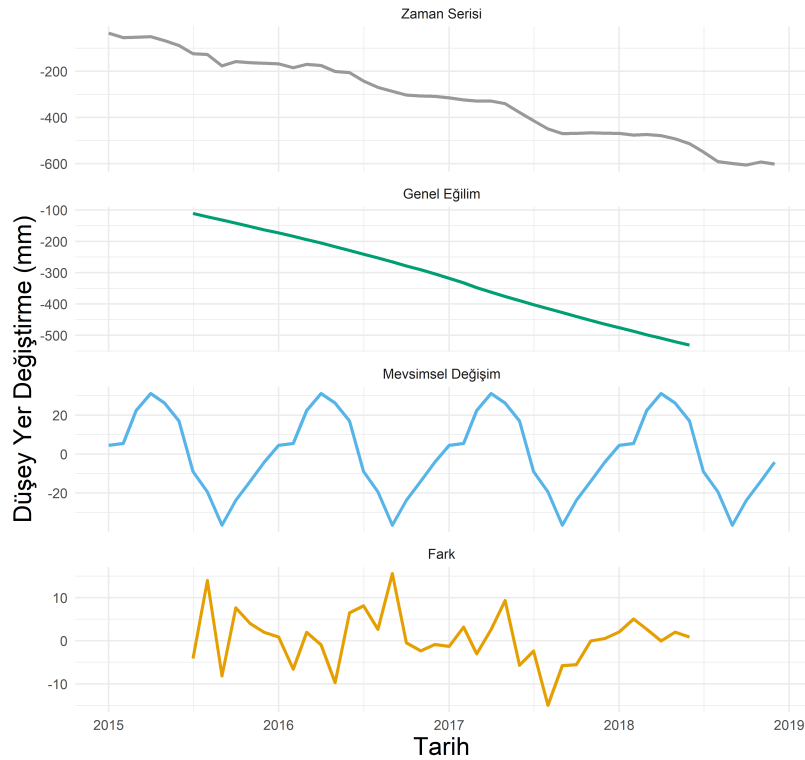
En genel hali ile yukarıda detayları verilen yaklaşımda, yinelemeli bir şekilde genel eğilim ve mevsimsel değişim bileşeni tekrar tekrar iyileştirme kaydedilerek hesaplanabilir. Örneğin hesaplanan mevsimsel değişim bileşeni, zaman serisinden tekrar çıkarılıp elde edilen seriye farklı filtreler uygulanarak genel eğilim tekrar hesaplanabilir. Bu şekilde fark bileşenine kalan verinin etkisi en aza indirgenmiş olur. Geleneksel bileşenlerine ayırıştırma yöntemini temel olarak kullanan X-11 gibi mevsimsel düzeltme yöntemlerinde, bu yinelemeli yaklaşım kullanılmaktadır [84].

Hesaplama karmaşıklığı ve hesaplama süresi az olduğu için ilk tercih edilen bileşenlerine ayırıştırma yöntemlerinden biri olmasına rağmen, bu yaklaşımın bazı dezavantajları bulunmaktadır. Öncelikle, genel eğilim hesaplanırken gerçekleştirilen ortalama işlemi anlık verinin öncesinden ve sonrasında eşit sayıda örneklemeye ihtiyaç duymaktadır. Filtreleme işleminin bu temel gereksinimi yüzünden, genel



eğilim bileşenine ait ilk ve son döneme ait veriler hesaplanamamaktadır. Bu eksikliği gidermek için zaman serisinin başlangıcına ve sonuna yapay veri eklenerek, tüm veride genel eğilimi hesaplamak mümkün hale gelir. Ortalama almanın bir diğer dezavantajı ise kısa süreli gerçekleşen ani değişimlerin ortadan kaybolmasıdır. Uzun dönemi kapsayan yumuşatma eğilimi sebebiyle, kısa süreli gerçekleşen bu tür ani değişimleri gözlemlemek imkansız hale gelmektedir.

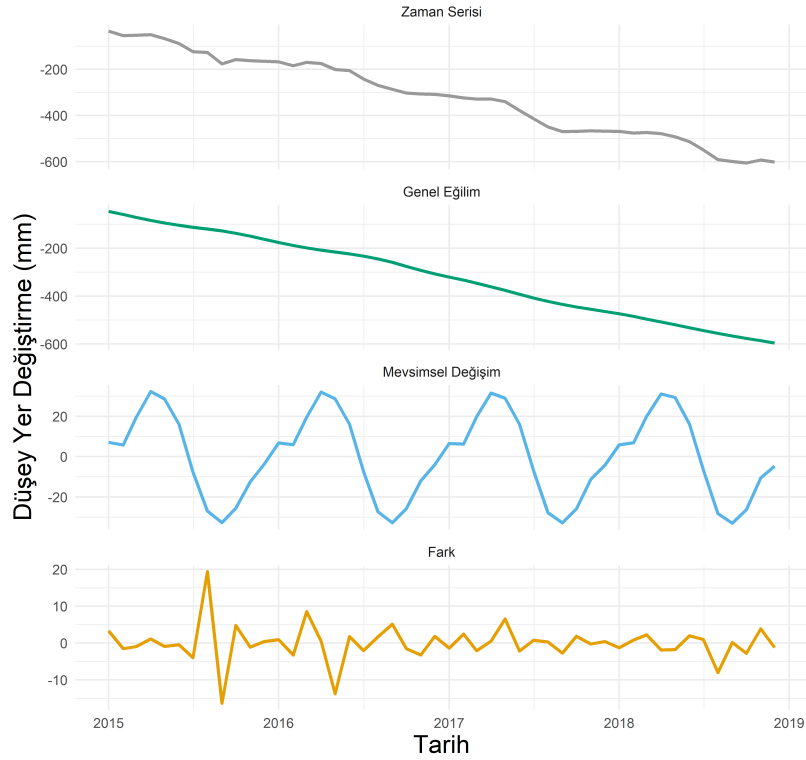
Şekil 3.1’de gösterilen deformasyon zaman serisinin klasik bileşenlerine ayrıştırma yöntemi uygulandıktan sonra elde edilen bileşenleri Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Deformasyon zaman serisi görsel olarak incelendiğinde doğrusal bir düşüş eğilimi kolaylıkla algılanabilir. Fakat mevsimsel bileşenin etkisi, büyüklüğü ve etki zamanı gibi noktalar bileşenlerine ayrıştırma işlemi sonrasında çok daha kolay bir şekilde anlaşılmaktadır. Mevsimsel etkinin her yıl tekrar ettiği,  $\pm 30$  değerleri arasında etki gösterdiği, Mart-Nisan aylarında en yüksek Ağustos-Eylül aylarında ise en düşük seviyesinde olduğu mevsimsel değişim bileşeni üzerinde rahatlıkla görülebilmektedir. Genel eğilim bileşeninin ilk 6 ve son 6 ayına ait sonuç hesaplanamadığı görülmektedir. Mevsimsel filtrenin boyutu uzun seçildiği için tüm yıllara ait mevsimsel bileşenler birbirine eşit çıkmıştır. Bu durum her zaman böyle olmayabilir. O nedenle verinin uzunluğuna göre, mevsimsel yumuşatma filtresinin boyutu görece daha kısa seçilebilir.



**Şekil 3.2** Klasik bileşenlerine ayrıştırma yöntemi

### 3.2.2 X11 Bileşenlerine Ayırıştırma

ABD Sayım Bürosu ve Kanada İstatistik kurumları tarafından, aylık ve çeyrek yıllık veri barındıran zaman serilerinin bileşenlerine ayrıştırılması için geliştirilmiştir [85]. Geleneksel bileşenlerine ayrıştırma yöntemi temel alınarak geliştirilse de, geleneksel yöntemin içerdiği dezavantajlar ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. Öncelikle, genel eğilim bileşenin başlangıcı ve sonu için veri üretilmektedir. Bu yöntemde, mevsimsel değişim bileşenin her mevsimde aynı olmasına gerek yoktur. Mevsimsel değişim bileşeni zaman içerisinde farklılık gösterebilir. Bu yaklaşım, zaman serisi içerisinde bulunan aykırı verilerin tespiti ve elenmesinde daha gülbüz bir yöntemdir. Şekil 3.1’de gösterilen deformasyon zaman serisinin X11 bileşenlerine ayrıştırma yöntemi ile elde edilmiş olan alt bileşenleri Şekil 3.3’de gösterilmiştir.

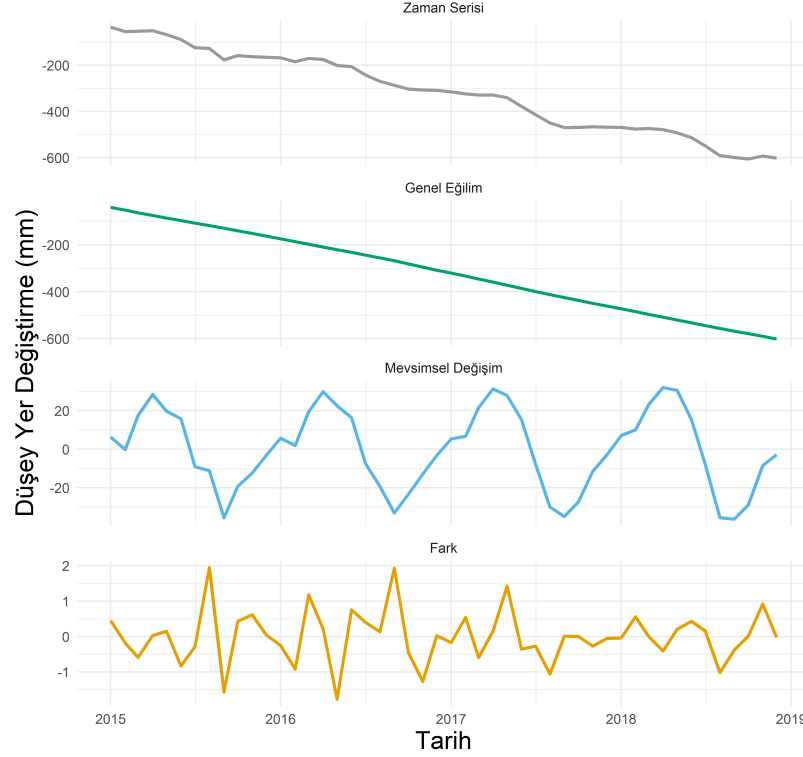


Şekil 3.3 X11 bileşenlerine ayrıştırma yöntemi

### 3.2.3 X-13ARIMA-SEATS Bileşenlerine Ayırıştırma

ABD Sayım Bürosu tarafında geliştirilen X12-ARIMA bileşenlerine ayrıştırma yöntemi ile İspanya Bankası tarafından geliştirilen ARIMA Zaman Serilerinde Mevsimsel Ayırıştırma (Seasonal Extraction in ARIMA Time Series, SEATS) yönteminin birleştirilmesi ile X-13ARIMA-SEATS yöntemi elde edilmiştir. X12-ARIMA yöntemi hem X11 bileşenlerine ayrıştırma yöntemini hem de model tabanlı OtoRegresif Entegre Hareketli Ortalama (AutoRegressive Integrated Moving Average, ARIMA) yöntemini barındırmaktadır. [80]

Şekil 3.1’de gösterilen deformasyon zaman serisinin X-13ARIMA-SEATS bileşenlerine ayrıştırma yöntemi ile elde edilmiş sonuçları Şekil 3.4’de gösterilmiştir. Genel eğilim bileşeni diğer yöntemler ile oldukça benzerdir. Mevsimsel değişim bileşeni yıllara göre değişebilmektedir. Fark bileşenindeki varyasyonların azaldığı görülmektedir.



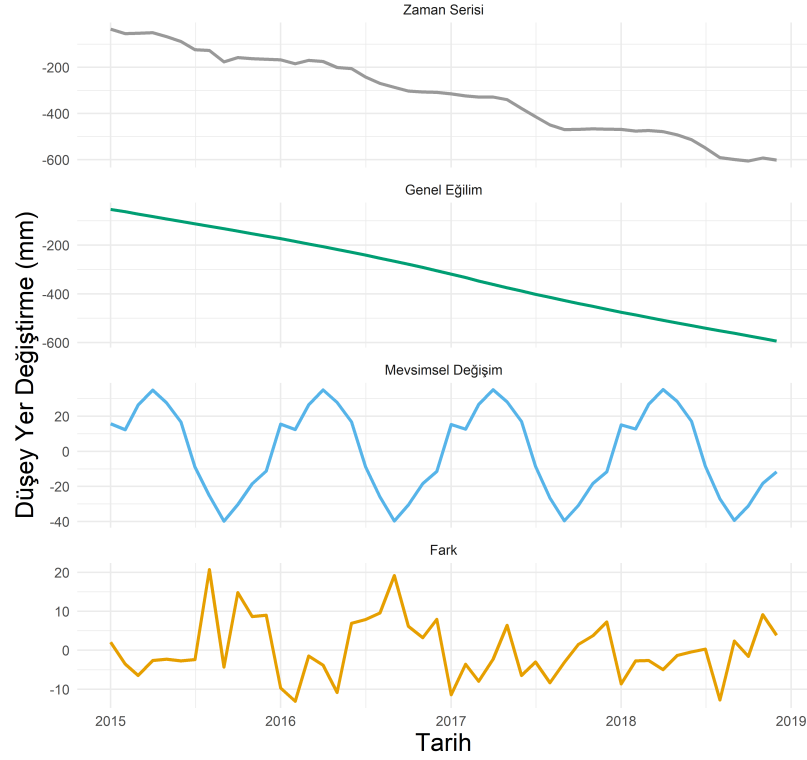
**Şekil 3.4** X-13ARIMA-SEATS bileşenlerine ayrıştırma yöntemi

### 3.2.4 STL Bileşenlerine Ayrıştırma

Mevsimsel Trend Ayrıştırma (Seasonal and Trend decomposition using Loess, STL) yöntemi sadece aylık elde edilen verileri değil, farklı örnekleme zamanına sahip verilerin işlenmesine de olanak sağlamaktadır [86]. Genel eğilim ve mevsimsel değişim bileşenlerinin değişim hızı ve yumuşatma miktarı kullanıcı tarafından ayarlanabilir. Aykırı verilere karşı gürbüz olmasına rağmen sadece toplamsal bileşenlerine ayrıştırmayı destekliyor olması da yöntemin dezavantajlarından biridir. En iyi sonucun elde edilmesi için yöntem parametrelerinin değiştirilmesi gerekmektedir. Şekil 3.1’de gösterilen deformasyon zaman serisinin STL bileşenlerine ayrıştırma yöntemi ile elde edilmiş sonuçları Şekil 3.5’de gösterilmiştir.

## 3.3 Genel Değerlendirme

Zaman serisi analizleri temel olarak iki amaçla yapılmaktadır. Birincisi, zaman serisindeki örüntülerin daha iyi anlaşılması için zaman serisini, kendisini oluşturan



**Şekil 3.5** STL bileşenlerine ayrıştırma yöntemi

alt bileşenlerine ayrıştırılması işlemidir. İkincisi ise, zaman serisindeki örüntülerin anlaşılması ile birlikte geleceğe yönelik verilerin tahmin edilmeye çalışılmasıdır. Bu çalışma içerisinde sadece deformasyon zaman serileri içerisinde bulunan örüntülerin daha iyi anlaşılması için bileşenlerine ayrıştırma yöntemleri kullanılacaktır.

Önceki bölümlerde, bileşenlerine ayrıştırma yöntemleri içerisinde yaygın olarak kullanılanlardan bazıları anlatılmıştır. Zaman serisi bileşenlerine ayrıştırma yöntemleri için oldukça detaylı kaynaklar bulunmaktadır [80, 83]. Her yöntemin kendine göre avantajı ve dezavantajı bulunmaktadır. Çalışma içerisinde geleneksel bileşenlerine ayrıştırma yönteminin kullanılması tercih edilmiştir. Bunun birinci sebebi, oldukça hızlı sonuç üretmesidir. İkincisi, kullanıcı etkileşimi ile mevsimsel değişim bileşenindeki büyüklüğün yıllara göre esnek ya da sabit olmasının ayarlanabiliyor olmasıdır. Son olarak, örnek bir deformasyon zaman serisinde, bahsedilen yöntemler ile yapılan analizlerde çok ciddi farklar görülmemiştir. Bu nedenle karmaşıklığı daha az olan, hızlı sonuç üreten, kullanıcı etkileşimine izin veren ve kabul edilebilir sonuçlar üreten klasik bileşenlerine ayrıştırma yöntemi seçilmiştir.

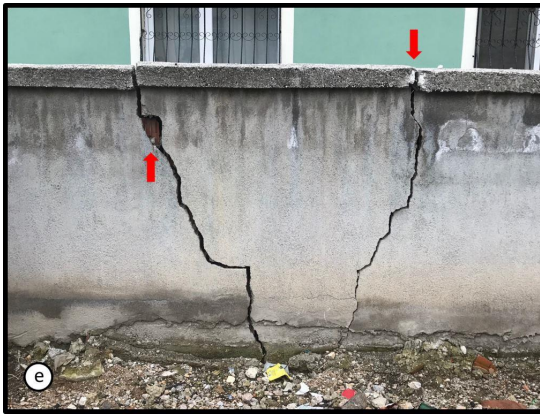
## 4 BOLVADİN DEFORMASYON ANALİZİ

---

Son yirmi yıl boyunca, Afyon ili Bolvadin ilçesi çökme, kırılma ve çatlama gibi yüzey deformasyonlarından ciddi şekilde etkilenmiştir. Yüzey deformasyonları yerleşim yerleri ve altyapı tesislerine ciddi zararlar vermiştir. Bu tür deformasyonları yerinde gözlemlemek için 12-13 Şubat 2019 tarihlerinde bölgeye yönelik bir saha çalışması gerçekleştirilmiştir. Daha önce [61] tarafından bildirilen deformasyon bölgeleri ve zarar görmüş diğer alanlar ziyaret edilmiştir. Gözlemlenen açık yüzey deformasyonlarına ve bunların yollara, binalara ve diğer yapılara olan yansımalarına örneklerle Şekil 4.1'de yer verilmiştir. Ziyaret edilen bölgelerin ve çekilen her fotoğrafın konumu ise Şekil 4.2b'de gösterilmiştir. Yüzeyde meydana gelen kırılma ve çatlaklar a ve c bölgelerinde açıkça görülmektedir. B ve d bölgelerinde yeniden asfaltlanan yollar, yüzeydeki deformasyon etkilerini kapatmış olsa da çevredeki taş duvarlar ve yol kenarındaki bordürler deformasyon etkilerini açıkça göstermektedir. E ve f bölgelerinde yer alan birçok binada ve bahçe duvarında çatlaklar olduğu görülmüştür.

Bu asismik yüzey deformasyonlarının, aşırı pompalama ve kuraklık sebebiyle yer altı suyu seviyesindeki sert düşüş [61] veya yakında bulunan aktif fay üzerindeki bölgeden meydana gelen kayma sonucunda olduğu düşünülmektedir [63]. Yüzey deformasyonlarının sebebini araştırmak için, [61] tarafından kırıklar boyunca dikey yer değiştirmeleri gösteren iki farklı alanda kazılar yapılmıştır. Kazılan çukurun duvarları üzerinde gözlemlenen dikey yer değiştirme miktarının 20-30 cm olduğu ve deformasyonun yaklaşık 5 m derinlikte bittiği raporlanmıştır. Yaklaşık olarak 1,5-3 cm/yıl olarak tespit edilen yer değiştirme hızının tektonik kökenli olamayacak kadar yüksek olduğu belirtilmiştir. Bu bulgular doğrultusunda, yüzeydeki deformasyonların fay yüzeyinde oluşan kayma veya diğer tektonik hareketlerden değil, hidrolojik değişikliklerden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte, Bolvadin ve çevresinde bulunan karmaşık aktif fay ağının varlığı [62] ve gerçekleştirilen jeodezik gözlemler dikkate alındığında, tüm yüzey deformasyonunun sadece yer altı su seviyesindeki düşüş ile açıklanamayacağı ve tektonik hareketlerin de kısmen sorumlu





Şekil 4.1 Bolvadin’de gözlemlenen yüzey deformasyonları ve bunların arazi, yol ve yapılara olan etkileri

olduğu ileri sürülmüştür [63].

Yüzey hareketlerini incelemek amacıyla bölgeye Ocak 2015'te sürekli bir Küresel Konumlandırma Sistemi (GNSS) istasyonu kurulmuştur [63]. 2 yıl boyunca toplanan veri sonrasında, GNSS istasyonunun bulunduğu noktada çökme hızının 7.1 cm/yıl olduğu belirlenmiştir. GNSS'e ek olarak, Ağustos 2016'da bölgede bir nivelman ağı kurulmuş ve Mayıs 2017'de son ölçüm gerçekleştirilmiştir [65]. 8 aylık süre sonunda, 9 farklı profile 18-24 mm arasında değişen çökme tespit edilmiştir. Fakat, GNSS ve nivelman ölçümleri yalnızca önceden belirlenmiş ve çok sık olmayan noktalar için gerçekleştirilmektedir [6]. Bu ölçüm yöntemleri, mekânsal anlamda ayrıntılı ve kapsamlı bilgi sağlayamazlar. Bu nedenle, yüzeyde meydana gelen deformasyonun geniş alanlarda ölçülmesine olanak sağlayan InSAR yönteminin kullanılması avantaj sağlayacaktır.

