

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**KONYA ŞEHİR ALANI YÜZEY DEFORMASYONLARININ InSAR
YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nurdan Şireci

KATI YER BİLİMLERİ ANA BİLİM DALI

Jeodinamik Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ziyadin ÇAKIR

AĞUSTOS 2021

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**KONYA ŞEHİR ALANI YÜZEY DEFORMASYONLARININ InSAR
YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Nurdan Şireci
(602191006)**

KATI YER BİLİMLERİ ANA BİLİM DALI

Jeodinamik Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ziyadin ÇAKIR

AĞUSTOS 2021

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 602191006 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Nurdan ŞİRECİ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “KONYA ŞEHİR ALANI YÜZEY DEFORMASYONLARININ InSAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı: **Prof. Dr. Ziyadin ÇAKIR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri: **Prof.Dr. Füsun Balık ŞANLI**
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet M. AKOĞLU
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 17 Ağustos 2021
Savunma Tarihi : 12 Ağustos 2021



ÖNSÖZ

Tez çalışmalarım süresince, engin deneyim ve bilgi birikimiyle yol haritamın oluşmasını sağlayan, fikirleri ve yol göstericiliğiyle çalışmamın gelişmesine imkân sağlayan tez danışmanım sayın Prof. Dr. Ziyadin ÇAKIR' a teşekkürü borç sayıyorum.

Ayrıca, Sentinel1A / B, ALOS ve Envisat görüntülerini TÜBİTAK ULAKBİM, Yüksek Başarım ve Grid Hesaplama TRUBA Yüksek Performans Hesaplama Merkezi'nde (TRUBA kaynaklarında) işlememize izin verdiği için TÜBİTAK'a teşekkür ederim. Çalışmalarına katkısı olan tüm araştırmacı arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

ALOS-1 verileri için JAXA, Envisat ve Sentinel verileri için ESA'ya teşekkür ederim.

Bu çalışma; İTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'nce desteklenmiştir (Proje numarası: MYL-2021-43033). Şekillerin büyük bir bölümü Generic Mapping Tools programı ile hazırlanmıştır.

Son olarak tez çalışmalarım boyunca ve öncesinde desteklerini hiç esirgemeyen aileme ve kardeşlerime sonsuz teşekkür ederim.

Ağustos 2021

Nurdan Şireci
(Jeoloji Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
KISALTMALAR.....	ix
SEMBOLLER.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Çalışmanın Konusu	1
1.2 Çalışmanın Amacı.....	3
1.3 Önceki Çalışmalar.....	4
2. ÇALIŞMA ALANININ JEOLJİSİ VE SİSMOTEKTONİĞİ	7
2.1 Çalışma Alanının Jeolojisi	7
2.2 Çalışma Alanının Sismotektoniği	8
3. YÖNTEM VE VERİ SETİ	11
3.1 Radar.....	11
3.2 Sentetik Açıklıklı Radar	13
3.3 Sinyal Polarizasyonu ve Saçılma Mekanizmaları	17
3.4 Sentetik Açıklıklı Radar İnterferometrisi.....	18
3.5 InSAR'ın Prensipleri	20
3.6 InSAR Faz Farkının Bileşenleri	22
3.7 Koherans	22
3.8 İleri InSAR Teknikleri	23
3.9 SAR Veri Seti	24
3.10 Verilerin İşlenmesi	25
3.11 InSAR Zaman Serilerinin Oluşturulması	26
4. ELDE EDİLEN BULGULAR.....	27
4.1 Konya Şehir Merkezinde 2004-2020 Yılları Arasında Meydana Gelen Deformasyonlar	27
4.2 InSAR LOS Hız Alanlarının Bileşenlerine Ayrıştırılması	32
4.3 InSAR Zaman Serileri İle Yeraltı Suyu Kuyuları Arasındaki İlişki	33
4.4 Deformasyonların Modellenmesi.....	36
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	41
KAYNAKLAR.....	43
ÖZGEÇMİŞ	47



KISALTMALAR

ASC	: Ascending (yükselen)
AFAD	: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
ALOS	: Advanced Land Observation Satellite (Japon ileri gözlem uydusu)
DEM	: Sayısal Arazi Modeli
DSC	: Descending (alçalan)
DSİ	: Devlet Su İşleri
EMSC	: European-Mediterranean Seismological Centre (Avrupa-Akdeniz Sismoloji Merkezi)
ERS	: European Remote Sensing Satellite (Avrupa Uzaktan Algılama Uydusu)
ESA	: European Space Agency (Avrupa Uzay Ajansı)
GMT	: Generic Mapping Tools
GMTSAR	: Genel Haritalama Araçları Sentetik Açıklık Radar Programı
GPS	: Global Positioning System (Küresel Konumlandırma Sistemi)
INGV	: Istituto Nazionale Di Geofisica E Vulcanologia (İtalyan Milli Jeofizik ve Volkanoloji Enstitüsü)
InSAR	: Interferometric Synthetic Aperture Radar (Sentetik Açıklık Radar İnterferometrisi)
IW	: Interferometric Wide Swath
JAXA	: Japan Aerospace Exploration Agency (Japonya Uzay Ajansı)
LOS	: Line of Sight (Uydunun Bakış Açısı)
MTA	: Maden Tetkik ve Arama Kurumu
NASA	: National Aeronautics and Space Administration (Amerikan Uzay Ajansı)
PS-InSAR	: Persistent InSAR (Stabil Yansıtıcılara Dayalı İnterferometrik Sentetik Açıklıklı Radar)
SRTM	: Shuttle Radar Topography Mission (Mekik Radar Topografya Misyonu)
SAR	: Sentetik Açıklıklı Radar
SBAS	: Kısa bazlara dayalı InSAR tekniği (small baseline subset)
SLC	: Single Look Complex (Tam çözünürlüklü kompleks SAR görüntüsü)
TOPSAR	: The Terrain Observation with Progressive Scans SAR



SEMBOLLER

β	: Base Line (Uydular arası mesafe)
$\Delta\phi$	: Faz Farkı
$\Delta\phi_{\text{displ}}$	: Deformasyon Faz Bileşeni
$\Delta\phi_{\text{topo}}$	: Topoğrafik Faz Bileşeni
$\Delta\phi_{\text{atm}}$	: Atmosferik Faz Katkısı
$\Delta\phi_{\text{orb}}$	: Orbital Faz Katkısı
n	: Gürültü
λ	: Dalga Boyu
θ_{asc}	: Local Incidence Angle (Yükselen uydunun bakış açısı)
θ_{dsc}	: Local Incidence Angle (Alçalan uydunun bakış açısı)
$\alpha_{\text{asc,dsc}}$	: Satellite Heading Angle (Uydunun uçuş yönü)
d_{ver}	: Uydu Bakış Yönündeki Düşey Hareket Bileşeni
d_{hor}	: Uydu Bakış Yönündeki Yatay Hareket Bileşeni
B_v	: Base Line (Uydulararası dik mesafe (düşey))
B_h	: Base Line (Uydular arası dik mesafe (yatay))



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Tablo3.1: Uydu bazlı SAR sensörlerine ve temel özelliklerine genel bakış (Moreira ve diğ., 2013'den güncellenmiştir).....	12
Tablo3.2: SAR görüntüleme sistemlerinde kullanılan bantlar, frekansları, dalgaboyları ve kullanım alanları (Meyer, 2019'dan değşitirilmiştir)..	16





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

- Şekil 1.1 :** Mexico City (Meksika) şehrinde 2003-2010 yılları arasında meydana gelen yüzey deformasyonların PS-InSAR tekniği kullanılarak elde edilen haritası (From Yan ve diğ., 2012). 2
- Şekil 1.2 :** Bursa havzasında meydana gelen zemin deformasyonlarının PS-InSAR yöntemiyle haritalanması (Aslan ve diğ., 2019). 2
- Şekil 1.3 :** Mekik Radar Topoğrafya Misyonu (SRTM) 90-m verisinden elde edilen gölgeli rölyef görüntüsü ile Konya havzası ve çevresinin morfolojik haritası. Kırmızı çizgiler aktif faylardır (Emre ve diğ., 2013). Dikdörtgenler, bu çalışmada kullanılan SAR görüntü çerçevelerini göstermektedir. Siyah poligon Konya Kapalı Havzası'nı göstermektedir (1050 m yükseklik münhanisi). ALOS-1 T605 ve Sentinel-1 T160 çerçeveleri yükselen yörüngelerdeki çerçeveler iken, Envisat T207 ve Sentinel-1 T167 çerçeveleri alçalan yörüngelerdeki çerçevelerdir. Ok çiftleri uydu uçuş yönünü ve uydu bakış yönlerini (LOS) göstermektedir. 3
- Şekil 1.4 :** Konya Kapalı Havzası'nın 12-m çönlüklü TanDEM-X SAR verilerinden elde edilen sayısal arazi modeli verisinin gölgelendirilmesiyle elde edilen morfoloji haritası. Turuncu renkteki daireler sayısal arazi modelinden haritalanan obrukları, yeşil renktekiler ise höyükleri göstermektedir. Kırmızı çizgiler MTA tarafından haritalanan aktif fayları (Emre ve diğ., 2013), mavi poligon ise Konya paleogölünün kıyı çizgilerini göstermektedir (Daniel ve diğ., 2017). 4
- Şekil 1.5 :** Konya havzasındaki GPS ölçüm sonuçları (Üstün ve diğ., 2010). 5
- Şekil 1.6 :** Konya şehir merkezindeki 2014-2015 yılları arasında meydana gelen yüzey deformasyonlarının Sentinel-1 (a, c) ve CosmoSky-Med (b, d) uydu görüntüleri kullanılarak haritalanması (Çomut ve diğ., 2016'dan). Radar bakış yönünde yılda 6 cm'ye kadar ulaşan deformasyon (oturma) tren istasyonunun yaklaşık 500 m batısında merkezlenmektedir.. 6
- Şekil 1.7 :** Konya şehir merkezinde elde edilen Sentinel-1 ve GPS zaman serileri (Orhan, 2021).. 6
- Şekil 2.1 :** Konya ve çevresinin 1:25.000 ölçekli MTA haritalarına dayalı jeoloji haritası. Beyaz kesik çizgiler, merkezde Alaaddin Tepesi ile çevre yollarını gösterir. Kırmızı çizgiler aktif faylardır (Emre ve diğ., 2013).. 7
- Şekil 2.2 :** Konya bölgesinde 1990-2021 arasında gözlenen sismik aktivite (AFAD). Siyah çizgiler alüvyal düzlükteki alüvyal yelpaze ve diğer litolojilerin sınırlarını, kırmızı çizgiler ise aktif fayları göstermektedir. Beyaz kesik çizgiler, merkezde Alaaddin Tepesi ile çevre yollarını, mavi üçgenler ise kuyu yerlerini göstermektedir. 8
- Şekil 2.3 :** 10 Eylül 2009 (sol panel) ve 11 Eylül 2009 (sağ panel) tarihli Konya depremlerinin çeşitli kurumlar tarafından yapılan odak mekanizması çözümleri (EMSC'den).. 9

- Şekil 2.4 :** Jeolojik harita üzerinde çizilmiş 10-11 Eylül 2009 Konya depremlerinin odak mekanizmaları (INGV'den) ve artçı sarsıntı dağılımları (numaralı kırmızı daireler). (Aksoy ve Demiröz, 2011'den)..... **10**
- Şekil 3.1:** Doppler etkisi; araç sireninden yayılan ses dalgalarının frekansı araç yaklaştıkça yükselirken, araç geçtikten sonra azalır. **14**
- Şekil 3.2 :** $X=0$ konumunda P hedefi için, sentetik açıklığı oluşturmak için kullanılan gözlemlerin geometrisi. β , anten ışın genişliğini (antenna beamwidth) göstermektedir (Meyer, 2019'den değiştirilmiştir). **14**
- Şekil 3.3 :** Mikrodalga bantları eklenmiş elektromanyetik spektrum.. **15**
- Şekil 3.4 :** SAR ölçümlerinin orman yapısına duyarlılığı ve kara yüzeyinin havadan veya uzaydan uzaktan algılama gözlemleri için kullanılan farklı dalga boylarının bitki örtüsüne penetrasyonu (Saatchi, 2019). **17**
- Şekil 3.5 :** Geri yansıma saçılımı ve polarizasyon (Meyer, 2019'dan değiştirilmiştir). **17**
- Şekil 3.6 :** Cilt 364, 6433 sayılı ve 8 Temmuz 1993 tarihli Nature dergisinin kapak sayfasını göstermektedir. ERS-1 uydusundan alınan iki görüntünün interferometrik işlenmesiyle görülen, Haziran 1992'de Landers'taki $M_w=7,3$ büyüklüğündeki depremle ilişkili yüzey deformasyonunu göstermektedir (Massonnet ve diğ., 1993).. **19**
- Şekil 3.7 :** Tek geçişli interferometrinin geometrisi. (a) Okyanus ve deniz dalgalarının hız alanını, buz tabakaları ve buzullar gibi hareketli nesneleri haritalamak için kullanılan yol boyunca geometri (perspektif görünüm) (Zebker ve Goldstein, 1986). (b) Sayısal yükseklik modellerini oluşturmak için kullanılan çapraz hat geometrisi (uçuş yönüne dik bir düzlemde). Faz farkı, yol boyunca interferometrede ölçüm sırasında nesnenin hareketinden kaynaklanırken, yol boyunca interferometrede faz farkı, görüntülenen alandaki yükseklik farklarından kaynaklanmaktadır..... **20**
- Şekil 3.8 :** Uydu bazlı tekrar-geçiş interferometrisinin geometrisi. Üst panel: İki uydu geçişi sırasında görüntüleme geometrisi. Yörüngedeki sapmalar nedeniyle taranan alan farklı bakış açılarıyla görüntülenir. Alt panel: Yüzeydeki aynı hedefin iki farklı geçiş sırasında görüntülenmesi. Yakın görünümlü iç şekil: iki yörünge arasındaki çeşitli bazlar (uydunun yörüngesine dik bir düzlemde) gösterir (Zebker ve Goldstein, 1986). **21**
- Şekil 3.9 :** Piksel tipleri (a) Dağınık saçıcılar içeren piksel. Pikseldeki saçıcılardan dönen yansımaların toplamı pikselin faz değerini oluşturur. Saçıcılar yer değiştirirse faz toplamı değişir. (b) İnsan yapımı bir binadan kaynaklanan tek bir kuvvetli ve kararlı saçıcının hâkim olduğu piksel (Hooper ve diğ., 2011'den değiştirilmiştir)..... **24**
- Şekil 3.10:** Bu çalışmada kullanılan ALOS-1 (a), Envisat (b) ve Sentinel-1 A/B (c, d) görüntülerinin zaman-dikey baz diyagramları (çerçeve konumları için bkz. Şekil 1.3). Siyah noktalar SAR görüntülerini, beyaz yıldızlar ise zaman serisi analizleri için seçilen mastır görüntüyü göstermektedir. Gri çizgiler, Envisat verilerinin zaman serisi analizi (SBAS) (d) kullanılan interferogram çiftlerini göstermektedir..... **25**
- Şekil 4.1 :** ENVISAT (a), ALOS-1 (b) ve Sentinel-1 (c, d) görüntüleri kullanılarak InSAR zaman serilerinden hesaplanan InSAR LOS hız haritaları. Sıcak renkler (yeşilden kırmızıya) uydudan uzaklaşmayı (LOS bakış yönünde oturma veya yatay hareket), soğuk renkler (mavi) ise sabit alanları ve/veya uyduya doğru olan yer değiştirmeleri (yükselme veya LOS'un tersi yönünde

yatay hareket) gösterir. Beyaz çizgi, Şekil 4.4'te gösterilen profilin yerini gösterir.....	27
Şekil 4.2 : Sentinel-1 T167'den elde edilen LOS ortalama hız alanının Google Earth ile 3 boyutlu gösterimi.....	28
Şekil 4.3 : 2018-2020 (a, b) ve 2014-2018 (c, d) olmak üzere iki farklı dönemde Sentinel-1 verilerinden hesaplanan InSAR LOS hız alanları. 2018'den bu yana deformasyonun kentin doğu tarafında artarken, batı tarafında azaldığı gözlenmektedir... ..	29
Şekil 4.4 : Şekil 5.1'de gösterilen A-B hattı boyunca düşey hız profilleri.	30
Şekil 4.5: Deformasyonun zamansal evrimi. 2000'li yılların başlarından itibaren hızlanan zemin oturmaları 2019'dan sonra şehrin batı yakasında yavaşlamış durumdadır (#8 ve #9).. ..	31
Şekil 4.6: Sentinel-1 T160 çerçevesinde farklı zaman dilimlerini kapsayan ve yeraltı suyu çekimini işaret eden bazı interferogramlar. İnterferogramlarda birçok dairesel saçak bulunmaktadır. Bunlar büyük olasılıkla kuyuların yerlerini göstermektedir. Zamanla bu dairesel loblar birleşmekte ve daha büyük loblar oluşturmaktadır. Üçgenler, DSI'den gelen kuyuların yerlerini, beyaz çizgiler ise Konya şehrinde çevre yollarını göstermektedir.. ..	32
Şekil 4.7: 2014-2018 yılları arasında Sentinel-1 yükselen (T160) ve alçalan (T167) çerçevelerindeki LOS hız alanlarının ayrıştırılmasıyla hesaplanan düşey (a) ve yatay (D-B) (b) bileşenleri. (c) ve (d) Düşey ve yatay hız alanlarının yakından görünümü.	34
Şekil 4.8: Şekil 4.7'de gösterilen A-B profili boyunca düşey (yeşil noktalar) ve yatay (D-B) (mavi noktalar) hız profillerini göstermektedir. Negatif ve pozitif yatay değerler sırasıyla batıya ve doğuya doğru olan hareketleri gösterir.	34
Şekil 4.9 : Yüzey deformasyonu ile yeraltı suyu seviyesi değişimi arasındaki korelasyon. (a) T160 üzerindeki ortalama LOS hız alanında gösterilen çalışma alanındaki mevcut kuyuların konumu. (b) (a)'da gösterilen kuyulardaki piezometrik ölçümlerin InSAR zaman serisi ile birlikte gösterimi.	35
Şekil 4.10: Konya Fayı üzerinde elastik kayma modellemesi. Siyah konturlar 2014 ve 2018 yılları arasında meydana gelen düşey deformasyonun 1 cm/yıl aralığındaki konturlarını göstermektedir. Beyaz çizgiler ise modelleme sonucu elde edilen düşey deformasyon konturlarını göstermektedir. Renk kodlaması modelin düşey hareketini gösterirken, oklar yatay hareketi göstermektedir. Modellenen fay kırmızı kutu ile gösterilirken, fayın yüzeye projeksiyonu kırmızı kesikli çizgiler ile gösterilmektedir ki yüzeyde Konya fayı ile çakışmaktadır. Profil A-A' şekil 4.11'de gösterilmektedir.....	36
Şekil 4.11: Elastik yerdeğiştirme modeli ve InSAR'dan elde edilen gözlemleri gösteren hız profilleri ve bu profiller boyunca olan topoğrafik değişim. Konya fayı üzerinde potansiyel yavaş kayma nedeniyle oluşabilecek yüzey deformasyonu mavi ile gösterilirken ve gözlenen deformasyon yeşil ile gösterilmektedir.	37
Şekil 4.12: Poly3D sınır elemanları yöntemi ile oturmanın modellenmesi. Düşey deformasyon, yaklaşık 150 m derinlikte yeraltı suyu seviyesini temsil eden yataya yakın düzlemde negatif açılma (yani hacim kaybı) ile modellenmiştir. (a) 2014-2018 yılları arasında gözlenen düşey deformasyon. (b) Yaklaşık 150 m derinlikte üçgen elemanlar üzerindeki açılma miktarı. (c) Gözlemler ile model arasındaki fark. (d) A-B hattı boyunca gözlemlerin ve modelin profili.....	38



KONYA ŞEHİR ALANI YÜZEY DEFORMASYONLARININ InSAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

ÖZET

Bu tezde Yapay Açıklık Radar İnterferometrisi (InSAR) tekniği kullanılarak Konya şehir merkezi ve civarındaki yüzey deformasyonları çalışılmıştır. Bunun için Avrupa Uzay Kurumu'na ait Envisat (2004-2010) ve Sentinel-1 A/B (2014-2020) uyduları ile Japon Uzay Ajansı'na ait ALOS-1 (2006-2010) uydularının Yapay Açıklık Radar (SAR) verileri kullanıldı. GMTSAR, ROI_PAC ve DORIS yazılımları ile elde edilen interferogramlar StaMPS yazılımı kullanılarak zaman serileri ve radar bakış yönü (LOS) hız haritaları hesaplandı. Kuzey ve güney yönlü yörüngelerden elde edilen Sentinel-1 LOS hız alanları kullanılarak yatay ve düşey hız alanları elde edildi. Elde edilen sonuçlar Konya şehir merkezindeki zemin oturmalarının 2004 yılından 2020 yılına kadar geçen zamanda zamansal ve mekânsal değişimini ortaya koymaktadır. 2004 yılından itibaren başlangıçta birkaç cm olan zemin oturmaları yıllık 11 cm'ye ulaşmaktadır. LOS ve düşey hız alanları şehri Alaaddin Tepesi'nden tam ortadan ikiye bölen kuzey-güney yönlü bir hattın her iki tarafında iki büyük deformasyon alanının varlığını göstermektedir. Batı ve doğu deformasyon lobları sırasıyla tren istasyonunun 500 m batısında ve tren istasyonunun 5 km doğusunda merkezlenmiştir. En yüksek hızda gelişen ve geniş alanları içeren batı deformasyon alanı Konya tren istasyonunun hemen batısında odaklanmakta ve yıllık 11 cm'ye ulaşan deformasyonlar gözlenmektedir. Şehrin doğu bölümünde bulunan deformasyon ise merkezden yaklaşık 3,5 km uzaklıkta bulunmaktadır. Deformasyon alanlarını ayıran bu kuzey güney yönlü hattın varlığına neyin sebep olduğu kesin bilinmemekle birlikte, buna şehrin üzerinde oturduğu alüvyon sedimanlardaki heterojen yapı veya yeraltı sularına geçirimsiz bir zon oluşturan bir fayın varlığı sebep olabilir. Bu sorunun cevabını bulmak için jeofizik yöntemlere başvurmak gerekmektedir. Hız alanları deformasyonların alüvyon ile sınırlı olduğunu göstermektedir. Şehrin batısındaki yamacın önünde bulunan aktif Konya fayı boyunca yüzeyde herhangi bir deformasyon gözlenmemektedir. Yapılan elastik yerdeğiştirme modellemesi deformasyonun Konya fayı üzerinde olası bir asismik kaymadan kaynaklanma ihtimalinin düşük olduğunu göstermektedir. Çünkü çok sıkı derinliklerde (4-5 km) çok yüksek kayma (90 cm/yıl) gerektirmektedir. 2019 itibarıyla, şehrin batı tarafındaki deformasyon önemli ölçüde yavaşlarken doğu kısmında ise artmaya devam etmiştir. InSAR zaman serileri ile kuyu suyu seviyelerindeki değişimler arasında oldukça iyi bir korelasyon mevcuttur. Bu InSAR sonuçları ile gözlenen ve 11 cm/yıl'a ulaşan zemin oturmalarının yılda ortalama 6 m düşen yeraltı su seviyesi değişimlerinden kaynaklandığını göstermektedir. 2019 yılından başlayan deformasyon hızındaki azalmanın sebebinin büyük olasılıkla şehrin su ihtiyacının yeraltı suyu dışında başka kaynaklardan karşılanmasından dolayı olduğu düşünülmektedir. Poly3D sınır elemanları metodu modellemesi çalışmaları, 2014 ve 2020 yılları arasında Konya metropol alanı ve çevresindeki akiferde sıkışma nedeniyle yıllık yaklaşık $7.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ 'e ulaşan hacim kayıplarının oluştuğunu göstermektedir.



