



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TÜRKİYE'DEKİ AKTİF VOLKANLARDA MEYDANA GELEN
YÜZEY DEFORMASYONLARININ JEODEZİK TEKNİKLERLE
İZLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Halil İbrahim GÜNDÜZ

DANIŞMAN

Prof. Dr. Ferruh YILMAZTÜRK

İKİNCİ TEZ DANIŞMANI

Doç. Dr. Osman ORHAN

AKSARAY, 2024



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TÜRKİYE'DEKİ AKTİF VOLKANLARDA MEYDANA GELEN
YÜZEY DEFORMASYONLARININ JEODEZİK TEKNİKLERLE
İZLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Halil İbrahim GÜNDÜZ

DANIŞMAN

Prof. Dr. Ferruh YILMAZTÜRK

İKİNCİ TEZ DANIŞMANI

Doç. Dr. Osman ORHAN

AKSARAY, 2024

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 192352001 numaralı Doktora öğrencisi Halil İbrahim GÜNDÜZ tarafından hazırlanan “**TÜRKİYE’DEKİ AKTİF VOLKANLARDA MEYDANA GELEN YÜZEY DEFORMASYONLARININ JEODEZİK TEKNİKLERLE İZLENMESİ**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Harita Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Ferruh YILMAZTÜRK

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye: Prof. Dr. Fatih POYRAZ

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye: Prof. Dr. Özgün AKÇAY

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Esra GÜRBÜZ

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Cemil GEZGİN

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 25/06/2024

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Mehmet Ali HINIS

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Doktora tezi olarak sunduđum bu çalıřmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı dűőecek bir yol ve yardıma bařvurmaksızın yazdıđımı, yararlandıđım eserlerin kaynakçada gűősterilenlerden oluřtuđunu, çalıřmamda kullandıđım verilerin orijinalliđini ve her tűrlű intihalden uzak olduđunu beyan ederim.

Enstitű tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tűm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

Halil İbrahim GűNDűZ

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince bilgi ve deneyimiyle bana yol gösteren, tezimin hazırlanıp bu aşamaya gelmesinde yardımlarını ve yönlendirmelerini esirgemeyerek büyük katkı sağlayan, Tez danışmanım Prof. Dr. Ferruh YILMAZTÜRK'e ve Eş danışmanım Doç. Dr. Osman ORHAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Bu tez çalışması sürecinde önerileri ve katkılarıyla destek olan çok değerli Tez İzleme Komitesi üyeleri Prof. Dr. Özgün AKÇAY ve. Dr. Öğr. Üyesi Esra GÜRBÜZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu tez çalışmasının her aşamasında katkısı bulunan ve görüşlerini sunan Aksaray Üniversitesi Harita Mühendisliği bölümünden Prof. Dr. Hediye ERDOĞAN'a ve Dr. Öğr. Üyesi Cemil GEZGİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin başlangıcından bitişine kadar olan süreçte desteklerini esirgemeyen hocalarım ve arkadaşlarım Aksaray Üniversitesi Harita Mühendisliği Bölümünden Doç. Dr. S. Sefa BİLGİLİOĞLU'na ve Arş. Gör. Dr. Osman OKTAR'a, Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi'nden Dr. Öğr. Üyesi A. Tarık Torun'a, Gümüşhane Üniversitesi'nden Dr. Öğr. Üyesi B. Baha BİLGİLİOĞLU'na, Gebze Teknik Üniversitesinden Öğr. Gör. Dr. Nur YAĞMUR AYDIN'a ve Afyon Kocatepe Üniversitesi'nden Eda Esmâ EYÜBAGİL'e teşekkür ederim.

Bu zorlu süreçte desteklerini her zaman hissettiğim aileme minnettarım ve bu tezi onlara ithaf ediyorum.

Bu tez çalışmasının gerçekleşmesinde 121Y401 numaralı proje ile maddi destek sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'na teşekkür ederim.

Halil İbrahim GÜNDÜZ

AKSARAY, 2024

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	6
3. MATERYAL VE METOD.....	10
3.1 Radar Teknolojisi ve Temel Prensipleri.....	10
3.2 Gerçek Açıklıklı Radar (Real Aperture Radar-RAR).....	11
3.3 Yapay Açıklıklı Radar (Synthetic Aperture Radar -SAR).....	13
3.3.1 SAR görüntülerinin özellikleri.....	16
3.3.1.1 Dalga boyu	16
3.3.1.2 Polarizasyon	18
3.3.1.3 Yüzey pürüzlülüğü	19
3.3.1.4 Geliş açısı	20
3.3.1.5 Nem muhtevası.....	21
3.3.2 SAR görüntülerindeki geometrik hatalar	22
3.4 İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar (InSAR)	25
3.4.1 Topoğrafik faz etkisi	28
3.4.2 Düzleştirilmiş yeryuvarı fazının etkisi	29
3.4.3 Yörünge etkisi	29
3.4.4 Atmosferik etki.....	30
3.4.5 Yüzey deformasyonu	31
3.4.6 Korelasyon bozukluğunun etkisi.....	31
3.4.6.1 Termal korelasyonsuzluk	32
3.4.6.2 Konumsal korelasyonsuzluk	32
3.4.6.3 Zamansal korelasyonsuzluk	33
3.5 Diferansiyel İnterferometrik SAR (DInSAR)	34
3.6 Çok Zamanlı InSAR Teknikleri	36
3.6.1 SBAS.....	37
3.6.2 PSInSAR	39
3.7 Yatay ve Düşey Yöndeki Hareketlerin Belirlenmesi	43
4. ÇALIŞMA ALANI VE KULLANILAN VERİLER	45
4.1 Çalışma Alanı ve Jeolojik Özellikleri	45
4.2 Kullanılan Veriler.....	50
4.2.1 SAR verileri	50
4.2.2 GNSS ölçüleri	52
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	55
5.1 Hasan Dağı PSInSAR Sonuçları	55
5.2. Hasan Dağı PSInSAR Sonuçlarının GNSS Sonuçları ile Karşılaştırılması	60
5.3. Hasan Dağı SBAS Sonuçları.....	69
5.4. Hasan Dağı SBAS Sonuçlarının GNSS Sonuçları ile Karşılaştırılması.....	72
5.5 Tendürek Dağı PSInSAR Sonuçları.....	74
5.6 Ağrı Dağı PSInSAR Sonuçları.....	81

5.7 Nemrut Dağı PSInSAR Sonuçları.....	86
5.8 Kula Volkanik Kompleksi PSInSAR Sonuçları.....	90
5.9 Karacadağ PSInSAR Sonuçları.....	94
5.10 Erciyes Dağı PSInSAR Sonuçları	98
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	102
KAYNAKLAR	107
ÖZGEÇMİŞ.....	128



DOKTORA TEZİ

TÜRKİYE’DEKİ AKTİF VOLKANLARDA MEYDANA GELEN YÜZEY DEFORMASYONLARININ JEODEZİK TEKNİKLERLE İZLENMESİ

Halil İbrahim GÜNDÜZ

**Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Ferruh YILMAZTÜRK

İkinci Danışman: Doç. Dr. Osman ORHAN

ÖZET

Volkanik tehdit açısından 95 ülke arasında 14. sırada yer alan Türkiye, son 10.000 yıl içerisinde faaliyeti bulunan 7 volkanik sisteme (Hasan Dağı, Tendürek Volkanı, Ağrı Dağı, Nemrut Volkanı, Kula Volkanik Kompleksi, Karacadağ, Erciyes Dağı) sahiptir. Türkiye’de yer alan bu volkanik sistemler Global Volkanizma Programına göre son 10.000 yılda 38 volkanik patlamaya neden olmuş ve MS 1100 ile 1900 yılları arasında ise her yüzyılda en az bir volkanik patlama meydana getirmiştir. Son volkanik aktiviteye ait kayıt 1855 yılında Tendürek Dağı’nda meydana gelen gaz ve kül çıkışı olsa da uzun süredir durgunluk döneminde olan volkanlar, yüzlerce yıl sonra bile faaliyetlerine devam edebilmekte ve çevresinde yaşayan toplumlar için ciddi bir tehdit oluşturabilmektedir. Bu nedenle volkanik aktivitelerin izlenmesinde en erken ve en önemli belirteçlerinden biri olan yüzey deformasyonların tespit edilmesi oldukça önemli bir konudur.

Bu çalışmada Global Volkanizma Programına göre Türkiye’de aktif olan 7 volkanik sistemde meydana gelen yüzey deformasyonlarının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda çalışma alanlarından alçalan ve yükselen yörüngelerden elde edilen Sentinel-1 SAR görüntüleri ve GACOS gecikme ürünleri kullanılarak 2019-2023 yılları arasındaki yüzey deformasyonları PSInSAR tekniği kullanılarak tespit edilmiştir. Ayrıca pilot bölge olarak seçilen Hasan Dağı’na TÜBİTAK 121Y401 no’lu proje kapsamında Türkiye’de ilk defa volkanik alanların izlenmesi amacıyla yönelik jeodezik bir ağ kurularak GNSS ve PSInSAR tekniklerinden elde edilen bulgular karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda Türkiye’de yer alan volkanik sistemlerde Tendürek volkanında yaklaşık -1,5 cm/yıl’lık bir deformasyon ve diğer 6 volkanik sistemde ise genel anlamda -2 ile 5 mm/yıl’lık bir deformasyon tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sentinel-1, PSInSAR, StaMPS, SBAS, GMTSAR, GACOS, GNSS, Volkan, Deformasyon.

Haziran, 2024; 128 sayfa

PhD. THESIS

MONITORING SURFACE DEFORMATIONS OF ACTIVE VOLCANOES IN TURKEY WITH GEODETIC TECHNIQUES

Halil İbrahim GÜNDÜZ

**Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Geomatics Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Ferruh YILMAZTÜRK

Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Osman ORHAN

ABSTRACT

Ranking 14th among 95 countries in terms of volcanic threat, Turkey has 7 volcanic systems (Mount Hasan, Tendürek Volcano, Mount Ağrı, Nemrut Volcano, Kula Volcanic Complex, Karacadağ, Mount Erciyes) that have been active in the last 10.000 years. According to the Global Volcanism Program, these volcanic systems in Turkey have caused 38 volcanic eruptions in the last 10,000 years and at least one volcanic eruption occurred every century between 1100 and 1900 AD. Although the last recorded volcanic activity was the gas and ash eruption from Tendürek Volcano in 1855, volcanoes that have been in a dormant state for a long time can continue their activities even after hundreds of years and pose a serious threat to the communities living in their surroundings. Therefore, detecting surface deformations, which are one of the earliest and most important indicators of volcanic activity, is a very important issue.

This study aims to determine the surface deformations occurring in 7 active volcanic systems in Turkey according to the Global Volcanism Program. In this context, surface deformations between 2019 and 2023 were determined using the PSInSAR technique using GACOS delay products and Sentinel-1 SAR images obtained from descending and ascending orbits for the study areas. In addition, a geodetic network was established for the first time in Turkey for the purpose of monitoring volcanic areas in Mount Hasan, which was selected as a pilot area, within the scope of the TÜBİTAK 121Y401 project, and the findings obtained from GNSS and PSInSAR techniques were compared. As a result of the study, a deformation of approximately -1.5 cm/year was detected in Tendürek volcano and a general deformation of -2 to 5 mm/year was detected in the other 6 volcanic systems in Turkey.

Keywords: Sentinel-1, PSInSAR, StaMPS, SBAS, GMTSAR, GACOS, GNSS, Volcano, Deformation.

June, 2024; 128 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Radar görüntüleme geometrisi.....	12
Şekil 3.2. Azimut ve menzil çözünürlüğü geometrisi.....	12
Şekil 3.3. SAR uyduları ve çalışma periyotları.....	14
Şekil 3.4. SAR görüntüleme geometrisi.	15
Şekil 3.5. Farklı dalga boylarındaki (X-C-L) bantların hedefe nüfuz etme kabiliyeti.	17
Şekil 3.6. Elektromanyetik dalganın yatay ve düşey polarizasyonları	18
Şekil 3.7. Farklı yüzeylerin yansıtma özellikleri.	20
Şekil 3.8. Geliş açısı ve yerel geliş açısı.....	21
Şekil 3.9. Yüzeyin nem içeriğine göre geri yansıması.....	22
Şekil 3.10. SAR görüntülerindeki kısa görüntüleme etkisi.	23
Şekil 3.11. SAR görüntülerindeki ters görüntüleme etkisi.	23
Şekil 3.12. SAR görüntülerindeki gölge etkisi.	24
Şekil 3.13. Yükselen ve alçalan uydu yörüngeleri.....	25
Şekil 3.14. Tek ve tekrar geçişli InSAR yöntemleri.	26
Şekil 3.15. SAR interferometre geometrisi.....	27
Şekil 3.16. SBAS işlem adımları.	39
Şekil 3.17. PSInSAR işlem adımları.....	43
Şekil 3.18. Yükselen ve alçalan yörüngede SAR görüntüleme geometrisi ve LOS doğrultusundaki yer değişimler ile 3B hareket bileşenleri arasındaki yansıtma ilişkisi.	44
Şekil 4.1. Türkiye’de yer alan aktif ve olası aktif volkanik sistemler.	46
Şekil 4.2. Sentinel-1 görüntü edinim modları.....	51
Şekil 4.3. Tesisi tamamlanan THKA-HAS-1 (a), THDI-HAS-2 (b) ve THKR-HAS-3 (c) sabit GNSS istasyonları.	53
Şekil 4.4. Hasan Dağı’na tesis edilen GNSS noktaların konumu.	54
Şekil 5.1. Hasan Dağı’nda kullanılan Sentinel-1 görüntü çerçeveleri.	55
Şekil 5.2. Hasan Dağı’nda kullanılan Sentinel-1 görüntülerinin yükselen (a) ve alçalan (b) yörüngelerdeki baz mesafe şemaları.....	56
Şekil 5.3. Hasan Dağı’na ait yükselen (a) ve alçalan (b) yörüngelerden elde edilen ortalama deformasyon hız haritaları.	57
Şekil 5.4. Hasan Dağı’na ait yükselen (a) ve alçalan (b) yörüngelerden elde edilen standart sapma haritaları.	58
Şekil 5.5. Hasan Dağı’na ait LOS doğrultusundaki sonuçlardan elde edilen yatay ve düşey deformasyon bileşenleri.....	59
Şekil 5.6. HAS-1, HAS-2 ve HAS-3 GNSS noktalarının uzun dönem zaman serileri.	61
Şekil 5.7. Yükselen (a,b,c) ve alçalan (d,e,f) yörüngelerden elde edilen PSInSAR zaman serileri ile GNSS’ten elde edilen zaman serileri.	67
Şekil 5.8. Yükselen (a,b,c) ve alçalan (d,e,f) yörüngelerden elde edilen PSInSAR zaman serileri ile GNSS zaman serilerinin gün bazında karşılaştırılması.	68
Şekil 5.9. Yükselen (a) ve alçalan (b) görüntü çiftlerine ait baz mesafe şemaları.....	70
Şekil 5.10. Hasan Dağı’na ait yükselen (a) ve alçalan (b) yörüngelerden elde edilen ortalama deformasyon hız haritaları.	71
Şekil 5.11. Yükselen (a,b,c) ve alçalan (d,e,f) yörüngelerden elde edilen SBAS zaman serileri ile GNSS zaman serilerinin gün bazında karşılaştırılması.....	73
Şekil 5.12. Tendürek Dağı’nda kullanılan Sentinel-1 görüntü çerçeveleri.....	75

Şekil 5.13. Tendürek Dağı'nda kullanılan Sentinel-1 görüntülerinin yükselen (a) ve alçalan (b) yörüngelerdeki baz mesafe şemaları.	76
Şekil 5.14. Tendürek Dağı'na ait yükselen (a) ve alçalan (b) yörüngelerden elde edilen ortalama deformasyon hız haritaları.	77
Şekil 5.15. Tendürek Dağı'na ait yükselen (a) ve alçalan (b) yörüngelerden elde edilen standart sapma haritaları.	78
Şekil 5.16. (a,b) Yükselen (Şekil 5.14-a'da 1,2) ve (c,d) alçalan yörüngeden seçilen PS noktalarındaki (Şekil 5.14-b'de 3,4) LOS zaman serileri.	79
Şekil 5.17. Tendürek Dağı'na ait LOS doğrultusundaki sonuçlardan elde edilen yatay ve düşey deformasyon bileşenleri.	80
Şekil 5.18. Ağrı Dağı'nda kullanılan Sentinel-1 görüntü çerçeveleri.	82
Şekil 5.19. Ağrı Dağı'nda kullanılan Sentinel-1 görüntülerinin yükselen (a) ve alçalan (b) yörüngelerdeki baz mesafe şemaları.	83
Şekil 5.20. Ağrı Dağı'na ait yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen ortalama deformasyon hız haritaları.	84
Şekil 5.21. Ağrı Dağı'na ait yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen standart sapma haritaları.	85
Şekil 5.22. Nemrut Dağı'nda kullanılan Sentinel-1 görüntü çerçeveleri.	86
Şekil 5.23. Nemrut Dağı'nda kullanılan Sentinel-1 görüntülerinin yükselen (a) ve alçalan (b) yörüngelerdeki baz mesafe şemaları.	87
Şekil 5.24. Nemrut Dağı'na ait yükselen (a) ve alçalan (b) yörüngelerden elde edilen ortalama deformasyon hız haritaları.	88
Şekil 5.25. Nemrut Dağı'na ait yükselen (a) ve alçalan (b) yörüngelerden elde edilen standart sapma haritaları.	89
Şekil 5.26. Kula Volkanik Kompleksi'nde kullanılan Sentinel-1 görüntü çerçeveleri.	90
Şekil 5.27. Kula Volkanik Kompleksi'nde kullanılan Sentinel-1 görüntülerinin yükselen (a) ve alçalan (b) yörüngelerdeki baz mesafe şemaları.	91
Şekil 5.28. Kula Volkanik Kompleksi'ne ait yükselen (a) ve alçalan (b) yörüngelerden elde edilen ortalama deformasyon hız haritaları.	92
Şekil 5.29. Kula Volkanik Kompleksi'ne ait yükselen (a) ve alçalan (b) yörüngelerden elde edilen standart sapma haritaları.	93
Şekil 5.30. Karacadağ'da kullanılan Sentinel-1 görüntü çerçeveleri.	94
Şekil 5.31. Karacadağ'da kullanılan Sentinel-1 görüntülerinin yükselen (a) ve alçalan (b) yörüngelerdeki baz mesafe şemaları.	95
Şekil 5.32. Karacadağ'a ait yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen ortalama deformasyon hız haritaları.	96
Şekil 5.33. Karacadağ'ın ait yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen standart sapma haritaları.	97
Şekil 5.34. Erciyes Dağı'nda kullanılan Sentinel-1 görüntü çerçeveleri.	98
Şekil 5.35. Erciyes Dağı'nda kullanılan Sentinel-1 görüntülerinin yükselen (a) ve alçalan (b) yörüngelerdeki baz mesafe şemaları.	99
Şekil 5.36. Erciyes Dağı'nın yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen ortalama deformasyon hız haritaları.	100
Şekil 5.37. Erciyes Dağı'na ait yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen standart sapma haritaları.	101

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Mikrodalga bantları.	17
Çizelge 3.2. Bazı SAR sistemlerinin polarizasyonları.....	19
Çizelge 4.1. Sentinel-1 uydusuna ait teknik bilgiler.	50
Çizelge 5.1. GNSS ölçülerinden elde edilen hızlarının istatistiksel değerlendirme sonuçları.....	62
Çizelge 5.2. Periyodik etki giderilmiş ve giderilmemiş lineer fonksiyonun katsayıları, standart sapmaları ve test büyüklükleri.....	63
Çizelge 5.3. GNSS hızlarının PSInSAR-LOS doğrultusuna dönüşümü.....	65
Çizelge 5.4. GNSS hızlarının SBAS-LOS doğrultusuna dönüşümü.	72



SİMGELER VE KISALTMALAR

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ALOS	Advanced Land Observing Satellite
COSMO-SkyMed	COntellation of small Satellites for Mediterranean basin
DInSAR	Differential SAR Interferometry
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ENVİSAT	European Environment Satellite
ERS-1/2	European Remote Sensing Satellite - 1/2
ESA	European Space Agency
EW	Extra-Wide swath
GACOS	Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR
GAMIT	GPS Analysis Massachussets Institute of Technology
GLOBK	Global Kalman Filter
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
HH	Horizontal-Horizontal
HV	Horizontal-Vertical
IGS	International GNSS Service
InSAR	İnterferometrik Yapay Açıklı Radar
ITRF	International Terrestirial Reference Frame
IW	Interferometric Wide swath
LOS	Line of Sight
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MTI	Multi-Temporal-InSAR
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PALSAR	Phased Array L-band SAR
PS	Persistent Scatterer
PSInSAR	Persistent Scatterers InSAR
RADAR	Radio Detecting and Ranging
RAR	Real Aperture Radar
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
SAR	Synthetic Aperture Radar
SBAS	Small Baselines Interferometry
SLC	Single Look Complex
SLR	Side Looking Radar
SM	Stripmap
SNAP	Sentinel Application Platform
SNR	Signal to Noise Ratio
SqueeSAR	Squeeze SAR
StaMPS	Stanford Method for PS
SYM	Sayısal Yükseklik Modeli
TRAIN	Toolbox for Reducing Atmospheric InSAR Noise
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
VH	Vertical-Horizontal
VV	Vertical-Vertical
WV	Wave mode
ZTD	Zenith Tropospheric Delay

1. GİRİŞ

Volkanik patlamalar, Dünya üzerindeki en güçlü ve yıkıcı doğal afetler arasında olup, toplumlar üzerinde doğrudan (can ve mal kaybı, altyapı ve üstyapılara hasar vb.) ve dolaylı olarak (hava taşımacılığının kesintiye uğraması, tsunamiler, iklim değişiklikleri vb.) olumsuz fiziksel ve sosyo-ekonomik etkilere neden olmaktadır (Desai vd., 2015; Freire vd., 2019; Gündüz vd., 2023). Her ne kadar volkanik patlamaların etkileri, son iki yüzyılda meydana gelen diğer doğal afetlerle karşılaştırıldığında nispeten küçük olsa da, 1902’de Pelee volkanının (Fransa) patlaması 30.000, 1951’de Lamington volkanının (Papua Yeni Gine) patlaması 3000, 1985’te Nevado del Ruiz volkanının (Kolombiya) patlaması ise 25.000 kişinin ölümüne neden olmuştur. Buna ek olarak 1991’de Pinatubo volkanının (Filipinler) patlaması 750 milyon dolar gelir kaybına, 2010 yılında Eyjafjallajokull volkanının (İzlanda) patlaması ise Avrupa hava sahasının kapanmasına ve 1,7 milyar dolardan fazla gelir kaybına neden olmuştur (Annen ve Wagner, 2003; ; Brown vd., 2017; Budd vd., 2011; Cardwell vd., 2021; Doocy vd., 2013; Garthwaite vd., 2019; Gorshkov, 1963).

Son 10.000 yıl içerisinde faaliyetinden şüphelenilen veya teyit edilen 1.508 aktif volkan bulunmakta olup, bu volkanların 100 km yakınında ise 800 milyondan fazla insanın yaşadığı tahmin edilmektedir (Brown vd., 2017). Buna ek olarak hızla artan Dünya nüfusu ve kent merkezlerinin genişlemesi de toplumların volkanik tehlikelere maruziyetini hızla artmasına neden olmaktadır (Auker vd., 2013; Chester vd., 2000). Volkanik aktivitelerin tahmin ve izlenmesindeki gelişmeler, volkanik patlamalar ve bu patlamalar sonrasında meydana gelen zincirleme etkilerin (lav akışı, deprem, tsunami vb.) en aza indirgenebileceğini veya önlenebileceğini göstermiş olsa da aktif volkanların önemli bir kısmı hâlâ düzenli olarak izlenmemektedir (Anantrasirichai vd., 2018; Auker vd., 2013; Mei vd., 2013).

Volkanik aktivitelerin izlenmesindeki huzursuzluk belirteçleri sismisite, gaz emisyonları ve yüzey deformasyonları ile karakterize edilmektedir. Bu belirteçlerden biri olan yüzey deformasyonu, volkanik huzursuzluğun en erken ve en önemli göstergesi olup belirli bir derinlikte gömülü olan magma rezervuarında meydana gelen basınç değişikliklerinin bir sonucu olarak oluştuğu düşünülmektedir (Sparks vd., 2012; Velez vd., 2011). Magma rezervuarlarında meydana gelen bu basınç değişiklikleri,

patlama faaliyeti dönemleriyle ilişkilendirilebilir ve huzursuzluk dönemi öncesinde, sırasında ve sonrasında bazı kombinasyonlarla çeşitli jeodezik etkilere, yani yüzey deformasyonlarına neden olabilmektedir (Velez vd., 2011). Bu nedenle volkanik alanların uzun süreli izlenmesi ve bu alanlarda meydana gelen yüzey deformasyonlarının tespit edilmesi, magmatik süreçleri daha iyi anlamak ve volkanik patlamaların tahmin edilmesi için oldukça kritik bir öneme sahiptir (Gambino vd., 2014).

Volkanik alanların düzenli olarak izlenmesi ve bu alanlarda meydana gelen yüzey deformasyonlarının zamansal ve mekânsal modellerinin tespit edilebilmesi için farklı yersel (eğimölçer, gerinim ölçer vb.) ve uzaysal (Global Navigation Satellite Systems-GNSS, Interferometric Synthetic Aperture Radar - InSAR) teknikler kullanılmaktadır (Velez vd., 2011). Yersel teknikler yüksek ölçme doğruluklarına rağmen önemli ölçüde iş gücü, zaman ve maliyet gerektirmektedir (Qu vd., 2015). Ayrıca 1508 aktif volkanın yersel tekniklerle izlenmesi, kaynak yetersizliği, uzak konumlara erişim gereksinimi, aktif bir volkana yakın olmanın doğasında var olan tehlikeler ve bu tekniklerle yapılan ölçümlerin zamansal ve mekânsal çözünürlüğünün sınırlı olması gibi nedenlerle oldukça güçleşebilmektedir (Reath vd., 2019). Uzaysal tekniklerden biri olan GNSS, yüksek konum hassasiyeti, zaman tasarrufu ve maliyetlerin düşmesi ile birlikte volkanik alanların izlenmesi ve bu alanlarda meydana gelen yüzey deformasyonlarının tespit edilmesinde son yıllarda oldukça yaygın bir kullanıma sahiptir (De Martino vd., 2021; DeGrandpre vd., 2017; Janssen vd., 2002; Lowry vd., 2001). Ancak, bu teknik sağlamış olduğu yüksek konum hassasiyetine rağmen mekânsal çözünürlük açısından sınırlı kalmakta ve alansal veri yerine noktasal veri sağlamaktadır (Li vd., 2022; Palano vd., 2008). InSAR tekniği ise düşük maliyet, geniş alanları görüntüleyebilme kabiliyeti, verilere erişimin kolaylığı ve yüksek zamansal ve mekânsal çözünürlük gibi avantajları sayesinde volkanik alanların izlenmesi ve yüzey deformasyonlarının tespit edilmesinde günümüzde sıklıkla kullanılmaktadır (Bemelmans vd., 2023; Lazecký vd., 2020; Morales Rivera vd., 2016; Parker vd., 2014; Pritchard ve Simons, 2004; Samsonov vd., 2017; Xue vd., 2020).

Klasik bir InSAR tekniği olan Diferansiyel İnterferometrik Sentetik Açıklıklı Radar (Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar - DInSAR), aynı sahneye ait iki farklı zaman diliminde elde edilen Sentetik Açıklıklı Radar (Sythetic Aperture Radar-

SAR) görüntülerinin faz farklarının kıyaslanması temeline dayanan ve depremler, volkanlar, heyelanlar ve buzullar gibi doğal afetlerin neden olduğu yüzey deformasyonlarının belirlenmesinde kullanılan etkili yöntemlerden biridir (Fruneau vd., 1996; Goldstein vd., 1993; Lu vd., 2005; Massonnet vd., 1993; Zebker vd., 1994). Bununla birlikte DInSAR tekniği her ne kadar milimetre ölçeğindeki küçük hareketleri tespit edebiliyor olsa da, bu tekniğin hassasiyeti uzaysal ve zamansal ilişkisizlikler, atmosferik artefaktlardan kaynaklanan sinyal gecikmeleri, topoğrafik ve yörüngesel hatalar nedeniyle sınırlı kalmaktadır (Pawluszek-Filipiak ve Borkowski, 2020). Tüm bu sorunlara rağmen, yaklaşık 30 yıldır birçok araştırmacı tarafından volkanların neden olduğu yüzey deformasyonlarının izlenmesinde (Boixart vd., 2020; Corsa vd., 2022; Lagios vd., 2005; Massonnet vd., 1995) başarıyla uygulanan DInSAR tekniğindeki bu sınırlamaları ortadan kaldırmak için zaman serisi analizleri, yani çok zamanlı InSAR teknikleri (Persistent Scatterer Interferometry-PSI ve Small Baseline Subset-SBAS) geliştirilmiştir (Berardino vd., 2002; Ferretti vd., 2000; Ferretti vd., 2001; Hooper vd., 2004).

Kalıcı Yansıtıcı InSAR (Persistent Scatterers InSAR-PSInSAR) tekniği, uzun zaman aralıklarında yüksek oranda korunan ve kalıcı saçıcılar olarak bilinen bireysel görüntü piksellerinin tanımlanmasına dayanmaktadır (Pourkhosravani vd., 2022). İlk olarak Ferretti vd. (2000) tarafından önerilen bu teknik, geliştirildikten sonra özellikle kalıcı saçıcı (Persistent Scatterer - PS) hedeflerin (insan yapımı yapılar, köşe reflektörleri vb.) olduğu kentsel alanlardaki yüzey deformasyonlarının mm ölçeğinde hassasiyetle tespit edilebilmesinde önemli bir araç haline gelmiştir (Lan vd., 2012; Navarro-Sanchez ve Lopez-Sanchez, 2014; Shen vd., 2022). Ancak PSInSAR tekniği, PS piksellerini zaman içerisinde kararlı saçılma davranışı sergileyen pikseller olarak tanımlayarak bu piksellerin zamansal bir deformasyon modeline ihtiyaç duymaktadır (Riddick vd., 2012). Bu nedenle kentsel olmayan doğal alanlarda bu teknikle yapılan çalışmalar, düşük PS yoğunluğu nedeniyle sınırlı kalmaktadır (Ducret vd., 2014). Diğer PSInSAR tekniklerinden farklı bir yaklaşımla geliştirilen Stanford Method for Persistent Scatterers (StaMPS) tekniği ise düşük faz varyansına sahip pikselleri tespit edebilmek için interferometrik fazın uzamsal korelasyonunu kullanarak bitki örtüsü içindeki büyük kayalar veya lav akıntıları gibi sabit yer saçıcılarını tanımlayabilmektedir (Hooper vd., 2004; Hooper vd., 2007; Riddick vd., 2012). Ayrıca bu teknik, deformasyonun zaman içerisinde nasıl değiştiğine dair deformasyon

modeli gerekliliğini de ortadan kaldırmaktadır. Bu avantajları sayesinde StaMPS tekniği, sadece kentsel alanlarda değil aynı zamanda volkanik alanlar gibi doğal arazilerde de yeterli yoğunlukta PS noktası tespit edebilmekte ve bu alanlarda meydana gelen yüzey deformasyonlarının tespit edilmesinde kullanılabilmektedir (Riddick vd., 2012). SBAS (Small Baseline Subset - SBAS) tekniğinin temeli ise tüm görüntü üzerinde yüksek korelasyona sahip dağılmış hedef noktalarının bir arada incelenmesine dayanmaktadır. SBAS tekniği, tek bir ana görüntü yerine zamansal ve dik baz uzunluklarına göre görüntü çiftlerinin seçilmesi temeline dayanan ileri bir DInSAR tekniği olarak bilinmektedir (Bayık, 2018). Görüntü çifti seçiminin temel amacı, gürültü etkilerinin elimine edilmesi ve bu sayede tespit edilebilen tutarlı nokta sayısının maksimum düzeye çıkarılmasıdır (Zeni vd., 2011). SBAS, PSInSAR tekniğine göre daha az hassastır ancak özellikle açık ve kentsel alanlarda iyi sonuçlar verebilmektedir (Orhan, 2018).

Çok zamanlı InSAR teknikleri, yeryüzünde meydana gelen çeşitli yüzey deformasyonlarını mm ölçeğinde tespit edilebiliyor olsa da bu tekniklerin ana dezavantajı GNSS'ten daha düşük bir mutlak doğruluğa sahip olmasıdır (Palano vd., 2008). Bu nedenle bu iki uzaysal teknik (InSAR ve GNSS) son yıllarda volkanların izlenmesi ve bu alanlarda meydana gelen yüzey deformasyonlarının tespit edilmesinde Dünya çapında birçok volkanik alanda birlikte kullanılmaktadır (Aly ve Cochran, 2011; Gatsios vd., 2020; Lei vd., 2021; Liu vd., 2023; Morales Rivera vd., 2017; Wang vd., 2018).

Volkanik tehdit açısından 95 ülke arasında 14. sırada yer alan Türkiye, son 10.000 yıl içerisinde faaliyeti bulunan 7 volkanik sisteme (Kula Volkanik Kompleksi, Hasan Dağı, Erciyes Dağı, Karacadağ, Nemrut Volkanı, Tendürek Volkanı ve Ağrı Dağı) sahiptir (Brown vd., 2015; URL-1). Türkiye'deki bu volkanik sistemler Global Volkanizma Programına göre son 10.000 yılda 38 volkanik patlamaya neden olmuş ve MS 1100 ile 1900 yılları arasında ise her yüzyılda en az bir volkanik patlama meydana getirmiştir; Nemrut Volkanı 1111, 1441 ve 1692, Ağrı Dağı 1450, 1783 ve 1840 (URL-1). Türkiye'de meydana gelen son volkanik patlamanın kaydı ise 1855 yılında Tendürek volkanındaki volkanik aktivitenin (gaz ve kül çıkışı) Osmanlı-Rus savaşı sırasında mevzide bulunan askerler tarafından kayıt altına alınmasıdır (Karakhanian vd., 2002). Bu tarihten itibaren yaklaşık 170 yıldır herhangi bir volkanik patlama

meydana gelmemiş olsa da uzun süredir durgunluk döneminde olan volkanlar, yüzlerce yıl sonra bile faaliyetlerine devam edebilmekte ve çevresinde yaşayan toplumlar için tehdit oluşturabilmektedir (Fagradalsfjall volkanının 6000 yıl ve Eyjafjallajokull volkanının 200 yıl sonra patlaması) (Barsotti vd., 2023). Bu kapsamda durgunluk dönemlerinde olsa bile volkanik alanların izlenmesi ve bu alanlarda meydana gelen yüzey deformasyonlarının tespit edilmesi toplumların volkanik tehlikelere maruziyeti açısından oldukça önemli bir konudur. Ancak Türkiye’de volkanların neden olduğu yüzey deformasyonlarının izlendiği çalışmalar oldukça sınırlı kalmaktadır (Bathke vd., 2013; Bathke vd., 2015; Biggs vd., 2021; Doğru vd., 2023; Gündüz vd., 2023; Tolluoğlu, 2006).

Bu amaçla, bu tez çalışması kapsamında literatürdeki öncül çalışmalar ve Türkiye’deki volkanik sistemlerde meydana gelen yüzey deformasyonlarının güncel durumunun tespit edilmesi ihtiyacından yola çıkılarak öncelikle pilot bölge olarak seçilen ve Aksaray ile Niğde illeri için doğrudan bir tehdit oluşturan Hasan Dağı’na ait yüzey deformasyonlarının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda son yıllarda volkanların neden olduğu yüzey deformasyonlarının tespit edilmesinde oldukça yaygın bir kullanıma sahip olan PSInSAR ve SBAS teknikleri kullanılarak bölgedeki güncel yüzey deformasyonları tespit edilmiştir. Buna ek olarak Hasan Dağı ve yakın çevresine 121Y401 no’lu Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) projesi kapsamında tesis edilen 3 adet sürekli gözlem yapan GNSS istasyonu ile Türkiye’de ilk defa volkanik alanların izlenmesi amacına yönelik jeodezik bir ağ kurulmuş ve elde edilen sonuçlar PSInSAR ve SBAS tekniğinden elde edilen bulgularla karşılaştırılmıştır. Ayrıca PSInSAR tekniğinden elde edilen sonuçlardaki atmosferik etkileşimlerden kaynaklanan hataları en aza indirmek veya ortadan kaldırmak amacıyla GACOS (Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR) atmosferik düzeltme yöntemi uygulanmıştır. Buna ek olarak Global Volkanizma Programına göre faaliyetlerine devam eden diğer 6 volkanik sistemin (Kula Volkanik Kompleksi, Erciyes Dağı, Karacadağ, Nemrut Volkanı, Tendürek Volkanı ve Ağrı Dağı) güncel yüzey deformasyonları PSInSAR-GACOS tekniği kullanılarak tespit edilmiş ve elde edilen sonuçlar ilerleyen bölümlerde sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Son 20 yılda yeryüzünün farklı bölgelerinde (Filipinler, Endonezya, Japonya, İspanya, ABD ve İzlanda vb.) meydana gelen volkanik patlamalar birçok can kaybına, yaralanmaya ve ekonomik kayıplara sebep olmuştur. Volkanik patlamalar, özellikle volkanların yakın çevresinde yaşayan toplumlar üzerinde olumsuz sosyo-ekonomik etkilere neden olduğu için Dünya çapında farklı disiplinlerden birçok araştırmacı volkanik alanlarda meydana gelen yüzey deformasyonlarını tespit etmek amacıyla farklı tekniklerle çalışmalar yürütmektedir. Özellikle 1990'lı yıllardan sonra SAR teknolojisinde meydana gelişmeler ve artan toplum bilinci sayesinde volkanik alanlarda meydana gelen değişimlerin izlenmesi konusunda yapılan çalışmaların giderek yaygınlaştığı görülmektedir. Uluslararası ve ulusal literatürde volkanik alanlarda meydana gelen yüzey deformasyonlarının izlenmesine yönelik gerçekleştirilen çalışmalar geçmişten günümüze sıralanarak aşağıda özetlenmiştir.

SAR görüntüleri kullanılarak volkanik alanlarda meydana gelen yüzey deformasyonlarının tespit edildiği ilk çalışma Massonnet vd. (1995) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, uydu radar interferometrisinin volkanik aktiviteler nedeniyle oluşan yüzey deformasyonlarının tespitinde önemli bir araç olduğunu göstermiştir.

Lu vd. (1998) Okmok volkanının 1997 yılındaki patlamasını analiz etmek ve modellemek amacıyla ERS-1/2 uydu görüntülerinden elde edilen interferogramları kullanılmıştır. Çalışmada Okmok kalderasının 5 km altında yer aldığı düşünülen magma odasındaki basınç artışının 1992-1995 yılları arasında 23 cm'lik bir yükselmeye ve 1995-1997 yılları arasında ise magmanın geri çekilmesinden kaynaklanan 140 cm'lik bir çökmeye neden olduğu tespit edilmiştir.

Lu vd. (2000) Westdahl volkanında 1992 ile 1998 yılları arasında meydana gelen yüzey deformasyonlarını tespit edebilmek için çift geçişli DInSAR tekniğini kullanmıştır. Yapılan çalışmada interferometrik tutarlılığı azaltan olan kar ve buz örtüsünden kaçınmak için yalnızca yaz sonu veya sonbahar başında çekilen ERS-1/2 uydu görüntüleri kullanılmış ve bu süre boyunca yaklaşık 17 cm'lik bir yükselme tespit edilmiştir.

Hooper vd. (2004) volkanik alanlarda meydana gelen yüzey deformasyonlarının tespit edilebilmesi için düşük genlikli doğal hedeflere uygulanabilen ve deformasyonun zaman içerisinde nasıl geliştiğine dair model gerektirmeyen yeni bir PSInSAR yöntemi geliştirmiştir. Çalışmada, geliştirilen PSInSAR yönteminin volkanik aktivite nedeniyle oluşan yüzey deformasyonlarını tespit etmesindeki etkinliği gösterilmiştir.

Tolluoğlu (2006) Türkiye’de volkanların neden olduğu yüzey deformasyonlarının SAR görüntüleri kullanılarak tespit edildiği ilk çalışma olma özelliği taşımaktadır. Yapılan çalışmada Tendürek Dağı’nda meydana gelen yüzey deformasyonlarını tespit edebilmek amacıyla ERS uydu görüntüleri ve tek ve çift geçişli interferometrik teknikler kullanmıştır. Çalışma sonucunda 1993-2000 yılları arasında Tendürek Dağı’nın zirvesinde kümülatif olarak 10-20 cm (~1.5 cm/yıl) çökme bildirilmiştir.

Hooper vd. (2004) tarafından önerilen PSInSAR yöntemi, Hooper vd. (2007) tarafından geliştirilmiş ve StaMPS adlı yeni bir teknik sunulmuştur. İlk olarak Galápagos takımadalarındaki Alcedo volkanında meydana gelen yüzey deformasyonlarının tespit edilmesinde kullanılan StaMPS tekniğinin, yoğun bitki örtüsü olan doğal alanlarda başarıyla kullanılabilen bir araç olduğu bildirilmiştir.

Lu vd. (2010) çok zamanlı InSAR görüntülerini (Envisat, ERS-2 ve Radarsat-1) kullanarak 1997 yılında faaliyete geçen Okmok volkanında kalderanın 3,5 km altında yer alan magma odasının neden olduğu yüzey deformasyonlarını tespit etmiş ve çalışma sonucunda InSAR’ın volkanik alanlarda meydana gelen yüzey deformasyonlarının uzun süreli izlenmesinde değerli bir araç olduğu rapor edilmiştir.

Bathke vd. (2013) 2003-2020 yılları arasında yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen 41 Envisat görüntüsünü kullanarak Tendürek Dağı’nda meydana gelen yüzey deformasyonlarını tespit etmeyi amaçlamışlardır. SBAS tekniğinin kullanıldığı çalışmada, volkanın zirvesinin 4,5 km altında bulunan eşiğin daralmasının sonucu olarak 11 mm/yıl’lık bir çökme rapor edilmiştir.

Lubis (2014) Kelud volkanında 2007 yılında meydana gelen aktivitenin neden olduğu yüzey deformasyonları DInSAR tekniği ve ALOS PALSAR uydu görüntüleri kullanarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda uydu bakış doğrultusunda (Line of Sight-LOS) 11 cm’lik bir yükselme hareketi tespit edilmiş ve aktivitenin 1-2 ay önce magma

odasında meydana gelen basınç değışikliğı nedeniyle başladığı bildirilmiştir. Ayrıca yapılan çalışma sonucunda volkanik alanların uzun süreli izlenmesinin volkanların neden olduğu tehlikeleri azaltmadaki önemi vurgulamıştır.

Rémy vd. (2015) Güney And Dağları'ndaki Llaima volkanındaki yüzey deformasyonlarını araştırmak için Envisat ve PALSAR uydu görüntülerinden ve InSAR tekniğinden yararlanmıştır. Bölgede daha önce yapılan çalışmalarda magma odasının neden olduğu düşünülen yüzey deformasyonlarının, MERIS ve MODIS atmosferik ürünlerinin işlenmesi sonucunda tespit edilmediğini veya ortadan kalktığını ve troposferik faz gecikmesinin InSAR'dan elde edilen sonuçların yanlış yorumlanmasına yol açabileceğı rapor edilmiştir.

Morales Rivera vd. (2017) Cotopaxi volkanının 2015 yılındaki faaliyetinin neden olduğu yüzey deformasyonlarını InSAR tekniğini kullanarak tespit etmeye çalışılmışlardır. Bu kapsamda 2014-2016 yıllarını kapsayan COSMO-SkyMed (CONstellation of small Satellites for Mediterranean basin-CSK) uydu verileri kullanmış ve InSAR'dan elde edilen sonuçlar GPS verileriyle karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda GNSS ve InSAR tekniklerinden benzer sonuçlar elde edilmiş olup kısa süreli ve küçük genlikli deformasyon sinyallerini izlemek için kısa tekrar ziyaret periyoduna sahip uydu sistemlerinin volkanik alanlarda kullanılmasının avantajları rapor edilmiştir.

Wang vd. (2018) aktif bir volkan olan Akutan'da 2003-2016 yılları arasında meydana gelen yüzey deformasyonlarını InSAR tekniğini kullanarak incelemiştir. Envisat (C-band) ve TerraSAR-X (X-band) görüntülerinin kullanıldığı çalışmada volkanın kuzeydoğu kanadında sürekli olarak yükselen bir alan tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda InSAR verilerinin magma sistemlerinin neden olduğu yüzey deformasyonlarının mekânsal ve zamansal ilişkilerinin incelenmesindeki önemi belirtilmiştir.

Biggs vd. (2021) Türkiye'de volkanların neden olduğu yüzey deformasyonlarının InSAR tekniğı ile tespit edilmesi konusunda en kapsamlı çalışma olma özelliğı taşımaktadır. Türkiye'deki 10 volkanik sistemde meydana gelen yüzey deformasyonlarının belirlenmesi amacıyla, 2015-2020 yılları arasında yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen 5000 Sentinel-1 SAR görüntüsü kullanılmıştır.

Volkanik alanların çok zamanlı InSAR teknikleri ile izlenmesinde karşılaşılan interferometrik tutarlılığı azaltan mevsimsel kar örtüsü ve deformasyonun yanlış yorumlanmasına neden olan atmosferik problemler üzerinde durulan çalışma sonucunda Türkiye’deki volkanik sistemlerde cm düzeyinde bir yüzey deformasyonun olmadığı bildirilmiştir.

Harvey (2021) yapmış olduğu çalışmada, 9 Aralık 2019 tarihinde patlayarak 21 ölüm ve 26 yaralanmaya neden olan Whakaari/White Island volkanının faaliyetinden 15 ay önce krater tabanının yükselmeye ve patlamadan 2 hafta önce ise kubbenin çökmeye başladığını tespit etmiştir. TerraSAR-X görüntülerinin ve PSInSAR tekniğinin kullanıldığı çalışma sonucunda volkanik alanların InSAR ile izlenmesindeki önemi rapor etmiştir.

Doğru vd. (2023) İç Anadolu ve Doğu Anadolu’daki 5 volkanik sistemde (Acıgöl-Nevşehir Kalderası, Göllü Dağı, Hasan Dağı, Tendürek Dağı ve Ağrı Dağı) meydana gelen yüzey deformasyonlarını Sentinel-1 SAR görüntülerini ve LİCSAR sistemini kullanarak tespit etmeyi amaçlamıştır. GACOS ve Faz-Yükseklik atmosferik düzeltme yöntemlerinin kullanıldığı çalışmada sonuç olarak ilgi alanlarında volkanların neden olduğu bir yüzey deformasyonu tespit edilmemiştir.

Gündüz vd. (2023) Tendürek Dağı’nda 2018-2022 yılları arasında meydana gelen yüzey deformasyonlarının tespit edebilmek için Sentinel-1 uydu görüntülerini ve PSInSAR tekniğini kullanmıştır. GACOS ve Faz-Yükseklik atmosferik düzeltme yöntemlerinin kullanıldığı çalışmada Bathke vd. (2013) ve Tolluoğlu (2006) tarafından yapılan çalışmalarla benzer sonuçlar elde edilmiş ve Tendürek Dağı’nda yıllık yaklaşık olarak 10 mm/yıl’lık bir yüzey deformasyonu tespit edilmiştir.

3. MATERİYAL VE METOD

3.1 Radar Teknolojisi ve Temel Prensipleri

Uzaktan algılama sistemleri, kullanılan elektromanyetik enerjinin kaynağına göre aktif ve pasif uzaktan algılama sistemleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Pasif uzaktan algılama sistemleri, Dünya yüzeyinden yansıyan veya yayılan elektromanyetik enerjiyi kaydeder yani bu sistemler güneş başta olmak üzere harici bir enerji kaynağına bağımlıdır. Bu nedenle bu sistemler güneş ışığı veya bağımlı oldukları enerji kaynağı olmaksızın görüntü elde edemezler. Aktif uzaktan algılama sistemlerinin ise kendi enerji kaynakları vardır ve bu sayede çoğunlukla hava koşullarından etkilenmeden görüntü elde edebilmektedirler (Abdikan, 2007; Lillesand vd., 2004).

Elektromanyetik spektrumun mikrodalga bölgesinde çalışan Radio Detection And Ranging (Radar) teknolojisinin temel prensibi, milimetreden metreye kadar değişebilen dalga boylarındaki elektromanyetik enerjinin, platform üzerinde bulunan anten vasıtasıyla hedefe gönderilmesi ve hedeften yansıyan bu enerjinin yine platform üzerinde bulunan alıcı vasıtasıyla hassas bir şekilde ölçülmesi ve kaydedilmesi esasına dayanmaktadır (Hanssen, 2001; Li, 2007). Aktif bir sistem olan Radar, güneş ışığından bağımsız olarak gece, gündüz ve olumsuz hava koşullarında (sisli, bulutlu vb.) operasyonel olarak bilgi toplayabilme yeteneğine sahiptir (Kourkouli, 2015).