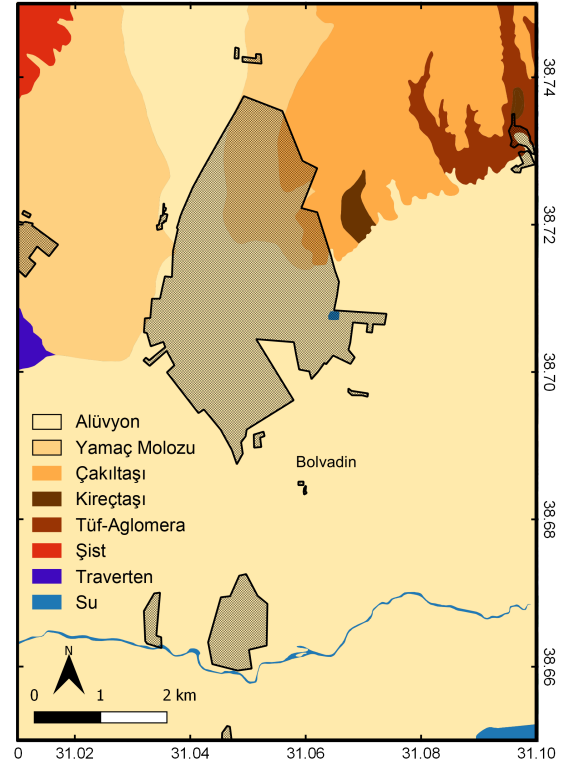
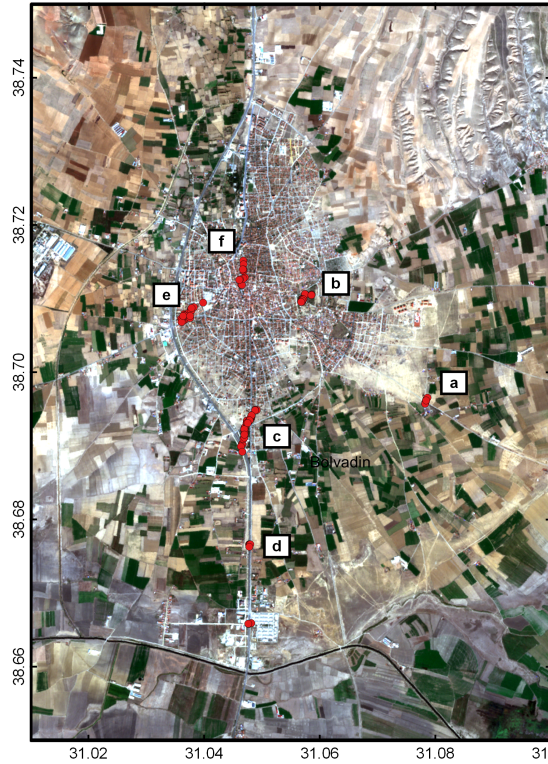
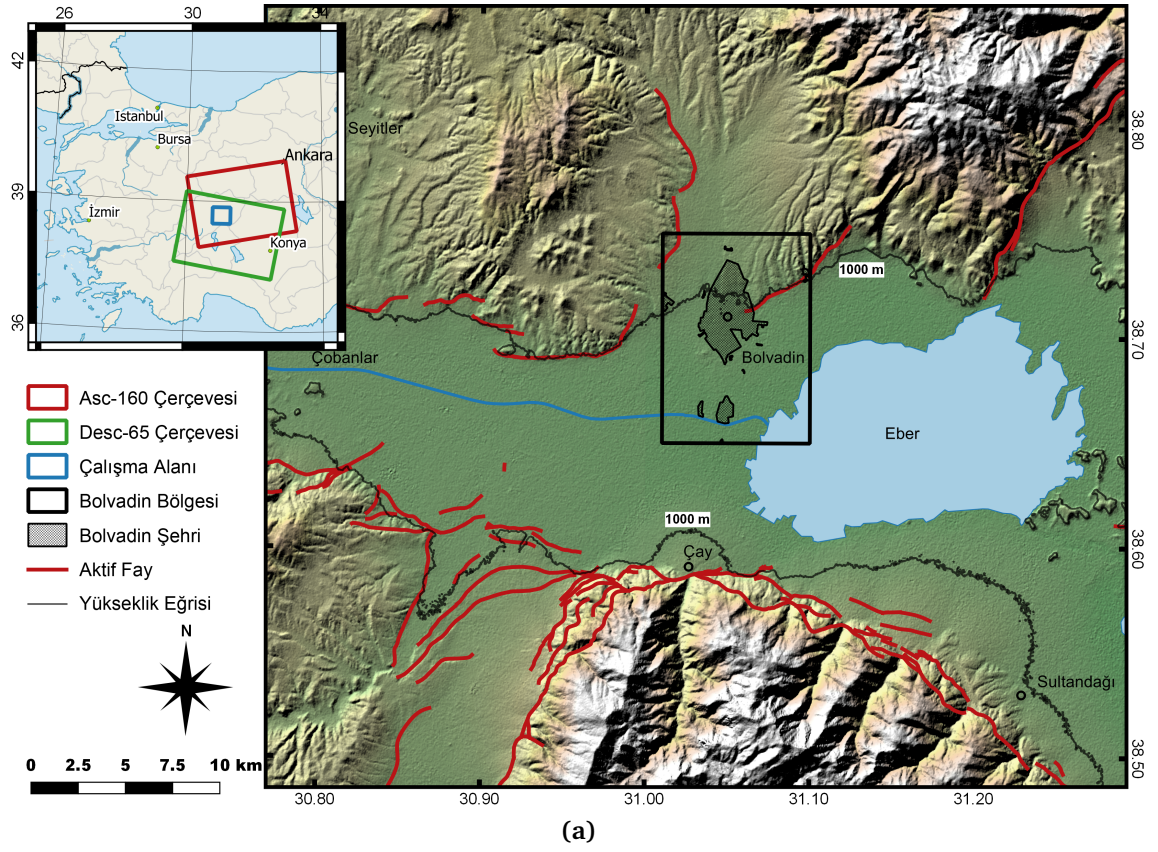
Bu bölümde gerçekleştirilen analizin amacı, Bolvadin ilçesi ve çevresinde gözlemlenen yüzey deformasyonlarına sebep olan mekanizmanın daha iyi anlaşılmasına katkı sağlamaktır. Bunu yapmak için, Sentinel-1 SAR verileri çok zamanlı InSAR yöntemi ile analiz edilmiştir. Ekim 2014 ile Ekim 2018 tarihleri arasında, yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen Sentinel-1 ürünleri PSI yöntemi kullanılarak işlenmiştir. PSI ile analiz sonucunda ortalama hız haritaları ve deformasyon zaman serileri elde edilmiştir. Sonuçlar jeolojik birimler, Eber Gölü'nün su yüzey alanındaki değişim ve yer altı su seviyesi ile karşılaştırılmıştır.

#### 4.1 Çalışma Alanı

Bolvadin, 30 binin üzerinde nüfusu ile Afyon ilinin en büyük ilçesidir (Şekil 4.2). Ege kıyılarında bulunan Sultandağ ve Emirdağ arasında, geniş ve verimli bir ovada inşa edilmiştir. Akarçay nehri ve Eber Gölü tarafından sulanan ova zengin bir tarım alanıdır. Eber Gölü bölge için önemli bir su kaynağıdır ve bölgeyi hem tarımsal hem de diğer ekonomik faaliyetler açısından olumlu yönde etkilemektedir. Tarımsal alanlardaki yoğun su kullanımı, iklim değişiklikleri ve bölgede yeni inşa edilen barajlar nedeniyle Eber Gölü'nün su seviyesi yıldan yıla değişmektedir [87–89]. Bolvadin bölgesinde, yer altı suyu tarım sulaması ve endüstriyel kullanım için temel su kaynağıdır. Akarçay Nehri ve Eber Gölü'nü çevreleyen yumuşak alüvyonlu zemin sebebiyle bölgede birçok çöküntü olayı yaşanmaktadır [61, 63]. Gerçekleşen yüzey deformasyonları altyapı açısından bölgeyi riskli hale getirmektedir.

Bolvadin, sık sismik olayların gözlemlendiği ve oldukça karmaşık tektonik oluşumun bulunduğu Afyon-Akşehir Graben sisteminin orta kısmında yer almaktadır [62, 63, 65]. Bu çalışmada kullanılan Afyon-Bolvadin aktif fay haritası, Maden Tetkik ve Arama





**Şekil 4.2 (a)** Çalışma alanı (Bolvadin) ve çevresi, bölgedeki aktif fay hatları ve Sentinel-1 çerçeveleri. **(b)** Sentinel-2 görüntüsü üzerinde ziyaret edilen bölgeler ve çekilen fotoğrafların konumları. **(c)** MTA'dan alınan Bolvadin'in jeolojik haritası



Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından hazırlanan güncellenmiş aktif fay haritasından alınmıştır [62].

## 4.2 Veri ve Yöntemler

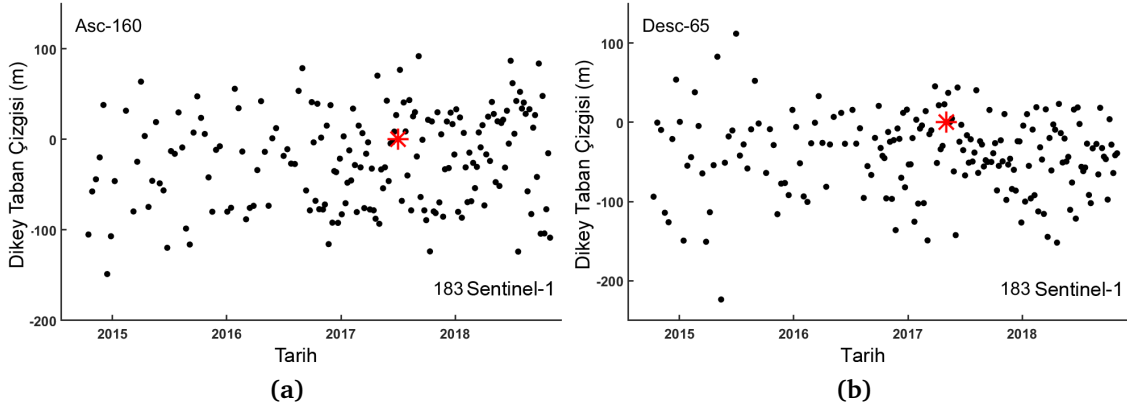
### 4.2.1 Veri Seti

Sentinel-1, Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından yönetilen Copernicus Programı altında, C-bandında (~5.6 cm dalga boyu) çalışan SAR sensörlerini taşıyan ikiz bir uydu takımıdır. Sentinel-1 ürünleri, Copernicus programı tarafından ücretsiz ve açık veri politikası kapsamında dağıtılmaktadır. Sentinel-1 A ve Sentinel-1 B uyduları, aynı bölgede her 6 günde bir, tüm hava koşullarında, gündüz ve gece görüntüleme kabiliyetine sahiptir. Altı günlük tekrar döngüsü, arazi izleme sistemleri için oldukça iyi bir zamansal çözünürlük sağlamaktadır.

Çalışma alanı, Ekim 2014 ile Ekim 2018 arasındaki zaman diliminde elde edilen tüm Sentinel-1 SAR görüntüleri kullanılarak analiz edilmiştir. Sentinel-1 A uydusu, analiz döneminin başından itibaren, Sentinel-1 B uydusu ise Ekim 2016'dan itibaren çalışma bölgesini kapsayan veri içermektedir. Yükselen (Asc-160 çerçevesi) ve alçalan (Desc-65 çerçevesi) yörüngede elde edilen görüntülerin kapsadığı alan Şekil 4.2a'da gösterilmiştir. Sentinel-1 B uydusunun 2016 yılının ortalarında yörüngeye yerleşmesiyle birlikte, zamansal çözünürlük analiz süresinin ikinci yarısında 12 günden 6 güne yükselmiştir. TOPSAR IW çekim modunda ve tek bakışlı kompleks (SLC) formatta elde edilen ürünler kullanılmıştır. 183 yükselen ve 183 alçalan yörüngede olmak üzere toplam 366 ürün, her yörünge seti için bağımsız olarak işlenmiştir. Şekil 4.3'te gösterildiği gibi Sentinel-1 A/B ürünlerinin zamansal ve geometrik durumları dikkate alınarak her veri kümesi için ayrı ayrı referans ürün (master) seçilmiştir.

### 4.2.2 Çok Zamanlı InSAR İşlemleri

Bolvadin'deki yüzey deformasyonları, PSI yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Görüntünün tamamını analiz etmek yerine, sadece zaman içinde stabil olan PS noktaları analiz edilir. PSI'nın ana işleme adımları interferogram oluşturma, PS noktalarının çok zamanlı işlenmesi ve Atmosferik Faz Ekranının (Atmospheric Phase Screen, APS) çıkarılmasından oluşmaktadır [12]. Her ana bloğun işlenmesi, [27]'de önerildiği gibi gerçekleştirilmiştir. İnterferogramlar SNAP (Sentinel Application Platform, sürüm 6.0) yazılımı kullanılarak üretilmiştir [90]. İlk olarak, Mart 2015'ten önce elde edilen veriler Anten Yükseklik Modeli (Elevation Antenna Pattern, EAP) yöntemi ile düzeltildi. Sentinel-1 verilerinin işlenmesi Mart 2015'te EAP



**Şekil 4.3** Sentinel 1 verileri arasındaki zamansal ve geometrik uzaklık grafiği.

Kırmızı yıldız referans (master) ürünü temsil eder. **(a)** Yükselen yörüngede (Asc-160) referans verinin tarihi 5 Mayıs 2017'dir. **(b)** Alçalan yörüngede (Desc-65) ise referans verinin tarihi 2 Temmuz 2017'dir

kazancına ek olarak EAP fazını da düzelterek şekilde güncellenmiştir. Bu değişiklik ile, Mart 2015 öncesinde ve sonrasında elde edilen ürünler arasında faz açısından farklılık bulunmaktadır. Bu ürünler ile interferogram oluştururken faz kayması oluşabileceği [91] tarafından bildirildiği için ilgili tarihten önceki verilere EAP uygulanması önemlidir. Çalışma alanını içeren alt veri bloğu seçildikten (sub-swath and burst selection) sonra, tüm görüntüler yörünge dosyaları [92] ve Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) yardımı ile tek bir referans görüntü ile eşleştirilmiştir. Daha sonra interferogramlar oluşturulmuş ve interferogramlardan topoğrafik faz bileşeni çıkarılmıştır. Eşleştirme ve topoğrafik faz bileşeni için SRTM 1 ark saniye (30 metre uzamsal çözünürlük) kullanılmıştır [93]. Aynı polarizasyona sahip bantlar daha yüksek uyumluluk(coherence) gösterdiği için tüm işlem adımları VV polarizasyonunda elde edilen bantlar ile gerçekleştirilmiştir.

İnterferogram kümeleri oluşturulduktan sonra, deformasyon zaman serisi analizi için bir sonraki aşamaya geçilir. İnterferogram kümesi içindeki PS noktalarının seçimi ve çok zamanlı olarak işlenmesi için StaMPS (The Stanford Method for Persistent Scatterers, sürüm 4.1-beta) yazılım paketi kullanılmıştır [11, 74]. İlk aşamada, PS noktaları genlik dağılım endeksi kullanılarak görece daha yüksek bir eşik değeri ile tespit edilir [73]. Daha sonra, faz analizi gerçekleştirilerek uzamsal olarak ilişkili bileşenler tahmin edilir. Böylece sadece sinyal genliğine değil, aynı zamanda faz uyumuna da bağlı olan daha kararlı PS noktalarının elde edilmesi sağlanır. Son aşamada, TRAIN (Toolbox for Reducing Atmospheric InSAR Noise) yazılımında [94], ERA-I küresel hava modeli kullanılarak sıcaklık, basınç ve nem değişikliklerinden kaynaklanan troposferik faz etkileri hesaplanır. Deformasyon sinyalinin nihai halini elde etmek için troposferik faz gecikmeleri interferometrik fazdan çıkarılır.

### 4.3 Analiz Sonuçları

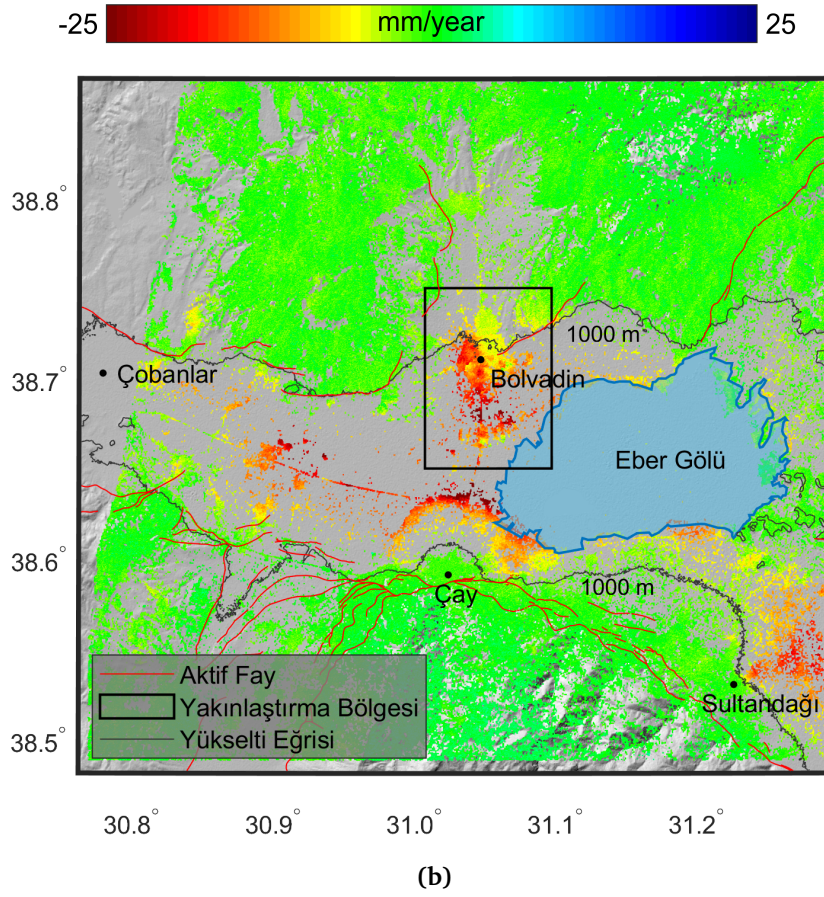
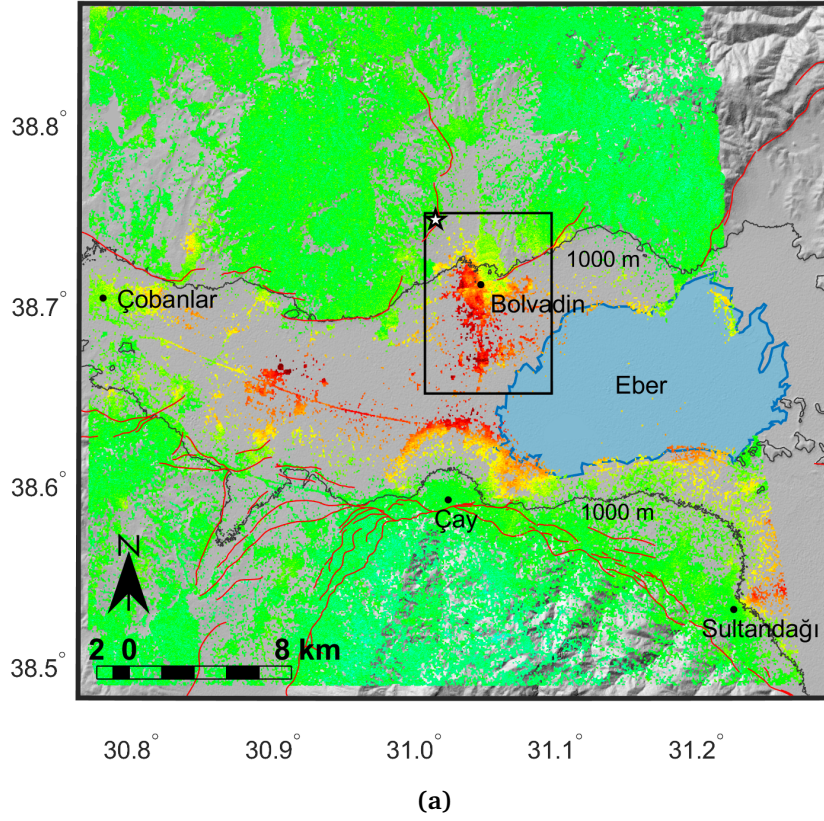
Ekim 2014 ile Ekim 2018 tarihleri arasında edilen tüm Sentinel-1 SAR verileri, çok zamanlı InSAR yöntemi ile analiz edilmiş ve sonuç olarak iki temel çıktı elde edilmiştir: Bakış açısı doğrultusunda (Line of Sight, LOS) ortalama hız haritaları ve yer değiştirme zaman serileri.

#### 4.3.1 Çok Zamanlı InSAR Sonuçları

##### 4.3.1.1 Ortalama Hız Haritaları

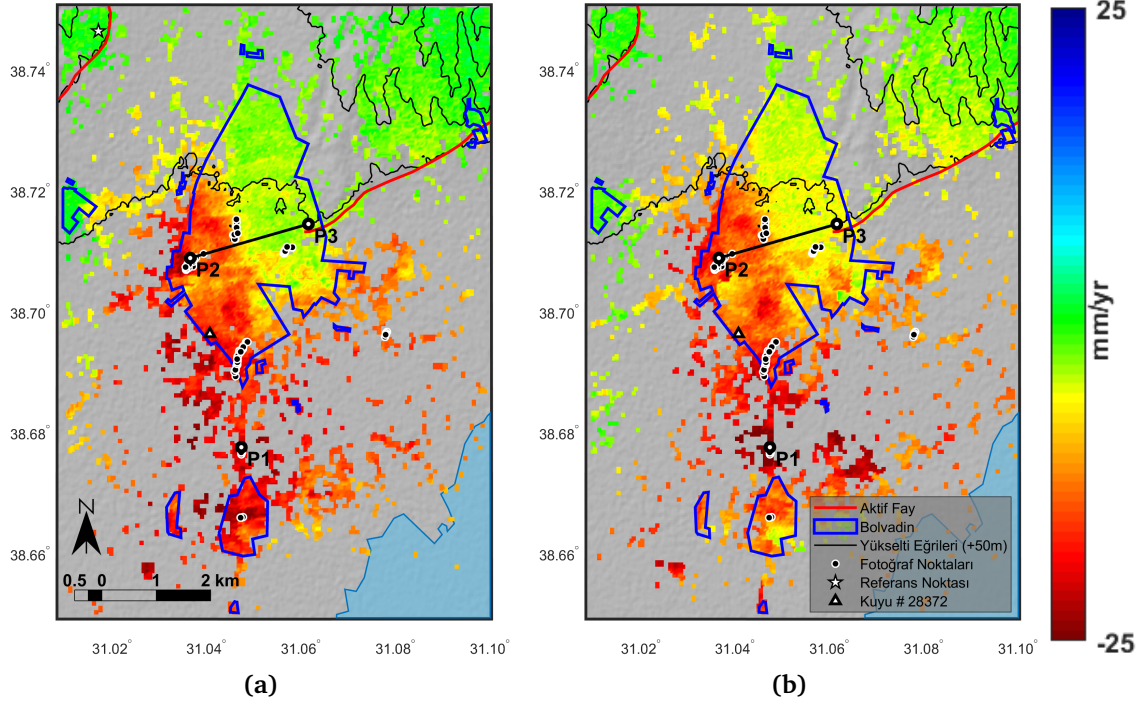
Ekim 2014 ve Ekim 2018 tarihleri arasında, yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen tüm Sentinel-1 SAR verileri çok zamanlı InSAR yöntemi ile analiz edilmiştir. Bakış açısı doğrultusunda, Afyon-Akşehir Grabeni'nin tamamını kapsayan ortalama hız haritaları Şekil 4.4'te, Bolvadin ilçe ve çevresini daha detaylı gösteren ortalama hız haritaları ise Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Tüm ölçüm değerleri, analiz tarihleri arasında sabit olduğu belirlenen ortak bir referans noktasına göre güncellenmiştir. Sıcak renkler (negatif değerler) sensörden uzaklaşmayı vurgularken, soğuk renkler (pozitif değerler) sensöre doğru hareket olduğunu göstermektedir. Ortalama hız haritaları, Şekil 4.4, yüzey hareketlerinin sadece Bolvadin ilçesinde değil Çay, Çobanlar ve Sultandağı ilçeleri de dâhil olmak üzere Afyon-Akşehir Grabeni'nin tamamında gerçekleştiğini göstermektedir. Ölçüm noktalarının genellikle PS özelliği gösteren yerleşim yeri ve çevresinde olduğu görülmektedir. Analiz tarihleri uzun bir zaman dilimini kapsadığı için bu tarihler arasında tarım arazilerinde değişikliklerin olması kaçınılmazdır. Bu nedenle, DS karakteristiği gösteren tarım alanlarına ilişkin neredeyse hiçbir ölçüm noktası bulunmamaktadır. Bununla birlikte, tüm grabenin şiddetli bir çöküntüye maruz kaldığı da açıkça görülmektedir. Şekil 4.5'te, sadece Bolvadin ve çevresine ait daha detaylı ortalama hız haritaları gösterilmiştir. Yükselen ve alçalan ortalama hız haritalarında benzer bir deformasyon hızı ve deseninin varlığı, Bolvadin'de gerçekleşen yüzey hareketlerinin sadece düşey yönde olduğuna dair bir gösterge olarak düşünülebilir. Bununla birlikte Bolvadin'in güneyinde gözlemlendiği gibi, ortalama hızın alçalan ve yükselen veri setleri için farklı olduğu bazı bölgeler de vardır. Bu farklılık, doğu-batı (D-B) doğrultusunda gerçekleşen yatay bir hareketin göstergesi olabilir. Bu gibi durumlarda, yüzey hareketlerinin daha kolay yorumlanması için LOS'ta elde edilen ortalama hız haritalarının düşey ve yatay bileşenlerine ayrıştırılması gerekmektedir.