ANALYSIS OF SURFACE DEFORMATION IN THE METROPOLITAN AREA OF KONYA CITY USING SYNTHETIC APERTURE RADAR INTERFEROMETRY

SUMMARY

In this thesis, spatiotemporal evolution of surface deformation in the Konya city and its vicinity is studied using advanced multi-temporal synthetic aperture radar techniques with SAR data acquired by Envisat, ALOS-1, and Sentinel-1 A/B satellites between 2004 and 2020. Land subsidence resulting from excessive groundwater extraction is one of the major environmental problems in the developing world as cities increase in population and water use in the absence of adequate pumping regulation and enforcement (Haghshenas and Motagh, 2019). The land subsidence due to over-extraction of groundwater from aquifer systems can cause serious damages to the urban components such as motorways, buildings and underground structures in long-term. Multiple studies have documented that many cities have undergone severe land subsidence in recent years as a result of groundwater extraction. This settlement phenomena mostly occurs when a large amount of groundwater has been extracted from unconsolidated alluvial or basin-fill aquifer systems as a result of ground compaction. Multiple groundwater-related land subsidence phenomena have been observed in cities in Indonesia (Du et al. 2018), Iran (Motagh et al., 2008; Khorrami et al., 2020), Italy (Peduto et al., 2015; Rosi et al., 2016), Mexico (Castellazzi et al., 2017; Figueroa-Miranda et al., 2018), the United States (Amelung et al., 1999; Bekaert et al., 2017; Riel et al., 2018), Spain (Fernandez et al., 2018) and Turkey (Aslan et al., 2019; Imamoglu et al., 2019; Orhan, 2021).

Knowledge of the spatial and temporal extents of land subsidence is necessary for developing water management programs and establishing measures to mitigate hazards associated with land settlements and infrastructure (Haghshenas and Motagh, 2019). In Turkey, land subsidence due to groundwater extraction is reported for Istanbul, Afyon and Bursa cities (Aslan et al., 2019; Imamoğlu et al., 2019).

Land subsidence in the Konya region has long been known and documented geodetically first by Üstün et al. (2010) using GPS measurements. Establishing and measuring 6 GPS benchmarks, they found subsidence with rates reaching up to 5.2 cm/yr. The maximum subsidence is found to be near the city, to the south of the city center. Since GPS measurements are pointwise measurements, they did not reveal a full picture of the pattern of subsidence. First InSAR observations in the study area were made again by Üstün et al. (2015) using limited amount of Envisat SAR imagery over the Karapınar region.

The ongoing subsidence in the metropolitan parts of the city is poorly known since no detail or comprehensive studies on this subsidence has been reported in the literature. Çomut et al. (2016) were the first to use InSAR technique with Sentinel-1 A/B and CosmoSky-Med images between 2014 and 2015 and report the subsidence in the metropolitan area of Konya. They found a maximum of 6 cm/yr of subsidence centered near the railway station. However, this study is based on a very short observation

period, that is, 1.5 years of Sentinel-1 data only, and hence does not reveal the entire pattern of deformation in the city.

Recently, Orhan (2021) used Sentinel-1 A/B data between October 5, 2014 and February 04, 2018 and found a ground subsidence of up to 7.5 cm/yr. Both Çomut et al. (2016), and Orhan (2021) used only a single track, that is, ascending or descending. Other InSAR observations in the Konya plain are mostly focused around the Karapınar region where widespread sinkhole formations are present (Üstün et al., 2015; Caló, et al., 2017; Orhan et al. 2021).

In this study, we calculate time series of deformation with advanced multitemporal InSAR techniques using descending ENVISAT images between 2004 and 2010, ascending ALOS images between 2006 and 2010, and ascending and descending Sentinel-1 A/B TOPS images between 2014 and 2020 in order to reveal the spatiotemporal pattern of ground subsidence in the entire Konya city since 2004. Using multi temporal advanced InSAR techniques (MT-InSAR), the time series of surface deformation and mean line of sight (LOS) maps are calculated. The mean LOS velocity maps derived from Sentinel-1 data between 2014 and 2020 are decomposed in to vertical and E-W horizontal component following the approach given by Motagh et al. (2017). The E-W horizontal velocity maps reveal the horizontal motion due to the subsidence around the edges of deformation lobes.

MT-InSAR analysis of SAR images acquired by 3 different spaceborne sensors spanning different time periods shows that the city of Konya has been subsiding since 2004. Subsidence is confined to the Quaternary alluvium while there is almost no deformation in the hills to the west of the city where the active Konya fault is located. The pattern of subsidence shows two main lobes of rapid subsidence to the west and east of the city center with a N-S line with no deformation that divides the city in to two nearly equal halves. The western and eastern lobes are centered 500 m west, and 5 km east of the train station, respectively. What separates the subsidence of the city into two halves roughly along a north-south line is unknown. It may be due to lithological differences in the alluvium on which the city is built on or the presence of a fault that may be sealed and hence act as a barrier to the aquifer system or the rate of extractions on both sides which are not sufficiently high for lobes to merge. Between 2004 and 2019 the rate of subsidence increased from a few cm per year to 11 cm/yr. Although subsidence has slowed down over the last two years, particularly in the western side of the city, it is still taking place at rates reaching up to 6-7 cm/yr in the eastern side.

We also use groundwater level changes recorded by the StateHydraulic Works (Devlet Su İşleri) over the last five years where lobes of rapid subsidence are centered. The results obtained from multi-sensor InSAR time-series are compared with groundwater levels over the last five years to understand how land subsidence evolves in response to the water table fluctuations.

Spatiotemporal variation of subsidence and its strong correlation with change in water table level confirm that subsidence in the metropolitan area of Konya is due to over drafting of the ground water used for urban needs. Over the last two years or so, the demand appears to have decreased as subsidence rate has slowed down dramatically or stopped at some locations in the city. This appears to be due to the so called “Blue Channel” project that transfers drinking water to the city from several recently built dams to the south.

We model the surface deformation deduced from Sentinel-1 data using elastic dislocations on triangular and rectangular surfaces (Okada, 1985). In order to check whether or not subsidence can be partly explained by creep on down dip section of the Konya fault beneath the city, we have modelled the subsidence with elastic dislocations on a rectangular fault that coincides with the Konya fault. Taking a forward approach in which fault parameters are estimated by trial and error, we model the vertical deformation observed between 2004 and 2017 with the Sentinel-1 data. Modelling results show that an unrealistic rate of aseismic slip (about 90 cm/yr) is required on a small portion of the fault (about 6 km) at depths between 4 and 6 km. While the western lobe can be approximated to some extent, the eastern lobe cannot be modelled satisfactorily. Thus, it is highly unlikely that the subsidence can be attributed to aseismic slip on the Konya fault.

In addition to rectangular dislocation, we have also modelled the subsidence with triangular dislocations in order to calculate volume loss due to the compaction of the aquifer as a result of excessive water extraction (Thomas, 1993). A near flat surface at a depth of 150 m below surface where the water table is approximately found is constructed using triangular elements. A negative opening of these triangular elements is inverted using the Poly3Dinv code (Maerten et al., 2005) using the vertical deformation observed between 2004 and 2017. The results show that every year a volume loss of $\sim 7.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ is happening due to groundwater extraction. This amount is valid only for the Konya city center and its vicinity. The volume loss is much greater where agricultural activities are intensive. If the ground water extraction is totally stopped in the future, InSAR monitoring could answer the question of how much of this compaction is recoverable.

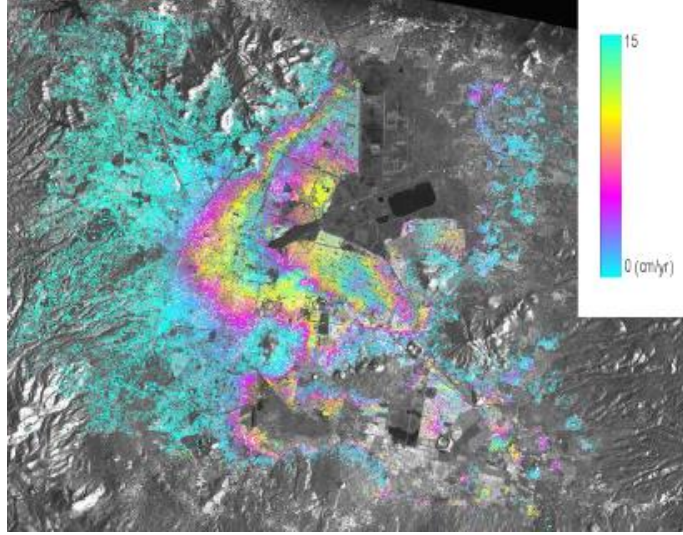
Although there is no reported incidence directly linked with the ongoing deformation, subsidence taking place for decades must have caused significant damage to buildings and infrastructure in Konya, which needs to be investigated. The damage is probably visible in the form of fractures and tilts in engineering structures that we assumed are attributed to the low quality of buildings and materials. If over pumping of the ground water continues the infrastructure and building will eventually be damaged seriously.



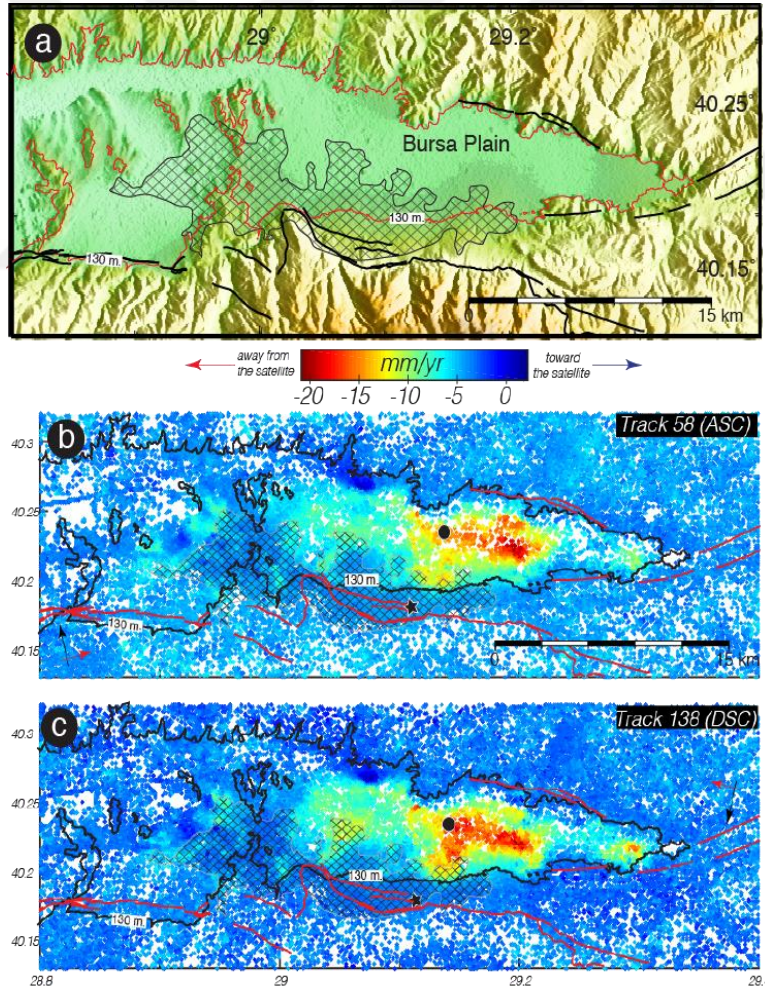
1. GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Konusu

Bu tezde, Konya şehir merkezinde aşırı yeraltı suyu çekimine bağlı olarak gelişen yüzey deformasyonları araştırılmıştır. Yeraltı suyu kullanımından kaynaklanan zemin oturması, gelişmekte olan ülkelerde, yeterli pompalama düzenlemesi ve yaptırımı olmaksızın şehirlerin nüfus ve su kullanımında artış olması nedeniyle ciddi bir sorun olup dünya genelinde büyüyen bir endişe kaynağıdır (Haghshenas ve Motagh, 2019). Yeraltı suyunun akifer sistemlerinden aşırı mikarda çıkarılmasının neden olduğu arazi yüzeyi deformasyonları uzun vadede otoyollar, binalar ve yeraltı yapıları gibi kentsel bileşenlere ciddi zararlar verebilecek yavaş ve kalıcı jeolojik bir süreçtir. Son yıllarda çok sayıda çalışma, birçok şehrin, yeraltı suyunun fazla kullanımından kaynaklı ciddi zemin oturması yaşadığını belgelemiştir (Aslan ve diğ., 2019). Bu oturma olayı, çoğunlukla, geçirimli hazne kayanın sıkışmasının bir sonucu olarak, konsolide olmayan alüvyon veya havza dolgulu akifer sisteminden büyük miktarda yeraltı suyu çekildiğinde ortaya çıkar. Endonezya (Du ve diğ., 2018), İran (Motagh ve diğ., 2008; Khorrami ve diğ., 2020), İtalya'daki (Peduto vd., 2015; Rosi vd.) şehirlerde yeraltı suyuyla ilgili çok sayıda zemin oturması olayı gözlemlenmiştir; Meksika (Castellazzi ve diğ., 2017; Figueroa-Miranda ve diğ., 2018), Amerika Birleşik Devletleri (Amelung ve diğ., 1999; Bekaert ve diğ., 2017; Riel ve diğ., 2018), İspanya (Fernandez ve diğ., 2018) ve Türkiye (Aslan ve diğ., 2019; İmamoğlu ve diğ., 2019; Orhan, 2021) (Şekil 1.1). Zemin oturmalarının mekansal ve zamansal boyutları hakkında bilgi, su yönetimi programları geliştirmek, arazi yerleşimleri ve altyapısı ile ilişkili tehlikeleri azaltmaya yönelik önlemler oluşturmak için gereklidir (Haghshenas ve Motagh, 2019). Türkiye'de İstanbul, Afyon ve Bursa şehirleri için yeraltı suyu çıkarılmasına bağlı yüzey deformasyonları (zemin oturması ve kırıklar) rapor edilmektedir (Şekil 1.2) (Aslan ve diğ., 2018; Aslan vd., 2019; İmamoğlu ve diğ., 2019; Demirtaş ve diğ., 2008).



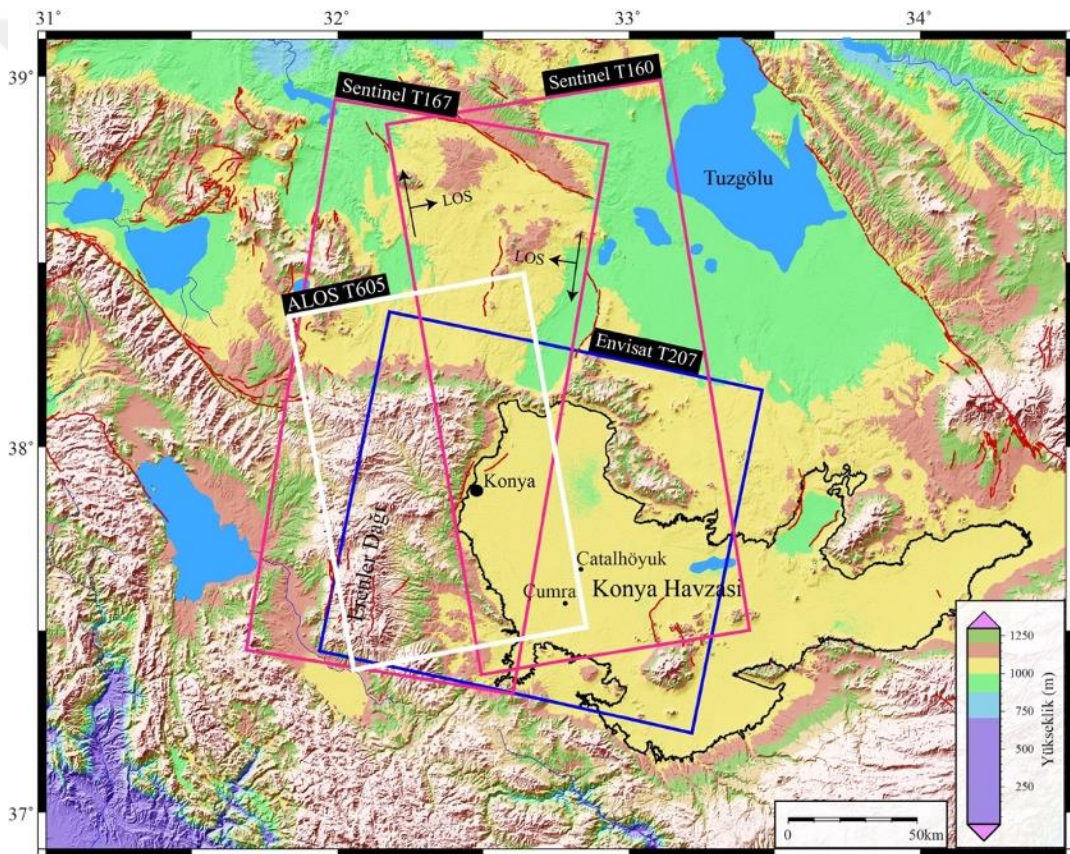
Şekil 1.1: Mexico City (Meksika) şehrinde 2003-2010 yılları arasında meydana gelen yüzey deformasyonların PS-InSAR tekniği kullanılarak elde edilen haritası (Yan ve diğ., 2012).



Şekil 1.2: Bursa havzasında meydana gelen zemin deformasyonlarının PS-InSAR yöntemiyle haritalanması (Aslan ve diğ., 2019).

1.2 Çalışmanın amacı

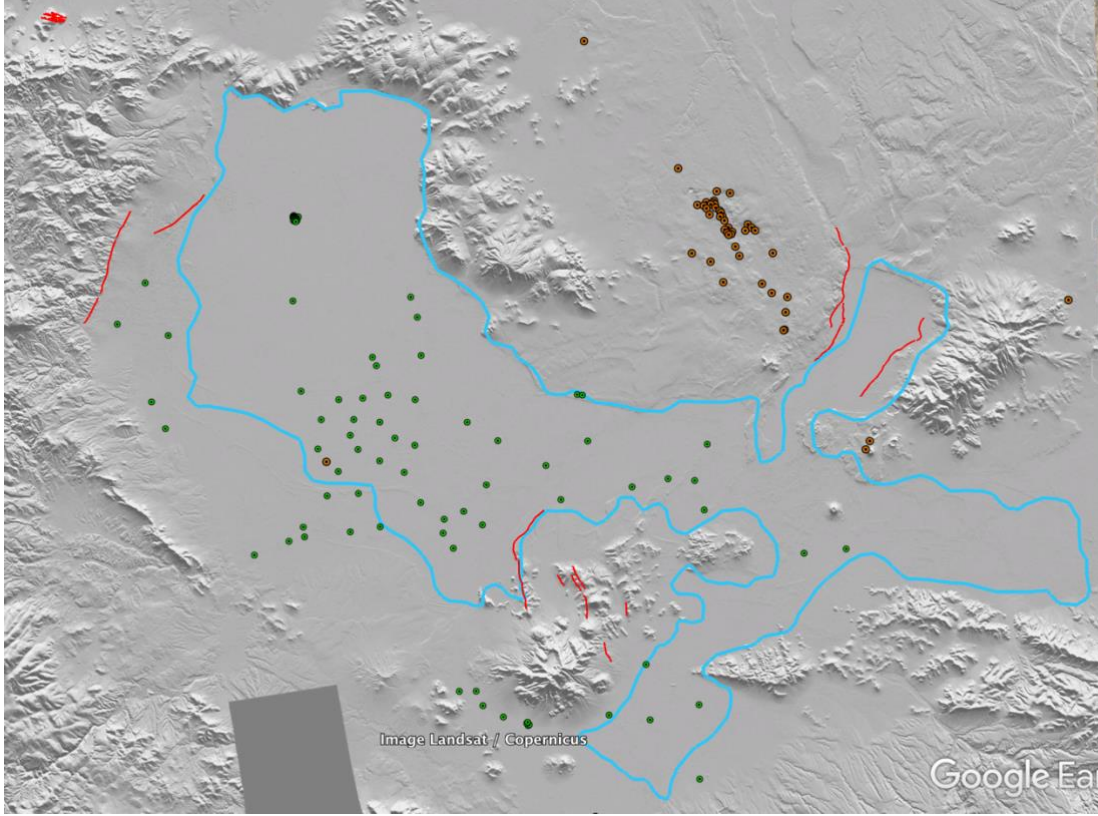
Çalışma alanı Konya şehir merkezi ve yakın civarını kapsamaktadır. Konya şehri, Konya Kapalı Havzası'nın kuzeybatısında ve Tuz Gölü'nün güney batısında bulunmaktadır (Şekil 1.3). Yeraltı suyu çekimi nedeniyle bina ve benzeri yapıların çökme riskinin yüksek olması gerçeği göz önüne alındığında, bu tezin temel amacı, Konya'nın deformasyona maruz kalan olan bölgelerini Sentinel-1, ALOS-1 ve Envisat SAR verileri ve aynı çerçevede farklı zamanlarda alınan birçok görüntünün kullanıldığı ileri InSAR teknikleri (MT-InSAR; Multi Temporal InSAR) kullanarak yüksek doğrulukta haritalamak ve deformasyonun zamansal ve mekânsal değişimini ve nedenlerini ortaya koymaktır.



Şekil 1. 3: Mekik Radar Topoğrafya Misyonu (SRTM) 90-m verisinden elde edilen gölgeli rölyef görüntüsü ile Konya havzası ve çevresinin morfotektonik haritası. Kırmızı çizgiler aktif faylardır (Emre ve diğ., 2013). Dikdörtgenler, bu çalışmada kullanılan SAR görüntü çerçevelerini göstermektedir. Siyah poligon Konya Kapalı Havzası'nı göstermektedir (1050 m yükseklik münhanisi). ALOS-1 T605 ve Sentinel-1 T160 çerçeveleri yükselen yörüngelerdeki çerçeveler iken, Envisat T207 ve Sentinel-1 T167 çerçeveleri alçalan yörüngelerdeki çerçevelerdir. Ok çiftleri uydu uçuş yönünü ve uydu bakış yönlerini (LOS) göstermektedir.

1.3 Önceki Çalışmalar

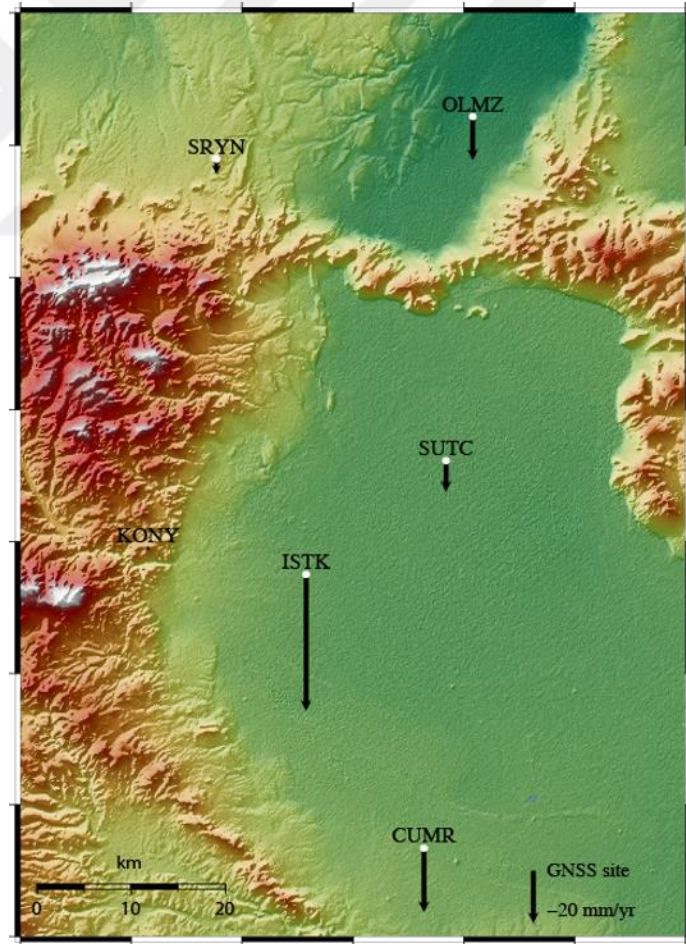
Konya havzasında InSAR çalışmaları daha çok Karapınar bölgesinde yoğunlaşan obruklar üzerine ve Konya Kapalı Havzası'nın deformasyonu üzerine yapılmıştır (Şekil 1.4) (Caló, ve diğ., 2017; Orhan ve diğ., 2021; Yeşilmeden ve diğ., 2021).