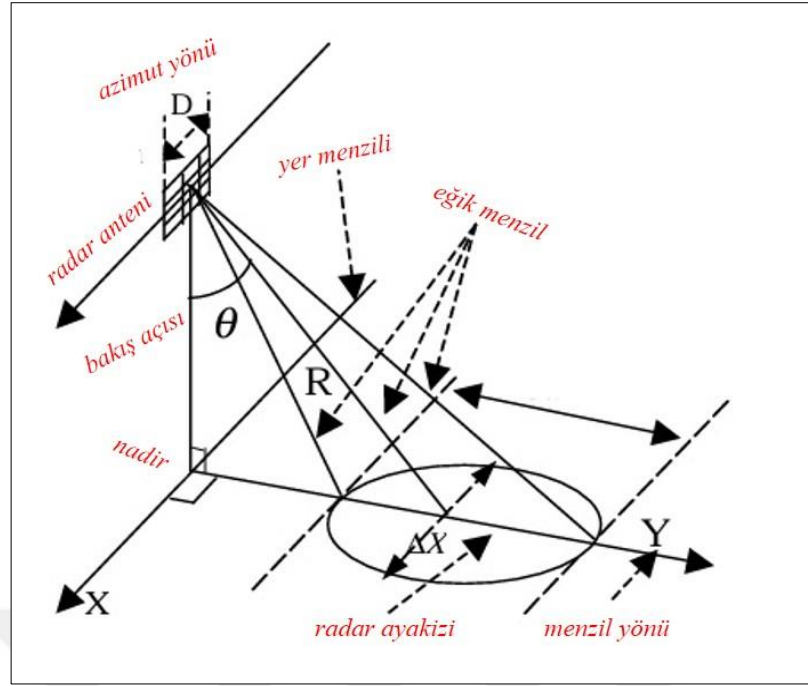
İlk olarak Maxwell (1881) “A Treatise on Electricity and Magnetism” ve Hertz’in 1886’da yapmış olduğu deneyler ile ortaya çıkan radar teknolojisi, daha sonra Christian Hulsmeyer tarafından 1900’lü yılların başında gemilerin izlenmesi ve çarpışmaların önlenmesi amacıyla görüntüleme amaçlı kullanılmaya başlanmıştır (Akoğlu, 2001; Hulsmeyer, 1904; Torun, 2021). İkinci Dünya Savaşı’nda radar teknolojisinin askeri amaçlı kullanımındaki avantajlarının fark edilmesiyle birlikte radar teknolojilerinin gelişimi ve kullanımı hızla artmıştır (Hanssen, 2001). İkinci Dünya Savaşı’ndan hemen sonra (1950’li yıllarda) hedef alanı taramak için radar antenini döndürmek yerine radar antenleri uçak gövdelerine sabitlenmiş ve bu durum geniş alanların hızlı ve yüksek çözünürlüklü bir şekilde görüntülenebilmesine imkân sağlamıştır (Akoğlu, 2001). 1960’lı yıllara kadar askeri amaçlı kullanılan radar sistemleri, daha sonra sivil ve bilimsel amaçlar için de kullanılmaya başlanmıştır. Arecibo ve Goldstone 1961-1963 yıllarında radyo antenleri vasıtasıyla hedeflere radar

sinyalleri göndererek hedef hakkında bilgi etmeye çalışmışlardır (Hanssen, 2001). Roger ve Ingalls (1969) ilk defa radar interferometrisini Venüs ve Ay'ın yüzeyini gözlemlemek amacıyla kullanmış, Graham (1974) yeryüzünün topoğrafik haritasını elde etmek amacıyla geleneksel sentetik açıklıklı radar interferometrisine ikinci bir anten ekleyerek üçüncü boyut bilgisini elde etmiştir. İlk InSAR sistemi sonuçları, Zebker ve Goldstein (1986) tarafından havadan yana bakan bir radar sistemi kullanılarak elde edilmiştir. Gabriel vd. (1989) ise yeryüzünde meydana gelen değişimlerin/hareketlerin tespit edilmesine yönelik ilk çalışmayı gerçekleştirmişlerdir. Sürekli gelişen radar sistemleri, birçok disiplinde ve bilimsel çalışmada aktif olarak kullanılmış ve günümüzde de halen kullanılmaktadır.

Görüntüleme amaçlı kullanılan radar sistemleri anten açıklıklarına göre Gerçek Açıklıklı Radar (Real Aperture Radar-RAR) ve Yapay Açıklıklı Radar (Synthetic Aperture Radar-SAR) olmak üzere iki başlığa ayrılmaktadır.

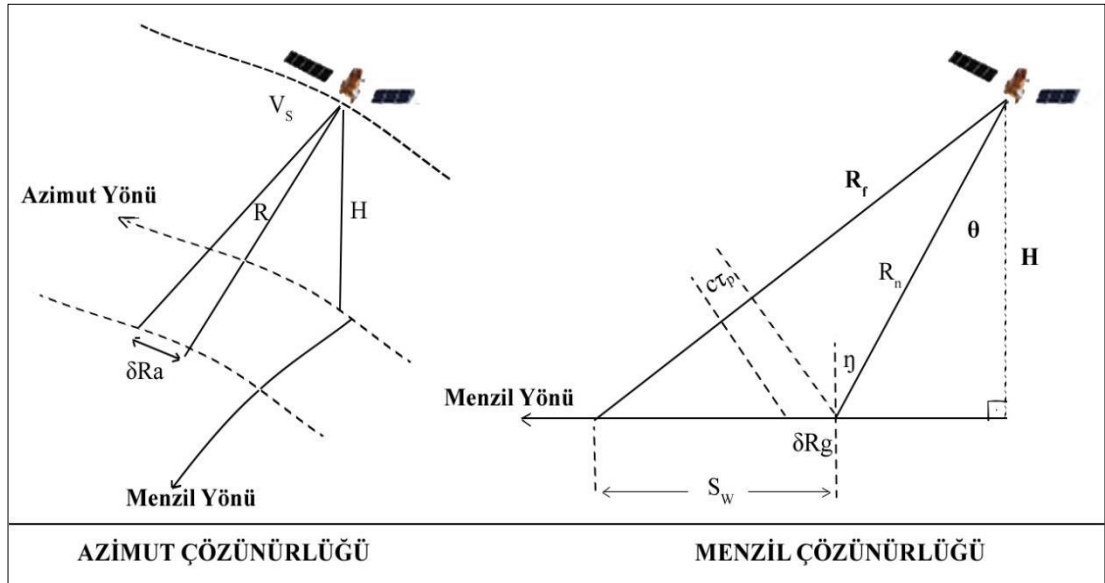
3.2 Gerçek Açıklıklı Radar (Real Aperture Radar-RAR)

Sabit bir anten uzunluğuna sahip olan RAR sistemleri, Yan Bakışlı Radar (Side Looking Radar-SLR) olarak da adlandırılmaktadır (Brawner, 2016). Uçak ya da uydu gibi bir platform üzerinde bulunan RAR sistemleri, platformun takip ettiği yöne dik olacak şekilde (azimut yönü) yandan bakış açısıyla (θ) yere sürekli radar sinyalleri göndermektedir (Abdikan, 2007). Bu sinyallerin aydınlattığı alan, radar ayak izini oluşturur ve bu ayak izi içerisindeki her bir yer hücresinden geri yansıyan sinyaller ise görüntü düzleminde pikselleri oluşturur (Chen vd., 2000). Şekil 3.1'de radar görüntüleme geometrisini tasvir eden görsel sunulmuştur.



Şekil 3.1. Radar görüntüleme geometrisi (Chen vd., 2000'den Türkçeleştirilerek).

RAR sistemleri, azimut (azimuth) ve menzil (range) olmak üzere iki farklı çözünürlük kavramına sahiptir. Radar algılayıcısının görüş hattı (LOS) doğrultusunda bulunan hedefi ayırt edebilme yeteneği azimut çözünürlüğü olarak ifade edilirken, algılayıcının uçuş doğrultusuna paralel olan hedefi ayırt edebilme yeteneği ise menzil çözünürlüğü olarak ifade edilmektedir (Orhan, 2018). Şekil 3.2'de azimut ve menzil çözünürlüğünü tasvir eden görsel verilmiştir.



Şekil 3.2. Azimut ve menzil çözünürlüğü geometrisi (Bilgilioğlu, 2022).

Menzil çözünürlüğü denklem 3.1 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\delta R_g = \frac{c\tau_p}{2\sin(\eta)} \quad (3.1)$$

Burada; δR_g menzil çözünürlüğünü, c ışık hızını, τ_p odaklanmış sinyal süresini, η geliş açısını temsil etmektedir (Dallemand vd., 1993). Azimut çözünürlüğü ise denklem 3.2 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\delta R_a = \frac{R\lambda}{L} \quad (3.2)$$

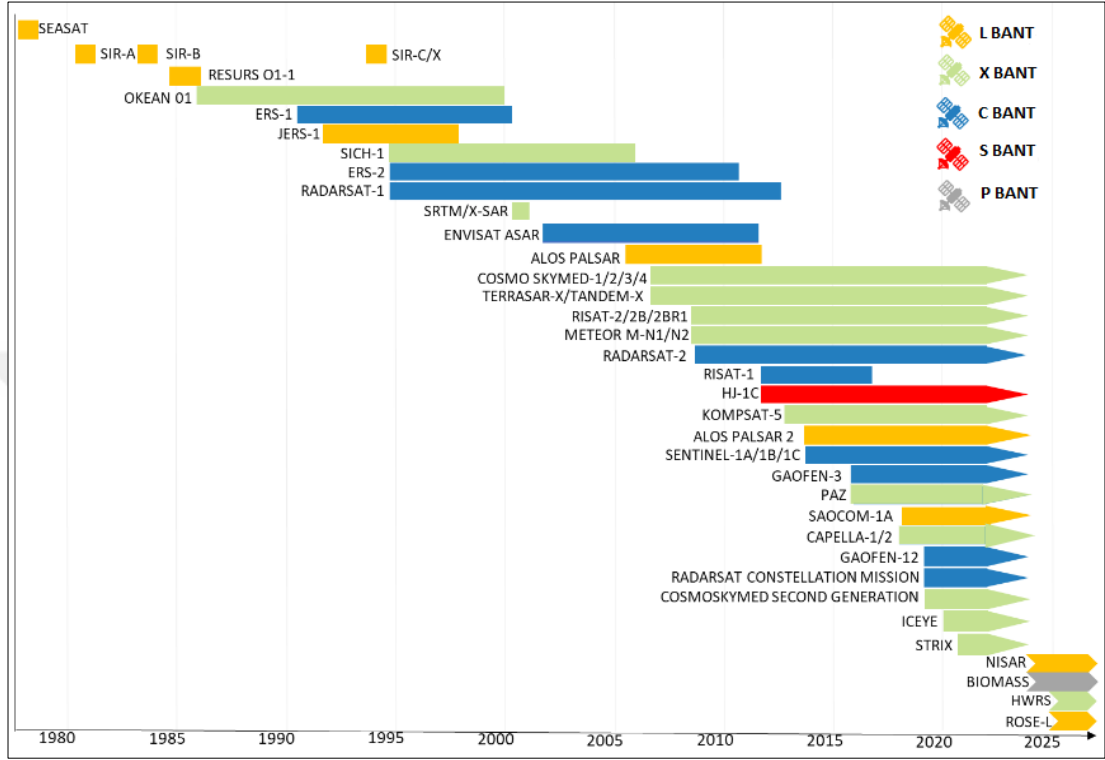
Burada; δR_a azimut çözünürlüğünü, R menzil mesafesini, L anten uzunluğunu, λ ise dalga boyunu temsil etmektedir (Bilgilioğlu, 2022).

RAR sistemlerinde azimut çözünürlüğünü artırmak için kısa dalga boylu enerjiye ve uzun anten boyuna gereksinim duyulmakta yani bu sistemler denklem 3.2'den anlaşılacağı üzere anten boyu ile doğru orantılı olacak şekilde sınırlı bir azimut çözünürlüğüne sahiptir (Abdikan, 2007). Ancak kısa dalga boyunun kullanılması, sinyalin bulut ve atmosfer tarafından zayıflamasına yol açmakta ve bu durum da radar sistemlerinin her türlü hava koşulunda çalışabilme yeteneğini ortadan kaldırmaktadır (Dallemand vd., 1993). Anten boyutu ise fiziksel kısıtlamalar nedeniyle belirli bir sınır dâhilinde uzatılabileceği için söz konusu bu iki durum istenilen çözünürlükte veri üretilmemesine neden olmaktadır. Bu nedenle bu sınırlamaların üstesinden gelmek için SAR sistemleri geliştirilmiştir (Bilgilioğlu, 2022).

3.3 Yapay Açıklıklı Radar (Synthetic Aperture Radar -SAR)

Carl Wiley'in 1951 yılındaki yol boyunca farklı açılarda bulunan iki hedefin radar platformuna göre herhangi bir anda farklı hızlara sahip olacağı yönündeki gözlemi SAR fikrinin oluşmasına yol açmıştır (Lyons, 2002; Wiley, 1954). 1960'lı ve 1970'li yıllara kadar çoğunlukla havadan yapılan SAR çalışmaları, Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (National Aeronautics and Space Administration-NASA) tarafından 1978 yılında SEASAT uydusunun uzaya fırlatılması ile artık uzaydan yapılarak bu alanda yeni bir döneme geçilmiştir. Daha sonra 1990'lı yıllarda, Avrupa uzaktan algılama uyduları ERS-1/2, Japon JERS-1 ve Kanada Radarsat-1'in yörüngelerine oturtulması ile birlikte pek çok SAR görüntüsü elde edilmiş ve bu sayede SAR'ın uygulama

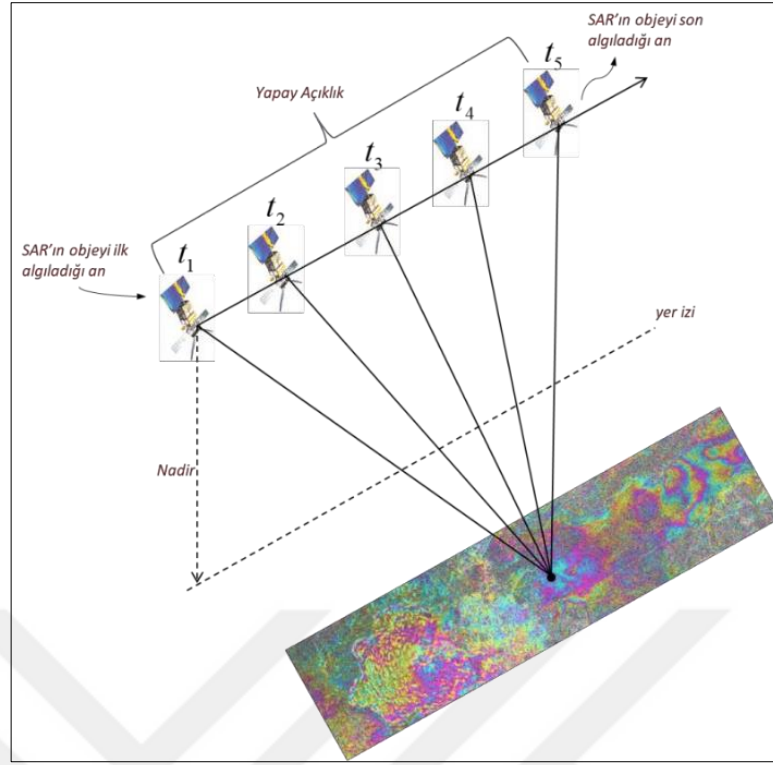
alanları genişlemiştir (Kourkouli, 2015). Şekil 3.3'te SAR uyduları ve çalışma periyotları verilmiş olup günümüzde volkanlar, depremler, buzullar, heyelanlar, levha hareketleri, arazi kullanım alanlarının belirlenmesi gibi birçok alanda SAR görüntüleri sıklıkla kullanılmaktadır.



Şekil 3.3. SAR uyduları ve çalışma periyotları (URL-2).

RAR sistemlerindeki azimut çözünürlüğünün anten boyuna bağlı olduğu ve çözünürlüğün artırılabilmesi için anten boyunun uzatılması gerektiği önceki bölümde ifade edilmiştir. 785 km yükseklikte ve C bantta çalışan ERS-1/2 gibi tipik bir radar sisteminden 25 km yer çözünürlüğü sağlayabilmek için yaklaşık 2 km uzunluğunda bir uydu antenine gereksinim duyulmaktadır (Lyons, 2002). Pratikte mümkün olmayan bu durumun üstesinden gelmek için geliştirilen SAR sistemleri, hedefe olan eğik menzilden bağımsız olarak iyi bir azimut çözünürlüğü elde edebilmek için küçük antenler ve nispeten uzun dalga boyları kullanmaktadır (Dallemand vd., 1993).

SAR sistemlerinin temel çalışma prensibi, ses frekansı, ses kaynağı ve ses algılayıcısının birbirine göre göreceli hareket etmeleri durumunda meydana gelen Doppler frekans değişimine dayanmaktadır (Kemaldere, 2011). Şekil 3.4 SAR sistemlerinin görüntüleme geometrisini tasvir etmektedir.



Şekil 3.4. SAR görüntüleme geometrisi (Orhan, 2018).

Şekil 3.4'teki SAR görüntüleme geometrisinde gösterildiği gibi azimut yönünde hareket eden bir SAR platformu, t_1 - t_5 zaman aralığında uçuş doğrultusundaki hareketine devam ederek bu süre içerisinde aldığı mesafe ile yapay bir açıklık oluşturmaktadır. Bu sayede SAR sistemi, hedefi ilk gördüğü t_1 anından son gördüğü t_5 anına kadar hedef nesneye sinyal göndermekte ve hedeften yansıyan bu sinyalleri geri almaktadır. Böylece Doppler prensibi yardımıyla t_1 'den t_5 'e kadar geçen zaman aralığında radar platformunda gerçek bir anten kullanılmış gibi bir etki yaratılır (Abdikan, 2007; Gürmen, 2003). SAR sisteminin bu çalışma prensibi, uzun antenlere gereksinim duyulmadan yüksek çözünürlüklü görüntülerin elde edilmesine olanak sağlamaktadır. SAR sistemlerinden elde edilen azimut ve mesafe çözünürlükleri sırasıyla denklem 3.3 ve 3.4 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\delta R_a = \frac{L}{2} \quad (3.3)$$

$$\delta R_R = \frac{c}{2B_{BW}} \quad (3.4)$$

Burada, L radar anteninin azimut doğrultusundaki uzunluğunu, c ışık hızını, B_{BW} ise radar sinyalinin bant genişliğini temsil etmektedir (Lyons, 2002). Denklem 3.3'ten

anlaşılacağı üzere antenin azimut doğrultusundaki boyu küçüldükçe azimut çözünürlüğü artacaktır. Denklem 3.4 ise mesafe çözünürlüğünün, algılama yapılan platform yüksekliğinden bağımsız olduğunu ve bant genişliğinin artırılmasıyla doğru orantılı olduğunu göstermektedir (Yılmaztürk, 2015).

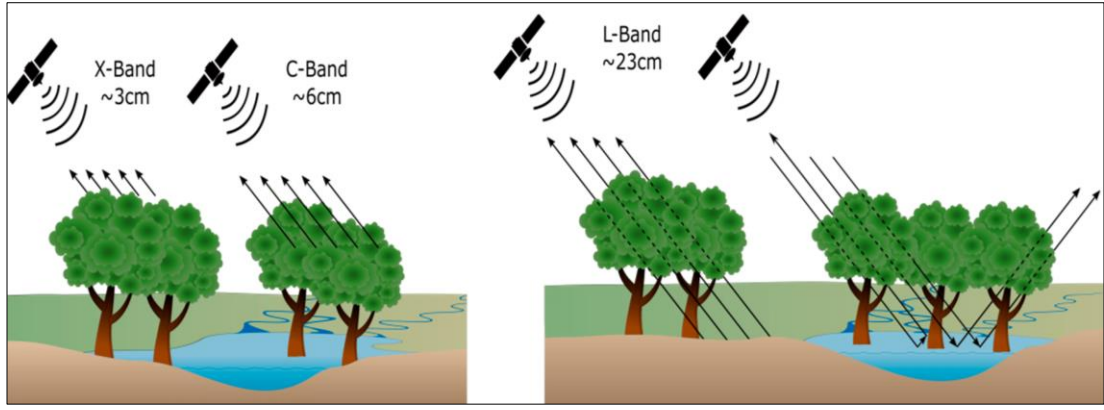
3.3.1 SAR görüntülerinin özellikleri

SAR görüntüleri, hedefe gönderilen ve hedeften yansıyan radar sinyallerinin faz ve genlik bilgilerinin kaydedilmesiyle elde edilmektedir. Faz bilgisi, hedefe olan uzaklığın bir fonksiyonu olup interferometri için gereklidir. Görüntüdeki her bir pikselin genliği ise radar tarafından tespit edilen geri saçılım miktarının bir temsilidir (Orhan, 2018).

SAR görüntüleri gri renk tonları ile gösterilmekte ve bu renk tonları, görüntüdeki farklı yüzey özelliklerini ve geri saçılım bilgilerini temsil etmektedir. Düz ve sulak alanlar (nemli) tam yansımaya neden olacağı için düşük geri saçılımı temsil eden koyu tonlarda görünürken, dağlık ve ormanlık alanlar ise dağınık yansımaya neden olacağı için genel olarak açık tonlarda gösterilmektedir (Lyons, 2002). SAR görüntülerinin özellikleri kullanılan polarizasyon, sinyal gücü, geliş açısı ve dalga boyu gibi sistem parametreleri ile algılanan hedefin nem muhtevası, dielektrik katsayısı ve yüzey pürüzlülüğü gibi etmenlere bağlıdır (Kemaldere, 2011).

3.3.1.1 Dalga boyu

SAR sisteminden yüzeye gönderilen sinyallerin dalga boyu, sinyalin hedef nesne ile nasıl bir etkileşime gireceğini ve bir ortama ne kadar nüfuz (penetrasyon) edebileceğini belirlemektedir. Genel olarak uzun dalga boyları toprak altına ve bitki örtüsüne nüfuz edebilme yeteneğine sahipken, kısa dalga boyları ise daha yüksek bir çözünürlük ve daha düşük bir penetrasyon kabiliyetine sahiptir (Fydrych, 2021). Bu durum dalga boyu ve penetrasyon yeteneği arasındaki doğru orantıyı göstermektedir. Şekil 3.5'te farklı dalga boylarındaki bantların hedef nesnelere nüfuz edebilme kabiliyeti arasındaki farkı tasvir eden görsel verilmiştir.



Şekil 3.5. Farklı dalga boylarındaki (X - C - L) bantların hedefe nüfuz etme kabiliyeti (Ottinger ve Kuenzer, 2020).

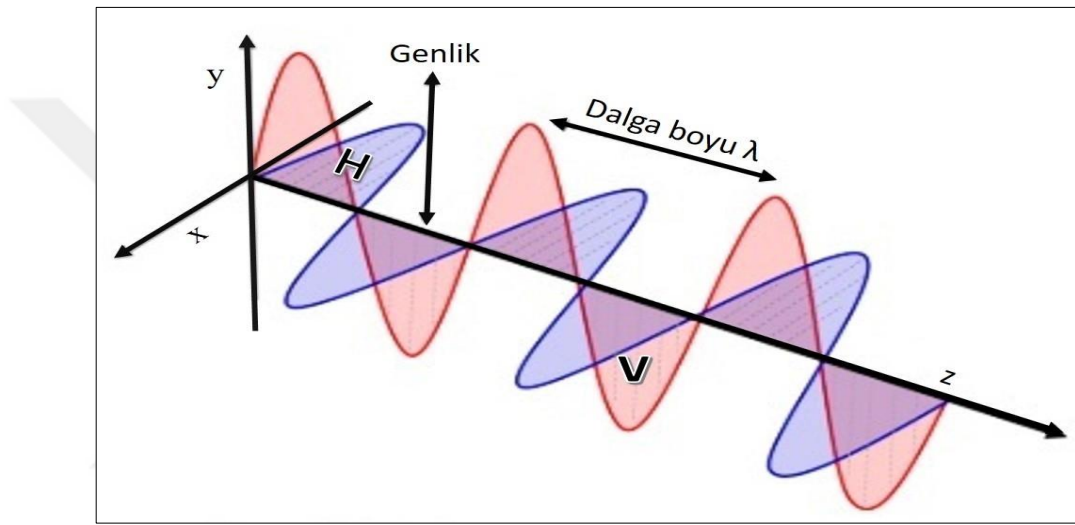
SAR sensörleri, santimetreden metre ölçeğine kadar değişen uzunlukta dalga boyları kullanarak bulut, bitki örtüsü ve toprak katmanlarına nüfuz edebile yeteneği sağlamaktadır. Bu spektral aralık, kullanılan dalga boyu ve frekansa göre İkinci Dünya Savaşı sırasında tanımlanan ve Çizelge 3.1’de verilen frekans bantlarına bölünmüştür. X bandı, yüksek frekansı ve kısa dalga boyu nedeniyle genellikle kentsel ve altyapı izleme amacıyla kullanılmaktayken, penetrasyon yeteneğinin zayıf olması nedeniyle bitki örtüsünün olduğu doğal alanlarda izleme yeteneği sınırlı kalmaktadır. X bandına göre daha düşük bir frekansa ve daha uzun bir dalga boyuna sahip olan L bandı, daha yüksek bir penetrasyon yeteneğine sahip olması sayesinde bitki örtüsü haritalama ve biyokütle çalışmalarında sıklıkla kullanılmaktadır. X ve L bantları arasında dalga boyuna sahip olan C bandı ise, X bandına göre daha yüksek penetrasyon yeteneği sunmakla birlikte, yoğun kanopilere nüfuz etme kapasitesinin düşük olması nedeniyle bitki örtüsü çalışmalarında uygulanabilirliği sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle C bandı genellikle deformasyon, tehlike izleme ve arazi kullanım değişikliği çalışmalarında tercih edilmektedir (Flores-Anderson vd., 2019; Fydrych, 2021).

Çizelge 3.1. Mikrodalga bantları (Flores-Anderson vd., 2019).

Bant	Frekans (GHz)	Dalga Boyu (cm)
P	0,3-1	100-30
L	1-2	30-15
S	2-4	15-7,5
C	4-8	7,5-3,8
X	8-12	3,8-2,4
Ku	12-18	2,4-1,7
K	18-27	1,7-1,1
Ka	27-40	1,1-0,8

3.3.1.2 Polarizasyon

Polarizasyon, elektromanyetik sinyalin salınım düzleminin yayılma yönüne dik bir düzlemdeki yönelimini ifade etmektedir. SAR sensörleri genellikle doğrusal olarak polarize olup, yatay ve/veya düşey olarak polarize edilmiş sinyalleri iletmekte ve almaktadır. Yatay polarizasyon, sinyali yatay bir düzlemle sınırlarken, düşey polarizasyon sinyali yataya dik bir düzlemle sınırlamaktadır (Fydrych, 2021). Şekil 3.6’da elektromanyetik dalganın yatay ve düşey polarizasyonlarını tasvir eden görsel verilmiştir.



Şekil 3.6. Elektromanyetik dalganın yatay (H) ve düşey (V) polarizasyonları (Braun, 2019’dan Türkçeleştirilerek).

Bir SAR sisteminde iletilen ve alınan sinyalin polarizasyonu, dört olası konfigürasyona yol açan düşey (Vertical-V) ve yatay (Horizontal-H) polarizasyonlarda iletilen ve alınan sinyallerle kontrol edilebilmektedir; VV, HH, VH ve HV. İlk iki konfigürasyona paralel veya benzer polarizasyon olarak adlandırılmakta olup bu konfigürasyonlarda iletilen ve alınan sinyallerin polarizasyonları eşleniktir. Son iki konfigürasyona ise çapraz polarizasyon adı verilmekte olup bu durum iletilen sinyal polarizasyonunun alınan sinyal polarizasyonuna dik olduğunu göstermektedir. Tek polarizasyon (single) konfigürasyonuna sahip SAR sistemleri genellikle benzer polarizedirler ancak çapraz polarize edilmiş tek polarizasyon sistemine sahip SAR sistemleri de mevcuttur. VV ve HH veya VV ve VH gibi iki konfigürasyon kombinasyonuna sahip sistemler ikili polarizasyon (dual) sistemi olarak bilinmekte ve dört konfigürasyonun tamamını içeren bir sistem ise tam polarimetrik veya karesel

polarimetrik (quad) sistem olarak adlandırılmaktadır (Fydrych, 2021). Çizelge 3.2’de SAR uydu sistemlerinde kullanılan polarizasyonlar verilmiştir.

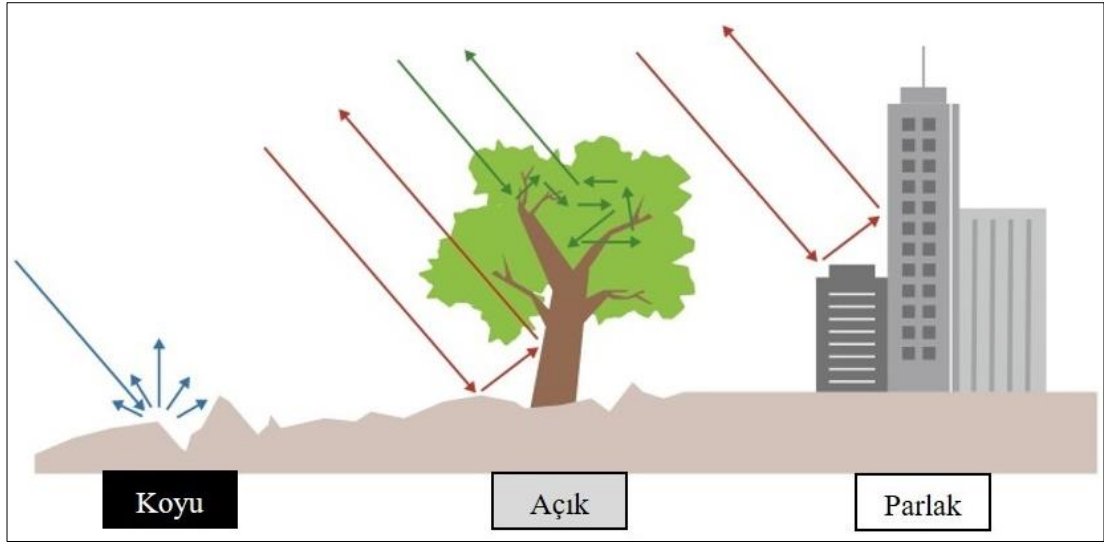
Çizelge 3.2. Bazı SAR sistemlerinin polarizasyonları (Bayık, 2018).

Uydu	λ (cm)	Band	Polarizasyon
ALOS PALSAR	23,6	L	Single
RADARSAT	5,6	C	Single, Dual, Quad
ERS-1/2	5,6	C	Single
Sentinel-1	5,6	C	Single, Dual
ENVISAT	5,6	C	Single
TerraSAR-X	3,1	X	Single, Dual, Quad

Elektromanyetik enerjinin polarizasyonu, gönderilen sinyalin yüzeyle nasıl etkileşime gireceğine ve kaydedilen radar görüntüsündeki hedefin parlaklığına etki etmektedir. Bu nedenle çalışma amacına uygun polarizasyona sahip SAR sistemlerinin tercih edilmesi oldukça önemlidir. VV polarizasyonu, yüzey saçılımına duyarlı olduğundan yüzey deformasyonların tespit edilmesi dâhil olmak üzere çeşitli çalışmalarda kullanılabilir. HH polarizasyonu, sinyalin toprağa nüfuz edebilme olasılığını artırdığı için arpa veya buğday gibi dikey yönde büyüyen mahsullerin altındaki toprak neminin tespit edildiği çalışmalarda kullanılmaktadır. Çapraz polarize sinyaller ise yüzey pürüzlülüğüne daha az duyarlı olduğundan bu konfigürasyonlar saçıcılar arasında ayırım yapmak için kullanışlıdır. Bu uygulamanın örnekleri arasında su üzerindeki gemi tespiti ve geniş yapraklı bitki örtüsünün tahıl bitkilerinden ayrılması yer almaktadır (Flores-Anderson vd., 2019; Fydrych, 2021; Touzi, 1999).

3.3.1.3 Yüzey pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü, elektromanyetik enerjinin yüzey veya hedefle girmiş olduğu etkileşimi (soğurma veya yansıma) kontrol etmekte ve radar görüntüsündeki gri tonların belirlenmesindeki baskın faktörlerden biridir. Pürüzsüz bir yüzey tam yansımaya neden olarak radar görüntülerinde koyu tonlarda görüntülenirken pürüzlü yüzeyler ise dağınık yansıma oluşturarak açık tonlarda görüntülenir (Braun, 2019). Şekil 3.7’de farklı yüzeylere gelen elektromanyetik enerjinin yansıtma özelliğini tasvir eden görsel verilmiştir.



Şekil 3.7. Farklı yüzeylerin yansıtma özellikleri (URL-3'ten değiştirilerek).

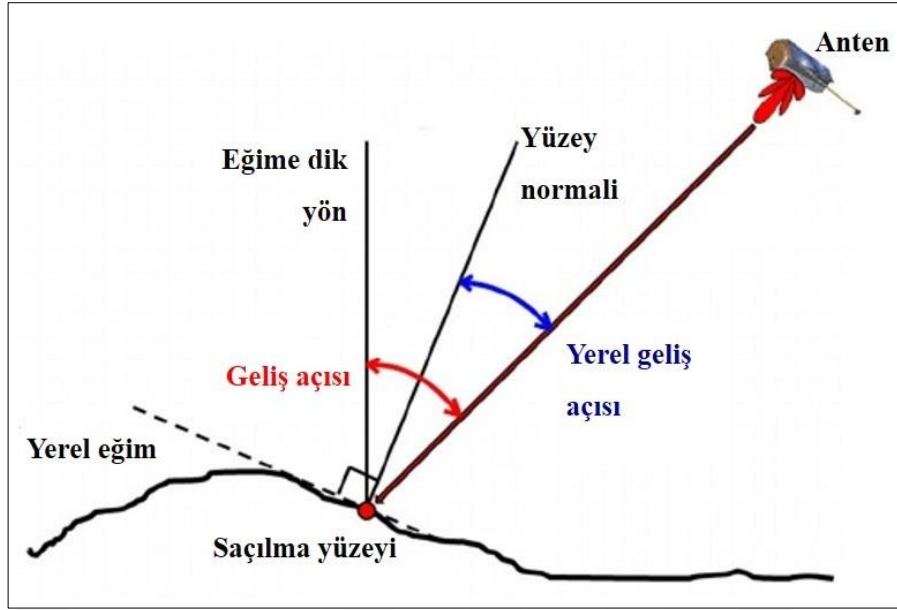
Pürüzlülük, geliş açısı ve dalga boyuna bağlı göreceli bir kavramdır. Yüzey yapısında meydana gelen yükseklik değişimleri, radar sisteminde kullanılan dalga boyuna bağlı olarak değerlendirilir; eğer bu değişimler dalga boyundan küçükse pürüzsüz yüzey olarak, büyükse pürüzlü yüzey olarak tanımlanır. Bu kapsamda bir dalga boyunda pürüzlü görünen yüzey daha uzun dalga boylu bir elektromanyetik enerjiyle aydınlatıldığında pürüzsüz görünebilir (Dallemand vd., 1993; Flores-Anderson vd., 2019; Kemaldere, 2011). Pürüzlü bir yüzeyin pürüzlülük ölççeği, Fraunhofer ölçütüne göre denklem 3.5 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$h_r > \frac{\lambda}{32\cos\theta_i} \quad (3.5)$$

Burada; h_r yükseklik büyüklüğünün standart sapması, θ_i elektromanyetik enerjinin geliş açısını ve λ dalga boyunu temsil etmektedir (Flores-Anderson vd., 2019).

3.3.1.4 Geliş açısı

Radar sinyalinin yüzey normali ile arasındaki açı yerel geliş açısı olarak tanımlanırken yüzey normali ile eğime dik yöndeki çizgi arasındaki açı ise geliş açısı olarak adlandırılmaktadır. Zeminde görüntülenen bölge pürüzsüz bir yüzey olduğunda geliş açısı ve yerel geliş açısı eşit olmaktadır. Şekil 3.8'de geliş açısı ve yerel geliş açısını tasvir eden görsel sunulmuştur (Fallahpour vd., 2018).



Şekil 3.8. Geliş açısı ve yerel geliş açısı (Fallahpour vd., 2018’den Türkçeleştirilerek).

Bir algılayıcı tarafından gönderilen sinyalin hedef yüzeye ulaştığı açı, SAR uydusunun yüksekliğine, geometrisine ve topoğrafyanın eğimine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Genel olarak daha büyük bir geliş açısı daha belirgin bir yandan görüşlü açıklık ve dolayısıyla daha fazla geometrik bozulma anlamına gelmektedir (Braun, 2019; Ismaya, 2010; Skolnik, 1980).

3.3.1.5 Nem muhtevası

Cisimlerin sahip olduğu nem muhtevası, radar sisteminden gönderilen elektromanyetik enerjinin yansıtma, soğurma ve saçılma davranışlarında değişikliklere yol açmaktadır. Elektromanyetik enerjinin SAR görüntülerindeki geri saçılma miktarı, hedef nesnenin barındırdığı nem miktarı ile orantılı olup nem miktarı fazla olan nesneler SAR görüntülerinde açık renk tonlarında, nem miktarı düşük olan nesneler ise koyu renk tonlarında görüntülenmektedir (Kemaldere, 2011). Ayrıca SAR görüntülerinde nemin geri saçılım üzerindeki etkisini ölçmek oldukça zordur ve bu durum SAR görüntülerinin görsel olarak yorumlanmasını zorlaştırmaktadır (Braun, 2019). Nem muhtevasının araştırıldığı çalışmalarda (Engman ve Chauhan, 1995; Wang ve Qu, 2009) daha detaylı bilgiye ulaşılabilir. Şekil 3.9’da nem içeriğinin sinyalin geri yansıması üzerindeki etkisi gösterilmektedir.

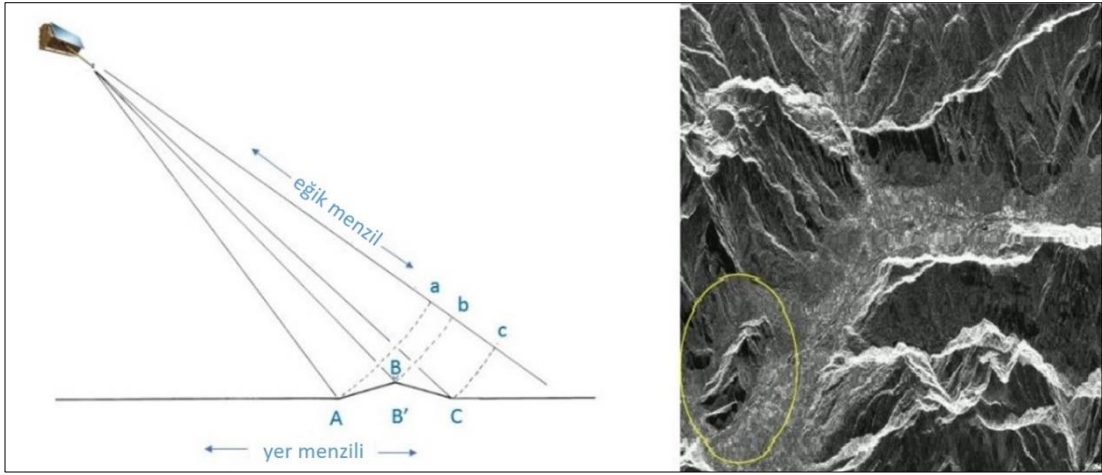


Şekil 3.9. Yüzeyin nem içeriğine göre geri yansıması (Kemaldere, 2011).

3.3.2 SAR görüntülerindeki geometrik hatalar

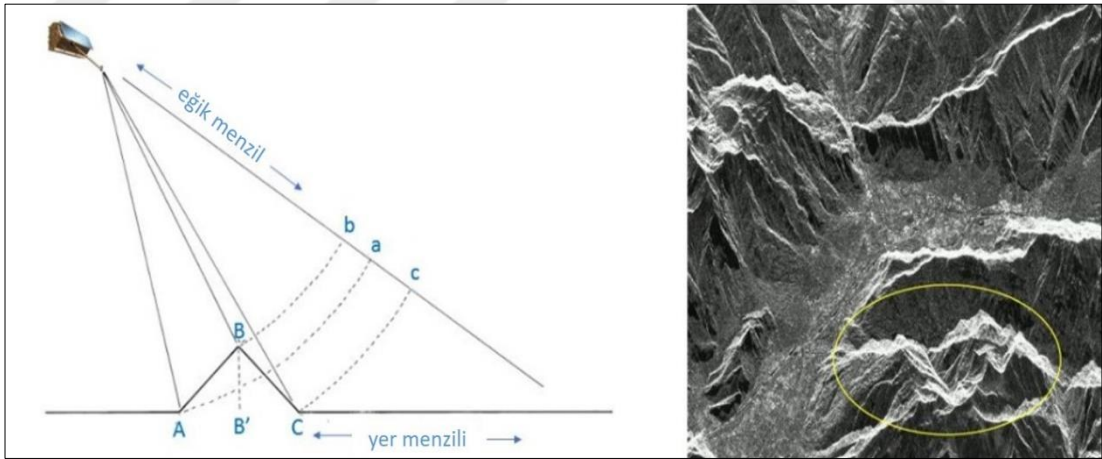
Görüntüleme amaçlı kullanılan radar sistemlerinin doğasında bulunan eğik gözlem geometrisi, SAR sistemleri tarafından elde edilen verilerde geometrik bozulmalara neden olmaktadır. Bu bozulmalar arasında kısa görüntüleme (foreshortening), ters görüntüleme (layover) ve gölge (shadow) oluşumu yer almaktadır (Flores-Anderson vd., 2019).

Kısa görüntüleme, sinyalin eğim açısı ve topoğrafyadaki eğim durumundan kaynaklı olarak radar antenine bakan dağ gibi yüksek ve eğimli bölgelerin gerçekten daha kısa bir şekilde görüntülenmesi olarak tanımlanabilir. Eğim açısı arttıkça radar sinyalleri eğimin tepesinden önce alt kısımlarından yansır ve bu durum kısa görüntüleme etkisine yol açmaktadır (Şekil 3.10'da A'dan B'ye). Radar sinyali eğimli araziye dik olduğunda (yani yerel geliş açısı 90° olduğunda) eğimin tüm noktaları antene aynı eğik aralıkta konumlanır. Bu durum birkaç km uzunluğundaki bir dağ yamacının tek bir pikselde görüntülenmesine neden olabilir ve bu durum arazi modelleri kullanılarak telafi edilebilir (Brawner, 2016; Dallemund vd., 1993; Ferretti vd., 2007). Şekil 3.10'da SAR görüntülerindeki kısa görüntüleme etkisini tasvir eden görsel sunulmuştur.



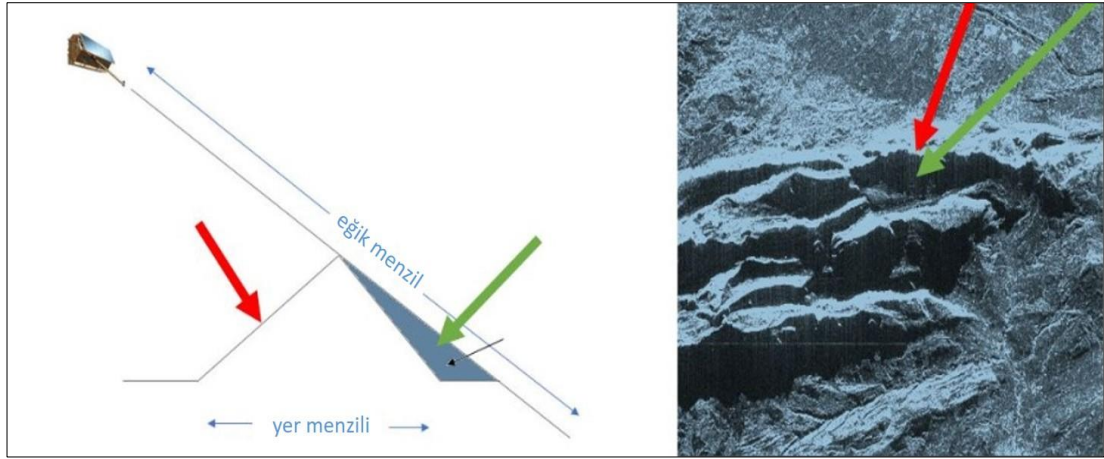
Şekil 3.10. SAR görüntülerindeki kısa görüntüleme etkisi (Selvakumaran, 2019'dan Türkçeleştirilerek).

Ters görüntüleme, çok dik eğimli arazilerde yüzeyin tepesinin (Şekil 3.11'de B noktası) alt kısmından (Şekil 3.11'de A noktası) önce kaydedilmesi nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Sonuç olarak tepeden yansıyan sinyal, tabandan yansıyan sinyali almadan antene geri dönmekte ve bu durum yüzey tabanının, tepesinden önce görüntülenmesine yol açmaktadır (Salas, 2015). Şekil 3.11'de SAR görüntülerindeki ters görüntüleme etkisini tasvir eden görsel sunulmuştur.



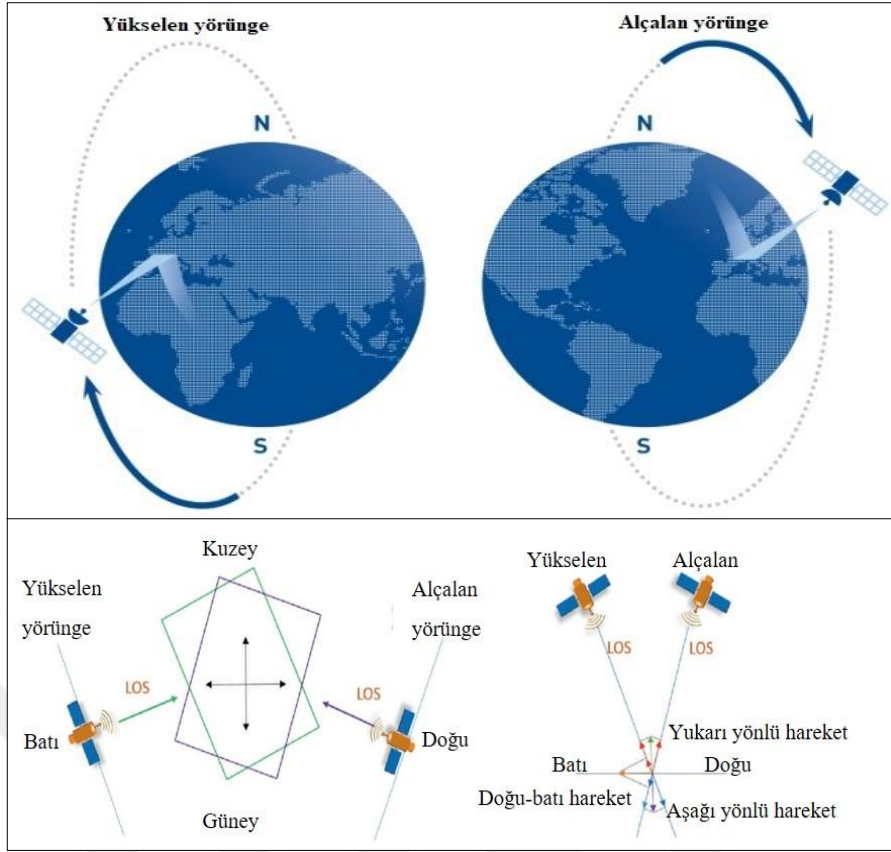
Şekil 3.11. SAR görüntülerindeki ters görüntüleme etkisi (Selvakumaran, 2019'dan Türkçeleştirilerek).

Gölge hatası, sensörden gönderilen elektromanyetik sinyalin dik arazilerde aydınlatamadığı bölgelerde ortaya çıkmaktadır (Şekil 3.12). Bu tür bölgeler radar tarafından görülemediğinden geri saçılım bilgisi kaydedilemez ve radar görüntülerinde daha koyu veya karanlık olarak görünür (Dallemand vd., 1993; Salas, 2015). Şekil 3.12'de SAR görüntülerindeki gölge etkisini tasvir eden görsel sunulmuştur.



Şekil 3.12. SAR görüntülerindeki gölge etkisi (Selvakumaran, 2019'dan Türkçeleştirilerek).

Yeryüzünde meydana gelen hareket bilgilerinin elde edilmesini zorlaştıran bu hataların çalışmalar sırasında dikkate alınması gerekmektedir. Bu tür hataları gidermenin potansiyel bir yolu, aynı çalışma alanı üzerinde farklı geometrilerden yani yükselen (ascending) ve alçalan (descending) yörüngelerden elde edilen uydu görüntülerinin kullanılmasıdır. Günümüzde uydu platformlarının çoğu kutuplara yakın yörüngelerde hareket etmektedir. Bu durum SAR uydusunun Dünya'nın bir tarafında kuzeye, ardından yörüngesinin ikinci yarısında ise güney kutbuna doğru hareket ettiği anlamına gelmekte olup bu harekete sırasıyla yükselen ve alçalan geçişler adı verilmektedir (Şekil 3.13) (Kourkouli, 2015).



Şekil 3.13. Yükselen ve alçalan uydu yörüngeleri (URL-4; Vassileva vd., 2017'den Türkçeleştirilerek).

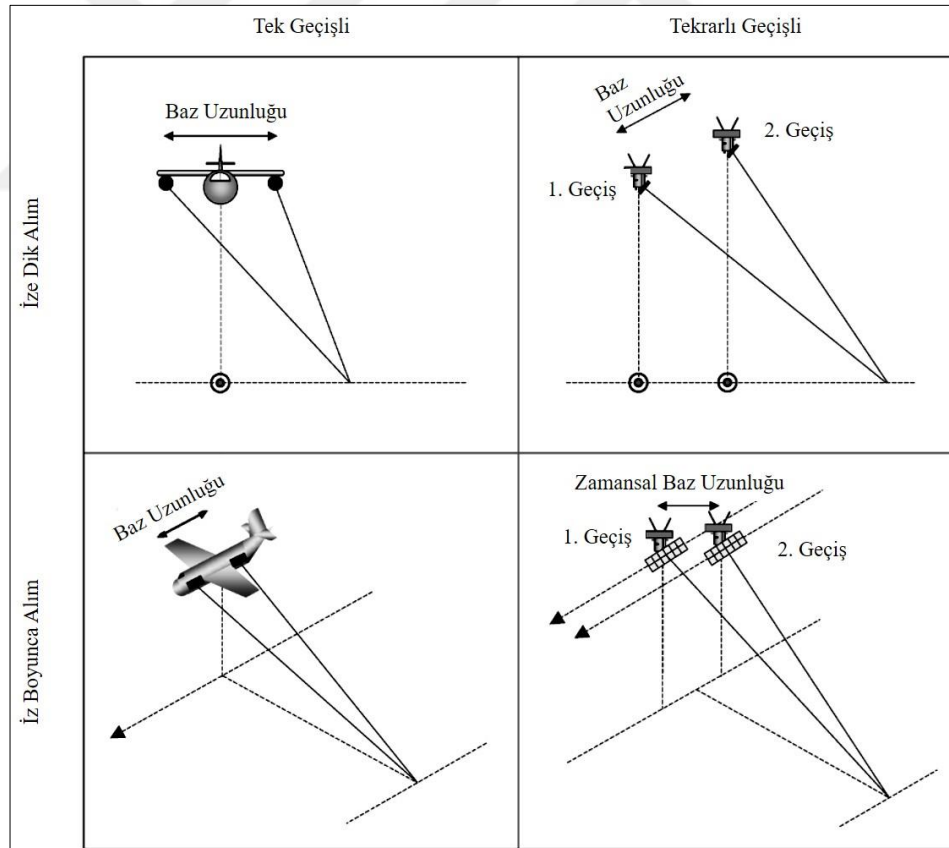
3.4 İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar (InSAR)

InSAR, belirli bir sahne için biraz farklı konumlardan elde edilen iki veya daha fazla radar görüntüsündeki faz bilgilerini karşılaştıran bir uzaktan algılama tekniğidir. Tek bir SAR görüntüsü, üçüncü boyutta haritalamaya izin vermediğinden üç boyutlu nesnelerin kesin konumu elde edilememektedir. Bu dezavantaj, aynı sahnenin ikinci görüntüsünün biraz farklı bir konumdan (ilk yola paralel) veya farklı bir zamanda alınmasıyla ortadan kaldırılabilir. Konum veya zaman farklılığına sahip görüntülerin fazları karşılaştırılarak interferogram adı verilen yeni bir görüntü oluşturulabilir. Ancak farklı polarizasyonlara sahip görüntü çiftleri tek bir interferogram oluşturmak için birleştirilemediğinden bu görüntülerin aynı polarizasyona sahip olması gerekmektedir (Ferretti vd., 2007; Fydrych, 2021; Lyons, 2002).