InSAR yöntemi ile yüzey hareketlerinin tespitinde bazı kısıtlar bulunmaktadır. Öncelikle, SAR sensörleri yüzey hareketinin sadece LOS'a olan izdüşümünü algılayabilir. Ayrıca, SAR sensörleri kuzey-güney (K-G) doğrultusunda gerçekleşen bir yüzey hareketine karşı oldukça düşük bir hassasiyet göstermektedir [95]. Yüzey



**Şekil 4.4** Afyon-Akşehir Grabeni, (a) yükselen yörünge (Asc-160) ve (b) alçalan yörünge (Desc-65) için LOS ortalama hız haritaları



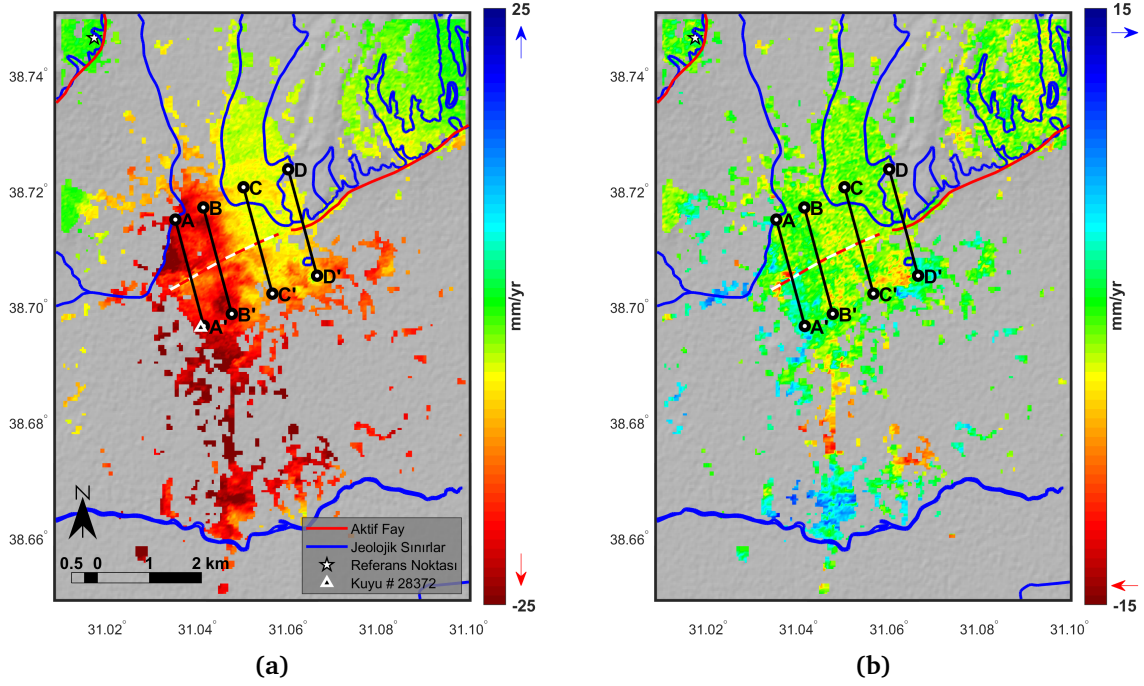


**Şekil 4.5** Bolvadin ve yakın çevresi için, (a) yükselen yörünge (Asc-160) ve (b) alçalan yörünge (Desc-65) için LOS'ta ortalama hız haritaları

hareketinin üç boyutlu (3B) bileşenlerini elde etmek için, farklı geometride çekilmiş en az 3 görüntü gerekmektedir. Bununla birlikte, K-G doğrultusundaki hareketlerin tespit edilmesinde görülen düşük duyarlılık sebebiyle K-G bileşeni ihmal edilebilir. Sonuç olarak, sadece yükselen ve alçalan yörüngelerde elde edilen görüntülerin varlığı düşey ve yatay (D-B) yer değiştirme bileşenlerini hesaplamak için yeterlidir. 3B bileşenlerine ayrıştırma yöntemi kullanılarak [96], Bolvadin bölgesinde düşey ve D-B doğrultuda gerçekleşen yatay hareket için ortalama hız haritaları oluşturulmuştur (Şekil 4.6). Bolvadin'in hemen hemen her bölgesinde bir deformasyon gerçekleştiği söylenebilir. En yüksek çöküntü hızı, 35 mm/yıl ile Bolvadin'in güney kesiminde görülmektedir. Kuzey ve kuzey-doğu bölgesinde, şehrin güney ve güney-batısına kıyasla daha küçük bir deformasyon hızı bulunmaktadır. D-B doğrultusundaki yatay hareket, çoğu bölgede ihmal edilebilir. Yine de batı küçük bir alanda ve güneyde sınırlı bir bölgede küçük bir yatay hareketin varlığından söz edilebilir.

#### 4.3.1.2 Deformasyon Zaman Serileri

Şehrin farklı bölgelerinden farklı deformasyon şiddetine maruz kalan üç ölçüm noktası seçilmiştir. Noktalar, saha çalışması sırasında çekilmiş olan fotoğraf konumlarına mümkün olduğunca yakın seçilmiştir. Seçilen noktaların yerleri Şekil 4.5'te gösterilmektedir. P1 noktası, en ağır çöküntünün gözlemlendiği şehrin güney kesiminden seçilmiştir. P2 ve P3 noktaları, farklı çökme hızlarının bulunduğu iki farklı



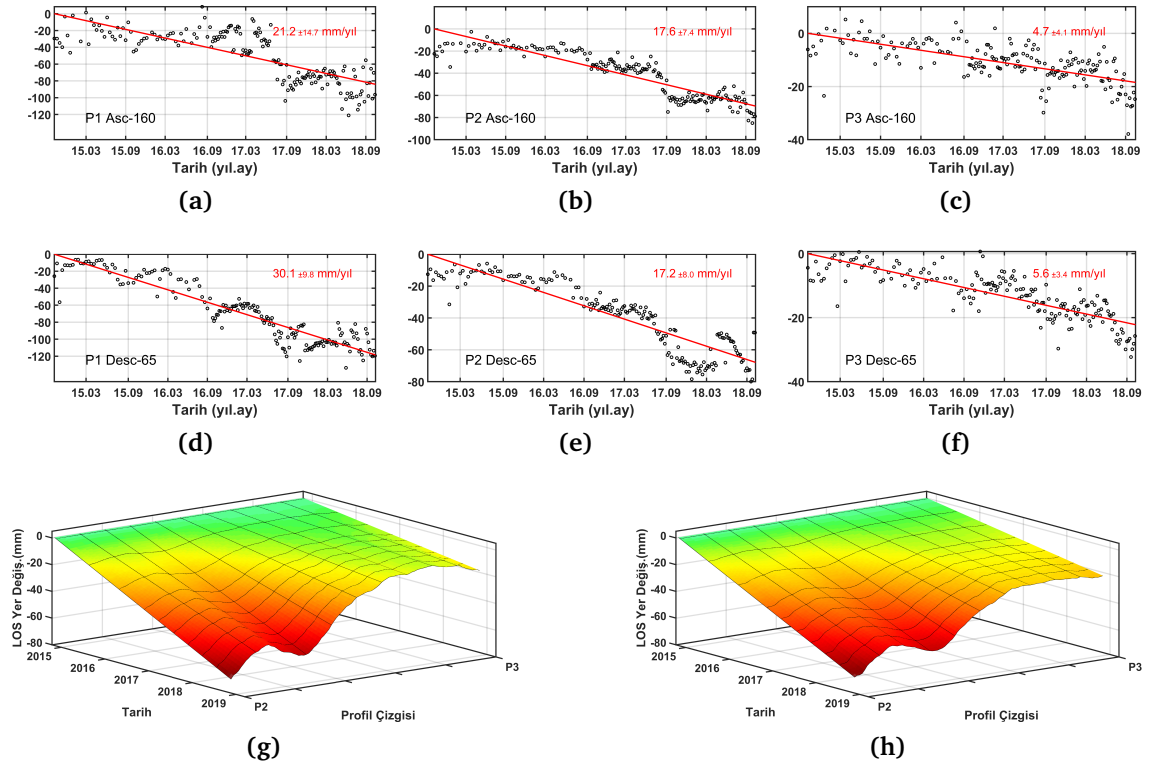
**Şekil 4.6 (a)** Düşey ortalama hız haritası. Sıcak renkler (negatif değerler) çökmeyi temsil eder. **(b)** Yatay (D-B) ortalama hız haritası. Sıcak renkler (negatif değerler) batı, soğuk renkler (pozitif değerler) ise doğu yönündeki hareketi temsil etmektedir. Kesik kırmızı-beyaz çizgiler, aktif fay hattının olası uzantısını göstermektedir

bölgeden seçilmiştir. P2 noktası şehrin batı kesiminde, P3 noktası ise nispeten düşük deformasyon hızının bulunduğu şehrin doğu kesiminde bulunmaktadır. Seçilen tüm noktalar için yükselen ve alçalan yörüngelerde elde edilen toplam yer değiştirme miktarı zaman serisi olarak Şekil 4.7a-f’de sırasıyla gösterilmiştir. 100 m yarıçapındaki tüm noktaların ortalaması alınarak LOS’ta yer değiştirme miktarları hesaplanmıştır. Yer değiştirme değerleri, doğrusal uyum (linear fit) sonucuyla birlikte gösterilmiştir.

Uzun vadede, hemen hemen bütün noktaların sensörden uzaklaştığı görülmektedir. Alçalan ve yükselen veri setinden elde edilen sonuçların benzerlik göstermesi sadece düşey yönde bir hareketin olduğu izlenimini vermektedir. P1 noktasında, yükselen veri seti için toplam yer değiştirme miktarı yaklaşık 8 cm iken, alçalan veri setinde yaklaşık 12 cm’dir. LOS’ta ölçülen toplam yer değiştirme miktarının, yükselen ve alçalan veri setlerinde farkı olması, Şekil 4.6b’de gösterildiği gibi o bölgede gerçekleşen yatay hareketin varlığı ile açıklanabilir. P2 noktasındaki toplam yer değiştirme miktarı her iki veri kümesi için de yaklaşık 7 cm’dir. P3 ise, her iki veri seti için de yaklaşık 2 cm yer değiştirme ile nispeten daha kararlı bir noktadır. P1 ve P2’deki benzer yer değiştirme değerleri, ağırlıklı olarak düşey doğrultuda gerçekleşen bir deformasyonun göstergesidir. Seçilen tüm noktalardaki deformasyon zaman serilerinde kısa süreli salınımlar bulunmaktadır. Genel deformasyon eğilimi azaldıkça, salınım miktarının

P1 noktasından P3'e doğru düştüğü söylenebilir. Mevsimsel değişimlerin salınım üzerindeki etkileri ilerleyen bölümlerde daha detaylı olarak incelenecektir.

P2 ve P3 noktalarının yer aldığı iki farklı bölge arasındaki deformasyon miktarının nasıl değiştiğini göstermek için, profil çizgisi üzerinde yer alan tüm ölçüm noktalarının deformasyon miktarları zaman serisi olarak birleştirilmiştir. Daha basit ve anlaşılır olması için, yalnızca LOS'taki doğrusal yaklaşımlar Şekil 4.7g,h'de gösterilmiştir. P2-P3 hattı üzerindeki tüm ölçüm noktaları çökmeye maruz kalmıştır. Bununla birlikte, yıllar geçtikçe P3 noktasından P2 noktasına doğru çöküntü miktarında bir artış olmuştur. P3 noktasında, yaklaşık 2 cm'lik toplam bir yer değiştirme gözlemlenirken, P2 noktasında ise yaklaşık 7 cm'lik bir yer değiştirme vardır. Bölgede D-B doğrultusundaki yatay hareket ihmal edilebilir olduğundan, toplam yer değiştirme miktarı yükselen ve alçalan veri setlerinde birbirine oldukça benzerdir.



**Şekil 4.7** Asc-160 yörüngesi için (a) P1, (b) P2, (c) P3 ve Desc-65 yörüngesi için (d)

P1, (e) P2 ve (f) P3 noktalarındaki LOS yer değiştirme miktarları gösterilmiştir.

Ayrıca, P2 ve P3 noktaları arasındaki profilde gerçekleşen LOS yer değiştirmelerin doğrusal uyumu da (g) Asc-160 ve (h) Desc-65 yörüngeleri için gösterilmiştir. Nokta ve profil konumları Şekil 4.5'de gösterilmektedir

#### 4.3.2 Jeolojik Birimler ile Karşılaştırma

Bolvadin temel olarak alüvyon çökeltilerinin varlığı ile karakterize edilen Afyon-Akşehir Graben sisteminin orta kısmında yer almaktadır. Bolvadin'in kuzey

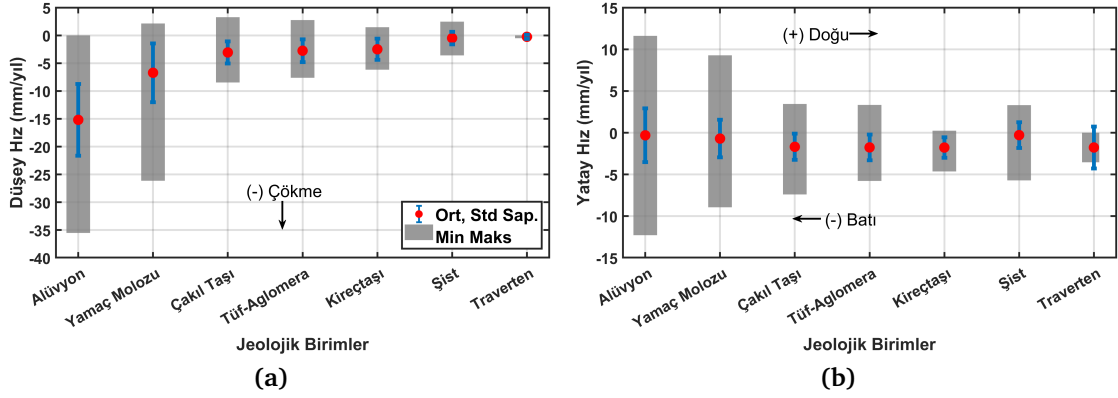
ve kuzey-doğu bölgesindeki litolojik birimler yamaç molozu/birikinti konisi ve çakıl taşlarından oluşmaktadır. Kasabanın dış bölgelerinde ayrıca kalker ve şist bulunmaktadır. Bolvadin ve çevresindeki jeolojik birimler Şekil 4.2c’de gösterilmiştir. Şekil 4.6’da verilen ortalama hız haritaları ve jeolojik sınırlar, kentin güney ve batı kesiminde bulunan alüvyon çökeltileri ile yüksek deformasyon hızları arasında açık bir ilinti olduğunu göstermektedir. P1 ve P2 noktaları bu bölgelerden seçilmiş ve LOS’ta toplam yer değiştirme miktarları zaman serisi olarak Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Yamaç molozu/birikinti konisi ve çakıltaşları gibi iri tanelerden ve bloklardan oluşan bölgeler daha az deforme olabilen çökeltilerdir. Bu bölgeden seçilmiş olan P3 noktasında, deformasyon hızının düştüğü görülmektedir. P2 ve P3 noktaları arasındaki profil çizgisi boyunca yer değiştirme miktarları incelendiğinde (Şekil 4.7g,h), alüvyon çökeltileri ve yamaç molozu/birikinti konisi arasında deformasyon hızının nasıl değiştiği görülebilir. Neredeyse sıfır deformasyon hızına sahip en durağan bölge, şist oluşumunun bulunduğu bölgenin kuzey-batı kısmındadır. Referans noktası o sabit bölgeden seçilmiş ve diğer tüm ölçüm noktaları bu noktaya göre güncellenmiştir.

Jeolojik birimler ile düşey ve yatay (D-B) yönde elde edilen deformasyon hızları arasındaki ilişki Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Her jeolojik birim için ortalama, standart sapma, minimum ve maksimum deformasyon hızları hesaplanmıştır. Beklendiği gibi, deformasyonun çoğu yumuşak alüvyon tortularında meydana gelirken, eski jeolojik oluşumlar deformasyondan daha az etkilenmiştir. Bolvadin’in güneyinde bulunan alüvyon birikintilerinde, maksimum çökme hızı yaklaşık 35 mm/yıl’dır. Alüvyon çökeltilerde ortalama çöküntü hızı yaklaşık 15 mm/yıl iken, diğer jeolojik birimlerde sifıra yakın deformasyon bulunmaktadır. Yamaç molozu/birikinti konisi bölgelerinde ortalama hız yaklaşık 7 mm/yıl olmasına rağmen, maksimum deformasyon hızı 25 mm/yıla kadar çıkmaktadır. Öte yandan, ortalama yatay (D-B) deformasyon hızı tüm jeolojik birimler için neredeyse sıfırdır. Bununla birlikte, özellikle alüvyonlu sedimanların bazı noktalarında 12 mm/yıl a çıkan D-B doğrultusunda yatay hareketler bulunmaktadır.

#### **4.3.3 Eber Gölü Su Yüzey Alanı ile Karşılaştırma**

Eber Gölü yüzey alanı 1990 ve 2016 yılları arasında %2,30 oranında büyümüştür [89]. Bununla birlikte, Ekim 2018 itibariyle gölün neredeyse kurduğuna dair bazı haberler gazeteler tarafından yayınlanmıştır [97, 98]. Yer altı ve yer üstü suları arasındaki ilişkiyi anlamak zor bir problem olmakla birlikte literatürde bu alan ile ilgili çalışmalar bir hayli fazladır. Son zamanlarda yapılan birkaç çalışma bu konuya odaklanmaktadır. Göl/rezervuar/sulak alanlar ile yer altı suyu arasındaki etkileşimler incelenmiştir [99]. Yer altı ve yer üstü suları arasındaki ilişkisi kapsamlı



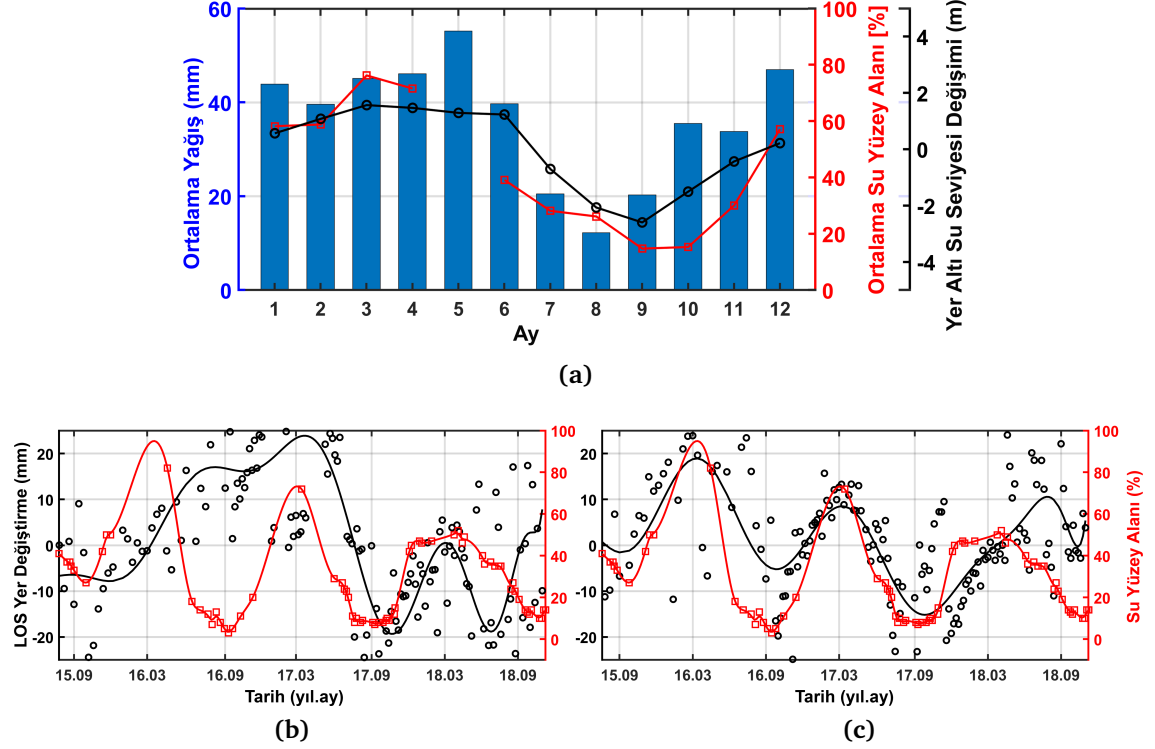


**Şekil 4.8** Bolvadin bölgesindeki jeolojik birimler ile (a) düşey deformasyon hızı ve (b) yatay (D-B) deformasyon hızı arasındaki ilişki gösterilmiştir. Her jeolojik birim için ortalama (kırmızı noktalar), standart sapma (mavi çizgi), minimum ve maksimum (koyu gri) deformasyon değerleri gösterilmektedir

bir araştırma ile sunulmuştur [100]. Nasser Gölü ile bölgedeki yer altı suyu arasındaki ilişki hakkında ayrıntılı bir vaka çalışması bildirilmiştir [101]. Bununla birlikte, Eber Gölü'nün yer altı suyu ile doğrudan etkileşime girmediği ve yer altı suyu seviyesi değişikliklerinin gölün su seviyesini etkilemediği iddia edilmektedir [102]. Gölün ağırlıklı olarak Akarçay ve Sultan Dağları'ndan gelen yağış ve kaynak suyuyla beslendiği düşünülmektedir [87]. Fakat, yağışın da yer altı suyunun temel kaynaklarından biri olduğu bilinmektedir [100]. Bu nedenle, hem Eber Gölü su yüzeyi hem de yer altı su seviyesi, yağış miktarı ile doğrudan ve dolaylı yünden etkilenmektedir.

Eber Gölü'nün su yüzey alanı yağış miktarlarındaki değişim, buharlaşma, sulama, pompalama ve yüzey akışı nedeniyle yıllara göre değişiklik göstermektedir [87–89]. Türkiye'deki tüm meteorolojik bilgiler, Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından toplanmaktadır. Afyon ili için, 1929-2018 dönemine ait aylık ortalama yağış verisi MGM'nin web sitesinde yayınlanmıştır [103]. Eber Gölü, Bluedot Observatory tarafından sürekli izlenen Dünya'daki 5000 gölden biridir. Gölün su yüzey alanı, Temmuz 2015 ve Kasım 2018 arasında multispektral Sentinel-2 optik verileri kullanılarak analiz edilmiştir [104]. Her bir Sentinel-2 verisi için, mevcut su yüzey alanının yüzdesi normal göl sınırlarına göre hesaplanmıştır. Eber Gölü'nün aylık ortalama su yüzey alanı (%) ve aylık ortalama yağış verisi (mm) Şekil 4.9a'da gösterilmiştir. Aylık ortalama yağış ile gölün su yüzey alanı arasında yüksek bir ilinti vardır ve bu yağışların Eber Gölü'nün ana su kaynaklarından biri olduğunu göstermektedir. Hem yağış verileri hem de su yüzey alanı ilkbaharda maksimum değere ulaşmakta ve yaz sonunda minimum seviyeye düşmektedir. Eber Gölü'nün su yüzey alanını etkileyen bir diğer faktör ise tarım alanlarının sulanması için göl

suyunun kullanılıyor olmasıdır. Eber Gölü ve doğrudan Eber Gölü'nü besleyen nehirler tarımsal alanların sulanmasında kullanılan temel su kaynakları arasında yer almaktadır. Bu nedenle, yaz aylarında su yüzeyinin minimum seviyeye inmesinde tarım faaliyetlerinde suyun yaygın kullanımı da önemli bir faktördür.



