

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**





KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Harita Mühendisliği Anabilim Dalında
Bülent Volkan YAZICI tarafından hazırlanan**

**DAİMİ YANSITICI InSAR (PSInSAR) TEKNİĞİ İLE HEYELANLARIN TESPİT
EDİLMESİ VE İZLENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 21 / 05 / 2019 gün ve 1805 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Oğuz GÜNGÖR

Üye : Doç. Dr. Halil AKINCI

Üye : Dr. Öğretim Üyesi Esra TUNÇ GÖRMÜŞ





Prof. Dr. Asim KADIOĞLU

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Daimi Yansıtıcı InSAR (PSInSAR) Tekniğı ile Heyelanların Tespit Edilmesi ve İzlenmesi” başlıklı bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliğı Anabilim Dalında, yüksek lisans tezi olarak gerçekleştirilmiştir.

Havuzlu Köyündeki heyelan sahasına ait ölçümleri paylaşan ve kullanmam için izin veren Doğuş Enerji Üretim ve Yatırım A.Ş.’ye teşekkür ederim. Eğitim hayatım boyunca olumlu katkısı olan tüm çağdaş öğretmenlerime ve lisansüstü öğrenimim sırasında bilgi, tecrübe, zaman ve en önemlisi desteğini esirgemeyen saygıdeğer tez danışmanım Dr. Esra TUNÇ GÖRMÜŞ’e şükranlarımı sunarım.

Hayatım boyunca yanımda olan güzel aileme, zor zamanlarımda ışık tutan ve yardımcı olan sevgili eşime, içimin gülen yüzü canım kızıma ve yardımlarını esirgemeyen bütün dostlarıma teşekkür eder ve şükranlarımı sunarım.

Bülent Volkan YAZICI

Trabzon 2019

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Daimi Yansıtıcı InSAR (PSInSAR) Tekniğı ile Heyelanların Tespit Edilmesi ve İzlenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Dr. Esra TUNÇ GÖRMÜŞ’ün sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 11/06/2019



Bülent Volkan YAZICI

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VII
SUMMARY.....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Uzaktan Algılama ve RADAR Görüntüleri.....	1
1.2. PSInSAR Uygulamaları.....	3
1.3. Tez Çalışmasının Amacı.....	5
2. HEYELANLARIN TESPİT EDİLMESİ VE İZLENMESİ.....	6
2.1. Heyelan.....	6
2.2. Uzaktan Algılama ile Heyelanların Tespit Edilmesi ve İzlenmesi.....	8
3. HEYELANLARIN TESPİT EDİLMESİNDE VE İZLENMESİNDE KULLANILAN BAŞLICA SAR UYDULARI VE ÖZELLİKLERİ.....	11
3.1. ERS-1 ve ERS-2.....	11
3.2. TerraSAR-X.....	11
3.3. ALOS-1 ve ALOS-2.....	12
3.4. COSMO-SkyMed.....	12
3.5. Sentinel-1.....	12
4. SAR TEKNOLOJİSİ VE PSInSAR TEKNİĞİ.....	15
4.1. Sentetik Açıklıklı Radar (SAR).....	15
4.1.1. SAR Görüntülerinde Faz ve Genlik Kavramı.....	21
4.1.2. Polarizasyon Çeşitleri.....	22
4.1.3. Geometrik Bozukluk Çeşitleri ve Benekleme.....	23
4.2. İnterferometrik SAR (InSAR) ve Diferansiyel İnterferometrik SAR (DInSAR).....	25

4.3.	Daimi Yansıtıcı InSAR (PSInSAR) Tekniği ve Stanford (StaMPS) Yöntemi ...	29
4.4.	InSAR Uygulamaları İçin Geliştirilmiş Yazılımlar	34
5.	YAPILAN ÇALIŞMALAR	35
5.1.	Çalışma Alanı	37
5.2.	Çalışmalarda Kullanılan Veriler ve Yazılımlar	38
5.3.	Görüntü Seçimi ve Ön İşleme Adımları	39
5.4.	PS İşleme Adımları	43
5.5.	Armutlu Mahallesi Heyelanının PSInSAR Tekniği ile Belirlenmesi	46
5.6.	Havuzlu Köyü Heyelanının PSInSAR Tekniği ile Belirlenmesi	49
5.7.	PSInSAR Sonuçlarının Yersel Ölçümlerle Karşılaştırılması: Havuzlu Köyü Örneği	51
5.8.	PSInSAR Sonuçlarının Enterpole Edilen Yersel Ölçümlerle Karşılaştırılması: Havuzlu Köyü Örneği	55
6.	BULGULAR VE İRDELEME	57
6.1.	Armutlu Mahallesi Heyelanı	57
6.2.	Havuzlu Köyü Heyelanı	63
6.3.	PSInSAR Sonuçlarının Yersel Ölçümlerle Karşılaştırılması	69
6.4.	Enterpole Edilen PSInSAR Sonuçlarının Yersel Ölçümlerle Karşılaştırılması	72
7.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	73
8.	KAYNAKLAR	76
	ÖZGEÇMİŞ	84

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

DAİMİ YANSITICI InSAR (PSInSAR) TEKNİĞİ İLE HEYELANLARIN TESPİT
EDİLMESİ VE İZLENMESİ

Bülent Volkan YAZICI

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Esra TUNÇ GÖRMÜŞ
2019, 84 Sayfa

Bu çalışma, Artvin ilinin Şavşat ilçe merkezinde bulunan Armutlu Mahallesiindeki ve Artvin ilinin Yusufeli ilçesine bağlı Havuzlu Köyündeki heyelanların, Sentinel-1 uydularına ait bir dizi SAR görüntüleri (C-band) ile tespit edilmesini ve izlenmesini anlatan bir yüksek lisans tez çalışmasıdır. Heyelanlar daimi yansıtıcı InSAR (PSInSAR) tekniği kullanılarak tespit edilmeye çalışılmıştır. PSInSAR tekniği üzerine birçok yöntem bulunmakta olup, çalışmalar kapsamında Stanford Yöntemi tercih edilmiştir. Bütün görüntü işleme, analiz ve görselleştirme adımları için SNAP, StaMPS/MTI, MATLAB, StaMPS Visualizer ve QGIS yazılımları kullanılmıştır. Çalışma sahalarında uygulanan PSInSAR tekniği ile saptanan PS (daimi saçıcı) noktaları yardımıyla her iki saha için de bir yıllık ortalama deformasyon hızı tespit edilebilmiştir. Tespit edilen deformasyonların tutarlılığını görebilmek adına, Havuzlu Köyünde yapılan çalışmada, çalışılan SAR görüntüleri ile aynı zaman aralığında yersel ölçü yöntemleri ile alınan ölçümlere ait sonuçlar tek boyuta indirilerek PS nokta deformasyonları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda deformasyon trendlerinin büyük oranda çakıştığı tespit edilmiştir. Bu sayede, Sentinel-1 SAR görüntüleri kullanılarak, PSInSAR tekniği ile heyelan bölgelerinin başarılı bir şekilde izlenebileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Yapay Açıklıklı Radar, SAR, İnterferometri, Daimi Yansıtıcı, PSInSAR, StaMPS, Heyelan