Bir SAR interferogramı, bir ana SAR görüntüsünün yardımcı görüntü olarak adlandırılan ikincil bir SAR görüntüsünün karmaşık eşleniği ile piksel-piksel çapraz çarpılmasıyla oluşturulur (Ferretti vd., 2007). Bu işlem sırasında iki SAR görüntüsü

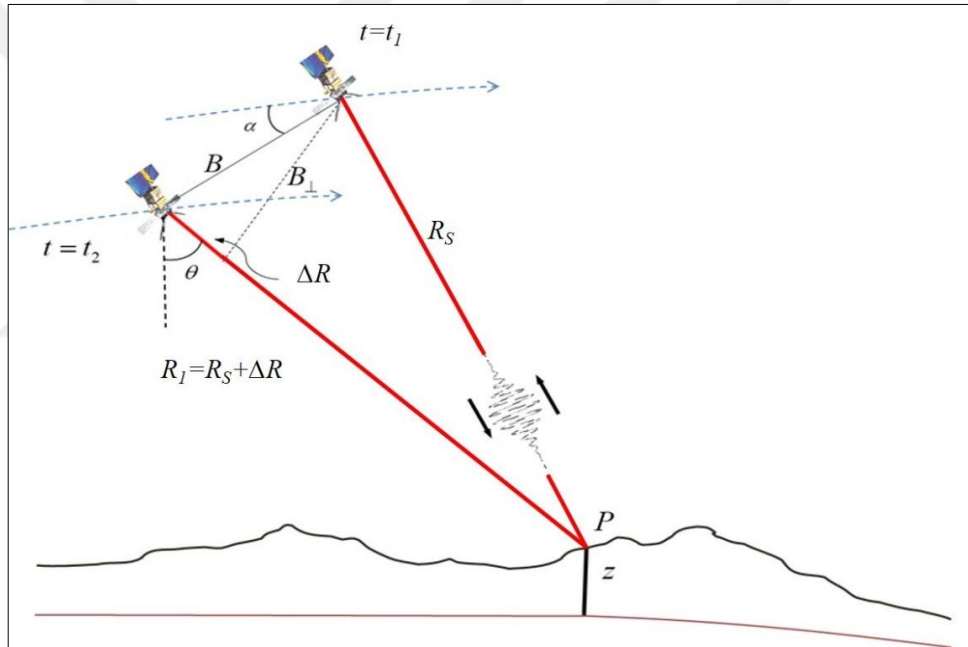
birlikte kaydedilip geometrik olarak düzeltildiğinden doğrudan piksel piksele karşılaştırılabilmektedir. Ortaya çıkan interferogram, ana ve yardımcı görüntülerin genlik değerlerinin çarpımını içerirken, interferogramın faz bilgisi (interferometrik faz) iki görüntünün faz değerleri arasındaki faz farkını yansıtır. İnterferogramdaki faz bilgisi saçaklar (fringe) olarak temsil edilir ve bir saçak genellikle kırmızından maviye değişen bir renk döngüsü olarak görülmektedir (Fydrych, 2021; Khakim vd., 2013).

InSAR tekniği, çoğunlukla tek veya tekrarlı geçiş olmak üzere iki farklı şekilde elde edilen SAR verileri kullanılarak uygulanmaktadır. Tek geçiş tekniğinin temeli, platform üzerinde aralarında belirli bir mesafe (baz uzunluğu) bulunan iki antenin aynı anda veri toplamasına dayanmaktadır. Tekrarlı geçiş tekniğinin temeli ise platform üzerinde yer alan tek bir antenin, aynı sahnenin farklı zamanlarda ve farklı konumlarından geri saçılım bilgisini kaydetmesine dayanmaktadır (Rosen vd., 2000; Torun, 2019). Tek ve tekrarlı geçiş InSAR geometrileri Şekil 3.14’te verilmiştir.



Şekil 3.14. Tek ve tekrar geçişli InSAR yöntemleri (Richards, 2009’dan Türkçeleştirilerek).

Tekrarlı geçiş sistemi, uydularda yer alan anten aracılığıyla kolay bir şekilde veri elde edilebilmesine rağmen bu verilerden anlamlı sonuçların çıkarılması atmosferik etki, zamansal ilişkisizlik sorunu ve görüntüler arasındaki baz mesafesi nedeniyle sınırlı kalabilmektedir. Atmosferik etkiler, InSAR'dan elde edilen yer değıştirme tahminlerinde sistematik hatalara neden olabilirken, zamansal ilişkisizlik sorunu ise gürültü seviyesini artırabilmekte ve faz kararlılığı kaybı nedeniyle interferometrik faz karşılaştırmasını imkânsız hale getirebilmektedir. Ayrıca SAR uydusunun ilk ve ikinci geçişleri arasındaki mesafeyi gösteren baz uzunluğunun, SAR görüntülerinden anlamlı sonuçlar elde edebilmek için olabildiğince düşük olması gerekmektedir (Gezgin, 2020; Klees ve Massonnet, 1998). Şekil 3.15'te genel olarak tekrar geçişli InSAR görüntüleme geometrisini tasvir eden görsel verilmiştir.



Şekil 3.15. SAR interferometre geometrisi (Orhan, 2018).

Şekil 3.15 yeryüzünde bulunan P hedef noktasının SAR prensiplerine uygun olarak birincil (B, t_1) ve ikincil (B, t_2) uydu geçişleri yardımıyla görüntülenme geometrisini tasvir etmektedir. P arazi noktasında gerçekleşen yer değıştirme birincil ve ikincil görüntü alım zaman aralığında belirlenir ve elde edilen deformasyon değeri LOS doğrultusundadır (Canaslan Çomut, 2016). Elde edilecek faz bilgisine, denklem 3.6-3.12 kullanılarak ulaşılabilmektedir.

$$\Delta R = R_I - R_B \quad (3.6)$$

$$\theta = \theta_i - \theta_B \quad (3.7)$$

$$\theta_B = \frac{4\pi}{\lambda} \times R_B \quad (3.8)$$

$$\theta_i = \frac{4\pi}{\lambda} \times R_i \quad (3.9)$$

$$\theta = \frac{4\pi}{\lambda} \times (R_i - R_B) \quad (3.10)$$

$$\theta = \frac{4\pi}{\lambda} \times \Delta R \quad (3.11)$$

$$I = B \times I \quad (3.12)$$

Burada; ΔR iki görüntünün görüş hattı mesafelerindeki farkı, θ interferometrik faz bilgisini, λ radar sisteminde kullanılan sinyalin dalga boyunu, I birincil ve ikincil görüntülerin eşleğinin çarpımını (interferogramı) temsil etmektedir (Canaslan Çomut, 2016). İnterferogramdaki faz bilgisi (θ), çeşitli faz katkılarının toplamı olup denklem 3.13 kullanılarak elde edilmektedir

$$\theta = \theta_{topo} + \theta_{düz} + \theta_{yrng} + \theta_{atm} + \theta_{defo} + \theta_{gür} \quad (3.13)$$

Burada; θ_{topo} topoğrafik faz etkisini, $\theta_{düz}$ düzleştirilmiş yeryuvarı fazını, θ_{yrng} yörünge faz etkisini, θ_{atm} atmosferik değişimlerden kaynaklanan faz gecikmelerini, θ_{defo} yüzey (zemin) deformasyonu nedeniyle oluşan faz etkisini ve $\theta_{gür}$ sistem faz gürültüsünü temsil etmektedir. İnterferometrik fazdan kesin deformasyon değerlerini elde etmek için diğer tüm faz katkılarının çıkarılması gerekmektedir (Chu ve Lindenschmidt, 2017; Li vd., 2017; Wang vd., 2022).

3.4.1 Topoğrafik faz etkisi

Topoğrafik faz etkisi (θ_{topo}), geleneksel InSAR uygulamalarında sinyalin anlamlı bir şekilde kullanılan tek kısmı olup SAR görüntülerinin iki farklı zamanda elde edilmesinin bir sonucudur (Fydrych, 2021). Topografyadan gelen faz katkıları, denklem 3.14 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$\theta_{topo} = -\frac{4\pi B_{\perp} h}{\lambda R \sin \theta} \quad (3.14)$$

Burada; $B_{\perp}$ baz uzunluğunu, θ geliş açısını, h gözlemlenen yüzeyin yüksekliğini, λ dalga boyunu ve R bakış açısındaki düşey mesafeyi temsil etmektedir. Denklem

3.14'ten anlaşılabacağı üzere, baz uzunluğunun artması topoğrafik fazın artmasına neden olmaktadır (Ferretti vd., 2007). Topoğrafik faz etkisinin dikey taban çizgisiyle doğru orantılı olması nedeniyle SAR görüntülerinin elde edildikleri konumlar arasındaki baz uzunluğuna ilişkin kesin bilgi oldukça önemlidir. Bu nedenle daha kısa baz uzunluğuna sahip görüntülerle oluşturulan interferogramlar topoğrafyadan kaynaklanan faz etkisini azaltabilmektedir. Örneğin iki COSMO-SkyMed görüntüsü arasındaki dik baz uzunluğu 100 metre kabul edilirse interferometrik fazdaki 2π 'lik bir değişiklik yaklaşık 28,44 metrede bir topoğrafik örüntü üretmesi anlamına gelecektir (Orhan, 2018). Topoğrafik fazı kaldırmak için çeşitli teknikler geliştirilmiş olsa da bu teknikler genellikle Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) veya başka bir interferometrik veri seti kullanarak topoğrafik fazın kaldırılması temeline dayanmaktadır (Rosen vd., 2000).

3.4.2 Düzleştirilmiş yeryuvarı fazının etkisi

Düzleştirilmiş yeryuvarı fazı ($\theta_{düz}$), uydu yörüngeleri ve jeodezik koordinat sistemi yardımıyla hesaplanabilmektedir. SAR görüntüleri düz Dünya varsayımı altında elde edilir ve bu nedenle gerçek Dünya yüzeyi ile düz Dünya yüzeyi arasında faz farkları meydana gelmektedir (Zhou, 2013). Düzleştirilmiş yeryuvarı fazı, denklem 3.15 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$\theta_{düz} = -\frac{4\pi}{\lambda} B_{\perp} \theta \quad (3.15)$$

Burada; $\Delta\theta$ iki SAR ediniminin görüntüleme veya bakış açılarındaki farkı, λ dalga boyunu ve $B_{\perp}$ baz uzunluğunu temsil etmektedir. İnterferogram düzleşmesi olarak da bilinen düleştirilmiş yeryuvarı fazı, uydu yörünge verileri yardımıyla hesaplanan paralel baz uzunlukları kullanılarak elimine edilmektedir (Ferretti vd., 2007; Fydrych, 2021).

3.4.3 Yörünge etkisi

Uydu yörüngeleri, atmosferik sürüklenme ve güneş radyasyon basıncı gibi bir dizi fenomenler ve korunumsuz kuvvetler tarafından bozulmaktadır. İnterferogram oluşumunda kullanılan ve iki farklı konumdan elde edilen SAR görüntüleri arasındaki baz uzunluğu, topoğrafik fazı kaldırmak için kullanılırken baz uzunluğuna ait yanlış

bilgi, interferometrik fazın referans elipsoitten ve topoğrafyadan hatalı bir şekilde belirlenmesine yol açarak interferogramlarda artık saçakların oluşmasına neden olmaktadır (Hanssen, 2001; Zhou, 2013). Son 20 yılda uydu yörüngelerinden kaynaklanan artık fazın etkisini azaltmak için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin çoğu, InSAR interferogramlarının uzaysal alan analizlerine dayanmakta olup doğrusal veya ikinci dereceden bir yüzey uydurma yardımıyla artık fazın etkisi kaldırılabilir (Massonnet ve Feigl, 1998; Tian vd.,2018; Xu vd., 2013).

3.4.4 Atmosferik etki

Atmosferik gecikmeler ve diğer gürültü kaynaklarının (ortak kayıt hataları gibi) neden olduğu faz katkıları, doğrudan ve/veya tamamen ortadan kaldırılamaz. Ancak belirli bir parametrenin daha doğru bir şekilde hesaplanabilmesi amacıyla interferometrik faz üzerindeki etkilerinin azaltılması gerekmektedir (Fydrych, 2021). Özellikle tekrar geçişli SAR sistemlerde algılanan görüntülerindeki atmosferik şartların farklı olması nedeniyle interferometrik faz iyonosferik ve troposferik durumlardan olumsuz etkilenmekte ve bu durum fazın gecikmesine yol açarak interferogramlar üzerinde hatalı faz etkisine neden olmaktadır.

InSAR üzerindeki atmosferik etkiler ilk kez Massonnet vd. (1994) tarafından ortaya koyulmuş olup, Zebker vd. (1997) ise troposferin bağıl nemindeki %20’lik mekânsal ve zamansal değişikliklerin 400 ile 100 m arasında değişen baz uzunlukları için 10-14 cm’lik bir yorumlama veya 80-290 m’lik bir topoğrafik yükseklik hatasına neden olabileceğini bildirmişlerdir (Ding vd., 2008). Ayrıca Delacourt vd. (1998) Etna volkanında gerçekleştirdikleri çalışma sonucunda atmosferik etkilerin volkanın tepesi ile tabanı arasında 4π ’ye kadar faz rotasyonu oluşturabileceğini ortaya koymuştur. Troposferik su buharı miktarının artması elektromanyetik enerjinin kat ettiği mesafenin artmasına neden olarak sinyalin daha fazla gecikmesine (yavaşlamasına) yol açmaktadır (Massonnet ve Feigl, 1998). Bu nedenle atmosferik etkilerin neden olduğu artık fazların elimine edilmesi amacıyla farklı baz uzunluğuna sahip birden fazla SAR görüntüsü veya uygun atmosferik modeller kullanılmalıdır (Wadge vd., 2010).

3.4.5 Yüzey deformasyonu

İnterferometrik fazdan topoğrafik etki, düz Dünya etkisi, yörünge etkisi ve atmosferik etkiler çıkardıktan sonra kalan faz bilgisi yer değiştirme miktarını vermektedir. Bu yer değiştirme miktarı denklem 3.16 yardımıyla hesaplanabilmektedir (Elliott, 2009; Zhou, 2013)

$$\theta_{defo} = \frac{4\pi\Delta R}{\lambda} = -\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) \hat{n}u \quad (3.16)$$

Burada; $\hat{n}$ birim vektörü, u yer ve radar sensörü arasındaki LOS doğrultusundaki üç boyutlu yer değişimini, λ ise dalga boyunu temsil etmektedir (Zhou, 2013). Denklem 3.16'dan anlaşılacağı gibi yeryüzünde meydana gelecek $\theta=2\pi$ 'lik bir değişim, dalga boyunun yarısı büyüklüğündeki ($\lambda/2$) bir örüntünün (saçak) oluşmasına neden olacaktır. Sonuç olarak yüzeyde meydana gelen deformasyon bilgilerini elde edilmek için interferometrik fazdan deformasyon haricinde kalan diğer artık fazların çıkarılması gerekmektedir (Orhan, 2018).

3.4.6 Korelasyon bozukluğunun etkisi

Tutarlılık (coherence - γ), bir interferometrik çiftin faz gürültüsünün ve dolaylı olarak ortaya çıkan interferogramların kalitesinin bir tahmini olarak tanımlanabilir. Her piksele ait bir tutarlılık değeri bulunmakta olup bu değer, 0 ile 1 arasında değişmektedir. Tutarlılığın 1 veya 1'e yakın olması her iki görüntü pikseli arasında mükemmel bir faz korelasyonu olduğunu, 0 veya 0'a yakın olması ise çakışan görüntü pikselleri arasında herhangi bir korelasyonun olmadığını ifade etmektedir. Genel olarak, 0,3 - 0,35'in üzerindeki tutarlılık değerleri güvenilir kabul edilirken daha düşük tutarlılık değerlerine sahip pikseller ise çok fazla hata barındırması nedeniyle maskelenmektedir (Ferretti vd., 2007; Fydrych, 2021; Khakim vd., 2013; Samsonov vd., 2015). Korelasyonsuzluk, uzaysal ve zamansal değişikliklerin bir sonucu olarak ortaya çıkmakta ve denklem 3.17 kullanılarak hesaplanmaktadır (Wei ve Sandwell, 2010; Smith vd., 1996; Zebker ve Villasenor, 1992).

$$\gamma = \gamma_{termal} + \gamma_{konumsal} + \gamma_{zamansal} \quad (3.17)$$

Burada; γ_{termal} sistem gürültüsünü, $\gamma_{konumsal}$ konumsal paralaks etkisine neden olan iki çekim arasındaki görüş açısı farklılıklarını, $\gamma_{zamansal}$ ise görüntü edinimleri arasında

saçıcıda meydana gelen fiziksel değişiklikleri ifade etmektedir. Bu nedenle tutarlılık, zamansal ve dik baz uzunlukları, arazi örtüsü, mevsimsel değişiklikler, atmosferik etkiler ve çalışma alanının topografyası gibi birçok faktörden etkilenmektedir (Fydrych, 2021; Samsonov vd., 2015).

3.4.6.1 Termal korelasyonsuzluk

Termal korelasyonsuzluk, radar sinyalinin sinyal gürültü oranı (Signal to Noise Ratio-SNR) ile ilişkili olup denklem 3.18 yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$\gamma_{\text{termal}} = \frac{1}{1+SNR^{-1}} \quad (3.18)$$

$$SNR = \frac{P_S}{P_N} \quad (3.19)$$

Burada; P_S sinyal gücünü, P_N ise sinyaldeki gürültünün gücünü temsil etmektedir. SNR, sadece geri saçılımın çok düşük olduğu alanlar için önemlidir ve çoğu durumda göz ardı edilebilir (Askne ve Smith, 1997; Zhou, 2013).

3.4.6.2 Konumsal korelasyonsuzluk

Konumsal korelasyonsuzluk, yüzey ve hacim saçılımından etkilenen saçılmaların konumsal dağılımına bağlıdır ve denklem 3.20 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$\gamma_{\text{konumsal}} = \gamma_{\text{yüzey}} + \gamma_{\text{hacim}} \quad (3.20)$$

γ_{hacim} , saçıcıların bir düzlemle sınırlı olmayıp bitki örtüsüyle kaplı olduğu alanlardaki gibi farklı şekillerde dağıldığı durumlarda ortaya çıkmakta ve bu nedenle radar sinyali bitki örtüsü ve zemindeki toprakla etkileşime geçerek hacim bozulması meydana gelmektedir. Konumsal hacim korelasyonsuzluğu, dikey baz uzunluğunun ($B_{\perp}$), menzil çözünürlüğünün (R_y), geliş açısının (θ), menzil yönündeki yerel yüzey eğiminin (α), dalga boyunun (λ), uydu sensörü ile yüzeydeki hedef arasındaki mesafenin (r) bir fonksiyonu olup denklem 3.21 kullanılarak hesaplanabilmektedir (Zebker ve Villasenor, 1992; Zhou, 2013).

$$\gamma_{\text{konumsal}} = 1 - \frac{2|B_{\perp}|R_y \cos^2(\theta - \alpha)}{\lambda r} \quad (3.21)$$

Denklem 3.21'den anlaşılacağı üzere konumsal korelasyon bozukluğu, dik baz uzunluğuyla doğru orantılıdır. Bu nedenle dik baz uzunluğu ne kadar yüksek olursa konumsal korelasyon bozukluğu da o kadar yüksek olacaktır (Zebker ve Villasenor, 1992). Dik baz uzunluğu kritik değere ulaştığında fazdaki tutarlılığın kaybolmasına ve dolayısıyla sağlıklı olmayan sonuçların elde edilmesine neden olmaktadır. Çalışmalarda tutarlı interferogramlar elde edebilmek için kritik baz uzunluğunun (B_c) aşılmamasına dikkat edilmelidir. Kritik baz uzunluğu denklem 3.22 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$B_c = \frac{\lambda r}{2\delta R_g \cos^2 \theta} \quad (3.22)$$

Burada; λ radar dalga boyunu, r eğik mesafeyi, δR_g menzil çözünürlüğünü, θ bakış açısını temsil etmektedir (Lyons, 2002). Kritik baz uzunluğu görüntü çifti üretilecek çalışmalarda 600 m'den, SYM üretilecek çalışmalarda 300 m'den ve deformasyon çalışmalarında ise 100 m'den küçük seçilmelidir (Yavaşoğlu, 2009).

3.4.6.3 Zamansal korelasyonsuzluk

Zamansal korelasyonsuzluk, SAR görüntülerinin algılandığı zaman diliminde yüzeyde meydana gelen değişikliklerden (boyut, şekil, pürüzlülük, nemlilik vb. durumlarda) kaynaklanmaktadır. Mevsimsel geçişlerin yaşandığı bölgelerde, bitki örtüsünün büyümesi ve/veya hasat edilmesi fazdaki tutarlılığın düşmesine yol açmaktadır. Mevsimsel geçişlerde tutarlılık kaybı genellikle kış aylarından yaz aylarına geçiş sırasında meydana gelmektedir (kış aylarında yağın karın, yaz aylarında erimesi) (Brawner, 2016; Zhou, 2013). Buna ek olarak çalışma alanında meydana gelebilecek bir doğal afet (volkanik patlama, deprem, heyelan vb.) zamansal korelasyonsuzluğa neden olarak tutarlılığın ciddi şekilde azalmasına yol açabilmektedir. Bu nedenle gerçekleştirilecek çalışmanın amacına uygun olacak şekilde zamansal baz uzunluğu hassas bir şekilde seçilmelidir; zemin çökmesi gibi uzun vadede meydana gelen deformasyon çalışmalarında uzun baz uzunlukları, SYM oluşturma çalışmalarında ise olabildiğince kısa zamansal baz uzunlukları kullanılmalıdır (Abdikan, 2012).

3.5 Diferansiyel İnterferometrik SAR (DInSAR)

DInSAR, belirli bir sahne için farklı zamanlarda ve birbirine yeterince yakın konumlardan elde edilen SAR görüntü çiftleri arasındaki faz farkından yararlanan bir uzaktan algılama tekniğidir. Bu teknikle, yeryüzünde meydana gelen yer değiştirme miktarları santimetreden milimetreye kadar doğrulukla hesaplanabilmektedir (Calò vd., 2014). DInSAR tekniği, ilk kez Massonnet vd. (1993) tarafından 1993 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde meydana gelen Landers depreminin neden olduğu yüzey deformasyonlarının tespit edilmesi amacıyla uygulanmıştır. Bu teknik, topoğrafya ve yer değiştirmeye ilişkin faz bileşenlerini birbirinden ayırarak yeryüzünde meydana gelen yüzey değişimlerinin tespit edilmesi esasına dayanmaktadır (Kourkoulı, 2016; Gabriel vd., 1989). Geleneksel InSAR tekniği olarak da bilinen DInSAR iki, üç veya dört geçişli olacak şekilde uygulanabilmektedir.

İki geçişli DInSAR tekniği, aynı sahnenin farklı zamanlarda edinilmiş iki SAR görüntüsü ile aynı sahneye ait harici bir sayısal yükseklik modeli (SYM) kullanılarak uygulanmaktadır. Bu iki görüntü alımı arasında geçen süre zarfında ilgili alanda herhangi bir yüzey deformasyonu meydana gelirse ikinci görüntündeki radar dalgası birinci görüntüdeki radar dalgasına kıyasla göre daha fazla mesafe kat ederek faz farkının oluşmasına neden olacaktır. Oluşan bu faz farkı (faz artıkları giderildikten sonra), ilgili alanda meydana gelen yüzey deformasyonlarının mm ölçeğinde tespit edilebilmesine olanak sağlamaktadır. Üç geçişli DInSAR tekniğinde aynı sahneye ait farklı zamanlarda edinilmiş üç SAR görüntüsü kullanılmaktadır. Deformasyondan önce edinilen iki SAR görüntüsü yardımıyla referans interferogram, deformasyonun öncesi ve sonrasında edinilmiş birer görüntü yardımıyla da ikinci interferogram oluşturulmaktadır. Daha sonra bu iki interferogram birbirinden çıkarılarak bölgede meydana gelen yüzey deformasyonları elde edilmektedir. Dört geçişli DInSAR tekniğinde ise aynı görüntü sahnesinin farklı zamanlarda edinilmiş dört SAR görüntüsüne ihtiyaç duyulmaktadır. İki görüntü çifti oluşturulur ve ilk çift yardımıyla SYM üretilmekteyken diğer çift ise yer değiştirme interferogramının oluşturulmasında kullanılmaktadır. Daha sonra bu çiftler karşılaştırılarak faz açılımı ve ölçeklendirilmesi yapılarak topoğrafik interferogram elde edilmektedir. Son aşamada ise topoğrafik interferogram yer değiştirme interferogramından çıkarılarak LOS doğrultusundaki yer

değiştirmeyi içeren görüntü elde edilmektedir (Aydöner ve Maktav, 2006; Curlander ve McDonough, 1991; Hanssen, 2001; Kemaldere, 2011).

Sonuç DInSAR haritasındaki yer değiştirmeler, örüntü (saçak) adı verilen eşmerkezli halkalarla temsil edilmektedir. Her bir örüntü LOS boyunca yeryüzünde meydana gelen yardım dalga boyundaki yer değiştirmeyi temsil etmektedir. Bu yer değiştirme 2π 'lik relatif değişimdir (Abdikan, 2012). Bu yer değiştirme miktarları LOS doğrultusunda ALOS PALSAR (dalga boyu: 23.62 cm) uydusu için 11.81 cm, ERS-1/2 (dalga boyu: 5.66 cm) uyduları için 2,83 cm, Envisat ASAR (dalga boyu: 5,62 cm) uydusu için 2,81 cm, Sentinel-1 (dalga boyu: 5,6 cm) uyduları için 2,8 cm, COSMO-SkyMed ve TerraSAR-X (dalga boyu: 3,1 cm) uyduları için 1,55 cm'lik hareketi temsil etmektedir (Orhan, 2018).

DInSAR tekniği, Massonnet vd. (1993) tarafından ilk kez uygulanmasından bu yana birçok yer bilimi alanında geniş ölçekli yüzey hareketlerinin tespit edilmesinde güçlü bir jeodezik araç olarak kullanılmaktadır. DInSAR, heyelanlar (Kimura ve Yamaguchi, 2000; Singhroy ve Molch, 2004; Strozzi vd., 2005), depremler (Fielding vd., 2005; Peltzer vd., 1996; Wright vd., 1999), buzullar (Derauw 1999; Nela vd., 2023; Wangenstein vd., 2005), madencilik nedeniyle çökmeler (Chang vd., 2004; Raucoules vd., 2003; Dong vd., 2013) ve volkanlar (Amelung vd., 2000; Beauducel vd., 2000; Rosen vd., 1996) gibi doğal ve antropojenik kaynaklı yüzey hareketlerini izlemek amacıyla çeşitli uygulamalarda başarılı bir şekilde uygulanmıştır.

DInSAR tekniğinde, faz bilgisine sahip olan SLC (Single Look Complex) formatındaki SAR görüntüleri kullanılmaktadır. Farklı zaman dilimlerinde edinilmiş aynı sahneye ait iki SAR görüntüsü ile aynı sahneye ait SYM kullanılarak genel olarak aşağıdaki işlem adımları takip edilerek DInSAR analizi gerçekleştirilebilir ve meydana gelen yüzey deformasyonları tespit edilebilir.

- Aynı sahneye ait farklı zamanlarda elde edilen iki SAR görüntüsünde aynı alt alan ve alt bölümlerin seçilerek hassas yörünge bilgilerinin uygulanması
- SAR görüntülerinin DEM verileri kullanılarak birlikte kaydedilmesi
- İnterferogram oluşumu
- Alt bölümlerin birleştirilmesi
- Topoğrafik fazın kaldırılması

- Faz filtreleme
- Faz açma (Unwrapping)
- Fazın LOS doğrultusundaki yer değiştirmeye dönüşümü (Deguchi vd., 2006).

3.6 Çok Zamanlı InSAR Teknikleri

Geleneksel InSAR (DInSAR) tekniğinde iki SAR görüntü alımı arasında meydana gelen yüzey deformasyonları tek bir görüntü çiftinin kullanılmasıyla elde edilebilmektedir. Ancak atmosferik gecikmeler, yüksek zamansal ve geometrik dik baz uzunlukları ve saçıcıların dielektrik özelliklerindeki değişimler gibi çeşitli olumsuz etkiler elde edilen interferogramlardaki korelasyon değerinin düşmesine neden olarak çalışma bölgesine ait yüzey deformasyonlarının sağlıklı bir şekilde tespit edilmesini engellemektedir. Bu etkilerin azaltılması veya tamamen ortadan kaldırılabilmesi ve uzun zaman aralıklarda meydana gelen yüzey değişikliklerinin tespit edilip izlenebilmesi amacıyla birden çok SAR görüntüsünün kullanıldığı çok zamanlı InSAR (Multi Temporal InSAR-MTI) teknikleri geliştirilmiştir (Berardino vd., 2002; Ferretti vd., 2000; Hooper vd., 2004; Hooper, 2008).

Zaman serisi analizi olarak da bilinen InSAR-MTI teknikleri, DInSAR tekniğinin sınırlamalarını elimine ederek yeryüzünde meydana gelen yüzey deformasyonlarının daha hassas bir şekilde tespit edilebilmesine olanak sağlamaktadır. Günümüzde kullanılan MTI yaklaşımları genel olarak iki başlığa ayrılabilir; bunlar Kalıcı Yansıtıcı InSAR (Persistent Scatterer Interferometry-PSI) ve Kısa Baz Uzunluğu Interferometri (Small Baselines Interferometry-SBAS) yöntemleridir. Bu teknikler volkanların neden olduğu yüzey deformasyonlarının belirlenmesi amacıyla volkanik patlama öncesi, patlama anı ve sonrası olmak üzere birçok çalışmada kullanılmıştır. Long Valley Kalderası (Hooper vd., 2004), Tenerife Volkanik Kompleksi (Fernández vd., 2009), Hekla Volkanı (Ofeigsson vd., 2011), And Dağları Volkanik Bölgesi (Henderson ve Pritchard, 2013), Midagahara Volkanı (Kobayashi, 2018), Asama Volkanı (Wang vd., 2019), Agung Volkanı (Albino vd., 2020), Changbaishan Volkanı (Meng vd., 2022) ve Tendürek Dağı (Gündüz vd., 2023) gibi birçok volkanik sistemde MTI teknikleri yardımıyla meydana gelen yüzey deformasyonları başarılı bir şekilde tespit edilmiştir.

PSInSAR yöntemleri, bir interferogram yığnında uzun zaman aralıklarında iyi korelasyon ve kararlı fazlar sağlayan pikselleri tanımlaması temeline

dayanmaktayken, SBAS yöntemleri ise küçük bir yörünge ayrımı (baz uzunluğu) ile karakterize edilen SAR görüntü çiftlerinin kullanılması temeline dayanmaktadır. PSInSAR ve SBAS yöntemleri çok çeşitli uygulamalarda yüzey deformasyonunu hassas bir şekilde tespit ederek güçlü birer jeodezik bir araç olduklarını kanıtlanmışlardır (Berardino vd., 2002; Ferretti vd., 2000; Hooper vd., 2004; Hooper, 2008; Lanari vd., 2004).

Zaman içerisinde PSInSAR ve SBAS tekniklerine bağlı olarak birden çok MTI tekniği ve yazılımı geliştirilmiştir. Çalışmalarda sıklıkla kullanılanlar ise aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

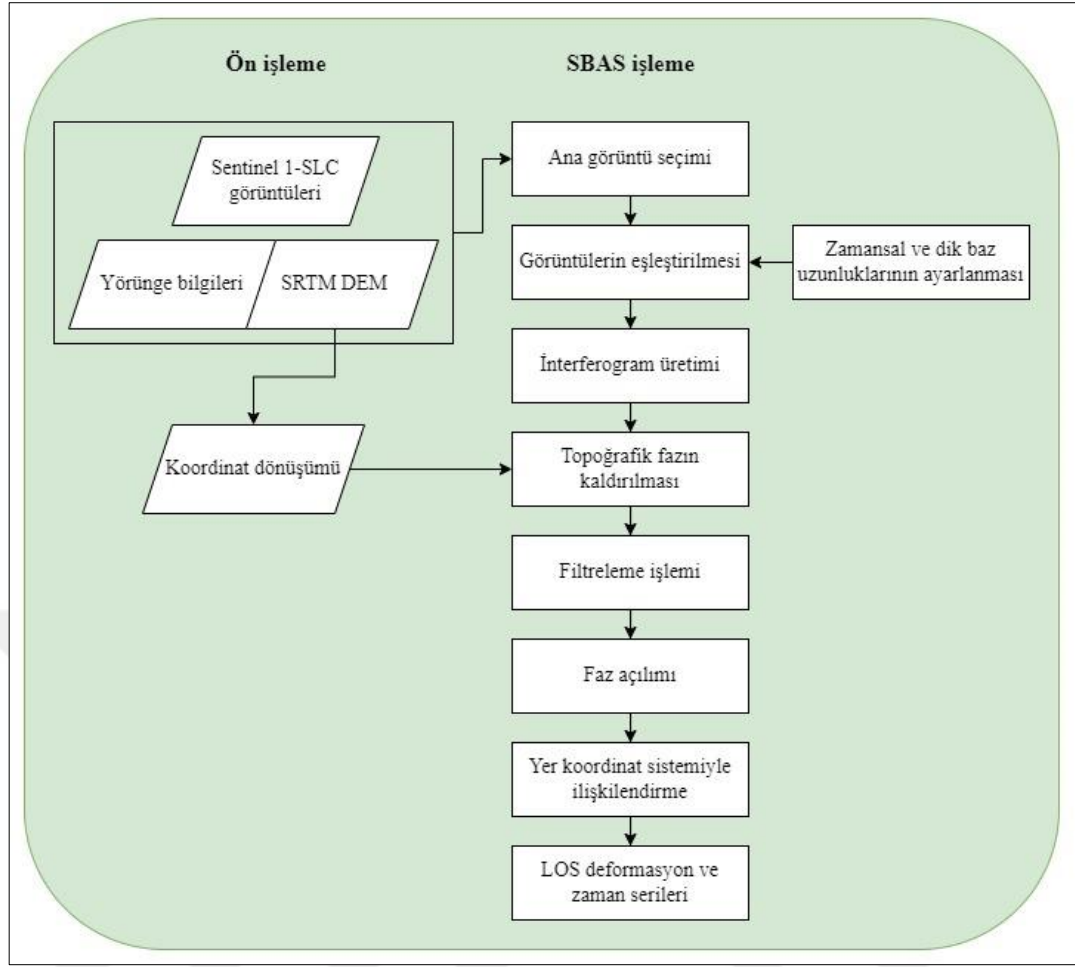
- Permanent Scatterer InSAR (PSInSAR) (Ferretti vd., 2000; Ferretti vd., 2001),
- Small Baseline Subset (SBAS) (Berardino vd., 2002, Lanari vd., 2007),
- Interferometric Point Target Analysis (IPTA) (Werner vd., 2003),
- Delft Persistent Scatterer Interferometry (DePSI) (Kampes, 2006),
- Coherent Pixels Technique (CPT) (Blanco-Sanchez vd., 2008),
- Stable Points Network (SPN) (Crosetto vd., 2008, Kuehn vd., 2010),
- Persistent Scatterer Pairs (PSP) (Costantini vd., 2008, Costantini vd., 2012),
- Stanford Method for Persistent Scatterers (StaMPS) (Hooper, 2008),
- SqueeSAR™ (Ferretti vd., 2011a),
- Quasi Persistent Scatterers (QPS) (Perissin ve Wang, 2011),
- Generic Mapping Tools Synthetic Aperture Radar (GMTSAR) (Sandwell vd., 2011),
- Miami INsar Time-series (MintPy) (Yunjun vd., 2019)
- Looking Into Continents from Space with Synthetic Aperture Radar (LiCSAR) (Lazecký vd., 2020)

3.6.1 SBAS

Berardino vd. (2002) tarafından geliştirilen SBAS tekniği, farklı küçük temel alt kümelerde yer alan SAR görüntü çiftlerini kullanarak meydana gelen yüzey deformasyonlarının zamansal etkilerini inceleyen çok zamanlı InSAR tekniklerinden biridir (Lanari vd., 2004; Lanari vd., 2007).

SBAS tekniği kullanılarak deformasyonun zamansal değişimi belirlenirken görüntülerde yüksek korelasyona sahip hedef nesneler (Distributed Scatterer) bir arada incelenmektedir. Bu teknikte, aynı bölgenin farklı zaman dilimlerinde çekilmiş $N+1$ adet SAR görüntüsü, azimut ve menzil yönündeki kaymaların ortadan kaldırılması için ana (master) görüntü ile hizalanmaktadır (Coregistration). Daha sonra görüntüler arasındaki mekânsal korelasyonsuzluğun en aza indirilmesi amacıyla Doppler frekansı değerleri, zamansal ve geometrik dik baz uzunlukları dikkate alınarak M adet interferogram oluşturulmaktadır. Üretilen interferogramlarda yüksek korelasyona sahip olan hedeflere tek değer ayırımı (Singular Value Decomposition-SVD) yöntemini temel alan bir yaklaşım uygulanarak deformasyonun zamansal gelişimi belirlenmektedir (Berardino vd., 2002; Gezin, 2020). Genel olarak SBAS yöntemi için izlenen iş adımları aşağıdaki gibi sıralanabilir (şekil 3.16).

- SAR görüntüleri, bunlara ait yörünge bilgileri ve harici SYM'nin temin edilip değerlendirilmesi ve ana (master) görüntünün seçimi,
- SAR görüntülerinden zamansal ve dik baz uzunluklarına göre görüntü çiftlerinin ve interferogramların oluşturulması,
- Oluşturulan interferogramlardan topoğrafik fazın kaldırılması ve gürültüyü azaltmak amacıyla filtreleme işlemenin uygulanması,
- Topoğrafik fazı giderilen ve çalışma alanındaki deformasyonu içeren interferogramlarda fazın açılması ve trendin kaldırılması,
- Son olarak elde edilen deformasyonların yer koordinat sistemiyle ilişkilendirilmesi ve LOS yönündeki deformasyon ve zaman serilerinin elde edilmesi.



Şekil 3.16. SBAS işlem adımları (Ghorbani vd., 2022’den Türkçeleştirilerek).

3.6.2 PSInSAR

PSInSAR, tek interferogram DInSAR ile ikinci nesil InSAR teknolojilerini birbirinden ayırmak için InSAR topluluğu içinde kullanılan genel bir terimdir (Ferretti vd., 2011b). PSInSAR tekniği, geleneksel InSAR’ın zamansal ve geometrik etkilerden kaynaklanan sorunlarını elimine etmek amacıyla ilk olarak Ferretti vd. (2001) tarafından önerilmiş ve daha sonra Colesanti vd., (2003) tarafından geliştirilmiştir.

PSInSAR, bir dizi SAR görüntüsünden topoğrafik ve geometrik bozulmalara uğramamış sabit saçılım özelliğine sahip noktaları (saçıcılar) kullanarak uzun zaman aralığında meydana gelen yüzey deformasyonlarını gözlemleyen bir tekniktir. Sabit saçılım özelliği gösteren noktalara kalıcı saçıcılar (PS) adı verilir ve bir piksel içerisinde bir veya iki saçıcı olabilir. PSInSAR tekniği, özellikle sabit saçılma özelliği gösteren nesnelerin (binalar, elektrik direkleri vb.) yoğun olarak bulunduğu kentsel alanlarda meydana gelen yüzey deformasyonlarının mm ölçeğinde hassasiyetle tespit

edilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak bu teknik, deformasyonun hızlı geliştiği alanlarda ve bitki örtüsü veya düşük yansıtma özelliği olan kentsel olmayan (kırsal) alanlardaki düşük PS yoğunluğu nedeniyle çeşitli kısıtlamalara sahiptir (Goel ve Adam, 2012).

PSInSAR tekniğinde, N+1 adet SAR görüntüsü kullanılarak N adet interferogram oluşturulmaktadır. Analiz sonucunda ilgi alanına ait sağlıklı sonuçlara ulaşabilmek amacıyla en az 20 SAR görüntüsüne ihtiyaç duyulmaktadır (Gezgin, 2022). Görüntülerden biri diğer görüntülerle yüksek korelasyon sağlayacak şekilde zamansal ve geometrik baz mesafesi, modellenmiş tutarlılık, yükseklik belirsizliği ve Doppler frekans değerlerine göre ana (master) görüntü olarak seçilmektedir. Ana görüntü haricindeki diğer görüntüler ise ana görüntüyle interferogram oluşturmak amacıyla ikincil görüntü (slave) görevi üstlenmektedir. Oluşturulan interferogramlardan aday PS noktaları, genlik dağılım indeksi (DA) kullanılarak seçilmektedir. Genlik dağılım indeksi denklem 3.23 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$D_A = \frac{\sigma_A}{\mu_A} \quad (3.23)$$

Burada; σ standart sapmayı ve μ genlik değerinin ortalamasını temsil etmektedir. Düşük genlik dağılımına ve dolayısıyla düşük faz dağılımına sahip olan saçıcılar başlangıçta PS adayı olarak seçilmektedir. Aday PS noktaları belirlendikten sonra piksellerdeki yaklaşık olarak sıfır gürültüye sahip olan faz bilgisinin sabitliği kestirilmekte ve kalıcı PS noktaları tespit edilmektedir (Abdikan, 2012). Daha sonra interferogramlardaki topoğrafya ve yörüngeden kaynaklanan hatalar, harici bir SYM ve hassas yörünge bilgileri kullanılarak giderilmekte ve faz çözümü (phase unwrapping) adımına geçilmektedir. Atmosferik etkiler ise veri setinin her görüntüsünde kararlı genlik ve tutarlı faz bilgisi içeren pikseller kullanılarak elimine edilmektedir. Atmosferik etkiler elimine edildikten sonra uydu bakış doğrultusundaki yıllık deformasyon miktarı elde edilmektedir (Gezgin, 2020).

Tez çalışması kapsamında PSInSAR analizleri SNAP (Sentinel Application Platform), StaMPS ve TRAIN (Toolbox for Reducing Atmospheric InSAR Noise) yazılımları aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. SNAP, Avrupa Uzay Ajansı (European Space Agency-ESA) tarafından uydu görüntülerinin işlenmesi amacıyla geliştirilen açık kaynak kodlu ücretsiz bir yazılımdır. İnterferogramların oluşturulması ve topoğrafik

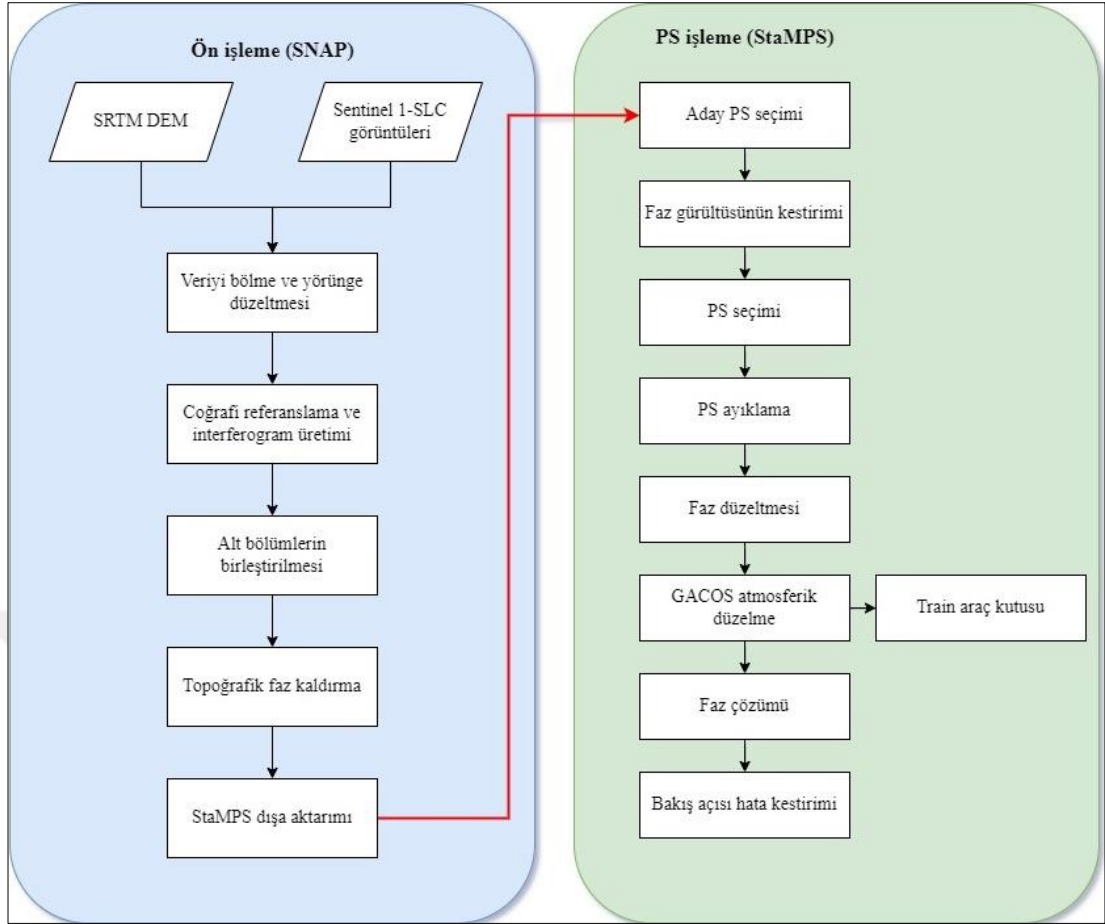
fazın kaldırılması SNAP yazılımı ile PSInSAR analizleri ise StaMPS yazılım paketi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hooper vd. (2007) tarafından önerilen StaMPS, diğer PSInSAR tekniklerinin kısıtlamalarına yönelik geliştirilen ve yeryüzünde meydana gelen kabuk hareketlerinin tespit edilmesinde ve izlenmesinde sıklıkla kullanılan çok zamanlı bir InSAR yöntemidir. Bu yöntem, binalar ve köprüler gibi insan yapımı hedeflerin bulunmadığı arazi yapılarında düşük faz değişimlerine sahip pikselleri tespit etmek için interferometrik fazın uzamsal korelasyonunu kullanmaktadır (Hooper vd., 2007; Dwivedi vd., 2017).

Genel olarak StaMPS analizleri dört ana adımdan oluşur; interferogram üretimi, PS seçimi, faz açma ve atmosferik filtreleme. İlk olarak SAR veri setinde uygun alt şerit (Interferometric Wide swath-IW) ve patlamalar (burst) seçilerek bunlara hassas yörünge bilgileri uygulanır. Daha sonra geometrik ve zamansal baz uzunlukları dikkate alınarak bir ana (master) görüntü seçilir ve tüm ikincil (slave) görüntüler, bu ana görüntüye eşleştirilir (Coregistration). Eşleştirme işleminden sonra interferogramlar üretilerek topoğrafik faz bileşeni kaldırılır ve StaMPS analizine hazır dosyalar elde edilir. Buraya kadar yapılan tüm işlem adımları SNAP'te gerçekleştirilmektedir. İkinci adımda aday PS noktaları genlik dağılım indeksine göre seçilir ve her bir piksel için faz gürültüsü tahmin edilerek elimine edilir. Üçüncü adımda aday PS noktaları tahmin edilen ve çıkarılan gürültü özelliklerine göre filtelenir ve böylece PS noktaları her bir interferogramdaki her piksel için genlik ve faz analizine dayalı olarak belirlenir. Daha sonra piksellerin sarılmış fazı (wrapped phase) uzaysal korelasyonlu bakış açısı (SCLA) hatası düzeltilir ve ardından faz açma işlemi gerçekleştirilir. Son adımda ise atmosferik filtreleme yapılarak ilgilenilen bölgeye ait LOS doğrultusundaki yer değiştirme miktarı elde edilir (Gündüz vd., 2023).

Tez çalışması kapsamında atmosfer etkileşimlerinin neden olduğu hataları elimine etmek için GACOS troposferik gecikme ürünlerini kullanılmıştır. Haziran 2017'de Newcastle Üniversitesi (İngiltere) tarafından geliştirilen GACOS, sayısal hava durumu modellerine dayanmaktadır (Xiao vd., 2021). GACOS, gerçek zamanlıya yakın kullanılabilirlik, kullanım kolaylığı ve ücretsiz olması gibi avantajları sayesinde birçok araştırmacı tarafından atmosferik etkileşimlerin etkisini azaltmak veya ortadan

kaldırmak için sıklıkla kullanılmaktadır (Albino vd., 2019; Araya ve Biggs, 2020; Murray vd., 2019; Vaka vd., 2021; Wang vd., 2021).