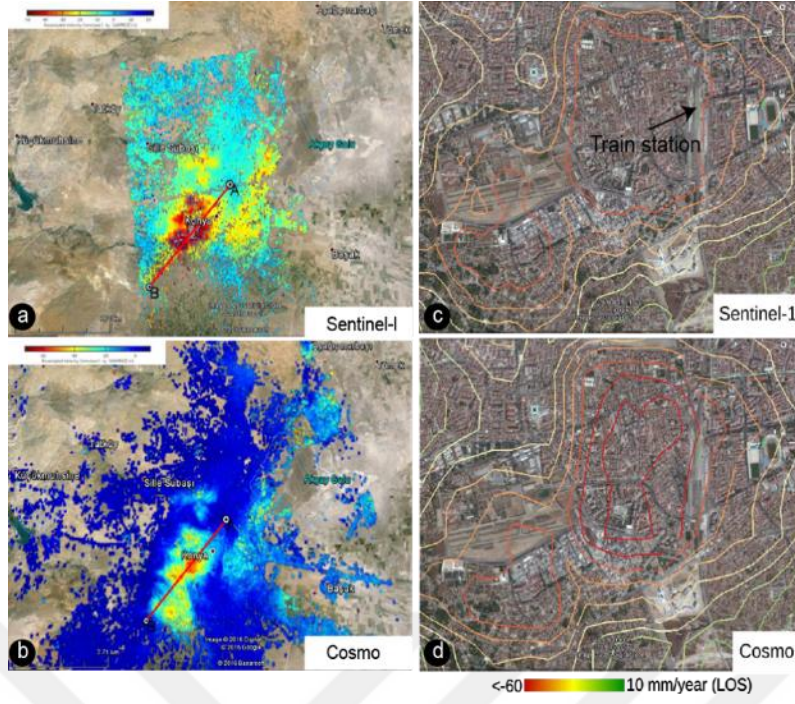
Şekil 1.4: Konya Kapalı Havzası'nın 12-m çözünürlüklü TanDEM-X verilerinden (Proje No: IDEM_GEOL_0132) elde edilen sayısal arazi modelinin gölgelendirilmesiyle elde edilen morfoloji haritası. Turuncu renkteki daireler sayısal arazi modelinden haritalanan obrukları, yeşil renktekiler ise höyükleri göstermektedir. Kırmızı çizgiler MTA tarafından haritalanan aktif fayları (Emre ve diğ., 2013), mavi poligon ise Konya paleogölünün kıyı çizgilerini göstermektedir (Daniel ve diğ., 2017).

Bölgedeki deformasyonların jeodezik yöntemlerle belirlenmesine yönelik ilk çalışma Üstün ve diğ. (2010) tarafından gerçekleştirilmiştir. Altı farklı noktada GPS ölçümleri yapan Üstün ve diğ. (2010) 5.2 cm/yıl'a ulaşan hızlarda düşey deformasyonlar bulmuştur (Şekil 1.5). Maksimum oturma, şehir merkezinin güneyinde, şehre yakın bir yerde bulunmuştur. Ancak GPS ölçümleri noktasal ölçümler olduğu için deformasyonun genel mekansal görünümünü tam olarak detaylı bir şekilde vermemektedir. InSAR ölçümleri alansal olduğu için, zemin deformasyonlarının mekansal ve zamansal değişimini ortaya çıkarmada önemli bir yere sahiptir. İlk kez InSAR yöntemini kullanarak Konya şehir merkezindeki yüzey deformasyonları

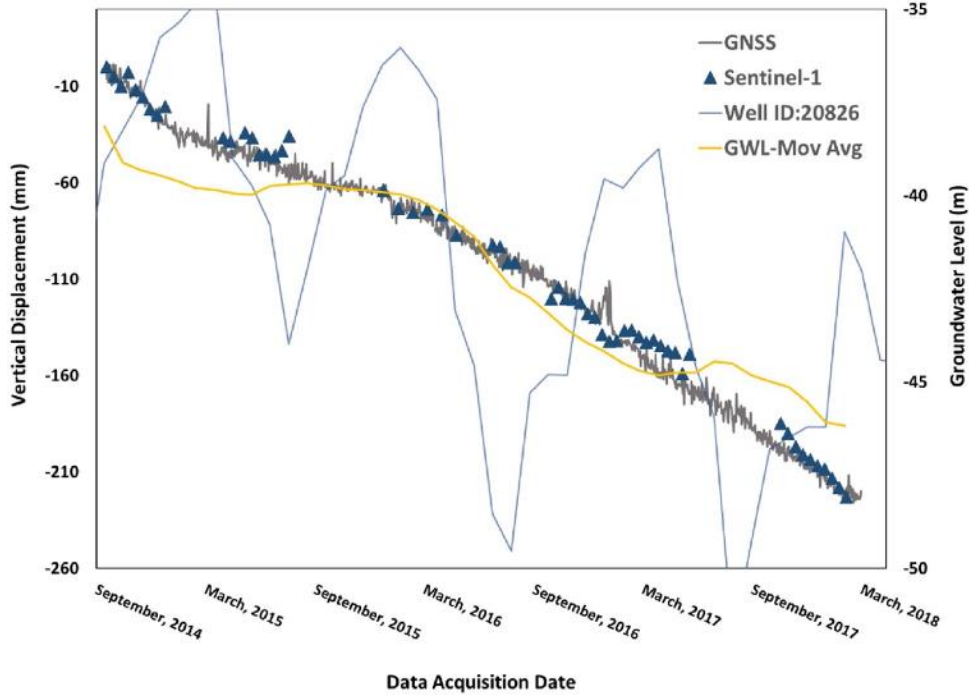
Çomut ve diğ. (2016) tarafından rapor edilmiştir. 2014-2015 yılları arasında 1.5 yıllık zaman diliminde ve tek bir yörüngeden elde edilen Sentinel-1 A ve CosmoSky-Med görüntülerini kullanan Çomut ve diğ. (2016) Konya merkez tren istasyonunun yaklaşık 500 m batısında yıllık 6 cm'ye ulaşan oturmalar bulmuştur (Şekil 1.6). Yakın bir geçmişte Orhan (2021) 2014-2020 yılları arasında yine tek bir yörüngeden alınan Sentinel-1 verilerini kullanarak Konya şehir alanındaki deformasyonları rapor etmiştir. Orhan (2021) GPS, yeraltı suyu ve InSAR ölçüm sonuçları arasında yüksek bir uyum olduğunu göstererek yüzey deformasyonlarının yeraltı suyu çekimi nedeniyle meydana geldiğini ileri sürmüştür (Şekil 1.7). Hem Çomut ve diğ. (2016) hem de Orhan (2021) Konya şehir alanındaki deformasyonları tek bakış açısından elde edilen ve kısa zaman dilimlerini kapsayan veri setleri kullanarak çalışmışlar ve bu nedenle deformasyonların yatay ve düşey bileşenlerini ve alansal ve mekansal gelişimini geniş bir zaman diliminde ortaya koyamamışlardır.



Şekil 1. 5: Konya havzasında yapılan GPS ölçüm sonuçları. Oklar düşey yönde hareketi göstermektedir (Üstün ve diğ., 2010).



Şekil 1. 6: Konya şehir merkezinde 2014-2015 yılları arasında meydana gelen yüzey deformasyonlarının Sentinel-1 (a, c) ve CosmoSky-Med (b, d) uydu görüntüleri kullanılarak haritalanması (Çomut ve diğ., 2016). Radar bakışı yönünde yılda 6 cm'ye kadar ulaşan deformasyon (oturma) tren istasyonunun yaklaşık 500 m batısında merkezlenmektedir.

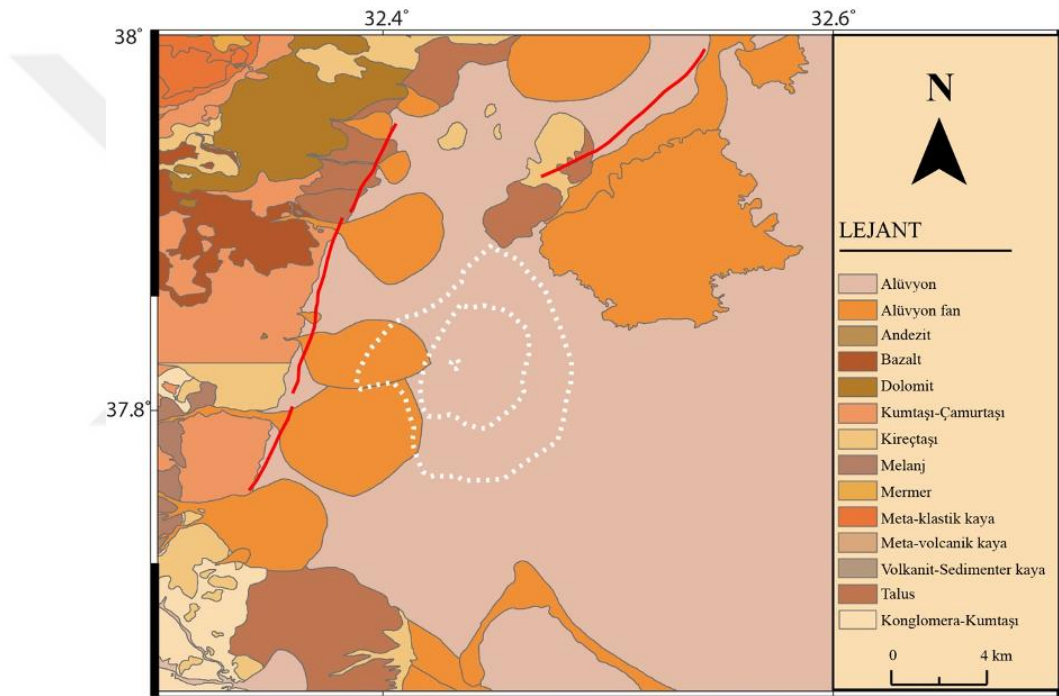


Şekil 1. 7: Konya şehir merkezinde elde edilen Sentinel-1 ve GPS zaman serilerinin kıyaslanması (Orhan, 2021).

2. ÇALIŞMA ALANININ JEOLJİSİ VE SİSMOTEKTONİĞİ

2.1 Çalışma Alanının Jeolojisi

Konya şehri, Erenler dağlarının doğusunda, temel kayalarının yüzeylendiği Kuvaterner yaşlı düz alüvyon yüzey üzerinde yer almaktadır. Temel kayaçları, Paleozoik'ten Senozoik'e (Eosen) kadar çeşitli litoloji türlerinden oluşur (Şekil 2.1).



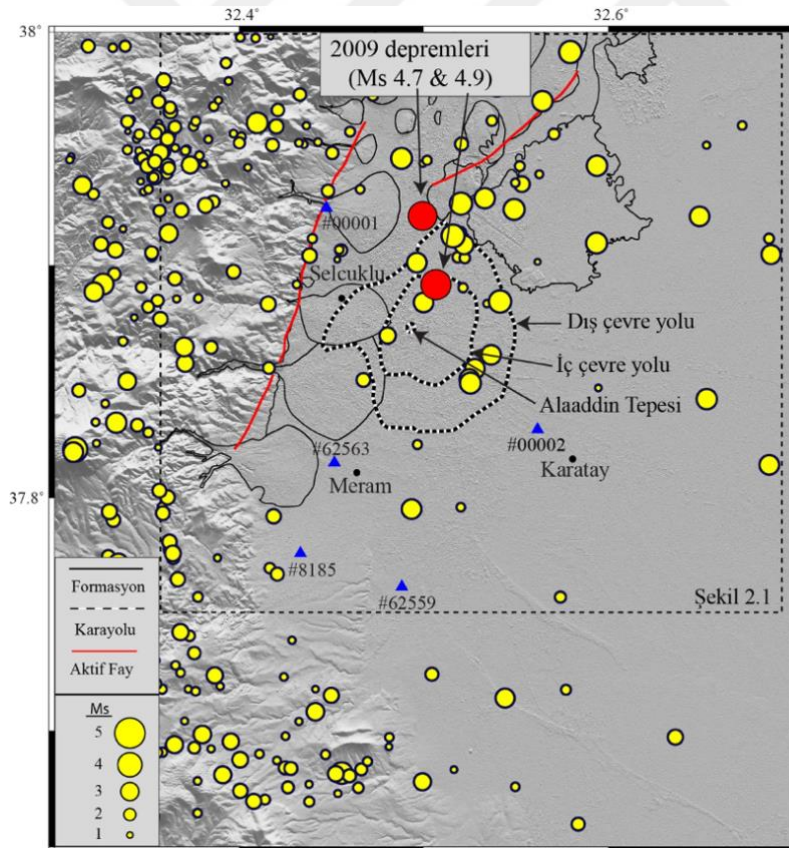
Şekil 2. 1: Konya ve çevresinin 1:25.000 ölçekli MTA haritalarına dayalı jeoloji haritası. Beyaz kesik çizgiler, merkezde Alaaddin Tepesi ile çevre yollarını gösterir. Kırmızı çizgiler aktif fayları göstermektedir (Emre ve diğ., 2013).

Kaynakta sığ denizel kayaları temsil eden Geç Permian-Erken Kretase yaşlı metakarbonatlar ve metaklastikler ile Geç Kretase yaşlı metamorfe pelajik ve olistostromik kayalardan oluşur (Hakyemez ve diğ., 1992). Bu kayaçlar, sırasıyla metamorfizmaya uğramıştır ve Geç Kretase ofiyolitli melanj ve Mesozoyik ofiyolit tarafından bindirilmiştir (Şengör ve Yılmaz, 1981). Bütün bu kayaçlar Paleosen-Eosen yaşlı metamorfizmasız sığ deniz kırıntıları ile uyumsuz olarak örtülmüştür. Miyosen-Kuvaterner kıtasal kayaçları bölgenin en genç birimidir. Menderes-Torid bloğunun pasif kıtasal kenarının bir parçası olan Geç Permian-Kretase kayalarının Kırşehir

bloğu altına dalması ofiyolit ve HP/LT (Yüksek basınç/Düşük sıcaklık) metamorfizması gelişmiştir (Şengör ve Yılmaz, 1981). Bölgedeki son suture oluşumu, düşük dereceli yeşil şist metamorfizması ve bindirmeli yapılar meydana getirmiştir (Şengör ve Yılmaz, 1981). Neojen'de kuvvetli volkanizma nedeniyle zayıf fay hatları boyunca andezit ve bazalt akıntıları oluşmuştur. Kuvaterner birimler alüvyon ve alüvyon yelpazeler olup Konya kapalı havzasını güneyden sınırlayan Toroslardan ve batıdan çevreleyen Erenler Dağı'ndan aşınma yoluyla oluşmuştur.

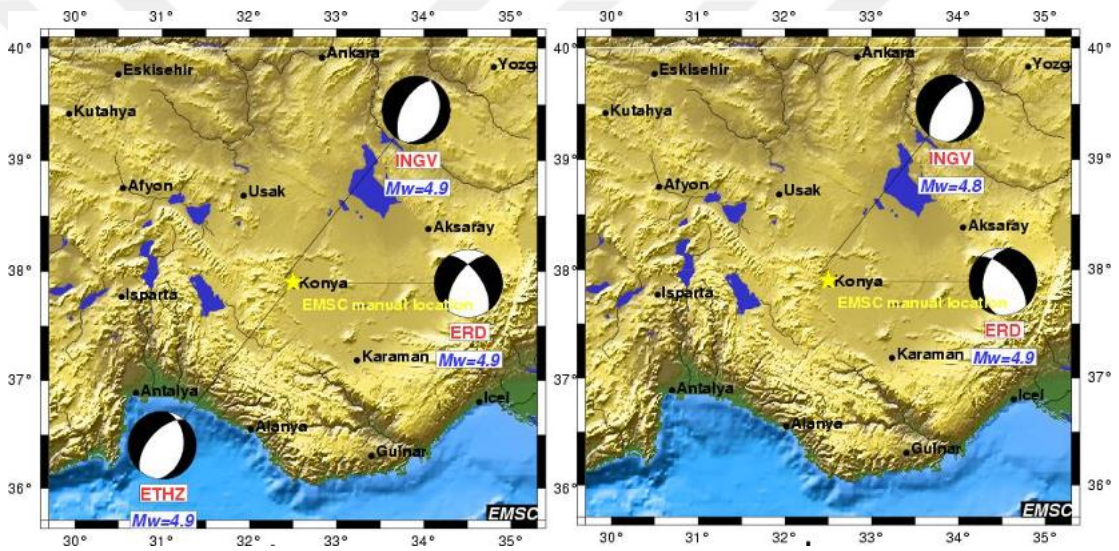
2.2 Çalışma Alanının Sismotektoniği

Çalışma alanı İç Anadolu Bölgesi'nde bulunmaktadır. İç Anadolu'nun neotektonik rejimi “Ova Rejimi” (Şengör, 1980) ve “Orta Anadolu neotektonik rejimi” (Koçyiğit ve diğ., 2000) olarak bilinir. Bölgede genişlemeli tektonik rejim halihazırda Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Çalışma alanında MTA (Emre ve diğ., 2013) tarafından haritalanan iki aktif fay bulunmaktadır (Şekil 2.2).

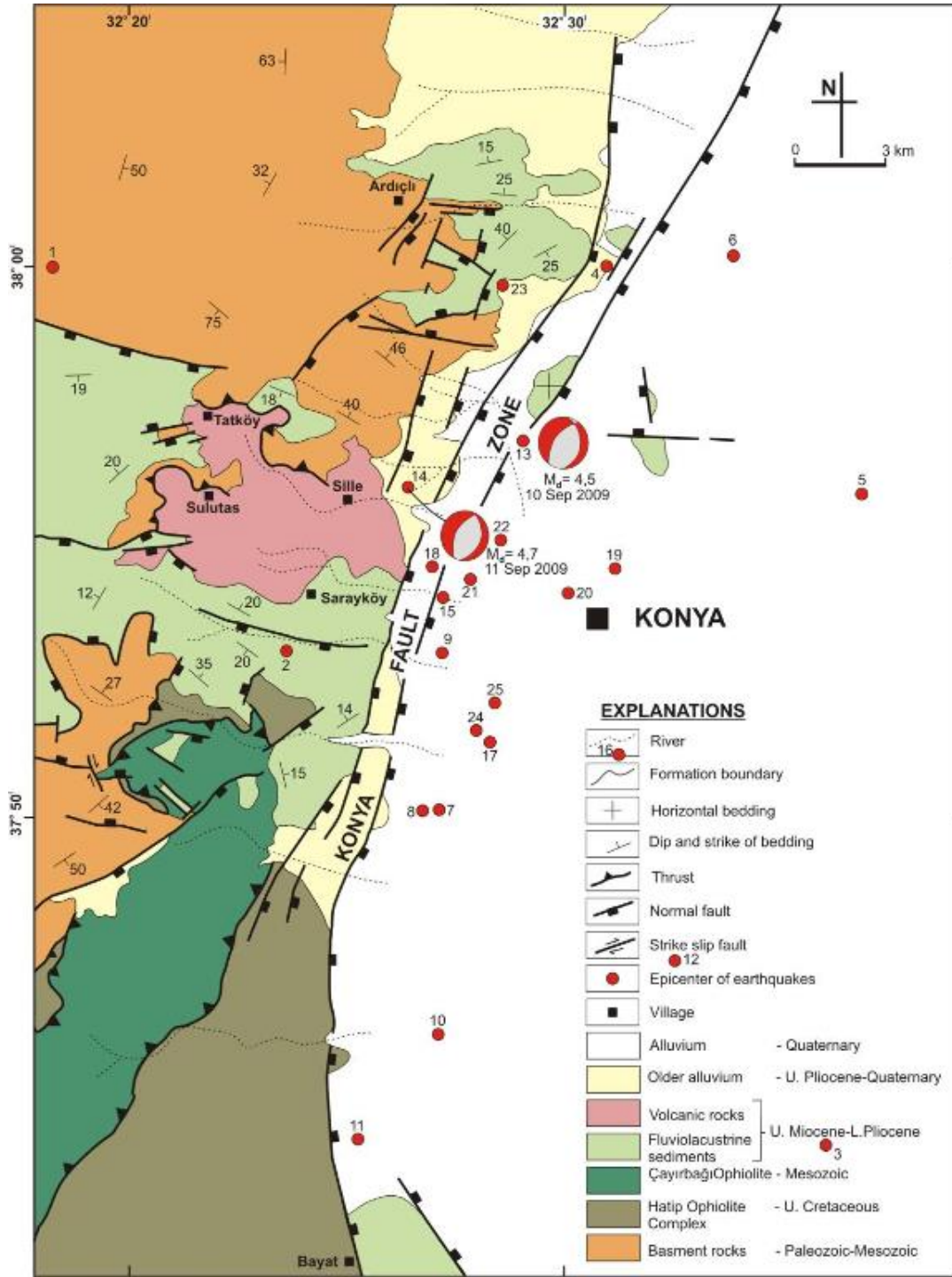


Şekil 2. 2: Konya bölgesinde 1990-2021 yılları arasında gözlenen sismik aktivite (AFAD). Siyah çizgiler alüvyal düzlükteki alüvyal yelpaze ve diğer litolojilerin sınırlarını, kırmızı çizgiler ise aktif fayları göstermektedir. Beyaz kesik çizgiler, merkezde Alaaddin Tepesi ile çevre yollarını, mavi üçgenler ise kuyu yerlerini göstermektedir.

Şehrin yaklaşık 6 km batısındaki yamaçların önünde yer alan Konya fayı, temel kayaları Kuvaterner alüvyonundan ayırır. Diğer fay, alüvyon düzlüğünde yaklaşık 5 km kuzeydedir. Her iki fay da normal fay olarak gözükmemektedir. Bölgede bazı küçük doğrultu atımlı ve normal faylanma dışında önemli bir tektonik aktivite görülmemiştir (Koçyiğit ve diğ., 2000). Çalışma alanında son 30 yılda olan depremlerin büyüklükleri çoğunlukla 4'ün altında ve dağınıktır (Şekil 2.2). 10-11 Eylül 2009'da meydana gelen 4.7 ve 4.9 büyüklüğündeki depremler bölgede son 30 yıl içinde kaydedilmiş en büyük depremlerdir. Odak mekanizma çözümleri, depremlerin güneybatıya eğimli normal bir fay üzerinde sığ derinliklerde (~5 km) gerçekleştiğini göstermektedir (Şekil 2.3). Şokların merkez üssü konumları ve derinlikleri ve odak mekanizmaları, bunların doğu-güneydoğu eğimli Konya fayı üzerinde gerçekleştiğini göstermektedir (Şekil 2.4).