Master Thesis

SUMMARY

DETECTION AND MONITORING OF LANDSLIDES WITH PERSISTANT
SCATTERER InSAR (PSInSAR) TECHNIQUE

Bülent Volkan YAZICI

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Geomatics Engineering Graduate Program
Supervisor: Dr. Esra TUNÇ GÖRMÜŞ
2019, 84 Pages

This study is a master thesis about detecting and monitoring of landslides in Havuzlu village of Yusufeli district of Artvin province and Armutlu Neighbourhood of Şavşat district of Artvin province with using series of SAR (C-band) images of Sentinel-1 satellites acquired at different times. Landslides have been tried to be determined by using persistant scatterer InSAR (PSInSAR) technique. There are many methods in the PSInSAR technique and Stanford Method was preferred for this study. SNAP, StaMPS/MTI, MATLAB, StaMPS Visualizer and QGIS softwares were used for all image processing, analysis and visualization steps. With using PS (Permanent Scatter) points determined by PSInSAR technique applied in the study areas, one-year surface deformations were detected for both sites. In order to see the consistency of the determined mean deformation velocities in the study conducted in the Havuzlu village, the results of the measurements taken with the terrestrial methods at the same time interval with the SAR images were compared with the PS deformations. As a result of this comparison, it was determined that the deformation trends substantially coincide. Thus, using Sentinel-1 SAR images, it was seen that regions with landslides can be monitored successfully with PSInSAR technique.

Key Words: Syntethic Aperture Radar, SAR, Interferometry, Persistant Scatterer, PSInSAR, StaMPS, Landslide

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Son 50 yılda meydana gelen heyelanların illere göre dağılımı	7
Şekil 2. Heyelanların aktivite yayılım özellikleri	8
Şekil 3. IW modundaki SLC görüntüsüne ait alt şerit alanlar ve patlamalar.....	14
Şekil 4. Aktif ve pasif algılama.....	16
Şekil 5. Elektromanyetik spektrum	16
Şekil 6. RAR ve SAR anten genişlikleri	17
Şekil 7. Eski ve güncel SAR uydu görevleri	18
Şekil 8. SAR çalışma prensibi	19
Şekil 9. Yükselen ve alçalan yörünge.....	20
Şekil 10. Coğrafi ve SAR koordinat sistemleri.....	20
Şekil 11. Sarılı faz, göreceli açılmamış faz ve mutlak faz	22
Şekil 12. İletilen ve alınan polarizasyon düzlemleri	23
Şekil 13. Geometrik bozukluk çeşitleri.....	24
Şekil 14. İnterferometri geometrisi	25
Şekil 15. Dağınık ve daimi yansıtıcı piksellerin gösterimi ve faz simülasyonları.....	31
Şekil 16. Çalışma iş akış şeması	36
Şekil 17. Çalışma alanlarının coğrafi konumu	37
Şekil 18. Armutlu Mahallesi için kullanılan görüntülerin yıldız grafiği	39
Şekil 19. Havuzlu Köyü için kullanılan görüntülerin yıldız grafiği	40
Şekil 20. SNAP yazılımına ait ekran görüntüsü	42
Şekil 21. Heyelanların aktivite yayılım özellikleri	43
Şekil 22. Armutlu çalışma sahasının uzaktan görünümü.....	46
Şekil 23. Armutlu Mahallesindeki heyelanlı bölge sınırı.....	47
Şekil 24. Radarın bakış yönündeki (LOS) hareketin tanımlanması	48
Şekil 25. Armutlu Mahallesinde elde edilen PS noktaları	48
Şekil 26. Havuzlu çalışma sahasının uzaktan görünümü.....	49
Şekil 27. Havuzlu Köyündeki heyelanlı bölge sınırı.....	50
Şekil 28. PSInSAR tekniği ile elde edilmiş olan PS noktaları	50

Şekil 29. Araziye tesis edilmiş ölçüm noktaları	51
Şekil 30. Yersel ölçü yöntemleri kullanılarak ölçülmüş olan noktalar	52
Şekil 31. Ölçüm noktaları ve PS noktaları	52
Şekil 32. DEF-2 ölçüm noktası ve etrafındaki PS pikselleri.....	53
Şekil 33. DEF-13 ölçüm noktası ve etrafındaki PS pikselleri.....	53
Şekil 34. PS noktaları kullanılarak oluşturulan enterpolasyon haritası.....	56
Şekil 35. Zaman serilerini göstermek amacıyla seçilen PS noktaları.....	58
Şekil 36. Armutlu sahasındaki 21 numaralı PS noktasının zaman serisi.....	58
Şekil 37. Armutlu sahasındaki 24 numaralı PS noktasının zaman serisi.....	59
Şekil 38. Armutlu sahasındaki 30 numaralı PS noktasının zaman serisi.....	59
Şekil 39. Armutlu sahasındaki 52 numaralı PS noktasının zaman serisi.....	60
Şekil 40. Armutlu sahasındaki 54 numaralı PS noktasının zaman serisi.....	60
Şekil 41. Armutlu sahasındaki 56 numaralı PS noktasının zaman serisi.....	61
Şekil 42. Armutlu sahasındaki 59 numaralı PS noktasının zaman serisi.....	61
Şekil 43. Armutlu sahasındaki 63 numaralı PS noktasının zaman serisi.....	62
Şekil 44. Armutlu sahasındaki 86 numaralı PS noktasının zaman serisi.....	62
Şekil 45. Armutlu sahasındaki 103 numaralı PS noktasının zaman serisi.....	63
Şekil 46. Zaman serilerini göstermek amacıyla seçilen PS noktaları.....	64
Şekil 47. Havuzlu sahasındaki 230 numaralı PS noktasının zaman serisi.....	64
Şekil 48. Havuzlu sahasındaki 286 numaralı PS noktasının zaman serisi.....	65
Şekil 49. Havuzlu sahasındaki 389 numaralı PS noktasının zaman serisi.....	65
Şekil 50. Havuzlu sahasındaki 429 numaralı PS noktasının zaman serisi.....	66
Şekil 51. Havuzlu sahasındaki 441 numaralı PS noktasının zaman serisi.....	66
Şekil 52. Havuzlu sahasındaki 465 numaralı PS noktasının zaman serisi.....	67
Şekil 53. Havuzlu sahasındaki 714 numaralı PS noktasının zaman serisi.....	67
Şekil 54. Havuzlu sahasındaki 934 numaralı PS noktasının zaman serisi.....	68
Şekil 55. Havuzlu sahasındaki 936 numaralı PS noktasının zaman serisi.....	68
Şekil 56. Havuzlu sahasındaki 1107 numaralı PS noktasının zaman serisi.....	69
Şekil 57. DEF-2 ölçüm noktası ve PS ölçüm noktalarının yer değiştirme grafiği	70
Şekil 58. DEF-13 ölçüm noktası ve PS ölçüm noktalarının yer değiştirme grafiği	70