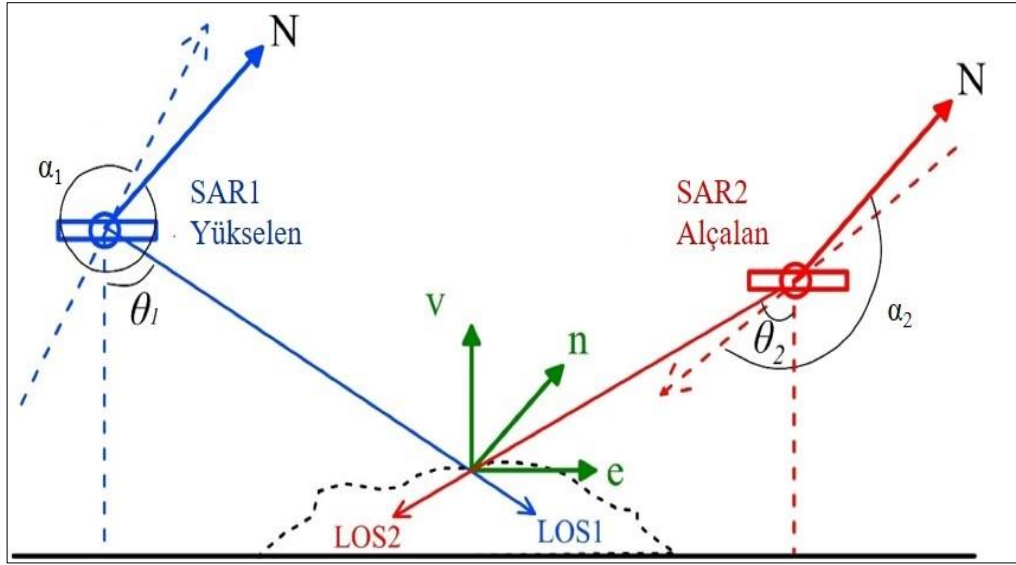
GACOS gecikme ürünlerinin işlenmesinde Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts-ECMWF) tarafından oluşturulan yüksek çözünürlüklü hava modelleri SRTM DEM (90 m, S60-N60) ve ASTER GDEM (90 m, N60-N83, S60-S83) kullanmaktadır. GACOS, katmanlı ve türbülanslı bileşenleri, troposferik gecikmelerden ayırmak için yinelemeli troposferik ayrıştırma modeli kullanır ve yüksek uzaysal çözünürlüklü zenit troposferik gecikme (Zenith Tropospheric Delay-ZTD) haritaları oluşturulur (Xiao vd., 2021). Daha sonra farklı tarihlerde elde edilen ZTD haritaları, LOS doğrultusuna dönüştürülerek faz düzeltmesi yapılmış olan interferogramlara uygulanır. Son adımda ise SCLA hatası ortadan kaldırılır ve bunun sonucunda LOS doğrultusundaki deformasyon haritaları ve zaman serileri üretilir. GACOS tabanlı atmosferik düzeltme yaklaşımı, Bekaert vd. (2015) tarafından geliştirilen ve ücretsiz bir modül olan TRAIN araç kutusu yardımıyla uygulanmıştır. Tez çalışması kapsamında SNAP, StaMPS ve TRAIN aracılığıyla gerçekleştirilen PSInSAR analizinin iş akış şeması Şekil 3.17’de verilmiştir.



Şekil 3.17. PSInSAR işlem adımları (Gündüz vd., 2023'ten Türkçeleştirilerek).

3.7 Yatay ve Düşey Yöndeki Hareketlerin Belirlenmesi

LOS doğrultusunda elde edilen yüzey deformasyonları, yükselen ve alçalan uydu geçişleri sayesinde yatay ve düşey bileşenlerine ayırabilmektedir. Yükselen ve alçalan yörüngelerdeki SAR görüntüleme geometrisi ve LOS doğrultusundaki deformasyonlar ile 3B hareket bileşenleri arasındaki ilişkiyi tasvir eden görsel Şekil 3.18'de verilmiştir.



Şekil 3.18. Yükselen ve alçalan yörüngede SAR görüntüleme geometrisi ve LOS doğrultusundaki yer değişimleri ile 3B hareket bileşenleri arasındaki yansıtma ilişkisi (Dai vd., 2015'ten Türkçeleştirilerek).

SAR uydularının kutuplara yakın yörüngelerde (kuzey-güney yönüne paralel) hareket etmesi ve yeryüzünü küçük geliş açılarıyla aydınlatması sebebiyle LOS doğrultusundaki deformasyonlar Kuzey-Güney yönlü hareketlere daha az duyarlıdır (Mancini vd., 2021; Pepe ve Calò, 2017). Bu nedenle yatay bileşen Doğu-Batı yönünde olup bu tez çalışması kapsamında Kuzey-Güney yönlü hareketler ihmal edilmiştir. Yukarı-Aşağı (düşey) ve Doğu-Batı (yatay) yönlerdeki deformasyon bileşenleri denklem 3.24 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\begin{bmatrix} d_{LOS^{yük}} \\ d_{LOS^{alç}} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} d_d \\ d_y \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$A = \begin{bmatrix} \cos\theta_{yük} & -\cos\alpha_{yük}\sin\theta_{yük} \\ \cos\theta_{alç} & -\cos\alpha_{alç}\sin\theta_{alç} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Burada; $d_{LOS^{yük}}$ ve $d_{LOS^{alç}}$ yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen LOS doğrultusundaki deformasyonu, d_d ve d_y düşey ve yatay yöndeki deformasyon bileşenlerini α ve θ ise geliş ve azimut açılarını temsil etmektedir (Motagh vd., 2017).

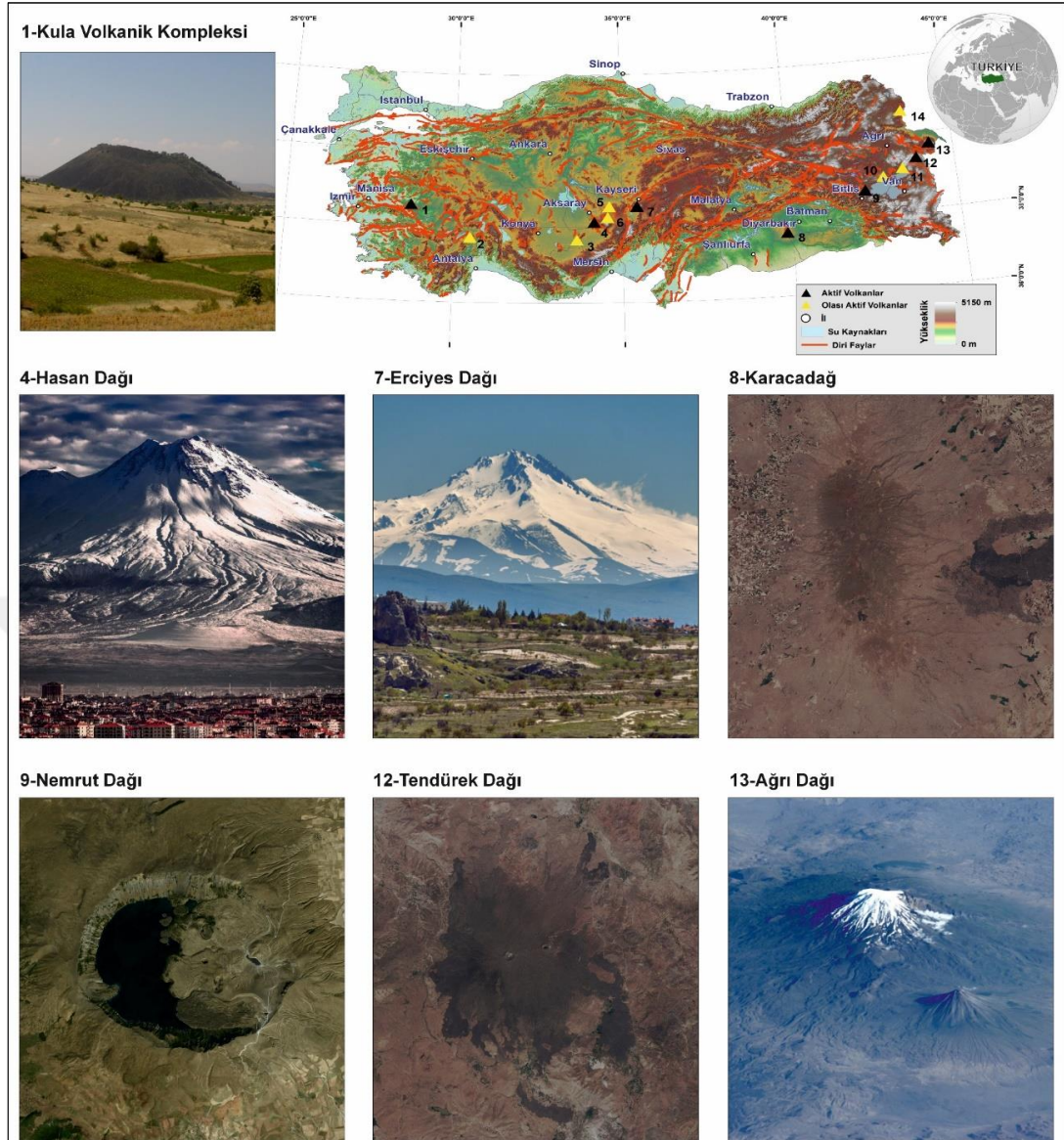
4. ÇALIŞMA ALANI VE KULLANILAN VERİLER

Tez çalışması kapsamında Türkiye’de yer alan 7 aktif volkanik sistem çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Bölüm 4.1’de 7 volkanik sistemin konumsal önemi ve jeolojik özellikleri verilmiş ve Bölüm 4.2’de ise tez çalışması kapsamında kullanılan SAR ve GNSS verileri sunulmuştur.

4.1 Çalışma Alanı ve Jeolojik Özellikleri

Türkiye, Alp-Himalaya orojenik kuşağının üzerinde yer almakta olup bu kuşak Dünya çapında sismik ve aktif volkanik faaliyetler açısından önemli bir kuşaktır. Türkiye’nin üzerinde yer aldığı Anadolu levhası, Avrasya ve Arap levhaları arasındaki çarpışma zonunda konumlanmaktadır. Paleo ve Neotetis Okyanusları tarafından çevrelenmiş olan bu levha, çok sayıda kıtasal parçadan oluşmaktadır (Gürer ve Aldanmaz, 2002). Bu levha hareketleri, günümüzden yaklaşık 65 milyon yıl önce Neotetis Okyanusu’nun kuzey kolunun kapanmasına ve Anadolu’da kenetlenmesine yol açmıştır (Şengör ve Yılmaz, 1981). Bu dönemden günümüze kadar süren jeodinamik olaylar sonucunda Anadolu levhasında farklı morfolojik, yapısal, jeokimyasal ve petrografik özelliklere sahip volkanik sistemler gelişmiştir (Ekici, 2023). Oluşan bu volkanik yapılar 250.000 km²’nin üzerinde bir alan kaplamakta ve bu da Türkiye’nin toplam yüz ölçümünün yaklaşık dörtte birini oluşturmaktadır (Ulusoy, 2008).

Volkanik tehdit açısından 95 ülke arasında 14. sırada yer alan Türkiye’de (Brown vd., 2015) Global Volkanizma Programına göre son 10.000 yılda 37 volkanik patlama meydana gelmiştir (URL-1). Bu patlamalara sebep olan diğer bir ifade ile Türkiye’de Holosen boyunca faaliyet gösteren 7 volkanik sistem bulunmaktadır. Bunlar batıdan doğuya doğru Kula Volkanik Kompleksi, Hasan Dağı, Erciyes Dağı, Karacadağ, Nemrut Dağı, Tendürek Dağı ve Ağrı Dağı’dır. Ayrıca Türkiye’de 7 adet (Gölcük, Karapınar Volkanik Alanı, Gölüdağ, Acıgöl, Süphan Dağı, Girekol Tepe ve Kars Platosu) olası aktif volkanik sistem bulunmaktadır. Şekil 4.1’de aktif ve olası aktif volkanik sistemlerin Türkiye haritası üzerindeki konumu verilmiştir.



Şekil 4.1. Türkiye’de yer alan aktif ve olası aktif volkanik sistemler (1. Kula Volkanik Kompleksi (URL-5), 2. Gölcük, 3. Karapınar Volkanik Alanı, 4. Hasan Dağı (URL-6), 5. Gölüdağ, 6. Acıgöl, 7. Erciyes Dağı (URL-7), 8. Karacadağ (URL-8), 9. Nemrut Dağı (URL-9), 10. Süphan Dağı, 11. Girekol Tepe, 12. Tendürek Dağı, 13. Ağrı Dağı (URL-10), 14 Kars Platosu) (Diri faylar Emre vd., 2013’ten alınmıştır).

Türkiye’deki aktif volkanlar MS 1100 ile 1900 yılları arasında, her yüzyılda en az bir patlamaya sebep olmuştur; Nemrut Dağı (1111, 1441 ve 1692), Ağrı Dağı (1450, 1783 ve 1840) (Biggs vd., 2021; URL-1). 1855 yılında Osmanlı-Rus savaşı sırasında mevzide bulunan askerler tarafından kayıt altına alınan Tendürek Dağı’ndaki volkanik aktivite (gaz ve kül çıkışı) ise bilinen en son volkanik aktivitedir (Karakhanian vd., 2002). Türkiye geneline bakıldığında, her ne kadar günümüzde faaliyet gösteren (zaman zaman meydana gelen gaz çıkışları hariç) volkan olmasa da uzun süredir

uykuda olan volkanların yüzlerce yıl sonra bile aktivitelerine tekrar devam ettiği bilinmektedir (Barsotti vd., 2023); Fagradalsfjall volkanının 6000 yıl ve Eyjafjallajokull volkanının 200 yıl sonra patlaması. Dolayısıyla ölkemizde yaklaşık 170 yıldır bir volkanik patlama meydana gelmemiş olsa da söz konusu aktif volkanların izlenmesi ve yüzey deformasyonlarının takip edilmesi, hem doğal süreçlerinin anlaşılması hem de meydana gelebilecek olası tehlikelerin önüne geçilebilmesi açısından önem taşımaktadır. Bu nedenle çalışma alanı olarak Global Volkanizma Programına göre aktif olarak kabul edilen bu 7 volkanik sistem seçilmiştir.

Kula Volkanik Kompleksi, Manisa ve Uşak illeri arasında yer almakta olup 100 km çevresinde yaklaşık 2,5 milyon insan yaşamaktadır (URL-11). Bölgede yapılan radyometrik tarihlendirme çalışmaları ile Kula volkanitlerinin en yaşlı bazaltik ürünün $1,67 \pm 0,22$ milyon yıl ile 1,1 milyon yıl arasında ve en genç ürünün ise 3000 ile 900 yıl önce meydana geldiği tespit edilmiştir (Atıcı ve Türkecan, 2017; Borsi vd., 1972; Richardson-Bunbury, 1996; Ercan ve Öztunalı, 1982; Heineke vd., 2016). Kulanın kuzey batısında bulunan Demirköprü Baraj Gölü yakınlarındaki volkanik ürünler üzerinde insan ayak izleri bulunmuş olup bu izler özellikle volkanik faaliyetler ve insan yaşamının kesişmesi açısından büyük önem taşımaktadır (URL-11). Ulusoy vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada doğrudan ayak izlerinin üstünde yer alan volkanik malzemeden yaş tayini analizleri yapılmış ve ayak izlerinin $4,7 \pm 0,7$ bin yıllık olduğu dolayısıyla Bronz çağındaki (MÖ 3300 - MÖ 1200) insanlara ait olduğu belirtilmiştir.

Hasan Dağı, Aksaray ve Niğde illeri arasında bulunmakta ve 100 km çevresinde yaklaşık 1,5 milyon insan yaşamaktadır (URL-12). Hasan Dağı, Büyük Hasan (3253 m) ve Küçük Hasan (3069 m) Dağı olmak üzere iki zirveden oluşan ve Kapadokya Volkanik Kompleksi'nin gelişimde Erciyes Dağı'ndan sonra en etkin olmuş stratovolkandır (Atıcı ve Türkecan, 2017). Dağın çevresinde, farklı dönemlerdeki volkanik faaliyetlere bağılı olarak gelişmiş ürünler (farklı karakterde volkanik ve magmatik kayalar gibi) ve bunların oluşturduğu diğer volkanik yapılar (lav akma izleri, volkan konileri gibi) bulunmaktadır. Bölgedeki volkanik aktiviteye yönelik yapılan yaşlandırma çalışmalarına genel olarak bakıldığında 13 milyon yıl öncesinden Holosen dönemine kadar uzanan farklı yaş verilerinin mevcut olduğu görölmektedir (Aydar ve Gourgaud, 1998; Deniel vd., 1998; Schmitt vd., 2014). Bunlar içerisinde

bugüne kadar elde edilen en genç yaş bulgusu Schmitt vd. (2014) tarafından $8,97 \pm 0,64$ bin yıl olarak elde edilmiş ve bu yaş bulgusu Çatalhöyük'teki duvar resmi ile ilişkilendirilmektedir. Ayrıca bazı yörelerde kışın kar tutmama gözlemleri, yer yer görülen gaz çıkışları ve dağın altında (4-6 km) bir magma odasının varlığı Hasan Dağı'nın aktif bir volkan olduğunu teyit etmektedir (Aydar, 1992; Türkecan, 2015; Tank ve Karaş, 2020).

Erciyes Dağı, İç Anadolu bölgesinde yer almakta olup, 100 km çevresinde yaklaşık 2 milyon insan yaşamaktadır (URL-13). Erciyes Dağı, 2628 m yüksekliğindeki Koçdağ ve Erciyes Dağı'nın (3917 m) birlikte oluşturduğu ve taban çapı 35 km olan devasa bir stratovolkandır (Yurteri, 2018). Sistemdeki ilk volkanik süreçler Koçdağ'ın oluşumunu ve patlama sonrası kalderasının yıkılmasını içerir. Kuvaterner periyodunda ise günümüzde de var olan Erciyes Dağı oluşmuştur. Bu nedenle sistemin volkanolojik gelişiminin Pliyosen - Kuvaterner zaman diliminden tarihsel zamanlara kadar devam ettiği söylenebilir (Yurteri, 2017). Erciyes Dağına ait volkaniklerde yapılan yaş ölçümlerine göre volkanik faaliyetin en az 3 milyon yıl boyunca meydana geldiğini ve volkanın en genç ürününün $7,2 \pm 0,7$ bin yıl önce oluştuğunu göstermektedir (Şen vd., 2003; Yurteri, 2018). Ayrıca M.Ö 40 yıllarında yaşamış olan Strabon, Erciyes volkanının alev, duman ve lav çıkardığını yazmıştır (Yurteri, 2017). Hem tarihsel kayıtlar hem de holosen dönemdeki genç ürünlerin varlığı Erciyes Dağı'nın aktif olduğunu ve izlenmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Karaca Dağ, Güneydoğu Anadolu bölgesinde yer almakta olup 100 km çevresinde yaklaşık olarak 2,5 milyon insan yaşamaktadır (URL-14). Üst Miyosen'de başlayarak tarihsel zamanlara kadar volkanik etkinliğini sürdüren (Çelik, 2022; Lustrino vd., 2010; Türkecan, 2017) Karaca Dağ (1957 m) kalkan tipi bir volkandır. Volkanın oluşumu ve jeolojik gelişimine yönelik yapılan çalışmalarda, Karacadağ meydana gelen Kuvaterner etkinliğin, 1,9 milyon yıl önce başladığı ve günümüzden yaklaşık 100.000 yıl öncesine kadar ürünler verdiği tespit edilmiştir (Atıcı ve Türkecan, 2017; Bridgland vd., 2007; Notsu vd., 1995; Westaway vd., 2009). Ayrıca volkanın doğu kanadındaki lavların birkaç bin yaşında olabileceğini öne sürülmektedir (Pearce vd., 1990).

Nemrut Dağı, Doğu Anadolu bölgesinde yer almakta olup 100 km çevresinde yaklaşık 1,5 milyon insan yaşamaktadır (URL-15). Eliptik bir zirve kalderasına (8,5x7 km)

sahip olan Nemrut (2948 m) stratovolkan tipi bir volkandır (Çubukçu vd., 2012). Volkanın evrimi beş aşamada incelenmiş ve en eski volkanitlerin $1,01 \pm 0,04$ milyon ile 80 ± 20 bin yıl önce meydana geldiği radyometrik tarihlendirme çalışmalarıyla tespit edilmiştir (Aydar vd., 2003; Çubukçu vd., 2012; Ulusoy vd., 2012; Yılmaz vd., 1998). Buna ek olarak kaldera içinden alınan örneklerden yapılan yaş tayini $0,02 \pm 0,01$ milyon yıl ile <10 bin yıl arasında değişmektedir (Aydar vd., 2003; Nagao vd., 1989). Volkanın en son patlamasının 1441 yılında meydana geldiği bilinse de 1597 yılında yazılan “Şerefname” adlı bir kitapta Nemrut Dağı’nın patladığı ve aktif olduğu bildirilmektedir (Aydar, vd., 2003).

Tendürek Dağı, Van ve Ağrı illeri arasında bulunmakta ve 100 km çevresinde yaklaşık 2 milyon insan yaşamaktadır (URL-16). Tendürek Dağı, doğrultu atımlı Balık Gölü Fay zone içerisinde yer alan ve iki adet koniye (Büyük Tendürek-3533m, Küçük Tendürek-3291m) sahip Kuvaterner yaşlı kalkan tipi bir volkandır (Ulusoy, 2016; Yılmaz vd., 1998). Beş ana evrede oluştuğu belirtilen Tendürek volkanının ürünlerinin yaşları Üst Kretase’den Kuvaterner’e kadar değişmektedir (Ünal, 2018; Yılmaz vd., 1998). Tendürek volkanında son püskürme 2500 yıl önce gerçekleşmiş olup, 1855 yılında volkanda gaz ve kül çıkışının olduğu belirtilmiştir (Karakhanian vd., 2002). Ayrıca kraterlerin kenarındaki çukurlardan yaklaşık 50°C sıcaklıkta su buharı ve çeşitli volkanik kökenli gazlar çıktığı da rapor edilmiştir (Ercan, 1986; Nagao vd., 1989; Pamir, 1951; Ünal, 2018).

Ağrı Dağı, Doğu Anadolu bölgesinde yer almakta olup 100 km çevresinde yaklaşık 3 milyon insan yaşamaktadır (URL-17). Volkan, tipik bir stratovolkandır ve Büyük Ağrı (5130 m) ve Küçük Ağrı (3896 m) Dağı olmak üzere iki ana koniden oluşmaktadır (Yılmaz vd., 1998). Dört ana evrede oluşan volkanın, koni gelişimi öncesi ilk ürünlerinden itibaren yapılan yaşlandırma çalışmalarına genel olarak bakıldığında 1,51 milyon yıl öncesinden 20.000 yıl öncesine kadar uzanan farklı yaş verilerinin mevcut olduğu görülmektedir (Karaoğlu vd., 2017; Pearce vd., 1990; Sanver, 1968; Yılmaz vd., 1998; Notsu vd., 1995). Ağrı Dağı’nın son tarihsel aktivesi ise 1840 yılında meydana gelen piroklastik akıştır (Karakhanian vd., 2002; Karaoğlu vd., 2017). Ayrıca volkanın yüzeyden 20-30 km derinlikte bir magma odasının bulunması (Karaoğlu vd., 2017), Ağrı Dağı’nın aktif bir volkan olduğunu ve uzun süreli izlenmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

4.2 Kullanılan Veriler

Tez çalışması kapsamında SAR uydu görüntüleri, GACOS gecikme ürünleri ve Hasan Dağı'na tesis edilen 3 adet sabit GNSS istasyonuna ait veriler kullanılmıştır.

4.2.1 SAR verileri

Tez çalışması kapsamında ESA ve Avrupa Komisyonu'nun ortak girişimi olan ve C bandında (~5,6 cm dalga boyu) algılama yapan Sentinel-1 SAR veri setleri kullanılmıştır. Sentinel-1 verileri, uydunun 2014 yılında fırlatılmasından bu yana ESA'nın açık erişim portalından ücretsiz bir şekilde temin edilebilmektedir. Nisan 2016'da Sentinel-1B'nin fırlatılmasıyla Avrupa üzerinde 6 günde bir veri toplayan Sentinel-1, Sentinel-1B'nin Aralık 2021'de hasar görmesi nedeniyle bu tarihten itibaren sadece Sentinel-1A'dan veri temin edilebilmektedir. Çizelge 4.1'de Sentinel-1 uydusuna ait teknik detaylar verilmiştir.

Çizelge 4.1. Sentinel-1 uydusuna ait teknik bilgiler (URL-18).

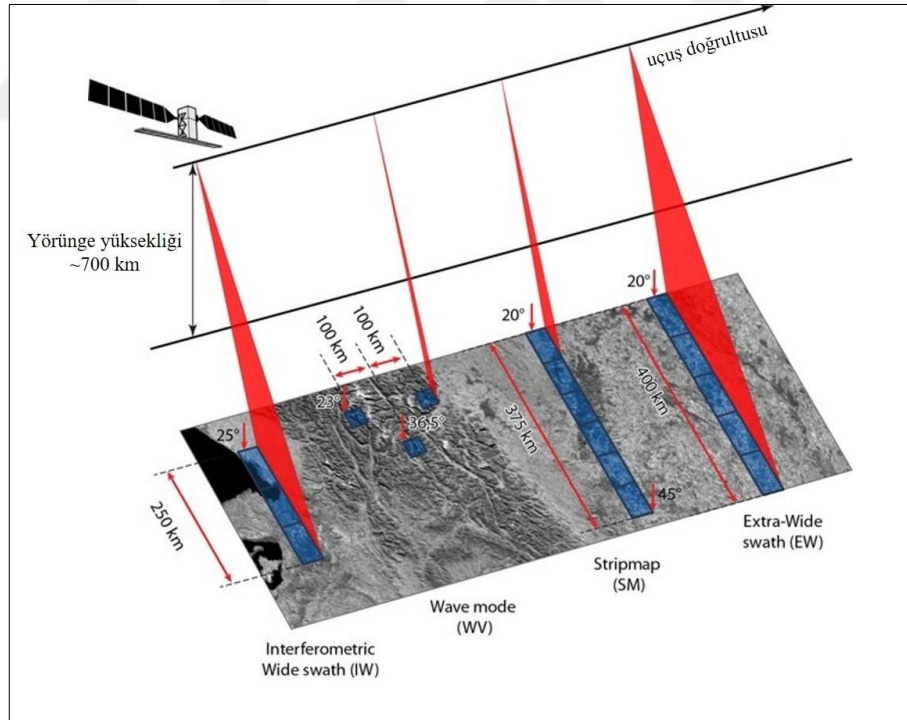
Sentinel-1	
Gözlem modu	IW
Yörünge	Güneş eş zamanlı
Yörünge yüksekliği	698 km
Mekânsal çözünürlük	5×20 m (azimut×menzil)
Zamansal çözünürlük	12 gün
Bant	C
Frekans	5,3 GHz
Polarizasyon	HH +HV, VV, VH
Dalga boyu (cm)	~5,6
Tarama genişliği	250 x 250 km
Bakış açısı	29,1 - 46
Kritik baz mesafesi	4500 km

Sentinel-1 sağlamış olduğu orta mekânsal çözünürlük, kısa tekrar ziyaret süresi (12 gün), gece ve gündüz her türlü hava koşulunda veri temin edilebilmesi gibi avantajları sayesinde InSAR analizlerinde kullanım alanı giderek artmaktadır. Sentinel-1 uydu görüntülerinin kullanım alanları;

- Yer kabuğu hareketlerinin belirlenmesi ve izlenmesi,
- Sayısal yükseklik modellerinin üretilmesi

- Petrol sızıntısının tespiti, deniz buzulunun izlenmesi, kıyı ve deniz rüzgârlarının ölçümü
- Deniz taşımacılığı bölgelerinin izlenmesi (gemi tespiti),
- Doğal afetlerin (orman yangını, deprem, sel, heyelan, volkanik faaliyetler vb.) izlenmesi
- Biokütle tahmini, yangın izi haritalama
- Toprak neminin belirlenmesi, bitki örtüsü, su ve toprak gibi farklı arazi örtülerini sınıflandırma ve izleme,
- İklim değişikliklerinin izlenmesi (Torres vd., 2012; URL-18).

Sentinel-1 uydusu, farklı çözünürlükte (5 m'ye kadar), farklı kapsama alanında (400 km'ye kadar) ve dört farklı alım modunda (Stripmap-SM, Interferometric Wide swath-IW, Extra-Wide swath-EW, Wave mode-WV) görüntü temin edebilmektedir (URL-19). Sentinel-1 uydusunun görüntü edinim modlarına ait görsel Şekil 4.2'de sunulmuştur.



Şekil 4.2. Sentinel-1 görüntü edinim modları (Çotar vd., 2016).

Çalışmada kullanılan Sentinel-1 verileri, Nisan 2019-Eylül 2023 tarihleri arasında yükselen ve alçalan edinim geometrilerinden, SLC formatında, IW modda ve WV polarizasyonlu olmak üzere “Copernicus Open Access Hub” internet portalı

aracılığıyla temin edilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında atmosferik etkilerin ortadan kaldırılması veya azaltılması için GACOS gecikme ürünleri kullanılmıştır. Her SAR verisine karşılık gelen GACOS gecikme ürünleri, çalışma alanı konumu ve SAR görüntü tarihleriyle birlikte GACOS web sitesinden (URL-20) temin edilmiştir.

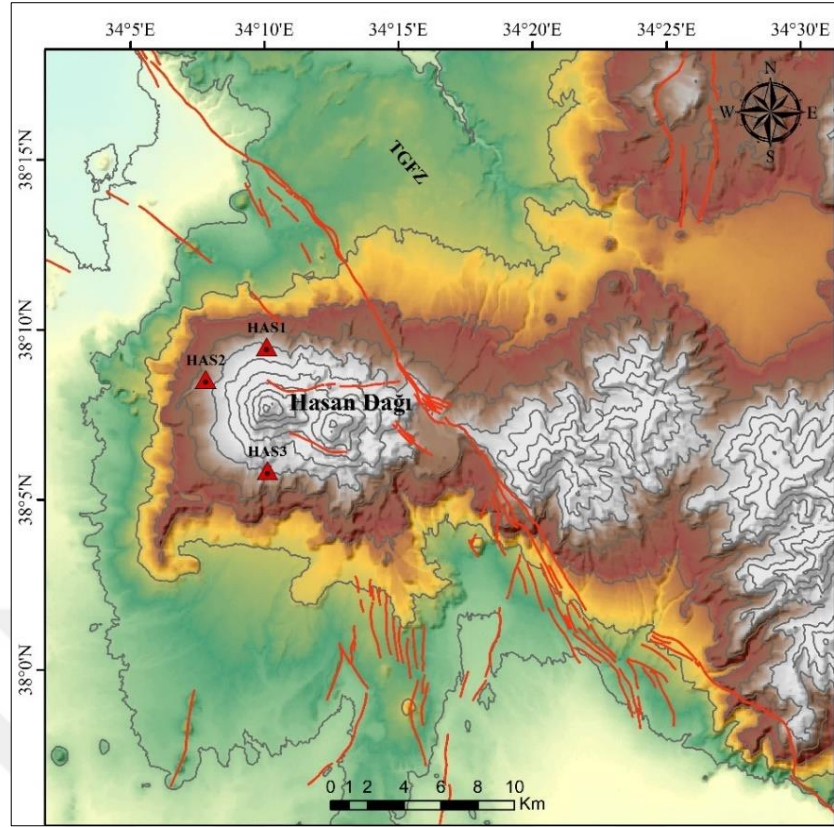
4.2.2 GNSS ölçüleri

GNSS tekniği ile volkanik alanlarda magma odasında meydana gelen basınç değişikliklerinin neden olduğu depremler ve yatay ile düşey yönlerdeki yüzey deformasyonları çevrimiçi izleme ağları kullanılarak uzun süreli gözlemler sonucunda belirlenebilmektedir. Bu nedenle volkanik alanlarda meydana gelen yüzey deformasyonlarını izleme uygulamalarını daha yönetilebilir hale getirmek amacıyla günümüzde tüm volkan yerine volkanın üzerinde belirli aralıklarla tesis edilmiş sabit noktalardan kurulu ağların geometrisinden elde edilen bilgilerden faydalanılmaktadır (Gezgin vd., 2022). Bu kapsamda, Hasan Dağı'na ait yatay ve düşey yönlerde gerçekleşen volkanik ve tektonik deformasyonların kesintisiz ve çevrimiçi olarak izlenmesi amacıyla bölgeye 121Y401 no'lu TÜBİTAK projesi kapsamında 3 adet sabit GNSS istasyonu Aralık 2022 tarihinde tesis edilmiş ve istasyonlar bu tarihten itibaren ölçülerine devam etmektedir. Sabit GNSS istasyonları volkanın kuzey, güney ve batısında olmak üzere 5 m x 5 m ebatlarında kenarlarından en az 1 m taşacak şekilde tesviye edilmiş zemine, kabin temeli, beton pilye, kabin, kuyu platformu ve tel çit duvarlarını içerisine alacak şekilde tesis edilmiştir (Şekil 4.3).



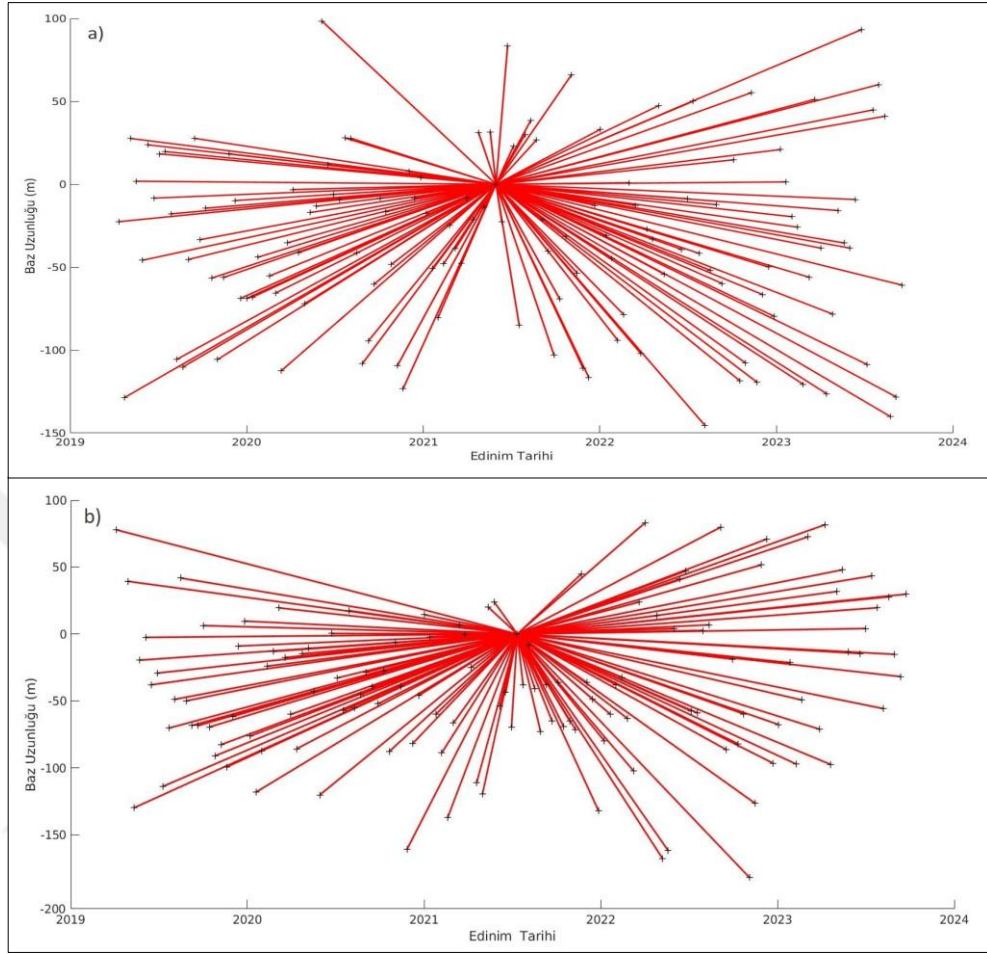
Şekil 4.3. Tesisi tamamlanan THKA-HAS-1 (a), THDI-HAS-2 (b) ve THKR-HAS-3 (c) sabit GNSS istasyonları.

İstasyonların adlandırılmasında uluslararası standartlara uygun olması ve RINEX verilerinin değerlendirme aşamasında isimlendirme kolaylığı açısından 4 haneli bir isimler tercih edilmiştir. İstasyonlar yakınlarında bulunan yerleşim yerlerine göre ve değerlendirme yazılımında IGS (International GNSS Service) noktalarıyla isim benzerliğini önlemek amacıyla, Aksaray Karbeyaz Otel mevkiinde bulunan istasyon için THKA (T-Türkiye, H- Hasan Dağı, KA- Karbeyaz Otel-HAS-1), Aksaray Dikmen köyü mevkiinde bulunan istasyon için THDI (T-Türkiye, H- Hasan Dağı, DI- Dikmen-HAS-2) ve son olarak Niğde, Karakapı köyü mevkiinde bulunan istasyon için THKR (T-Türkiye, H- Hasan Dağı, KR- Karakapı-HAS-3) olarak isimlendirilmişlerdir (Şekil 4.4).



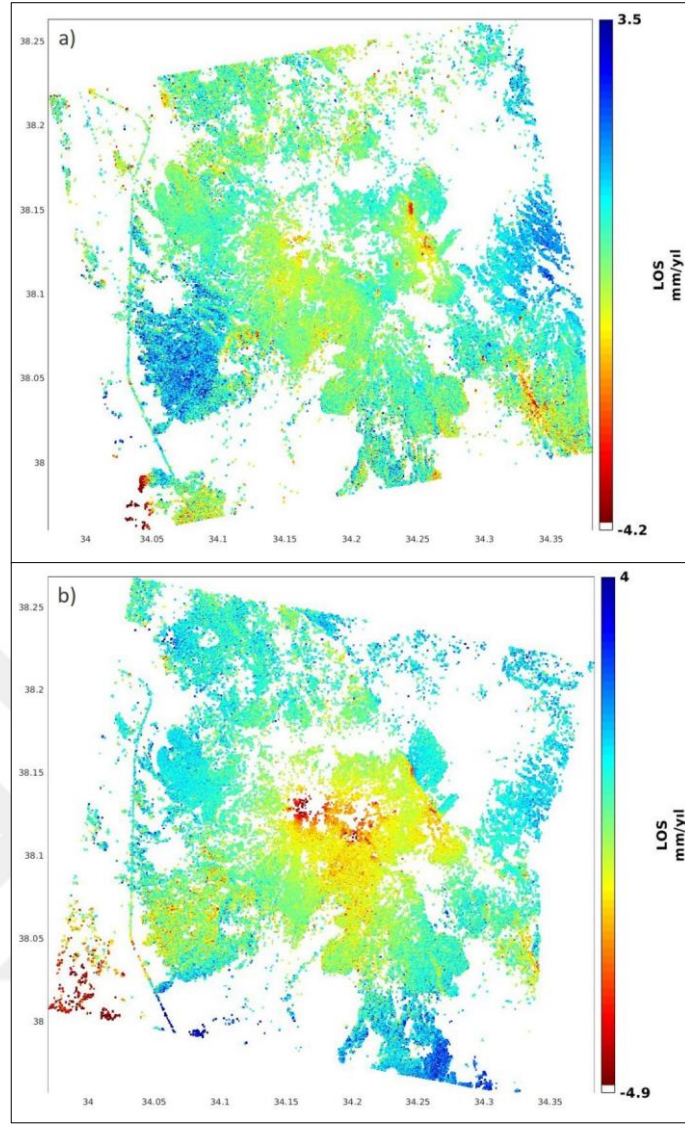
Şekil 4.4. Hasan Dağı'na tesis edilen GNSS noktaların konumu (Diri faylar Emre vd., 2013'ten alınmıştır).

gösterilmiştir. Yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen görüntülerin baz mesafe şemalarına ilişkin görseller Şekil 5.2’de verilmiştir.



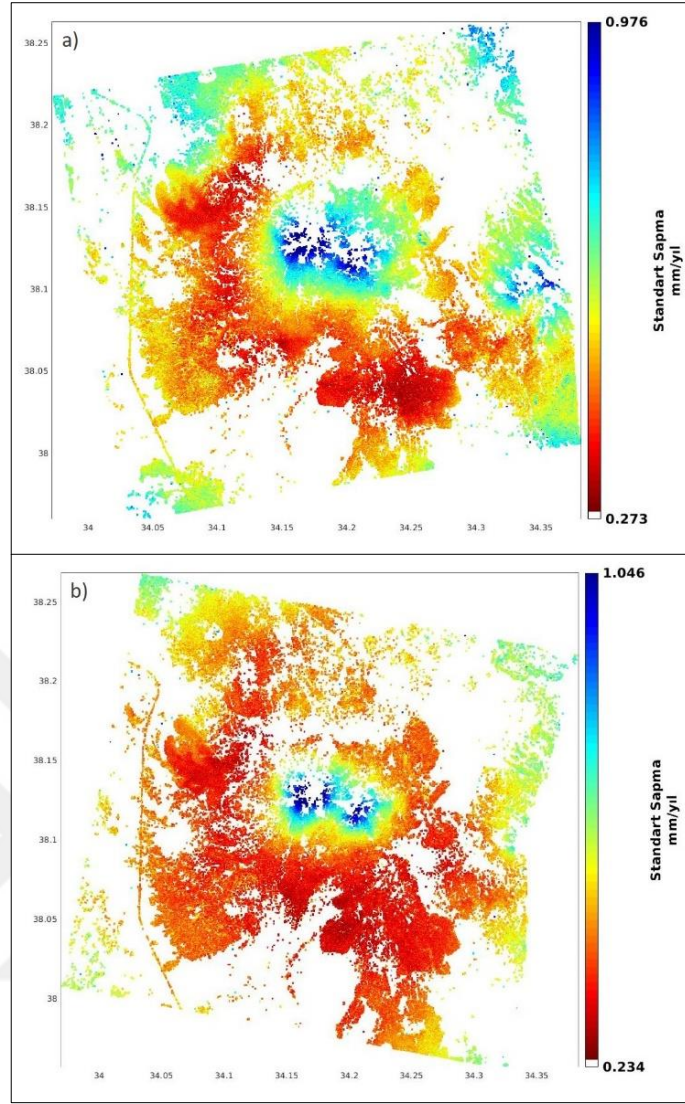
Şekil 5.2. Hasan Dağı’nda kullanılan Sentinel-1 görüntülerinin yükselen (a) ve alçalan (b) yörüngelerdeki baz mesafe şemaları.

Sentinel-1 görüntüleri ve GACOS gecikme ürünleri kullanılarak üretilen ortalama deformasyon hız haritaları Şekil 5.3’te verilmiştir. Ortalama deformasyon hız haritalarında kırmızı renkli noktalar uydudan uzaklaşan alanları, sarı renkli noktalar stabil alanları ve mavi renkli alanlar ise uyduya yaklaşan alanları göstermektedir. Deformasyonlar LOS doğrultusundaki hareketi temsil etmekle birlikte yükselen yörüngede elde edilen deformasyon değerleri -4,2 mm/yıl ile 3,5 mm/yıl aralığında değişirken, alçalan yörüngede ise -4,9 mm/yıl ile 4 mm/yıl aralığında değişmektedir (Şekil 5.3).



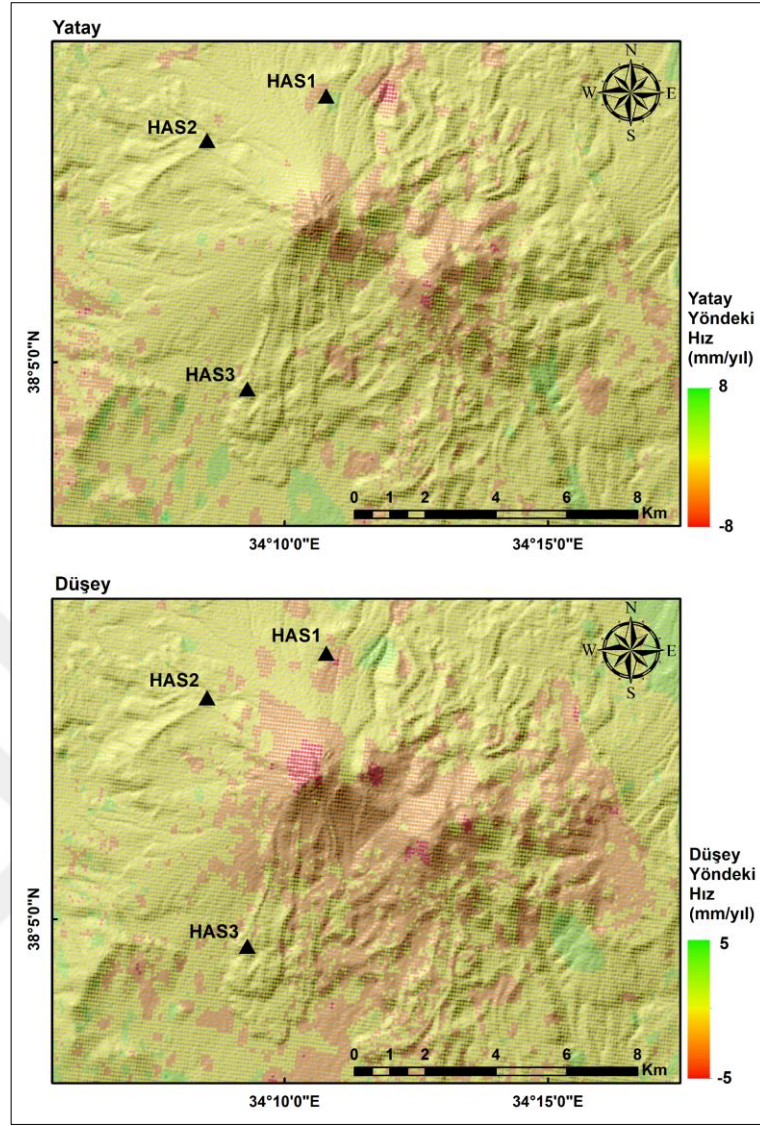
Şekil 5.3. Hasan Dağı'na ait yükselen (a) ve alçalan (b) yörüngelerden elde edilen ortalama deformasyon hız haritaları.

Şekil 5.3'te her iki yörüngeden elde edilen ortalama deformasyon hız haritaları özellikle Hasan Dağı'nın zirvesinde negatif değerlere sahip PS noktalarının varlığını göstermektedir. Şekil 5.3'te verilen ortalama deformasyon hız haritalarına ait standart sapma değerleri yükselen ve alçalan yörüngeler için Şekil 5.4'te verilmiştir. Yükselen yörüngede standart sapma değerleri 0,273 mm/yıl ile 0,976 mm/yıl aralığında değişirken, alçalan yörüngede ise 0,234 mm/yıl ile 1,046 mm/yıl aralığında değişmektedir (Şekil 5.4).



Şekil 5.4. Hasan Dağı'na ait yükselen (a) ve alçalan (b) yörüngelerden elde edilen standart sapma haritaları.

Yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen LOS doğrultusundaki sonuçlar benzer bir deformasyon modeli göstermekle birlikte çalışma alanında baskın deformasyon bileşenin tespit edilebilmesi ve PSInSAR ile GNSS tekniklerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılabilmesi amacıyla yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen PS noktalarına ait deformasyon bilgileri, denklem 3.24 ve 3.25 yardımıyla bileşenlerine ayrılmıştır. Şekil 5.5'te çalışma alanında meydana gelen yatay ve düşey deformasyon bileşenlerine ait görseller sunulmuştur.



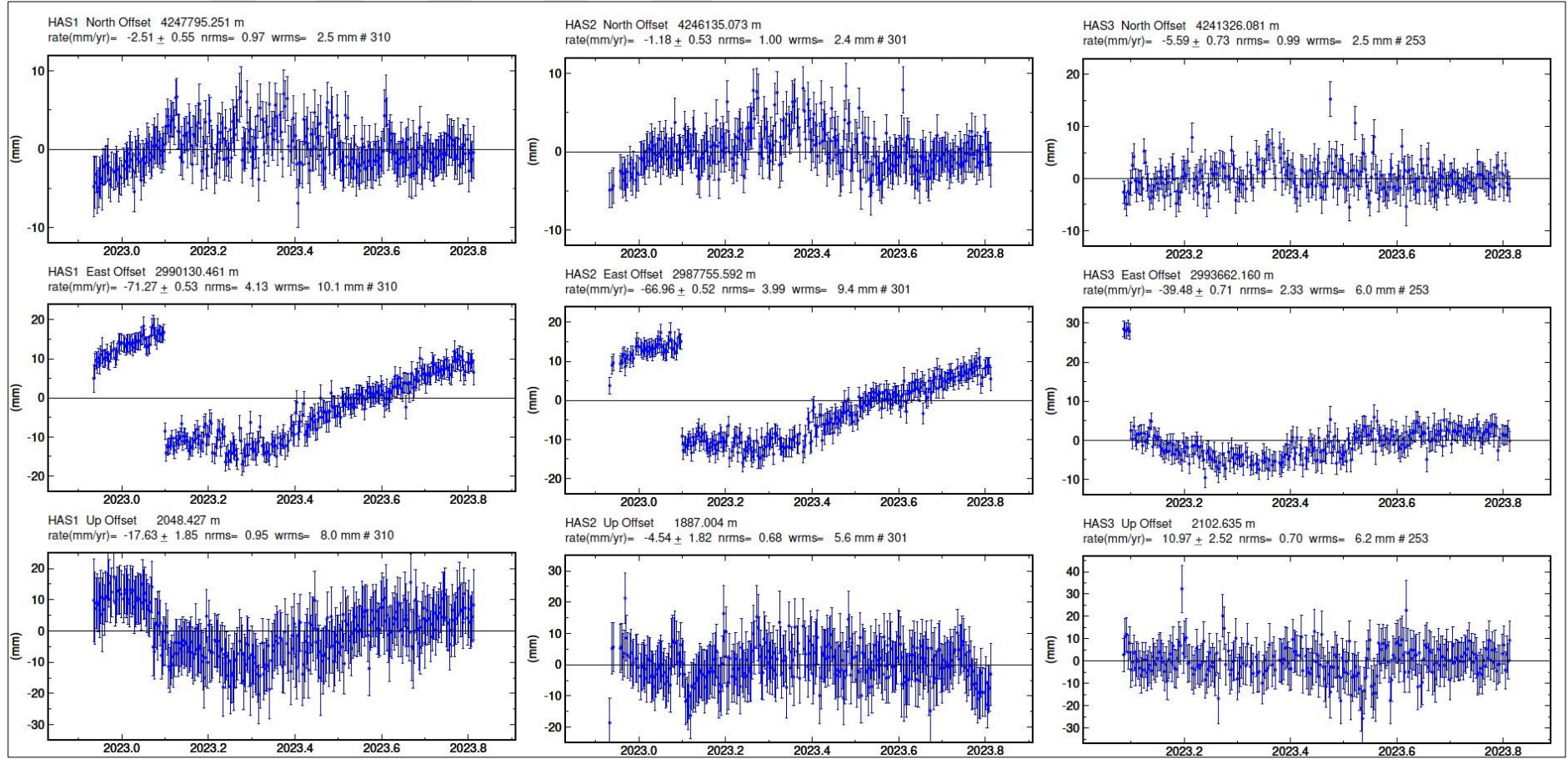
Şekil 5.5. Hasan Dağı'na ait LOS doğrultusundaki sonuçlardan elde edilen yatay ve düşey deformasyon bileşenleri.