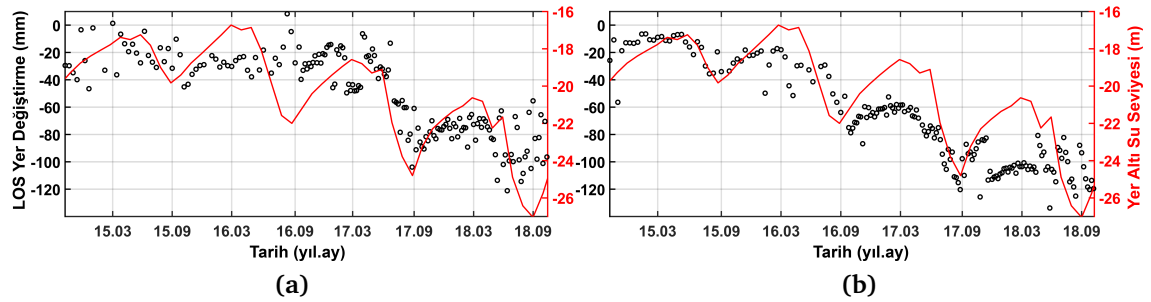
**Şekil 4.9 (a)** Afyon aylık ortalama yağış miktarı (mm), Eber Gölü'nün aylık ortalama su yüzey alan değişimi (%) ve yer altı su seviyesindeki mevsimsel değişimler (m). P1 noktasındaki mevsimsel yer değiştirme miktarları, Eber Gölü'nün yüzey alanındaki değişim ile birlikte **(b)** Asc-160 ve **(c)** Desc-65 yörüngeleri için gösterilmiştir

P1 noktası için LOS'ta yer değiştirme zaman serileri Bluedot Gözlemevi'nden elde edilen Eber Gölü'nün su yüzeyi alanı ile Şekil 4.9b,c'de gösterildiği gibi karşılaştırılmıştır. Bulutsuz optik veri eksikliğinden dolayı, özellikle kış mevsimlerinde göl suyu yüzey alanı verilerinde eksiklikler bulunmaktadır. Bu nedenle, eksik kısımlar aradeğerleme yöntemi ile doldurulmuştur. Göl yüzeyinin yaz sonunda düştüğü ve ilkbaharda en yüksek seviyesine ulaştığı görülmektedir. Gölün yüzey alanı, 2016 yılında doğal sınırlarının oldukça altına (% 10) inmiş ve neredeyse sıfır değerine yaklaşmıştır. Göl yüzeyinde mevsimsel değişimler baskın olsa da uzun vadede ufak bir azalmanın varlığından söz edilebilir. Göl yüzey alanı yer değiştirme miktarlarıyla karşılaştırıldığında, su yüzey alanındaki mevsimsel değişiklikler ile alçalan veri setindeki yer değiştirme miktarları arasında yüksek bir bağıntı olduğu gözlemlenmektedir. Yükselen veri kümesindeki sonuçlar mevsimsel değişikliklerden daha az etkilenmiş görünmektedir.

#### 4.3.4 Yer Altı Su Seviyesi ile Karşılaştırma

Yer altı su seviyesindeki değişiklikler, birçok nedenden dolayı yüzey deformasyonunu tetikleyebilir [42]. En etkili sebeplerden biri yer altı su seviyesindeki düşüşün, deforme olabilen topraklarda stres seviyesinde değişikliklere neden olmasıdır. Bu nedenle, yer altı su seviyesindeki değişimler, yüzey deformasyonunu tetikleyebilecek önemli faktörlerden biridir. Bu çalışmada kullanılan yer altı su seviyesi verileri Türkiye Devlet Su İşleri Müdürlüğü'nden alınmıştır. 28372 no'lu kuyunun yeri Şekil 4.5a,b'de gösterilmiştir. LOS'ta ölçülen toplam yer değiştirme miktarı, yükselen ve alçalan yörüngedeki veri setleri için sırasıyla yer altı su seviyesi ile karşılaştırılmıştır, 4.10. Hem uzun vadede hem de kısa vadede, yer altı su seviyesi değişimleri ile LOS yer değiştirme eğilimleri arasında oldukça yüksek bir ilinti vardır. Uzun vadede, yer altı suyunun aşırı kullanımı sebebiyle genel bir düşüş eğilimi görülmektedir. Kısa vadede yağış ve sulama etkisiyle mevsimsel değişiklikler gözlenmektedir.

Sulama ve yağış, yer altı su seviyesindeki değişimi etkileyen temel sebeplerdendir. Tarım alanlarının sulanmasında yer altı suyu yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, uzun vadede yer altı seviyesinde bir azalma eğilimi görülmektedir. Şekil 4.10'da, yer altı su seviyesinde uzun vadede oluşan düşüşün deformasyon miktarını doğrudan nasıl etkilediği görülebilir. Yer altı su seviyesindeki değişiminin bir diğer önemli faktörü ise yağışlardır. İlkbaharda yağış arttıkça, yer altı suyu seviyesi de artmaktadır, 4.9a. Yer altı su seviyesinin artması sonucunda, yüzeyde mevsimsel olarak bir yükselme gerçekleşmektedir. Yaz sonuna doğru, yağışların azalmasıyla birlikte ters etki görülmekte ve bölgede çökme tekrar etkili olmaya başlamaktadır.



**Şekil 4.10** P1 noktasındaki LOS yer değiştirme miktarı ile 28372 numaralı kuyudaki su seviyesinin zamansal değişimi **(a)** Asc-160 ve **(b)** Des-65 yörüngeleri için birlikte gösterilmiştir. Kuyunun yeri Şekil 4.5a,b'de gösterilmektedir

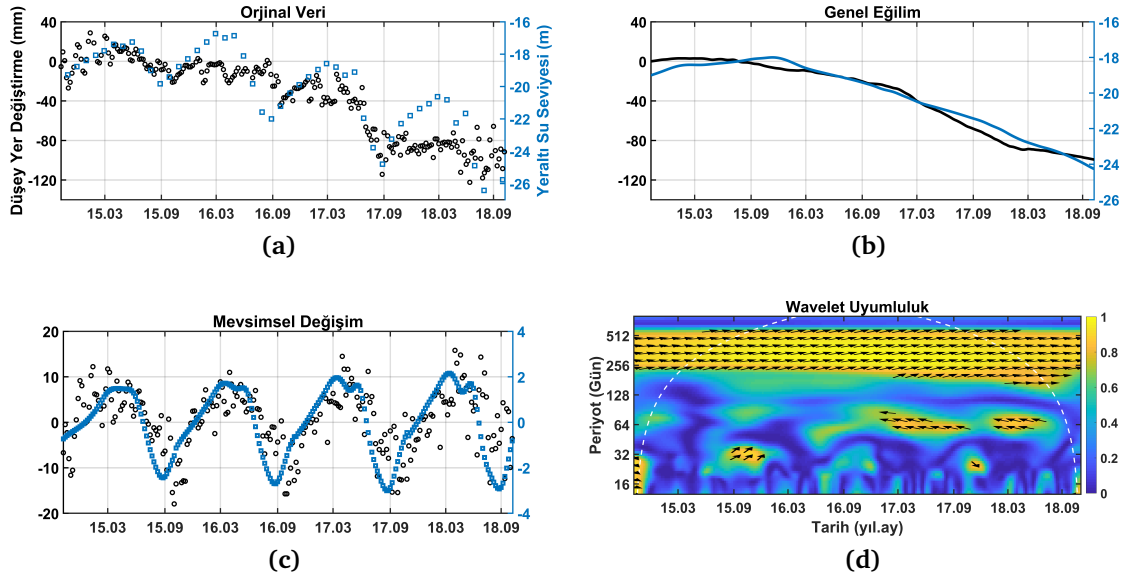
3B bileşenlerine ayrıştırma yöntemi ile P1 noktasında alçalan ve yükselen zaman serileri kullanılarak düşey yer değiştirme zaman serisi elde edilmiştir. Daha sonra, düşey yer değiştirme ve 28372 numaralı kuyuya ait yer altı su seviyesi klasik bileşenlerine ayrıştırma yöntemi kullanılarak genel eğilim ve mevsimsel değişim bileşenlerine ayrıştırılmış ve Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Her iki zaman serisinin

genel eğilim bileşeni incelendiğinde uzun vadede oldukça yüksek bir benzerlik oranı olduğu görülmektedir. Kısa vadede ise, yağış ve tarım sulama miktarının değişmesinin de etkisiyle yeraltı su seviyesinde mevsimsel değişiklikler gözlenmektedir. Benzer mevsimsel etki, deformasyon zaman serisinin mevsimsel değişim bileşeninde de görülmektedir.

Mevsimsel değişim bileşenleri arasındaki ilişkiyi daha iyi anlayabilmek adına iki verinin dalgacık (wavelet) uyumluluk değerleri hesaplanmıştır. Dalgacık dönüşümü ile zaman serisi içerisinde bulunan farklı frekansların ( $1/peri\,yot$ ) incelenmesi mümkün hale gelmektedir [105]. İki farklı zaman serisi içerisinde bulunan frekansların arasındaki çapraz ilinti ise dalgacık uyumluluk yöntemi ile hesaplanır [106]. Hesaplanan uyumluluk değerleri 0 ve 1 arasında değişmekte olup, uyumluluk değeri yüksek olan frekans değerlerinin her iki zaman serisinde de bulunduğu anlamına gelmektedir. Zaman serileri içerisinde benzer periyotlarda değişim gösteren veriler arasındaki ilişki, dalgacık uyumluluk değerleri ile hem genlik hem faz değerlerinde daha net ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.11d’de gösterilen düşey yer değiştirme ile yeraltı su seviyesi arasındaki dalgacık uyumluluk değerleri, 1 yıllık dönemlerde (365 gün) iki veri arasında yüksek bir frekans ilişkisi olduğunu göstermektedir. Bu ilişki bize 1 yıllık periyotlar içerisinde her iki zaman serisinin de benzer değişimler geçirdiğini göstermektedir. Okların yönü ise birim çemberdeki faz gecikmesine karşılık gelmektedir. Grafik üzerindeki okların yönleri incelendiğinde  $\sim 30^\circ$ ’lik bir açı bulunduğu görülmektedir. Birim çember üzerindeki  $\sim 30^\circ$  açı, 365 günlük periyot üzerinde yaklaşık olarak 25-30 güne karşılık gelmektedir. Bu veriler, yer değiştirme olgusunun 25-30 günlük bir gecikme süresi ile yeraltı su seviyesini takip ettiğini göstermektedir. Bu gözlemler doğrultusunda yer değiştirme miktarında gözlemlenen kısa süreli değişimlerin yeraltı su seviyesindeki değişimlerin sonucu olduğu söylenebilir.

#### 4.4 Bulgular ve Tartışma

Bolvadin bölgesindeki yüzey deformasyonlarının nedenlerini araştırmak için daha önce çeşitli çalışmalar yapılmıştır [61, 63, 65]. En önemli deformasyon sebebinin hidrolojik değişiklikler olduğu konusunda tartışma yoktur. Bununla birlikte, tektoniğin etkileri hakkında farklı yaklaşımlar vardır. [61] tektonik hareketlerin zemin yüzeyindeki deformasyonlara etkisini kabul etmese de, [63] yıkıcı bir deprem olmamasına rağmen, bölgedeki yoğun mikro-sismik aktivitenin ve buna bağlı nedenlerin yüzey deformasyonlarını etkilemiş olabileceğini öne sürmektedir. GNSS ve nivelman ağı ile zemin seviyesi ölçümleri yapılmış, yüzey yarıkları etrafındaki belirli noktalarda deformasyon hızları hesaplanmıştır. Bu tür teknikler ile kesin ölçümler



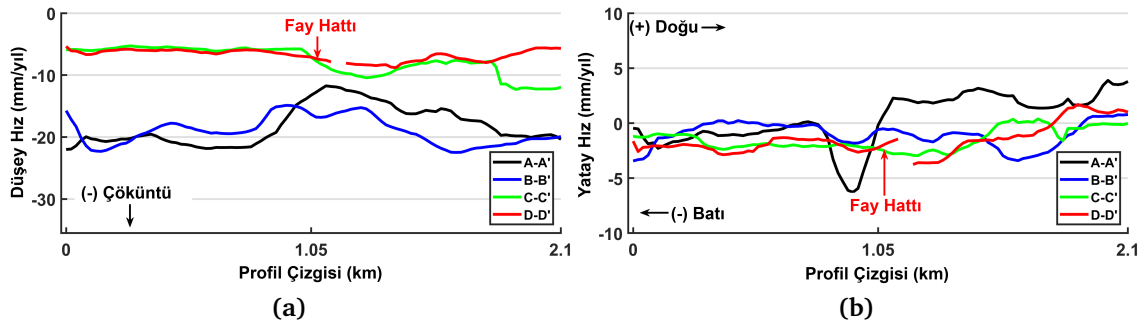
**Şekil 4.11 (a)** 28372 numaralı kuyuya ait yer altı su seviyesi değişimi ve aynı bölgeye ait düşey yer değiştirme zaman serisi. **(b)** Genel eğilim. **(c)** Mevsimsel değişim. **(d)** Mevsimsel değişimlerin wavelet(dalgacık) uyumluluk yöntemi ile karşılaştırılması

elde edilmesine rağmen, sadece belirli noktalarda sonuç üretilmesi, analiz kapasitesini mekânsal olarak sınırlamaktadır.

Bu bölümdeki çalışma ile Afyon-Akşehir Grabeni'nin ve Bolvadin bölgesinin yüzey deformasyon analizi, Sentinel-1 verileri ve çok zamanlı InSAR yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, LOS ortalama hız haritaları, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te gösterildiği gibi yükselen ve alçalan yörüngeler için üretilmiştir. Daha sonra, düşey ve yatay (D-B) yer değiştirme bileşenleri üretilmiş ve Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Ortalama hız haritalarına göre Bolvadin'in batı kesimleri bir bütün olarak düşey deformasyona maruz kalmıştır. Yer altı su seviyesindeki azalma ve alüvyal tortuların varlığı nedeniyle güneye doğru çökme hızı artarak 35 mm/yıl'a kadar çıkmaktadır. Düşey hareketler genellikle yumuşak alüvyonlu çökeltilerde gerçekleşmekte ve alüvyonlu çökeltilerden uzaklaştıkça ortalama düşey hız sıfıra yaklaşmaktadır. Ortalama deformasyon hızı ile bölgenin litolojik birimleri ile arasında yüksek bir bağıntının olduğu da rahatlıkla söylenebilir.

Şehrin doğu bölgesinde bulunan Bolvadin Fayı'nın deformasyon üzerindeki muhtemel etkilerini anlamak için fay boyunca belirli profillerde düşey yönde deformasyon hız değişimleri incelenmiştir. Bolvadin Fayı ve fayın güneybatı yönündeki muhtemel uzantısı dört farklı profil çizgisi ile birlikte Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Şekil 4.12'de ise profiller üzerindeki düşey ve yatay (D-B) ortalama deformasyon hız değişimlerine yer verilmiştir. Bolvadin Fayı boyunca, tektonik kaynaklı olabilecek belirgin veya tutarlı

düşey veya yatay deformasyon hız değişimi gözlemlenmemektedir. Bununla birlikte, özellikle yumuşak alüvyon çökelti üzerinde bulunan AA' ve BB' profilleri, Bolvadin fayı boyunca önemli farklılıklar göstermektedir. Bu asimetrik deformasyon desenleri, alüvyonlu sedimanlardaki farklı malzeme türlerinden kaynaklanmış olmalıdır. Çünkü Bolvadin Fayı'ndaki asismik kaymanın, fayın güney tarafında çökme yaratması beklenir. CC' ve DD' profilleri daha sert litolojik birimlerin üzerinde oldukları için deformasyon hız değişimlerinin daha durağan olduğu söylenebilir. Bolvadin Fayı ve çevresindeki alanda düşey deformasyon hızları genel olarak aynıdır. Dolayısıyla, faydan kaynaklanabilecek fay boyunca farklı bir hareket (fayın güney bloğunun düşmesi gibi) gözlemlenmemesi, fayın çöküntüye belirgin bir katkısı olmadığı anlamına gelmektedir.



**Şekil 4.12** Şekil 4.6'de gösterilen AA'-DD' profilleri boyunca ortalama hız. (a) Düşey ortalama hız. (b) Yatay (D-B) ortalama hız

Eber Gölü su yüzey alanı ile yükselen ve alçalan yörüngelerde elde edilen ortalama hız değerleri de karşılaştırılmıştır. Şekil 4.9b-c'de gösterildiği gibi, Eber Gölü'nün su yüzey alanının mevsimsel değişimi ile deformasyon miktarı arasında net bir ilintinin olduğu gözlemlenmektedir. Kuzeyden güneye doğru su yüzey alanındaki mevsimsel değişimler ile deformasyon zaman serileri arasındaki ilintinin arttığı söylenebilir. Mevsimsel değişimin farklı bölgeler üzerindeki etkisi, bölgenin ortalama deformasyon hızının standart sapmasına bakılarak da anlaşılabilir. Deformasyon hızındaki ortalama standart sapma miktarı, her iki veri kümesi için de kuzeyden güneye doğru 0,3 mm/yıl'dan 1,7 mm/yıl'a yükselmektedir. Standart sapmanın artması, mevsimsel değişimin doğrudan bir etkisidir. Eber Gölü'nü ile yer altı suları arasında doğrudan bir bağlantı olmasa da, hem Eber Gölü hem de yer altı suyu yağıştan beslenir ve iklim değişikliklerinden etkilenmektedir. Deformasyon hızları yer altı su seviyesi değişimleri 4.10a,b'de gösterildiği gibi karşılaştırılmıştır. Yer altı su seviyesindeki değişimler ile deformasyon eğilimleri arasında hem uzun vadede hem de kısa vadede oldukça yüksek bir ilinti vardır. Sonuç olarak, yer altı su seviyesi ve göl yüzey alanı ile deformasyon hız değişimleri arasındaki ilişki, hidrolojik değişimlerin deformasyon hızına olan etkilerini açıkça göstermektedir.

Bolvadin bölgesindeki yumuşak litolojik birimlerde yüksek deformasyon hızının varlığı, deformasyon hızı ile yer altı su seviyesi ve Eber Gölü'nün su yüzeyi arasındaki yüksek benzerlik, bölgedeki çökme olayının doğrudan hidrolojik etkilerin bir sonucu olabileceğini göstermektedir. Ayrıca, AA'-DD'deki profil çizgileri üzerindeki ortalama deformasyon hızları, Bolvadin Fayı'nın deformasyon üzerindeki etkileri hakkında net bir kanıt bulunmadığını göstermektedir. Ayrıca, fotoğrafların çekildiği a ve c bölgelerinde gözlemlenen kırılma ve çatlama gibi yüzey deformasyonları, Bolvadin fayına paralel olmayan neredeyse güney-batı kuzey-doğu yönündedir. Sonuç olarak, bölgede gözlemlenen yüzey deformasyonlarının, esasen yer altı suyunun aşırı kullanımı ve bölgedeki hidrolojik değişikliklerin bir sonucu olması oldukça yüksek bir ihtimaldir.

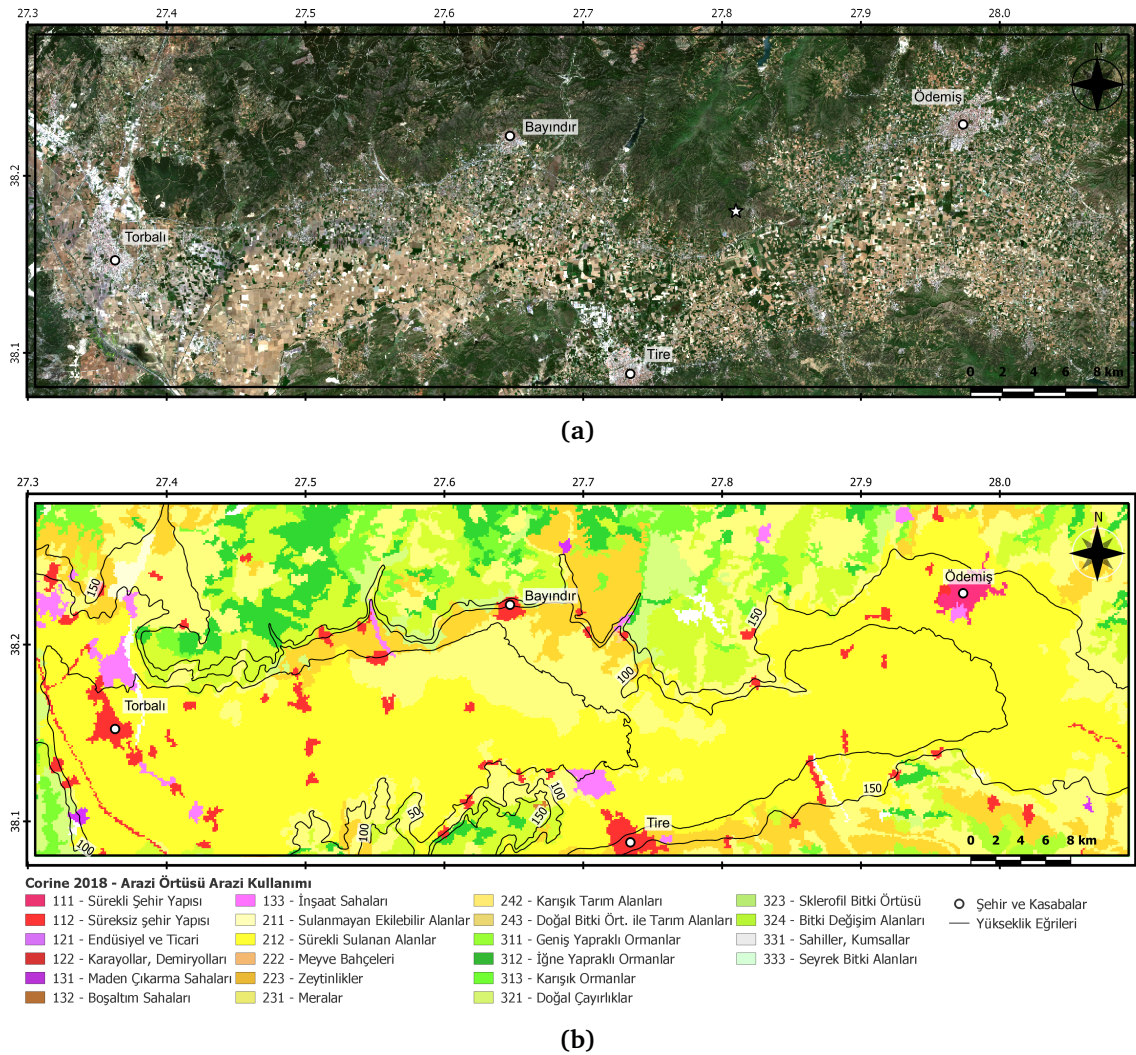
Son 10-20 yılda Türkiye'nin batısında yer alan Ege Bölgesi'nde herhangi bir yıkıcı deprem gerçekleşmeden yer yüzeyinde çökme, kırılma ve çatlama gibi zemin deformasyonları gözlemlenmiştir [59]. Afyon ili Bolvadin ilçesi, Manisa Sarıgöl, Aydın Söke, İzmir Kınık ve Ödemiş yerleşim yerleri ve çevreleri bu yeryüzü deformasyonlarının gözlemlendiği yerlerden sadece birkaçıdır. Sarıgöl'ün içinde yer aldığı Gediz Graben'i InSAR ve GNSS yöntemleri ile analiz edilmiş ve tektonik hareketlerle birlikte yer altı sularının aşırı kullanılmasının da yüzey deformasyonlarının oluşmasında etkili olduğu vurgulanmıştır [60]. Afyon-Akşehir Grabeni'nde yer alan Bolvadin ilçesi ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalarda, yüzey deformasyonun sadece yağış miktarındaki değişimler ve yer altı sularının aşırı kullanımı sonucunda olması daha muhtemel görülmüştür [61]. Bolvadin'in sismik hareketlilik anlamında oldukça yoğun bir bölgede yer alması sebebiyle, yüzey deformasyonlarında tektonik hareketlerin de etkili olabileceğini vurgulamıştır [63]. Bölüm 4'te detayları anlatılan analiz çalışmaları ile, Bolvadin bölgesi ve çevresi için öne sürülen fikirlere katkı sunulmaya çalışılmıştır. K.Menderes Grabeni içerisinde yer alan İzmir Ödemiş çevresinde uzun ve geniş zemin yarıkları gözlemlenmiştir. Noktasal olarak gerçekleştirilen kazı çalışmaları sonucunda, Ödemiş çevresinde oluşan yüzey deformasyonlarının temel olarak yer altı sularının aşırı kullanımı sebebiyle gerçekleştiği düşünülmektedir [64]. Fakat bu noktasal kazı çalışmaları dışında, K. Menderes Grabeni'nin tamamını kapsayan bir zemin deformasyon analiz çalışması, tarafımızca bilindiği kadarıyla daha önce gerçekleştirilmemiştir.

Daha önce K.Menderes Havzası ile ilgili çeşitli konularda birçok çalışma yapılmıştır. Mekansal-zamansal kuraklık analizi [107], tarımda sulama için kullanılan suların yönetimi [108], akiferin yeniden şarj olma potansiyeli [109], iklim değişikliğinin yer altı sularına olan etkisi [110], erozyon riski alanları [111], K.Menderes Grabeni'nin yapısal oluşumu [112] K.Menderes Havzası ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalardan sadece birkaçıdır. Ancak, bildiğimiz kadarıyla, tüm bölgenin ayrıntılı bir zemin deformasyon analizi daha önce hiç gerçekleştirilmemiştir.