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Heyelanların hızlarına göre sınıflandırılması	9
Tablo 2. Sentinel-1 uydusunun edinim modları ve temel özellikleri.....	13
Tablo 3. Radar sistemlerindeki farklı polarizasyon seviyeleri.....	23
Tablo 4. PSInSAR tekniğinde temel yaklaşımlar.....	30
Tablo 5. SAR uygulamaları için geliştirilmiş yazılımlar	34
Tablo 6. Çalışmalarda kullanılan görüntüler	41
Tablo 7. SNAP ve StaMPS/MTI yazılımlarında kullanılan parametre değerleri	45
Tablo 8. Enterpolasyonla elde edilen yer değiştirme miktarları	56
Tablo 9. Seçili ölçüm ve PS noktalarındaki bir yıllık yer değiştirme miktarları	71
Tablo 10. Yersel ölçülerle ve enterpolasyonla elde edilen yer değiştirme miktarları ..	72

SEMBOLLER DİZİNİ

3B	: 3 boyutlu
ADEOS	: Advanced Earth Observing Satellite
A-DInSAR	: İleri DInSAR
AJE	: Ayrıntılı Jeolojik Etüt gerektiren alan
ALOS	: The Advanced Land Observing Satellite
ALS	: Airborne Laser Scanning
AOE	: Atmosfer ve Yörünge Hatası
ASAR	: İleri Yapay Açıklıklı Radar
ASF	: Alaska Satellite Facility
ASTER	: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
CCRS / CCT	: Canada Centre for Remote Sensing / Centre canadien de télédétection
Cosmo SkyMed	: CONstellation of small Satellites for Mediterranean basin Observation
DEM	: Sayısal Yükseklik Modeli (Digital Elevation Model)
DInSAR	: Differential InSAR
Envisat	: Environmental Satellite
ERS	: European Remote Sensing
ESA	: European Space Agency
GDEM	: Global Digital Elevation Model
GNSS	: Global Navigation Satellite Systems
GPS	: Global Positioning System
HR	: Yüksek Çözünürlük
InSAR	: Interferometric SAR
ISCE	: Interferometric synthetic aperture radar Scientific Computing Environment
JAXA	: Japan Aerospace Exploration Agency
JERS-1	: Japan Earth Resources Satellite 1
LiDAR	: Light Detection and Ranging
LOS	: Görüş Doğrultusu (Line of sight)
MATLAB	: Matrix Laboratory

MST	: Minimum Spanning Tree
MTI	: Multi-Temporal Interferometry
PSInSAR	: Kalıcı/Daimi yansıtıcı InSAR(Permanent/Persistent Scatterer InSAR)
QGIS	: Quantum Geographic Information Systems
QPS	: Quasi-PS (Quasi-Permanent Scatterers)
RADAR	: Radio Detection and Ranging
RAR	: Gerçek Açıklıklı radar
SAR	: Yapay Açıklıklı Radar
SBAS	: Küçük Baz Çizgisi (Small Baseline Subset)
ScanSAR	: Scanning SAR
SCLA	: Konumsal Olarak Korelasyonlu Bakış Açısı (Spatially-correlated look angle)
SLAR	: Side Looking Airborne Radar
SNAP	: Sentinel Uygulama Platformu (Sentinel Application Platform)
SNR	: Sinyalin Gürültüye Oranı (Signal-to-noise ratio)
SONAR	: Sound Navigation and Ranging
SRTM	: Shuttle Radar Topography Mission
StaMPS	: Stanford Method for Persistent Scatterers
SULA	: Konumsal Olarak Korelasyonsuz Bakış Açısı (Spatially-uncorrelated look angle)
SYM	: Sayısal Yükseklik Modeli
TEŞ	: Şaşırt Formasyonu
TIR	: Thermal Kızılötesi
TLS	: Yersel Lazer Tarama
TOPSAR	: Terrain Observation with Progressive Scans SAR
VHR	: Çok Yüksek Çözünürlük
WGS84	: World Geodetic System 1984

1. GENEL BİLGİLER

Heyelanlar, yaşamı doğrudan ve dolaylı olarak etkileyen doğa olayları ve afetlerin başında gelmektedir. Doğrudan kayba örnek olarak yaşamlar, yaşam alanları, bina hasarları ve mülkler; dolaylı kayba örnek olarak üretkenlik kaybı, emlak değer kaybı, vergi gelir kaybı ve diğer ekonomik etkiler gösterilebilir. Erken tahminler ve uyarılar, bu gibi etkileri hafifletmek ve bu doğrultudaki çalışmalarını teşvik etmek için gereklidir. Temassız teknikleri kullanarak dünya ile ilgili gözlemleri toplamayı amaçlayan uzaktan algılama bilimi, doğal afetler ile mücadelede çok önemli olan erken tahmin ve erken uyarı sistemleri geliştirmek adına oldukça önemli bir yere sahiptir (Scaioni vd., 2014). Afet yerlerinin gözlenmesi ve ölçülmesi, bilinen klasik yersel ölçme yöntemleri ile çok zaman alıcı ve pahalı olmaktadır. Afet alanlarındaki noktalara aletlerin kurulması ve kaldırılması hem çok tehlikeli, hem de çok pratik olmayan bir yoldur. Bu nedenlerden dolayı, yer, hava ve uzay platformlarında bulunan uzaktan algılama alıcıları ile doğa olaylarının ve afetlerin gözlenmesi kullanıcılara büyük avantajlar sunmaktadır. Sonuç olarak uzaktan algılama araçlarının jeodezik, jeoteknik, jeolojik ve çevresel gözlemler kadar, sayısal modeller ile de birleştirilmesi de heyelan gibi doğal afetler ile başa çıkmak için bilim insanlarına yeni araştırmaya kapıları açmaktadır.