Şekil 5.5'te verilen deformasyonun bileşenleri, yatay deformasyonun -8 mm/yıl ile 8 mm/yıl arasında, düşey deformasyonun (Doğu-Batı yönlü) ise -5 mm/yıl ile 5 mm/yıl arasında olduğunu göstermektedir. Yatay ve düşey deformasyon bileşenleri, Hasan Dağı'nın zirvesinde 0 mm ile 5 mm arasında çökme göstermesi dışında çalışma alanında oldukça küçük değerlerde meydana gelen deformasyonları temsil etmektedir. Çalışma alanı ile ilgili literatür incelendiğinde, farklı InSAR teknikleri kullanılarak Hasan Dağı'nda meydana gelen yüzey deformasyonlarının araştırıldığı çalışmalarda da benzer sonuçlara ulaşılmış ve Hasan Dağı'nda InSAR teknikleri kullanılarak cm düzeyinde bir deformasyon tespit edilememiştir (Biggs vd., 2021; Doğru vd., 2023).

5.2. Hasan Dağı PSInSAR Sonuçlarının GNSS Sonuçları ile Karşılaştırılması

PSInSAR ve GNSS tekniğinin karşılaştırılması amacıyla Hasan Dağı'na tesis edilen GNSS istasyonlarından elde edilen 30 sn'lik veriler GAMIT/GLOBK v10.71 yazılım takımı kullanarak değerlendirilmiş ve çalışma alanına ait GNSS hızları elde edilmiştir. Aralık 2022 tarihinde tesis edilen HAS-1, HAS-2 ve HAS-3 GNSS istasyonlarına ait Aralık 2022 - Eylül 2023 tarihli uzun dönemli zaman serilerine ait görseller Şekil 5.6'da sunulmuştur.





Şekil 5.6. HAS-1, HAS-2 ve HAS-3 GNSS noktalarının uzun dönem zaman serileri (ITRF14).

Tesis edilen GNSS istasyonlarındaki verilerden, Şubat 2023'te meydana gelen Kahramanmaraş depremlerinin çalışma alanında oluşturduğu ko-sismik etkileri elimine etmek ve post-sismik etkiyi minimuma indirmek amacıyla Nisan-Ekim 2023 döneminde elde edilen veriler PSInSAR tekniğinden elde edilen bulgularla karşılaştırılmıştır. Ayrıca Nisan-Eylül 2023 tarihleri arasındaki GNSS istasyonlarına ait yer değiştirme grafiklerinden kestirilen hız değerlerine t testi uygulanarak ($\alpha = 0,05$ güven aralığında, $f=174$ serbestlik derecesine göre t test değeri; HAS-1, HAS-2 ve HAS-3 için 1,96) anlamlı hız değerleri elde edilmiştir. Sabit GNSS istasyonlarından elde edilen hızlarının istatistiksel değerlendirme sonuçları Çizelge 5.1'de sunulmuştur.

Çizelge 5.1. GNSS ölçülerinden elde edilen hızlarının istatistiksel değerlendirme sonuçları.

	Hız (mm/yıl)			Standart Sapma (mm/yıl)			Test Değeri (T)			$t_{f,1-\alpha/2}$
İstasyon	$V_{doğu}$	V_{kuzey}	$V_{düşey}$	S_{vd}	S_{vk}	S_{vy}	T_{vd}	T_{vk}	T_{vd}	
HAS-1	-5,19	12,69	8,05	0,82	0,88	2,98	6,33	14,42	2,70	1,96
HAS-2	-5,80	13,26	-8,15	0,79	0,83	2,87	7,34	15,98	2,83	1,96
HAS-3	-4,75	11,66	11,23	0,96	1,01	3,57	4,95	11,55	3,18	1,96

GNSS ölçülerinden elde edilen yatay ve düşey hızlarının anlamlı olduğu tespit edildikten sonra ölçülerde yer alan periyodik değişimlerin hesaplanan hız değerlerine etkisini tespit edebilmek için hem periyodik etki içeren hem de periyodik etki giderilen ölçülere, $y = a + bt$ (y ölçüleri, a ve b lineer fonksiyonun parametreleri, t ise gün biriminde zamanı temsil etmektedir) lineer fonksiyonu öngörülerek fonksiyonun a ve b parametreleri ve standart sapma değerleri En Küçük Kareler Yöntemi (EKKY) ile kestirilmiştir. Periyodik değişimler ise, Harmonik analiz ile hesaplanmış ve harmonik fonksiyondaki frekanslar, ölçülere uygulanan Lomb-Scargle yöntemi kullanılarak elde edilmiştir (Hastaoglu vd., 2023). Böylece elde edilen periyodik değişimler ölçülerden giderilmiştir. Ölçülerdeki periyodik etki içeren ve içermeyen fonksiyonlara ait b_1 ve b_2 parametreleri (standart sapmaları; S_{b1} ve S_{b2}) arasındaki farkın anlamlı olup olmadığı $f = f_1 + f_2$ (348) serbestlik derecesi ve $\alpha=0,05$ yanılma düzeyi için t- dağılımı ile test edilmiştir. Test süreci denklem 5.3 - 5.11 kullanılarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen değerler Çizelge 5.2'de sunulmuştur.

Çizelge 5.2. Periyodik etki giderilmiş ve giderilmemiş lineer fonksiyonun katsayıları, standart sapmaları ve test büyüklükleri.

İstasyon		b_1 (mm/yıl)	b_2 (mm/yıl)	S_{b1} (mm/yıl)	S_{b2} (mm/yıl)	t- büyüklüğü	Açıklama
HAS-1	Kuzey	-0,0297	-0,0305	0,0036	0,0030	0,1836	Anlamsız
	Doğu	-0,0647	-0,0629	0,0029	0,0020	0,5160	Anlamsız
	Yükseklik	0,0481	0,0507	0,0078	0,0054	0,2684	Anlamsız
HAS-2	Kuzey	-0,0335	-0,0336	0,0037	0,0025	0,0133	Anlamsız
	Doğu	-0,0701	-0,0691	0,0030	0,0025	0,2455	Anlamsız
	Yükseklik	-0,0245	-0,0318	0,0076	0,0061	0,7533	Anlamsız
HAS-3	Kuzey	-0,0302	-0,0299	0,0040	0,0026	0,0679	Anlamsız
	Doğu	-0,0608	-0,0597	0,0031	0,0026	0,2736	Anlamsız
	Yükseklik	0,0476	0,0481	0,0095	0,0066	0,0436	Anlamsız

Çizelge 5.2’de görüldüğü gibi, $t' < t_{f, 1-\alpha/2}=1,96$ olduğundan periyodik etki içeren ve içermeyen lineer fonksiyonlar arasındaki fark (b parametresi için) anlamsızdır. Lineer fonksiyondaki b parametresi zamana (t) bağlı ölçülerdeki artan veya azalan değişimi yani hız değerinin hesaplanmasında dikkate alınmaktadır. Bu bağlamda ölçülerdeki periyodik hareketlerin, hız değerine bir etkisinin ($\alpha = 0,05$ yanılma düzeyi için) olmadığı sonucuna varılabilir. Bu durumda HAS-1, HAS-2 ve HAS-3 GNSS istasyonlarından elde edilen bulgular;

- Düşey deformasyon değeri HAS-1’e göre 8,05 mm/yıl (Yükseklik), HAS-2 noktasında bu değer -8,15 mm/yıl ve HAS-3 noktasında ise 11,23 mm/yıl olduğu tespit edilmiştir.
- Doğu yönündeki yatay deformasyon değeri HAS-1 noktasında -5,19 mm/yıl, HAS-2 noktasında -5,8 ve HAS-3 noktasında ise -4,75 mm/yıl olduğu tespit edilmiştir.
- Kuzey yönündeki yatay deformasyon değeri HAS-1’e göre 12,69 mm/yıl, HAS-2’de 13,26 mm/yıl ve HAS-3 noktasında ise 11,66 olarak belirlenmiştir.

Sabit GNSS istasyonlarındaki hızların anlamlı ve periyodik etki içermediği tespit edildikten sonra GNSS ve PS-InSAR tekniklerinden elde edilen hızların karşılaştırılabilmesi amacıyla GNSS tekniğinden elde edilen hızların LOS doğrultusuna dönüşümü denklem 5.1 ve 5.2 yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

$$d_{LOS} = s^T \cdot D \quad (5.1)$$

$$s = (\sin\theta\sin\alpha - \sin\theta\cos\alpha \cos\theta)^T \quad (5.2)$$

Burada; d_{LOS} uydu bakış doğrultusundaki deformasyonu, s uydu birim vektörünü, D üç boyutlu yüzey deformasyonunu, α ve θ ise geliş ve azimut açılarını temsil etmektedir (Yang vd., 2019).

Her iki teknikten elde edilen bulguların karşılaştırılması işleminde Sentinel-1 uydusunun piksel çözünürlüğü 5 m x 20 m olması nedeniyle GNSS istasyonlarının tesis edildiği noktalar merkez alınarak 10 m yarıçaplı bir alan içerisinde kalan PS noktalarının ortalama deformasyon değerleri alınmıştır. LOS doğrultusuna dönüştürülen GNSS hızları ile PSInSAR LOS hızları arasındaki uyumu belirlemek için ise f ve t testleri uygulanmış ve uygulanan bu testlere ilişkin ayrıntılar aşağıda verilmiştir.

Birbirinden bağımsız olan iki değişkene ait (GNSS ve PSInSAR verileri); ölçü sayıları (n_1, n_2), bilinmeyen sayıları (u_1, u_2), kestirim değerleri (y_1, y_2) ve standart sapmaları (s_1, s_2) için serbestlik dereceleri denklem 5.3 ve 5.4 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$f_1 = n_1 - u_1 \quad (5.3)$$

$$f_2 = n_2 - u_2 \quad (5.4)$$

Beklenen değerlerin eşit olması durumunda; Sıfır hipotezi $H_0 = E(y_1) = E(y_2)$ kurularak denklem 5.5 yardımıyla test büyüklüğü hesaplanmaktadır.

$$t' = \frac{y_1 - y_2}{s_d} \quad (5.5)$$

Burada t' test büyüklüğünü, Y_i örneklere ait değerler kullanılarak elde edilen kestirim değerleri için rastgele değişkenleri, S_i ise bunlara ait standart sapma değerlerini temsil etmektedir. Birim ağırlıklı ölçüye ilişkin sonsal varyanslar için $s_i^2 = v_i^t P_i v_i / f_i$ sıfır hipotezinin ($H_0: E(s_1^2) = E(s_2^2)$) geçerli olması durumunda bu varyansların ağırlıklı ortalaması ve kestirim değerlerinin varyansları denklem 5.6-5.8 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$s_0^2 = \frac{f_1 s_1^2 + f_2 s_2^2}{f_1 + f_2} \quad (5.6)$$

$$s_1^2 = s_0^2 Q_{y_1 y_1}, s_2^2 = s_0^2 Q_{y_2 y_2} \quad (5.7)$$

$$s_d^2 = s_1^2 + s_2^2 = s_0^2(Q_{y1y1} + Q_{y2y2}) \quad (5.8)$$

$f=f_1+f_2$ serbestlik derecesi ve $1- \alpha$ yanılma düzeyine bağlı olarak $t' < t_{f, 1-\alpha/2}$ olması durumunda sıfır hipotezi kabul edilmektedir. Sıfır hipotezi geçerli değil veya $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$ olması durumunda ise test büyüklüğü,

$$s_d^2 = s_1^2 + s_2^2 = s_{01}^2 Q_{y1y1} + s_{02}^2 Q_{y2y2} \quad (5.9)$$

varyansı ve küçülen serbestlik derecesi,

$$f = \frac{1}{\frac{c^2}{f_1} + \frac{(1-c)^2}{f_2}} \quad (5.10)$$

$$c = \frac{s_1^2}{s_1^2 + s_2^2} \quad (5.11)$$

ile yaklaşık t-dağılımlıdır (Demirel, 2003; Poyraz, 2023). GNSS hızları ile PSInSAR LOS hızlarına ait istatistiksel değerlendirme sonuçları Çizelge 5.3'te sunulmuştur.

Çizelge 5.3. GNSS hızlarının PSInSAR-LOS doğrultusuna dönüşümü.

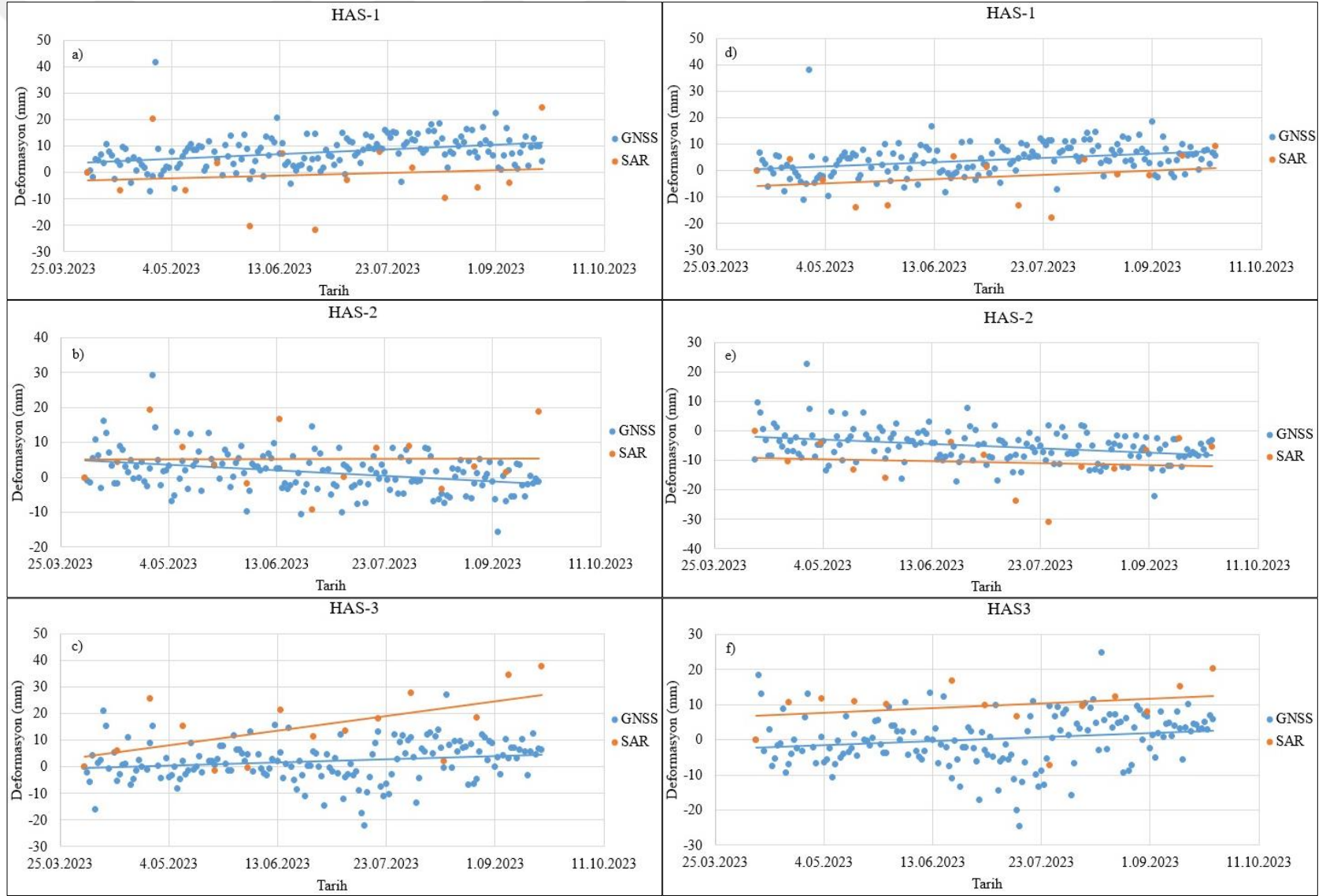
	LOS doğrultusuna dönüştürülmüş GNSS (mm/yıl)		PSInSAR LOS hızı (mm/yıl)		Hız farkı (mm)	Varyans Testi HAS-1 f sınırı: 1,306 HAS-2 f sınırı: 1,306 HAS-3 f sınırı: 1,306		Hız testi HAS-1 t sınırı: 1,96 HAS-2 t sınırı: 1,96 HAS-3 t sınırı: 1,96	
İstasyon	V	Std	V	Std	Vf	f test değeri	Karar	t-test değeri	Karar
HAS-1	5,07	3,21	0,48	0,54	4,59	47,84	Eşit değil	1,41	Eşit
HAS-2	-10,9	3,09	-0,38	0,66	10,52	29,45	Eşit değil	3,32	Eşit değil
HAS-3	8,39	3,83	-0,40	3,51	8,79	1,60	Eşit değil	1,69	Eşit

Çizelge 5.3 incelendiğinde HAS-1 noktasının LOS doğrultusundaki ortalama deformasyon hız değerinin 5,07 mm/yıl, HAS-2 noktasında bu değer -10,9 mm/yıl ve HAS-3 noktasında ise 8,39 mm/yıl olarak tespit edilmiştir (Çizelge 5.3). Ayrıca HAS-1, HAS-2 ve HAS-3 noktalarında dönüştürülmüş GNSS ve Sentinel-1 LOS hızlarının varyans testine göre eşit kabul edilemeyeceği tespit edilmiştir. Her iki teknikten elde edilen hız farklarının t test analiz sonucuna göre, HAS-1 ve HAS-3 noktalarında hızlar eşit kabul edilirken, HAS-2 noktasında ise eşit kabul edilemeyeceği tespit edilmiştir. Ancak her iki teknikten elde edilen deformasyon yönelimlerinin (benzer yönlerdeki hareketi temsil etmekte) uyumlu olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 5.3). Bu durumun ayrıntılı bir şekilde incelenebilmesi ve PSInSAR ve GNSS tekniğinden elde edilen hız

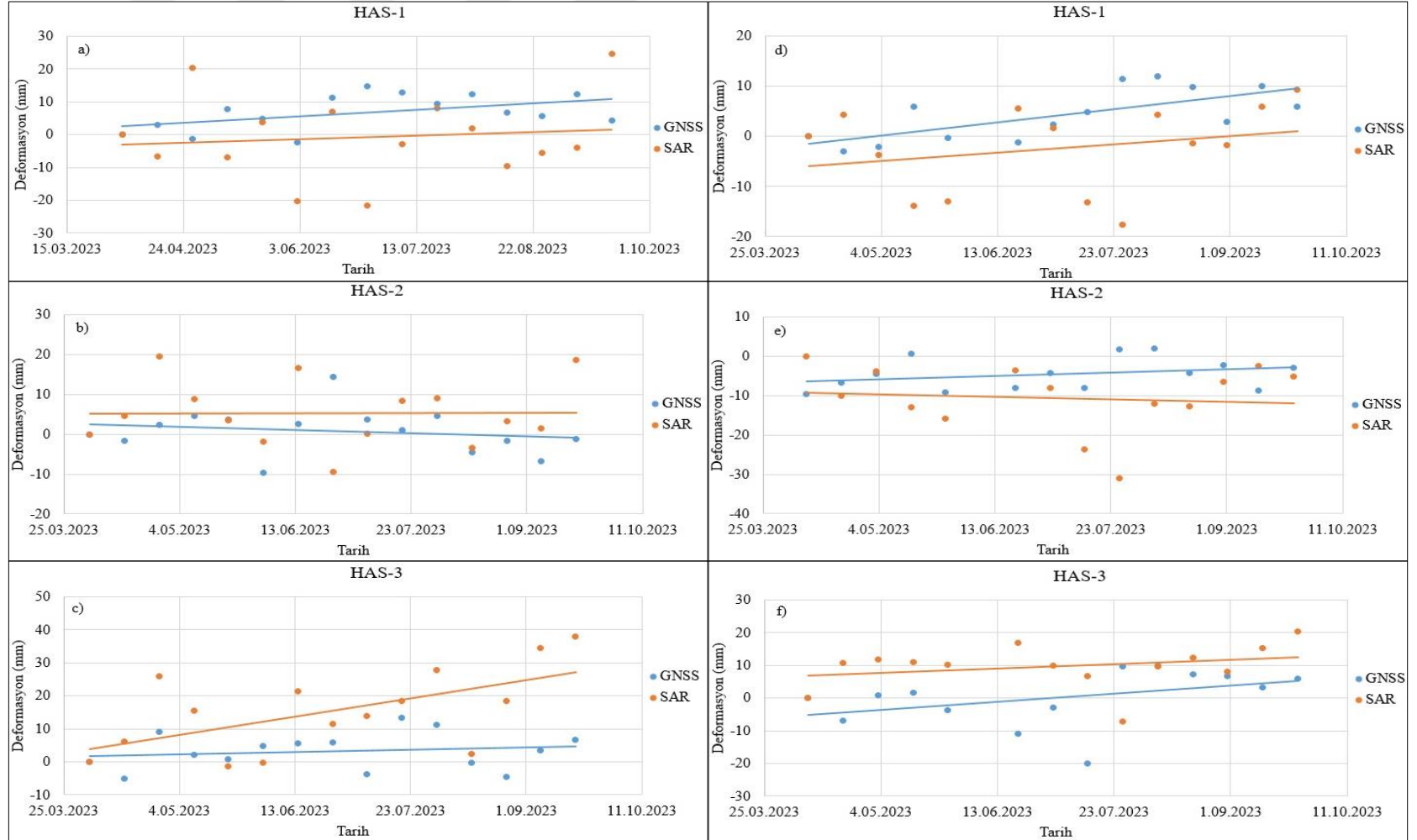
değerlerinin zamansal değişiminin tespit edilebilmesi amacıyla yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen LOS doğrultusundaki deformasyon değerleri, denklem 5.12 yardımıyla düşey deformasyon değerlerine dönüştürülmüştür.

$$D_{düşey} = \frac{d_{LOS}}{\cos\theta} \quad (5.12)$$

Burada; d_{LOS} LOS doğrultusundaki deformasyonu, θ ise geliş açısını temsil etmektedir (Gee vd., 2016; Yang vd., 2019). GNSS ve PSInSAR tekniklerinden elden edilen zaman serilerinin yükselen ve alçalan yörüngelerden karşılaştırılmasına ait görseller Şekil 5.7’de verilmiştir. Buna ek olarak GNSS ve PSInSAR tekniklerinden elde edilen deformasyonlar arasındaki ilişkinin gün bazında karşılaştırılması amacıyla Sentinel-1 görüntü tarihlerine karşılık gelen GNSS zaman serileriyle PSInSAR zaman serilerinin karşılaştırılmasına ait görseller ise Şekil 5.8’de sunulmuştur.



Şekil 5.7. Yükselen (a,b,c) ve alçalan (d,e,f) yörüngelerden elde edilen PSInSAR zaman serileri ile GNSS'ten elde edilen zaman serileri.



Şekil 5.8. Yükselen (a,b,c) ve alçalan (d,e,f) yörüngelerden elde edilen PSInSAR zaman serileri ile GNSS zaman serilerinin gün bazında karşılaştırılması.

Şekil 5.7 ve 5.8’de verilen GNSS ve PSInSAR tekniklerinden elde edilen zaman serileri incelendiğinde yaklaşık 180 günlük zaman periyodunda her iki teknikten elde edilen zaman serilerinin genel anlamda benzer yönlerdeki hareketi temsil ettiği ancak her iki teknik arasında ise uyuşumun olmadığı tespit edilmiştir.

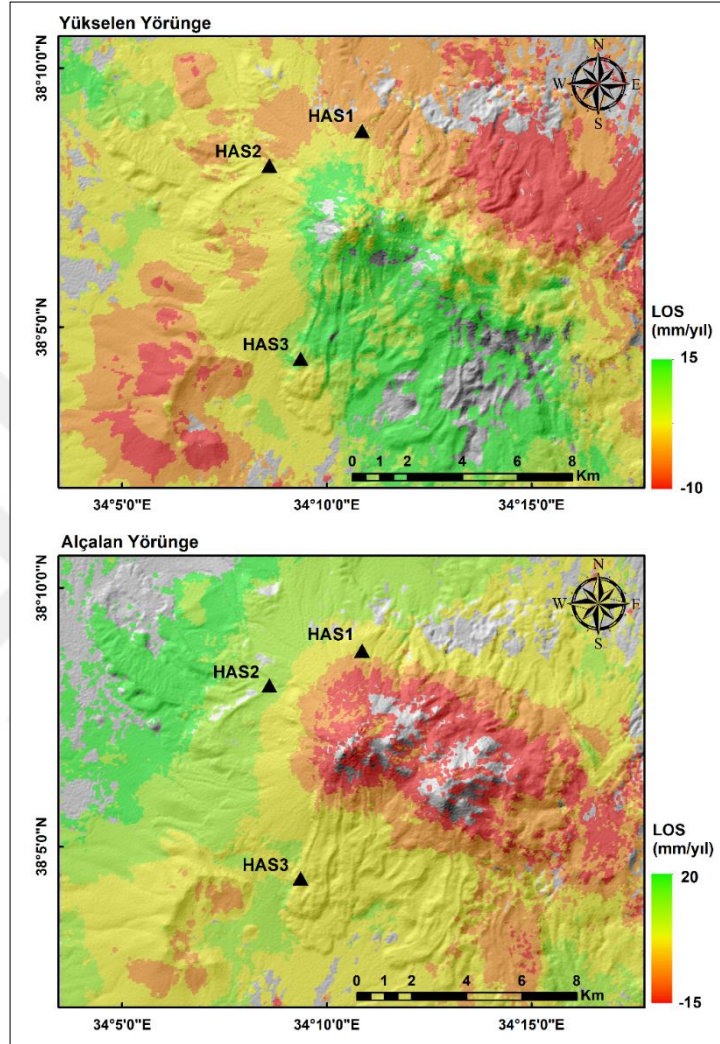
Hasan Dağı’nda Aralık 2022 tarihinde tesis edilen ancak Şubat 2023’te meydana gelen Kahramanmaraş depremlerinin ko-sismik etkilerini elimini etmek amacıyla sabit GNSS istasyonlarından Nisan-Eylül 2023 verileri değerlendirilmiş ve bu nedenle sabit GNSS istasyonları son altı aylık ölçmelere ait değişimleri vermekten PSInSAR analizleri ise 5 yıl gibi uzun bir zaman aralığında meydana gelen değişimleri göstermektedir. PSInSAR ve GNSS’ten elde edilen sonuçlar benzer yönlerdeki ancak farklı değerlerdeki hareketleri göstermektedir. Bu duruma her iki tekniğin aynı zaman dilimini kapsamaması, farklı algılama kapasitesine ve duyarlılığına sahip olmasının ve PS noktaları ile GNSS noktalarının birebir aynı konumda olmamasının yol açtığı düşünülmektedir. Bu kapsamda GNSS tekniğinden elde edilen deformasyonların daha sağlıklı bir şekilde karşılaştırılabilmesi amacıyla Nisan-Eylül 2023 tarihleri arasında temin edilen 30 Sentinel-1 SAR görüntüsü kullanılarak çalışma alanında SBAS analizleri gerçekleştirilmiştir.

5.3. Hasan Dağı SBAS Sonuçları

PSInSAR analizleri sonucunda çalışma alanına ait sağlıklı sonuçlara ulaşabilmek amacıyla en az 20 SAR görüntüsüne ihtiyaç duyulması nedeniyle Nisan-Eylül 2023 tarihleri arasında elde edilen Sentinel-1 SAR görüntüleri kullanılarak SBAS analizleri gerçekleştirilmiştir. Tez çalışması kapsamında elde edilen Sentinel-1 görüntülerinin SBAS tekniğiyle değerlendirilmesinde Sandwell vd. (2011) tarafından geliştirilen açık kaynak kodlu GMTSAR yazılımı kullanılmıştır. Tez çalışması kapsamında GMTSAR yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilen SBAS analizinin iş akış şeması önceki bölümlerde verilmiştir (Şekil 3.16).

Tez çalışması kapsamında GNSS ölçülerinin gerçekleştirildiği Nisan-Eylül 2023 tarihleri arasında yükselen yörüngeden elde edilen 15 Sentinel-1 SAR görüntüsü kullanılarak 103, alçalan yörüngeden elde edilen 15 Sentinel-1 SAR görüntüsü kullanılarak ise 97 görüntü çifti oluşturulmuştur. Görüntü çiftlerinin seçiminde gürültü etkilerini azaltmak ve daha fazla görüntü çifti elde edebilmek amacıyla baz

değerlerine olumsuz yönde etki etmektedir. Bu nedenle SBAS analizlerinde uyşum eşik değeri 0.5'in altında olan noktalar maskelenenerek 0.5'in üzerinde tutarlılık seviyesine sahip noktalar değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen SBAS analizleri sonucunda elde edilen deformasyon haritaları Şekil 5.10'da verilmiştir.



Şekil 5.10. Hasan Dağı'na ait yükselen (a) ve alçalan (b) yörüngelerden elde edilen ortalama deformasyon hız haritaları.

Ortalama deformasyon hız haritalarında kırmızı renkli noktalar uydudan uzaklaşan alanları, sarı renkli noktalar stabil alanları ve mavi renkli alanlar ise uyduya yaklaşan alanları göstermektedir. Çalışma bölgesine ait SBAS analizlerinden elde edilen ortalama deformasyon hız haritaları incelendiğinde bölgede meydana gelen deformasyonun yaklaşık olarak -10 mm/yıl ile 10 mm/yıl arasında değişmekte olduğu tespit edilmiştir. Deformasyonlar LOS doğrultusundaki hareketi temsil etmekle birlikte yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen sonuçların benzer bir deformasyon modeli gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca SBAS ve PSInSAR

sonuçlarından elde edilen ortalama deformasyon hızlarının da benzer deformasyon modellerini gösterdiği tespit edilmiştir.

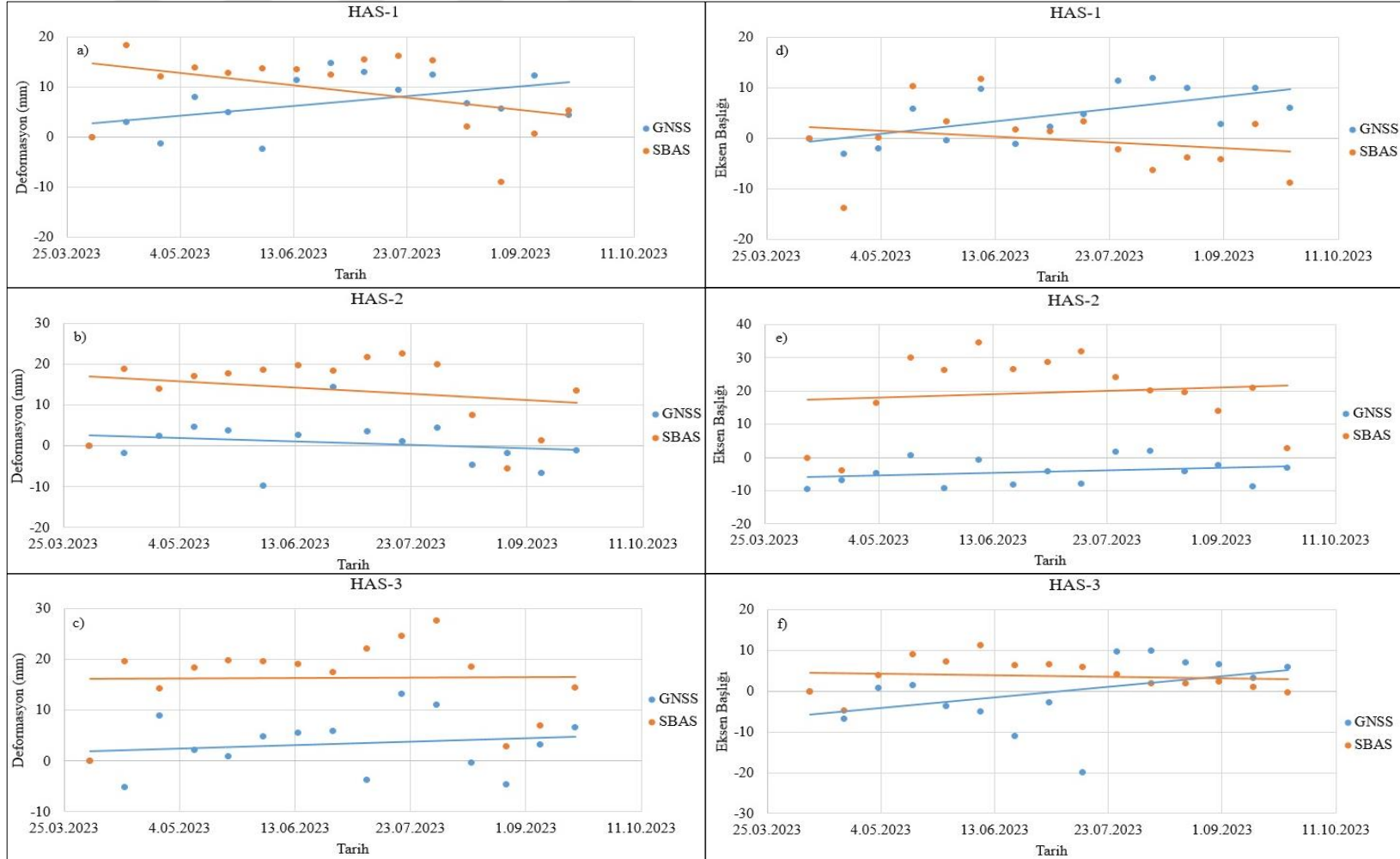
5.4. Hasan Dağı SBAS Sonuçlarının GNSS Sonuçları ile Karşılaştırılması

GNSS tekniğinden elde edilen hızların LOS doğrultusuna dönüşümü ve GNSS ölçülerinde $\alpha = 0,05$ yanılma düzeyi için periyodik hareketlerin hız değerlerine bir etkisinin olmadığı bölüm 5.2’de sunulmuştur. Her iki teknikten elde edilen bulguların karşılaştırılmasında GNSS istasyonlarının tesis edildiği noktalar merkez alınarak 10 m yarıçaplı bir alan içerisinde kalan noktalarının ortalama deformasyon değerleri alınmıştır. LOS doğrultusuna dönüştürülen GNSS hızları ile SBAS tekniğinden elde edilen LOS hızları arasındaki uyumu belirlemek için f ve t testleri uygulanmış ve test sonuçlarına ilişkin istatistiksel değerlendirmeler Çizelge 5.4’te sunulmuştur.

Çizelge 5.4. GNSS hızlarının SBAS-LOS doğrultusuna dönüşümü.

İstasyon	LOS doğrultusuna dönüştürülmüş GNSS (mm/yıl)		SBAS LOS hızı (mm/yıl)		Hız farkı (mm)	Varyans Testi HAS-1 f sınırı: 1,72 HAS-2 f sınırı: 1,73 HAS-3 f sınırı: 1,72		Hız testi HAS-1 t sınırı: 1,96 HAS-2 t sınırı: 1,96 HAS-3 t sınırı: 1,96	
	V	Std	V	Std	Vf	f test değeri	Karar	t-test değeri	Karar
HAS-1	5,07	3,21	3,09	8,34	1,98	1,74	Eşit değil	0,22	Eşit
HAS-2	-10,9	3,09	-11,18	9,49	-0,28	1,24	Eşit	0,08	Eşit
HAS-3	8,39	3,83	-13,05	8,17	21,44	2,58	Eşit değil	2,38	Eşit değil

Çizelge 5.4 incelendiğinde HAS-1 ve HAS-2 noktalarında dönüştürülmüş GNSS ve Sentinel-1 LOS hızlarının varyans testine göre eşit kabul edilemeyeceği tespit edilmiştir. Ayrıca her iki teknikten elde edilen hız farklarının t test analiz sonucuna göre, HAS-1 ve HAS-2 noktalarında hızlar eşit kabul edilirken, HAS-3 noktasında ise elde edilen hızların eşit kabul edilemeyeceği tespit edilmiştir. Ancak her iki teknikten elde edilen deformasyon yönelimlerinin (benzer yönlerdeki hareketi temsil etmekte) uyumlu olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 5.4). Bu durumun daha ayrıntılı bir şekilde incelenebilmesi ve her iki teknikten elde edilen deformasyonların zamansal değişimini tespit edebilmek amacıyla yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen LOS doğrultusundaki deformasyon değerleri, denklem 5.4 kullanılarak düşey deformasyon değerlerine dönüştürülmüştür. GNSS ve SBAS tekniklerinden elde edilen zaman serilerinin yükselen ve alçalan yörüngelerden karşılaştırılmasına ait görseller Şekil 5.11’de verilmiştir.

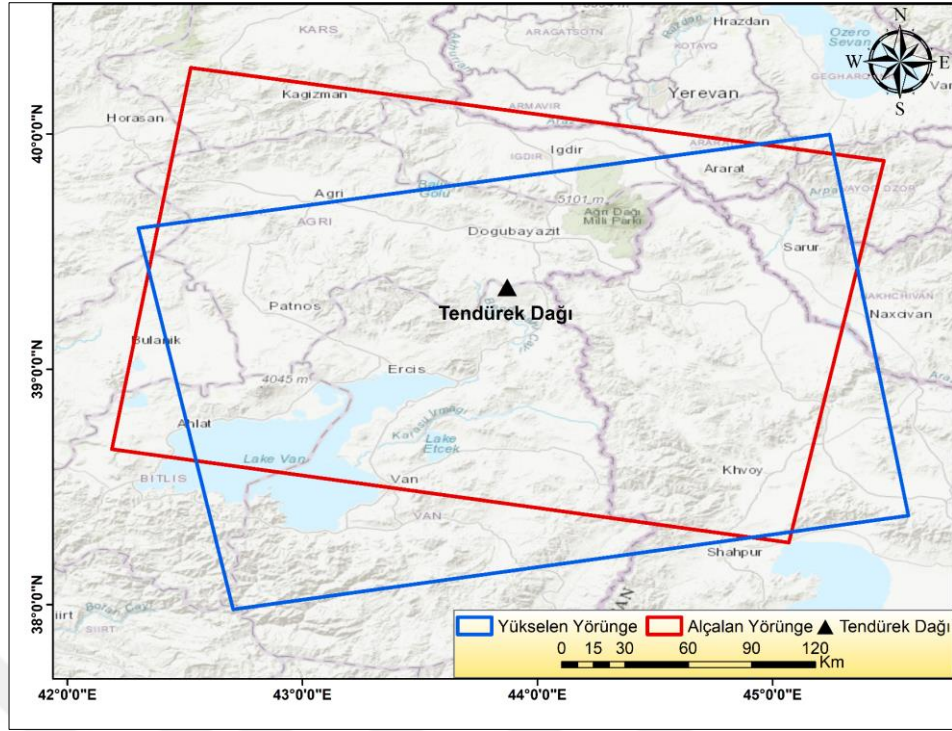


Şekil 5.11. Yükselen (a,b,c) ve alçalan (d,e,f) yörüngelerden elde edilen SBAS zaman serileri ile GNSS zaman serilerinin gün bazında karşılaştırılması.

Şekil 5.11’de verilen GNSS ve SBAS tekniklerinden elde edilen zaman serileri incelendiğinde yaklaşık 180 günlük zaman periyodunda her iki teknikten elde edilen zaman serileri arasında genel anlamda bir uyum olmadığı tespit edilmiştir. Bu duruma her iki tekniğin farklı algılama kapasitesine ve duyarlılığına sahip olmasının ve GNSS noktaları ile SBAS analizleri sonucunda elde edilen noktaların aynı konumda olmamasının yol açtığı düşünülmektedir. Ancak ilerleyen yıllarda çalışma alanında farklı InSAR teknikleri ve görüntüleri ile yapılacak olan çalışmaların, tesisi tamamlanmış olan GNSS istasyonlarının düşey yönlü bileşenlerinin de daha yüksek hassasiyette elde edilecek olması nedeniyle bölgede meydana gelen deformasyonların daha sağlıklı bir şekilde elde edilip karşılaştırılabileceği düşünülmektedir.

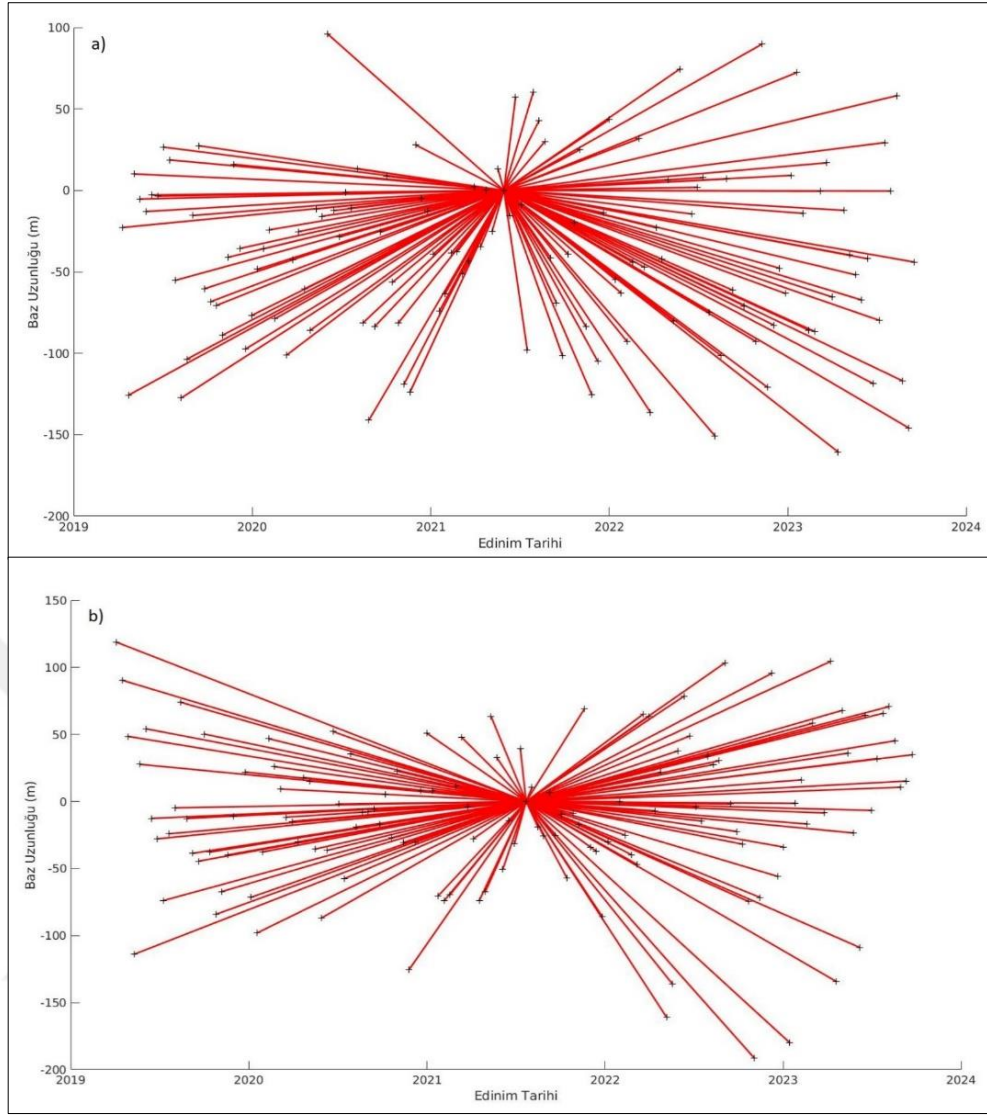
5.5 Tendürek Dağı PSInSAR Sonuçları

Tendürek Dağı’nda meydana gelen yüzey deformasyonlarının belirlenmesi amacıyla yükselen yörüngeden 137 görüntü elde edilmiş ancak bu görüntülerden 9 tanesinin, alçalan yörüngeden ise 137 görüntü elde edilmiş ve bu görüntülerden 8 tanesinin zamansal ve geometrik baz mesafeleri, modellenmiş tutarlılık, yükseklik belirsizliği ve Doppler frekans değerlerinin uygun olmaması nedeniyle analizler geri kalan görüntülerle gerçekleştirilmiştir. Çalışma bölgesini kapsayan yükselen ve alçalan Sentinel-1 görüntü çerçeveleri Şekil 5.12’de verilmiştir.



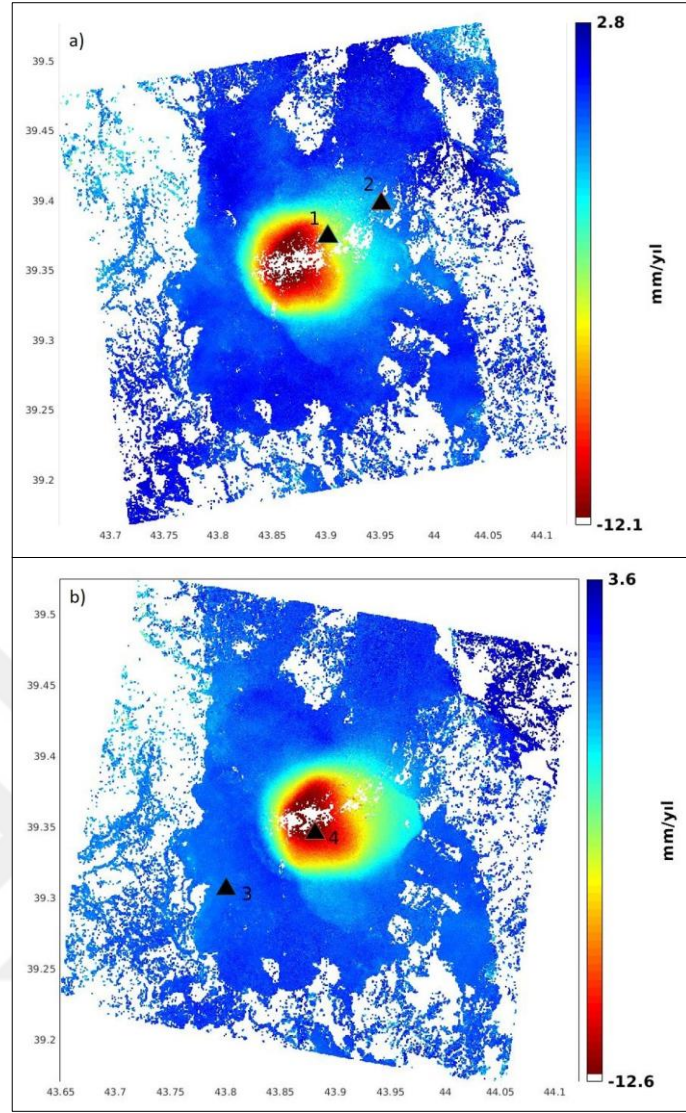
Şekil 5.12. Tondürek Dağı'nda kullanılan Sentinel-1 görüntü çerçeveleri.

Sentinel-1 görüntülerinin ön işlem adımları (Alt alan ve alt yörünge seçimi, hassas yörünge bilgilerinin uygulanması geri coğrafi kodlama, interferogram üretimi vb.) SNAP yazılımında gerçekleştirilmiş olup PSInSAR sonuçlarının elde edilmesinde ise StaMPS ve TRAIN yazılımları kullanılmıştır. Yükselen yörüngede 30 Mayıs 2021, alçalan yörüngede ise 23 Temmuz 2021 ana (master) görüntüler ve bunlara bağımlı ikincil (slave) görüntülere ait baz mesafe şemaları Şekil 5.13'te verilmiştir.



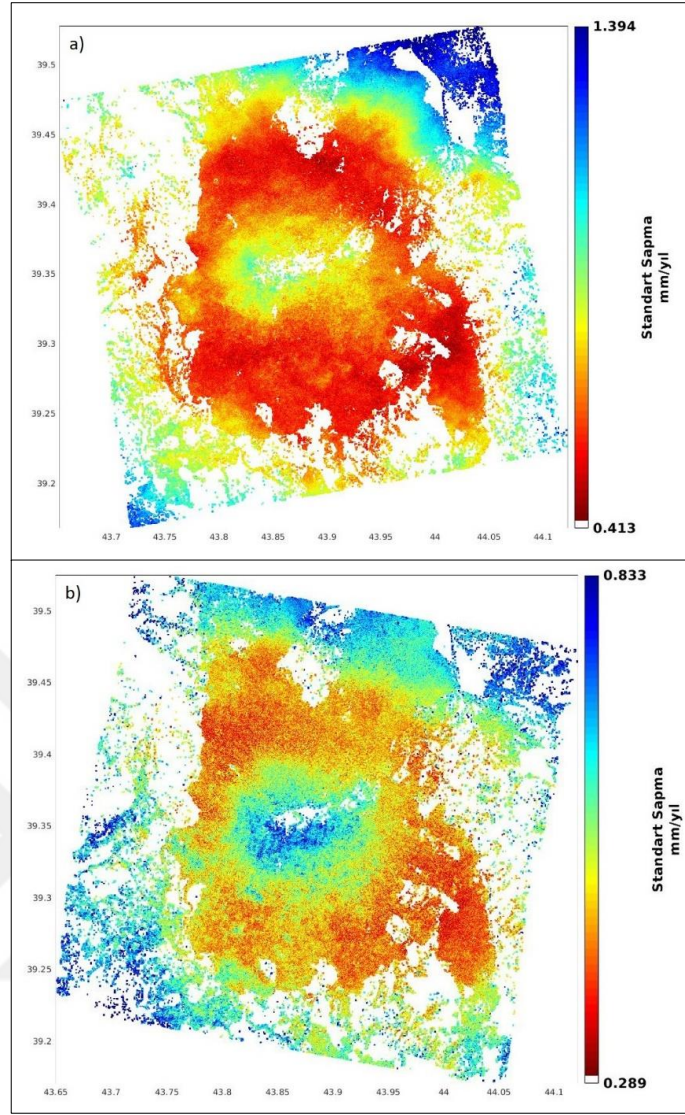
Şekil 5.13. Tendürek Dağı’nda kullanılan Sentinel-1 görüntülerinin yükselen (a) ve alçalan (b) yörüngelerdeki baz mesafe şemaları.

Tendürek Dağı’nda meydana gelen yüzey deformasyonları Nisan 2019 ile Eylül 2023 tarihleri arasında Sentinel-1 görüntüleri ve GACOS gecikme ürünleri kullanılarak tespit edilmiş olup ortalama deformasyon hız haritalarına ait görseller Şekil 5.14’te verilmiştir. Deformasyonlar LOS doğrultusundaki hareketi temsil etmekle birlikte yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen sonuçların benzer bir deformasyon modeli gösterdiği tespit edilmiştir. Yükselen yörüngeden elde edilen deformasyon değerleri -12,1 mm/yıl ile 2,8 mm/yıl aralığında değişirken, alçalan yörüngede ise -12,6 mm/yıl ile 3,6 mm/yıl aralığında değişmektedir (Şekil 5.14).