Şekil 2.3: 10 Eylül 2009 (sol panel) ve 11 Eylül 2009 (sağ panel) tarihli Konya depremlerinin çeşitli kurumlar tarafından yapılan odak mekanizması çözümleri (EMSC'den).



Şekil 2.4: Jeolojik harita üzerinde çizilmiş 10-11 Eylül 2009 Konya depremlerinin odak mekanizmaları (INGV'den) ve artçı sarsıntılar (numaralı kırmızı daireler) dağılımları gösterilmektedir (Aksoy ve Demiröz, 2011'den).

3. YÖNTEM VE VERİ SETİ

3.1 Radar

Radar kelimesi İngilizce “RADio Detecting And Ranging” kelimelerinin ilk harflerinden oluşmuştur. Işık hızına yakın bir hızda olan elektromanyetik dalgalarla çalışan radar, kendi ürettiği radyo ve mikrodalgaları yayan, bu dalgaların geri yansımalarını toplayan ve bu sürede geçen zamanı kaydeden bir tekniktir. Dalga gidiş-dönüş zamanıyla cismin mesafesini, geri yansıyan dalganın şiddetini kullanarak da cismin boyutu ve yüzeyi gibi özelliklerini algılayabilmektedir (Hanssen, 2001). 1873 yılında, İskoçyalı bir fizikçi ve matematikçi olan James Clerk Maxwell’in, elektromanyetik ışık teorisini keşfetmesiyle radar üzerine ilk çalışmaların temeli atılmıştır. 1886 yılında, Maxwell’in teorisini kanıtlamak için yola çıkan Alman fizikçi Heinrich Rudolf Hertz radyo dalgalarının kullanılabilir olduğunu deneyleriyle ispatlamış (Hanssen, 2001) ve radar üzerine çalışmalar hızlanmıştır. Daha sonra birçok ülkeden bilim insanlarının çalışmasıyla radar cihazları üretilip, geliştirilmiş ve hala geliştirilmeye devam etmektedir.

Yapılan birçok çalışma sonucunda anten boyunu kısaltmak ve görüntü çözünürlüğünü arttırmak için 1952’de John Wiley, “Doppler beam-sharpening” sistemi dediği bir hava radarı geliştirdi. Bu sentetik açıklıklı radar (SAR) cihazlarının ilkidir. Fırtınaların morfolojisini incelemek için ilk sivil Doppler radarı, 1971’de Oklahoma’daki Ulusal Şiddetli Fırtınalar Laboratuvarı’nda geliştirildi. Öncelikle askeri amaçlar için üretilen ve kullanılan radar cihazları 1960’ların başında sivil uygulamalarda da kullanılmaya başlamıştır. 1978 yılında okyanusları gözlemlemek için uzaya fırlatılan ilk SAR uydusu NASA’ya ait SEASAT’tır. Sadece üç ay çalışan bu uydu milyonlarca kilometrekarelik yüksek çözünürlüklü radar görüntüsü üretmiştir. 1980, 1990 ve 2000’li yılların başında, dünya yüzeyini topoğrafyasını çıkarmak için ilk radar interferometresi kullanılmıştır ve NASA’nın Mekik Radar Topoğrafya Misyonu dahil olmak üzere birkaç mekik SAR uydusu görev almıştır (Farr ve diğ., 2007). Bu tarihlerden sonra da yeni nesil SAR uyduları birçok ülke tarafından çeşitli görev amaçlı geliştirilip kullanılmıştır (Tablo 3.1).

Tablo 3.1: Uydu bazlı SAR sensörlerine ve temel özelliklerine genel bakış (Moreira ve diğ., 2013’den güncellenmiştir).

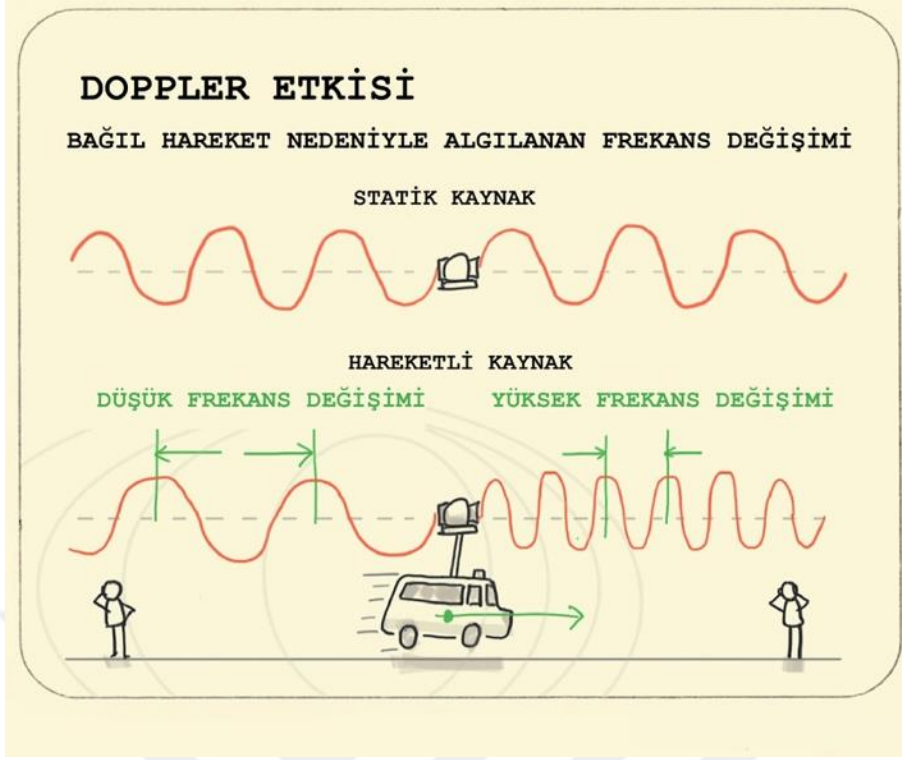
Sensor	Operation	Frequency Band (Polarization)	Comments	Institution, Country
Seasat	1978	L (HH)	Sadece 3 ay çalışan ilk SAR uydusu	NASA/JPL, ABD
SIRA-A, SIR-B	1981-1984	L (HH)	Topoğrafya haritalama mekiği	NASA/JPL, ABD
ERS-1/2	1991-2000/1995-2011	C (VV)	ERS uyduları (ilk Avrupa SAR uyduları)	ESA, Avrupa
J-ERS-1	1992-1998	L (HH)	JERS uydusu (ilk Japon SAR uydusu)	JAXA, Japonya
SIR-C/X-SAR	Nisan ve Ekim 1994	L & C (quad)	SAR görüntüleme amaçlı uzay mekiği	NASA/JPL, ABD DLR, Almanya ASI, İtalya
Radarsat-1	1995-günümüze	C (HH)	Kadana’nın ilk SAR uydusu, 500 km’ye kadar geniş görüntüleme tekniği	CSA, Kanada
SRTM	Şubat-2000	C (HH+VV) & X (VV)	SRTM	NASA/JPL, ABD DLR, Almanya ASI, İtalya
ENVISAT/ASAR	2002-2012	C (dual)	İleri SAR görüntüleme uydusu	ESA, Avrupa
ALOS/PALSAR	2006-2011	L (quad)	İleri SAR görüntüleme uydusu	JAXA, Japonya
TerraSAR-X	2007-günümüze	X (quad)	İlk bi-statik SAR, 1 m’ye varan çözünürlük, küresel topoğrafya	DLR/Astrium, Almanya
TanDEM-X	2010-günümüze	X (quad)	1 m’ye varan çözünürlükte kadar küresel topoğrafya Azimutta 1 m’ye varan çözünürlük	DLR/Astrium, Almanya
Radarsat-2	2007-günümüze	C (quad)	500 km’ye varan şerit genişliği	CSA, Kanada
COSMOSkyMed-1/4	2007,2010-günümüze	X (dual)	1 m’ye varan çözünürlükte görüntüleme sunan 4 uydu takımı ve 4 gün görüntüleme periyodu	ASI/MID, İtalya
RISAT-1/2	2008-günümüze	C (quad)	L-bant SAR	ISRO, Hindistan
HJ-1C	2012-günümüze	S (VV)	4 uydu takımından oluşan sistem	CRESDA/CAST/NRSCC, Çin
Kompsat-5	2013-günümüze	X (dual)	1 m’ye varan çözünürlükte görüntüleme sunan çok amaçlı SAR uydusu	KARI, Kore
PAZ	2018-günümüze	X (quad)	1 m’ye varan çözünürlükte görüntüleme sunan çok amaçlı SAR uydusu	CDTI, İspanya
ALOS-2	2014-günümüze	L (quad)	1 m’ye varan çözünürlükte görüntüleme sunan çok amaçlı SAR uydusu, 490 km’ye varan şerit genişliği	JAXA, Japonya
Sentinel-1a/1b	2014-günümüze	C (dual)	2 uydu takımı, 400 km’ye varan şerit genişliği	ESA, Avrupa
Radarsat takım-1/2/3	2019-günümüze	C (dual)	3 uydu takımı, 500 km’ye varan şerit genişliği	CSA, Kanada
SAOCOM-1/2	2018-günümüze	L (quad)	2 uydu takımı, tam polarizasyon	CONAE, Arjantin

3.2 Sentetik Açıklıklı Radar

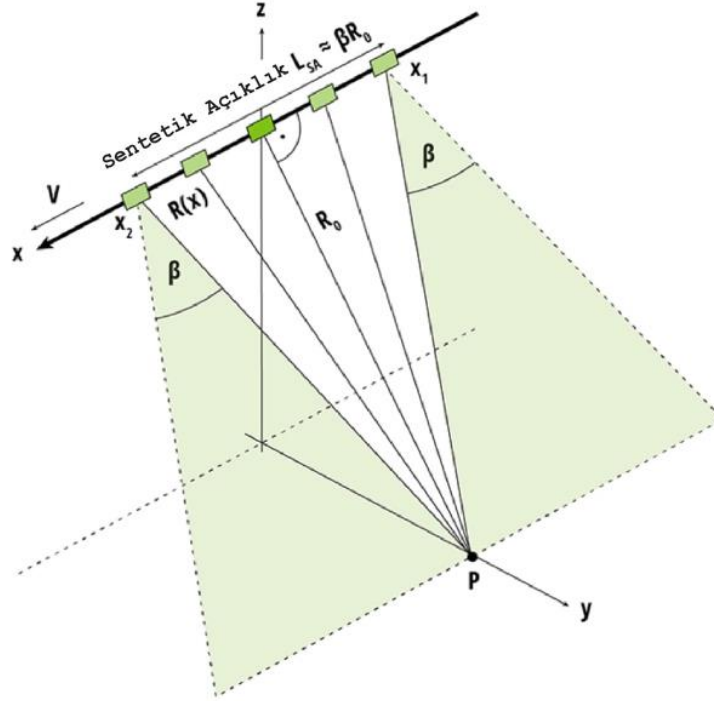
Sentetik açıklıklı radar (SAR) radar dalgalarını kullanarak yeryüzünde çeşitli türdeki nesneleri algılamak, bulmak, izlemek ve tanımak için kullanılan aktif bir görüntüleme sistemidir. Optik görüntüleme sistemleri gibi güneş ışınlarına ihtiyaç duymadan kendi yaydığı elektromanyetik dalgalar ile gece ve gündüz görüntüleme yapar. InSAR'ı optik ve kızılötesi algılama cihazlarından ayıran diğer bir unsur ise, bulut ve benzeri engellerden çok etkilenmeksizin görüntüleme yapabilmesidir. Görüntüleme yer yüzündeki hedeflere çarpıp geri yansıyan dalgalar kaydedilerek elde edilir. Hedefler, okyanus dalgaları gibi hızlı hareket eden nesneler veya tektonik kuvvetler nedeniyle çok yavaş hareket eden yeryüzü olabilir. SAR cihazları, bu tür nesnelerin varlığını, yerini ve hızını belirlemenin yanı sıra boyut ve şeklini de elde edebilir.

SAR gibi radar görüntüleme sistemleri geri yansıyan dalgaların genlik ve faz bilgisinin yanı sıra dalganın çarpıp cihaza ulaştığı yüzey boyunca topoğrafya ve cismin yansıma karakteri hakkında da bilgi içerir. Radar verilerinin alansal çözünürlüğü sensör dalga boyunun sensör anteninin uzunluğuna oranı ile doğrudan ilişkilidir. Belirli bir dalga boyu için, anten ne kadar uzun olursa, alansal çözünürlük o kadar yüksek olur. ERS veya Envisat gibi yaklaşık 6 cm dalga boyunda çalışan uzaydaki bir uydudan (C-bant radar), 10 m'lik bir alansal çözünürlük elde etmek için, yaklaşık 4.250 m uzunluğunda bir radar antenine ihtiyacınız olacaktır (Meyer, 2019). Ancak bu boyutta bir anteni doğal olarak uzaydaki bir uydu için uyarlamak mümkün değildir. Bu nedenle, aynı hedeften geri yansıyan dalgaların frekans değişimi (Doppler etkisi) (Şekil 3.1) kullanılarak çok uzun bir anten simüle edilir. Yani radar antenin gerçek uzunluğundan çok daha uzun sanal bir anten elde edilir. Yapay (sentetik) açıklık (aperture) terimi de radar anteninin bu simüle edilmiş uzunluğunu ifade eder (Şekil 3.2).

Şekil 3.2'te, bir hava veya uzay platformuna yerleştirilmiş bir radar, yeryüzündeki P cismini ilk gördüğü yer olan x_1 konumundan son görüldüğü x_2 konumuna doğru V hızıyla hareket etmektedir. Radar anteni (yeşil renkli dikdörtgen) hareketi süresince sinyal gönderip cisimlerden geri yansıyan dalgaları toplamaktadır. x_1 ve x_2 konumları arasında yeryüzündeki P cisminden yansıyan tüm sinyaller kullanılarak çok daha uzun bir anten simüle edilmiş olur.



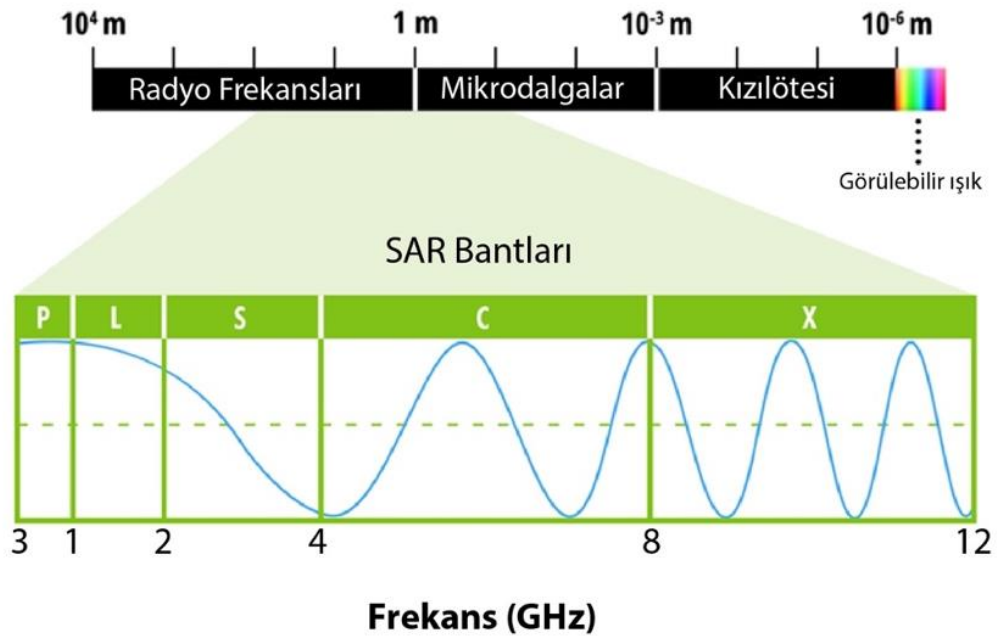
Şekil 3.1: Doppler etkisi; araç sireninden yayılan ses dalgalarının frekansı araç yaklaştıkça yükselirken, araç geçtikten sonra azalır (<https://sketchplanations.com/the-doppler-effect>).



Şekil 3.2: $X=0$ konumunda P hedefi için, sentetik açıklığı oluşturmak için kullanılan gözlemlerin geometrisi. β , anten ışın genişliğini (antenna beamwidth) göstermektedir (Meyer, 2019'den değiştirilmiştir).

Bu şekilde uçuş yönünde yüksek alansal çözünürlük elde edilir ve yüzeydeki P cismi tespit edilir (Meyer 2019). Bu işlem görüntülenene tüm alana uygulanır ve yüksek çözünürlüklü bir SAR görüntüsü elde edilir. Bu işleme Doppler yöntemiyle odaklama (focusing) ismi verilir. Oluşturulan görüntüye SLC (single look complex) görüntü ismi verilir. Sinyal gürültü oranını arttırmak için bazen komşu piksellerin ortalaması alınır ve çok bakışlı (multi look) SAR görüntüleri elde edilir.

InSAR görüntüleme sistemlerinde frekans ve dalga boyunun rolü çok önemlidir. SAR cihazının farklı dalga boyları genellikle X, C, L ve P gibi harf gösterilir ve bantlar olarak adlandırılır (Şekil 3.3). Tablo 3.2’de bantlarla ilişkili frekans, dalga boyu ve bu bantlar için tipik olan uygulamayı belirtmektedir.



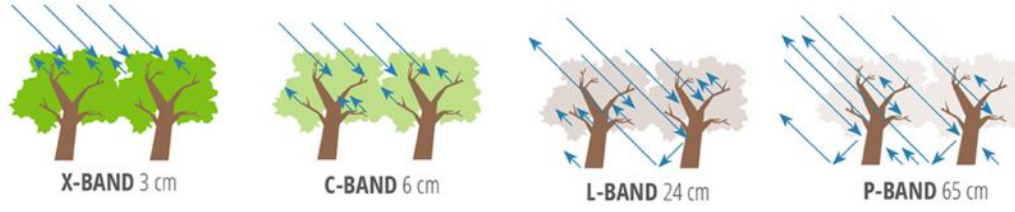
Şekil 3. 3: Mikrodalga bantları eklenmiş elektromanyetik spektrum (<https://earthdata.nasa.gov>).

Radar sinyallerinin görüntülenene alandaki hedeflerle olan etkileşimi ve penetrasyon miktarı sinyallerin dalga boyuna bağlı olarak değişir. Bu nedenle bant seçimi çalışma alanının özellikleri (örneğin, bitki örtüsünün ve zeminin tipleri) ve hedeflenen amaçlar dikkate alınarak yapılmalıdır (Tablo 3.2). Örneğin, yaklaşık 3 cm dalga boyunda çalışan bir X-bandi radarı, geniş yapraklı ormana çok az nüfuz etme kabiliyetine sahiptir ve bu nedenle çoğunlukla ağaç tepesindeki yapraklardan geri yansır. Zaman içinde ve mevsimsel olarak ağaçlar değişimi uğradıkları için radar dalgalarını birbirinden çok farklı şekilde yansıtırlar ve bu da dalgaların korelasyonunun düşmesine

neden olur. İşte bu nedenle bu tür alanlarda yüzey deformasyon X veya C bandına sahip SAR görüntüleri kullanılarak tespit edilemez. Öte yandan L-bantlı SAR görüntülerinde radar dalga boyu yaklaşık 24 cm’dir radar dalgalarının X ve C banlarına göre penetrasyonu daha yüksek olur ve ağaçlık alanların zeminine kadar ulaşabilir. Bu nedenle deformasyon çalışmaları için bu tür alanlarda L bandındaki SAR görüntülerinin tercih edilmesi gerekir. Dalga boyu radarın sadece bitki örtüsüne değil, aynı zamanda toprak, kumul, buz ve benzeri zeminlere olan nüfuz etme derinliğini etkiler; dalga boyu arttıkça penetrasyon derinliği artar (Şekil 3.4).

Tablo 3.2: SAR görüntüleme siteminde kullanılan bantlar, frekansları, dalga boyları ve kullanım alanları (Meyer, 2019’dan değiştirilmiştir).

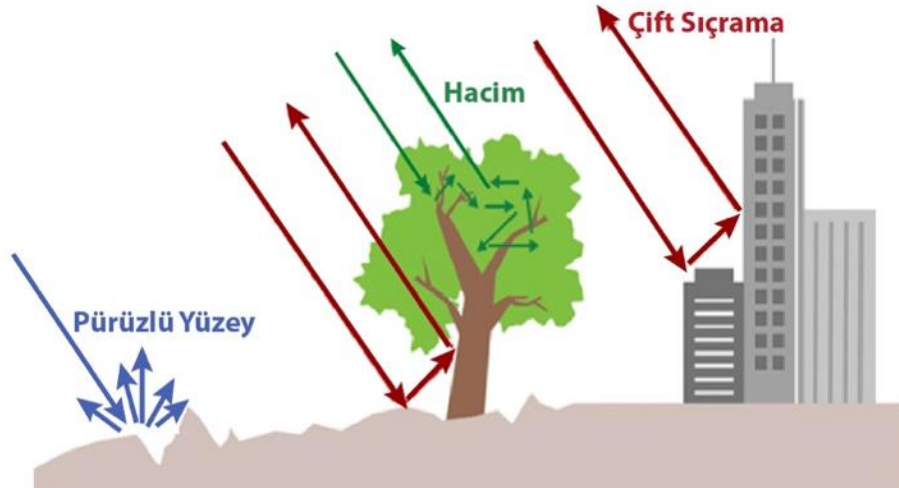
Bant Adı	Frekans	Dalga Boyu	Uygulama Alanları
Ka	27–40 GHz	1.1–0.8 cm	SAR için nadiren kullanılır
K	18–27 GHz	1.7–1.1 cm	Nadiren kullanılır (H ₂ O Emilimi)
Ku	12–18 GHz	2.4–1.7 cm	SAR için nadiren kullanılır
X	8–12 GHz	3.8–2.4 cm	Yüksek çözünürlüklü SAR, (bitki örtüsü olan alanlarda yüksek koherans kaybı olur)
C	4–8 GHz	7.5–3.8 cm	Küresel haritalama (düşük ile orta nüfuzlu alanların izlenmesi, buz, okyanus ve deniz seviyesi takibi, yüksek koherans)
S	2–4 GHz	15–7.5 cm	SAR tabanlı Dünya gözlemi için az ama artan kullanım (tarım izleme, NISAR L bandının yanısıra S-bant kanalı da taşıyacaktır; yüksek bitki örtüsü yoğunluğu olan alanlarda C bandına göre penetrasyonu yüksek)
L	1–2 GHz	30–15 cm	Orta çözünürlüklü SAR (jeofizik izleme; biyokütle ve bitki örtüsü haritalama, yüksek penetrasyon, InSAR)
P	0.3–1 GHz	100–30 cm	Biyokütle (bitki örtüsü haritalama ve değerlendirme)



Şekil 3.4: SAR ölçümlerinin orman yapısına duyarlılığı ve kara yüzeyinin havadan veya uzaydan uzaktan algılama gözlemleri için kullanılan farklı dalga boylarının bitki örtüsüne penetrasyonu (Saatchi, 2019).