Bu tez çalışmasında uzaktan algılama alıcılarından biri olan yapay açıklıklı radar görüntülerinin heyelan alanlarının tespit edilmesi ve izlenmesinde kullanılması araştırılmış ve iki bölge üzerinde örnek uygulama yaparak analizler gerçekleştirilmiştir.

1.1. Uzaktan Algılama ve RADAR Görüntüleri

Maxwell Denklemleri olarak bilinen elektromanyetik alan hakkındaki öncü araştırmalar (Maxwell, 1865) ile bu denklemleri deneylerle kanıtlayan (Hertz, 1893) çalışmalar, uzaktan algılama bilimi için dönüm noktası olmuştur. Elektromanyetizmanın keşfinden kısa bir süre sonra nesne uzaklığı, büyüklüğü, hızı, azimuth açısı, yükseklik açısı ve fiziksel özellikleri belirlemeye yönelik radyo ile tespit etme ve uzaklık ölçme anlamına gelen RADAR sistemleri geliştirilmiştir. Özellikle askeri amaçlar için geliştirilen radar sistemlerinin siviller tarafından yaygın şekilde kullanılmasıyla birlikte yer bilimlerindeki radar uygulamalarına sıkça rastlanmaya başlanmıştır.

Radar teknolojilerinin gelişmesi, veri kalitesinde ve sayısında artış yaşanmasını

sağlamıştır. Bu artışın sonucu olarak yer bilimlerindeki birçok konuda farklı ve etkili bakış açıları ortaya çıkmış olup, özellikle heyelanlar konusunda çeşitli uygulamalar gündeme gelmiştir. Bu uygulamaların büyük bir kısmı, Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) sistemleri üzerinde yoğunlaşmış durumdadır. Mikrodalga ışınları kullanan SAR, dünyanın yüzeyinden geri yansıyan elektromanyetik ekoyu kaydedebilen ve 2 boyutlu karmaşık değerli (genlik ve faz) görüntü haritası düzenleyebilen aktif bir sistemdir.

SAR verilerini jeolojik alanda kullanmak için en önemli teknik, farklı zamanlarda toplanan iki radar görüntüsü arasındaki faz farkının neden olduğu girişim örüntüsünü hesaplayan interferometridir (Yonezawa vd., 2012). Faz farkı, çoklu katkı (arazi pürüzlülüğü, topoğrafya, atmosferik etkiler, gürültü) ve radarın bakış yönündeki (LOS) olası yer değiştirme bileşenini içerir. İstenmeyen etkileri modellemek ve filtrelemek için yer değiştirme bileşenini diferansiyel InSAR (DInSAR) kullanarak çıkarmak amacıyla farklı çözümler üretilmiştir (Wasowski ve Bovenga, 2014).

Farklı zamanlarda çekilmiş ve aynı hedefi gösteren SAR görüntülerindeki faz farkından yararlanan DInSAR tekniği, 1980'lerin sonundan beri (Gabriel vd., 1989; Zebker ve Goldstein, 1986) geniş alanlardaki (Costantini vd., 2008; Massonnet ve Feigl, 1998; Singhroy vd., 1998) yüzey deformasyonlarını santimetre altındaki hassasiyetle tespit etmek, haritalandırmak ve ölçmek için kullanılmaktadır. Tek bir çift interferogram kullanan geleneksel DInSAR tekniğinde, zamansal-geometrik korelasyonsuzluk ve atmosferik etkilerden kaynaklanan faz bozulmalarını ortadan kaldırmanın imkansız olması gibi sınırlandırmalar vardır. Uzun süreli SAR görüntüleri kullanan çok zamanlı interferometrik teknikler (Ferretti vd., 2001) ile bu kısıtlamaların üstesinden gelinmektedir. Daimi yansıtıcı interferometrik SAR (PSInSAR), uzun zaman aralığındaki SAR görüntülerini analiz eden, yüzey deformasyonlarının yıllık hızlarını ve zaman serilerini belirlemeye yarayan çok zamanlı DInSAR (multi temporal DInSAR) tekniğidir. Çok zamanlı SAR görüntülerini işleyen birçok farklı teknik geliştirilmiştir. Bunlar, PSI ve SBAS olmak üzere sınıflandırılabilirler. PSI teknikleri, aynı birincil görüntü kullanılarak oluşturulan interferogramlardaki daimi yansıtıcıları belirler (Kampes, 2006; Hooper vd., 2004; Arnaud vd., 2003; Costantini vd., 2008; Ferretti vd., 2001). SBAS teknikleri ise, konumsal ve zamansal korelasyonsuzluğu azaltmak için kısa dik baz uzunluğuna ve kısa zamansal ayırımı sahip çoklu birincil görüntü kombinasyonunu kullanır (Casagli vd., 2016).