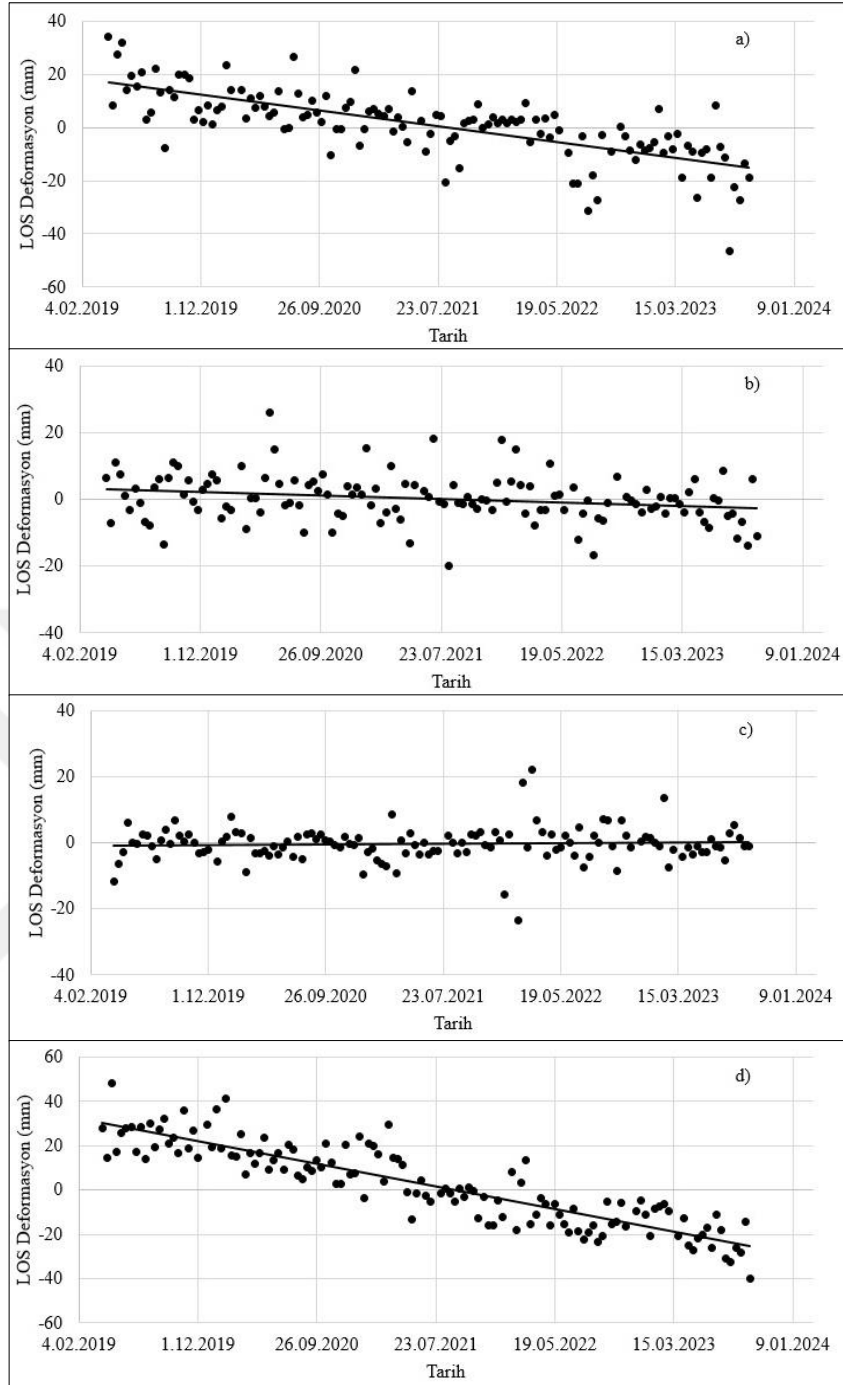
Şekil 5.14. Tendürek Dağı'na ait yükselen (a) ve alçalan (b) yörüngelerden elde edilen ortalama deformasyon hız haritaları.

Hem alçalan hem de yükselen yörüngelerden elde edilen deformasyon haritaları kaldera merkezli olmak üzere yaklaşık -13 mm/yıl'lık bir deformasyon göstermektedir. Şekil 5.14'te verilen LOS doğrultusundaki ortalama deformasyon hız haritalarına ait standart sapma değerleri yükselen ve alçalan yörüngeler için Şekil 5.15'te verilmiştir.



Şekil 5.15. Tendürek Dağı'na ait yükselen (a) ve alçalan (b) yörüngelerden elde edilen standart sapma haritaları.

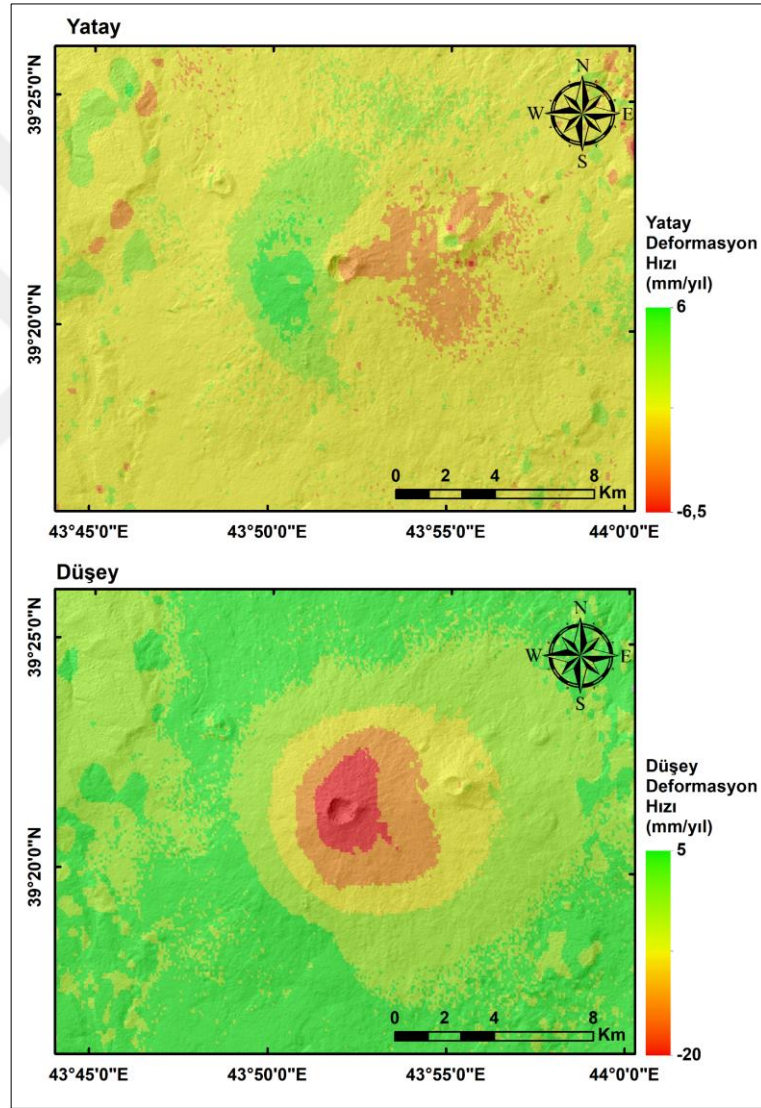
Şekil 5.15 incelendiğinde standart sapma değerinin en yüksek olduğu alanların Tendürek Dağı'nın Kuzey-Doğu ve Kuzey-Batı kesimlerindeki noktalara ait olduğu görülmektedir. Yükselen yörüngede standart sapma değerleri 0,413 mm/yıl ile 1,394 mm/yıl aralığında değişirken, alçalan yörüngede ise 0,289 mm/yıl ile 0,833 mm/yıl aralığında değişmekte ve alçalan yörüngede zirveye yakın noktalardaki standart sapma değerlerinin yaklaşık %30'unun 0,5 mm/yıl üzerinde olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5.15). Çalışma alanından meydana gelen yüzey deformasyonlarını daha ayrıntılı inceleyebilmek amacıyla alçalan ve yükselen yörüngelerden belirli PS noktalarına (Şekil 5.14-a,b'de 1,2,3,4 numaralı noktalar) ait zaman serileri Şekil 5.16'da verilmiştir.



Şekil 5.16. (a,b) Yükselen (Şekil 5.14-a'da 1,2) ve (c,d) alçalan yörüngeden seçilen PS noktalarındaki (Şekil 5.14-b'de 3,4) LOS zaman serileri.

Zaman serileri, aynı bulguları ortalama deformasyon hız haritalarından daha ayrıntılı bir şekilde göstermekte olup Tendürek Dağı'nda meydana gelen çökmenin 2019 ile 2023 yılları arasında kademeli olarak geliştiğini ve deformasyonun zamansal gelişiminin doğrusal olduğunu göstermektedir (Şekil 5.16).

Yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen LOS doğrultusundaki sonuçlar benzer bir deformasyon modeli göstermekte ve bu durum çalışma alanında düşey deformasyonun baskın ve yatay deformasyondan (Doğu-Batı yönlü) daha büyük olduğunu göstermektedir (Bayık ve Abdikan, 2021; Calò vd., 2017). Ancak bu durumun tespit edilebilmesi ve analiz sonuçlarının daha iyi tartışılabilmesi amacıyla yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen PS noktalarına ait deformasyon bilgileri denklem 3.24 ve 3.25 yardımıyla bileşenlerine ayrılmış ve yatay (Doğu-Batı yönlü) ve düşey deformasyon bileşenleri Şekil 5.17’de sunulmuştur.



Şekil 5.17. Tendürek Dağı’na ait LOS doğrultusundaki sonuçlardan elde edilen yatay ve düşey deformasyon bileşenleri.

Deformasyonun bileşenleri, yatay deformasyonun (Doğu-Batı yönlü) -6,5 mm/yıl ile 6 mm/yıl arasında, düşey deformasyonun ise -20 mm/yıl ile 5 mm/yıl arasında

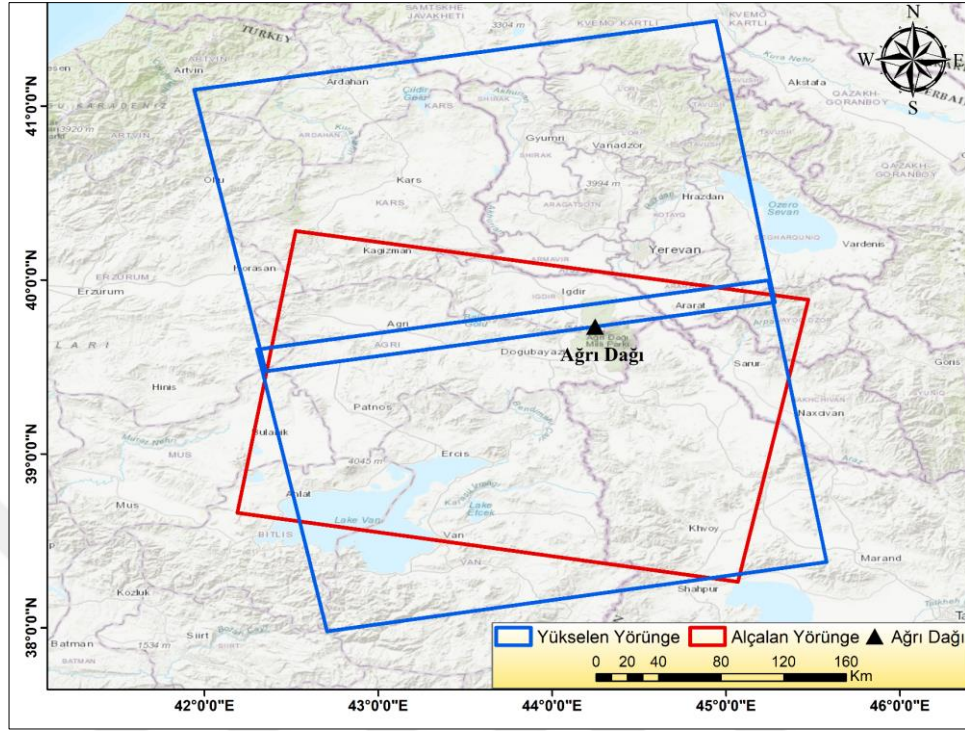
değiştiğini göstermektedir (Şekil 5.17). Düşey deformasyon bileşeni, maksimum -20 mm/yıl ile kaldera merkezli bir bölgenin çökmesini göstermektedir. Ayrıca deforme olmuş bölgenin hem kuzey hem de güney kesimleri doğu yönünde bir deformasyon göstermektedir. Yatay deformasyon ise düşey bileşenden çok daha küçük ve bu durum Tendürek Dağı'ndaki deformasyonun ağırlıklı olarak düşey yönde meydana geldiğini ve yatay deformasyon bileşeninin ise ihmal edilebilir düzeyde olduğunu göstermektedir. Çalışma alanında yapılan önceki çalışmalarda da yaklaşık 15 mm/yıl'lık zirve kalderasındaki çökme bildirmiş olup bu tez çalışmasında da benzer sonuçlara ulaşılmıştır (Bathke vd., 2013; Bathke vd., 2015; Gündüz vd., 2023; Tolluoğlu, 2006).

Çalışma alanında yapılan önceki çalışmalar incelendiğinde, Tendürek Dağı'nda meydana gelen yüzey deformasyonları ilk olarak Tolluoğlu (2006) tarafından incelenmiş ve 1993 ile 2000 yılları arasında Tendürek Dağı'nın zirvesinde 10 ile 20 cm arasında bir çökme tespit etmiştir. Bathke vd. (2013) ve Bathke vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada ise 2003 ile 2015 yılları arasında Tendürek Dağı'nda 11 mm/yıl'lık bir çökmeyi volkanın 4,5 km altında bulunan eşiğin daralmasına bağlamıştır ve iki çalışmada da benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Biggs vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada 2015 ile 2020 yılları arasında Tendürek Dağı'nda cm düzeyinde bir yüzey deformasyon olmadığını bildirmişlerdir. Bölgede yapılan bir diğer çalışmada ise Doğru vd. (2023) 2016 ile 2018 yılları arasında Tendürek Dağı'nda deformasyonun yavaşladığını veya tamamen durduğunu bildirmişlerdir. Biggs vd. (2021) ve Doğru vd. (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile bu tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar arasındaki farklılığa, çalışmaların farklı bir zaman diliminde gerçekleştirilmesi ve farklı InSAR tekniklerinin kullanılmasının neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca bu çalışmaların yapıldığı dönemlerde volkanın durgunluk dönemine de girmiş olabileceği düşünülmektedir.

5.6 Ağrı Dağı PSInSAR Sonuçları

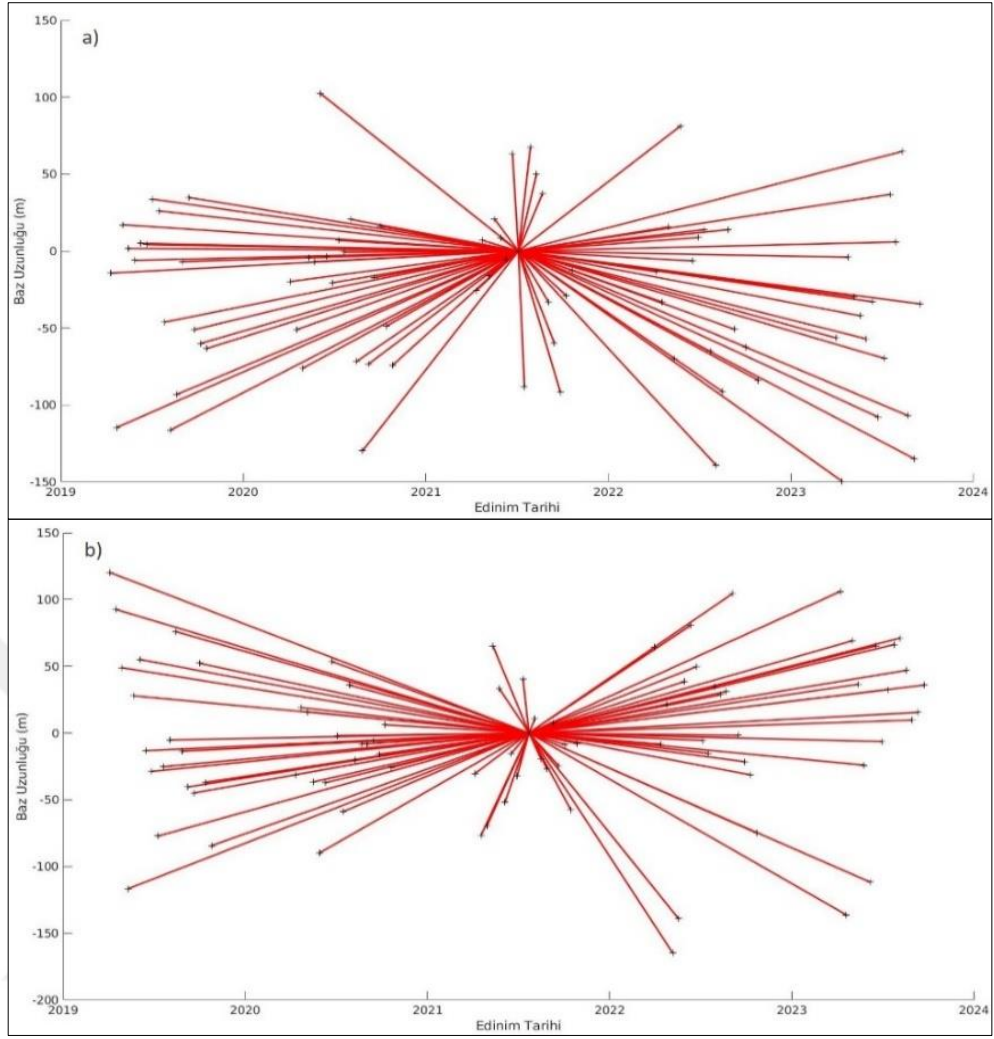
Ağrı Dağı, yükselen edinim geometrisinde iki görüntü çerçevesi (123 ve 128 numaralı çerçeveler) ve iki alt şeritte (IW2-IW3), alçalan edinim geometrisinde ise tek görüntü çerçevesi (461 numaralı çerçeve) ve iki alt şerit (IW1-IW2) sınırında kaldığı için tüm PSInSAR işlem adımları bu çerçeve ve bölümlerin hepsine ayrı ayrı uygulanmıştır.

Çalışma alanını kapsayan yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen Sentinel-1 görüntü çerçeveleri Şekil 5.18’de verilmiştir.



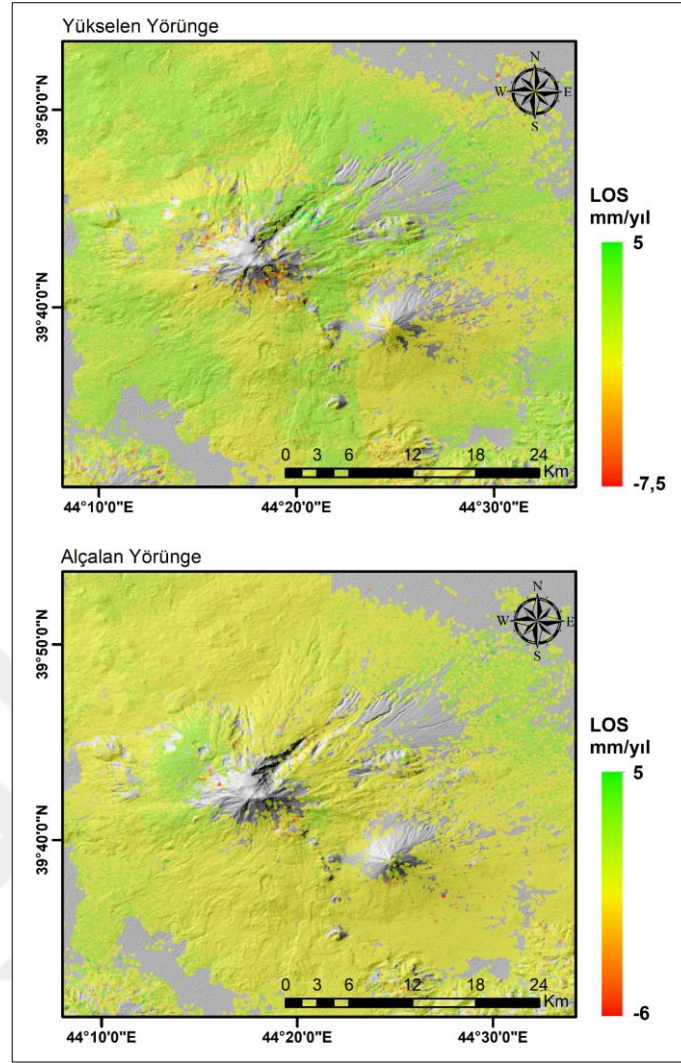
Şekil 5.18. Ağrı Dağı’nda kullanılan Sentinel-1 görüntü çerçeveleri.

Yükselen yörüngede ilk çerçevede (123 numaralı çerçeve) 81 görüntü elde edilmiş olup bu görüntülerden 5 tanesinin, ikinci çerçevede (128 numaralı çerçeve) ise 86 görüntü elde edilmiş olup bu görüntülerden 4 tanesinin zamansal ve geometrik baz mesafesi, modellenmiş tutarlılık, yükseklik belirsizliği ve Doppler frekans değerlerinin uygun olmaması nedeniyle analizler geri kalan görüntülerle gerçekleştirilmiştir. Alçalan yörüngede ise 88 görüntü elde edilmiş olup bu görüntülerden 2 tanesinin standart sapma, atmosfer ve yörüngesel hata miktarlarının uygun olmaması nedeniyle analizler 86 görüntüyle gerçekleştirilmiştir. Yükselen ve alçalan yörüngelerde kullanılan görüntülerin baz mesafe şemaları Şekil 5.19’da verilmiştir.



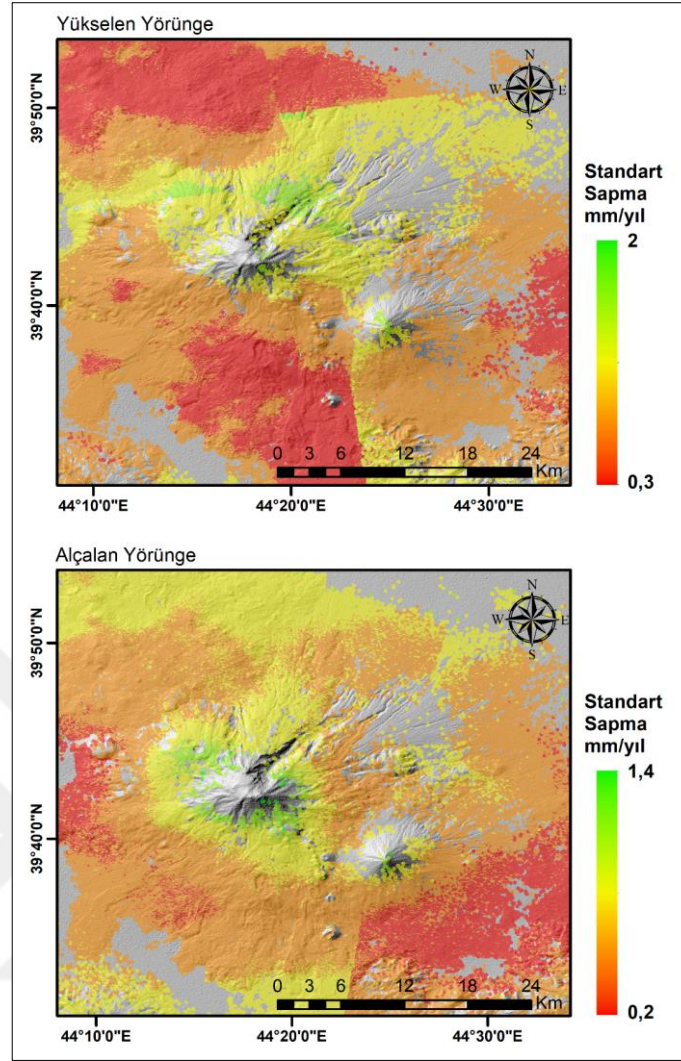
Şekil 5.19. Ağrı Dağı’nda kullanılan Sentinel-1 görüntülerinin yükselen (a) ve alçalan (b) yörüngelerdeki baz mesafe şemaları.

Nisan 2019 ile Eylül 2023 tarihleri arasında yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen Sentinel-1 görüntüleri ve GACOS gecikme ürünleri SNAP, StaMPS ve TRAIN yazılımları kullanılarak PSInSAR analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanının farklı alt alanlarda olması nedeniyle birden fazla deformasyon haritası üretilmiş ve bu haritaların birlikte değerlendirilebilmesi amacıyla lejantları aynı olacak şekilde düzenlenerek deformasyon haritaları Şekil 5.20’de verilmiştir.



Şekil 5.20. Ağrı Dağı'na ait yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen ortalama deformasyon hız haritaları.

Yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen LOS doğrultusundaki ortalama deformasyon hız haritaları benzer deformasyon modelini göstermekte ve bu durum da çalışma alanında düşey deformasyonun baskın ve yatay deformasyondan daha yüksek olduğunu göstermektedir. Yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen deformasyon değerleri genel olarak -5 mm/yıl ile 5 mm/yıl aralığında değişmekte ve çökme gösteren (negatif değerler) PS noktalarının genellikle Ağrı Dağı'nın zirve kısımlarında olduğu tespit edilmiştir. Hem alçalan hem de yükselen yörüngelerden elde edilen LOS doğrultusundaki ortalama deformasyon hız haritalarına ait standart sapma değerlerine ilişkin görseller Şekil 5.21'de verilmiştir.



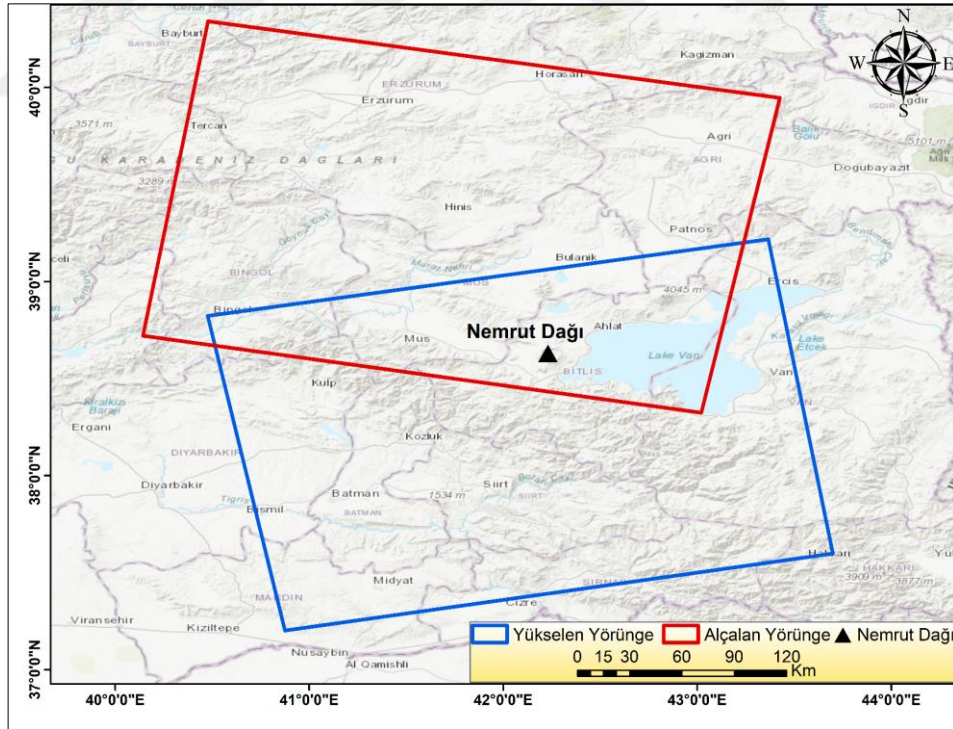
Şekil 5.21. Ağrı Dağı'na ait yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen standart sapma haritaları.

Şekil 5.21'de verilen standart sapma haritaları incelendiğinde yükselen yörüngede standart sapma değerlerinin 0,3 mm/yıl ile 2 mm/yıl, alçalan yörüngede ise 0,2 mm/yıl ile 1,4 mm/yıl aralığında değiştiği görülmektedir (Şekil 5.21). Şekil 5.20 ve Şekil 5.21'den elde edilen sonuçlar incelendiğinde çalışma alanında yoğun bitki örtüsünün ve Ağrı Dağı'nın zirve kısımlarında kalıcı buz örtüsünün olması sebebiyle yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen ortalama deformasyon hız haritalarında bazı alanlarda yeterli sayıda PS noktasının üretilemediği tespit edilmiştir. Ayrıca çökme gösteren (negatif değerler) ve standart sapma değeri en yüksek olan noktaların da yine zirveye yakın alanlarda olduğu görülmektedir. Baldasso vd. 2019 yapmış olduğu çalışmada 1976 ile 2014 yılları arasında küresel ısınma nedeniyle buzulların eridiğini bildirmiştir. Bu kapsamda ortalama deformasyon hız haritalarında çökme gösteren PS noktalarına buzulların erimesinin neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca çalışma alanı

ile ilgili literatür incelendiğinde, Ağrı Dağı'nda meydana gelen yüzey deformasyonlarının InSAR teknikleri kullanılarak araştırıldığı çalışmalarda da benzer sonuçlara ulaşılmış ve Ağrı Dağı'nda cm düzeyinde bir deformasyon tespit edilememiştir (Biggs vd., 2021; Doğru vd., 2023). Bu kapsamda tez çalışmasında da benzer sonuçlara ulaşılmıştır

5.7 Nemrut Dağı PSInSAR Sonuçları

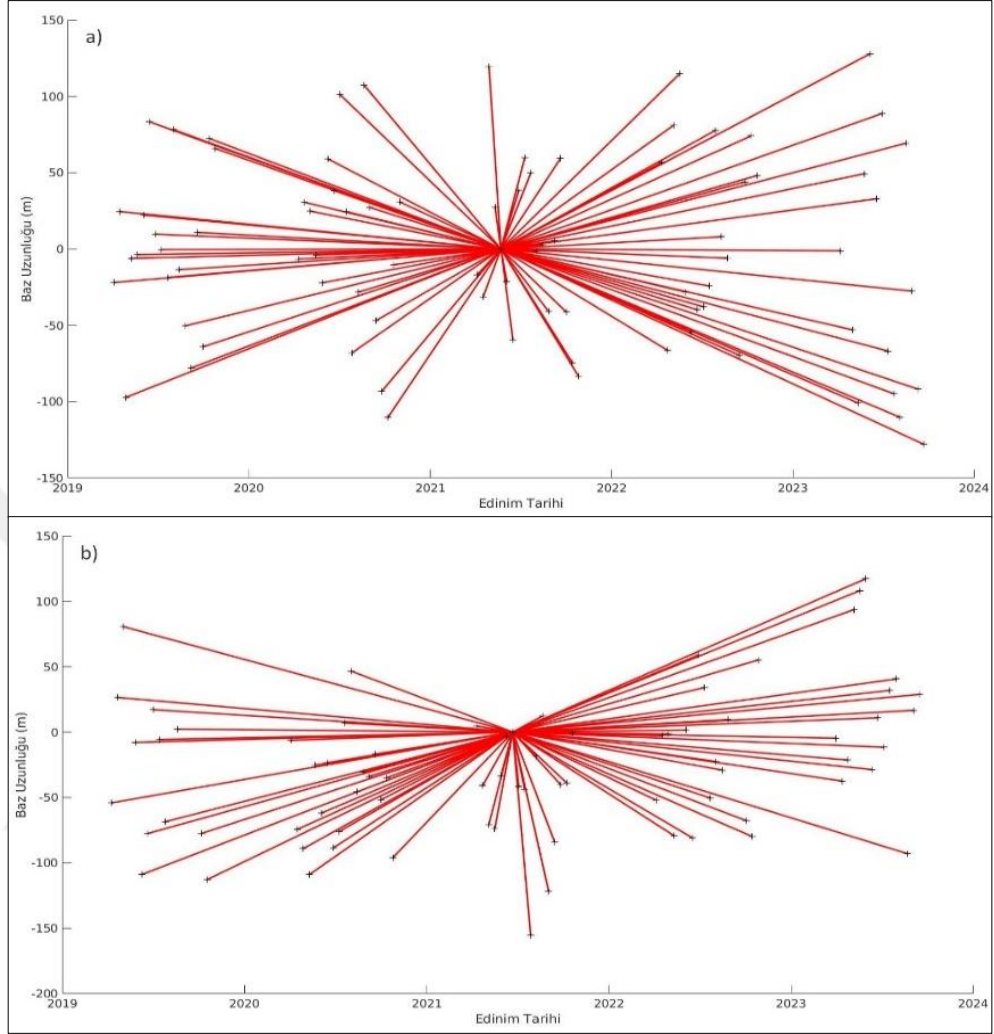
Nemrut Dağı'nda meydana gelen yüzey deformasyonlarının belirlenebilmesi amacıyla yükselen yörüngeden 89 adet, alçalan yörüngeden ise 81 adet görüntü elde edilmiştir. Ancak yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen görüntülerden 5 tanesinin zamansal ve geometrik baz mesafesi, modellenmiş tutarlılık, yükseklik belirsizliği ve Doppler frekans değerlerinin uygun olmaması nedeniyle analizler geri kalan görüntülerle gerçekleştirilmiştir. Çalışma bölgesini kapsayan yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen Sentinel-1 görüntü çerçevelerine ait görsel Şekil 5.22'de verilmiştir.



Şekil 5.22. Nemrut Dağı'nda kullanılan Sentinel-1 görüntü çerçeveleri.

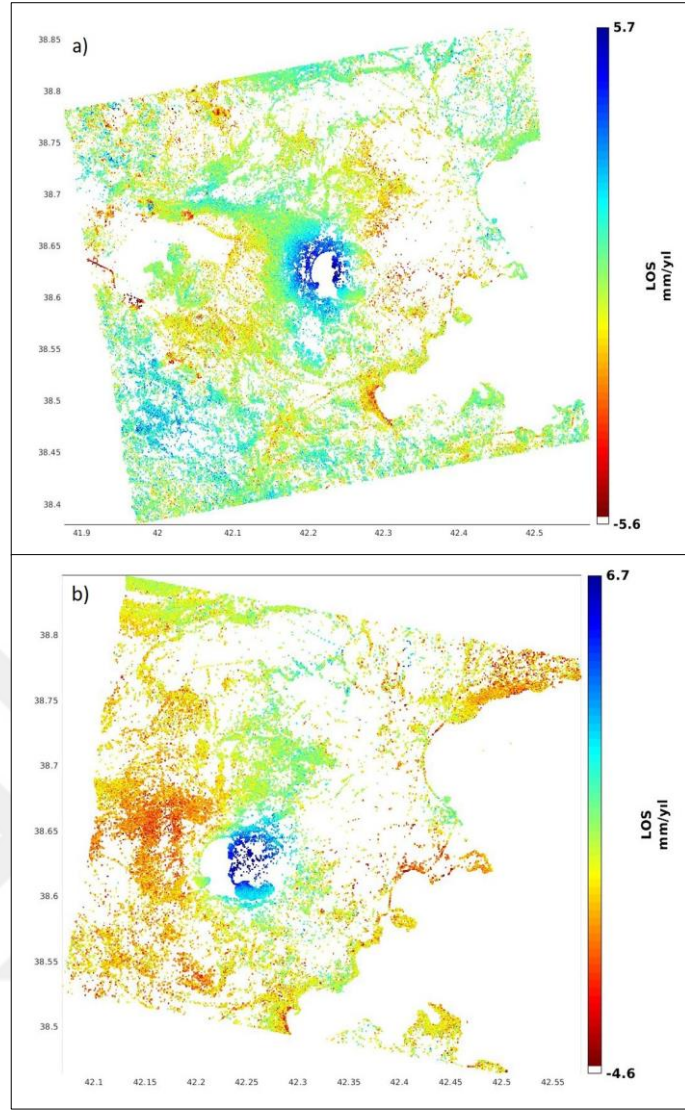
Zamansal ve geometrik baz mesafesi, modellenmiş tutarlılık, yükseklik belirsizliği ve Doppler frekans değerleri dikkate alınarak seçilen yükselen yörüngede 23 Mayıs 2021,

alçalan yörüngede ise 22 Haziran 2021 tarihli ana (master) görüntüler ve bunlara bağımlı ikincil (slave) görüntülere ait baz mesafe şemaları Şekil 5.23'te verilmiştir.



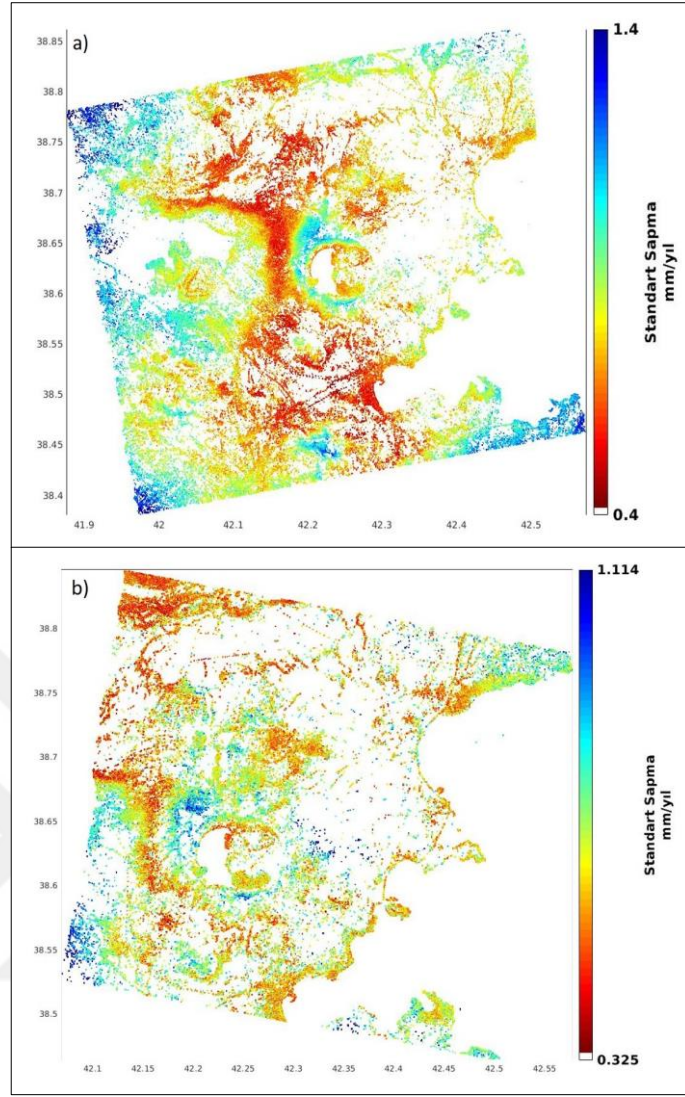
Şekil 5.23. Nemrut Dağı'nda kullanılan Sentinel-1 görüntülerinin yükselen (a) ve alçalan (b) yörüngelerdeki baz mesafe şemaları.

Yükselen ve alçalan yörüngelerde üretilen ortalama deformasyon hız haritalarına ait görseller Şekil 5.24'te verilmiştir. Yükselen yörüngede elde edilen deformasyon değerleri -5,6 mm/yıl ile 5,7 mm/yıl aralığında değişirken, alçalan yörüngede ise -4,6 mm/yıl ile 6,7 mm/yıl aralığında değişmektedir (Şekil 5.24).



Şekil 5.24. Nemrut Dağı'na ait yükselen (a) ve alçalan (b) yörüngelerden elde edilen ortalama deformasyon hız haritaları.

Alçalan ve yükselen yörüngelerden üretilen ortalama deformasyon hız haritaları, Nemrut Dağ'ında yaklaşık 7 mm/yıl'lık yükselme göstermektedir. Şekil 5.24'te verilen ortalama deformasyon hız haritalarına ait standart sapma değerleri yükselen ve alçalan yörüngeler için Şekil 5.25'te verilmiştir.



Şekil 5.25. Nemrut Dağı'na ait yükselen (a) ve alçalan (b) yörüngelerden elde edilen standart sapma haritaları.

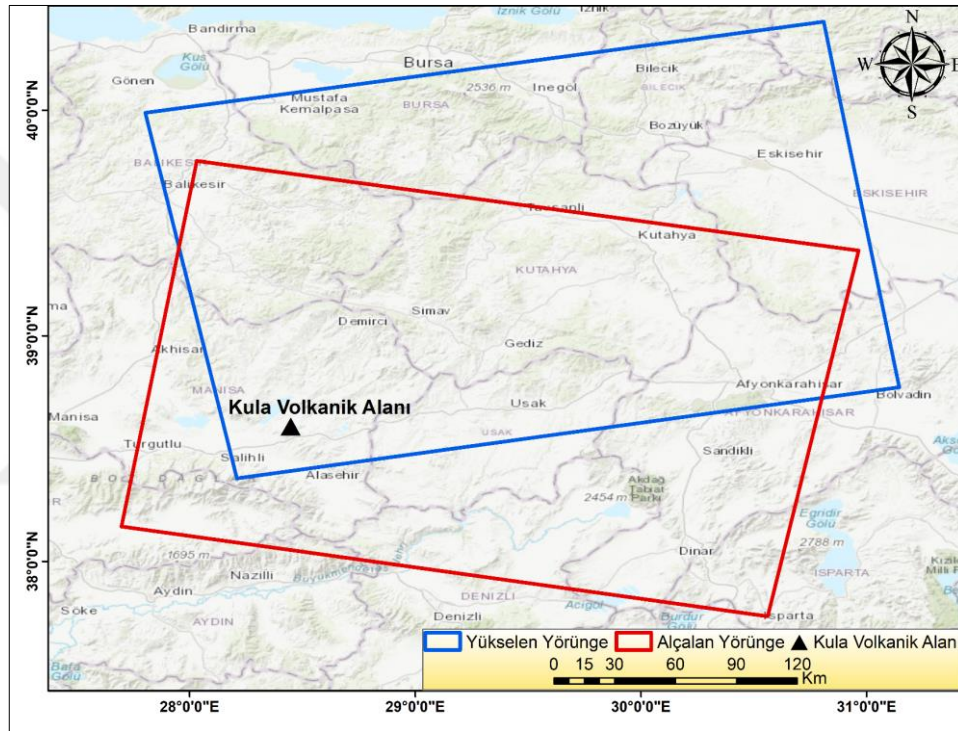
Şekil 5.25'te verilen standart sapma haritaları yükselen yörüngede standart sapma değerlerinin 0,4 mm/yıl ile 1,4 mm/yıl, alçalan yörüngede ise 0,325 mm/yıl ile 1,114 mm/yıl aralığında değişmekte olduğunu göstermektedir. Ayrıca Şekil 5.25 incelendiğinde, en düşük standart sapma değerlerinin Nemrut Dağı ve yakın çevresinden üretilmiş olan PS noktalarına ait olduğu görülmektedir.

Alçalan ve yükselen yörüngelerden elde edilen ortalama deformasyon hız haritaları (Şekil 5.24) benzer deformasyon modelleri göstermekte olup bu durum bölgede meydana gelen deformasyonun düşey yönde ve yatay yöndeki deformasyondan daha büyük olduğunu göstermektedir. Ayrıca çalışma alanı ile ilgili literatür incelendiğinde de Nemrut Dağı'nda InSAR teknikleri kullanılarak cm düzeyinde bir deformasyon

tespit edilememiş ve tez kapsamında elde edilen bulgularla benzer sonuçlara ulaşılmıştır (Biggs vd., 2021).

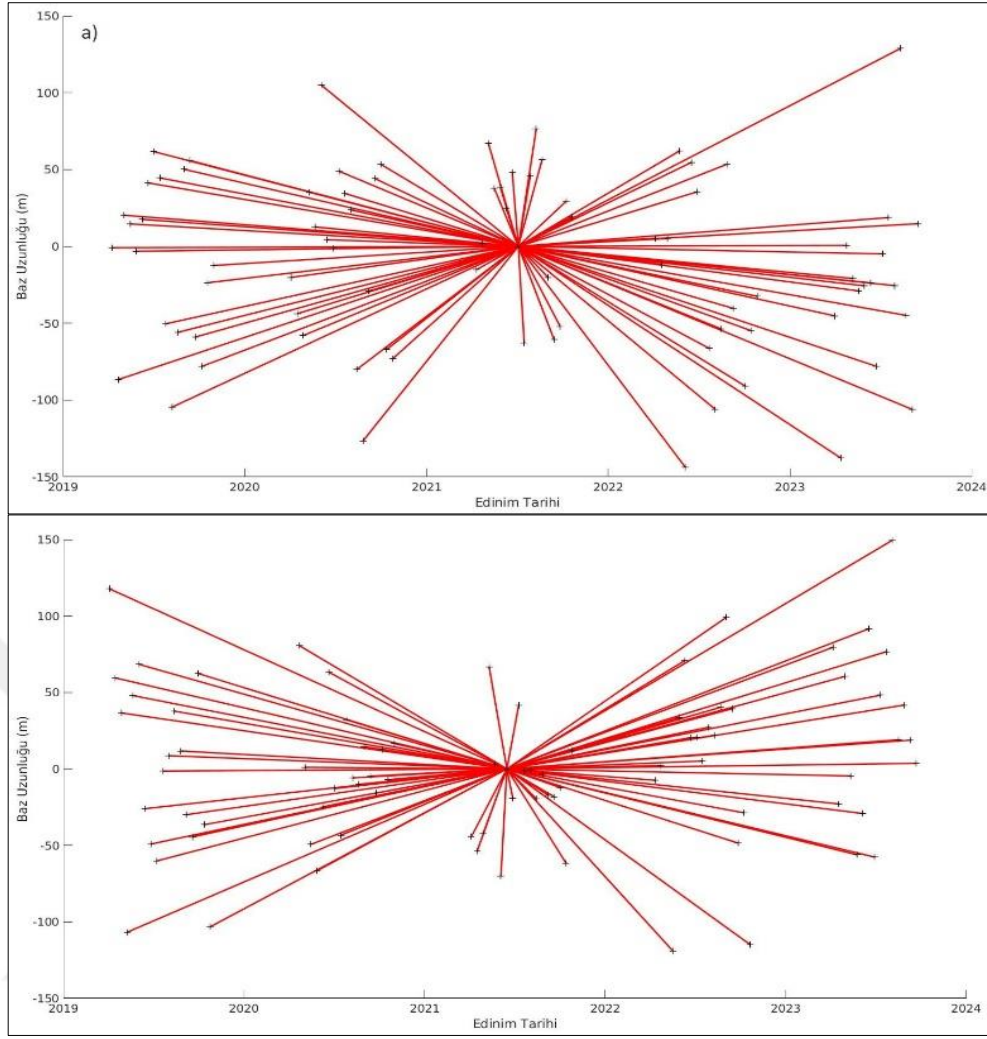
5.8 Kula Volkanik Kompleksi PSInSAR Sonuçları

Kula Volkanik Kompleksi'nde meydana gelen yüzey deformasyonlarının belirlenmesi amacıyla yükselen yörüngeden 83, alçalan yörüngeden ise 84 Sentinel-1 SAR görüntüsü kullanılmış olup çalışma bölgesini kapsayan yükselen ve alçalan Sentinel-1 görüntü çerçeveleri Şekil 5.26'da verilmiştir.



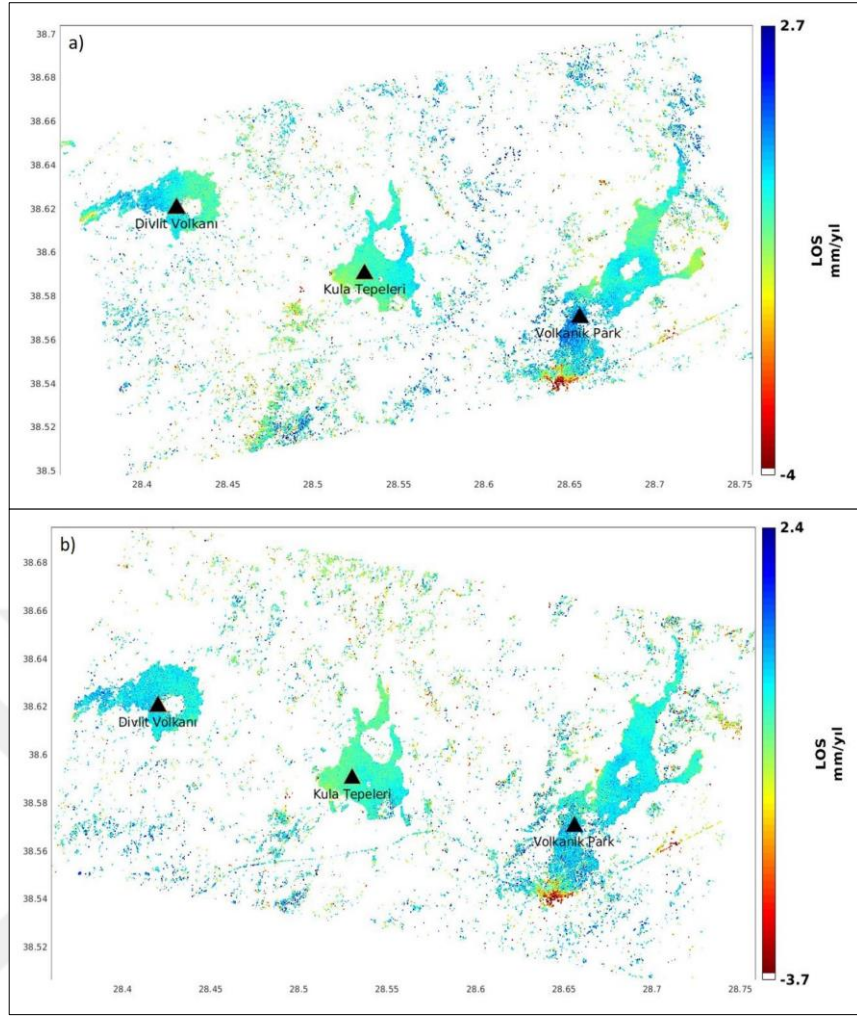
Şekil 5.26. Kula Volkanik Kompleksi'nde kullanılan Sentinel-1 görüntü çerçeveleri.

Zamansal ve geometrik baz mesafesi, modellenmiş tutarlılık, yükseklik belirsizliği ve Doppler frekans değerleri dikkate alınarak seçilen yükselen yörüngede 4 Temmuz 2021, alçalan yörüngede ise 16 Haziran 2021 tarihli ana (master) görüntüler ve bunlara bağımlı ikincil (slave) görüntülere ait baz mesafe şemaları Şekil 5.27'de verilmiştir.