3.3. Sinyal Polarizasyonu ve Saçılma Mekanizmaları

SAR sistemleri görüntüleme esnasında farklı polarizasyonlarda sinyaller gönderip toplayabilir. Polarizasyon, iletilen elektromanyetik dalganın salındığı düzlemin yönünü ifade eder. Polarizasyon yatay (H) veya dikey (V) yönde gönderilip geri toplanır. ALOS-2 ve Radarsat-2 gibi SAR sistemleri hem yatay hem de dikey polarizasyonda sinyal gönderip toplayabilmektedir. Bu şekilde aynı yerin VV, HH, VH ve HV şeklinde (quad polarization) dört farklı kombinasyonda SAR görüntüleri elde edilebilmektedir. Bu çalışmada kullanılan veri setlerinden birisi olan Sentinel-1 verileri ise sadece VV ve HH kombinasyonunda (dual polarization) veri toplamaktadır. Bu farklı polarizasyonlardan gelen sinyal gücünün incelenmesi, aşağıdaki saçılma türlerine dayalı olarak görüntülenen yüzeyin yapısı hakkında bilgi taşır: pürüzlü yüzey, hacim ve çift sıçrama (Şekil 3.5).



Şekil 3.5: Geri yansıma saçılımı ve polarizasyon (Meyer, 2019'dan değiştirilmiştir).

Deformasyon çalışmaları için aynı yönde (VV veya HH) alınmış görüntü çiftleri interferogram oluşturmak için kullanılır. Çapraz polarizasyonlardan (ör. VV ve HH veya VH ve VV) elde edilen görüntülerden oluşturulan interferogramların deformasyon çalışmalarında kullanımı söz konusu değildir. Geri yansıma karakterinen dolayı VV polarizasyonu deformasyon çalışmalarında daha çok tercih edilmektedir.

3.4. Sentetik Açıklıklı Radar Interferometrisi

InSAR tekniği ise iki SAR görüntüsündeki faz bilgisini, karşılık gelen her görüntü noktası çifti arasındaki faz farkını hesaplayarak kullanır. Geleneksel SAR sistemleri, aydınlatılan platformun radar yansıtıcılığının iki boyutlu bir haritasını sağlar. SAR görüntüsünü oluşturmak için radar dalga genlikleri de kullanılır. Ortaya çıkan yeni görüntüye interferogram denir. İnterferogram, bağıl faz farkı nedeniyle oluşan bir girişim desenidir. İnterferogram radardan yer yüzeyine olan mesafedeki değişimini gösteren bir çeşit kontur haritasıdır. Ortaya çıkan interferogramdaki her bir saçak, uydu veya uçaktan yer yüzeyine olan menzil mesafesindeki radar dalga boyunun yarısına eşit miktardaki (Sentinel-1 için $5.66/2 = 2.83$ cm) değişikliğe karşılık gelir. Uçak veya uydu platformlarıyla elde edilen SAR görüntüleri, topoğrafik yüksekliklerin, yeryüzündeki hareketlerin ve değişikliklerin çok hassas bir şekilde tespit edilmesine olanak tanımıştır. Uydu bazlı SAR verileri ile yapılan öncü çalışma 1978'deki kısa SEASAT görevi ile gerçekleştirilmiştir. 1991 yılında Avrupa Uzay Ajansı tarafından ERS-1'in yörüngeye yerleştirilmesiyle ve elde ettiği görüntülerle 1992 Landers (Kaliforniya, ABD) depreminin yüzey deformasyonunun çok net bir şekilde ortaya çıkartılması sayesinde (Massonnet ve diğ., 1993) InSAR yüzey deformasyonları çalışmaları için popüler bir konu haline gelmiştir (Şekil 3.6).

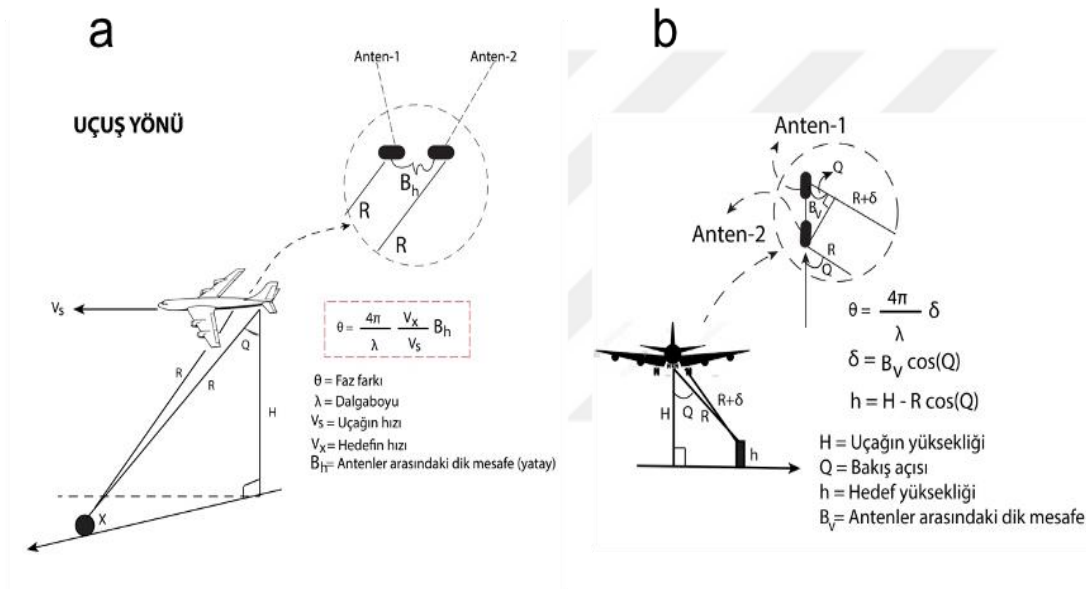
InSAR verileri yaygın olarak iki ana uygulama alanında kullanılmaktadır; a) sayısal arazi modellerinin oluşturulması ve b) bir bölge üzerinde çoklu interferogramlardan oluşan bir ağı birleştirerek çeşitli faktörlerin neden olduğu yüzey deformasyonunun uzaysal-zamansal tespiti ve izlenmesi.



Şekil 3.6: Cilt 364, 6433 sayılı ve 8 Temmuz 1993 tarihli Nature dergisinin kapak sayfasını göstermektedir. ERS-1 uydusundan alınan iki görüntünün interferometrik işlenmesiyle görülen, Haziran 1992'de Landers'taki $M_w=7,3$ büyüklüğündeki depremle ilişkili yüzey deformasyonunu göstermektedir (Massonnet ve diğ., 1993).

3.5. InSAR'ın Prensipleri

İnterferometri terimi, girişim kelimesinden türetilmiştir. Girişim, ses, ışık, okyanus, elektromanyetik, sismik dalgalar gibi herhangi bir tür dalgaya sahip olduğunda meydana gelen bir olgudur. Girişim, iki dalga bir araya geldiğinde meydana gelir. InSAR, girişim olgusunun sentetik açıklıklı radar ile birleştirildiği bir yöntemdir. Hava araçlarına monte edilen iki radar anteninden veya aynı radar uydusundan iki farklı geçişte elde edilen radar sinyalleri ilişkilendirilerek bir radar interferometresi oluşturulabilir. Tek bir platforma monte edilmiş iki antenden elde edilen görüntülerden yapılan interferometriye tek geçişli interferometri ismi verilir (Şekil 3.7). Bir uydunun üzerindeki tek bir antenden farklı zamanlarda elde edilen radar sinyallerinin ilişkilendirilmesiyle oluşturulan interferometriye de tekrarlı geçiş interferometresi ismi verilir (Şekil 3.8).



Şekil 3.7: Tek geçişli interferometrinin geometrisi. (a) Okyanus ve deniz dalgalarının hız alanını haritalamak ve buz tabakaları ve buzullar gibi hareketli nesneleri haritalamak için kullanılan yol boyunca geometri (perspektif görünüm) (Zebker ve Goldstein, 1986). (b) Sayısal yükseklik modellerini oluşturmak için kullanılan çapraz hat geometrisi (uçuş yönüne dik bir düzlemde). Yol boyunca interferometrede faz farkı, görüntülenen alandaki yükseklik farklarından kaynaklanmaktadır.

3.6. InSAR Faz Farkının Bileşenleri

Denklem 3.1’de hesaplanan diferansiyel interferometrik faz ($\Delta\phi$), pikselin uydu bakış yönündeki hareketinden kaynaklanan yüzey deformasyon faz bileşenini ($\Delta\phi_{displ}$) ve çeşitli nedenlerden kaynaklanan faz terimlerinin toplamını içerir:

- Farklı bakış açılarından kaynaklanan topoğrafik bileşen katkısı ($\Delta\phi_{topo}$),
- Yayılma koşullarının değişmesinden dolayı atmosferik faz katkısı ($\Delta\phi_{atm}$) (atmosferik ve iyonosferik dielektrik sabitindeki değişim),
- Yanlış yörünge bilgisi nedeniyle yörünge fazı katkısı ($\Delta\phi_{orb}$)
- Pikselin saçılma özelliklerindeki değişkenlikten, termal gürültüden ve ortak kayıt hatalarından kaynaklanan gürültü terimi (n).

İnterferometrik fazın değişimi şu şekilde ifade edilebilir:

$$\Delta\phi = \Delta\phi_{displ} + \Delta\phi_{topo} + \Delta\phi_{orb} + \Delta\phi_{atm} + n. \quad (3.1)$$

Bir interferogramdaki topoğrafik faz bileşeni yüksek çözünürlüklü bir sayısal arazi modeli ve hassas yörünge bilgileri kullanılarak hesap edilip giderilebilir (Hanssen, 2001). Bu çalışmada, interferogramlardaki topografik faz katkısı, SRTM 90-m çözünürlüklü DEM verileri kullanılarak kaldırılmıştır (Farr ve diğ., 2007). Bu tezde oluşturulan tüm interferogramlar için, atmosferik faz gecikmesi, ERA-Interim küresel atmosferik modelini kullanan TRAIN yazılımı (Bekaert ve diğ., 2015) ile giderilmiştir (Dee ve diğ., 2011). Atmosferik faz bileşenleri ise StaMPS yazılımı tarafından filtreleme yöntemiyle hesaplanıp giderilmiştir.

3.7. Koherans

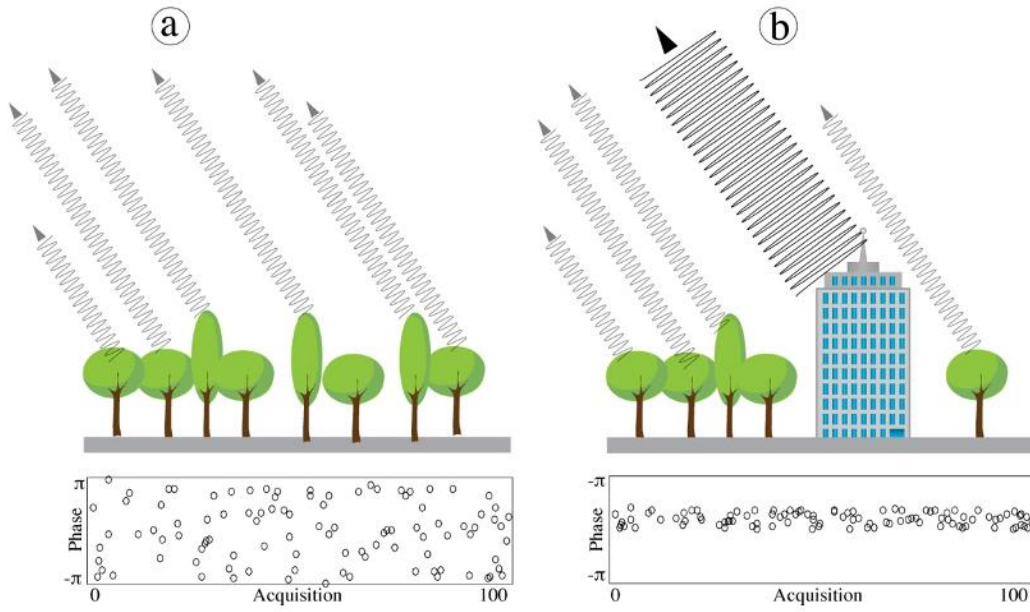
Bir interferogramın güvenilirliği ve doğruluğu, sinyal korelasyonunun derecesi ile ilgilidir. Sinyal korelasyonun ölçüsü koherans olarak adlandırılır ve 0 ile 1 arasında değişir. Koherans ne kadar yüksekse bir interferogramdan elde edilen bilgiler o kadar güvenilir olur. Uzun dönemli yeryüzü değişimleri (bitki örtüsü büyümesi, toprak nemi, buzul hareketi vb. gibi) veya yüksek bazlardan dolayı radar sinyalleri arasındaki korelasyon azalabilmektedir. SAR işleme performansı için nicel tutarlılık bilgisi çok önemlidir. Farklı kaynaklardan kaynaklanan bu korelasyon kaybı, yalnızca iki görüntü yerine birden çok SAR alımından elde edilen bilgileri birleştiren ileri InSAR teknikleri kullanılarak giderilebilir.

3.8. İleri InSAR Teknikleri

Temel olarak iki radar verisinin interferometrik olarak faz farklarının hesaplanmasına dayalı klasik diferansiyel InSAR tekniği ile üretilen interferogramlarla bir bölgede meydana gelen yer değiştirmeler uzun dönemli takip edilmek istendiğinde en başta sinyal dekoherasyonu sonucu oluşan düşük koherans olmak üzere atmosferik gecikmeler ve sayısal yükseklik modeli kaynaklı hatalar olmak üzere çeşitli sorunlarla karşılaşılacaktır. Bu sorunları aşmak ve bir zaman serisi hesaplayabilmek için *İleri InSAR teknikleri* olarak adlandırabileceğimiz farklı yaklaşımlar geliştirilmiş olup ana ilke iki radar verisi yerine çalışma alanına ait çok sayıda SAR verisindeki bilgiden istifade etmektir. Günümüzde bu tekniklerin en yaygın kullanılanları Persistent Scatterers (PS-InSAR) ve Small BAseline Subset (SBAS) yöntemleridir. Bu yöntemler ile uzun dönemli ve yüksek hassasiyetli yer değiştirme zaman serileri ve ortalama hız haritaları üretilebilmektedir.

PS-InSAR yönteminde uydu açıklık farklılıklarına bakılmaksızın tüm olası interferometrik kombinasyonları kullanılır (Ferretti ve diğ., 2001, Perissin ve Ferretti, 2007, Hooper, 2008). Tek bir “master” görüntüyü referans kabul eden bir interferogramlar ağı hesaplanır. Bu görüntülerin genlik ve faz bilgilerinden çalışma alanındaki stabil-kararlı nokta tipi saçıcılar tespit edilir. Yerleşim yerlerinde insan yapımı binalar nedeniyle nokta tipi saçıcılar bol bulunabilirken şehir dışı alanlarda da daha fazla kararlı nokta tipi saçıcı tespit edilebilmesi için farklı usüller geliştirilmiştir.

Öte yandan, SBAS yöntemi, kısa dikey uydu açıklık farklarına ve de göreceli olarak kısa zaman aralıklarına sahip SAR görüntü çiftlerinin uygun kombinasyonlarına dayanan ve yüksek koheransa sahip fakat noktasal değil de alansal dağınık saçıcılar (Şekil 3.9) için optimize edilmiş bir InSAR yöntemidir (Berardino ve diğ., 2002, Lanari ve diğ., 2004, Biggs ve diğ., 2007, Hooper, 2008). SBAS yönteminde kısa zaman aralıkları ve dikey bazlar kullanılarak interferogramlarda yüksek korelasyon elde edilmeye çalışılır.



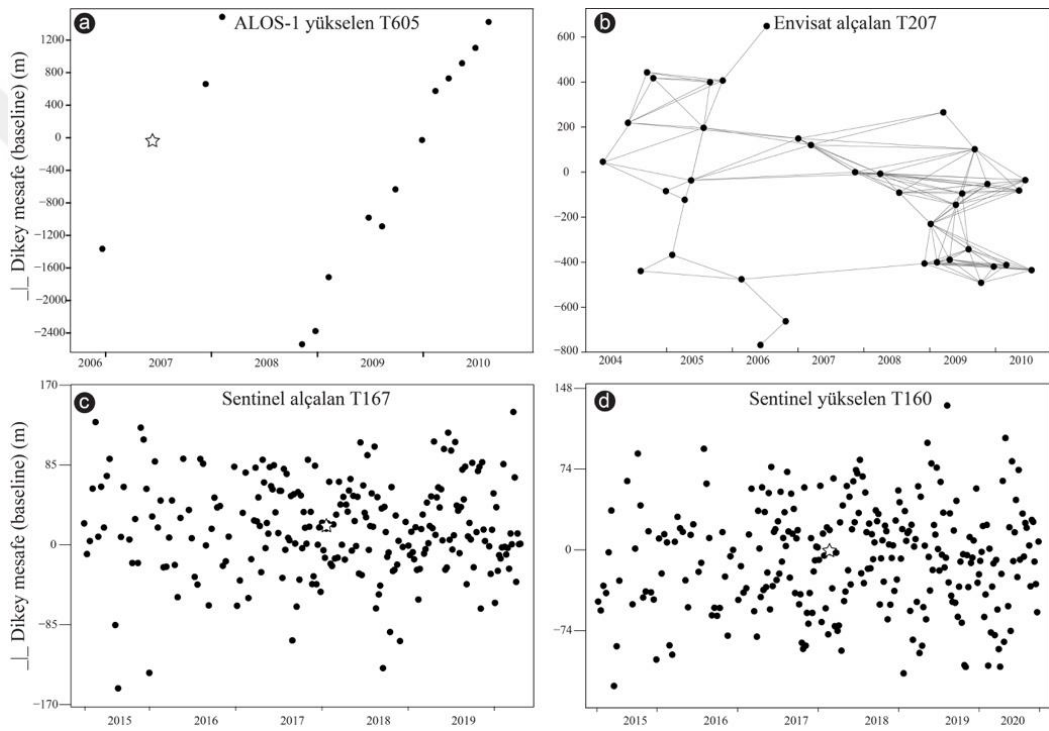
Şekil 3.9: Piksel tipleri (a) Dağınık saçıcılar içeren piksel. Pikseldeki saçıcılardan dönen yansımaların toplamı pikselin faz değerini oluşturur. Saçıcılar yer değiştirirse faz toplamı değişir. (b) İnsan yapımı bir binadan kaynaklanan tek bir kuvvetli ve kararlı saçıcının hâkim olduğu piksel (Hooper ve diğ., 2011'den değiştirilmiştir).

3.9. SAR Veri Seti

2000'li yılların başından bu yana çalışma sahasındaki deformasyonun zamansal ve makansal gelişimini araştırmak için, sırasıyla 2004'ten 2010'a ve 2014'ten 2020'ye kadar Envisat ASAR ve Sentinel-1 A/B görüntülerinden elde edilen (C-bandı (~5.5 cm dalga boyu) verilerini kullanılmıştır. Ayrıca 2006 ve 2010 yılları arasında çekilen JAXA'ya ait L bandına sahip (~24 cm dalga boyu) ALOS-1 PALSAR görüntüleri de kullanılmıştır (Şekil 3.10). Avrupa Uzay Ajansı'nın Envisat ve Sentinel-1 verileri halka açıktır. Japon Havacılık ve Uzay Araştırma Ajansı'nın ALOS-1 uydu verileri ise bilimsel araştırma önerileri ile elde edilebilmektedir. Sentinel-1 görüntüleri hem yükselen (T160) hem de alçalan (T167) yörüngelerden alınırken, ALOS-1 ve Envisat verileri sırasıyla yükselen ve alçalan yörüngelerdedir. Böylece bu çalışmada 2004 ve 2020 yılları arasında farklı zaman dilimlerinde iki yükselen ve iki alçalan yörüngede elde edilmiş SAR görüntüleri kullanılmıştır. Her bir Sentinel-1 A/B şeridinde 2014'ten bu yana görüntü sayısı 250'nin üzerindeyken (T160 ve T160'ta 256, T167'de 258 görüntü kullanıldı), ALOS-1 ve Envisat'ta görüntü sayısı sırasıyla 16 ve 37'dir. Sentinel-1 verilerinin bolluğu, Sentinel1A'dan yaklaşık iki yıl sonra Nisan 2016'da Sentinel1B'nin yörüngeye yerleştirilmesiyle 6 gün arayla birbirini takip eden bu iki

uydunun 12 günlük tekrar döngüsünden kaynaklanmaktadır. Çalışma alanı, bu çalışmada kullanılan tüm SAR veri setleri tarafından tamamen kapsanmaktadır.

ALOS-1 ve Sentinel-1 verilerinden deformasyon zaman serileri PS-InSAR yöntemiye hesap edilirken, Envisat verilerinden SBAS yöntemi kullanılarak hesap edilmiştir (Şekil 3.10). Envisat verilerindeki uzun bazlar düşük korelasyona neden olduğu için PS-InSAR yöntemi kullanıldığında birçok görüntünün kullanılması mümkün olmadığından SBAS yöntemi tercih edilmiştir. Daha uzun kritik interferometrik baza sahip (~5 km) L bandındaki ALOS-1 interferogramlarında ciddi bir koheransa kaybı söz konusu değildir.



Şekil 3.10: Bu çalışmada kullanılan ALOS-1 (a), Envisat (b) ve Sentinel-1 A/B (c, d) görüntülerinin zaman-dikey baz diyagramları (çerçeve konumları için bkz. Şekil 1.3). Siyah noktalar SAR görüntülerini, beyaz yıldızlar ise zaman serisi analizleri için seçilen master görüntüyü göstermektedir. Gri çizgiler, Envisat verilerinin zaman serisi analizi (SBAS) (d) kullanılan interferogram çiftlerini göstermektedir.

3.10. Verilerin İşlenmesi

Konya şehrini kapsayan Envisat, ALOS-1 ve Sentinel-1 A/B görüntülerinden interferogramları hesaplamak için ücretsiz olarak kullanılabilen açık kaynaklı yazılım araçları kullanıldı. Tüm Sentinel-1 interferogramları GMTSAR kullanılarak

hesaplandı (Sandwell ve diğ., 2011). ALOS-1 ve Envisat ham görüntüleri ise ROI_PAC (Rosen ve diğ., 2000) ile odaklanıp SLC haline getirildi ve daha sonra DORIS (Kampes ve diğ., 1999) ile interferogramlar hesap edildi. İnterferogramlardaki topoğrafik faz bileşenlerini gidermek için 3 saniyelik (~90 m) SRTM dijital yükseklik verileri kullanıldı. Tüm işlemler TÜBİTAK ULAKBİM, Yüksek Performans ve Grid Hesaplama Merkezi'nde (TRUBA kaynakları) gerçekleştirilmiştir. InSAR sonuçları GMT yazılımı ile görselleştirilmiştir. GMT 2-B ve 3-B verileri manipüle etmeyi ve diyagramlar, kontur haritaları, renkli görüntüler, çeşitli projeksiyonlarla gölgeli kabartma haritalar ve bu gibi Postscript illüstrasyonları oluşturmayı sağlar (Wessel ve Smith, 1998; Wessel ve diğ., 2013).