1.2. PSInSAR Uygulamaları

PSInSAR tekniği ile çökme, heyelan, volkanik ve tektonik faaliyetler üzerine yapılmış olan bir önceki bölümde referans gösterilen çalışmaların haricinde birçok farklı çalışma mevcuttur. PSInSAR tekniği ile heyelan belirlemek için yapılan kapsamlı ve aynı zamanda öncü bir çalışma Farina vd. (2006) tarafından yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada 1992-2002 tarihleri arasında ERS-1 ve ERS-2 uyduları tarafından edinilen SAR görüntüleri kullanılmıştır. İtalya'da Arno Nehri havzasındaki heyelan envanter haritalarının oluşturulması için bölgesel ölçekte ve bilinen bazı heyelanların izlenmesi için yerel ölçekte çalışılmıştır. PSInSAR tekniği uygulanan bu çalışma ile, önceden bilinen heyelanlar yeniden tespit edilmiş ve ayrıca daha önceden tespit edilmemiş heyelanlar bulunarak heyelan envanter haritalarına işlenmiştir. Meisina vd. (2006) tarafından İtalya'nın Oltrepo Pavese bölgesinde PSInSAR tekniği uygulanarak yapılan bir diğer çalışmada 1992-2001 yılları arasında edinilen ERS uydu görüntüleri kullanılmıştır. Sığ ve derin heyelanları bünyesinde barındıran inceleme alanında yapılan bu çalışma ile, bazı heyelanların stabilite durumları güncellenmiş ve bazı heyelanlar da ilk defa tespit edilmiştir. +5 ile -16 mm/yıl arasında değişen yavaş zemin deformasyonları tespit edilmiştir. Ciampalini vd. (2016) tarafından yapılan bir çalışma ile arazi kullanımı ve planlama faaliyetlerinde öncelikli öneme sahip olan duyarlılık haritalarının doğruluğunu artırmak için PSInSAR tekniğini de kullanarak yeni bir teknik geliştirilmiştir. PSInSAR verileri ve heyelan duyarlılık haritalarının birleşimi ile özellikle şehirleşmiş bölgeleri etkileyen yavaş heyelanların tahmin güvenilirliği artmıştır.

Jung vd. (2007) tarafından JERS-1 uydusuna ait SAR görüntüleri kullanılarak, PSInSAR tekniği ile Gaeun kömür madenciliği alanındaki çökme ölçülmüştür. 1992-1998 yılları arasında edinilen görüntüler kullanılan çalışmada maksimum çökme miktarı 6 yılda 11.2 cm olarak bulunmuştur. Perski vd. (2009) tarafından yapılan çalışma ile ERS uydularına ait SAR görüntüleri kullanılarak Polonya'nın Wieliczka bölgesindeki maden sahasında gerçekleşen çökmeler PSInSAR tekniği ile tespit edilmiştir. Raspini vd. (2014) tarafından yapılan bir çalışmada 1995-2001 tarihleri arasında edinilen ERS uydularına ait SAR görüntüleri kullanılarak ve PSInSAR tekniği uygulanarak Kuzey Yunanistan'daki Selanik ovasında yeraltı suyu çekilmesinden kaynaklanan çökme olayı tespit edilmiştir. Çökme miktarı yılda 4.5 cm olarak tespit edilmiştir. Mateos vd. (2017) tarafından Güneydoğu İtalya'daki Vega de Granada bölgesinde jeolojik ve hidrojeolojik faktörlerden dolayı meydana gelen çöküntü PSInSAR teniği uygulanarak araştırılmıştır. Yapılan çalışmada 2003-2009

yılları arasında ENVISAT uydusu tarafından edinilen SAR görüntüleri, 2011-2014 yılları arasında Cosmo-SkyMed tarafından edinilen SAR görüntüleri ve 2015-2016 yılları arasında Sentinel-1A uydusu tarafından edinilen SAR görüntüleri kullanılmıştır. En yüksek yer değıştirme 2003-2009 yılları arasında yılda 10 mm olarak tespit edilmiş olup yeraltı suyunun azalması ile çöküntünün artması arasında bir korelasyon saptanmıştır. Nahli vd. (2018) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise, Sentinel-1 uydusuna ait SAR görüntüleri kullanılarak Fransa'daki Rennes şehir metrosu üzerindeki tünel kazılarında kaynaklanan yüzey hareketleri incelenmiştir. Metro hattı boyunca meydana gelen yüzey hareketleri belirlenmiştir.

Massironi vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada 1992-1996 tarihleri arasında edinilen ERS uydusuna ait SAR görüntüleri ile Giudicarie kuşağı üzerindeki tektonik hareket incelenmiştir. Vilaro vd. (2009) tarafından 1992-2001 tarihleri arasında edinilen ERS uydu görüntüleri kullanılarak, Campania Bölgesi'ndeki geniş bir alanda PSInSAR tekniğı uygulanmıştır. Kentleşme, volkanizma, heyelanlar ve hidrolojik dengesizlikler açısından hareketli olan inceleme alanında +28 ile -39 mm/yıl arasında değışen zemin deformasyonları tespit edilmiştir. Zemin deformasyonları GPS ölçümleri ile karşılaştırılmış ve PSInSAR tekniğı ile elde edilen verilerin tutarlı olduğu sonucuna varılmıştır. Dias vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada, yoğun sismik ve volkanik faaliyetler gözlenen Kanarya ve Cape Verde adalarında, 2015-2018 yılları arasında edinilen Sentinel-1 uydu görüntüleri kullanılarak PSInSAR tekniğı uygulanmıştır. Çalışma sonucunda yüzey deformasyonları ve volkan patlaması öncesinde meydana gelen yer değıştirme başarılı bir şekilde tespit edilmiştir.

Son yıllarda, Sentinel-1 uydusu tarafından edinilen SAR görüntülerini kullanarak PSInSAR tekniğini uygulayan çalışmalar arasında Bakon vd. (2016) de vardır. Bakon vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada Sentinel-1A uydusuna ait 2014-2016 yılları arasında edinilen SAR görüntüleri kullanılarak Madrid'de PSInSAR tekniğı uygulanmıştır. Bulunan deformasyon miktarları için doğrulama analizleri çalışma alanında mevcutta bulunan kalıcı GNSS istasyonları kullanılarak yapılmıştır. Çalışma sonucunda PSInSAR tekniğı ile Madrid gibi büyük kentlerde güvenilir PS noktalarının elde edilebildiğı sonucuna ulaşılmıştır. Czikhart vd. (2018) tarafından Kuzey Slovakya'da yapılan çalışmada 2014-2017 yılları arasında Sentinel-1 uydularına ait SAR görüntüleri kullanılmıştır. Dağlık alanların ve seyrek kentleşmenin yoğun olarak gözleendiğı bölgeden elde edilen sonuçlara göre kaya düşmeleri ve çökme gibi deformasyonlar ölçülebilmştir. Deformasyon miktarları daha sonra kalıcı referans ağı noktalarındaki GNSS ölçümleri ile doğrulanmıştır. Bayer vd. (2018) tarafından

yapılan çalışmada İtalya'nın Kuzey Apennines bölgesindeki üç nehir havzasını kapsayan bir bölgede yavaş heyelanların izlenmesi ve heyelan davranışlarının jeolojik birimlere göre farklılıklarının araştırılması amacıyla Cosmo SkyMed ve Sentinel-1 uydularına ait SAR görüntüleri PSInSAR tekniğinde kullanılarak 25 adet heyelan incelenmiştir.