Küçük Menderes Havzası oldukça verimli toprakların yer aldığı bir tarım bölgesidir, Şekil 5.2a. Havza ürün kalitesi ve verimi açısından yüksek tarım potansiyeline sahiptir. Başlıca tarım ürünleri zeytin, pamuk, buğday, patates ve tütündür [115]. 2018 yılında üretilen CORINE Arazi Örtüsü (CLC) haritasına göre, Şekil 5.2b, 212 etiketi ile ifade edilen sürekli sulanan araziler tarım alanlarının büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Yer altı suyu bölgenin ana sulama kaynağıdır. 2016 yılında gerçekleştirilen sulamanın %92.7'sinin yer altı suyundan sağlandığı tespit edilmiştir [116]. Tarım alanlarının sulanması dışında, yer altı suyu aynı zamanda endüstriyel su ihtiyaçları ve yerel halkın kişisel kullanımı için de kullanılmaktadır. Ancak çekilen toplam yer altı suyu miktarının %78'i tarım alanlarının sulanması için kullanılmaktadır [115]. Yer altı sularının aşırı kullanımı, bölgede yer altı su seviyesinin önemli ölçüde düşmesine sebep olmaktadır [109]. Yer altı su kuyularının tarihsel verileri, tüm havza boyunca yer altı su seviyesindeki düşüşü açıkça ortaya koymaktadır [116, 117].



**Şekil 5.2 (a)** Çalışma alanını gösteren Sentinel-2 optik görüntüsü ve **(b)** bölgeye ait Corine 2018 haritası. 212 etiket numarası ve sarı renk ile gösterilen sürekli sulanan topraklar, bölge genelinde çok geniş alanları kaplamaktadır

Bölgede, 1990 ve 2019 yılları arasında gerçekleşen depremler büyüklükleri ile birlikte Şekil 5.1 içerisinde gösterilmiştir [118]. Türkiye'nin aktif fay veri tabanı Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) Jeolojik Araştırma Dairesi tarafından yenilenerek kullanıma açıldı [119]. Şekil 5.1'de gösterilen çalışma alanı içerisindeki aktif faylar, yenilenen aktif fay haritasından alınmıştır. Batı Türkiye, tektonik açıdan oldukça aktif olmasına rağmen, K.Menderes Graben'nin yakın çevresinde çok fazla aktif fay bulunmamaktadır. Bu yüzden, bu bölge depremlerden daha az etkilenmiş görünmektedir. Yüzey deformasyonları ile ilgili yapılan çalışmalarda aktif fay hareketleri ile yer değiştirme yönü ve hızının ayrıntılı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Gediz Grabeni'nde gerçekleştirilen çalışmada [60], ve bölüm 4'te detayları aktarılan Bolvadin ve çevresinin deformasyon analizinde aktif fayların varlığı dikkate alınmıştır. K.Menderes Grabeni deformasyon bölgelerinde aktif fay hatları bulunmadığından, bu bölümde gerçekleştirilen analizlerde tektonik hareketlerin deformasyon ile olan ilişkisi incelenmemiştir.

## 5.2 Veri ve Yöntemler

### 5.2.1 Veri Seti

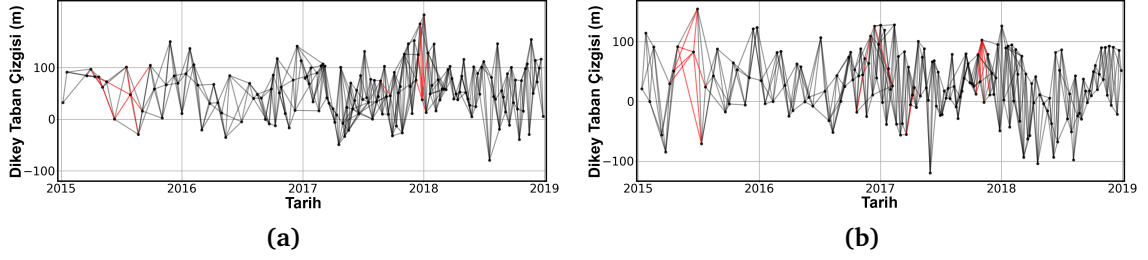
Sentinel-1, ESA Copernicus programı kapsamında işletilen ve verileri ücretsiz olarak dağıtılan ikiz bir uydu takımıdır. 3 Nisan 2014'te fırlatılan Sentinel-1 A ve 25 Nisan 2016'da fırlatılan Sentinel-1 B, aynı yörünge düzleminde çalışmakta ve her 6 günde bir aynı bölgeye ait veri sağlamaktadır. Sentinel-1 uyduları daha yüksek zamansal çözünürlük ve daha geniş kapsama alanı ile ERS-1/2 ve ENVISAT ASAR uydularının sürekliliğini sağlayan C-bant (~5.6 cm dalga boyu) sensör yüküne sahiptir. Sentinel-1'in tasarım görevlerinden biri, çökme ve heyelan izleme gibi yer gözlem uygulamaları için SAR interferometri oluşumunu kolaylaştırmaktır [120]. Yer hareketlerini izlemek için özellikle tasarlanmış ilk uydu olan Sentinel-1'in muazzam uyarıcı etkisiyle, InSAR yöntemi son yıllarda küresel bir izleme aracı haline gelmiştir [15].

Bu bölümde yer alan çalışmada, K.Menderes Grabeni'nde gerçekleşen yüzey deformasyonunu izlemek için 2015-2018 yılları arasında elde edilen Sentinel-1 SAR verileri analiz edildi. Analiz döneminin başında sadece Sentinel-1A verisi varken 2016 ortasından itibaren Sentinel-1B uydusunun da veri sağlamaya başlamasıyla, zamansal çözünürlük 6 güne yükseldi. TOPSAR IW çekim modunda, SLC formatında elde edilen Sentinel-1 ürünleri kullanıldı. İnterferogram oluşturmak için 167 yükselen ve 175 alçalan yörünge de olmak üzere toplamda 342 Sentinel-1 ürünü kullanıldı. Kullanılan Sentinel-1 SAR verileri hakkında ayrıntılı bilgiler Tablo 5.1'de gösterilmiştir. Ürün çiftleri Şekil 5.3'de gösterildiği gibi kullanılarak interferogramlar oluşturulmuştur.

Kırmızı çizgilerle gösterilen düşük kaliteli interferogramlar InSAR işlemlerinden çıkarılmıştır.

**Tablo 5.1** Sentinel-1 SAR veri detayları.

| Yörünge  | Rota | Yön Açısı° | Ort. Gelen Açısı° | Ürün | İnterferogram |
|----------|------|------------|-------------------|------|---------------|
| Yükselen | 131  | 350.06     | 38.99             | 167  | 541           |
| Alçalan  | 36   | 191.06     | 35,98             | 175  | 556           |



**Şekil 5.3 (a)** Yükselen (Asc-131) ve **(b)** alçalan (Desc-36) yörüngelerde kullanılan interferogram çiftleri ve aralarındaki dikey uzaklık mesafesi. Kırmızı çizgiler, düşük kaliteli interferogramları göstermektedir

### 5.2.2 Çok Zamanlı InSAR İşlemleri

İnterferogram oluşturmak için sadece iki SAR ürününün yeterli olduğu geleneksel InSAR yöntemi, uzun vadede yavaş gelişen deformasyon süreçlerini izlemek için yeterli olmayabilir [121, 122]. Geleneksel InSAR yönteminin, zamansal ilintisizlik ve atmosferik etkiler sebebiyle oluşan kısıtları bulunmaktadır. Bunların üstesinden gelmek için çok zamansal gelişmiş InSAR yöntemleri önerilmiştir [11–14]. Nesnelerin farklı saçılma özelliklerinden yararlanılarak geliştirilen çok zamansal InSAR yöntemleri temel olarak ikiye ayrılır. PSI olarak adlandırılan ilk yaklaşımda, uzun bir süre boyunca daha az zamansal ilintisizlik gösteren sürekli saçıcılar, PS, kullanılır [73]. İnterferogramlar, herhangi bir uzaysal/zamansal temel kriter olmadan, veri seti içerisindeki tek bir SAR görüntüsü referans alınarak oluşturulur. Bu yaklaşım ile yalnızca sürekli saçıcılık özelliği gösteren ölçüm noktaları analiz edilir. SBAS olarak adlandırılan ikinci yaklaşımda ise zamansal ve dikey uzaklık olarak birbirine daha yakın SAR ürünleri kullanılarak ilintisizliğin azaltılması amaçlanmaktadır [76]. Ürünlerin seçiminde zamansal ve dikey uzaklık açısından bir eşik değeri bulunduğu için, uzun süre kararlı özellikler gösteremeyen dağınık saçıcıların da, DS, analiz edilmesi sağlanmıştır. Birden çok referans görüntü kullanılması sebebiyle daha fazla interferogramın oluşturulmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat bu yaklaşımla, özellikle kırsal alanlarda daha fazla ölçüm noktası elde etmek mümkün hale gelmiştir [123]. Daha fazla PS noktası içeren kentsel

alanların deformasyon analizi için PSI yöntemi tercih edilmektedir. DS noktalarının hakim olduğu kırsal alanlarda ise, yüzey deformasyonlarının takibi için ilk tercih SBAS yöntemidir [12].

K.Menderes Grabeni, zamansal ilintisizliğin kaçınılmaz olduğu tarım alanlarının hakimiyeti altındadır, Şekil 5.2. Bu sebeple, çok zamanlı InSAR analiz yöntemi olarak SBAS yaklaşımının kullanılması daha uygun görülmüştür. SBAS yönteminde, interferogramların oluşturulması ve zaman serisi analizi şeklinde iki temel işlem grubu bulunmaktadır [12]. LiCSAR [124] ve LiCSBAS [125] açık kaynak yazılımları kullanılarak SBAS işlem adımları gerçekleştirilmiştir. LiCSAR araç seti Deprem, Volkan ve Tektonik Gözlem ve Modelleme Merkezi (the Centre for the Observation and Modelling of Earthquakes, Volcanoes, and Tectonics, COMET) tarafından geliştirilmiş bir Sentinel-1 InSAR verisi oluşturma ve işleme yazılımıdır. Küresel düzeyde tektonik ve volkanik bölgeleri izlemek için, Sentinel-1 interferogramları düzenli olarak oluşturulmakta ve COMET-LiCS web portalında ücretsiz olarak yayınlanmaktadır [126]. Her Sentinel-1 ürünü ile, kendisinden önceki ve sonraki ardışık üç ürün kullanılarak toplam altı interferogram oluşturulur. İnterferogramların topografik faz bileşenleri, SRTM 1 ark saniye (30 m uzamsal çözünürlük) kullanılarak kaldırılır [93]. Tüm interferogramlar Goldstein filtresi [127] ile işlenmiş ve SNAPHU yazılımı [128] ile  $0-2\pi$  faz döngüsünden kurtarılmıştır. Zaman serisi InSAR adımları ise LiCSBAS açık kaynak yazılımı ile gerçekleştirildi. İlk olarak, oluşturulan interferogramlar indirilmiş ve zaman serisi analizi için uygun hale getirilmiştir. Düz alanların çoğunlukta olduğu K.Menderes Grabeni'ne odaklanıldığından troposferik gürültünün düzeltilmesine ihtiyaç duyulmamıştır [129]. Düşük uyumluluğa sahip interferogramlar elendikten sonra deformasyon ortalama hız haritaları ve zaman serileri üretilmiştir.

### 5.2.3 Düşey ve Yatay Bileşenlerine Ayırma

InSAR yöntemi, gerçek yer değiştirmenin sadece SAR sensörünün bakış açısı doğrultusundaki (LOS) izdüşümünü ölçebilir. Bununla birlikte, çoğu uygulamada, yüzey hareketlerinin üç boyutlu (3B) ayrıntılarına ihtiyaç duyulmaktadır. 3B yer değiştirme bileşenlerini elde etmek için, farklı çekim geometrilerinde oluşturulmuş en az üç görüntü gereklidir [96]. Bununla birlikte, kutup yörüngesinde dönen uyduların hareket yönü K-G doğrultusuna neredeyse paraleldir. K-G yer değiştirme bileşeninin LOS üzerine izdüşümü neredeyse hiçbir bilgi sağlamaz. Bu sebeple, K-G bileşenin genellikle ihmal edilebilir [14]. İki farklı çekim geometrisine sahip yükselen ve alçalan yörüngelerde elde edilen Sentinel verileri, gerçek yer değiştirmenin düşey ve D-B bileşenlerini üretmek için yeterlidir. Bu çalışmada, 3B bileşenlerine ayrıştırma yöntemi olarak [130]'de önerilen yöntem kullanılmıştır. Yükselen ve alçalan veri

kümeleri için bulunan ölçüm noktaları aynı olmayabilir. Bir çekim geometrisinde yeterli uyumluluğu sağlayan noktalar, diğer çekim geometrisinde aynı uyumluluğu göstermeyebilir. Bu sebeple, sonuçlar uyumluluk kriteri kullanılarak maskelenmiştir. Sadece yeterli uyumluluğu gösteren noktalar, bileşenlerine ayrıştırma işleminde kullanılmıştır. Bununla birlikte, yükselen ve alçalan yörüngedeki ürünlerinin çekim tarihleri de aynı olmayabilir. Deformasyon zaman serileri, bileşenlerine ayırma işleminden önce ara değerlendirme yöntemi ile ortak bir zaman referansına alınmıştır.

#### 5.2.4 Zaman Serisi Bileşenlerine Ayırma

Zaman serisi sinyali, uzun ve kısa vadede farklı karakteristik özellikler gösterebilir. Değişimleri etkileyen davranışı daha etkili bir şekilde analiz etmek için zaman serisi sinyallerini alt bileşenlerine ayrıştırmak faydalıdır. Deformasyon zaman serileri ve yer altı su verilerini kısa ve uzun vadede daha iyi anlamak ve aralarındaki ilişkiyi ölçebilmek için alt bileşenlerine ayrıştırılmıştır. Genel yaklaşım, bir zaman serisi sinyalini,  $x$ , aşağıdaki gibi 3 alt bileşenine ayrıştırmaktır:

$$x = x_{genel} + x_{mev} + x_{fark} \quad (5.1)$$

$x_{genel}$  genel eğilimi,  $x_{mev}$  mevsimsel değişimleri ve  $x_{fark}$  ise geriye kalan bileşenleri gösterir. Mevsimsel bileşenin büyüklüğünde zaman içerisinde herhangi bir artış/azalma eğilimi yoksa, eklemeli ayrıştırma yaklaşımı kullanılır [83]. Klasik ayrıştırma yaklaşımında, genel eğilim ortalama filtresi kullanılarak hesaplanır. Filtrenin boyutu mevsim uzunluğuna göre seçilir. Genel eğilimin orijinal sinyalden çıkarılır. Daha sonra, mevsimsel bileşeni tahmin etmek için bir yıllık döngüde aynı döneme denk gelen her noktanın ortalaması alınır. Mevsimsel filtre boyutu yeterince uzun seçilirse, istikrarlı bir şekilde aynı değişimi gösteren mevsimsel etki oluşturulabilir.

Bu çalışmada kullanılan yer altı su seviyelerinin örnekleme zamanları ile Sentinel-1 verilerinin çekim tarihleri aynı değildir. Zaman serilerini bileşenlerine ayırma işlemine başlamadan önce, tüm yer altı su seviyesi verileri, düşey deformasyon zaman serileri ile aynı zaman referansına göre enterpole edilmiştir. Her iki Sentinel-1 uydusu çalışır durumdayken, 1 yılda elde edilen ortalama veri sayısı 61'dir. Bu nedenle, genel eğilimi elde etmek için kullanılan filtre boyutu da 61 olarak seçilmiştir. Mevsimsel değişimin büyüklüğü tüm yıllar için aynı olmak zorunda değildir. Analiz yıllarında toplam mevsim sayısı 4 olmasına rağmen, mevsimsel bileşen elde edilirken filtre boyutu 3 olarak seçilmiştir. Eşit kenarlı filtreler kullanıldığından, orijinal verinin hem başına hem de sonuna yapay verinin eklenmesi gerekmektedir. Aksi takdirde, ortalama



alma işlemi sonunda elde edilen alt bileşenlerin başında ve sonunda veri eksikliği gözlemlenecektir. Klasik bileşenlerine ayrıştırma yöntemi, kısa süreler içerisinde gerçekleşen hızlı değişiklikleri yumuşatma eğilimindedir. Bu tür dezavantajlar sebebiyle X11, SEATS, STL gibi daha karmaşık algoritmaların geliştirilmiştir [83]. Bu tür algoritmalar, genel eğilimdeki hızlı değişiklikleri yakalamak için daha gürbüz yaklaşımlar sergilemektedir. Aynı zamanda, uç noktalarda ek yapay veriye ihtiyaç duyulmamaktadır. Ancak yine de, veriler kısa olduğunda ve herhangi bir hızlı dalgalanmanın olmadığı durumlarda klasik yaklaşım kullanılabilir.

### **5.3 Analiz Sonuçları**

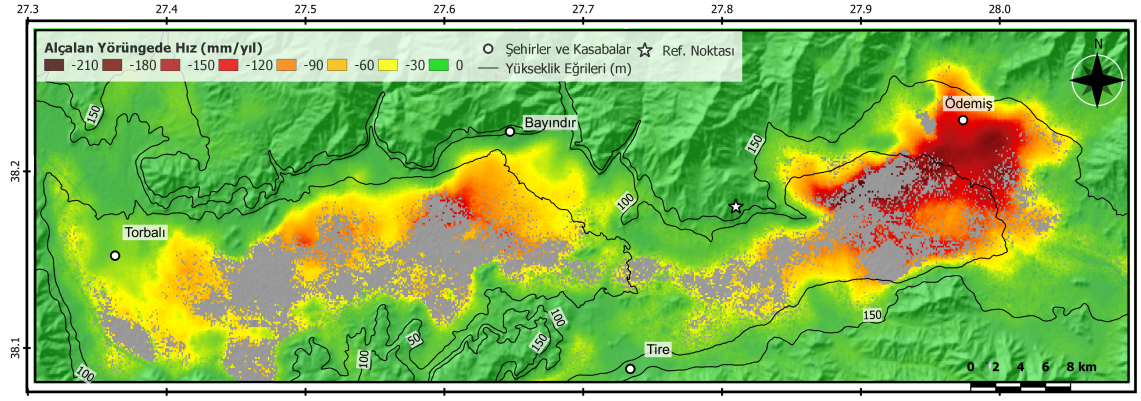
K.Menderes Grabeni 2015 Ocak ve 2019 Ocak tarihleri arasında elde edilen Sentinel-1 SAR verileri ve LiCSBAS çok zamanlı InSAR yöntemi ile analiz edilmiş ve 2 temel çıktı elde edilmiştir: ortalama hızı haritaları ve deformasyon zaman serileri. Ortalama hızı haritaları jeolojik birimlerle, zaman serileri ise yer altı su seviyesindeki değişikliklerle karşılaştırılmıştır.

#### **5.3.1 Ortalama Hız Haritaları**

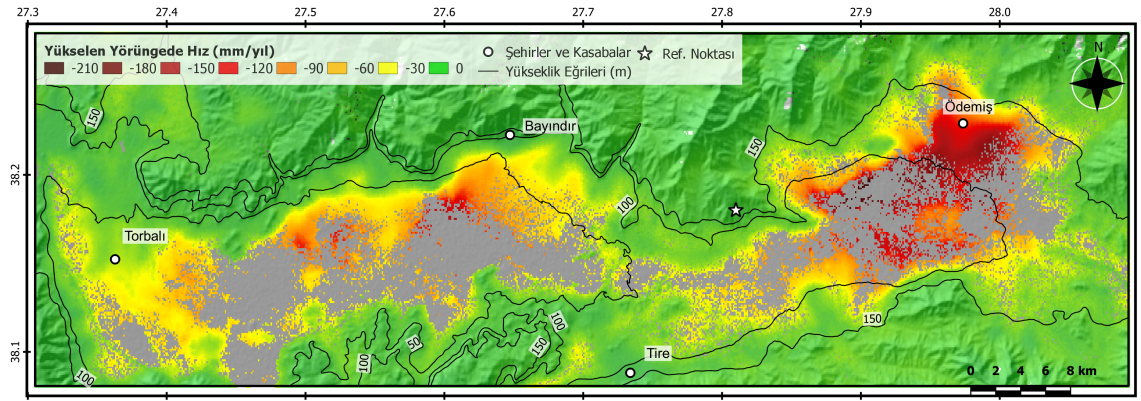
Yükselen ve alçalan Sentinel-1 veri kümeleri ile LOS'ta elde edilen ortalama hız haritaları Şekil 5.4a, b'de gösterilmiştir. Düşey ortalama hızı haritası ise Şekil 5.5'te gösterilmiştir. D-B doğrultusunda sadece küçük yer değiştirmeler tespit edildiğinden, yatay yönde harita üretilmemiştir. Daha güvenilir ölçüm noktaları elde etmek için, analiz sonuçları uyumluluk kriterine göre maskelenmiştir [125]. Sarıdan kırmızıya doğru değişim gösteren sıcak renkler (negatif değerler), LOS'ta sensörden uzaklaşmayı temsil ederken düşey doğrultuda çökme eylemine vurgu yapmaktadır. K.Menderes Grabeni'nin tamamı -3 ile -24 cm/yıl arasında değişen ortalama hız ile çökmeye maruz kalmıştır. En az -3 cm/yıl ile çökmeye maruz kalan toplam alan yaklaşık 688 km<sup>2</sup> 'dir. Ödemiş ve çevresi maksimum -28.6 cm/yıl'a ulaşan ortalama düşey hız ile en çok etkilenen bölgedir. Torbalı ve çevresi ile Bayındır'ın güney bölgesi de çökmeye maruz kalırken, Tire neredeyse durağan bir bölgede yer almaktadır. Genel olarak çalışma alanında doğudan batıya ve dışarıdan içe doğru çökme hızı artmaktadır.