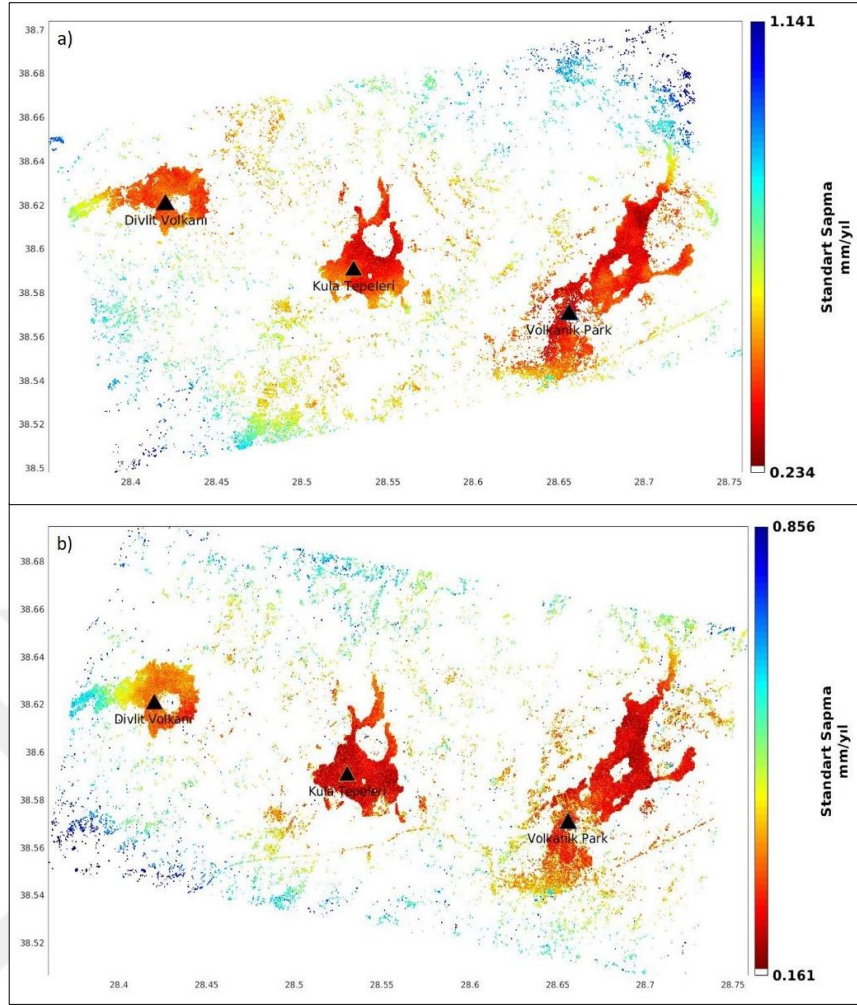
Şekil 5.27. Kula Volkanik Kompleksi'nde kullanılan Sentinel-1 görüntülerinin yükselen (a) ve alçalan (b) yörüngelerdeki baz mesafe şemaları.

Kula Volkanik Kompleksi'nde meydana gelen yüzey deformasyonları Nisan 2019 ile Eylül 2023 tarihleri arasında Sentinel-1 görüntüleri ve GACOS gecikme ürünleri kullanılarak tespit edilmiş olup ortalama deformasyon hız haritalarına ait görseller Şekil 5.25'te verilmiştir. Yükselen yörüngeden elde edilen deformasyon değerleri -4 mm/yıl ile 2,7 mm/yıl aralığında değişirken, alçalan yörüngede ise -3,7 mm/yıl ile 2,4 mm/yıl aralığında değişmektedir (Şekil 5.28).



Şekil 5.28. Kula Volkanik Kompleksi'ne ait yükselen (a) ve alçalan (b) yörüngelerden elde edilen ortalama deformasyon hız haritaları.

Deformasyonlar LOS doğrultusundaki hareketi temsil etmekle birlikte yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen sonuçların benzer bir deformasyon modeli gösterdiği tespit edilmiştir. Şekil 5.25'te verilen ortalama deformasyon hız haritalarına ait standart sapma değerleri yükselen ve alçalan yörüngeler için Şekil 5.29'da verilmiştir.

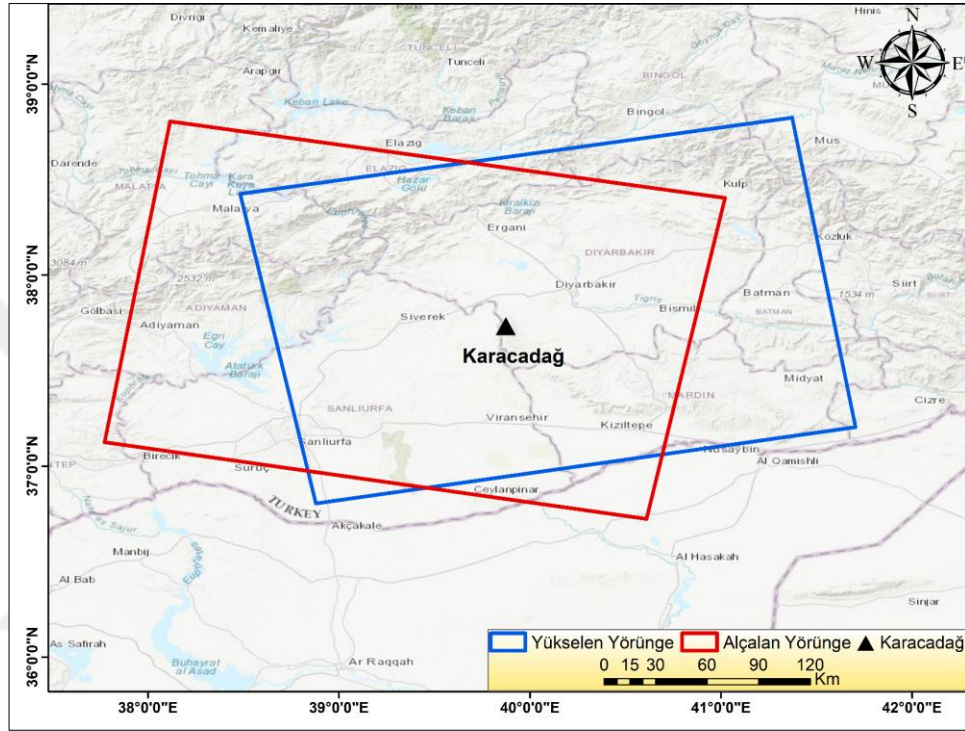


Şekil 5.29. Kula Volkanik Kompleksi'ne ait yükselen (a) ve alçalan (b) yörüngelerden elde edilen standart sapma haritaları.

Yükselen yörüngede standart sapma değerleri 0,234 mm/yıl ile 1,141 mm/yıl aralığında değişirken, alçalan yörüngede ise 0,161 mm/yıl ile 0,856 mm/yıl aralığında değişmektedir (Şekil 5.29). Şekil 5.29'da verilen standart sapma haritaları incelendiğinde Kula Volkanik Kompleksi'nde yer alan Divlit Volkanı, Kula Tepeleri ve Volkanik Park'ta üretilen PS noktalarının standart sapma değerlerinin 0,2 mm/yıl ile 0,6 mm/yıl arasında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca çalışma alanı ile ilgili literatür incelendiğinde de Kula Volkanik Kompleksi'nde InSAR teknikleri kullanılarak yapılmış tek çalışma Biggs vd. (2021) tarafından gerçekleştirilmiş ve çalışma sonucunda cm düzeyinde bir deformasyon tespit edilemediği bildirilmiştir. Bu kapsamda gerçekleştirilen bu tez çalışmasında da benzer sonuçlara ulaşılmıştır.

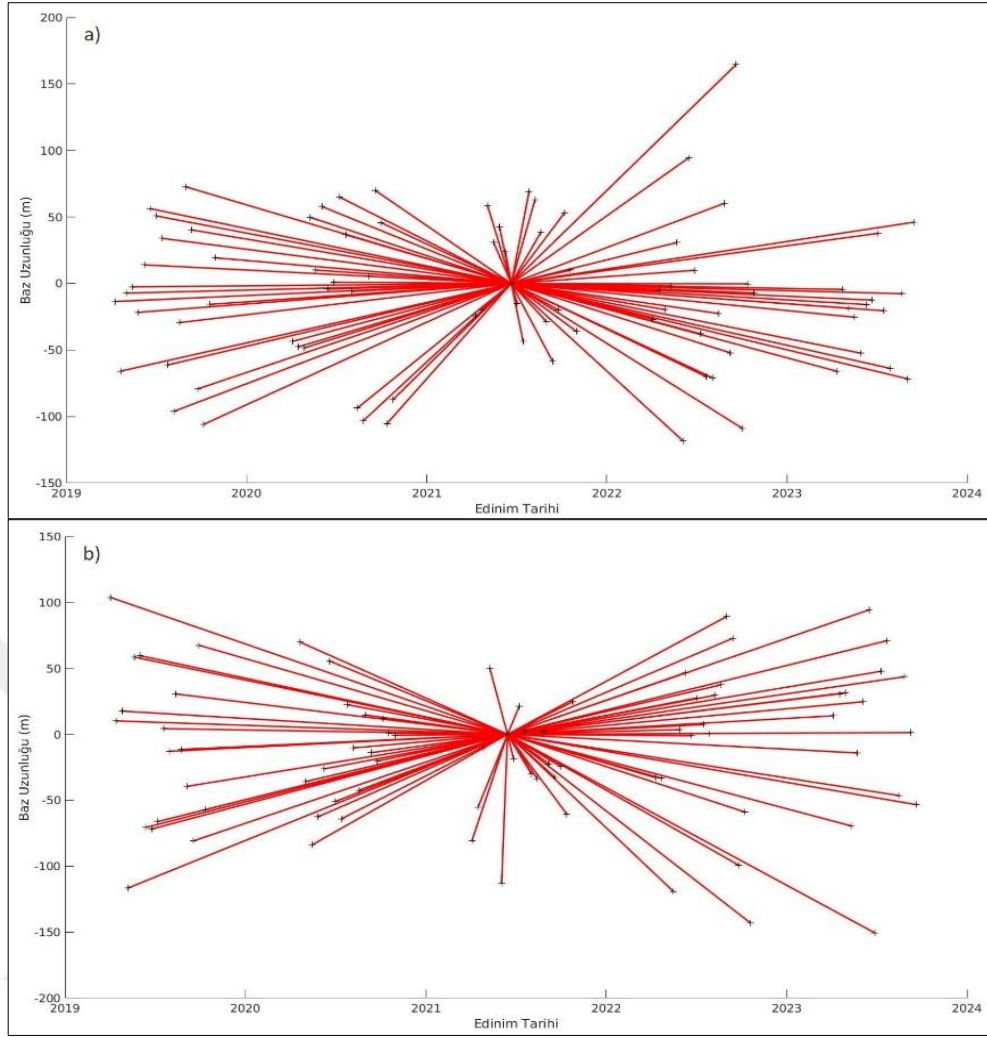
5.9 Karacadağ PSInSAR Sonuçları

Karacadağ, yükselen yörüngede tek alt şerit (IW2), alçalan yörüngede ise iki alt şerit (IW1-IW2) sınırında kaldığı için tüm işlem adımları bu bölümlerin hepsine ayrı ayrı uygulanmıştır. Çalışma alanını kapsayan yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen Sentinel-1 görüntü çerçeveleri Şekil 5.30'da verilmiştir.



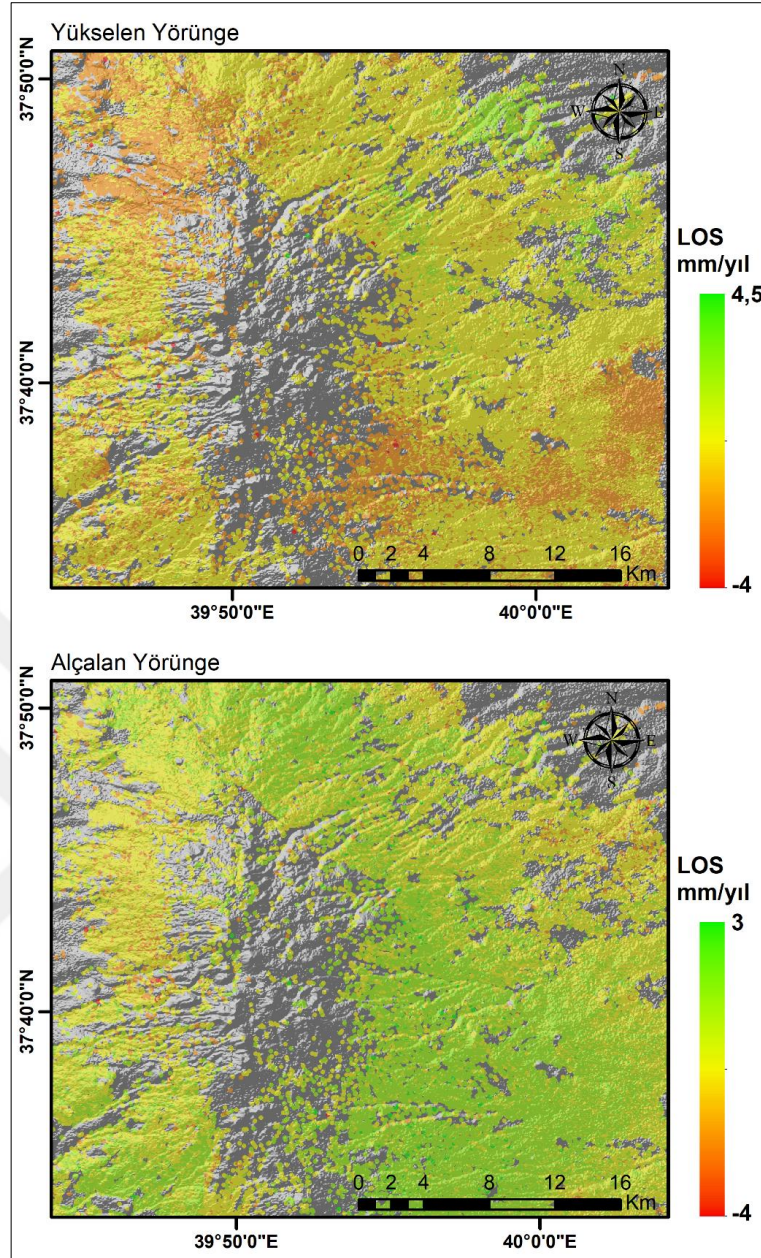
Şekil 5.30. Karacadağ'da kullanılan Sentinel-1 görüntü çerçeveleri.

Yükselen yörüngede 89 görüntü elde edilmiş olup bu görüntülerden 4 tanesinin, alçalan yörüngede ise 86 görüntü elde edilmiş olup bu görüntülerden 5 tanesinin standart sapma, atmosfer ve yörüngesel hata miktarlarının uygun olmaması nedeniyle analizler kalan görüntülerle gerçekleştirilmiştir. Zamansal ve geometrik baz mesafesi, modellenmiş tutarlılık, yükseklik belirsizliği ve Doppler frekans değerleri dikkate alınarak seçilen yükselen yörüngede 21 Haziran 2021, alçalan yörüngede ise 15 Haziran 2021 tarihli ana (master) görüntüler ve bunlara bağımlı ikincil (slave) görüntülere ait baz mesafe şemaları Şekil 5.31'de verilmiştir.



Şekil 5.31. Karacadağ’da kullanılan Sentinel-1 görüntülerinin yükselen (a) ve alçalan (b) yörüngelerdeki baz mesafe şemaları.

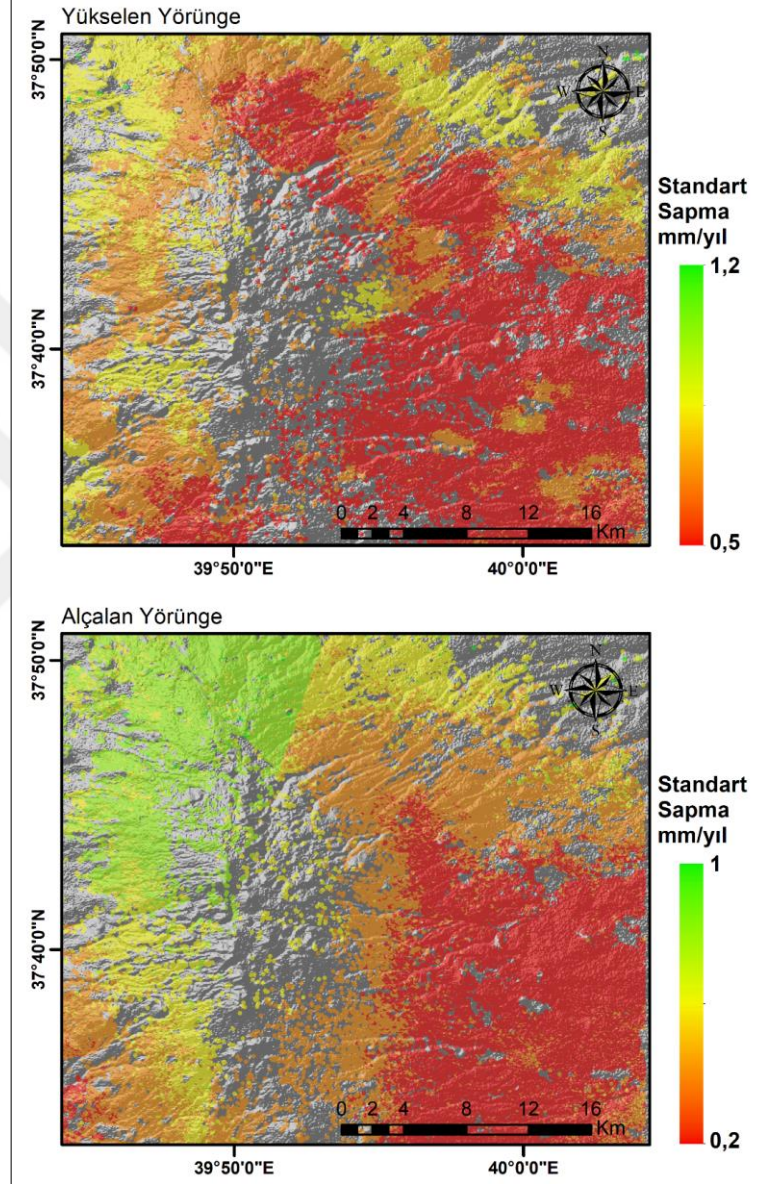
Sentinel-1 görüntüleri ve GACOS gecikme ürünleri SNAP, StaMPS ve TRAIN yazılımları kullanılarak PSInSAR analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanının farklı alt alanlarda olması nedeniyle birden fazla deformasyon haritası üretilmiş ve bu haritaların birlikte değerlendirilebilmesi adına, lejantları aynı olacak şekilde düzenlenerek deformasyon haritaları Şekil 5.32’de verilmiştir.



Şekil 5.32. Karacadağ'a ait yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen ortalama deformasyon hız haritaları.

Yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen deformasyon değerleri genel olarak -4 mm/yıl ile 4 mm/yıl aralığında değişmekte olup çökme (negatif değerler) gösteren noktalar toplam üretilen PS noktasının %20'sini oluşturmaktadır. Şekil 5.32'de verilen ortalama deformasyon hız haritaları Karacadağ'da genel olarak 0 mm/yıl ile 2 mm/yıl arasında değişen bir yükselme davranışı göstermektedir. Yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen LOS doğrultusundaki ortalama deformasyon hız haritaları benzer deformasyon modelini göstermekte ve bu durum da çalışma alanında düşey deformasyonun baskın ve yatay deformasyondan daha yüksek olduğunu

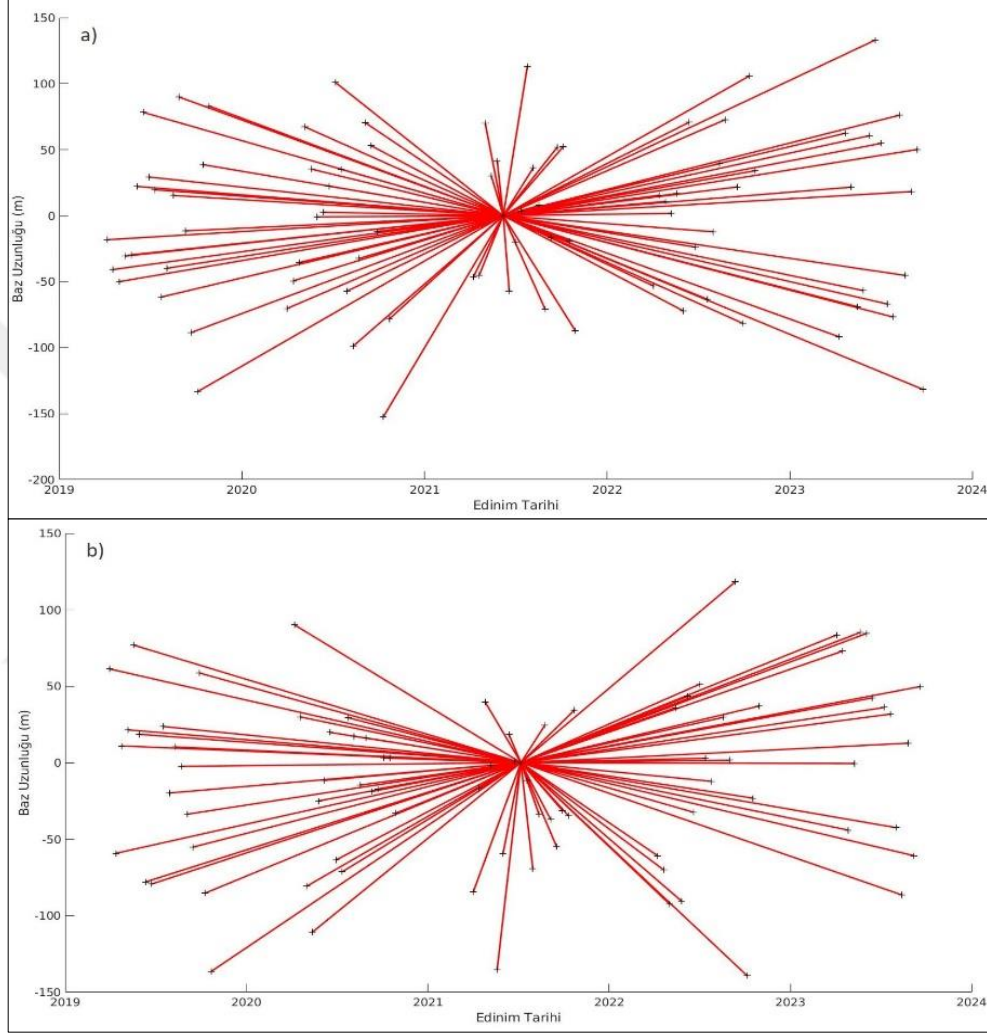
göstermektedir. Hem alçalan hem de yükselen yörüngelerden elde edilen LOS doğrultusundaki ortalama deformasyon hız alanına ait standart sapma değerleri Şekil 5.33'te verilmiştir. Yükselen yörüngede standart sapma değerleri 0,5 mm/yıl ile 1,2 mm/yıl aralığında değişirken, alçalan yörüngede ise 0,2 mm/yıl ile 1 mm/yıl aralığında değişmektedir (Şekil 5.33).



Şekil 5.33. Karacadağ'ın ait yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen standart sapma haritaları.

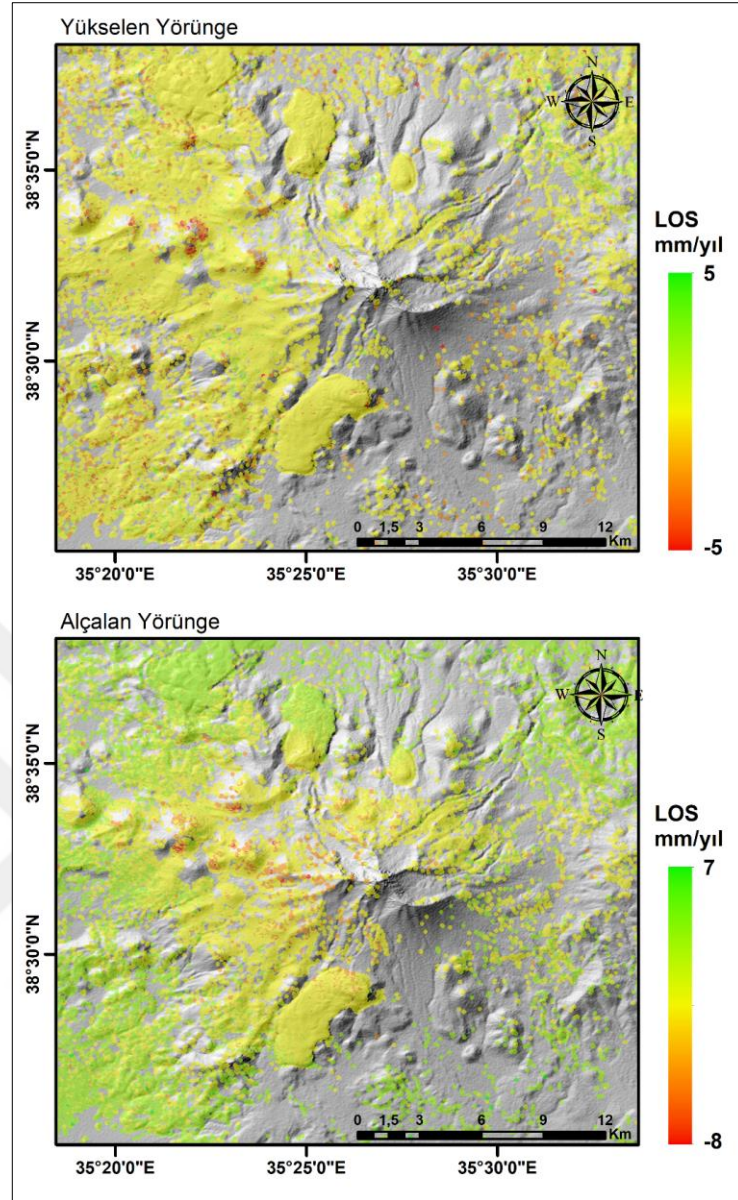
Karacadağ'da yapılan PSInSAR analiz sonucunda yükselen yörünge için yaklaşık 150.000, alçalan yörünge için yaklaşık 160.000 PS noktası üretilmiş olup bu noktaların çoğunlukla Karacadağ'ın alt yamaçlarında olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak

görüntülerle gerçekleştirilmiştir. Zamansal ve geometrik baz mesafesi, modellenmiş tutarlılık, yükseklik belirsizliği ve Doppler frekans değerleri dikkate alınarak seçilen yükselen yörüngede 7 Haziran 2021, alçalan yörüngede ise 7 Temmuz 2021 tarihli ana (master) görüntüler ve bunlara bağımlı ikincil (slave) görüntülere ait baz mesafe şemaları Şekil 5.35'te verilmiştir



Şekil 5.35. Erciyes Dağı'nda kullanılan Sentinel-1 görüntülerinin yükselen (a) ve alçalan (b) yörüngelerdeki baz mesafe şemaları.

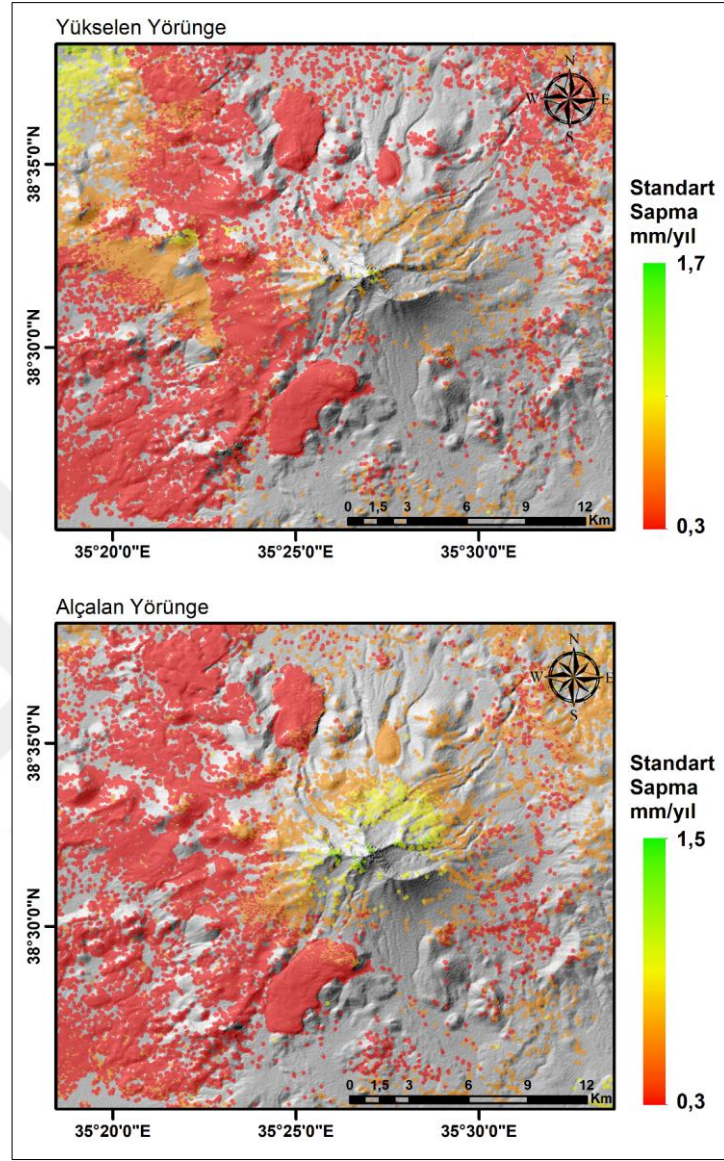
Nisan 2019 ile Eylül 2023 tarihleri arasında yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen Sentinel-1 görüntüleri ve GACOS gecikme ürünleri kullanılarak PSInSAR analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanının farklı alt alanlarda olması nedeniyle birden fazla deformasyon haritası üretilmiş ve bu haritaların beraber değerlendirilebilmesi adına lejantları aynı olacak şekilde düzenlenerek deformasyon haritaları Şekil 5.36'da verilmiştir.



Şekil 5.36. Erciyes Dağı'nın yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen ortalama deformasyon hız haritaları.

Çalışma alanında yapılan PSInSAR analiz sonucunda yükselen ve alçalan yörüngelerde ~80000 PS noktası elde edilmiştir. Bu noktalar çoğunlukla uyuşumun yüksek olduğu Dağ'ın alt yamaçlarında tespit edilmiştir. Uydu bakış doğrultusu ve topoğrafyanın ani değişimleri nedeniyle bazı bölgelerde PS noktaları üretilmemiştir. Bunun bir diğer nedeni ise çalışma alanında bulunan bitki örtüsüne Sentinel-1 C bandının nüfuz edememesidir. Yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen deformasyon değerlerinin genel olarak -5 mm/yıl ile 7 mm/yıl aralığında ve çökme gösteren (negatif değerler) PS noktalarının ise genellikle Erciyes Dağı'nın Kuzey-Batı'sında olduğu tespit edilmiştir. Hem alçalan hem de yükselen yörüngelerden elde

edilen LOS doğrultusundaki ortalama deformasyon hız haritalarına ait standart sapma değerlerine ilişkin görseller Şekil 5.37’de verilmiştir.



Şekil 5.37. Erciyes Dağı’na ait yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen standart sapma haritaları.

Yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen standart sapma değerleri 0,3 mm/yıl ile 1,7 mm/yıl aralığında değişmektedir (Şekil 5.37). Alçalan ve yükselen yörüngelerden elde edilen ortalama deformasyon hız haritaları (Şekil 5.36) benzer deformasyon modelleri göstermekte olup bu durum bölgede meydana gelen deformasyonun düşey yönde ve yatay yöndeki deformasyondan daha büyük olduğunu göstermektedir. Ayrıca çalışma alanı ile ilgili literatür incelendiğinde de Erciyes Dağı’nda InSAR teknikleri kullanılarak cm düzeyinde bir deformasyon tespit edilememiştir (Biggs vd., 2021).

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında Türkiye'deki volkanik sistemlerde (Hasan Dağı, Tendürek Dağı, Ağrı Dağı, Nemrut Dağı, Kula Volkanik Kompleksi, Karacadağ, Erciyes Dağı) meydana gelen yüzey deformasyonlarının güncel durumunun tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda pilot bölge olarak seçilen ve Aksaray ve Niğde illeri arasında konumlanan Hasan Dağı'na 121Y401 no'lu TÜBİTAK projesi kapsamında tesis edilmiş olan 3 adet sürekli gözlem yapan GNSS istasyonuna ait verilerden faydalanmıştır. Buna ek olarak PSInSAR ve SBAS tekniği kullanılarak çalışma alanındaki güncel yüzey deformasyonları tespit edilmiş ve elde edilen sonuçlar GNSS tekniğinden elde edilen bulgular ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca atmosferik etkileşimlerden kaynaklanan hataları en aza indirmek amacıyla PSInSAR sonuçlarına GACOS atmosferik düzeltme yöntemi uygulanmıştır. Diğer 6 volkanik sistemde meydana gelen yüzey deformasyonları ise sadece PSInSAR-GACOS tekniği kullanılarak tespit edilmiştir.

Bu tez çalışmasından elde edilen bulgu ve sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

1. Hasan Dağı'nda meydana gelen yüzey deformasyonlarının uzun süreli izlenmesi amacıyla Nisan 2019 ile Eylül 2023 tarihleri arasında alçalan ve yükselen yörüngelerden elde edilen Sentinel-1 SAR görüntüleri ve GACOS troposferik gecikme ürünleri, PSInSAR tekniği kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda Hasan Dağı'na ait yüzey deformasyonları belirlenmiş ve deformasyona ait zaman serileri üretilmiştir.

- PSInSAR analizleri sonucunda yaklaşık 1500 günlük bir zaman aralığında LOS doğrultusundaki deformasyonların yükselen yörüngede -4,2 mm/yıl ile 3,5 mm/yıl arasında alçalan yörüngede ise -4,9 mm/yıl ile 4 mm/yıl arasında olduğu tespit edilmiştir. Her iki yörüngeden elde edilen sonuçlar özellikle Hasan Dağı'nın zirvesinde negatif değerlere sahip PS noktaları olduğunu göstermektedir. Ortalama deformasyon hız haritalarına ait standart sapma değerleri ise yükselen yörüngede 0,273 mm/yıl ile 0,976 mm/yıl arasında değişirken, alçalan yörüngede 0,234 mm/yıl ile 1,046 mm/yıl arasında değişmektedir. En yüksek standart sapma değerine sahip noktaların ise yine Hasan Dağı'nın zirvesine yakın olan alanlardan üretilmiş olan PS noktalarına ait olduğu tespit edilmiştir.

- Yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen PS noktaları kullanılarak deformasyonlara ait yatay ve düşey bileşenler elde edilmiş olup yatay deformasyonun (Doğu-Batı yönünde) -8 mm/yıl ile 8 mm/yıl arasında, düşey deformasyonun ise -5 mm/yıl ile 5 mm/yıl arasında olduğu tespit edilmiştir. Şekil 5.15'te verilen yatay ve düşey deformasyon bileşenleri Hasan Dağı'nın zirvesinin 0 mm ile 5 mm arasında çökme göstermesi dışında genel anlamda oldukça küçük değerlerdeki deformasyonları temsil etmektedir.
 - PSInSAR ve GNSS tekniğinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması amacıyla Aralık 2022 tarihinde Hasan Dağı'na üç adet sabit GNSS istasyonu tesis edilmiş ancak Şubat 2023 tarihinde meydana gelen Kahramanmaraş depremlerinin kosismik etkilerini elimini etmek amacıyla sadece Nisan 2023 ile Eylül 2023 tarihleri arasındaki veriler GAMIT/GLOBK yazılım takımıyla değerlendirilmiştir. Ayrıca GNSS ölçülerindeki periyodik etkilerin etkisinin incelenmesi istatistiksel değerlendirmeler yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda; PSInSAR ve GNSS tekniklerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde 180 günlük zaman periyodunda her iki teknikten elde edilen zaman serilerinin genel anlamda benzer yönlerdeki hareketi temsil ettiği ancak aralarında uyumun olmadığı tespit edilmiştir.
 - GNSS ölçülerinin gerçekleştirildiği tarihlerde elde edilen Sentinel-1 SAR görüntüleri kullanılarak Hasan Dağı'nda meydana gelen yüzey deformasyonları SBAS tekniği ile tespit edilmiş ve elde edilen bulgular GNSS ile karşılaştırılmıştır. SBAS analizleri sonucunda yaklaşık 180 günlük bir zaman aralığında LOS doğrultusundaki deformasyonların yükselen yörüngede -10 mm/yıl ile 15 mm/yıl, alçalan yörüngede ise -15 mm/yıl ile 20 mm/yıl arasında olduğu tespit edilmiştir. SBAS ve GNSS tekniklerinden elde edilen zaman serileri karşılaştırıldığında ise iki teknik arasında genel anlamda bir uyumun olmadığı tespit edilmiştir.
 - PSInSAR, SBAS ve GNSS tekniklerinden elde edilen hız değerleri incelendiğinde her iki teknikten elde edilen sonuçların benzer yönde ancak farklı değerlerdeki hareketleri gösterdiği tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar arasındaki farklılığa, her iki tekniğin aynı zaman dilimini kapsamaması, GNSS noktaları ile PSInSAR/SBAS noktalarının birebir aynı konumda olmaması ve her iki tekniğin farklı algılama kapasitesine ve duyarlılığına sahip olmasının yol açtığı düşünülmektedir.
2. Global Volkanizma Programına göre faaliyetlerine devam eden diğer 6 volkanik sistemin (Tendürek Dağı, Ağrı Dağı, Nemrut Dağı, Kula Volkanik

Kompleksi, Karacadağ, Erciyes Dağı) Nisan 2019 ile Eylül 2024 tarihleri arasında meydana gelen güncel yüzey deformasyonları Sentinel-1 SAR görüntüleri ve GACOS troposferik gecikme ürünleri, PSInSAR tekniğiyle kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda;

- Tendürek Dağı'nda LOS doğrultusunda yükselen yörüngeden -12,1 mm/yıl ile 2,8 mm/yıl, alçalan yörüngede ise -12,6 mm/yıl ile 3,6 mm/yıl aralığında kaldera merkezli bir yüzey deformasyonu tespit edilmiştir. Ayrıca yüzey deformasyonlarının zamansal evrimini incelemek amacıyla yükselen ve alçalan yörüngelerden belirli PS noktalarına ait zaman serileri üretilmiş ve Tendürek Dağı'nda meydana gelen çökmenin 2019 ile 2023 yılları arasında doğrusal olduğu tespit edilmiştir. Yükselen ve alçalan yörüngelerdeki PS noktaları kullanılarak çalışma alanındaki baskın deformasyon modelinin düşey yönde ve -20 mm/yıl ile 5 mm/yıl arasında olduğu tespit edilmiştir.
- Ağrı Dağı'nda LOS doğrultusunda yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen deformasyon değerlerinin, -5 mm/yıl ile 5 mm/yıl aralığında değişmekte olduğu ve çökme gösteren (negatif değerler) PS noktalarının genellikle Ağrı Dağı'nın zirve kısımlarında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Ağrı Dağı'nın zirve kısımlarında kalıcı buz örtüsünün olması sebebiyle yükselen ve alçalan yörüngelerden üretilen ortalama deformasyon hız haritalarının bazı bölgelerinde yeterli sayıda PS noktasının üretilmediği ve çökme gösteren noktaların da çoğunlukla zirveye yakın alanlarda olduğu tespit edilmiştir. Ortalama deformasyon hız haritalarına ait standart sapma değerleri incelendiğinde standart sapmanın en yüksek olduğu alanların da yine zirve ve zirveye yakın alanlarda üretilmiş olan PS noktalarına ait olduğu görülmektedir. Bu duruma kalıcı bir buz örtüsüne sahip olan ve son yıllarda küresel ısınma nedeniyle eriyen buzulların yol açtığı düşünülmektedir.
- Nemrut Dağı ve yakın çevresine ait PSInSAR analiz sonuçları, yükselen yörüngede -5,6 ile 5,7 mm/yıl arasında, alçalan yörüngede ise -4,6 ile 6,7 mm/yıl aralığında değişen bir deformasyonun olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlar Nemrut Dağı'nın 0 mm/yıl ile 5 mm/yıl arasında yükselme, yakın çevresindeki lokal bölgelerde ise 0 mm/yıl ile -4 mm/yıl arasında çökme (negatif değerler) davranışı gösterdiği tespit edilmiştir. Ortalama deformasyon hız haritalarına ait standart sapma değerleri yükselen yörüngede 0,4 mm/yıl ile 1,4 mm/yıl, alçalan yörüngede ise 0,325 mm/yıl ile 1,114 mm/yıl arasında değişmektedir. Ayrıca en düşük standart sapma değerlerinin Nemrut Dağı ve yakın çevresinden üretilmiş olan PS noktalarına ait

olduğu tespit edilmiştir. Alçalan ve yükselen yörüngelerden elde edilen ortalama deformasyon hız haritalarının benzer deformasyon modelleri göstermesi bölgede meydana gelen baskın deformasyonun düşey yönde olduğunu göstermektedir.

- Kula Volkanik Kompleksi'nde PSInSAR tekniği kullanılarak yükselen yörünge -4 mm/yıl ile 2,7 mm/yıl aralığında, alçalan yörüngede ise -3,7 mm/yıl ile 2,4 mm/yıl aralığında bir yüzey deformasyonu tespit edilmiştir. Volkanik komplekse ait 3 ayrı alan incelenmiş olup (Divlit Volkanı, Kula Tepeleri ve Volkanik Park) bu alanların genel olarak 0 mm/yıl ile 2 mm/yıl arasında yükselme davranışı gösterdiği tespit edilmiştir. Her iki yörüngeden elde edilen sonuçların benzer deformasyon modeli göstermesi bölgedeki baskın deformasyon bileşenin düşey yönde olduğunu göstermektedir. Ayrıca bu üç alanda (Divlit Volkanı, Kula Tepeleri ve Volkanik Park) üretilen PS noktalarına ait standart sapma değerleri genel anlamda 0,1 mm/yıl ile 0,3 mm/yıl arasında olduğu tespit edilmiştir.

- Karacadağ'da PSInSAR tekniği ile yükselen ve alçalan yörüngelerden elde edilen deformasyon değerleri genel olarak -4 mm/yıl ile 4 mm/yıl aralığında değişmektedir. Her iki yörüngeden elde edilen sonuçların benzer olması bölgedeki baskın deformasyonun düşey yönde olduğunu göstermektedir. Karacadağ'da çökme (negatif değerler) gösteren lokal noktalar toplam üretilen PS noktasının %20'sini oluşturmaktadır. Bu nedenle çalışma alanında genel olarak 0 mm/yıl ile 4 mm/yıl arasında bir yükselme eğilimi tespit edilmiştir. Bu noktalara ait standart sapma değerleri yükselen yörüngede 0,5 mm/yıl ile 1,2 mm/yıl aralığında değişirken, alçalan yörüngede ise 0,2 mm/yıl ile 1 mm/yıl aralığında değişmektedir.

- Erciyes Dağı ve yakın çevresine ait PSInSAR analiz sonuçları, yükselen ve alçalan yörüngelerde -5 mm/yıl ile 5 mm/yıl aralığında değişen bir deformasyonun olduğunu göstermektedir. Ayrıca Erciyes Dağı'nın zirve kısımlarında buz örtüsünün olması sebebiyle yükselen ve alçalan yörüngelerden üretilen ortalama deformasyon hız haritalarının bazı bölgelerinde yeterli sayıda PS noktasının üretilemediği ve çökme gösteren noktaların da çoğunlukla zirveye yakın olan alanlarda olduğu tespit edilmiştir. Her iki yörüngeden elde edilen sonuçların benzer olması ise çalışma alanındaki baskın deformasyonun düşey yönde olduğunu göstermektedir. Ortalama deformasyon hız haritalarına ait standart sapma değerleri yükselen ve alçalan yörüngelerde genel olarak 0,3 ile 1,7 mm/yıl arasında olduğu tespit edilmiştir.

Sonuç olarak bu tez çalışması kapsamında Türkiye’de Tendürek Dağı haricindeki diğer aktif volkanik sistemlerde InSAR tekniği kullanılarak incelenen dönem içerisinde cm düzeyinde bir deformasyonun olmadığı tespit edilmiştir.

Tendürek Dağı haricinde genel olarak -2 mm/yıl ile 5 mm/yıl arasında deformasyon gösteren volkanik sistemlerin InSAR tekniği kullanılarak izlenmesi, kalıcı kar örtüsü, topoğrafyadaki ani değişimler, tekniğin kısıtlamaları ve bitki örtüsü gibi nedenlerle güçleşebilmektedir. Bu nedenle karşılaşılan bu problemlerin çözümü için;

- ✓ Daha yüksek bir penetrasyon yeteneğine sahip olan L band SAR görüntülerinin,
- ✓ Köşe reflektörlerinin (corner reflector),
- ✓ Yerel atmosferik modellerin,
- ✓ Farklı InSAR tekniklerinin,
- ✓ Daha yüksek çözünürlüğüne sahip Radar görüntülerinin (Sentinel-1 StripMap, COSMO-SkyMed Spotlight, HIMAGE vb.) kullanılması gerektiği düşünülmektedir.

Ayrıca Hasan Dağı’na tesis edilen GNSS istasyonlardan sadece 6 aylık ölçüler bulunduğundan ilerleyen zamanda istasyonlara ait daha sağlıklı veriler elde edileceği ve bölgede meydana gelen yüzey deformasyonlarının daha sağlıklı bir şekilde tespit edilerek Türkiye’de yer alan volkanik sistemlerin izlenmesi konusuna katkı yapacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdikan, S., 2007. SAR görüntülerinden üretilen interferometrik ve stereo sayısal yükseklik modellerinin kalitesinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Abdikan, S., 2012. Monitoring of land surface subsidence in Zonguldak coal mining field in the northern Turkey using multi temporal sar interferometry, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Akoğlu, A. M., 2001. 17 Ağustos 1999 İzmit depremi postsismik deformasyonunun sentetik açıklık radar interferometrisi yöntemi ile incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Albino, F., Biggs, J. ve Syahbana, D. K., 2019. Dyke intrusion between neighbouring arc volcanoes responsible for 2017 pre-eruptive seismic swarm at Agung, Nature communications, 10, 1, 748.
- Albino, F., Biggs, J., Yu, C. ve Li, Z., 2020. Automated methods for detecting volcanic deformation using Sentinel-1 InSAR time series illustrated by the 2017-2018 unrest at Agung, Indonesia, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 125, 2, 1-18.
- Aly, M. H. ve Cochran, E. S., 2011. Spatio-temporal evolution of Yellowstone deformation between 1992 and 2009 from InSAR and GPS observations, Bulletin of Volcanology, 73, 1407-1419.
- Amelung, F., Jónsson, S., Zebker, H. ve Segall, P., 2000. Widespread uplift and 'trapdoor' faulting on Galapagos volcanoes observed with radar interferometry, Nature, 407, 993-996.
- Anantrasirichai, N., Biggs, J., Albino, F., Hill, P. ve Bull, D., 2018. Application of machine learning to classification of volcanic deformation in routinely generated InSAR data, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 123, 8, 6592-6606.
- Annen, C. ve Wagner, J. J., 2003. The impact of volcanic eruptions during the 1990s, Natural Hazards Review, 4, 4, 169-175.
- Araya, M. C. ve Biggs, J., 2020. Deformation associated with sliver transport in Costa Rica: seismic and geodetic observations of the July 2016 Bijagua earthquake sequence, Geophysical Journal International, 220, 1, 585-597.
- Askne, J. ve Smith, G., 1997. Forest INSAR decorrelation and classification properties, In proceedings on ERS SAR interferometry, Zurich, 95-103.
- Atıcı, G. ve Türkecan, A., 2017. Anadolu'nun volkanları, Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni, 22, 1-18.

- Auker, M. R., Sparks, R. S. J., Siebert, L., Crosweller, H. S. ve Ewert, J., 2013. A statistical analysis of the global historical volcanic fatalities record, *Journal of Applied Volcanology*, 2, 1-24.
- Aydar, E. ve Gourgaud, A., 1998. The geology of Mount Hasan stratovolcano, central Anatolia, Turkey, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85, 1-4, 129-152.
- Aydar, E., 1992. Etude volcano-structurale et magmatologique du strato-volcan Hasan Dagı (Anatolie centrale-Turquie), PhD Thesis, Université Clermont Auvergne, Clermont-Ferrand, France.
- Aydar, E., Gourgaud, A., Ulusoy, I., Digonnet, F., Labazuy, P., Sen, E., Bayhan, H., Kurttas, T. ve Tolluoglu, A. U., 2003. Morphological analysis of active Mount Nemrut stratovolcano, eastern Turkey: evidences and possible impact areas of future eruption, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 123, 3-4, 301-312.
- Aydöner, C. ve Maktav, D., 2006. Uydu ve yersel veri entegrasyonu ile deprem sonrası arazi örtüsü/kullanımı analizi, *İTÜ Dergisi*, 5, 2, 35-48.
- Baldasso, V., Soncini, A., Azzoni, R. S., Diolaiuti, G., Smiraglia, C. ve Bocchiola, D., 2019. Recent evolution of glaciers in Western Asia in response to global warming: the case study of Mount Ararat, Turkey, *Theoretical and applied climatology*, 137, 45-59.
- Barsotti, S., Parks, M. M., Pfeffer, M. A., Óladóttir, B. A., Barnie, T., Titos, M. M., Jónsdóttir, K., Pedersen, G. B. M., Hjartardóttir, Á. R., Stefansdóttir, G., Johannsson, T., Arason, Þ., Gudmundsson, M. T., Oddsson, B., Þrastarson, R. H., Ófeigsson, B. G., Vogfjörð, K., Geirsson, H., Hjörvar, T., von Löwis, S., Petersen, G. N. ve Sigurðsson, E. M., 2023. The eruption in Fagradalsfjall (2021, Iceland): how the operational monitoring and the volcanic hazard assessment contributed to its safe access, *Natural Hazards*, 116, 3, 3063-3092.
- Bathke, H., Nikkhoo, M., Holohan, E. P. ve Walter, T. R., 2015. Insights into the 3D architecture of an active caldera ring-fault at Tendürek volcano through modeling of geodetic data, *Earth and Planetary Science Letters*, 422, 157-168.
- Bathke, H., Sudhaus, H., Holohan, E. P., Walter, T. R. ve Shirzaei, M., 2013. An active ring fault detected at Tendürek volcano by using InSAR, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118, 8, 4488-4502.
- Bayık, Ç., 2018. Çok zamanlı ve çok frekanslı sar-gnss verileri ile heyelanların araştırılması: Beylikdüzü-Esenyurt örneği, Doktora Tezi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- Beauducel, F., Briole, P. ve Froger, J. L., 2000. Volcano-wide fringes in ERS synthetic aperture radar interferograms of Etna (1992-1998): Deformation or tropospheric effect?, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105, B7, 16391-16402.