1.3. Tez Çalışmasının Amacı

Yüzey hareketleri, jeodezik ölçü teknikleri (GPS vb.) ve jeolojik tekniklerle (inklinometre vb.) sıklıkla belirlenmektedir. Buna karşın, uydu tabanlı olarak heyelanların belirlenmesi diğerlerine göre yeni sayılabilecek bir tekniktir. Bu tekniğin diğer tekniklere göre avantajı, görüntü arşivleri kullanılarak istenilen alana istenilen zamanda uygulanmasıdır. Bunun yanında zaman ve maliyet açısından da büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Diğer yöntemlerin geniş alanlara uygulanması çok fazla zaman ve maliyet kaybına yol açmaktadır.

Hazırlanan bu tez çalışması, Sentinel 1A'ya ait SAR uydu görüntüleri kullanılarak heyelanların tespit edilmesini ve izlenmesini amaçlamaktadır. Bunun için Artvin ili içerisinde farklı yüzey şekillere sahip iki alan seçilmiş ve PSInSAR yöntemi ile heyelanlı bölgeler ve heyelan riski taşıyan bölgeler analiz edilmiştir. Uzun gözlem sürelerinde yüzey noktalarındaki hareketlilik, PSInSAR yöntemi ile yüksek hassasiyette belirlenebildiği için bu çalışmada PSInSAR yöntemi kullanılmıştır.

Tez kapsamında yapılmak istenen; seçilen örnek bölgelere ait yüzey deformasyonlarını SAR görüntüleri yardımıyla tespit etmek, deformasyon büyüklüklerini zamanla ilişkilendirerek yüzey değişimlerinin tarihsel gelişimini ortaya çıkarmak ve sonuçlarını yorumlamaktır.

Bu tez çalışması 7 bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, tez çalışmasına giriş yapmak için genel bilgilerden kısaca bahsedilmiştir. İkinci bölümde heyelanların tespit edilmesi ve izlenmesi hakkında, üçüncü bölümde RADAR uydu görüntüleri ve özellikleri hakkında, dördüncü bölümde SAR teknolojisi ve PSInSAR tekniği hakkında, beşinci bölümde tez kapsamında yapılan çalışmalar hakkında bilgiler bulunmaktadır. Altıncı bölümde elde edilen bulgular anlatılarak irdelemeler yapılmıştır. Yedinci bölümde ise tez çalışmasında ulaşılan sonuçlar ve yapılan öneriler bulunmaktadır.

2. HEYELANLARIN TESPİT EDİLMESİ VE İZLENMESİ

2.1. Heyelan

Varnes (1958) tarafından heyelan kavramı, toprak, kaya veya bunların karışımından oluşan bir zeminin ya da çeşitli kayaçların bir yüzey üzerinde, yerçekiminin etkisiyle aşağıya ve dışarıya doğru gözle görülür bir şekilde hareket etmesi olarak tanımlanmaktadır. Soeters ve Westen (1996) ise, yamaç duraysızlığı, yerel jeomorfolojik, hidrojeolojik ve jeolojik koşullar ile bu koşulların jeodinamik süreçler, bitki örtüsü, arazi kullanımı ve insan aktivitesiyle değiştirilmesinin; yağış ve sismik aktivitenin sıklığının ve yoğunluğunun ürünü olarak tanımlamaktadır. Heyelanlar hakkındaki bütün tanımlamalarda hemen hemen aynı faktörler ön plana çıkmaktadır.

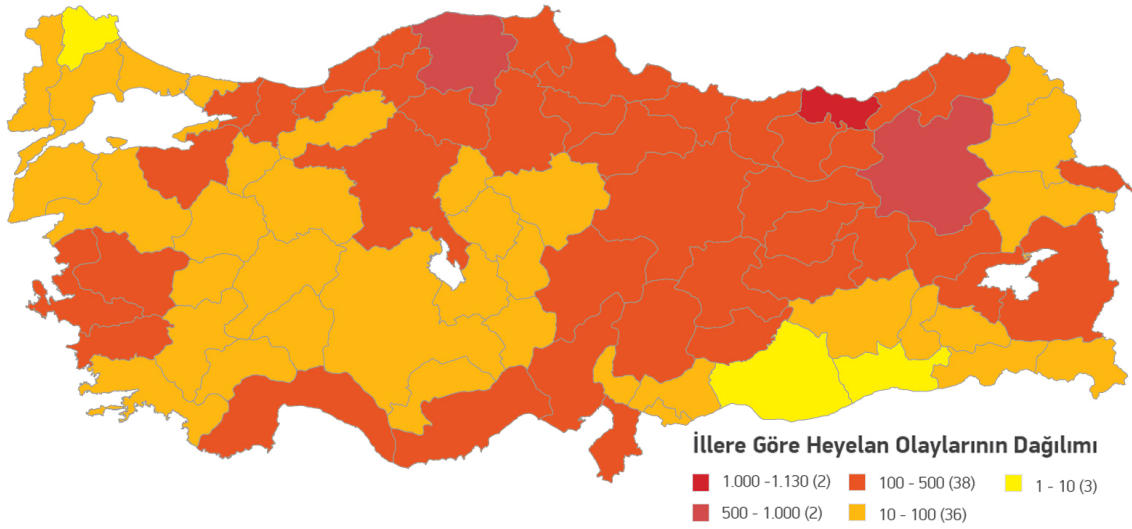
Söz konusu bu faktörlerden bahsederken denetleyici ve tetikleyici faktörler olarak ayırım yapmakta fayda vardır. Jeolojik, jeomormolojik ve çevresel faktörler heyelanları denetleyen, doğal ve yapay faktörler ise heyelanları tetikleyen faktörlerdir.

Jeolojik faktörlere örnek olarak, litoloji, kayaç ve zemin türü, yapısal unsurlar (kırık, çatlak, fay vb.), ayrışma, yeraltı suyu durumu ve jeoteknik özellikler verilebilir. Yamaç eğimi, yamaç yönelimi, yamaç eğriselliği ve yükseklik jeomorfolojik faktörlere, arazi kullanımı ile yol ve derelerin varlığı ise çevresel faktörlere örnek olarak verilebilir.