#### **5.3.2 Jeolojik Birimler ile Karşılaştırma**

K.Menderes Graben'ini oluşturan jeolojik birimler ve ortalama düşey deformasyon hız eğrileri Şekil 5.6a'da gösterilmiştir. Deformasyon eğrileri, sürekliliği sağlamak için maskelenmemiş hız haritası kullanılarak oluşturulmuştur. K.menderes Grabeni, Torbalı'dan Ödemiş'e kadar görece düz bir zemin oluşturan alüvyon (Qa) yatakları

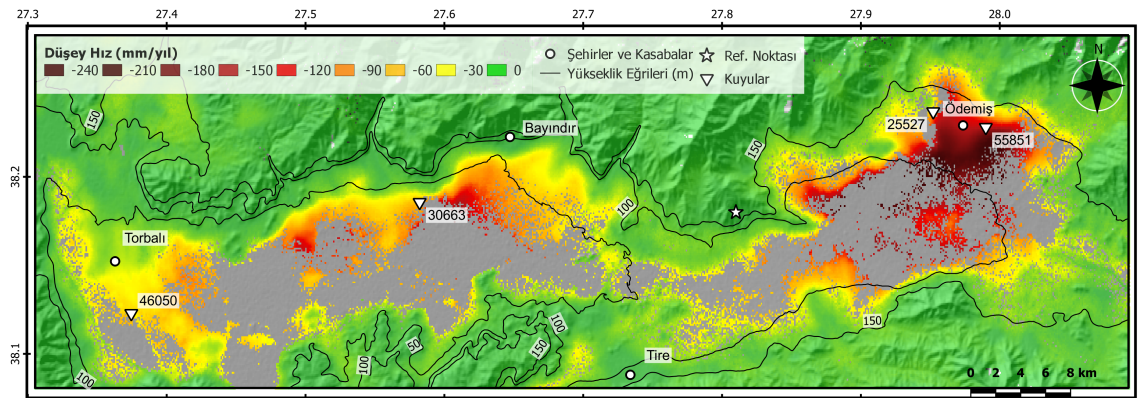


(a)



(b)

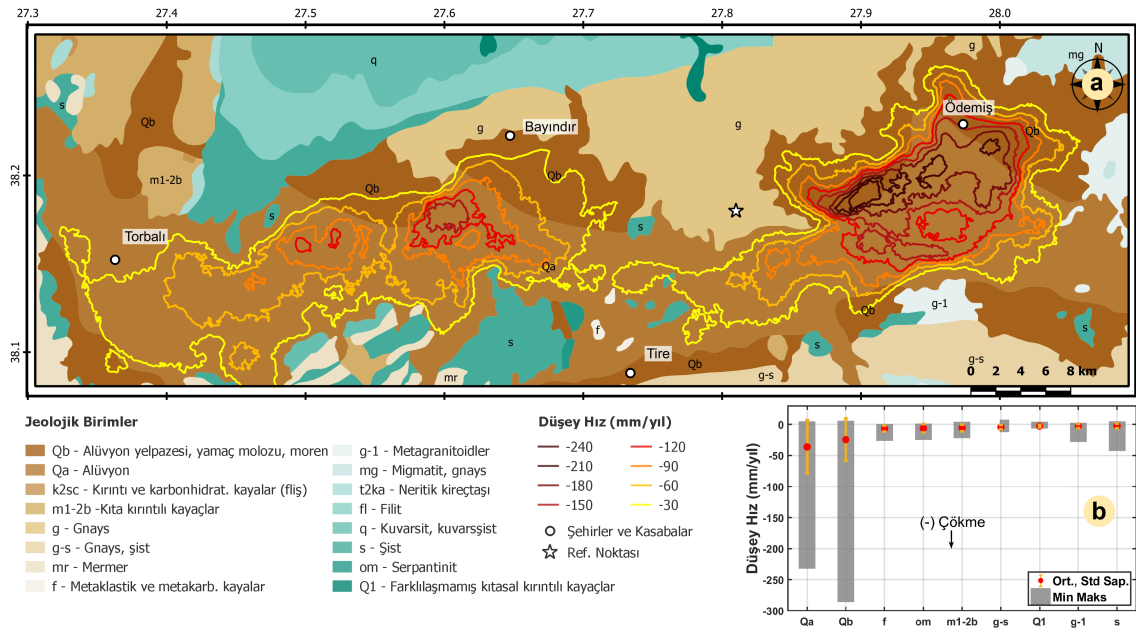
Şekil 5.4 K.Menderes Grabeni için (a) yükselen (Asc-131) ve (b) alçalan (Desc-36) yörüngelerde LOS ortalama hız haritaları



Şekil 5.5 K.Menderes Grabeni düşey ortalama hız haritası



ile karakterize edilebilir. Alüvyal yelpazesi, yamaç molozu ve moren (Qb) de alüvyon yataklarının yakınında geniş bir alana yayılmıştır. Çökme hızının en fazla olduğu jeolojik birimler Qa ve Qb olarak görülmektedir. Deformasyon hızı graben kenarlarında -3 cm/yıl'dan başlayarak iç kesimlere doğru yükselmektedir. Ödemiş'in güneyinde deformasyon hızı -24 cm/yıl'a kadar çıkmaktadır. Bu çökme hızı, bölgeyi dünyanın en hızlı çöken bölgelerinden biri haline getirmektedir. Ödemiş'in güneyinde, alüvyon yataklarının kalınlığı 270 m'ye kadar ulaşırken, Bayındır ve Torbalı'ya doğru kalınlık azalmaktadır [112]. Batıya doğru, alüvyon yatak kalınlığı ve deformasyon hızının azalması, iki olgu arasındaki doğrusal ilişkiyi göstermektedir.



**Şekil 5.6 (a)** MTA'dan alınan veriler doğrultusunda K.Menderes Grabeni'ni oluşturan jeolojik birimler. **(b)** Jeolojik birimler üzerinde gerçekleşen ortalama düşey deformasyon hızı ile ilgili istatistikler

Jeolojik birimler ve ortalama düşey hız arasındaki ilişki istatistik olarak Şekil 5.6b'de gösterilmektedir. Her jeolojik birim için ortalama, standart sapma, minimum ve maksimum deformasyon hızları hesaplanmıştır. Ortalama deformasyon hızı Qa ve Qb birimlerinde sırasıyla yaklaşık -3.6 ve -2.4 cm/yıl'dır. Diğer jeolojik birimlerde ise deformasyon hızı neredeyse sıfıra düşmektedir. Bölgedeki maksimum deformasyon hızı -28.6 cm/yıl ile Ödemiş'in güneybatısında yer alan Qb birimlerinde gözlemlenmiştir. İstatistiksel olarak, alüvyon ve alüvyon yelpazeleri gibi yumuşak sedimanların varlığı ile çökme hızı arasında çok yüksek bir ilinti olduğu açıkça görülmektedir.

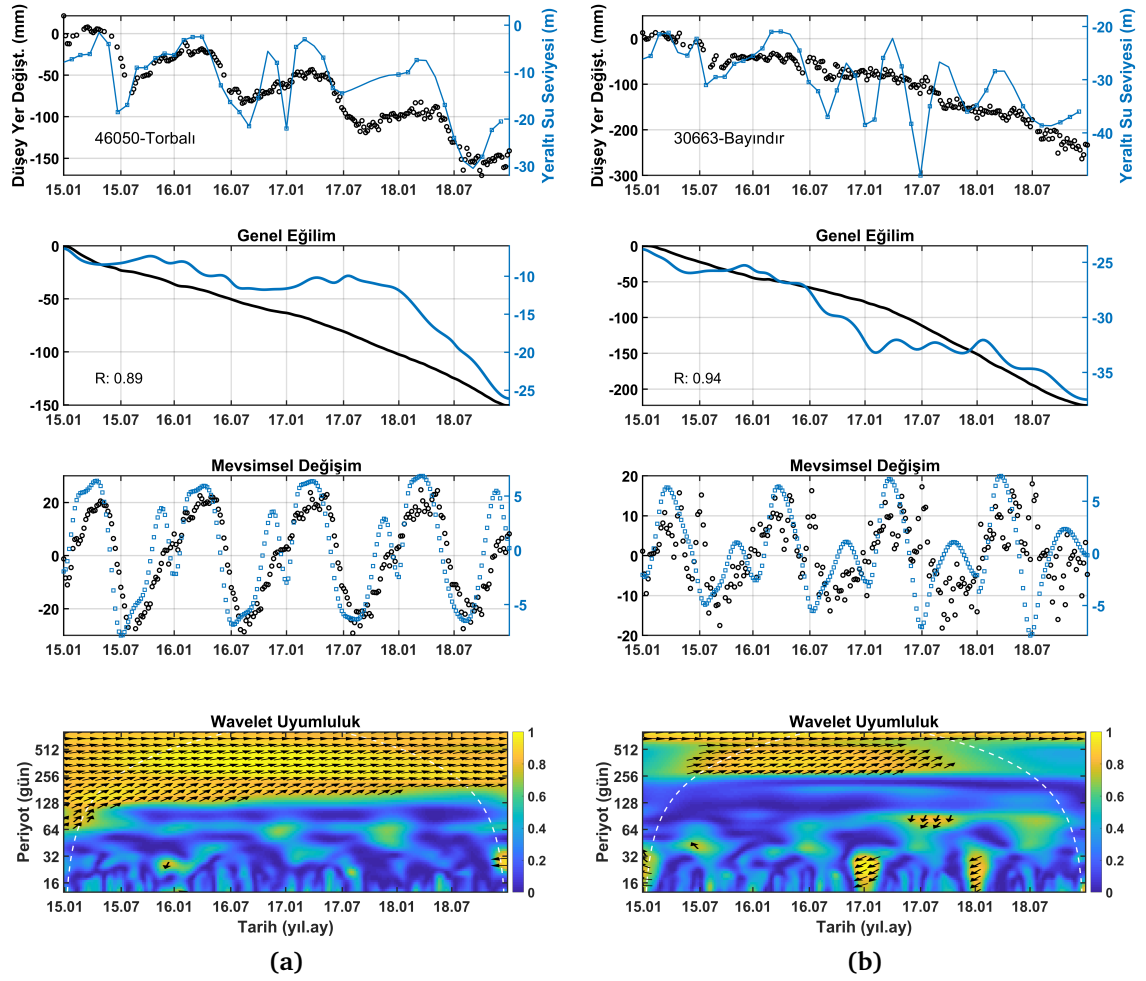
### 5.3.3 Deformasyon Zaman Serileri ve Yer Altı Su Seviyesi

Düşey yer değiştirme zaman serileri, belirli kuyu konumları için yer altı su seviyesi değişiklikleri ile birlikte Şekil 5.7 ve 5.8'de gösterilmiştir. Bu çalışmada dört kuyuya ait yer altı su seviyesi bilgileri kullanılmıştır: Torbalı'nın güneyinde yer alan 46050 numaralı kuyu, Bayındır yakınlarındaki 30663 numaralı kuyu ve Ödemiş çevresinde yer alan 25527 ile 55851 numaralı kuyular. Kuyuların konumları Şekil 5.5'te üçgen sembollerle gösterilmiştir. Dört yılda düşey doğrultuda gerçekleşen toplam yer değiştirme miktarı Torbalı'daki kuyu noktasında 15 cm, Bayındır'da 30 cm, Ödemiş'teki kuyu noktalarında ise 30 ve 60 cm'dir. Aynı yıllar içerisinde, yer altı su seviyesindeki düşüş aynı sırayla yaklaşık 25, 15, 35 ve 10 m'dir. Son yıla ait veri bulunmayan 25527-Ödemiş kuyusunda olduğu gibi su seviyesi ile ilgili ölçüm yapılmayan zamanlar bulunmaktadır. Ayrıca su seviyelerinin ölçümleri de düzensiz aralıklarla yapılmıştır. Yine de eldeki veriler, azalan su seviyeleri ile düşey yer değiştirme miktarları arasında kaçınılmaz bir ilişki olduğunu göstermektedir. Bu ilişkiyi nicel olarak ölçmek için zaman serileri genel eğilim ve mevsimsel değişim bileşenlerine ayrıştırılmış ve bileşenler kendi içlerinde karşılaştırılmıştır.

Zaman serilerinde klasik bileşenlerine ayrıştırma yöntemi kullanılarak düşey yer değiştirme ve yer altı su seviyeleri için genel eğilim ve mevsimsel değişim bileşenleri hesaplanmış ve sırasıyla Şekil 5.7 ve 5.8'de gösterilmiştir. Hemen hemen tüm kuyulardaki yer değiştirme zaman serileri ve yer altı su seviyesi değişimleri, tüm yıllar için genel bir düşüş eğilimi göstermektedir. Genel eğilim çizgileri arasındaki ilinti katsayıları, oldukça iyi bir benzerliğin göstergesidir. 55851-Ödemiş kuyusundaki ilinti katsayısı 0.64 R değeri ile kuyular içerisindeki en düşük değeri oluşturmaktadır. Aslında, ilk 2,5 yılda, her iki veri arasında yüksek bir ilinti var gibi görünmektedir. Ancak son 1,5 yılda yer altı su seviyesi artmaya başlarken, düşey yer değiştirme benzer bir hızda azalmaya devam ederek ilinti değerini azaltmıştır.

46050-Torbalı kuyusu için elde edilen düşey yer değiştirme zaman serisindeki mevsimsel etki orijinal veri de bile oldukça rahat bir şekilde gözlemlenebilmektedir. Diğer kuyularda ise dönemsel etki mevsimsel değişim bileşenleri hesaplandıktan sonra görünür hale gelmiştir. Yer değiştirme zaman serilerinde gözlemlenen mevsimsel değişim frekansı daha düzenli görünmektedir. Yer altı su seviyelerinde ise aynı mevsim içerisinde bile sık değişimler gözlemlenmektedir. Bu iki zaman serisinin mevsimsel değişimleri arasındaki ilişkiyi daha iyi inceleyebilmek için dalgacık (wavelet) uyum analizi yapılmıştır. Dalgacık dönüşümü, iki zaman serisi arasında periyod ve faz açısından ortak mevsimsel değişim desenlerinin tanımlanmasını sağlar. Yüksek uyumluluk değerleri, her iki sinyalin de o dönemler içinde benzer şekilde değiştiğini göstermektedir. Hesaplanan dalgacık uyumluluk değerleri Şekil 5.7 ve

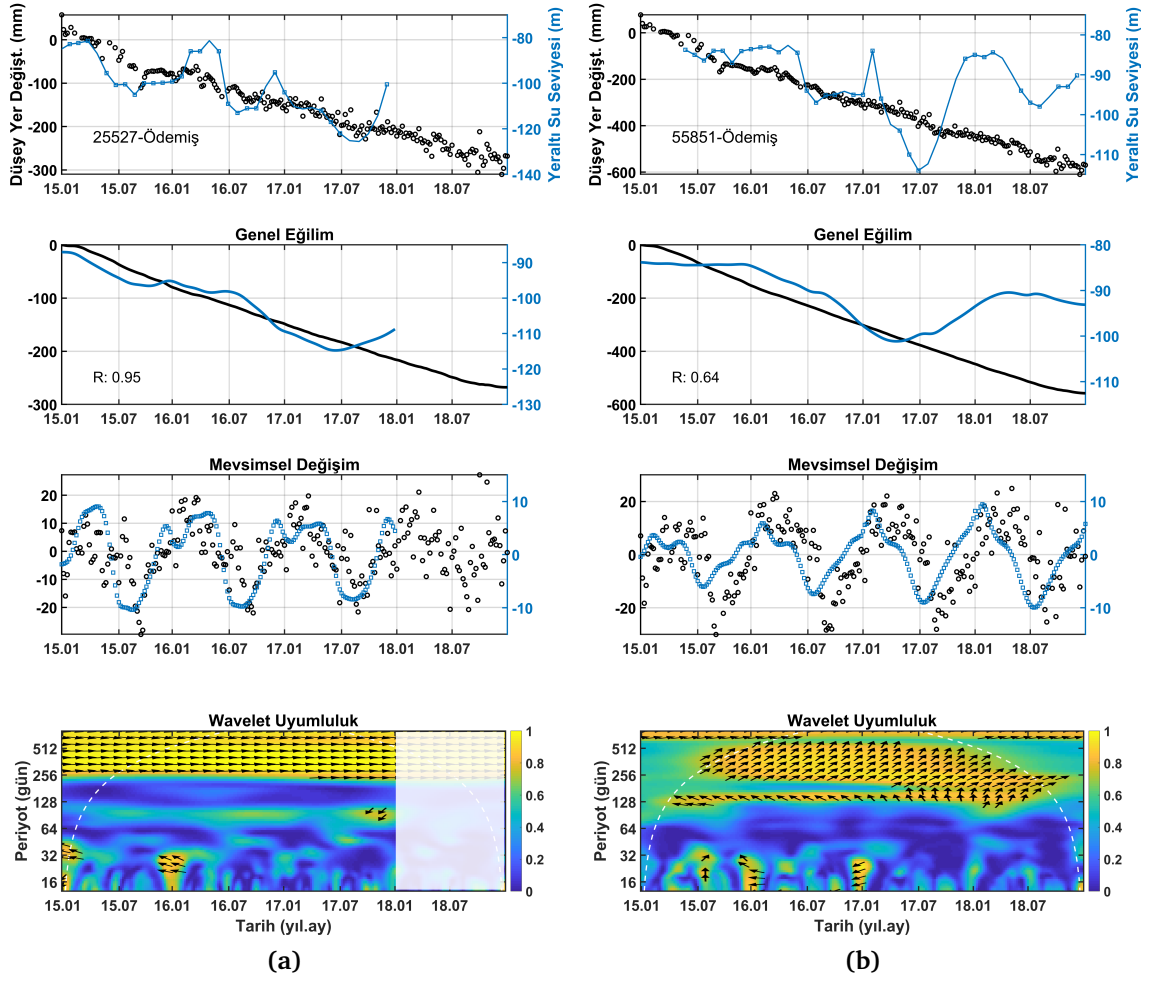
5.8’de gösterilmiştir. Her iki veri arasında 365 gün, 1 yıl, gibi zaman dilimi civarında çok yüksek bir ilinti olduğu görülmektedir. 46050-Torbalı ve 25527-Ödemiş kuyularında tüm tarihlerde 365 gün civarında, sürekli olarak yüksek bir uyum değeri görülmektedir. Diğer kuyularda ise uyumluluk değeri son yılda azalmaktadır. Grafiklerdeki oklar, zaman serilerinin faz ilişkilerini göstermektedir. Okların yönü, birim çemberdeki faz gecikmesine karşılık gelir. 46050-Torbalı ve 25527-Ödemiş kuyularında olduğu gibi, ok yönünde oluşan 30°’lik bir açı, düşey yer değiştirmenin yeraltı su seviyesindeki değişimi yaklaşık 30 günlük bir gecikmeyle takip ettiğini göstermektedir.



**Şekil 5.7 (a) 46050-Torbalı ve (b) 30663-Bayındır kuyuları için düşey yer değiştirme zaman serileri ve yer altı su seviyesi değişimleri. Zaman serileri genel eğilim ve mevsimsel değişim bileşenlerine ayrıştırılmıştır. Wavelet uyumluluk değerleri ile mevsimsel değişimler karşılaştırılmıştır**

## 5.4 Bulgular ve Tartışma

Yer altı su seviyesindeki azalma, konsolide olmayan tortular üzerinde çökmeye neden olmaktadır. Bu yaklaşım ilk olarak [58] tarafından kavramsallaştırılmıştır.



**Şekil 5.8 (a) 25527-Ödemiş ve (b) 55851-Ödemiş kuyuları için düşey yer değiştirme zaman serileri ve yer altı su seviyesi değişimleri. Zaman serileri genel eğilim ve mevsimsel değişim bileşenlerine ayrıştırılmıştır. Wavelet uyumluluk değerleri ile mevsimsel değişimler karşılaştırılmıştır**

Oldukça iyi bilinen bu teori, akifer sistemi üzerindeki toplam basıncın, taneler arası basınç ve gözenek sıvısı basıncının toplamı olduğunu ifade etmektedir. Taneler arası oluşan basınç jeolojik ortamın basit bir sonucudur. Taneler arası oluşan basınç aynı zamanda tanecik iskeleti olarak da ifade edilmektedir. Gözenek basıncı ise gözenek boşluklarında bulunan yer altı suyu tarafından oluşturulmaktadır. Yer altı su seviyesindeki düşme uygulanan sıvı basıncın düşmesine sebep olur. Sıvı basıncının düşmesi ile birlikte tanecik iskeleti üzerindeki basınç artmaktadır. Taneciklerin oluşturduğu iskelet üzerindeki artan basınç, ortamın sıkışmasına ve zeminin çökmesine sebep olur.

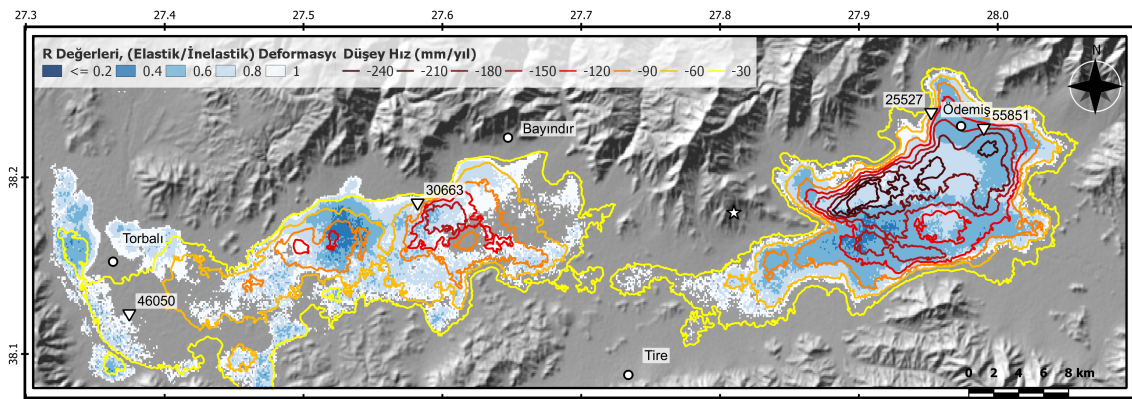
K.Menderes Grabeni'nde gözlemlenen çökmenin sebebi en basit şekilde yukarıda bahsedilen yaklaşımla açıklanabilir. Genel olarak, düşey yer değiştirme zaman serileri ve yer altı su seviyesindeki değişimler hem uzun hem de kısa vadede çok yüksek bir ilinti göstermektedir. Yer altı su seviyesinde uzun bir süre boyunca gözlemlenen azalma eğilimi zeminde çökmeye sebep olmaktadır. Bununla birlikte, yer altı suyunun mevsimsel olarak artması ya da azalması, zeminin de yükselmesine veya çökmesine sebep olmaktadır. Dahası, çökme çoğunlukla  $Q_a$  ve  $Q_b$  gibi yüksek oranda sıkıştırılabilir yumuşak alüvyal çökeltelerde meydana gelmiştir. Sonuç olarak, K. Menderes Grabeni'nde gözlemlenen çökmenin temel sebebinin yer altı sularının aşırı kullanımı olduğu söylenebilir. Genel eğilim ve mevsimsel değişimler yer altı suyu seviyesi ile düşey yer değiştirme arasında genellikle uyum göstermektedir. Ancak 55851-Ödemiş kuyusunda son 1,5 yılda yer altı su seviyesi yaklaşık 10 m artmasına rağmen, çökme eğiliminde bir değişiklik olmadığı görülmektedir. Bu nedenle, bölgede gözlemlenen çökmenin çeşidini, geri döndürülebilir olup olmadığının daha detaylı incelenmesi gerekmektedir.

Zeminde oluşan deformasyonun tersine çevrilebilir (geri döndürülebilir) olup olmadığını anlamamanın bir yolu, yer değiştirmenin esnekliğine bakmaktır. Daha önce farklı çalışmalarda, elastik bileşen ile inelastik deformasyon bileşeninin karşılaştırması olarak basitçe formüle edilen  $R$  değerinin kullanılması önerilmiştir [45, 131]. Uzun sürede gerçekleşen çökme eylemi ile ince taneli topraklar konsolide olduğundan, uzun vadede gözlemlenen çökme eğiliminin inelastik deformasyona sebebiyet verdiği düşünülmektedir. Çökme miktarında, kısa zaman dilimlerinde gözlemlenen periyodik çökme ve yükselme eğilimleri ise elastik deformasyon olarak kabul edilir. Bu nedenle, yer değiştirme zaman serisini oluşturan genel eğilim bileşeni inelastik deformasyonu yansıtırken, mevsimsel değişim bileşeni ise elastik deformasyon çeşidini işaret etmektedir. Tek bir ölçüm noktasının,  $R$  değeri olarak ifade edilen metriği şu

şekilde hesaplanır:

$$R = d_{el}/d_{in} \quad (5.2)$$

burada  $d_{el}$ , elastik deformasyon miktarını ifade etmekte ve mevsimsel bileşende maksimum ve minimum değer arasındaki fark ile bulunmaktadır.  $d_{in}$  ise bir yıl içerisinde gözlemlenen toplam yer değiştirme miktarı olan inelastik deformasyonu ifade etmektedir. Ölçüm noktalarında sabit bir mevsimsel değişim elde etmek için mevsimsel yumuşatma filtresinin boyutu uzun seçilmiştir. Bu şekilde tüm ölçüm noktaları için  $R$ -değerini hesaplamak daha basit hale getirilmiştir. Bu işlemler sonunda elde edilen  $R$ -değerleri haritası Şekil 5.9'da gösterilmiştir. Sonuçlar düşey deformasyon eğrileri ile üst üste bindirilerek gösterilmiştir. Mekansal sürekliliği sağlamak için uyumluluk maskesi ile filtrelenmemiş düşey deformasyon hız haritaları kullanılmıştır. 1'den büyük  $R$  değeri, düşey yer değiştirme eyleminde baskın bileşenin elastik olduğunu gösterirken, 1'den küçük değerler inelastik deformasyonun baskın olduğunu göstermektedir. 0'a yakın değerler, yüksek inelastik deformasyonu ve zeminde geri dönüşü olmayan bir sıkışma eyleminin gerçekleştiğini göstermektedir. Hesaplanan  $R$  değeri haritası, bölgede inelastik deformasyonun baskın bileşen olduğunu göstermesine rağmen, çalışma alanında elastik deformasyon da gözlenmektedir. Genel olarak, yüksek bir çökme hızı olan bölgelerde inelastik deformasyonun bulunduğu söylenebilir. Bununla birlikte, ortalama çökme hızının -6 cm/yıl'a kadar ulaştığı bazı bölgelerde bile hala elastik deformasyonun mevcut olduğu görülebilir. Bazı bölgelerde ise, ortalama çökme hızı -3 cm/yıl'ın altında olmasına rağmen, yüksek bir inelastik deformasyonun etkisini gösteren 0,6 civarında  $R$  değerleri görülebilir. Bu nedenle, yüksek bir çökme hızının varlığı her zaman inelastik bir deformasyon oluşacağı anlamına gelmez.