- Bekaert, D. P. S., Walters, R. J., Wright, T. J., Hooper, A. J. ve Parker, D. J., 2015. Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques, *Remote Sensing of Environment*, 170, 40-47.
- Bemelmans, M. J., Biggs, J., Poland, M., Wookey, J., Ebmeier, S. K., Diefenbach, A. K. ve Syahbana, D., 2023. High-resolution InSAR reveals localised pre-eruptive deformation inside the crater of Agung volcano, Indonesia, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128, 5.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. ve 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.
- Biggs, J., Dogru, F., Dagliyar, A., Albino, F., Yip, S., Brown, S., Anantrasirichai, N. ve Atıcı, G., 2021. Baseline monitoring of volcanic regions with little recent activity: application of Sentinel-1 InSAR to Turkish volcanoes, *Journal of Applied Volcanology*, 10, 1-14.
- Bilgilioglu, B. B., 2022. Yapay açıklıklı radar interferometre teknikleri ile tuz gölü dinamiklerinin analizi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- Blanco-Sanchez, P., Mallorquí, J. J., Duque, S. ve Monells, D., 2008. The coherent pixels technique (CPT): An advanced DInSAR technique for nonlinear deformation monitoring, *Earth Sciences and Mathematics* 1, 1167-1193.
- Boixart, G., Cruz, L. F., Miranda Cruz, R., Euillades, P. A., Euillades, L. D. ve Battaglia, M., 2020. Source model for Sabancaya volcano constrained by DInSAR and GNSS surface deformation observation, *Remote Sensing*, 12, 11, 1852.
- Borsi, S., Ferrara, G., Innocenti, F. ve Mazzuoli, R., 1972. Geochronology and petrology of recent volcanics in the Eastern Aegean Sea (West Anatolia and Lesvos Island), *Bulletin Volcanologique*, 36, 473-496.
- Braun, A., 2019. Radar satellite imagery for humanitarian response: Bridging the gap between technology and application, PhD Thesis, Eberhard Karls Universität Tübingen, Tübingen, Almanya.
- Brawner, E., 2016. Synthetic aperture radar interferometry analysis of ground deformation within the Coso geothermal site, California, MSc Thesis, University of Arkansas, USA.
- Bridgland, D. R., Demir, T., Seyrek, A., Pringle, M., Westaway, R., Beck, A. R., Rowbotham, G. ve Yurtmen, S., 2007. Dating Quaternary volcanism and incision by the River Tigris at Diyarbakır, southeast Turkey, *Journal of Quaternary Science: Published for the Quaternary Research Association*, 22, 4, 387-393.

- Brown, S. K., Jenkins, S. F., Sparks, R. S. J., Odbert, H. ve Auken, M. R., 2017. Volcanic fatalities database: analysis of volcanic threat with distance and victim classification, *Journal of Applied Volcanology*, 6, 1-20.
- Brown, S. K., Sparks, R. S. J. ve Jenkins, S. F., 2015. Global distribution of volcanic threat, In: Loughlin SC, Sparks RSJ, Brown SK, Jenkins SF, Vye-Brown C, editors, *Global Volcanic Hazards and Risk*, Cambridge: Cambridge University Press, 359-69.
- Budd, L., Griggs, S., Howarth, D. ve Ison, S., 2011. A fiasco of volcanic proportions? Eyjafjallajökull and the closure of European airspace, *Mobilities*, 6, 1, 31-40.
- Calò, F., Ardizzone, F., Castaldo, R., Lollino, P., Tizzani, P., Guzzetti, F., Lanari, R., Angeli, M., Pontoni, F. ve Manunta, M., 2014. Enhanced landslide investigations through advanced DInSAR techniques: The Ivancich case study, Assisi, Italy, *Remote Sensing of Environment*, 142, 69-82.
- Canaslan Çomut, F., 2016. Farklı yeryüzü özelliklerinde ileri InSAR teknikleri kullanılarak yüzey deformasyonlarının belirlenmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Cardwell, R., McDonald, G., Wotherspoon, L. ve Lindsay, J., 2021. Simulation of post volcanic eruption land use and economic recovery pathways over a period of 20 years in the Auckland region of New Zealand, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 415, 107253.
- Chang, H. C., Ge, L. ve Rizos, C., 2004. Application of repeat-pass DInSAR and GIS for underground mine subsidence monitoring, In *Proceedings of IGARSS*, 2815-2818.
- Chen, Y., Zhang, G., Ding, X. ve Li, Z., 2000. Monitoring earth surface deformations with InSAR technology: principles and some critical issues, *Journal of Geospatial Engineering*, 2, 1, 3-22.
- Chester, D. K., Degg, M., Duncan, A. M. ve Guest, J. E., 2000. The increasing exposure of cities to the effects of volcanic eruptions: a global survey, *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, 2, 3, 89-103.
- Chu, T. ve Lindenschmidt, K. E., 2017. Comparison and validation of digital elevation models derived from InSAR for a flat inland delta in the high latitudes of Northern Canada, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 43, 2, 109-123.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Novali, F., Prati, C. ve Rocca, F., 2003. SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 7, 1685-1701.
- Corsa, B., Barba-Sevilla, M., Tiampo, K. ve Meertens, C., 2022. Integration of DInSAR time series and GNSS data for continuous volcanic deformation monitoring and eruption early warning applications, *Remote Sensing*, 14, 3, 784.

- Costantini, M., Falco, S., Malvarosa, F. ve Minati, F., 2008. A new method for identification and analysis of persistent scatterers in series of SAR images, In IGARSS 2008-2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2, 2, 449-452.
- Costantini, M., Malvarosa, F. ve Minati, F., 2012. A general formulation for redundant integration of finite differences and phase unwrapping on a sparse multidimensional domain, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 50, 3, 758-768.
- Čotar, K., Oštir, K. ve Kokalj, Ž., 2016. Radar satellite imagery and automatic detection of water bodies, Geodetski glasnik, 50, 47, 5-15.
- Crosetto, M., Biescas, E., Duro, J., Closa, J. ve Arnaud, A., 2008. Generation of advanced ERS and Envisat interferometric SAR products using the stable point network technique, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 74, 4, 443-450.
- Curlander, J. C. ve McDonough, N. R., 1991. Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing, John Wiley and Sons, New York.
- Çelik, M. V., 2022. Karacadağ yöresinde arazi kullanımı ve planlamaya yönelik öneriler, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Sosyal Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.
- Çubukçu, H. E., Ulusoy, I., Aydar, E., Ersoy, O., Şen, E., Gourgaud, A. ve Guillou, H., 2012. Mt. Nemrut volcano (Eastern Turkey): temporal petrological evolution, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 209, 33-60.
- Dai, K., Liu, G., Li, Z., Li, T., Yu, B., Wang, X. ve Singleton, A., 2015. Extracting vertical displacement rates in Shanghai (China) with multi-platform SAR images, Remote Sensing, 7, 8, 9542-9562.
- Dallemand, J. F., Lichtenegger, J., Raney, R. K. ve Schumann, R., 1993. Radar imagery: theory and interpretation, Lecture notes, RSC Series (FAO), 67.
- De Martino, P., Dolce, M., Brandi, G., Scarpato, G. ve Tammara, U., 2021. The ground deformation history of the neapolitan volcanic area (Campi Flegrei caldera, Somma-Vesuvius Volcano and Ischia island) from 20 years of continuous GPS observations (2000-2019), Remote Sensing, 13, 14, 2725.
- DeGrandpre, K., Wang, T., Lu, Z. ve Freymueller, J. T., 2017. Episodic inflation and complex surface deformation of Akutan volcano, Alaska revealed from GPS time-series, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 347, 337-359.
- Deguchi, T., Kato, M., Akcin, H. ve Kutoglu, H. S., 2006. Automatic processing of interferometric SAR and accuracy of surface deformation measurement, In SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques VIII, 6363, 47-54.

- Delacourt, C., Briole, P. ve Achache, J., 1998. Tropospheric corrections of SAR interferograms with strong topography, Application to Etna, Geophysical Research Letters, 25, 15, 2849-2852.
- Demirel, H., 2003. Dengeleme Hesabı, Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi, Üniversite Yayın No: YTÜ.İN.DK-03.0703,245s, İstanbul.
- Deniel, C., Aydar, E. ve Gourgaud, A., 1998. The Hasan Dagi stratovolcano (Central Anatolia, Turkey): evolution from calc-alkaline to alkaline magmatism in a collision zone, Journal of volcanology and Geothermal Research, 87, 1-4, 275-302.
- Derauw, D., 1999. DInSAR and coherence tracking applied to glaciology: The example of Shirase Glacier, FRINGE99 workshop, 1-8.
- Desai, B., Maskrey, A., Peduzzi, P., De Bono, A. ve Herold, C., 2015. Making development sustainable: the future of disaster risk management, global assessment report on disaster risk reduction, Geneva: United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR).
- Ding, X. L., Li, Z. W., Zhu, J. J., Feng, G. C. ve Long, J. P., 2008. Atmospheric effects on InSAR measurements and their mitigation, Sensors, 8, 9, 5426-5448.
- Doğru, F., Albino, F. ve Biggs, J., 2023. Weather model based atmospheric corrections of Sentinel-1 InSAR deformation data at Turkish volcanoes, Geophysical Journal International, 234, 1, 280-296.
- Dong, S., Yin, H., Yao, S. ve Zhang, F., 2013. Detecting surface subsidence in coal mining area based on DInSAR technique, Journal of Earth Science, 24, 3, 449-456.
- Doocy, S., Daniels, A., Dooling, S. ve Gorokhovich, Y., 2013. The human impact of volcanoes: a historical review of events 1900-2009 and systematic literature review, PLoS currents, 5.
- Ducret, G., Doin, M. P., Grandin, R., Lasserre, C. ve Guillaso, S., 2014. DEM corrections before unwrapping in a small baseline strategy for InSAR time series analysis, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 11, 3, 696-700.
- Dwivedi, R., Narayan, A. B., Tiwari, A., Singh, A. K. ve Dikshit, O., 2017. Optimal estimation of interferometric phase for measuring surface deformation, International journal of remote sensing, 38, 5, 1339-1349.
- Ekici, T., 2023. Yeryüzündeki volkanik aktivitenin dağılımı ve Türkiye'den örnekler, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 2, 1, 5-15.
- Elliott, J. R., 2009. Strain accumulation and release on the Tibetan Plateau measured using InSAR, PhD Thesis, University of Oxford, Oxford, United Kingdom.

- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş. ve Şaroğlu, F., 2013. Açıklamalı Türkiye Diri Fay Haritası, Ölçek 1:1.250.000, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayın Serisi, 30, Ankara.
- Engman, E. T. ve Chauhan, N., 1995. Status of microwave soil moisture measurements with remote sensing, *Remote Sensing of Environment*, 51, 1, 189-198.
- Ercan, T., 1986. Anadolu'nun sönmüş volkanları yeniden püskürecekler mi, *Tübitak Bilim ve Teknik Dergisi*, 222, 17-19.
- Ercan, T., ve Öztunalı, Ö., 1982. Kula volkanizmasının özellikleri ve içerdiği "Base surge" tabaka şekilleri, *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 25, 117-125.
- Fallahpour, M. B., Dehghani, H., Jabbar Rashidi, A. ve Sheikhi, A., 2018. SAR target recognition using behaviour library of different shapes in different incidence angles and polarisations, *International Journal of Electronics*, 105, 5, 771-783.
- Fernández, J., Tizzani, P., Manzo, M., Borgia, A., González, P. J., Martí, J., Camacho, A. G., Casu, F., Berardino, P. ve Lanari, R., 2009. Gravity-driven deformation of Tenerife measured by InSAR time series analysis, *Geophysical Research Letters*, 36, 4, 1-6.
- Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F. ve Rucci, A., 2011a. A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR, *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 49, 9, 3460-3470.
- Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F. ve Massonet, D., 2007. InSAR principles-guidelines for SAR interferometry processing and interpretation, *ESA Publications*, TM-19.
- Ferretti, A., Prati, C. ve Rocca, F., 2000. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry, *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 38, 5, 2202-2212.
- Ferretti, A., Prati, C. ve Rocca, F., 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry, *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 39, 1, 8-20.
- Ferretti, A., Tamburini, A., Novali, F., Fumagalli, A., Falorni, G. ve Rucci, A., 2011b. Impact of high resolution radar imagery on reservoir monitoring, *Energy Procedia*, 4, 3465-3471.
- Fielding, E. J., Talebian, M., Rosen, P. A., Nazari, H., Jackson, J. A., Ghorashi, M. ve Walker, R., 2005. Surface ruptures and building damage of the 2003 Bam, Iran, earthquake mapped by satellite synthetic aperture radar interferometric correlation, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110, B03302:1-B03302:15.
- Flores-Anderson, A. I., Herndon, K. E., Thapa, R. B. ve Cherrington, E., 2019. The SAR handbook: comprehensive methodologies for forest monitoring and biomass estimation, *SERVIR Global Science Coordination Office*.

- Freire, S., Florczyk, A. J., Pesaresi, M. ve Sliuzas, R., 2019. An improved global analysis of population distribution in proximity to active volcanoes, 1975-2015, *ISPRS international journal of geo-information*, 8, 8, 341.
- Fruneau, B., Achache, J. Delacourt, C., 1996. Observation and modelling of the Saint-Etienne-de-Tinée landslide using SAR interferometry, *Tectonophysics*, 265, 3-4, 181-190.
- Fydrych, M., 2021. Evaluating multi-temporal DInSAR measurements of ground surface deformation around the Rhenish Coalfields in Germany using Sentinel-1 SAR imagery, MSc Thesis, University of Waterloo, Canada.
- Gabriel, A. K., Goldstein, R. M. ve Zebker, H. A., 1989. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94, 9183-9191.
- Gambino, S., Falzone, G., Ferro, A. ve Laudani, G., 2014. Volcanic processes detected by tiltmeters: A review of experience on Sicilian volcanoes, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 271, 43-54.
- Garthwaite, M. C., Miller, V. L., Saunders, S., Parks, M. M., Hu, G. ve Parker, A. L., 2019. A simplified approach to operational InSAR monitoring of volcano deformation in low-and middle-income countries: Case study of Rabaul Caldera, Papua New Guinea, *Frontiers in Earth Science*, 6, 240.
- Gatsios, T., Cigna, F., Tapete, D., Sakkas, V., Pavlou, K. ve Parcharidis, I., 2020. Copernicus sentinel-1 MT-InSAR, GNSS and seismic monitoring of deformation patterns and trends at the Methana Volcano, Greece, *Applied Sciences*, 10, 18, 6445-6523.
- Gee, D., Sowter, A., Novellino, A., Marsh, S. ve Gluyas, J., 2016. Monitoring land motion due to natural gas extraction: Validation of the Intermittent SBAS (ISBAS) DInSAR algorithm over gas fields of North Holland, the Netherlands, *Marine and Petroleum Geology*, 77, 1338-1354.
- Gezgin, C., 2020. Gnss ve insar teknikleri ile Tuz Gölü fay zone'sunun (Tgfb) kinematik analizi, Doktora Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- Gezgin, C., 2022. The influence of groundwater levels on land subsidence in Karaman (Turkey) using the PS-InSAR Technique, *Advances in Space Research*, 70, 11, 3568-3581.
- Gezgin, C., Yılmaz, H. M., Erdoğan, H., Bilgilioğlu, S. S., Gürbüz, E., Orhan, O., Tiryakioğlu, İ., Gürbüz, A., Gündüz, H. İ., Atıcı, G., Türkmen, C., Yıldırım, E., Kılıçel, S. ve Özal, K., 2022. Hasan Dağı'na ait yüzey deformasyonlarının GNSS tekniği ile izlenmesi: Öncül bulgular, Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu (TUJK) 2022 Yılı Bilimsel Toplantısı.
- Ghorbani, Z., Khosravi, A., Maghsoudi, Y., Mojtahedi, F. F., Javadnia, E. ve Nazari, A., 2022. Use of InSAR data for measuring land subsidence induced by

- groundwater withdrawal and climate change in Ardabil Plain, Iran, *Scientific Reports*, 12, 1, 13998.
- Goel, K. ve Adam, N., 2012. An advanced algorithm for deformation estimation in non-urban areas, *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 73, 100-110.
- Goldstein, R. M., Engelhardt, H., Kamb, B. ve Frolich, R. M., 1993. Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: application to an Antarctic ice stream, *Science*, 262, 5139, 1525-1530.
- Gorshkov, G. S., 1963. Directed volcanic blasts, *Bulletin Volcanologique*, 26, 83-88.
- Graham, L. C., 1974. Synthetic interferometer radar for topographic mapping, *Proceedings of the IEEE*, 62, 6, 763-768.
- Gündüz, H. İ., Yılmaztürk, F. ve Orhan, O., 2023. An investigation of volcanic ground deformation using InSAR observations at Tendürek Volcano (Turkey), *Applied Sciences*, 13, 11, 6787.
- Gürer, Ö. F. ve Aldanmaz, E., 2002. Origin of the Upper Cretaceous–Tertiary sedimentary basins within the Tauride-Anatolide platform in Turkey, *Geological Magazine*, 139, 2, 191-197.
- Gürmen, G., 2003. Yapay açıklıklı radar (SAR) ile görüntü oluşturma, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Hanssen, R. F., 2001. Radar interferometry: data interpretation and error analysis, Springer Science and Business Media.
- Harvey, M., 2021. Sentinel-1 InSAR captures 2019 catastrophic White Island eruption, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 411, 107124.
- Hastaoglu, K. O., Poyraz, F., Erdogan, H., Tiryakioglu, İ., Ozkaymak, C., Duman, H., Gül, Y., Guler, S., Dogan, A. ve Gul, Y., 2023. Determination of periodic deformation from InSAR results using the FFT time series analysis method in Gediz Graben, *Natural Hazards*, 117,1, 491-517.
- Heineke, C., Niedermann, S., Hetzel, R. ve Akal, C., 2016. Surface exposure dating of Holocene basalt flows and cinder cones in the Kula volcanic field (Western Turkey) using cosmogenic ³He and ¹⁰Be, *Quaternary Geochronology*, 34, 81-91.
- Henderson, S. T. ve Pritchard, M. E., 2013. Decadal volcanic deformation in the Central Andes Volcanic Zone revealed by InSAR time series, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14, 5, 1358-1374.
- Hooper, A., 2008. A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches, *Geophysical Research Letters*, 35, 16.

- Hooper, A., Segall, P. ve Zebker, H., 2007. Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112, 1-21.
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P. ve Kampes, B., 2004. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent Scatterers, *Geophysical research letters*, 31, 23, L23611, 1-5.
- Hulsmeyer, C., 1904. Herzian-Wave projecting and receiving apparatus adopted to indicate or give warning of the presence of a metallic body such as a ship or a train, *British Patent No.* 13, 170.
- Ismaya, F., 2010. The application of differential interferometric synthetic aperture radar to identify, measure, and analyze subsidence above underground coal mines in Utah, MSc Thesis, The University of Utah, Utah, USA.
- Janssen, V., Roberts, C., Rizos, C. ve Abidin, H. Z., 2002. Low-cost GPS-based volcano deformation monitoring at Mt. Papandayan, Indonesia, *Journal of volcanology and geothermal research*, 115, 1-2, 139-151.
- Kampes, B. M., 2006. *Radar interferometry: Persistent Scatterer Technique*, Springer Dordrecht, The Netherlands.
- Karakhanian, A., Djrbashian, R., Trifonov, V., Philip, H., Arakelian, S. ve Avagian, A., 2002. Holocene-historical volcanism and active faults as natural risk factors for Armenia and adjacent countries, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 113, 1-2, 319-344.
- Karaoğlu, Ö., Elshaafi, A., Salah, M. K., Browning, J. ve Gudmundsson, A., 2017. Large-volume lava flows fed by a deep magmatic reservoir at Ağrı Dağı (Ararat) volcano, Eastern Turkey, *Bulletin of Volcanology*, 79, 1-16.
- Kemaldere, H., 2011. Şehir altı madenciliği ve tasman etkilerinin diferansiyel insar tekniği ile belirlenmesi: Zonguldak metropolitan alanı örneği, *Doktora Tezi*, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- Khakim, M. Y. N., Tsuji, T. ve Matsuoka, T., 2013. Detection of localized surface uplift by differential SAR interferometry at the hangingstone oil sand field, Alberta, Canada, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6, 6, 2344-2354.
- Kimura, H. ve Yamaguchi, Y., 2000. Detection of landslide areas using satellite radar interferometry, *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 66, 3, 337-344.
- Klees, R. ve Massonnet, D., 1998. Deformation measurements using SAR interferometry: potential and limitations, *Geologie en Mijnbouw*, 77, 161-176.

- Kobayashi, T., 2018. Locally distributed ground deformation in an area of potential phreatic eruption, Midagahara volcano, Japan, detected by single-look-based InSAR time series analysis, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 357, 213-223.
- Kourkoulis, P., 2015. DInSAR/PSI hybrid methodologies for ground-motion monitoring, PhD Thesis, University of Leicester, Leicester, United Kingdom.
- Kuehn, F., Albiol, D., Cooksley, G., Duro, J., Granda, J., Haas, S., Hoffman-Rothe, A. ve Murdohardono, D., 2010. Detection of land subsidence in Semarang, Indonesia, using stable points network (SPN) technique, *Environmental Earth Sciences*, 60, 909-921.
- Lagios, E., Sakkas, V., Parcharidis, I. ve Dietrich, V., 2005. Ground deformation of Nisyros Volcano (Greece) for the period 1995-2002: Results from DInSAR and DGPS observations, *Bulletin of volcanology*, 68, 201-214.
- Lan, H., Li, L., Liu, H. ve Yang, Z., 2012. Complex urban infrastructure deformation monitoring using high resolution PSI, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5, 2, 643-651.
- Lanari, R., Casu, F., Manzo, M., Zeni, G., Berardino, P., Manunta, M. ve Pepe, A., 2007. An overview of the small baseline subset algorithm: A DInSAR technique for surface deformation analysis, *Deformation and Gravity Change: Indicators of Isostasy, Tectonics, Volcanism, and Climate Change*, 164, 4, 637-661.
- Lanari, R., Mora, O., Manunta, M., Mallorquí, J. J., Berardino, P. ve Sansosti, E., 2004. A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms, *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 42, 7, 1377-1386.
- Lazecký, M., Spaans, K., González, P. J., Maghsoudi, Y., Morishita, Y., Albino, F., Elliot, J., Greenall, N., Hatton, E., Hooper, A., Juncu, D., McDougall, A., Walters, J., Scoot Watson, C., Weiss, J. R. ve Wright, T. J., 2020. LiCSAR: An automatic InSAR tool for measuring and monitoring tectonic and volcanic activity, *Remote Sensing*, 12, 15, 1-29, 2430.
- Lei, K., Ma, F., Chen, B., Luo, Y., Cui, W., Zhou, Y., Liu, H. ve Sha, T., 2021. Three-dimensional surface deformation characteristics based on time series InSAR and GPS Technologies in Beijing, China, *Remote Sensing*, 13, 19, 3964.
- Li, H., Wang, Z., He, G. ve Man, W., 2017. Estimating snow depth and snow water equivalence using repeat-pass interferometric SAR in the northern piedmont region of the tianshan mountains, *Journal of Sensors*, 1-17.
- Li, S., Xu, W. ve Li, Z., 2022. Review of the SBAS InSAR Time-series algorithms, applications, and challenges, *Geodesy and Geodynamics*, 13, 2, 114-126.
- Li, Z., 2007. Coregistration of image pairs, DEM refinement and evaluation for SAR interferometry, PhD Thesis, Purdue University, West Lafayette, USA.

- Lillesand, T., Kiefer, R. W. ve Chipman, J., 2004. Remote sensing and image interpretation, Fifth edition, John Wiley and Sons.
- Liu, C., Ji, L., Zhu, L., Xu, C., Zhang, W., Qiu, J. ve Xiong, G., 2023. Present-Day Three-Dimensional Deformation across the Ordos Block, China, Derived from InSAR, GPS, and Leveling Observations, *Remote Sensing*, 15, 11, 2890.
- Lowry, A. R., Hamburger, M. W., Meertens, C. M. ve Ramos, E. G., 2001. GPS monitoring of crustal deformation at Taal Volcano, Philippines, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 105, 1-2, 35-47.
- Lu, Z., Dzurisin, D., Biggs, J., Wicks Jr, C. ve McNutt, S., 2010. Ground surface deformation patterns, magma supply, and magma storage at Okmok volcano, Alaska, from InSAR analysis: 1. Interruption deformation, 1997-2008, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115, B00B02.
- Lu, Z., Mann, D. ve Freymueller, J., 1998. Satellite radar interferometry measures deformation at Okmok Volcano, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 79, 39, 461-468.
- Lu, Z., Masterlark, T. ve Dzurisin, D., 2005. Interferometric synthetic aperture radar study of Okmok volcano, Alaska, 1992-2003: Magma supply dynamics and postemplacement lava flow deformation, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110, B02403.
- Lu, Z., Wicks, C., Dzurisin, D., Thatcher, W., Freymueller, J. T., McNutt, S. R. ve Mann, D., 2000. Aseismic inflation of Westdahl volcano, Alaska, revealed by satellite radar interferometry, *Geophysical Research Letters*, 27, 11, 1567-1570.
- Lubis, A. M., 2014. Uplift of Kelud volcano prior to the November 2007 eruption as observed by L-band insar, *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 46, 3, 245-257.
- Lustrino, M., Keskin, M., Mattioli, M., Lebedev, V. A., Chugaev, A., Sharkov, E. ve Kavak, O., 2010. Early activity of the largest Cenozoic shield volcano in the circum-Mediterranean area: Mt. Karacadag, SE Turkey, *European Journal of Mineralogy*, 22, 3, 343.
- Lyons, S. N., 2002. Investigations of fault creep in Southern California using interferometric synthetic aperture radar and GPS, PhD Thesis, University of California San Diego, USA.
- Mancini, F., Grassi, F. ve Cenni, N., 2021. A workflow based on SNAP–StaMPS open-source tools and GNSS data for PSI-Based ground deformation using dual-orbit sentinel-1 data: Accuracy assessment with error propagation analysis, *Remote Sensing*, 13, 4, 753.
- Massonnet, D. ve Feigl, K. L., 1998. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface, *Reviews of geophysics*, 36, 4, 441-500.

- Massonnet, D., Briole, P. ve Arnaud, A., 1995. Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry, *Nature*, 375, 6532, 567-570.
- Massonnet, D., Feigl, K., Rossi, M. ve Adragna, F., 1994. Radar interferometric mapping of deformation in the year after the Landers earthquake, *Nature*, 369, 6477, 227-230.
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K. ve Rabaute, T., 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, *Nature*, 364, 6433, 138-142.
- Maxwell, J. C., 1881. A treatise on electricity and magnetism, volume 1, Oxford, Clarendon press.
- Mei, E. T. W., Lavigne, F., Picquout, A., De Bélizal, E., Brunstein, D., Grancher, D., Sartohadi, J., Cholikh, N. ve Vidal, C., 2013. Lessons learned from the 2010 evacuations at Merapi volcano, *Journal of volcanology and geothermal research*, 261, 348-365.
- Meng, Z., Shu, C., Yang, Y., Wu, C., Dong, X., Wang, D. ve Zhang, Y., 2022. Time series surface deformation of changbaishan volcano based on sentinel-1B SAR data and its geological significance, *Remote Sensing*, 14, 5, 1213.
- Morales Rivera, A. M., Amelung, F. ve Mothes, P., 2016. Volcano deformation survey over the Northern and Central Andes with ALOS InSAR time series, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17, 7, 2869-2883.
- Morales Rivera, A. M., Amelung, F., Mothes, P., Hong, S. H., Nocquet, J. M. ve Jarrin, P., 2017. Ground deformation before the 2015 eruptions of Cotopaxi volcano detected by InSAR, *Geophysical Research Letters*, 44, 13, 6607-6615.
- Motagh, M., Shamshiri, R., Haghighi, M. H., Wetzels, H. U., Akbari, B., Nahavandchi, H., Roessner, S. ve Arabi, S., 2017. Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements, *Engineering geology*, 218, 134-151.
- Murray, K. D., Bekaert, D. P. ve Lohman, R. B., 2019. Tropospheric corrections for InSAR: Statistical assessments and applications to the Central United States and Mexico, *Remote Sensing of Environment*, 232, 111326.
- Nagao, K., Matsuda, J. I., Kita, I. ve Ercan, T., 1989. Noble gas and carbon isotopic compositions in Quaternary volcanic area in Turkey, *Jeomorfoloji Dergisi*, 17, 101-110.
- Navarro-Sanchez, V. D. ve Lopez-Sanchez, J. M., 2014. Spatial adaptive speckle filtering driven by temporal polarimetric statistics and its application to PSI, *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 52, 8, 4548-4557.

- Nela, B. R., Singh, G. ve Kulkarni, A. V., 2023. Ice thickness distribution of Himalayan glaciers inferred from DInSAR-based glacier surface velocity, *Environmental Monitoring and Assessment*, 195, 1, 15.
- Notsu, K., Fujitani, T., Ui, T., Matsuda, J. ve Ercan, T., 1995. Geochemical features of collision-related volcanic rocks in central and eastern Anatolia, Turkey, *Journal of volcanology and geothermal research*, 64, 3-4, 171-191.
- Ofeigsson, B. G., Hooper, A., Sigmundsson, F., Sturkell, E. ve Grapenthin, R., 2011. Deep magma storage at Hekla volcano, Iceland, revealed by InSAR time series analysis, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116, B5, B05401.
- Orhan, O., 2018. Uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemleri ile muhtemel obruk alanlarının belirlenmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Ottinger, M. ve Kuenzer, C., 2020. Spaceborne L-band synthetic aperture radar data for geoscientific analyses in coastal land applications: a review, *Remote Sensing*, 12, 14, 2228.
- Palano, M., Puglisi, G. ve Gresta, S., 2008. Ground deformation patterns at Mt. Etna from 1993 to 2000 from joint use of InSAR and GPS techniques, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 169, 3-4, 99-120.
- Pamir, H. N., 1951. Tendürek dağı, *İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Dergisi B*, 16, 83-88.
- Parker, A. L., Biggs, J. ve Lu, Z., 2014. Investigating long-term subsidence at Medicine Lake Volcano, CA, using multitemporal InSAR, *Geophysical Journal International*, 199, 2, 844-859.
- Pawluszek-Filipiak, K. ve Borkowski, A., 2020. Integration of DInSAR and SBAS Techniques to determine mining-related deformations using sentinel-1 data: The case study of Rydułtowy mine in Poland, *Remote Sensing*, 12, 2, 242.
- Pearce, J. A., Bender, J. F., De Long, S. E., Kidd, W. S. F., Low, P. J., Güner, Y., Saroglu, F., Yilmaz, Y., Moorbath, S. ve Mitchell, J. G., 1990. Genesis of collision volcanism in Eastern Anatolia, Turkey, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 44, 1-2, 189-229.
- Peltzer, G., Rosen, P., Rogez, F. ve Hudnut, K., 1996. Postseismic rebound in fault step-overs caused by pore fluid flow, *Science*, 273, 5279, 1202-1204.
- Pepe, A. ve Calò, F., 2017. A review of interferometric synthetic aperture RADAR (InSAR) multi-track approaches for the retrieval of Earth's surface displacements, *Applied Sciences*, 7, 12, 1264.
- Perissin, D. ve Wang, T., 2011. Repeat-pass SAR interferometry with partially coherent targets, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50, 1, 271-280.

- Pourkhosravani, M., Mehrabi, A., Pirasteh, S. ve Derakhshani, R., 2022. Monitoring of Maskun landslide and determining its quantitative relationship to different climatic conditions using D-InSAR and PSI techniques, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 13, 1, 1134-1153.
- Poyraz, P., 2023. Maden işletmelerinde yüzey deformasyonlarının yapay açıklıklı uydu radar görüntüleriyle izlenebilirliğinin araştırılması, Doktora Tezi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
- Pritchard, M. E. ve Simons, M., 2004. An InSAR-based survey of volcanic deformation in the central Andes, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 5, 2.
- Qu, F., Lu, Z., Zhang, Q., Bawden, G. W., Kim, J. W., Zhao, C. ve Qu, W., 2015. Mapping ground deformation over Houston–Galveston, Texas using multi-temporal InSAR, *Remote Sensing of Environment*, 169, 290-306.
- Raucoules, D., Maisons, C., Carnec, C., Le Mouelic, S., King, C. ve Hosford, S., 2003. Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert salt mine (France): Comparison with ground-based measurement, *Remote sensing of environment*, 88, 4, 468-478.
- Reath, K., Pritchard, M., Poland, M., Delgado, F., Carn, S., Coppola, D., Andrews, B., Ebmeier, S. K., Rumpf, E., Henderson, S., Baker, S., Lundgren, P., Wright, R., Biggs, J., Lopez, T., Wauthier, C., Moruzzi, S., Alcott, A., Wessels, R., Griswold, J., Ogburn, S., Loughlin, S., Meyer, F., Vaughan, G. ve Bagnardi, M., 2019. Thermal, deformation, and degassing remote sensing time series (CE 2000-2017) at the 47 most active volcanoes in Latin America: implications for volcanic systems, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124, 1, 195-218.
- Rémy, D., Chen, Y., Froger, J. L., Bonvalot, S., Cordoba, L. ve Fustos, J., 2015. Revised interpretation of recent InSAR signals observed at Llaima volcano (Chile), *Geophysical Research Letters*, 42, 10, 3870-3879.
- Richards, J. A., 2009. Remote sensing with imaging radar, vol. 1, Springer, Berlin/Heidelberg.
- Richardson-Bunbury, J. M., 1996. The Kula volcanic field, western Turkey: the development of a Holocene alkali basalt province and the adjacent normal-faulting graben, *Geological Magazine*, 133, 3, 275-283.
- Riddick, S. N., Schmidt, D. A. ve Deligne, N. I., 2012. An analysis of terrain properties and the location of surface scatterers from persistent scatterer interferometry, *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 73, 50-57.
- Rogers, A. E. E. ve Ingalls, R. P., 1969. Venus: mapping the surface reflectivity by radar interferometry, *Science*, 165, 3895, 797-799.

- Rosen, P. A., Hensley, S., Joughin, I. R., Li, F. K., Madsen, S. N., Rodriguez, E. ve Goldstein, R. M., 2000. Synthetic aperture radar interferometry, *Proceedings of the IEEE*, 88, 3, 333-382.
- Rosen, P. A., Hensley, S., Zebker, H. A., Webb, F. H. ve Fielding, E. J., 1996. Surface deformation and coherence measurements of Kilauea Volcano, Hawaii, from SIR-C radar interferometry, *Journal of Geophysical Research: Planets*, 101, E10, 23109-23125.
- Salas, Á. F., 2005. Interferometric SAR data analysis and processing, MSc Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, Spain.
- Samsonov, S. V., Czarnogorska, M. ve Charbonneau, F., 2015. Selecting optimal RADARSAT constellation mission beams for monitoring ground deformation in Alberta's oil sands, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 41, 5, 390-400.
- Samsonov, S. V., Feng, W., Peltier, A., Geirsson, H., d'Oreye, N. ve Tiampo, K. F., 2017. Multidimensional Small Baseline Subset (MSBAS) for volcano monitoring in two dimensions: Opportunities and challenges, Case study Piton de la Fournaise volcano, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 344, 121-138.
- Sandwell, D., Mellors, R., Tong, X., Wei, M. ve Wessel, P., 2011. Open radar interferometry software for mapping surface deformation, *Eos Transactions American Geophysical Union* 92, 28, 234-235.
- Sanver, M., 1968. A palaeomagnetic study of Quaternary volcanic rocks from Turkey, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1, 6, 403-421.
- Schmitt, A. K., Danišík, M., Aydar, E., Şen, E., Ulusoy, İ. ve Lovera, O. M., 2014. Identifying the volcanic eruption depicted in a neolithic painting at Çatalhöyük, Central Anatolia, Turkey, *PloS one*, 9, 1, e84711.
- Selvakumaran, S., 2019. Interferometric Synthetic Aperture Radar for remote satellite monitoring of bridges, PhD Thesis, Newnham College, Cambridge, United Kingdom.
- Shen, P., Wang, C., Lu, L., Luo, X., Hu, J., Fu, H. ve Zhu, J., 2022. A novel polarimetric PSI method using trace moment-based statistical properties and total power interferogram construction, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1-15.
- Singhroy, V. ve Molch, K., 2004. Characterizing and monitoring rockslides from SAR techniques, *Advances in Space Research*, 33, 3, 290-295.
- Skolnik, M. I., 1980. Introduction to radar, In *Radar Handbook 2*; McGraw-Hill Company: New York, USA.

- Smith, G., Dammert, P. B. ve Askne, J., 1996. Decorrelation mechanisms in C-band SAR interferometry over boreal forest, In *Microwave Sensing and Synthetic Aperture Radar* 2958, 300-310.
- Sparks, R. S. J., Biggs, J. ve Neuberg, J. W., 2012. Monitoring volcanoes, *Science*, 335, 6074, 1310-1311.
- Strozzi, T., Farina, P., Corsini, A., Ambrosi, C., Thüning, M., Zilger, J., Wiesmann, A., Wegmüller, U. ve Werner, C., 2005. Survey and monitoring of landslide displacements by means of L-band satellite SAR interferometry, *Landslides*, 2, 193-201.
- Şen, E., Kürkcüoğlu, B., Aydar, E., Gourgaud, A. ve Vincent, P. M., 2003. Volcanological evolution of Mount Erciyes stratovolcano and origin of the Valibaba Tepe ignimbrite (Central Anatolia, Turkey), *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 125, 3-4, 225-246.
- Şengör, A. C. ve Yılmaz, Y., 1981. Tethyan evolution of Turkey: a plate tectonic approach, *Tectonophysics*, 75, 3-4, 181-241.
- Tank, S. B. ve Karaş, M., 2020. Unraveling the electrical conductivity structure to decipher the hydrothermal system beneath the Mt. Hasan composite volcano and its vicinity, SW Cappadocia, Turkey, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 405, 107048.
- Tian, X., Malhotra, R., Xu, B., Qi, H. ve Ma, Y., 2018. Modeling orbital error in InSAR interferogram using frequency and spatial domain based methods, *Remote Sensing*, 10, 4, 508.
- Tolluoğlu, D., 2006. Tendürek volkanı üzerindeki deformasyonların farksal SAR interferometrisi yöntemi ile belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
- Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., Potin, P., Rommen, B., Floury, N., Brown, M., Traver, I. N., Deghaye, P., Duesmann, B., Rosich, B., Miranda, N., Bruno, C., L'Abbate, M., Croci, R., Pietropaolo, A., Huchler, M. ve Rostan, F., 2012. GMES Sentinel-1 mission, *Remote sensing of environment*, 120, 9-24.
- Torun, A. T., 2021. Radar görüntülerinden kar derinliği ve hacminin hesaplanması; Erciyes Dağı örneği, Doktora Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- Touzi, R., 1999. On the use of polarimetric SAR data for ship detection, In *IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS99)*, 2, 812-814.
- Türkecan, A., 2015. Türkiye'nin senozoyik volkanitleri, Maden Tetkik Arama Müdürlüğü Özel Yayını, Ankara.

- Ulusoy, I., 2008. Etude volcano-structurale du volcan Nemrut (Anatolie de l'Est, Turquie) et risques naturels associés, PhD Thesis, Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II Université, Auvergne, France.
- Ulusoy, I., Sarıkaya, M. A., Schmitt, A. K., Şen, E., Danişık, M. ve Gümüş, E., 2019. Volcanic eruption eye-witnessed and recorded by prehistoric humans, *Quaternary Science Reviews*, 212, 187-198.
- Ulusoy, İ., 2016. Temporal radiative heat flux estimation and alteration mapping of Tendürek volcano (eastern Turkey) using ASTER imagery, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 327, 40-54.
- Ulusoy, İ., Çubukçu, H. E., Aydar, E., Labazuy, P., Ersoy, O., Şen, E. ve Gourgaud, A., 2012. Volcanological evolution and caldera forming eruptions of Mt. Nemrut (Eastern Turkey), *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 245, 21-39.
- Ünal, E., 2018. Tendürek volkanının volkanostratigrafisi, petrolojisi ve magmatik evrimi, Doktora Tezi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
- Vaka, D. S., Rao, Y. S. ve Bhattacharya, A., 2021. Surface displacements of the 12 November 2017 Iran-Iraq earthquake derived using SAR interferometry, *Geocarto International*, 36, 6, 660-675.
- Vassileva, M., Giulio Tonolo, F., Riccardi, P., Lecci, D., Boccardo, P. ve Chiesa, G., 2017. Satellite SAR interferometric techniques in support to emergency mapping, *European journal of remote sensing*, 50, 1, 464-477.
- Velez, M. L., Euillades, P., Caselli, A., Blanco, M. ve Díaz, J. M., 2011. Deformation of Copahue volcano: Inversion of InSAR data using a genetic algorithm, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 202, 1-2, 117-126.
- Wadge, G., Zhu, M., Holley, R. J., James, I. N., Clark, P. A., Wang, C. ve Woodage, M. J., 2010. Correction of atmospheric delay effects in radar interferometry using a nested mesoscale atmospheric model, *Journal of Applied Geophysics*, 72, 2, 141-149.
- Wang, L. ve Qu, J. J., 2009. Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring: A review, *Frontiers of Earth Science in China*, 3, 237-247.
- Wang, T., DeGrandpre, K., Lu, Z. ve Freymueller, J. T., 2018. Complex surface deformation of Akutan volcano, Alaska revealed from InSAR time series, *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 64, 171-180.
- Wang, X., Aoki, Y. ve Chen, J., 2019. Surface deformation of Asama volcano, Japan, detected by time series InSAR combining persistent and distributed scatterers, 2014-2018, *Earth, Planets and Space*, 71, 1-16.

- Wang, Y., Chang, L., Feng, W., Samsonov, S. ve Zheng, W., 2021. Topography-correlated atmospheric signal mitigation for InSAR applications in the Tibetan plateau based on global atmospheric models, *International Journal of Remote Sensing*, 42, 11, 4361-4379.
- Wang, Y., Dong, J., Zhang, L., Zhang, L., Deng, S., Zhang, G., Liao, M. ve Gong, J., 2022. Refined InSAR tropospheric delay correction for wide-area landslide identification and monitoring, *Remote Sensing of Environment*, 275, 113013.
- Wangensteen, B., Weydahl, D. J. ve Hagen, J. O., 2005. Mapping glacier velocities on Svalbard using ERS tandem DInSAR data, *Norsk Geografisk Tidsskrift-Norwegian Journal of Geography*, 59, 4, 276-285.
- Wei, M. ve Sandwell, D. T., 2010. Decorrelation of L-band and C-band interferometry over vegetated areas in California, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48, 7, 2942-2952.
- Werner, C., Wegmuller, U., Strozzi, T. ve Wiesmann, A., 2003. Interferometric point target analysis for deformation mapping, In 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS2003), Proceedings 7, 4362-4364.
- Westaway, R., Guillou, H., Seyrek, A., Demir, T., Bridgland, D., Scaillet, S. ve Beck, A., 2009. Late Cenozoic surface uplift, basaltic volcanism, and incision by the River Tigris around Diyarbakır, SE Turkey, *International Journal of Earth Sciences*, 98, 601-625.
- Wiley, C. A., 1954. Pulsed Doppler radar methods and apparatus, US, Patent, 3.
- Wright, T. J., Parsons, B. E., Jackson, J. A., Haynes, M., Fielding, E. J., England, P. C. ve Clarke, P. J., 1999. Source parameters of the 1 October 1995 Dinar (Turkey) earthquake from SAR interferometry and seismic bodywave modelling, *Earth and Planetary Science Letters*, 172, 1-2, 23-37.
- Xiao, R., Yu, C., Li, Z. ve He, X., 2021. Statistical assessment metrics for InSAR atmospheric correction: Applications to generic atmospheric correction online service for InSAR (GACOS) in Eastern China, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 96, 102289.
- Xu, B., Li, Z. W., Wang, Q. J., Jiang, M., Zhu, J. J. ve Ding, X. L., 2013. A refined strategy for removing composite errors of SAR interferogram, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11, 1, 143-147.
- Xue, X., Freymueller, J. ve Lu, Z., 2020. Modeling the post-eruptive deformation at Okmok based on the GPS and InSAR time series: Changes in the shallow magma storage system *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125, 2, e2019JB017801.
- Yang, Y. J., Hwang, C., Hung, W. C., Fuhrmann, T., Chen, Y. A. ve Wei, S. H., 2019. Surface deformation from Sentinel-1A InSAR: relation to seasonal groundwater extraction and rainfall in Central Taiwan, *Remote Sensing*, 11, 23, 2817.

- Yavaşoğlu, H., 2009. Kuzey anadolu fayının orta anadolu bölümündeki güncel tektonik aktivitenin jeodezik yöntemler ve elastik yarı uzay modelleme ile belirlenmesi, Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yılmaz, Y., Güner, Y. ve Şaroğlu, F., 1998. Geology of the quaternary volcanic centres of the east Anatolia, Journal of volcanology and geothermal research, 85, 1-4, 173-210.
- Yılmaztürk, S., 2015. Sbas-insar yöntemiyle düşey yönlü yüzey deformasyonlarının belirlenmesi: Bursa-Orhaneli linyit madeni örneği, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yunjun, Z., Fattahi, H. ve Amelung, F., 2019. Small baseline InSAR time series analysis: Unwrapping error correction and noise reduction, Computers and Geosciences, 133, 104331.
- Yurteri, E., 2017. Orta Anadolu'nun aktif volkanı: Erciyes Dağı, Doğal Kaynak ve Ekonomi Bülteni, 22, 43-55.
- Yurteri, E., 2018. Erciyes stratovolkanında yer alan dasitik domların, dom akıntılarının ve domlarla ilgili piroklastik çökellerin petrolojik incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Zebker, H. A. ve Goldstein, R. M., 1986. Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 91, B5, 4993-4999.
- Zebker, H. A. ve Villasenor, J., 1992. Decorrelation in interferometric radar echoes, IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 30, 5, 950-959.
- Zebker, H. A., Rosen, P. A. ve Hensley, S., 1997. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps, Journal of geophysical research: solid earth, 102, B4, 7547-7563.
- Zebker, H. A., Rosen, P. A., Goldstein, R. M., Gabriel, A. ve Werner, C. L., 1994. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 99, 10, 19617-19634.
- Zeni, G., Bonano, M., Casu, F., Manunta, M., Manzo, M., Marsella, M., Pepe, A. ve Lanari, R., 2011. Long-term deformation analysis of historical buildings through the advanced SBAS-DInSAR technique: The case study of the city of Rome, Italy, Journal of Geophysics and Engineering, 8, 3, 1-12.
- Zhou, Z., 2013. The applications of InSAR time series analysis for monitoring long-term surface change in peatlands, PhD Thesis, University of Glasgow, Glasgow, Scotland.

- URL-1 <https://volcano.si.edu/volcanolist_countries.cfm?country=Turkiye>, Erişim tarihi: 10.03.2024.
- URL-2 <<https://detektia.com/en/sar-synthetic-aperture-radar/>>, Erişim tarihi: 10.03.2024.
- URL-3 <<https://gisgeography.com/synthetic-aperture-radar-examples/>>, Erişim tarihi: 11.03.2024.
- URL-4 <<https://site.tre-altamira.com/insar/>>, Erişim tarihi: 01.04.2024.
- URL-5 <<https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=213000&vtab=Photos>>, Erişim tarihi: 01.01.2024.
- URL-6 <<https://ar.pinterest.com/pin/532269249724511203/>>, Erişim tarihi: 01.01.2024.
- URL-7 <<https://www.flickr.com/photos/fesign/17771394113/in/photostream/>>, Erişim tarihi: 01.01.2024.
- URL-8 <<https://volcano.si.edu/gallery/photos/GVP-12568.jpg>>, Erişim tarihi: 01.01.2024.
- URL-9 <<https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=213020>>, Erişim tarihi: 01.01.2024.
- URL-10 <<https://volcano.si.edu/gallery/ShowImage.cfm?photo=GVP-11101>>, Erişim tarihi: 01.01.2024.
- URL-11 <<https://www.mta.gov.tr/turkvolc/tr/kula>>, Erişim tarihi: 01.01.2024.
- URL-12 <<https://www.mta.gov.tr/turkvolc/tr/hasan-dagi>>, Erişim tarihi: 01.01.2024.
- URL-13 <<https://www.mta.gov.tr/turkvolc/tr/erciyes>>, Erişim tarihi: 01.01.2024.
- URL-14 <<https://www.mta.gov.tr/turkvolc/tr/karacadag>>, Erişim tarihi: 01.01.2024.
- URL-15 <<https://www.mta.gov.tr/turkvolc/tr/nemrut>>, Erişim tarihi: 01.01.2024.
- URL-16 <<https://www.mta.gov.tr/turkvolc/tr/tendurek>>, Erişim tarihi: 01.01.2024.
- URL-17 <<https://www.mta.gov.tr/turkvolc/tr/agri>>, Erişim tarihi: 01.01.2024.
- URL-18 <<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/overview/mission-summary>>, Erişim tarihi: 21.07.2023.
- URL-19 <<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1>>, Erişim tarihi: 21.07.2023.
- URL-20 <<http://www.gacos.net/>>, Erişim tarihi: 21.10.2023.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Halil İbrahim GÜNDÜZ

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Aksaray Üniversitesi, Harita Müh. 2011-2015

Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi, Harita Müh. ABD, 2015-2019

Doktora : Aksaray Üniversitesi, Harita Müh. ABD, 2019-2024

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Gündüz, H. İ., Yılmaztürk, F. ve Orhan, O., 2023. An investigation of volcanic ground deformation using InSAR observations at Tendürek Volcano (Turkey), Applied Sciences, 13, 11, 6787.

Yılmaz H. M., Erdoğan H., Yılmaztürk F., Bilgilioğlu, S. S., Gürbüz E., Orhan O., Gezin C., Tiryakioğlu İ., Gürbüz A., Gündüz H. İ., Türkmen C., Yıldırım E., Kılıçel S. ve Öcal K., 2022. Hasan Dağı volkanının InSAR teknikleri ile izlenmesi, 11. Türkiye Ulusal Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Birliği (TUFUAB) Teknik Sempozyumu, 12-14 Mayıs 2022, Mersin.

Gezin, C., Yılmaz, H. M., Erdoğan, H., Bilgilioğlu, S. S., Gürbüz, E., Orhan, O., Tiryakioğlu, İ., Gürbüz, A., Gündüz, H. İ., Atıcı, G., Türkmen, C., Yıldırım, E., Kılıçel, S. ve Özal, K., 2022. Hasan Dağı'na ait yüzey deformasyonlarının GNSS tekniği ile izlenmesi: Öncül bulgular, Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu (TUJK) 2022 Yılı Bilimsel Toplantısı, 2-4 Kasım 2022, Kocaeli.