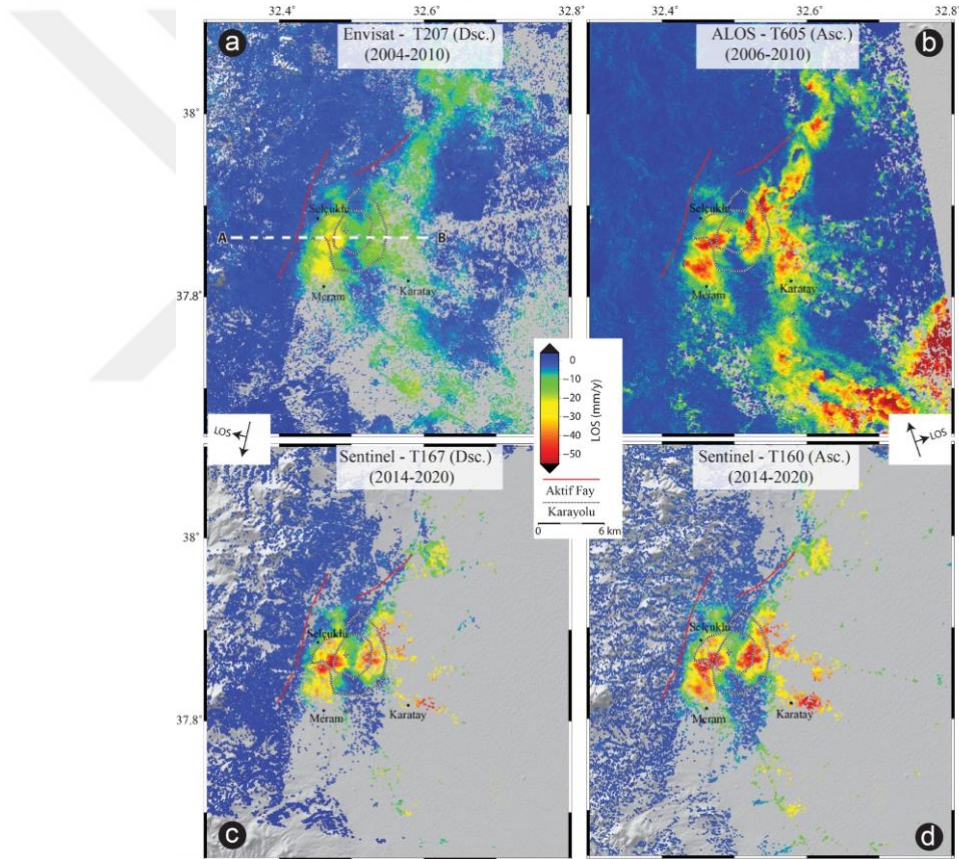
3.11. InSAR Zaman Serilerinin Oluşturulması

Bu tezde, çalışma alanındaki deformasyonların zaman serileri PS-InSAR ve SBAS teknikleri kullanılarak elde edilmiştir. Hem PS-InSAR hem de SBAS için StaMPS (Hooper, 2008; Hooper ve diğ., 2011) yazılım paketi kullanılmıştır. StaMPS, ortalama hızları ve zaman serilerini hesaplamak için yalnızca zaman içinde kararlı faz gürültüsü özelliği gösteren seçili pikselleri kullanır. Bu yöntemin, PS algoritmasının değiştirilmiş bir versiyonu olduğu ve asismik kayma gibi sabit olmayan deformasyona maruz kalan alanlarda, geçici deformasyon modelinin ön bilgisini kullanmadan uygulanabilir olduğu düşünülmektedir.

4. ELDE EDİLEN BULGULAR

4.1 Konya Şehir Merkezinde 2004-2020 Yılları Arasında Meydana Gelen Deformasyonlar

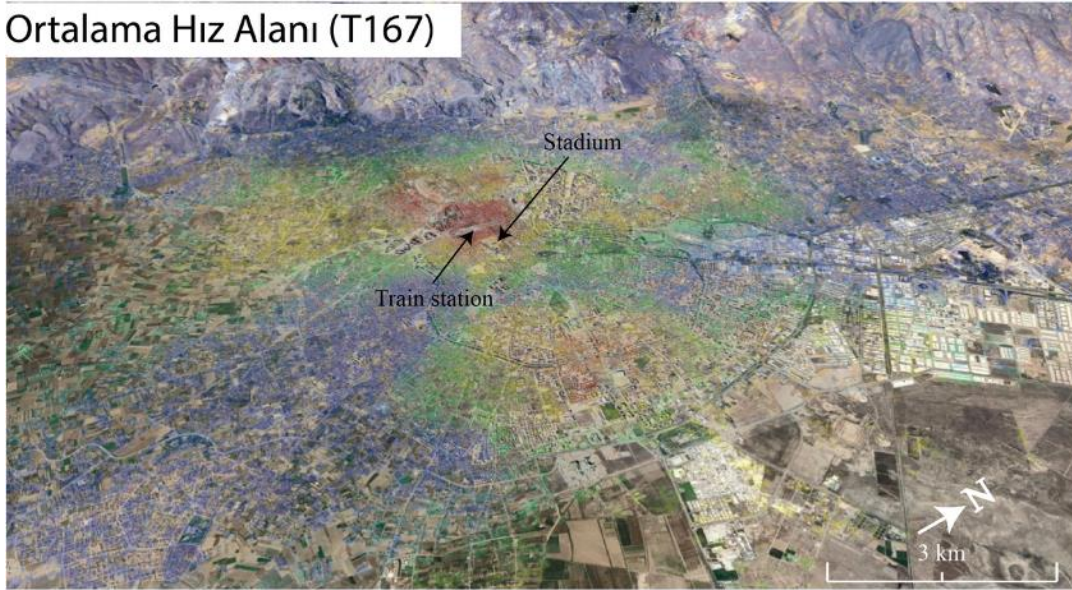
Envisat, ALOS-1 ve Sentinel-1 görüntüleri kullanılarak InSAR zaman serilerinden hesaplanan LOS hız haritaları Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Sonuçların daha çok şehrin batısındaki yerleşim yerleri, mühendislik yapıları ve bitki örtüsü olmayan dağlık bölgelerden elde edildiği gözlenmektedir.



Şekil 4.1: ENVISAT (a), ALOS-1 (b) ve Sentinel-1 (c, d) görüntüleri kullanılarak InSAR zaman serilerinden hesaplanan InSAR LOS hız haritaları. Sıcak renkler (yeşilden kırmızıya) uydudan uzaklaşmayı (LOS bakış yönünde oturma veya yatay hareket), soğuk renkler (mavi) ise sabit alanları ve/veya uyduya doğru olan yer değiştirmeleri (yükselme veya LOS'un tersi yönünde yatay hareket) gösterir. Beyaz çizgi, Şekil 4.4'te gösterilen profilin yerini gösterir.

Mavi renkli alanlar, sabit bölgeleri ve uyduya doğru hareket edenleri gösterirken (yani, uyduların bakış yönünün tersi olan yükselme veya yatay hareket), sarıdan kırmızıya renkler uydudan uzak bölgeleri gösterir (yani uyduların bakış yönündeki yatay hareket ve oturma). Gri bölgeler sağlıklı InSAR ölçümlerinin elde edilemediği yerlerdir. Buralar PS'lerin bulunmadığı veya SBAS analizinde koheransın düşük olduğu yerlerdir. Yüksek dalga boyu (~24 cm) nedeniyle ALOS-1 verilerinden elde edilen deformasyon ölçümleri tüm görüntü çerçevesi üzerinde, hemen hemen her yerde mevcuttur. Öbür taraftan koherans kaybından dolayı Sentinel-1 verileri ile şehrin doğusunda yer alan tarım alanlarındaki yüzey deformasyonları ölçülememektedir. SBAS yöntemi ve de kısa zaman bazlarından dolayı Envisat görüntülerindeki faydalı veriler sadece şehirde değil, aynı zamanda batıdaki bazı tarım bölgelerinde de bol miktarda bulunmaktadır. Konya fayının bulunduğu batıdaki tepelerde kayda değer bir deformasyon gözlenmezken, şehrin düz kesimlerinde zeminde radardan uzakaşmaların yani oturmaların meydana geldiği görülmektedir (Şekil 4.2).

Ortalama Hız Alanı (T167)

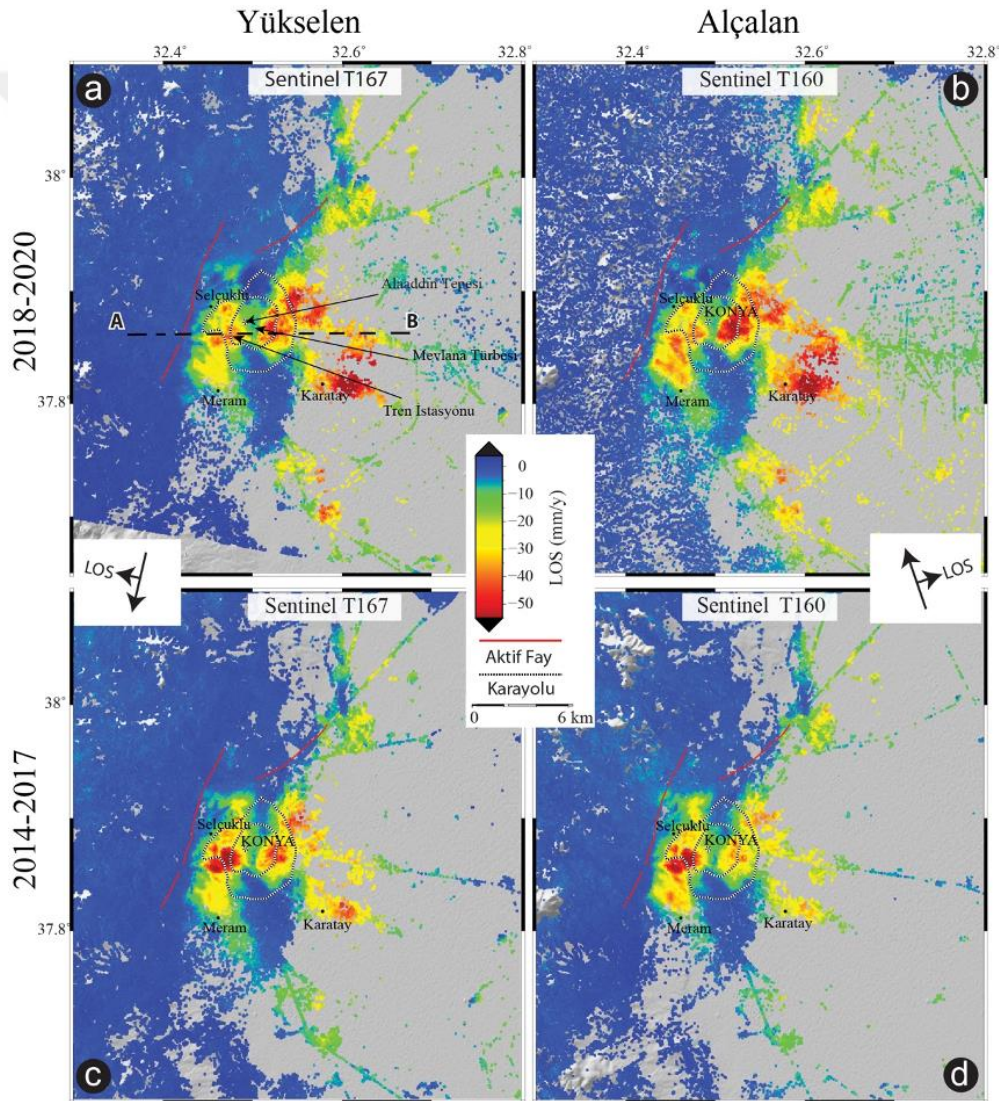


Şekil 4.2: Sentinel-1T167'den elde edilen LOS ortalama hız alanının Google Earth'de üç boyutlu gösterimi.

Farklı zaman aralıklarını kapsayan ve farklı görüntü setlerinden elde edilen hız alanları Konya Metropolitan bölgesinde benzer bir deformasyon paterni sergilemektedir. Bu da haritalarda görülen LOS değişikliklerinin çoğunlukla düşey yöndeki deformasyonlardan kaynaklandığını göstermektedir. Deformasyon miktarındaki farklılıklar, farklı görüntüleme geometrisinden ve gözlem aralığındaki farklılıklardan

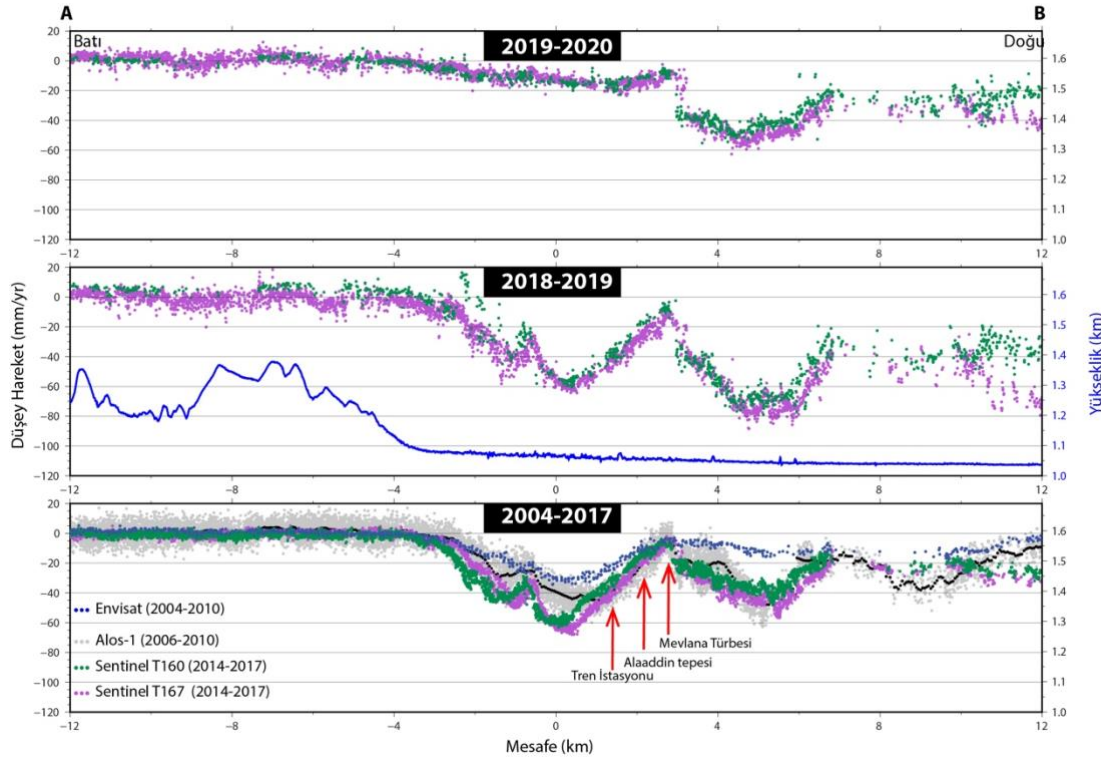
kaynaklanmaktadır. 2006-2020 yılları arasında şehrin batı ve doğu taraflarında LOS yönünde 6 cm/yıl'a ulaşan iki deformasyon alanı vardır. Bu iki alan, şehri neredeyse eşit yarıya bölen yaklaşık olarak K-G bir hat ile ayrılmaktadır.

Envisat sonuçlarından, oturmanın başlangıçta çok daha yavaş olduğu ve zamanla arttığı anlaşılmaktadır. Oturmanın son dönem zamansal ve mekansal değişimini ortaya çıkarmak için, Sentinel-1 verileri iki farklı zaman dilimi için işlenmiştir; 2014-2018 ve 2018-2020. Şekil 4.3'te gösterilen farklı zaman aralıklarında elde edilen ortalama hız alanlarının analizi, oturmanın son 6 yılda da zaman ve mekân olarak farkedilir derecede değiştiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.3: 2018-2020 (a, b) ve 2014-2018 (c, d) olmak üzere iki farklı dönemde Sentinel-1 verilerinden hesaplanan InSAR LOS hız alanları. 2018'den bu yana deformasyonun kentin doğu tarafında artarken, batı tarafında azaldığı gözlenmektedir.

Deformasyonun zaman ve mekân içindeki değişimini daha iyi görselleştirmek için, her iki lobda da maksimum deformasyon merkezini geçen doğu-batı yönündeki ortalama LOS hız alanlarından profiller Şekil 4.4'te gösterilmektedir. Bu şekilde LOS değişimlerinin tamamen düşey hareketlerden kaynaklandığı var sayılarak LOS değerleri uydu geometrisi ve bakış açısı göz önünde tutularak düşey bileşene çevrilmiştir.

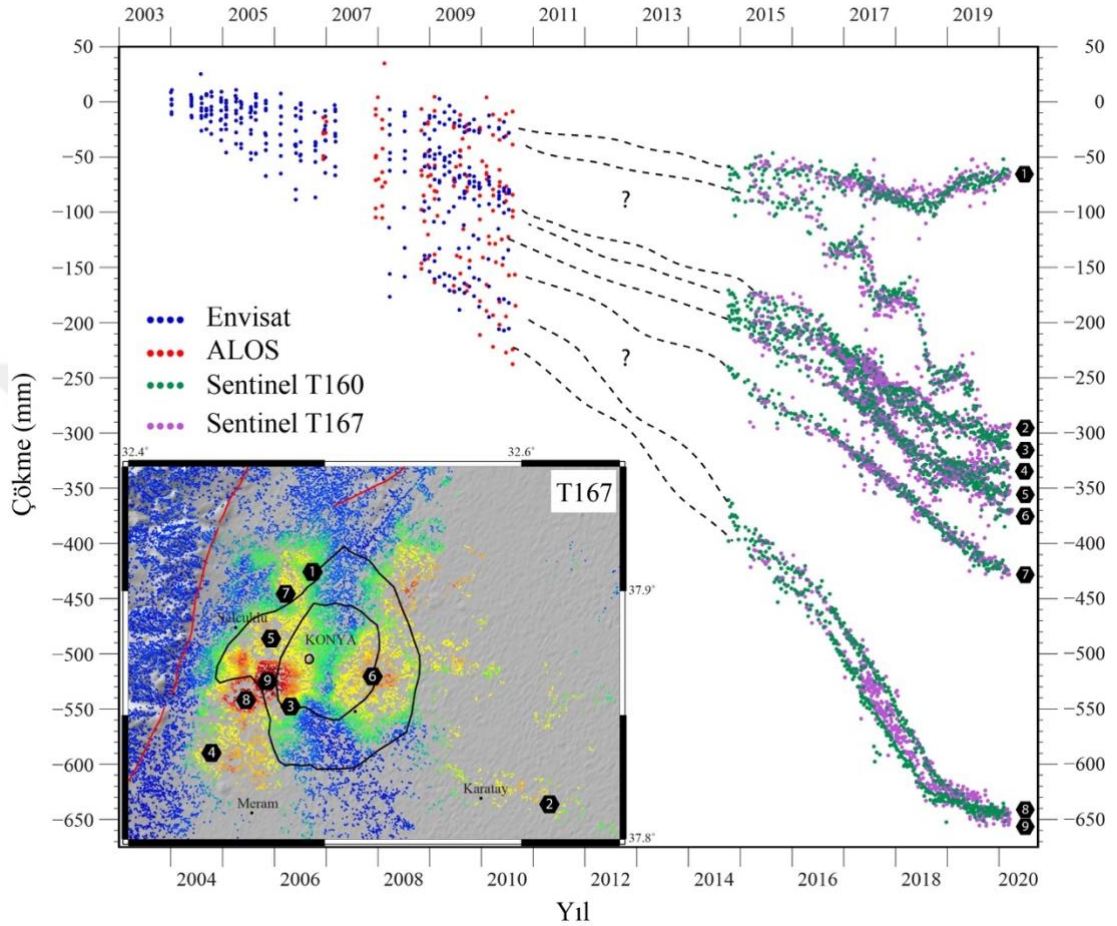


Şekil 4.4: Şekil 4.1'de gösterilen A-B hattı boyunca düşey hız profilleri.

Şekil 4.4'te profiller, oturmaların 2004 ve 2018 yılları arasında her iki lobda da birkaç cm/yıl'dan 9 cm/yıl'a kadar arttığını çok açık bir şekilde göstermektedir. Ancak, 2018 ve 2019 arasında batı loblarındaki deformasyon hemen hemen aynı kalırken, doğu lobu 6-7 cm/yıl'dan 11 cm/yıl'a yükselmektedir (Şekil 4.4b). 2019'dan sonra her iki lob da özellikle batı lobunda çok hızlı bir şekilde azalma olduğu görülmektedir (Şekil 4.4c). Ancak doğu lobda deformasyon hala önemli hızda (6 cm/yıl) devam etmektedir.

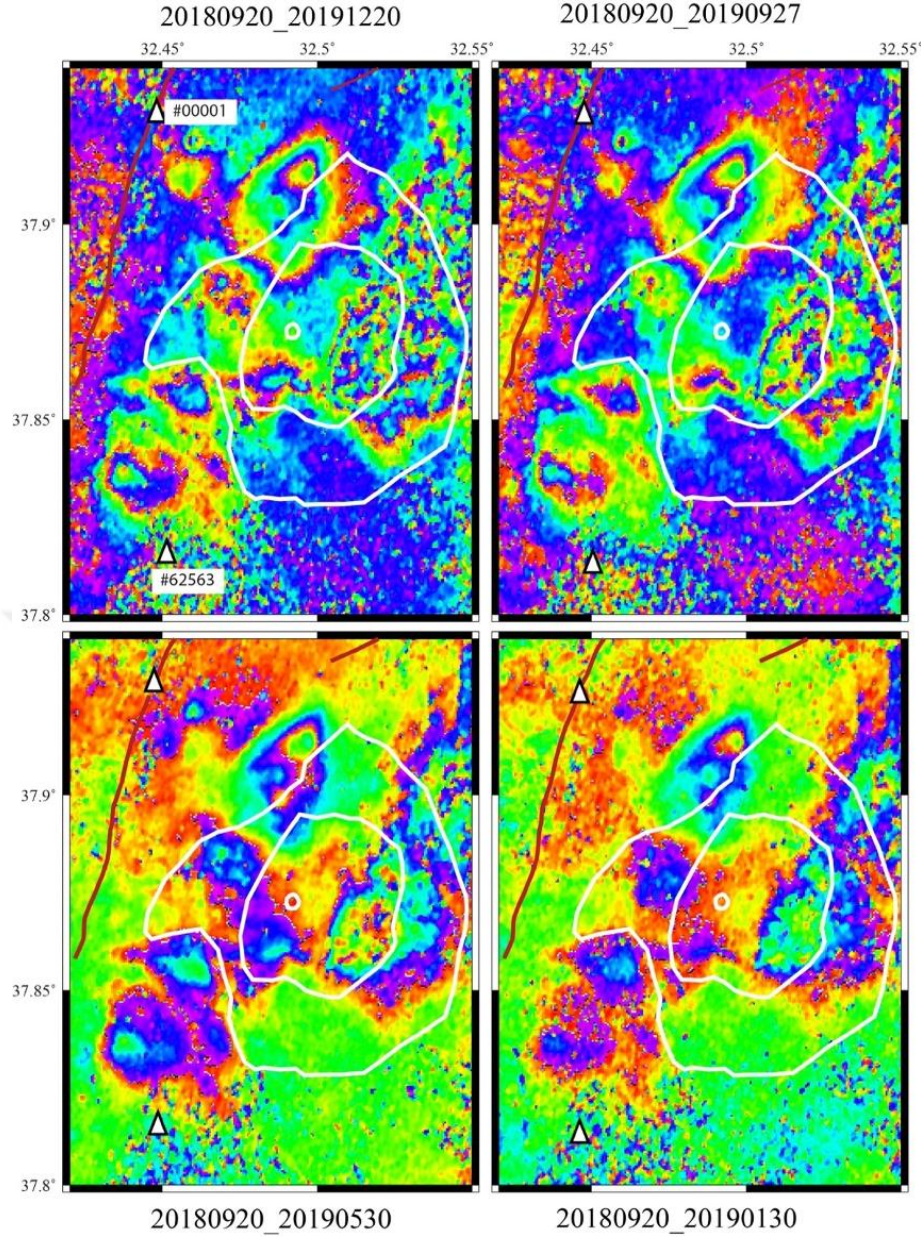
Kentin belirli bazı noktalarında deformasyonun zamansal evrimi Şekil 4.5'te de gösterilmiştir. Kentin doğu tarafından bulunan tarım alanlarında LOS zaman serilerinin mevsimsel etkilerden dolayı zamanla dalgalandığı görülmektedir (örneğin, 2 numaralı zaman serisi). Tarım bölgelerindeki bu inişli çıkışlı ve basamaklı zemin hareketlerin tersine, şehir alanlarında zaman serileri genel olarak doğrusal bir trend

göstermektedir. Bu da şehrin altındaki yeraltı suyunun doğal yollarla yeterince beslemesine mücade edilmeksizin sürekli olarak sabit bir miktarda çekildiğini göstermektedir. Buradan hızla büyüyen Konya şehrinin içme suyunun kısmen de olsa yeraltı suyundan temin edildiği sonucu çıkmaktadır.