Doğal faktörler için en önemli iki örnek yağış ve depremdir. Yağışlar ve depremler sırasında ya da kısa bir süre sonra heyelan olaylarının gerçekleşmesi bir tesadüf değildir. Patlatmalar, yamaçlara ek yük bindirilmesi, kontrolsüz kazılar ve yanlış arazi kullanımları ise yapay faktörlere örnek olarak sunulabilir. Kazılardan sonra yol kenarlarında açıkta bırakılan şevler ya da destekleme sistemlerinin (duvar, kazık, iksa vb.) yamaç üstü yükünü taşıyamayacak şekilde dizayn edilmesi yapay faktörlere verilebilecek örnekler arasındadır.

Denetleyici ve tetikleyici faktörlerin etkisi altında Türkiye’de gerçekleşmiş ve kayıt altına alınmış heyelan haritası, Şekil 1’de verilmiştir. Harita incelendiğinde, Türkiye genelinde yoğun bir heyelan varlığının olduğu görülmektedir. Tez kapsamında yapılan çalışmaların bulunduğu Artvin ilinde gerçekleşmiş heyelan sayısının bir hayli fazla olduğu da görülmektedir.

Heyelanlar, meydana gelme sıklığı ve olumsuz etkileri bakımından hem dünyada hem de ülkemizde büyük önem arz etmektedir. Can kayıplarına yol açmasının yanı sıra, yol,



Şekil 1. Son 50 yılda meydana gelen heyelanların illere göre dağılımı (Gökçe vd., 2008; Oktay vd., 2015)

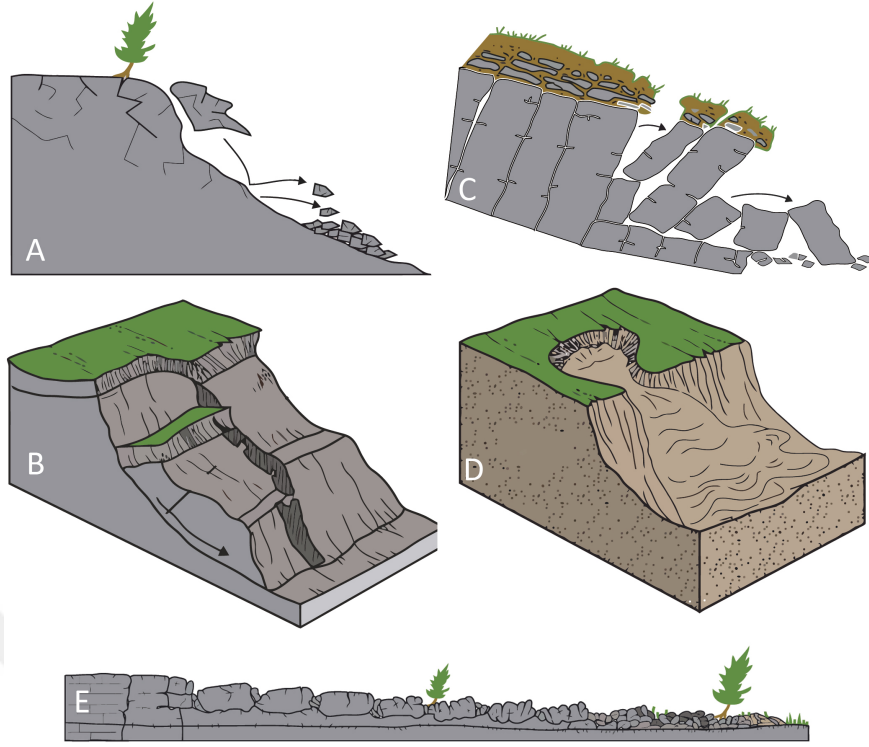
tünel ve baraj gibi mühendislik yapılarında da maddi hasarlara neden olmaktadır. Ayrıca; tarım ve orman alanlarında, kentlerde ve köylerde gerçekleşen heyelanlar, insan-doğa ve insan-kent ilişkisini de olumsuz yönde etkilemektedir. Özellikle çay ekilen Doğu Karadeniz bölgesindeki tarım arazilerinde ortaya çıkan olumsuz koşullar ve yerleşim yerlerinde gerçekleşen heyelanlar nedeniyle ortaya çıkan kayıplar göz önünde bulundurulduğunda insanın doğayla ve kentle olan ilişkilerini nasıl etkilediği hakkında fikir edinilebilmektedir.

Heyelanlar, farklı amaçlar ve çalışmalar doğrultusunda birçok farklı şekilde sınıflandırılmıştır. Bu sınıflamalar hareket, hız, malzeme türü vb. dikkate alınarak yapılmıştır. Beltran vd. (1993) tarafından önerilen tanımlar ve mekanizmalar dikkate alınarak, oluşum mekanizmaları itibariyle en çok karşılaşılan heyelanlar düşme, kayma, devrilme, akma ve yanal yayılma olmak üzere Şekil 2’de gösterilmiştir.

Aktivite özelliklerine göre heyelanlar, aktif, aktif olmayan, yeniden aktif olan, duraklamış ve eski heyelan şeklinde sınıflandırılmışlardır. Aktivite türlerine göre ise karmaşık, bileşik, ilerleyen, tekil ve çoklu şeklinde sınıflandırılmışlardır (Beltran vd., 1993).

Tablo 1’de verilen bir başka heyelan sınıflandırması da, heyelanların hızına göre yapılmıştır. Bu tabloya göre heyelanlar, hızları dikkate alınarak, son derece yavaş ve son derece hızlı olmak üzere yedi sınıfa ayrılmıştır.

Tez kapsamında çalışılan PSInSAR tekniği ile son derece yavaş, çok yavaş ve yavaş heyelanlar rahatlıkla izlenebilmektedir. Çalışılması planlanan tarih aralığında uygun SAR görüntülerinin olması yeterlidir. Çalışma tarihinde aktif olmayan bir heyelan, aktif olduğu



Şekil 2. Heyelanların aktivite yayılım özellikleri. Düşme (A), kayma (B), devrilme (C), akma (D) ve yanal yayılma (E). (Oktay vd., 2015)

dönemdeki görüntü arşivleri kullanılarak çalışılabilir. PSInSAR tekniği ile sadece heyelanın hareketi hakkında bilgi sahibi olunabildiğinden ötürü, heyelana neden olan faktörler ve heyelan mekanizmaları hakkında detaylı bilgiler arazi gözlemleri ve jeolojik-jeoteknik çalışmalar sonucunda elde edilir.