**Şekil 5.9**  $R$  değerleri ( $d_{el}/d_{in}$ ) ortalama düşey deformasyon hız eğrileri ile birlikte gösterilmiştir.  $R$  değerlerinden sadece 0-1 arasındaki inelastik deformasyon aralığı gösterilmiştir

Bölgede gerçekleşen deformasyon şiddetini değerlendirmek için kullanılan bir başka yaklaşım ise, düşey yer değiştirme miktarı ile yer altı su seviyesindeki değişiminin göreceli olarak karşılaştırılmasıdır. Sadece yer değiştirme zaman serileri kullanılarak yapılan analizler ile kesin bir yargıya varmak yerine, bu şekilde karşılaştırmalı bir tutum daha somut sonuçlar sağlayabilir. Bu ilişki, akifer sisteminde iskelet depolama katsayısını (sıkıştırılabilirlik),  $S_k$ , bulmamızı sağlayan basınç-gerilme analizi olarak tanımlanır [132].  $S_k$  şu şekilde hesaplanır:

$$S_k = \Delta d / \Delta h_s \quad (5.3)$$

$$S_k = S_{kv} + S_{ke} \quad (5.4)$$

$\Delta d$  düşey yer değiştirme farkını ve  $\Delta h_s$  yeraltı su seviyesindeki değişimi temsil eder. Deformasyon türüne bağlı olarak,  $S_k$  elastik iskelet depolama katsayısı,  $S_{ke}$ , ve inelastik iskelet depolama katsayısı,  $S_{kv}$  olmak üzere iki bileşen içerebilir [133, 134]. Buna bağlı olarak, düşey yer değiştirme farkı elastik,  $\Delta d_{el}$  veya inelastik  $\Delta d_{in}$  olarak değiştirilir. Elastik yer değiştirme sırasında yer altı su seviyesi değişimi  $\Delta h_{s_{el}}$ , inelastik yer değiştirme esnasında ise  $\Delta h_{s_{in}}$  olarak güncellenir. İnelastik düşey yer değiştirme, uzun vadede genel eğilim çizgisindeki değişimle aynı iken, elastik yer değiştirme ise kısa vadede mevsimsel bileşen içerisindeki maksimum ve minimum değer arasındaki fark ile ifade edilebilir.

Yer altı su seviyesindeki değişim eğilimleri, analiz dönemi boyunca farklılık göstermektedir. 46050-Torbalı kuyusunun su seviyesindeki düşüş eğilimi son yıllarda hızlanmaktadır. 55851-Ödemiş kuyusundaki yer altı su seviyesi düşüşü, analiz döneminin ikinci yarısında sona ermiş, daha sonra önce bir yükselme eğilimi sonrasında ise durağanlık gözlemlenmektedir. Bu nedenle,  $S_{ke}$  ve  $S_{kv}$  değerleri tüm kuyular için yıllık olarak hesaplanmış ve Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Yer değiştirme zaman serileri analiz süresi boyunca doğrusal bir düşüş eğilimi gösterdiğinden,  $R$  değerleri bütün dönem için tek bir değer olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.9’de konumları gösterilen kuyular, çoğunlukla 1’in altında  $R$  değerlerinin bulunduğu ve inelastik deformasyon türünün baskın olduğu bölgelerde yer almaktadır. Sadece 46050-Torbalı kuyusu elastik aralıkta, 1.55808  $R$  değerinin bulunduğu bölgede yer almaktadır. Şiddetli bir inelastik sıkıştırma, elastik sıkıştırmadan birkaç derece daha büyük olabilir [132, 135]. 55851-Ödemiş kuyusu  $S_{kv}$  değerinin 0.47053’e ulaştığı, en şiddetli inelastik deformasyonun olduğu kuyu bölgesidir. Bu kuyuda ölçülen yer altı su seviyesi 2015 ve 2018 yıllarında neredeyse sabit olmasına rağmen, kuyu çevresinde -15 cm/yıl hızında bir çökme meydana gelmiştir. Ayrıca,  $S_{kv}$  ile tutarlı olarak, 0.44758 ile

55851-Ödemiş kuyusu en düşük  $R$  değerine sahiptir. Yer altı su seviyesinde sabit bir düşüş olmadığı için yıllık  $S_{ke}$  ve  $S_{kv}$  değerleri istikrarsızdır. 46050-Torbalı kuyusu da dahil olmak üzere tüm kuyular neredeyse bütün yıllar için daha büyük bir  $S_{kv}$  değerine sahiptir. Bununla birlikte, 46050-Torbalı kuyusunda  $S_{ke}$  ve  $S_{kv}$  değerleri arasındaki farklar diğer kuyulara göre çok daha azdır. Özetlemek gerekirse, elastik/inelastik iskelet depolama katsayısı değerleri,  $R$ -değer analizi sonuçlarını doğrulamaktadır. Baskın inelastik deformasyonu gösteren daha düşük  $R$  değerleri için,  $S_{kv}$ ,  $S_{ke}$ 'den çok daha büyüktür.

**Tablo 5.2** Her bir kuyu için inelastik iskelet depolama katsayısı ( $S_{kv}$ ), elastik iskelet depolama katsayısı ( $S_{ke}$ ) ve elastik deformasyon/inelastik deformasyon oranı ( $R$ ).

| Kuyu           | Yıl  | $S_{kv}$ | $S_{ke}$ | $R$     |
|----------------|------|----------|----------|---------|
| 46050-Torbalı  | 2015 | 0.01668  | 0.00382  | 1.55808 |
|                | 2016 | 0.00722  | 0.00423  |         |
|                | 2017 | 0.02185  | 0.00415  |         |
|                | 2018 | 0.00337  | 0.00391  |         |
| 30663-Bayındır | 2015 | 0.02031  | 0.00365  | 0.77739 |
|                | 2016 | 0.00515  | 0.00321  |         |
|                | 2017 | 0.05900  | 0.00249  |         |
|                | 2018 | 0.01328  | 0.00222  |         |
| 25527-Ödemiş   | 2015 | 0.00819  | 0.00219  | 0.84989 |
|                | 2016 | 0.00485  | 0.00234  |         |
|                | 2017 | 0.01151  | 0.00281  |         |
|                | 2018 | -        | -        |         |
| 55851-Ödemiş   | 2015 | 0.47053  | 0.00613  | 0.44758 |
|                | 2016 | 0.01145  | 0.00386  |         |
|                | 2017 | 0.01952  | 0.00290  |         |
|                | 2018 | 0.03519  | 0.00259  |         |



## 6 SONUÇ VE ÖNERİLER

---

Son 20 yılda, Ege Bölgesi'nin çeşitli yerlerinde, yıkıcı bir deprem gerçekleşmeden zeminde oluşan çatlak, açılma ve kırılma gibi yüzey deformasyonları gözlemlenmiştir. Bu tez kapsamında, raporlanan yüzey deformasyonlarının oluşum mekanizmaları anlamaya yardımcı olmak adına iki farklı çalışma bölgesi seçilmiştir. Birinci bölge, oldukça yoğun yüzey deformasyonlarının gözlemlendiği Afyon'da bulunan Bolvadin ilçesi ve Afyon-Akşehir Grabeni'dir. İkinci çalışma bölgesi ise yine şiddetli yüzeysel deformasyonların gözlemlendiği İzmir, Ödemiş ilçesi ve içerisinde bulunduğu K.Menderes Grabeni'dir.

Birinci çalışma bölgesinde yer alan Bolvadin'de bulunan aktif fay hattının varlığı yüzey deformasyonlarının oluşum mekanizmaları konusunda iki farklı görüşün ortaya çıkmasına sebebiyet vermiştir. İlk görüşe göre, yüzey deformasyonlarının oluşum sebebi sadece hidrolojik etkenler ve yer altı sularının aşırı kullanılmasıdır [61]. Diğer görüşe göre ise, yer altı sularının aşırı kullanılması yüzey deformasyonlarının oluşmasında oldukça etkili olsa da tek sebep değildir. Bolvadin ilçe merkezine kadar uzanan aktif fay hattının da yüzey deformasyonlarının oluşmasına katkı da bulunduğu belirtilmiştir [63]. Bu tez çalışması kapsamında, Bolvadin ilçesini de içerisine alan Afyon-Akşehir Grabeni'nin tamamı çok zamanlı InSAR yöntemi ile analiz edilerek Bolvadin'de gözlemlenen yüzey deformasyonlarının oluşum sebeplerinin anlaşılmasına katkı sağlanmıştır.

Afyon-Akşehir Grabeni ve içerisinde yer alan Bolvadin ilçesi, Ekim 2014 ile Ekim 2018 arasındaki zaman diliminde elde edilen tüm Sentinel-1 SAR verileri kullanılarak çok zamanlı InSAR yöntemi ile analiz edilmiştir. Elde edilen ortalama hız haritaları incelendiğinde, Bolvadin ilçesi ve çevresinin çeşitli hızlarda olmak üzere çökmeye maruz kaldığı görülmüştür. Çöküntü şiddetinin daha yüksek olduğu Bolvadin'in güney bölgesinde ortalama çöküntü hızı 35 mm/yıl'a kadar varmaktadır. Fakat sadece Bolvadin ilçesi ve çevresinin değil, Afyon-Akşehir Grabeni'nin tamamının deformasyona uğradığı açıkça görülmüştür.

Bolvadin çöküntü alanlarının neredeyse tamamı, alüvyon çökeltileri ve yamaç molozu/birikinti konisi zeminlerinde bulunmaktadır. Alüvyon çökeltilerinde ortalama çöküntü hızı yaklaşık 15 mm/yıl, yamaç molozu/birikinti konisi bölgelerinde ise ortalama çöküntü hızı yaklaşık 7 mm/yıl olarak ölçülmüştür. Diğer litolojik birimlerde çöküntü hızı sıfıra yakındır. Çöküntü olgusunun büyük oranda yumuşak zeminlerde gerçekleşmesi, yumuşak zeminlerden uzaklaştıkça çöküntü hızının sıfıra yaklaşması çöküntü hızı ile bölgenin litolojik birimleri arasında yüksek bir bağıntı olduğunu göstermektedir.

Bolvadin Fayı'nın yüzey deformasyonu üzerindeki muhtemel etkilerini anlamak için fay boyunca belirli profiller üzerinde düşey yönde deformasyon hızları incelenmiştir. Profiller incelendiğinde, Bolvadin fayı ve çevresindeki alanda düşey deformasyon hızları genel olarak aynıdır. Dolayısıyla, faydan kaynaklanabilecek fay boyunca farklı bir hareket (fayın güney bloğunun düşmesi gibi) gözlemlenmemesi, fayın çöküntüye belirgin bir katkısı olmadığı anlamına gelmektedir.

28372-Bolvadin kuyusundaki yer altı su seviyesi ile kuyu bölgesindeki yer değiştirme zaman serisi karşılaştırılmıştır. Hem uzun hem de kısa vadede, yer altı su seviyesi ile yer değiştirme zaman serileri arasında yüksek bir bağıntının olduğu görülmüştür. Yer altı su seviyesi değişimlerinin yanı sıra, yer değiştirme zaman serileri bölgede bulunan Eber Gölü su yüzey alanındaki değişimler ile de karşılaştırılmış ve iki verinin mevsimsel değişimi arasında yüksek bir benzerlik olduğu görülmüştür. Yer altı suyu seviyesi ve göl suyu yüzey alanı değişimleri ile yüzey hareketleri arasındaki ilişki hidrolojik değişikliklerin deformasyona olan etkilerini açıkça göstermektedir.

İkinci çalışma bölgesi olarak Ödemiş ilçesi ve içerisinde bulunduğu K.Menderes Grabeni Ocak 2015 ve Ocak 2019 tarihleri arasında elde edilen tüm Sentinel-1 SAR verileri kullanılarak çok zamanlı InSAR yöntemi ile analiz edilmiştir. Elde edilen ortalama hız haritaları sadece Ödemiş ilçesinin değil K.Menderes grabeninin tamamının çökme olgusuna maruz kaldığını açıkça ortaya koymaktadır. Çöküntünün en şiddetli olduğu Ödemiş'in güney bölgesinde, 29 cm/yıl'a varan çöküntü hızına rastlanmaktadır. Bu çöküntü hızı, Ödemiş ilçesini dünyanın en hızlı çöken bölgelerinden biri haline getirmektedir.

Çöküntü hızı alüvyon çökelleri, yamaç molozları ve morenler gibi konsolide olmayan tortulların dağılımı ile mekansal olarak doğrudan ilişkilidir. Ayrıca, K.Menderes Grabeni'nin farklı bölgelerinde yer alan dört farklı kuyunun yer altı su seviyesindeki değişimleri ile çökme olgusu arasında güçlü bir zamansal ilişki vardır. Bu gözlemler, çökmenin yer altı suyu seviyesindeki değişikliklerin doğrudan bir sonucu olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Gözlemlenen deformasyonun elastik mi yoksa inelastik mi olduğu da incelenmiştir.  $R$ -değeri hesaplamaları, bölgenin çoğu yerinde elastik olmayan deformasyonun baskın bileşen olduğunu göstermektedir. Elde edilen bu sonuç, bölgede meydana gelen çöküntünün geri dönüşü olmayan bir deformasyon olduğunu göstermektedir. İlgili kuyu konumlarındaki iskelet depolama katsayıları,  $S_{ke}$  ve  $S_{kv}$  da esnek olmayan deformasyon fikrini desteklemektedir. Bununla birlikte, şiddetli inelastik deformasyon yaygın değildir ve bölgenin çöküntü olgusundan kurtarılması hala mümkündür. K.Menderes havzasında uygulanacak olan yapay su doldurma gibi başarıyla uygulanacak yer altı su yönetimi [109, 136], bölgedeki çökmenin şiddetini durdurabilir ve hatta bölgenin tekrar yükselmeye başlamasını bile sağlayabilir.

- [1] G. Herrera-Garcia, P. Ezquerro, R. Tomás, M. Béjar-Pizarro, J. López-Vinielles, M. Rossi, R. M. Mateos, D. Carreón-Freyre, J. Lambert, P. Teatini, *et al.*, “Mapping the global threat of land subsidence,” *Science*, vol. 371, no. 6524, pp. 34–36, 2021.
- [2] T. Strozzi, U. Wegmuller, L. Tosi, G. Bitelli, V. Spreckels, “Land subsidence monitoring with differential sar interferometry,” *Photogrammetric engineering and remote sensing*, vol. 67, no. 11, pp. 1261–1270, 2001.
- [3] D. L. Galloway, D. R. Jones, S. E. Ingebritsen, *Land subsidence in the United States*. US Geological Survey, 1999, vol. 1182.
- [4] T. L. Holzer, D. L. Galloway, “Impacts of land subsidence caused by withdrawal of underground fluids in the united states,” *Humans as geologic agents*, vol. 16, pp. 87–99, 2005.
- [5] R. Tomás, Z. Li, “Earth observations for geohazards: Present and future challenges,” *Remote Sensing*, vol. 9, no. 3, p. 194, Feb. 2017.
- [6] M. Besoya, H. Govil, P. Bhaumik, “A review on surface deformation evaluation using multitemporal SAR interferometry techniques,” *Spatial Information Research*, pp. 1–14, 2020.
- [7] F. Qu, Z. Lu, Q. Zhang, G. W. Bawden, J.-W. Kim, C. Zhao, W. Qu, “Mapping ground deformation over Houston–Galveston, Texas using multi-temporal InSAR,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 169, pp. 290–306, 2015.
- [8] A. K. Gabriel, R. M. Goldstein, H. A. Zebker, “Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry,” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 94, no. B7, pp. 9183–9191, 1989.
- [9] D. Massonnet, K. L. Feigl, “Radar interferometry and its application to changes in the earth’s surface,” *Reviews of geophysics*, vol. 36, no. 4, pp. 441–500, 1998.
- [10] R. Tomás, R. Romero, J. Mulas, J. J. Marturià, J. J. Mallorquí, J. M. Lopez-Sanchez, G. Herrera, F. Gutiérrez, P. J. González, J. Fernández, *et al.*, “Radar interferometry techniques for the study of ground subsidence phenomena: A review of practical issues through cases in Spain,” *Environmental earth sciences*, vol. 71, no. 1, pp. 163–181, 2014.
- [11] A. Hooper, D. Bekaert, K. Spaans, M. Arıkan, “Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation,” *Tectonophysics*, vol. 514, pp. 1–13, 2012.
- [12] B. Osmanoglu, F. Sunar, S. Wdowinski, E. Cabral-Cano, “Time series analysis of InSAR data: Methods and trends,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 115, pp. 90–102, 2016.

- [13] M. Crosetto, O. Monserrat, M. Cuevas-González, N. Devanthéry, B. Crippa, "Persistent scatterer interferometry: A review," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 115, pp. 78–89, 2016.
- [14] A. Pepe, F. Calò, "A review of interferometric synthetic aperture RADAR (InSAR) multi-track approaches for the retrieval of Earth's surface displacements," *Applied Sciences*, vol. 7, no. 12, p. 1264, 2017.
- [15] J. Biggs, T. J. Wright, "How satellite InSAR has grown from opportunistic science to routine monitoring over the last decade," *Nature Communications*, vol. 11, no. 1, pp. 1–4, 2020.
- [16] S. Abdikan, M. Arıkan, F. B. Sanlı, Z. Cakir, "Monitoring of coal mining subsidence in peri-urban area of Zonguldak city (NW Turkey) with persistent scatterer interferometry using ALOS-PALSAR," *Environmental Earth Sciences*, vol. 71, no. 9, pp. 4081–4089, 2014.
- [17] R. Czikhardt, J. Papco, M. Bakon, P. Liscak, P. Ondrejka, M. Zlocha, "Ground stability monitoring of undermined and landslide prone areas by means of sentinel-1 multi-temporal InSAR, case study from Slovakia," *Geosciences*, vol. 7, no. 3, p. 87, 2017.
- [18] T. Carlà, P. Farina, E. Intrieri, H. Ketizmen, N. Casagli, "Integration of ground-based radar and satellite InSAR data for the analysis of an unexpected slope failure in an open-pit mine," *Engineering Geology*, vol. 235, pp. 39–52, 2018.
- [19] Z. Yang, Z. Li, J. Zhu, Y. Wang, L. Wu, "Use of SAR/InSAR in Mining Deformation Monitoring, Parameter Inversion, and Forward Predictions: A Review," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, vol. 8, no. 1, pp. 71–90, 2020.
- [20] H. Fan, L. Wang, B. Wen, S. Du, "A New Model for three-dimensional Deformation Extraction with Single-track InSAR Based on Mining Subsidence Characteristics," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 94, p. 102 223, 2021.
- [21] X. Xu, D. Zhao, C. Ma, D. Lian, "Monitoring Subsidence Deformation of Suzhou Subway Using InSAR Timeseries Analysis," *IEEE Access*, 2020.
- [22] M. Gheorghe, I. Armaş, P. Dumitru, A. Călin, O. Bădescu, M. Necsoiu, "Monitoring subway construction using Sentinel-1 data: a case study in Bucharest, Romania," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 41, no. 7, pp. 2644–2663, 2020.
- [23] M. F. Fadhilah, A. R. Achmad, C.-W. Lee, "Integration of InSAR Time-Series Data and GIS to Assess Land Subsidence along Subway Lines in the Seoul Metropolitan Area, South Korea," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 21, p. 3505, 2020.
- [24] R. Lanari, D. Reale, M. Bonano, S. Verde, Y. Muhammad, G. Fornaro, F. Casu, M. Manunta, "Comment on "pre-collapse space geodetic observations of critical infrastructure: The morandi bridge, genoa, italy" by milillo et al.(2019)," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 24, p. 4011, 2020.

- [25] S. Selvakumaran, "Interferometric Synthetic Aperture Radar for remote satellite monitoring of bridges," Ph.D. dissertation, University of Cambridge, 2020.
- [26] F. D'Amico, V. Gagliardi, L. B. Ciampoli, F. Tosti, "Integration of InSAR and GPR techniques for monitoring transition areas in railway bridges," *NDT & E International*, vol. 115, p. 102 291, 2020.
- [27] M. Imamoglu, F. Kahraman, S. Abdikan, "Preliminary results of temporal deformation analysis in Istanbul using multi-temporal InSAR with Sentinel-1 SAR data," in *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IEEE, 2018, pp. 1352–1355.
- [28] G. Aslan, Z. Cakır, S. Ergintav, C. Lasserre, F. Renard, "Analysis of secular ground motions in Istanbul from a long-term InSAR time-series (1992–2017)," *Remote sensing*, vol. 10, no. 3, p. 408, 2018.
- [29] R. Boni, A. Bosino, C. Meisina, A. Novellino, L. Bateson, H. McCormack, "A methodology to detect and characterize uplift phenomena in urban areas using sentinel-1 data," *Remote Sensing*, vol. 10, no. 4, p. 607, 2018.
- [30] E. Erten, C. Rossi, "The worsening impacts of land reclamation assessed with sentinel-1: The rize (turkey) test case," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 74, pp. 57–64, 2019.
- [31] M. Béjar-Pizarro, D. Notti, R. M. Mateos, P. Ezquerro, G. Centolanza, G. Herrera, G. Bru, M. Sanabria, L. Solari, J. Duro, *et al.*, "Mapping vulnerable urban areas affected by slow-moving landslides using Sentinel-1 InSAR data," *Remote Sensing*, vol. 9, no. 9, p. 876, 2017.
- [32] E. Intrieri, F. Raspini, A. Fumagalli, P. Lu, S. Del Conte, P. Farina, J. Allievi, A. Ferretti, N. Casagli, "The maoxian landslide as seen from space: Detecting precursors of failure with sentinel-1 data," *Landslides*, vol. 15, no. 1, pp. 123–133, 2018.
- [33] B. Bayer, A. Simoni, M. Mulas, A. Corsini, D. Schmidt, "Deformation responses of slow moving landslides to seasonal rainfall in the Northern Apennines, measured by InSAR," *Geomorphology*, vol. 308, pp. 293–306, 2018.
- [34] D. P. Bekaert, A. L. Handwerger, P. Agram, D. B. Kirschbaum, "InSAR-based detection method for mapping and monitoring slow-moving landslides in remote regions with steep and mountainous terrain: An application to Nepal," *Remote Sensing of Environment*, vol. 249, p. 111 983, 2020.
- [35] G. Aslan, M. Foumelis, D. Raucoules, M. De Michele, S. Bernardie, Z. Cakır, "Landslide mapping and monitoring using persistent scatterer interferometry (psi) technique in the french alps," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 8, p. 1305, 2020.
- [36] L. Solari, M. Del Soldato, F. Raspini, A. Barra, S. Bianchini, P. Confuorto, N. Casagli, M. Crosetto, "Review of satellite interferometry for landslide detection in italy," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 8, p. 1351, 2020.
- [37] J.-W. Kim, Z. Lu, K. Degrandpre, "Ongoing deformation of sinkholes in wink, texas, observed by time-series sentinel-1a sar interferometry (preliminary results)," *Remote Sensing*, vol. 8, no. 4, p. 313, 2016.