Şekil 4.5: Deformasyonun zamansal evrimi. 2000'li yılların başlarından itibaren hızlanan zemin oturmaları 2019'dan sonra şehrin batı yakasında yavaşlamış durumdadır (#8 ve #9).

Zaman serisi #2, kışın çok az veya hiç geri kazanımın sağlanmadığı duraklamalara rağmen yeraltı suyunda çarpıcı bir düşüş olduğunu gösteriyor. Şehrin kuzeyinde 2018'in ortalarından bu yana deformasyonun durduğu ve tersine yükselmenin meydana gelmeye başladığını göstermektedir (zaman serisi #1). Gerçekten de interferogramların görsel incelemesi, her biri muhtemelen şehrin etrafına dağılmış bir yeraltı suyu pompasının etrafında merkezlenen çok sayıda eşmerkezli saçakların varlığını ortaya koymaktadır (Şekil 4.6). Konsantrik saçaklar zamanla birbirleriyle birleşmekte ve ortalama hız alanlarında gözlemlediğimiz büyük lobları oluşturmaktadır.



Şekil 4.6: Sentinel-1T160 çerçevesinde farklı zaman dilimlerini kapsayan ve yeraltı suyu çekimini işaret eden bazı interferogramlar. Interferogramlarda birçok dairesel saçak bulunmaktadır. Bunlar büyük olasılıkla kuyuların yerlerini göstermektedir. Zamanla bu dairesel loblar birleşmekte ve daha büyük loblar oluşturmaktadır. Beyaz üçgenler DSI'ne ait olan ve bu çalışmada kullanılan kuyuların yerlerini göstermektedir. Beyaz çizgiler Konya şehrinde çevre yollarını göstermektedir.

4.2 InSAR LOS Hız Alanlarının Bileşenlerine Ayrıştırılması

Elimizde çalışma alanını hem yükselen hem de alçalan yörüngelerden görüntüleyen uydu olarak sadece Sentinel-1uydusuna ait veriler mevcuttur. Bu nedenle, yükselen ve alçalan yörüngelerden ortalama LOS hız alanlarını ayrıştırarak deformasyonun yatay

(doğu-batı) ve dikey yöndeki bileşenleri hesap edilebilir. Bunun için önce, her iki yöndeki LOS hız alanları 100x100 m piksel büyüklüğünde ortak bir alan için gridlendi. İkinci adımda hem yükselen hem de alçalan yörüngede veri olan tüm pikseller seçildi. Ayırıştırmadan önce, gridlenmiş hız alanları deforme olmadığı kabul edilen bir referans alanı kullanılarak referanslandırıldı (mavi alanlardan bir bölge seçildi). Son adımda, LOS hız alanları Motagh ve diğerleri (2017) tarafından aşağıda verilen bağıntı ile iki bileşene ayrıştırıldı: uydunun yerel geliş açısı (incidence açısı) dikkate alınarak doğu-batı yönündeki yatay bileşen (d_{hor}) ve düşey bileşen (d_{ver}) hesaplandı.

$$\begin{pmatrix} d_{asc} \\ d_{dsc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_{asc} & -\cos\alpha_{asc} \sin\theta_{asc} \\ \cos\theta_{dsc} & -\cos\alpha_{dsc} \sin\theta_{dsc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_{ver} \\ d_{hor} \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

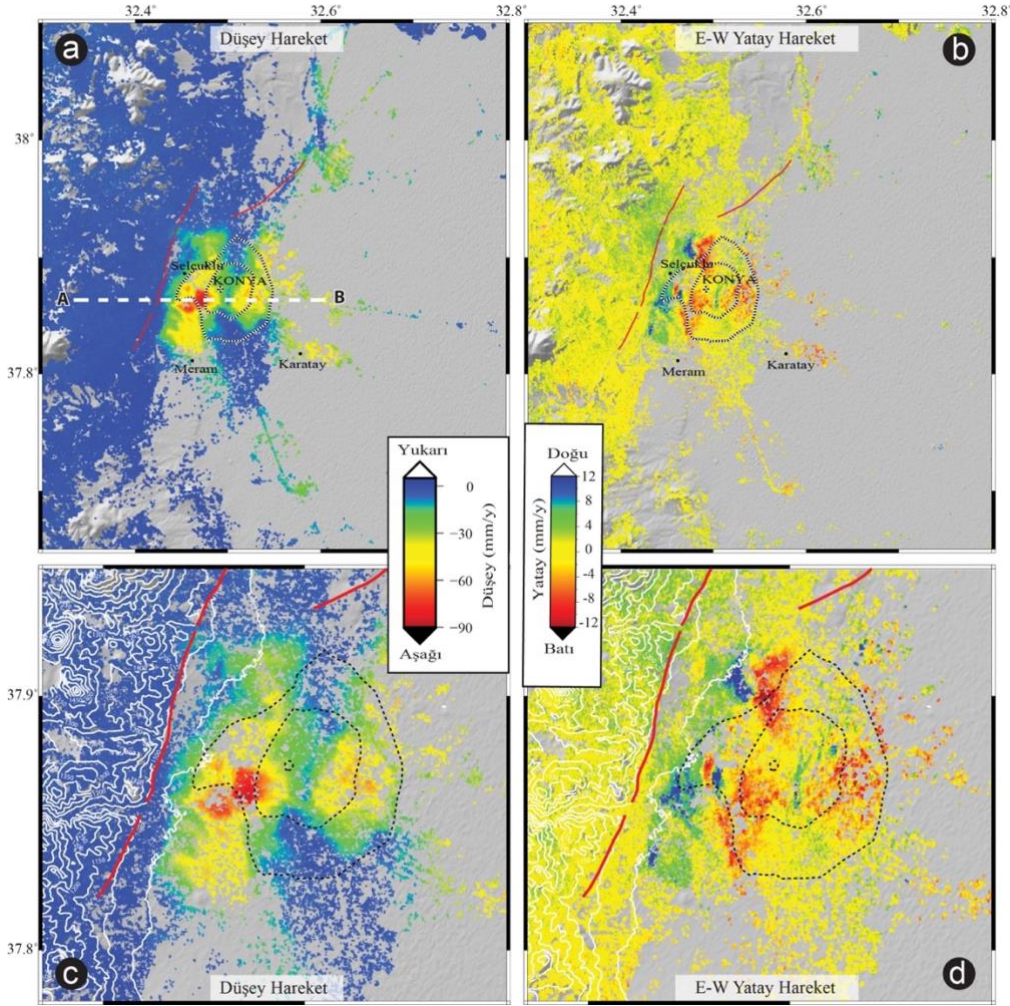
Şekil 4.7 ayırıştırma sonrasında elde edilen düşey ve doğu-batı yönündeki yatay hız alanlarını göstermektedir. Ayırıştırma sonuçları, LOS deformasyonunun çoğunun düşey yönde olduğunu, yani oturma olduğunu doğrulamaktadır. Yatay hareketler genel olarak dikey hareketlerin sonucudur ve beklendiği gibi LOS loblarının doğu taraflarında batı yönlü yatay hareketler, batı taraflarında doğu yönlü yatay hareketler yer oluşmaktadır.

A-B profil hattı boyunca düşey ve yatay hızlar lobların batı kenarlarında yatay hareketlerin doğuya doğru (pozitif değerler) ve lobların doğu kenarlarında ise batıya doğru olduğunu (negatif değerler) göstermektedir (Şekil 4.8). Bu noktada bina hasarının yüksek olasılıkla olması beklenen alanların düşey ve yatay hareketlerinin yüksek gradyana sahip olduğu yerlerde olması gerektiğini belirtmekte fayda var.

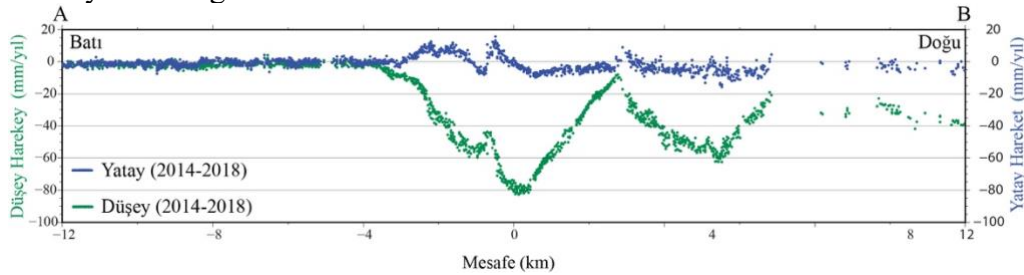
4.3. InSAR Zaman Serileri ile Yeraltı Suyu Kuyuları Arasındaki İlişki

Alandaki oturma ve hidrojeolojik faaliyetler arasındaki ilişkiyi araştırmak için DSI'den (Türkiye Devlet Su İşleri) piezometrik ölçümler elde edildi. Ne yazık ki, DSI kuyularının hiçbirisi kentin yüksek miktarlarda deformasyonun meydana geldiği metropol bölgesinde yer almamaktadır (Şekil 4.9a). Ancak, piezometrik ölçümler şehir merkezinde meydana gelen yeraltı suyu seviyesindeki hızlı değişiklikleri göstermese de şehir dışındaki PS-InSAR zaman serileri ile karşılaştırılabilir (Şekil 4.9b). Görüldüğü üzere, InSAR zaman serileri ve alüvyon üzerindeki kuyulardaki yeraltı suyu tablası seviyeleri yüksek oranda ilişkilidir. Bu da bölgedeki deformasyonun, Caló ve diğ. (2017) ve Orhan (2021) tarafından bildirildiği üzere, aşırı yeraltı suyu çekiminden kaynaklandığını doğrulamaktadır (Şekil 4.9b). Bazı kuyularda, 2014 ve

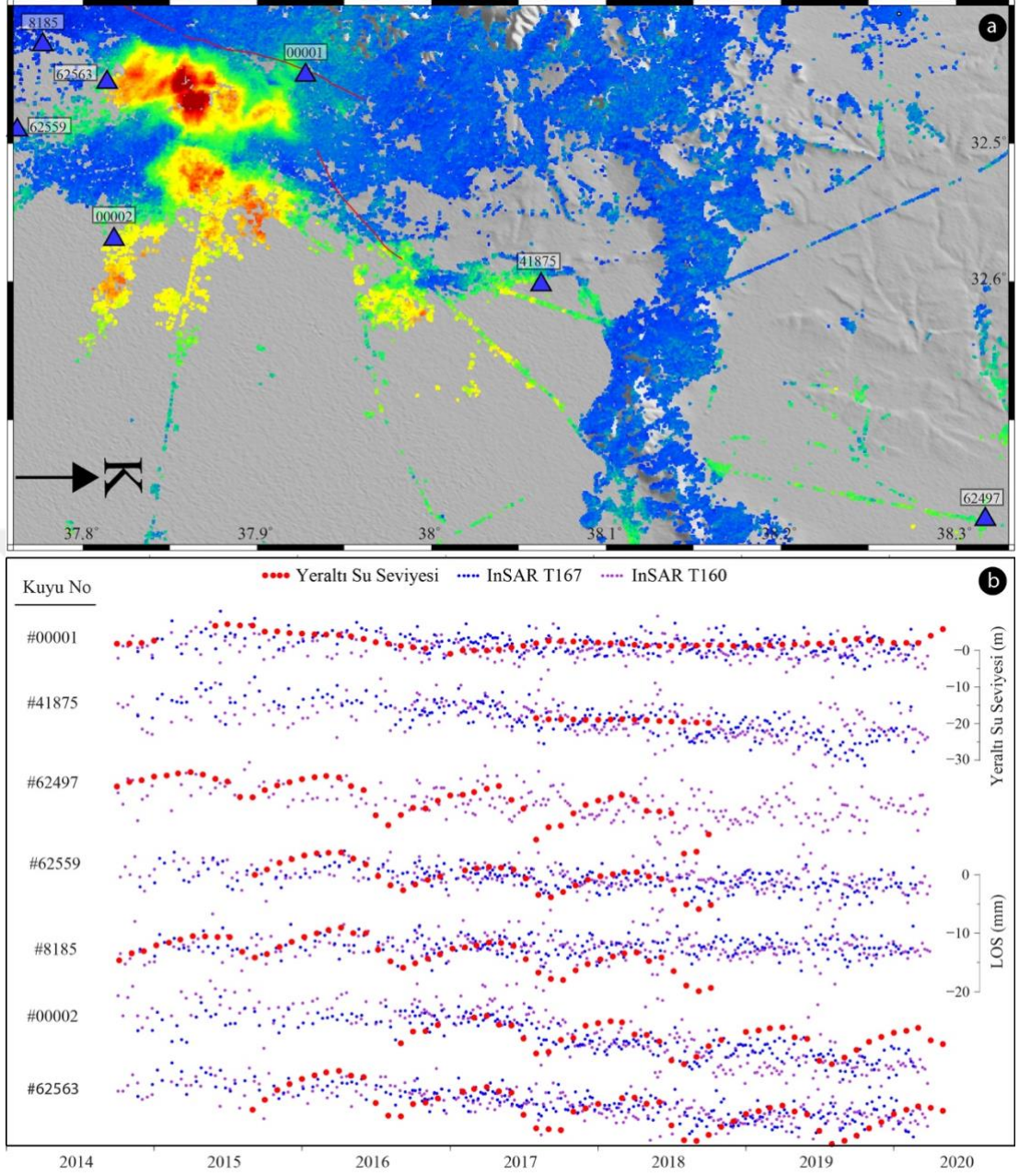
2018 yılları arasında yeraltı suyu tablasındaki düşüş 15 m'ye ulaşmaktadır. Şekil 5.9'deki zaman serisinin analizi, her 1 m'lik su tablası düşüşü için yüzeyde ~1.4 cm'lik bir oturma meydana geldiğini göstermektedir. Böylece yılda yaklaşık 6 m su tablası düşüşü yılda 8 cm'lik bir zemin oturmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.7: 2014-2018 yılları arasında Sentinel-1yükselen (T160) ve alçalan (T167) çerçevelerindeki LOS hız alanlarının ayrıştırılmasıyla hesaplanan düşey (a) ve yatay (D-B) (b) bileşenleri. (c) ve (d) Düşey ve yatay hız alanlarının yakından görünümü.



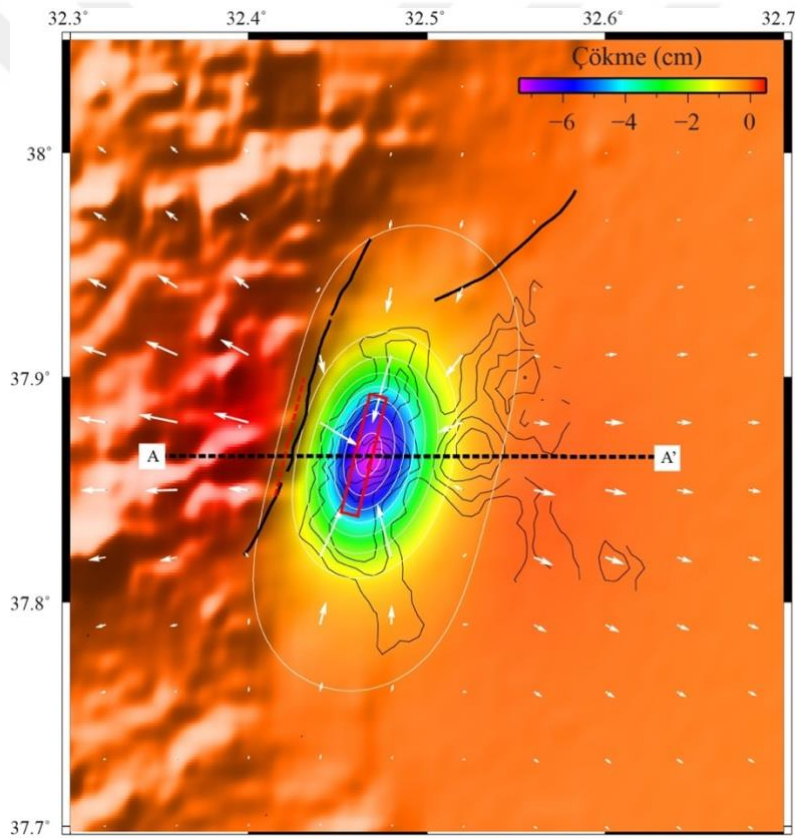
Şekil 4.8: Şekil 4.7'de gösterilen A-B profili boyunca düşey (yeşil noktalar) ve yatay (D-B) (mavi noktalar) hız profillerini göstermektedir. Negatif ve pozitif yatay değerler sırasıyla batıya ve doğuya doğru olan hareketleri gösterir.



Şekil 4.9: Yüzey deformasyonu ile yeraltı suyu seviyesi değişimi arasındaki korelasyon. (a) T160 üzerindeki ortalama LOS hız alanında gösterilen çalışma alanındaki mevcut kuyuların konumu. (b) (a)'da gösterilen kuyulardaki piezometrik ölçümlerin InSAR zaman serisi ile birlikte gösterimi.

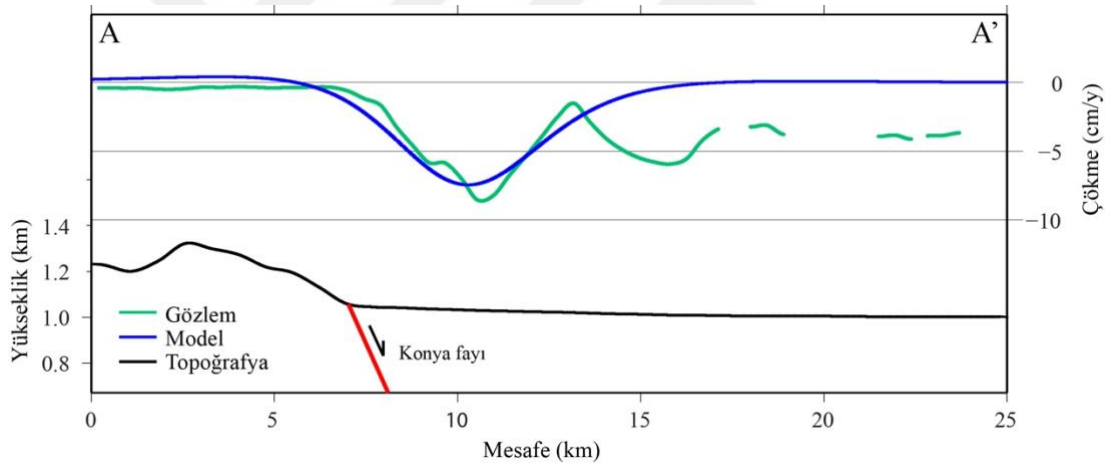
4.4. Deformasyonların Modellenmesi

Konya şehir alanındaki deformasyonların de batıdaki tarım alanlarında olduğu gibi aşırı yeraltı suyu çekilmesinden kaynaklandığı açıktır. Bununla birlikte, metropolitan alandaki oturmaların bir kısmının derinde şehrin altına uzanan Konya fayı üzerindeki olası bir asismik kaymadan kaynaklanıp kaynaklanmadığını araştırmak için, deformasyon homojen ve elastik bir ortamda gömülü dikdörtgen faylar üzerinde gerçekleşen yerdeğiştirme yöntemi (Okada, 1985) ile modellendi. Bunun için 2014-2018 yılları arasındaki elde edilen düşey deformasyon alanı kullanıldı. Bu nedenle Konya fayının yüzey izi boyunca güneydoğuya doğru 45° eğimli 6 km uzunluğunda bir model fay yer oluşturuldu (Şekil 4.10).



Şekil 4.10: Konya Fayı üzerinde elastik kayma modellemesi. Siyah konturlar 2014 ve 2018 yılları arasında meydana gelen düşey deformasyonun 1 cm/yıl aralığındaki konturlarını göstermektedir. Beyaz çizgiler ise modelleme sonucu elde edilen düşey deformasyon konturlarını göstermektedir. Renk kodlaması modelin düşey hareketini gösterirken, oklar yatay hareketi göstermektedir. Modellenen fay kırmızı kutu ile gösterilirken, fayın yüzeye projeksiyonu kırmızı kesikli çizgiler ile gösterilmektedir ki yüzeyde Konya fayı ile çakışmaktadır. Profil A-A' Şekil 4.11'de gösterilmektedir.

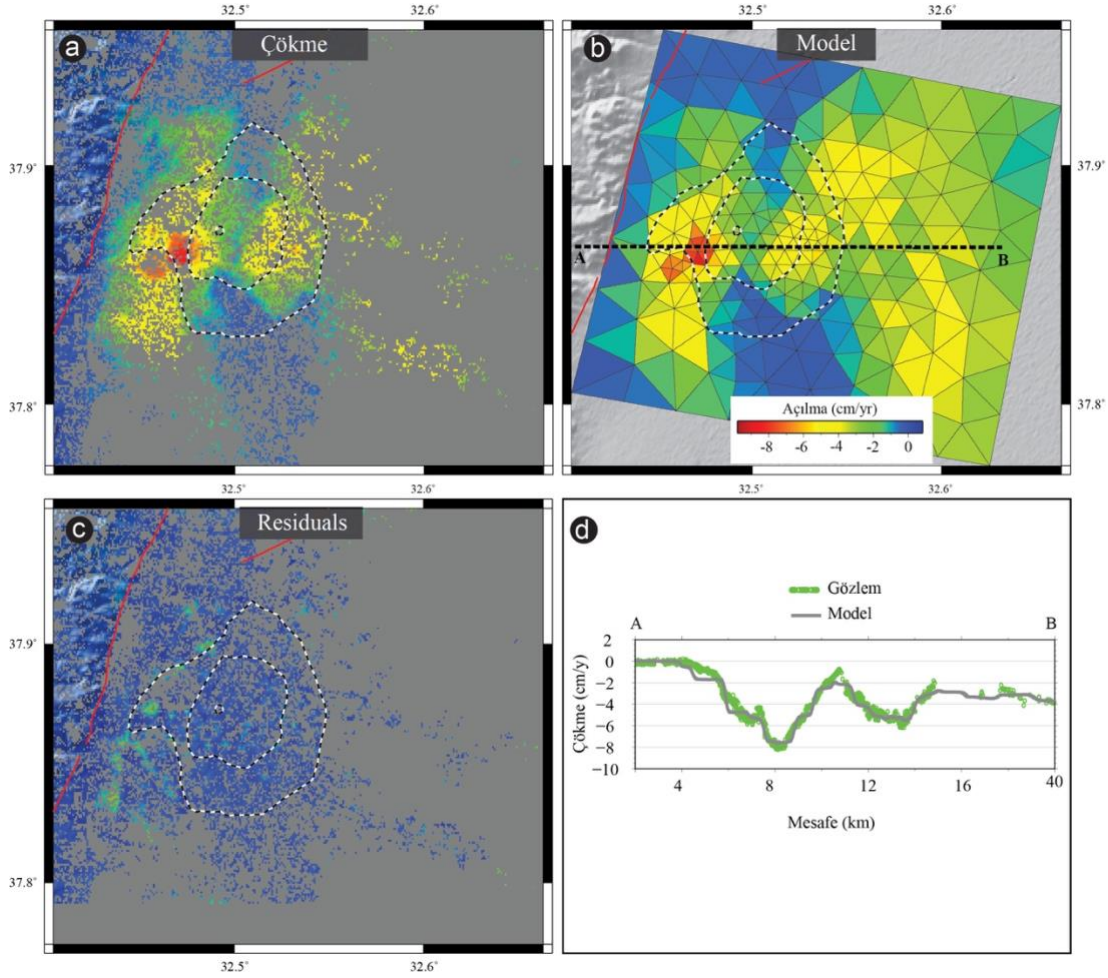
Modelleme düz çözüm yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Çeşitli derinlik ve boyutlarda düzlemler yapılmış ve bunların üzerinde çeşitli miktarlarda normal kayma değerleri verilmiş ve sonuçlar gözlem ile kıyaslanmıştır. Yapılan denemelerde en iyi uyum 4 ila 5 km arasındaki derinliklerde bulunan bir fay üzerinde 90 cm normal kayma verilerek elde edildi. Şekil 4.10 ve 4.11'de gösterildiği gibi, model şehrin batı yakasındaki genel deformasyonları açıklamaktadır, ancak aşağı doğru yüksek frekanslı değişimlerin olduğu doğu lobunu taklit edememektedir. Kaymanın derinliği, eğimi ve genliği ile oynayarak benzer uyumlara sahip çeşitli modeller de elde edilmiştir. Ancak yıllık 90 cm/yıl'dan az kayma, 45°'den daha az eğim ve 3.5 km'den daha sığ derinliklere sahip hiçbir model yüzeyde gözlenen deformasyonları yeterince açıklayamamaktadır. Tüm modeller büyüklüğü 5'ten daha büyük olan bir depreme eşdeğer jeodezik moment vermektedir. Bu kadar yüksek miktarda bir asismik kayma mantıklı olmadığı için Konya metropol alanlarındaki deformasyonların Konya fayının derindeki olası bir aktivitesi ile açıklanması pek mümkün gözükmemektedir.



Şekil 4.11: Elastik yerdeğiştirme modeli ve InSAR'dan elde edilen gözlemleri gösteren hız profilleri ve bu profiller boyunca olan topoğrafik değişim. Konya fayı üzerinde potansiyel yavaş kayma nedeniyle oluşabilecek yüzey deformasyonu mavi ile gösterilirken ve gözlenen deformasyon yeşil ile gösterilmektedir.

Eğer deformasyonlar, yeraltı suyu tablasının düşmesinden kaynaklanan alüvyon çökellerinin sıkışmasından kaynaklanıyorsa, bu deformasyon su tablasını saran bir yüzey üzerinde negatif açılma (yani hacim kaybı veya sıkışma) ile modellenenebilir. Bunun için üçgen yüzeylerdeki yerdeğiştirmelere dayalı sınır elemanları metodunu kullanan Poly3D ve bunun ters çözümünü yapan Poly3Dinv programları kullanıldı (Thomas, 1995; Maerten ve diğ., 2005). Model için yeraltı su tablasının bulunduğu yaklaşık 150 m derinlikte üçgen elemanlardan oluşan yatay bir yüzey oluşturuldu.

Üçgenlerin boyutu, batı ve doğu oturma lobunun merkezine doğru küçültülmüştür ve böylece deformasyon gradyanı açılma ile daha detay bir şekilde modellenebilmiştir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12: Poly3D sınır elemanları yöntemi ile oturma'nın modellenmesi. Düşey deformasyon, yaklaşık 150 m derinlikte yeraltı suyu seviyesini temsil eden yataya yakın düzlemde negatif açılma (yani hacim kaybı) ile modellenmiştir. (a) 2014-2018 yılları arasında gözlenen düşey deformasyon. (b) Yaklaşık 50 m derinlikte üçgen elemanlar üzerindeki açılma miktarı. (c) Gözlemler ile model arasındaki fark. (d) A-B hattı boyunca gözlemlerin ve modelin profili.

Çalışma alanına bakıldığında, diğer ülkelerde yapılan çalışmalarda görüldüğü üzere akiferde su seviyesindeki düşüşten dolayı litolojik birimlerin sıkışması ile hacim kaybı meydana gelmektedir. Ters çözüm sonuçları, 2014-2018 yılları arasında Konya ve çevresinde sedimanların sıkışması nedeniyle her yıl $7.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ 'lük bir hacim kaybının meydana geldiğini göstermektedir. Bu sadece modele dahil edilen bölge içindir. Tüm havzadaki hacim kaybı doğal olarak bundan çok daha fazla ve muhtemelen milyonlarca metreküpe ulaşmaktadır. Yeraltı suyu seviyesi 150 m'den düşükse, hacim kaybı daha da yüksek olacaktır. Bu sıkışmanın ne kadarının geri kazanılabilir olduğuna

cevap vermek, bir bölgedeki yeraltı suyu çekiminin sona ermesini takiben yükselme miktarının izlenmesini ve ölçülmesini gerektirir. Böyle bir alan, şehrin kuzeyinde gözlemlenmektedir. Bu bölgede zaman serileri (Şekil 4.5'teki 1 numaralı zaman serisi) 2018 ortasından bu yana yaklaşık 3 cm yükselmeyi göstermektedir.





5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Farklı zaman dilimlerini kapsayan 2 farklı radar bandı ve 3 farklı radar uydusu tarafından elde edilen SAR görüntülerinin PS-InSAR analizi, Konya şehrinin 2004 yılından bu yana çökmekte olduğunu göstermektedir. Çökme, Kuvaterner alüvyonu ile sınırlı olup, batıdaki tepelerde neredeyse hiç deformasyon yoktur. Konya fayının yüzey izi boyunca izin iki tarafında belirgin deformasyon yoktur. Bu durum, fayın yüzeyde kilitli olduğunu ve krip etmediğini göstermektedir. InSAR sonuçları, şehir merkezinin batısında ve doğusunda, şehri neredeyse eşit iki parçaya bölen deformasyonsuz bir K-G hattı ile iki ana deformasyon alanının varlığını göstermektedir. Batı ve doğu lobları sırasıyla tren istasyonunun 500 m batısında ve tren istasyonunun 5 km doğusunda odaklanmaktadır. Kentin zemininde oluşan bu iki deformasyon alanını birbirinden ayıran şeyin ne olduğu kesin olarak belirlemek için jeofizik çalışmalarına ihtiyaç vardır. Kentin kurulduğu alüvyondaki litolojik farklılıklar veya akifer sistemine engel teşkil edebilecek bir fayın varlığı veya her iki taraftaki çekim hızının lobların birleşmesi için yeterince yüksek olmaması buna neden olabilir. 2004-2019 yılları arasında, başlangıçta yılda birkaç cm olan zemin oturma oranı yılda 11 cm/yıl'a yükselmiştir. Özellikle şehrin doğu kesiminde son iki yılda deformasyon yavaşlamasına rağmen halen 6 cm/yıl'a varan oranlarda gerçekleşmektedir. Şehrin batı kısmında ise son iki yılda deformasyonlar 2 cm/yıl'a kadar düşmüştür.

Zemin oturmalarının mekansal-zamansal değişimi ve bunun su tablası seviyesindeki değişimle güçlü korelasyonu, oturmaların kentsel ihtiyaçlar için kullanılan yeraltı suyunun aşırı çekilmesinden kaynaklandığını doğrulamaktadır. Son iki yılda, oturma hızının çarpıcı bir şekilde yavaşlaması veya şehrin bazı yerlerinde durması nedeniyle talebin azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni, yakın zamanda tamamlanmış olan ve şehre içme suyunu aktaran Mavi Kanal Projesi olabilir.

Yüzey deformasyonlarının Konya fayının derin kesimlerinde meydana gelebilecek olası bir asismik kayma ile kısmen açıklanıp açıklanamayacağını kontrol etmek için, elastik dislokasyon modellemesi yapılmıştır. Modelleme sonuçları, 4 ila 5 km arasındaki derinliklerde fayın küçük bir bölümünde (yaklaşık 6 km) gerçekçi olmayan bir krip hareketini (yaklaşık 90 cm/yıl) gerektirmektedir. Bu nedenle, deformasyonun bir kısmının Konya fayı üzerindeki sismik kaymaya atfedilmesi pek olası değildir.

Sıkıştırılmadan kaynaklanan hacim kaybını hesaplamak için oturmayı üçgen yerdeğiştirme ile modelledik. Sonuçlar, yeraltı suyunun çekilmesi nedeniyle yılda $7.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ hacim kaybının meydana geldiğini göstermektedir. Bu sadece modele dahil edilen bölge içindir. Tüm havzadaki hacim kaybı doğal olarak bundan çok daha fazla ve muhtemelen milyonlarca metreküpe ulaşmaktadır. Gelecekte yeraltı suyu

ıkarılması tamamen durdurulursa, InSAR gözlemleriyle bu hacim kaybının ne kadarının geri kazanılabilir olduğu sorusuna cevap verilebilir.

Konya’da son 20 yıldır devam eden bu deformasyonların binalara ve altyapıya önemli miktarda zarar vermiş olma olasılığı yüksektir. Bina ve diğer mühendislik yapılarında meydana gelen hasarlar, muhtemelen bina yapısında kullanılan malzemenin kalitesiz olmasına veya mühendislik hatalarına atfedilmektedir. Örneğin 2019 yılı Aralık ayında meydana gelen bina çökmesine bu deformasyonlar sebep olmuş olabilir. Bu nedenle yeraltı suyu çekiminin neden olduğuyer değiştirmeler hakkında düzenli olarak yerel yönetimlerin bilgilendirilmesi ve gerekli önlemlerin alınması doğru olacaktır.



KAYNAKLAR

- Aksoy, R., Demiröz, A.,** (2012). The Konya earthquakes of 10–11 September 2009 and soil conditions in Konya, Central Anatolia, Turkey. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **12** (2), 295–303. doi:10.5194/nhess-12-295-2012.
- Amelung, F., Galloway, D.L., Bell, J.W., Zebker, H.A., Lacznia, R.J.,** (1999). Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation. *Geology* **27**(6), 483–486. doi:10.1130/0091-7613(1999)027.
- Aslan, G., Çakır, Z., Ergintav, S., Lasserre, C., Renard, F.,** (2018). Analysis of secular ground motions in Istanbul from a long-term InSAR time-series (1992–2017). *Remote Sensing* **10**(3), 408. doi: 10.3390/rs10030408.
- Aslan, G., Çakır, Z., Lasserre, C., Renard, F.,** (2019). Investigating subsidence in the Bursa Plain, Turkey, using ascending and descending Sentinel-1 satellite data. *Remote Sensing* **11**(1), 85. doi: 10.3390/rs11010085.
- Bekaert, D.P.S., Hamlington, B.D., Buzzanga, B., Jones, C.E.,** (2017). Spaceborne synthetic aperture radar survey of subsidence in Hampton Roads, Virginia (USA). *Scientific reports* **7**(1), 1-9. doi: 10.1038/s41598-017-15309-5.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E.,** (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **40**(11), 2375–2383. doi: 10.1109/TGRS.2002.803792.
- Berke, M.Ö., Dıvrak, B.B., Sarısoy, H.D.,** (2014). Konya’da suyun bugünü raporu. *WWF-Türkiye* (Doğal Hayatı Koruma Vakfı) (in Turkish).
- Caló, F., Notti, D., Galve, J.P., Abdikan, S., Görüm, T. ve diğ.** (2017). Dinsar-Based detection of land subsidence and correlation with groundwater depletion in Konya Plain, Turkey. *Remote sensing* **9**(1), 83. doi: 10.3390/rs9010083.
- Castellazzi, P., Garfias, J., Martel, R., Brouard, C., Rivera, A.,** (2017). InSAR to support sustainable urbanization over compacting aquifers: The case of Toluca Valley, Mexico. *International journal of applied earth observation and geoinformation* **63**, 33–44. doi: 10.1016/j.jag.2017.06.011.
- Comut, F.C., Ustun, A., Lazecky, M., Perissin, D.,** (2016). Capability of detecting rapid subsidence with Cosmo SkyMed and Sentinel-1 dataset over Konya city. In: *The ESA Living Planet Symposium ESA SP740*; Prague, Czech Republic. pp. 9-13.
- Daniel, M., Yıldırım, C., ve diğ.** (2017). Slip along Sultanhanı fault in central Anatolia from deformed Pliocene shorelines of paleolake Konya and implications for seismic hazards in low strain regions. *Geophysical Journal International*, **209**, 1431-1454.
- Demirtaş, R., Ercan, S., Demir, B. ve Aktan M.** (2008). Ege Çöküntü Bölgesinde Son 10 yılda Olmuş Yüzey Deformasyonlarının Mekanizması. *ATAG 12 toplantısı Bildiri Özleri Kitapçığı*, 14-15 Kasım 2008, Akçakoca, MTA Tesisleri.
- Du, Z., Ge, L., Ng, A.H.M., Zhu, Q., Yang, X. ve diğ.** (2018). Correlating the subsidence pattern and land use in Bandung, Indonesia with both Sentinel-

- 1/2 and ALOS-2 satellite images. *International journal of applied earth observation and geoinformation* 67: 54-68. doi: 10.1016/j.jag.2018.01.001.
- Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş. ve diğ.** (2013). Active Fault Map of Turkey with and Explanatory Text, General Directorate of Mineral Research and Exploration, *Special Publication Series* 30, Ankara, Turkey.
- Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R. ve diğ.** (2007). The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*: 45 (2). doi: 10.1029/2005RG000183.
- Fernandez, J., Prieto, J.F., Escayo, J., Camacho, A.G., Luzón, F. ve diğ.** (2018). Modeling the two-and three-dimensional displacement field in Lorca, Spain, subsidence and the global implications. *Scientific reports* 8(1), 1-14. doi: 10.1038/s41598-018-33128-0.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F.,** (2001). Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39 (1), 8-20. doi: 10.1109/36.898661.
- Figueroa-Miranda, S., Tuxpan-Vargas, J., Ramos-Leal, J.A., Hernández-Madrigal, V.M., Villaseñor-Reyes, C.I.,** (2018). Land subsidence by groundwater over-exploitation from aquifers in tectonic valleys of Central Mexico: A review. *Engineering Geology* 246, 91-106. doi: 10.1016/j.enggeo.2018.
- Gabriel, A. K., Goldstein, R.M., Zebker, H.A.,** (1989). Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 94 (B7), 9183-9191. doi: 10.1029/JB094iB07p09183.
- Graham, L.C.,** (1974) Synthetic interferometer radar for topographic mapping, *Proc. IEEE*, 62, 763-768. doi: 10.1109/PROC.1974.9516.
- Haghshenas, H.M. & Motagh M.,** (2019). Ground surface response to continuous compaction of aquifer system in Tehran, Iran: Results from a long-term multi-sensor InSAR analysis. *Remote Sensing of Environment*, doi: 10.1016/j.rse.2018.11.003.
- Hakyemez, H.Y., Elibol, E., Umut, M., Bakırhan, B., Dağistan, H. ve diğ.** (1992). Geology of the Çumra Akören (Konya). *MTA Report* 9449, pp. 63, Ankara.
- Hanssen, R.F.,** (2001). Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis Delft University Civil Engineering and Geosciences Faculty.
- Hooper, A.,** (2008). A Multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters*, 35(16). doi: 10.1029/2008GL034654.
- Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., Arıkan, M.,** (2011). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonics* 514-517, 1-13. doi: 10.1016/j.tecto.2011.10.013.
- Imamoglu, M., Kahraman, F., Cakir, Z., Sanli, F.B.,** (2019). Ground deformation analysis of Bolvadin (W. Turkey) by means of multi-temporal InSAR techniques and Sentinel-1 data. *Remote Sensing* 11(9), 1069. doi: 10.3390/rs11091069.
- Kampes, B., Stefania, U., Doris.,** (1999). The Delft Object-Oriented Radar Interferometric Software. In: *The 2nd International Symposium on Operationalization of Remote Sensing*, Enschede; Netherlands. pp. 16.

- Khorrami, M., Abrishami, S., Maghsoudi, Y., Alizadeh, B., Perissin, D.,** (2020). Extreme subsidence in a populated city (Mashhad) detected by PSInSAR considering groundwater withdrawal and geotechnical properties. *Scientific Reports* **10**(1), 1-16. doi:10.1038/s41598-020-67989-1.
- Koçyiğit, A., Ünay, E., Saraç, G.,** (2000). Episodic graben formation and extensional neotectonic regime in west central Anatolia and Isparta Angle; a case study in the Akşehir-Afyon graben, Turkey, in Tectonics and magmatism in Turkey and surrounding area. In: Bozkurt E, Winchester JA, Piper JDA (editors). *Special Publication*, London: Geological Society, pp 405–421.
- Maerten, F., Resor, P., Pollard, D., Maerten, L.,** (2005). Inverting for Slip on Three-Dimensional Fault Surfaces Using Angular Dislocations. *Bulletin of the Seismological Society of America* **95** (5), 1654-1665. doi: 10.1785/0120030181.
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C. ve diğ.,** (1993). The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature* **364**, 138–142. doi: 10.1038/364138a0.
- Massonnet, D., Feigl, K.L.,** (1998). Radar Interferometry and its Application to Changes in the Earth's Surface. *Reviews of Geophysics* **36** (4), 441-500. doi: 10.1029/97RG03139.
- Meyer, F.,** (2019) "Spaceborne Synthetic Aperture Radar – Principles, Data Access, and Basic Processing Techniques." *SAR Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation*. Eds. Flores, A., Herndon, K., Thapa, R., Cherrington, E., NASA. doi:10.25966/ez4f-mg98.
- Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., Papathanassiou, K. P.,** (2013) A tutorial on synthetic aperture radar. *IEEE Geosci Rem Sens Mag*, **1** (1), pp. 6-43.
- Motagh, M., Walter, T.R., Sharifi, M.A., Fielding, E., Schenk, A. ve diğ.** (2008). Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation. *Geophysical Research Letters* **35**(16), doi: 10.1029/2008GL033814.
- Motagh, M., Shamshiri, R., Haghighi, M.H., Wetzel, H.U., Akbari, B. ve diğ.** (2017). Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjani plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements. *Engineering Geology* **218**, 134–151. doi: 10.1016/j.enggeo.2017.01.011.
- Okada, Y.,** (1985). Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America* **75** (4), 1135-1154.
- Orhan, O.,** (2021). Monitoring of land subsidence due to excessive groundwater extraction using small baseline subset technique in Konya, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment* **193**(4), 1-17. doi: 10.1007/s10661-021-08962-x.
- Orhan, O., Oliver-Cabrera, T., Wdowinski, S., Yalvac, S. & Yakar, M.,** (2021). Land subsidence and its relations with sinkhole activity in Karapınar region, Turkey: a multi-sensor InSAR time series study. *Sensors*, **21**(3), 774.
- Peduto, D., Cascini, L., Arena, L., Ferlisi, S., Fornaro G. ve diğ.** (2015). A general framework and related procedures for multiscale analyses of DInSAR data in subsiding urban areas. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing* **105**, 186-210. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2015.04.001.

- Riel, B., Simons, M., Ponti, D., Agram, P., Jolivet, R.,** (2018). Quantifying ground deformation in the Los Angeles and Santa Ana Coastal Basins due to groundwater withdrawal. *Water Resources Research* **54(5)**, 3557-3582. doi: 10.1029/2017WR021978.
- Rosen, P.A., Hensley, S., Joughin, I.R., Li, F.K., Madsen, S.N. ve diğ.** (2000). Synthetic aperture radar interferometry. *Institute of Electrical and Electronics Engineers* **88(3)**, 333–382. doi: 10.1109/5.838084.
- Rosi, A., Tofani, V., Agostini, A., Tanteri, L., Stefanelli, C.T. ve diğ.** (2016). Subsidence mapping at regional scale using persistent scatters interferometry (PSI): The case of Tuscany region (Italy). *International journal of applied earth observation and geoinformation* **52**, 328-337. doi: 10.1016/j.jag.2016.07.003.
- Saatchi, S.,** (2019) "SAR Methods for Mapping and Monitoring Forest Biomass." *SAR Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation*. Eds. Flores, A., Herndon, K., Thapa, R., Cherrington, E., NASA. doi:10.25966/hbm1-ej07.
- Sandwell, D., Mellors, R., Tong, X., Wei, M., Wessel, P.,** (2011) Open Radar Interferometry Software for Mapping Surface Deformation. *Eos, Transactions American Geophysical Union* **92 (28)**, 234. doi: 10.1029/2011EO280002.
- Şengör, A.M.C.,** (1980). Principles of neotectonics of Turkey. In: *Geological Society of Turkey Conference Series* **2**, pp. 40, Ankara.
- Şengör, A.M.C., Yılmaz, Y.,** (1981). Tethyan evolution of Turkey: A plate tectonic approach. *Tectonophysics* **75**, 181-241.
- Thomas, A.L.,** (1993). Poly3D: a three-dimensional, polygonal element, displacement discontinuity boundary element computer program with applications to fractures, faults, and cavities in the earth's crust. *M.S. Thesis*, Stanford University, Stanford, California, 221p.
- Ustun, A., Tusat, E. ve Yalvac, S.,** (2010). Preliminary results of land subsidence monitoring project in Konya Closed Basin between 2006–2009 by means of GNSS observations. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **10(6)**, 1151-1157. doi: 10.5194/nhess-10-1151-2010
- Ustun, A., Tuşat, E., Yalvaç, S., Özkan, İ., Eren, Y., Özdemir, A., Bildirici, İ.Ö., Üstüntaş, T., Kırtıloğlu, O.S., Mesutoğlu, M.,** (2015). Land subsidence in Konya Closed Basin and its spatio-temporal detection by GPS and DInSAR. *Environ. Earth Sci.*, **73**, 6691–6703. doi: 10.1007/s12665-014-3890-5.
- Yeşilmeden, H. M., İnan, Ç. A., Kurtuluş, B., Canoğlu, M. C., Avşar, Ö. & Razack, M.** (2021). Land subsidence assessment under excessive groundwater pumping using ESA Sentinel-1 satellite data: a case study of Konya Basin, Turkey. *Environmental Earth Sciences*, **80(11)**, 1-16.
- Zebker, H. & Goldstein R.,** (1986). Topographic Mapping from SAR Observation, *Journal of Geophysical Research*, Vol. **911**, pp. 4993- 4999.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad: Nurdan Şireci

EĞİTİM

Lisans: 2014-2019 İTÜ Jeoloji Mühendisliği Bölümü (%100 İngilizce)

MESLEKİ DENEYİM

2020-Halen: İTÜ Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi

İTÜ BAP projesi (2020-2021): Konya metropoliten alanında meydana gelen yüzey deformasyonlarının InSAR yöntemiyle araştırılması, Araştırmacı.

Yapay açıklıklı radar interferometrisi (InSAR), Aktif tektonik, Deformasyon modellemesi

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR

Şireci, N., Aslan, G., Çakır, Z. (basımda) “Long-Term Spatiotemporal Evolution of Land Subsidence in Konya Metropolitan Area (Turkey) Based on Multi-Sensor SAR Data”. Turkish Journal of Earth Sciences.

TEZDEN TÜRETİLEN ULUSLARARASI BİLDİRİLER

Şireci, N., Aslan, G., and Çakır, Z., (2019) “Rapid subsidence in Konya city (C. Turkey) revealed by Sentinel1 InSAR time series”, American Geophysical Union, Fall Meeting 2019, abstract #G13B-0532, San Francisco, USA.

Şireci, N., Aslan, G., and Çakır, Z., (2019) “Investigation of the land subsidence in the Konya plain using hydrogeological and Sentinel-1 time-series data” Geophysical Research Abstracts, Vol. 21, EGU2019-17474, 2019, EGU General Assembly 2019, Vienna, Austria