- [38] F. Caló, D. Notti, J. P. Galve, S. Abdikan, T. Görüm, A. Pepe, F. Balik Şanlı, “Dinsar-Based detection of land subsidence and correlation with groundwater depletion in Konya Plain, Turkey,” *Remote sensing*, vol. 9, no. 1, p. 83, 2017.
- [39] L. Chang, O. Ku, R. F. Hanssen, “Identification of deformation pattern changes caused by enhanced oil recovery (EOR) using InSAR,” *International journal of remote sensing*, vol. 40, no. 4, pp. 1495–1505, 2019.
- [40] S. Staniewicz, J. Chen, H. Lee, J. Olson, A. Savvaidis, R. Reedy, C. Breton, E. Rathje, P. Hennings, “InSAR Reveals Complex Surface Deformation Patterns Over an 80,000 km<sup>2</sup> Oil-Producing Region in the Permian Basin,” *Geophysical Research Letters*, vol. 47, no. 21, e2020GL090151, 2020.
- [41] J. W. Bell, F. Amelung, A. Ferretti, M. Bianchi, F. Novali, “Permanent scatterer InSAR reveals seasonal and long-term aquifer-system response to groundwater pumping and artificial recharge,” *Water Resources Research*, vol. 44, no. 2, 2008.
- [42] R. Boni, G. Herrera, C. Meisina, D. Notti, M. Béjar-Pizarro, F. Zucca, P. J. González, M. Palano, R. Tomás, J. Fernández, *et al.*, “Twenty-year advanced DInSAR analysis of severe land subsidence: The Alto Guadalentin Basin (Spain) case study,” *Engineering Geology*, vol. 198, pp. 40–52, 2015.
- [43] M. Chen, R. Tomás, Z. Li, M. Motagh, T. Li, L. Hu, H. Gong, X. Li, J. Yu, X. Gong, “Imaging land subsidence induced by groundwater extraction in Beijing (China) using satellite radar interferometry,” *Remote Sensing*, vol. 8, no. 6, p. 468, 2016.
- [44] E. Chaussard, P. Milillo, R. Bürgmann, D. Perissin, E. J. Fielding, B. Baker, “Remote sensing of ground deformation for monitoring groundwater management practices: Application to the santa clara valley during the 2012–2015 california drought,” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 122, no. 10, pp. 8566–8582, 2017.
- [45] M. H. Haghighi, M. Motagh, “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*, vol. 221, pp. 534–550, 2019.
- [46] E. Hussain, T. J. Wright, R. J. Walters, D. P. Bekaert, R. Lloyd, A. Hooper, “Constant strain accumulation rate between major earthquakes on the north anatolian fault,” *Nature communications*, vol. 9, no. 1, pp. 1–9, 2018.
- [47] C. Liu, L. Ji, L. Zhu, C. Zhao, “InSAR-constrained interseismic deformation and potential seismogenic asperities on the Altyn Tagh Fault at 91.5–95° E, Northern Tibetan Plateau,” *Remote Sensing*, vol. 10, no. 6, p. 943, 2018.
- [48] J. Elliott, M. de Michele, H. Gupta, “Earth observation for crustal tectonics and earthquake hazards,” *Surveys in Geophysics*, vol. 41, no. 6, pp. 1355–1389, 2020.
- [49] J. R. Weiss, R. J. Walters, Y. Morishita, T. J. Wright, M. Lazecky, H. Wang, E. Hussain, A. J. Hooper, J. R. Elliott, C. Rollins, *et al.*, “High-resolution surface velocities and strain for Anatolia from Sentinel-1 InSAR and GNSS data,” *Geophysical Research Letters*, vol. 47, no. 17, e2020GL087376, 2020.

- [50] Q. Bletery, O. Cavalié, J.-M. Nocquet, T. Ragon, "Distribution of interseismic coupling along the North and East Anatolian Faults inferred from InSAR and GPS data," *Geophysical Research Letters*, vol. 47, no. 16, e2020GL087775, 2020.
- [51] C. De Luca, I. Zinno, M. Manunta, R. Lanari, F. Casu, "Large areas surface deformation analysis through a cloud computing P-SBAS approach for massive processing of DInSAR time series," *Remote Sensing of Environment*, vol. 202, pp. 3–17, 2017.
- [52] A. Kalia, M. Frei, T. Lege, "A copernicus downstream-service for the nationwide monitoring of surface displacements in germany," *Remote Sensing of Environment*, vol. 202, pp. 234–249, 2017.
- [53] D. Gee, A. Sowter, S. Grebby, G. de Lange, A. Athab, S. Marsh, "National geohazards mapping in europe: Interferometric analysis of the netherlands," *Engineering geology*, vol. 256, pp. 1–22, 2019.
- [54] J. F. Dehls, Y. Larsen, P. Marinkovic, T. R. Lauknes, D. Stødle, D. A. Moldestad, "INSAR. No: A National Insar Deformation Mapping/Monitoring Service In Norway–From Concept To Operations," in *IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IEEE, 2019, pp. 5461–5464.
- [55] M. K. Emil, M. Sultan, K. Alakhras, G. Sataer, S. Gozi, M. Al-Marri, E. Gebremichael, "Countrywide Monitoring of Ground Deformation Using InSAR Time Series: A Case Study from Qatar," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 4, p. 702, 2021.
- [56] R. Lanari, M. Bonano, F. Casu, C. D. Luca, M. Manunta, M. Manzo, G. Onorato, I. Zinno, "Automatic generation of sentinel-1 continental scale DInSAR deformation time series through an extended P-SBAS processing pipeline in a cloud computing environment," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 18, p. 2961, 2020.
- [57] M. Crosetto, L. Solari, J. Balasis-Levinsen, N. Casagli, M. Frei, A. Oyen, D. Moldestad, "Ground Deformation Monitoring at Continental Scale: the European Ground Motion Service," *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 43, pp. 293–298, 2020.
- [58] K. Terzaghi, "Principles of soil mechanics, IV—Settlement and consolidation of clay," *Engineering News-Record*, vol. 95, no. 3, pp. 874–878, 1925.
- [59] R. Demirtaş, S. Ercan, B. Demir, M. Aktan. (). "Ege Çöküntü Alanında Son 20 Yıl Süresince Oluşmuş ve Oluşmaya Devam Eden Yüzey Deformasyonları Deprembilimcilere Ne Söylemeye Çalışıyor?" [Online]. Available: <https://www.academia.edu/8775613/> (visited on 04/01/2021).
- [60] F. Poyraz, K. Ö. Hastaoğlu, "Monitoring of tectonic movements of the Gediz Graben by the PSInSAR method and validation with GNSS results," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 13, no. 17, pp. 1–11, 2020.
- [61] R. Demirtaş, E. Tepeuğur, "Bolvadin (Afyon) Merkez yerleşim alanında son 15 yıllık dönemde oluşmuş yüzey kırıklarının oluşum mekanizması," *Proceedings of the ATAG-21, p11, Aktif Tektonik Araştırma Grubu Çalıştayı, Afyon, Turkey*, pp. 26–28, 2017.



- [62] Ö. Emre, T. Duman, S. Özalp, Ş. Olgun, H. Elmacı, “1: 250.000 scale active fault map series of Turkey, Afyon (NJ 36-5) Quadrangle,” *General Directorate of Mineral Research and Exploration; (Serial number: 16); General Directorate of Mineral Research and Expansion (MTA): Ankara, Turkey*, 2011.
- [63] Ç. Özkaymak, H. Sözbilir, İ. Tiryakioğlu, T. Baybura, “Bolvadin’de (Afyon-Akşehir Grabeni, Afyon) Gözlenen Yüzey Deformasyonlarının Jeolojik, Jeomorfolojik ve Jeodezik Analizi,” *Türkiye Jeoloji Bülteni*, vol. 60, no. 2, pp. 169–189, 2017.
- [64] R. Demirtaş, M. Yaman, E. Tepeuğur. (2002). “Ödemiş’de Yüzeyde Oluşan Deformasyonların Oluşum Mekanizması,” [Online]. Available: <https://www.academia.edu/8775970/> (visited on 04/01/2021).
- [65] İ. Tiryakioğlu, M. Uğur, M. Yalçın, T. Baybura, M. Yılmaz, Ç. Özkaymak, C. Yiğit, A. Dindar, F. Poyraz, M. Uysal, *et al.*, “Akşehir simav fay sistemindeki güncel tektonik hareketlerinin izlenmesi: Nivelman çalışmaları,”
- [66] A. Moreira, P. Prats-Iraola, M. Younis, G. Krieger, I. Hajnsek, K. P. Papathanassiou, “A tutorial on synthetic aperture radar,” *IEEE Geoscience and remote sensing magazine*, vol. 1, no. 1, pp. 6–43, 2013.
- [67] A. Ferretti, A. Monti-Guarnieri, C. Prati, F. Rocca, “Insar principles: Guidelines for sar interferometry processing and interpretation, 19 vols,” *The Netherlands: ESA Publications*, 2007.
- [68] A. Ferretti, *Satellite InSAR data: reservoir monitoring from space*. EAGE publications, 2014.
- [69] M. Eineder, R. Bamler. (). “Module 2201: SAR Interferometry Basics,” [Online]. Available: [https://saredu.dlr.de/unit/insar\\_basics](https://saredu.dlr.de/unit/insar_basics) (visited on 11/11/2017).
- [70] R. F. Hanssen. (2014). “Advanced SAR 3: SAR interferometry,” [Online]. Available: [http://seom.esa.int/landtraining2014/files/D2T2a\\_Hanssen.pdf](http://seom.esa.int/landtraining2014/files/D2T2a_Hanssen.pdf) (visited on 11/11/2017).
- [71] R. Hanssen, *Radar interferometry: data interpretation and error analysis*. Springer Science & Business Media, 2001, vol. 2.
- [72] I. D. Walter. (). “Module 3110: Anthroposphere - SAR Interferometry,” [Online]. Available: <https://eo-college.org/resource/anthrophosphere/> (visited on 05/14/2021).
- [73] A. Ferretti, C. Prati, F. Rocca, “Permanent scatterers in SAR interferometry,” *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 39, no. 1, pp. 8–20, 2001.
- [74] A. Hooper, H. Zebker, P. Segall, B. Kampes, “A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers,” *Geophysical research letters*, vol. 31, no. 23, 2004.
- [75] M. Crosetto, E. Biescas, J. Duro, J. Closa, A. Arnaud, “Generation of advanced ers and envisat interferometric sar products using the stable point network technique,” *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 74, no. 4, pp. 443–450, 2008.

- [76] P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, E. Sansosti, "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms," *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 40, no. 11, pp. 2375–2383, 2002.
- [77] A. Ferretti, A. Fumagalli, F. Novali, C. Prati, F. Rocca, A. Rucci, "A new algorithm for processing interferometric data-stacks: Squeesar," *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 49, no. 9, pp. 3460–3470, 2011.
- [78] D. Pena, G. C. Tiao, R. S. Tsay, *A course in time series analysis*. John Wiley & Sons, 2011, vol. 322.
- [79] G. Kirchgässner, J. Wolters, U. Hassler, *Introduction to modern time series analysis*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [80] E. B. Dagum, S. Bianconcini, *Seasonal adjustment methods and real time trend-cycle estimation*. Springer, 2016.
- [81] J. D. Cryer, K.-S. Chan, *Time series analysis: with applications in R*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [82] G. E. Box, G. M. Jenkins, G. C. Reinsel, G. M. Ljung, *Time series analysis: forecasting and control*. John Wiley & Sons, 2015.
- [83] R. J. Hyndman, G. Athanasopoulos, *Forecasting: principles and practice*. OTexts, 2018.
- [84] D. F. Findley, B. C. Monsell, W. R. Bell, M. C. Otto, B.-C. Chen, "New capabilities and methods of the x-12-arma seasonal-adjustment program," *Journal of Business & Economic Statistics*, vol. 16, no. 2, pp. 127–152, 1998.
- [85] W. P. Cleveland, G. C. Tiao, "Decomposition of seasonal time series: A model for the census x-11 program," *Journal of the American statistical Association*, vol. 71, no. 355, pp. 581–587, 1976.
- [86] C. Robert, C. William, T. Irma, "Stl: A seasonal-trend decomposition procedure based on loess," *Journal of official statistics*, vol. 6, no. 1, pp. 3–73, 1990.
- [87] E. Sener, A. Davraz, S. Sener, "Investigation of Akşehir and Eber Lakes (SW Turkey) coastline change with multitemporal satellite images," *Water resources management*, vol. 24, no. 4, pp. 727–745, 2010.
- [88] Ü. Yıldırım, S. Erdoğan, M. Uysal, "Changes in the coastline and water level of the Akşehir and Eber Lakes between 1975 and 2009," *Water resources management*, vol. 25, no. 3, pp. 941–962, 2011.
- [89] M. M. Köle, M. Ataol, T. Erkal, "Eber ve Akşehir gölleri'nde 1990-2016 yılları arasında gerçekleşen alansal değişimler," *TÜCAUM Uluslararası Coğrafya Sempozyumu, 13-14 Ekim, Ankara*, 2016.
- [90] SNAP - ESA Sentinel Application Platform v6.0. [Online]. Available: <http://step.esa.int/main/toolboxes/snap> (visited on 12/20/2018).
- [91] N. Miranda, "Sentinel-1 Instrument Processing Facility: Impact of the Elevation Antenna Pattern Phase Compensation on the Interferometric Phase Preservation," *European Space Agency Technical Note ESA-EOPG-CSCOP-TN-0004*, vol. 1, no. 22, 2015.

- [92] *Sentinel-1 Quality Control*. [Online]. Available: <https://qc.sentinel1.eo.esa.int> (visited on 12/20/2018).
- [93] T. G. Farr, P. A. Rosen, E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, M. Paller, E. Rodriguez, L. Roth, *et al.*, “The shuttle radar topography mission,” *Reviews of geophysics*, vol. 45, no. 2, 2007.
- [94] D. Bekaert, R. Walters, T. Wright, A. Hooper, D. Parker, “Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 170, pp. 40–47, 2015.
- [95] T. J. Wright, B. E. Parsons, Z. Lu, “Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR,” *Geophysical Research Letters*, vol. 31, no. 1, 2004.
- [96] J. Hu, Z. Li, X. Ding, J. Zhu, L. Zhang, Q. Sun, “Resolving three-dimensional surface displacements from InSAR measurements: A review,” *Earth-Science Reviews*, vol. 133, pp. 1–17, 2014.
- [97] *Hürriyet Gazetesi*. [Online]. Available: <http://www.hurriyet.com.tr/gundem/eber-golu-tamamen-kurudu-40991682> (visited on 01/02/2019).
- [98] *T24 Bağımsız İnternet Gazetesi*. [Online]. Available: <http://t24.com.tr/haber/afyonkarahisardaki-eber-golutamamen-kurudu,727012> (visited on 01/02/2019).
- [99] T. C. Winter, J. W. Harvey, O. L. Franke, W. M. Alley, *Ground water and surface water: a single resource*. US geological Survey, 1998, vol. 1139.
- [100] M. Sophocleous, “Interactions between groundwater and surface water: The state of the science,” *Hydrogeology journal*, vol. 10, no. 1, pp. 52–67, 2002.
- [101] S. Y. Ghoubach, “Impact of Lake Nasser on the groundwater of the Nubia sandstone aquifer system in Tushka area, South Western Desert, Egypt,” *Journal of King Saud University-Science*, vol. 24, no. 2, pp. 101–109, 2012.
- [102] L. Tezcan, B. T. Meriç, N. Doğdu, B. Akan, ; A. Ö. Atilla, T. Kurttaş, “Akarçay havzası hidrojeolojisi ve yeraltısuyu akım modeli,” in *Hacettepe University International Karst Water Sources Research and Application Center (UKAM), Project Final Report*, 2010.
- [103] *The Turkish State Meteorological Service Web Site*. [Online]. Available: <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=A&m=AFYONKARAHISAR> (visited on 04/07/2019).
- [104] *Bluedot Water Observatory*. [Online]. Available: <https://water.bluedot-observatory.com/2361> (visited on 11/19/2018).
- [105] I. Daubechies, *The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis*. Princeton University Press, 2009.
- [106] C. Torrence, G. P. Compo, “A practical guide to wavelet analysis,” *Bulletin of the American Meteorological society*, vol. 79, no. 1, pp. 61–78, 1998.
- [107] E. Eris, Y. Cavus, H. Aksoy, H. I. Burgan, H. Aksu, H. Boyacioglu, “Spatiotemporal analysis of meteorological drought over Kucuk Menderes River Basin in the Aegean Region of Turkey,” *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 142, no. 3, pp. 1515–1530, 2020.

- [108] O. T. Pusatli, M. Z. Camur, H. Yazicigil, "Susceptibility indexing method for irrigation water management planning: applications to K. Menderes river basin, Turkey," *Journal of environmental management*, vol. 90, no. 1, pp. 341–347, 2009.
- [109] A. P. Sayit, H. Yazicigil, "Assessment of artificial aquifer recharge potential in the Kucuk Menderes River Basin, Turkey," *Hydrogeology Journal*, vol. 20, no. 4, pp. 755–766, 2012.
- [110] O. Yagbasan, "Impacts of climate change on groundwater recharge in Küçük Menderes River Basin in Western Turkey," *Geodinamica Acta*, vol. 28, no. 3, pp. 209–222, 2016.
- [111] A. E. Gülersoy, M. A. Çelik, "Determining of areas with high erosion risk in Küçük menderes river basin (west anatolia, turkey) By using multi-criteria decision making method," *Fresenius Environmental Bulletin*, vol. 24, no. 1a, 2015.
- [112] B. Rojay, V. Toprak, C. Demirci, L. Süzen, "Plio-quaternary evolution of the Küçük Menderes graben southwestern Anatolia, Turkey," *Geodinamica Acta*, vol. 18, no. 3-4, pp. 317–331, 2005.
- [113] J. F. Dumont, Ş. Uysal, Ş. Şimsek, İ. H. Karamanderesi, J. Letouzey, "Formation of the grabens in southwestern Anatolia," *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, vol. 92, no. 92,
- [114] G. Muslu, "Küçük Menderes Havzasının Beşeri ve İktisadi Coğrafyası," *Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü*, 2005.
- [115] T.C. İzmir Valiliği Çevre Ve Şehircilik İl Müdürlüğü. (). "Nehir havza yönetim planı nihai raporu," [Online]. Available: [https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/K%C3%BC%C3%A7%C3%BCk%20Menderes%20NHYP%20HavzaY%C3%B6netim%20Plan%C4%B1/KMNNHYP%20Nihai%20Raporu\\_11092019\\_io.pdf](https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/K%C3%BC%C3%A7%C3%BCk%20Menderes%20NHYP%20HavzaY%C3%B6netim%20Plan%C4%B1/KMNNHYP%20Nihai%20Raporu_11092019_io.pdf) (visited on 01/09/2021).
- [116] Y. Şahin, B. Alper, G. Tayfur, "Küçük Menderes Havzası Su Kaynaklarının Sürdürülebilirliği," *DÜMF Mühendislik Dergisi*, vol. 9, no. 2, pp. 955–962, 2018.
- [117] T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü. (). "İzmir ili 2018 yılı çevre durum raporu," [Online]. Available: [https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/-zm-r\\_2018-cdr-son-20191122120621.pdf](https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/-zm-r_2018-cdr-son-20191122120621.pdf) (visited on 01/13/2021).
- [118] Boğaziçi University Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute Regional Earthquake-Tsunami Monitoring Center. (). "B.u. koeri-retmc earthquake catalogue," [Online]. Available: <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/earthquake-catalog/> (visited on 01/13/2021).
- [119] Ö. Emre, T. Y. Duman, S. Özalp, F. Şaroğlu, Ş. Olgun, H. Elmacı, T. Can, "Active fault database of Turkey," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 16, no. 8, pp. 3229–3275, 2018.
- [120] R. Torres, P. Snoeij, D. Geudtner, D. Bibby, M. Davidson, E. Attema, P. Potin, B. Rommen, N. Floury, M. Brown, *et al.*, "GMES Sentinel-1 mission," *Remote Sensing of Environment*, vol. 120, pp. 9–24, 2012.

- [121] R. Hanssen, S. Usai, “Interferometric phase analysis for monitoring slow deformation processes,” *ESA SP (Print)*, pp. 487–491, 1997.
- [122] R. Klees, D. Massonnet, “Deformation measurements using SAR interferometry: potential and limitations,” *Geologie en Mijnbouw*, vol. 77, no. 2, pp. 161–176, 1998.
- [123] T. Lauknes, A. P. Shanker, J. Dehls, H. Zebker, I. Henderson, Y. Larsen, “Detailed rockslide mapping in northern Norway with small baseline and persistent scatterer interferometric SAR time series methods,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 114, no. 9, pp. 2097–2109, 2010.
- [124] M. Lazeck, K. Spaans, P. J. González, Y. Maghsoudi, Y. Morishita, F. Albino, J. Elliott, N. Greenall, E. Hatton, A. Hooper, *et al.*, “LiCSAR: An automatic InSAR tool for measuring and monitoring tectonic and volcanic activity,” *Remote Sensing*, vol. 12, no. 15, p. 2430, 2020.
- [125] Y. Morishita, M. Lazecky, T. J. Wright, J. R. Weiss, J. R. Elliott, A. Hooper, “LiCSBAS: An Open-Source InSAR Time Series Analysis Package Integrated with the LiCSAR Automated Sentinel-1 InSAR Processor,” *Remote Sensing*, vol. 12, no. 3, p. 424, 2020.
- [126] *COMET-LiCS Sentinel-1 InSAR Portal*. [Online]. Available: <https://comet.nerc.ac.uk/COMET-LiCS-portal/> (visited on 01/21/2021).
- [127] R. M. Goldstein, C. L. Werner, “Radar interferogram filtering for geophysical applications,” *Geophysical research letters*, vol. 25, no. 21, pp. 4035–4038, 1998.
- [128] C. W. Chen, H. A. Zebker, “Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, no. 8, pp. 1709–1719, 2002.
- [129] Y. Morishita, “Nationwide urban ground deformation monitoring in Japan using Sentinel-1 LiCSAR products and LiCSBAS,” *Progress in Earth and Planetary Science*, vol. 8, no. 1, pp. 1–23, 2021.
- [130] J. Hu, X. Ding, Z. Li, L. Zhang, J. Zhu, Q. Sun, G. Gao, “Vertical and horizontal displacements of Los Angeles from InSAR and GPS time series analysis: Resolving tectonic and anthropogenic motions,” *Journal of Geodynamics*, vol. 99, pp. 27–38, 2016.
- [131] P. Ezquerro, G. Herrera, M. Marchamalo, R. Tomás, M. Béjar-Pizarro, R. Martinez, “A quasi-elastic aquifer deformational behavior: Madrid aquifer case study,” *Journal of Hydrology*, vol. 519, pp. 1192–1204, 2014.
- [132] F. S. Riley, “Analysis of borehole extensometer data from central California,” *Land subsidence*, vol. 2, pp. 423–431, 1969.
- [133] J. Chen, R. Knight, H. A. Zebker, W. A. Schreüder, “Confined aquifer head measurements and storage properties in the San Luis Valley, Colorado, from spaceborne InSAR observations,” *Water Resources Research*, vol. 52, no. 5, pp. 3623–3636, 2016.
- [134] A. Rezaei, Z. Mousavi, F. Khorrami, H. Nankali, “Inelastic and elastic storage properties and daily hydraulic head estimates from continuous global positioning system (GPS) measurements in northern Iran,” *Hydrogeology Journal*, vol. 28, no. 2, pp. 657–672, 2020.

- [135] J. Hoffmann, H. A. Zebker, D. L. Galloway, F. Amelung, "Seasonal subsidence and rebound in Las Vegas Valley, Nevada, observed by synthetic aperture radar interferometry," *Water Resources Research*, vol. 37, no. 6, pp. 1551–1566, 2001.
- [136] A. Peksezer, "Artificial recharge of groundwater in Küçük Menderes River Basin, Turkey," M.S. thesis, METU, 2010.

## TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

---

### Makale

1. **M. İmamoglu**, F. Kahraman, Z. Cakir, F. B. Sanli, “Ground deformation analysis of Bolvadin (W. Turkey) by means of multi-temporal InSAR techniques and Sentinel-1 data”, *Remote Sensing*, vol. 11, no. 9, p. 1069, 2019.
2. **M. İmamoglu**, F. B. Sanli, Z. Cakir, F. Kahraman, “Ground deformation analysis of Bolvadin (W. Turkey) by means of multi-temporal InSAR techniques and Sentinel-1 data”, *Springer, Environmental Earth Sciences*, (2021 Revizyon).

### Konferans Bildirisi

1. **M. İmamoglu**, F. Kahraman, Z. Çakır, F. B. Şanlı, “Bolvadin subsidence analysis with multi-temporal InSAR technique and Sentinel-1 data,” in *2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, IEEE, 2020, pp. 1–4.