2.2. Uzaktan Algılama ile Heyelanların Tespit Edilmesi ve İzlenmesi

Uzaktan algılama teknikleri kullanılarak heyelanların belirlenmesi için optik görüntüler, termal görüntüler, lazer tarama verileri ve mikrodalga radar görüntüleri olmak üzere dört temel veri tipi kullanılmaktadır. Optik, termal ve mikrodalga radar görüntüleri genellikle havadan, uzay platformlarından ve nadiren yer tabanlı platformlardan elde edilir. Lazer tarama verileri ise havadan ve yer tabanlı platformlardan elde edilir (Scaioni vd., 2014).

Optik sensörler, görünür, yakın kızılötesi ve kısa dalga kızılötesi sistemleri de dahil olmak üzere elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinden yararlanır. Çeşitli hava fotoğrafları, video kameralar, uydu tabanlı sensörlerden edinilen yüksek ve çok yüksek çözünürlüklü görüntüler, multispektral ve hiperspektral sensörler en yaygın kullanılan

Tablo 1. Heyelanların hızlarına göre sınıflandırılması (Cruden ve Varnes, 1996)

Hız sınıfı	Tanımlama	Hız (mm/sn)	Tipik hız
7	Son derece hızlı	5×10^3	5 m/sn
6	Çok hızlı	5×10^1	3 m/dk
5	Hızlı	5×10^{-1}	1.8 m/yıl
4	Orta	5×10^{-3}	13 m/ay
3	Yavaş	5×10^{-5}	1.6 m/yıl
2	Çok yavaş	5×10^{-7}	16 mm/yıl
1	Son derece yavaş		

uzaktan algılama araçlarıdır. Optik sensörler, sığ stabilite problemlerinin, başlıca heyelanların ve yamaç akmalarının incelenmesi için uygundur. Geleneksel olarak hava fotoğrafları ile yapılan manuel, yarı otomatik ve otomatik görüntü yorumlamaları daha sonra yer tabanlı görüntülerle ve uydu görüntüleriyle yapılmaya başlanmıştır (Scaioni vd., 2014).

Termal kızılötesi (TIR) sensörlerin heyelan tespitinde bazı kısıtlamaları bulunmaktadır. Arazi ve vejetasyonundaki sıcaklıklar günlük ve mevsimsel olarak değişir ve hava, toprak, iklim, eğim yönü ve arazi kullanımından etkilenir. Ayrıca TIR sensörlerinin konumsal çözünürlükleri de düşüktür. Bu nedenlerden ötürü özellikle küçük heyelanlar üzerinde ayrıntılı analizler yapılamamaktadır. Birkaç kilometrekarelik alanlara yayılan büyük heyelanlar TIR sensörleri ile gözlene bile şevler hakkında bilgi verememektedir. TIR sensörlerinin etkili olduğu konulardan birisi toprak doymunluğunun belirlenmesidir. Stabilite koşullarının, eğim hareketlerinin ve özellikle sığ heyelanların aktivasyonunun belirlenmesinde toprak doymunluğu en önemli faktörlerden biridir. Bu nedenle erken uyarı amacıyla toprak doymunluğu ve gerçek zamanlı yağış verileri birlikte değerlendirilebilir (Scaioni vd., 2014).

Lazer kelimesi, yüksek derecede paralel, yönsel, tutarlı ve faz içi elektromanyetik radyasyondan bir ışın (veya darbe serisi) yayan sensörleri tanımlar. Hava platformlarına yerleştirilen cihazlara hava lazer tarayıcıları (LiDAR) adı verilir ve geniş çaplı kapsama alanı sunar. Yer tabanlı sensörler genellikle karasal lazer tarayıcılar (TLS) olarak adlandırılır ve yerel ölçek incelemesinde yardımcı olur. Hava tabanlı lazer tarama (ALS) ile elde edilen yüksek çözünürlüklü SYM'ler (HR-DEM) kullanılarak, yeni heyelanlar tespit

edilebilir, bilinen heyelan sınırları düzeltilebilir ve aynı zamanda heyelan envanter haritaları iyileştirilebilir. Temel olarak, heyelan tespiti için iki farklı yöntem uygulanmaktadır. Bunlardan birincisi topografik yüzeyin sezgisel görsel analizidir. HR-DEM'in kullanımı, stereo hava fotoğrafları veya HR/VHR verisinin 3B görselleştirilmesi ile karşılaştırılabilir. İkincisi, morfometrik özelliklerin yarı otomatik tanınmasıdır. Farklı heyelan türlerinin tanınması için örneğin topografyanın eğriliği veya pürüzlülüğü gibi morfometrik özelliklerin yarı-otomatik analizinden oluşmaktadır. Karasal lazer tarama (TLS) sistemleri, zemin tabanlı bir platforma dahil edilmiş bir lazerli uzaklık ölçerden oluşur. TLS veri yorumlama için en çok kullanılan teknikler 3B nokta bulutu analizi ve HR-DEM'lerin üretilmesidir (Scaioni vd., 2014).

SAR görüntüleri, uzay, hava ve yer tabanlı platformlardan elde edilebilir. SAR görüntüleri alınırken aktif sensörler kullanıldığından dolayı havanın karanlık ve bulutlu olması sorun oluşturmaz. Heyelan belirleme amacıyla yapılan çalışmalarda C ($\lambda=5.6$ cm), L ($\lambda=23.6$ cm) ve X ($\lambda=3.1$ cm) bantlı SAR görüntüleri kullanılmaktadır. İnterferometri, jeoloji alanında SAR verilerinden yararlanmak için en önemli tekniktir (InSAR). InSAR tekniğinin eksikliklerini gidermek için diferansiyel InSAR (DInSAR) ve daha sonra ileri DInSAR (A-DInSAR) teknikleri geliştirilmiştir. Çok zamanlı interferometri (MTI) olarak da adlandırılan bu yaklaşım deformasyon haritalarının kalitesini kötüleştiren hataları gidermek için SAR görüntü yığınlarından yararlanmaktadır. MTI teknikleri arasında PSInSAR ve SBAS teknikleri gösterilebilir. Heyelanların belirlenmesinde ve izlenmesinde kullanılan InSAR teknikleri aynı zamanda heyelan envanter haritalarının güncellenmesinde, önceden tespit edilen heyelan sınırlarının daha iyi tanımlanmasında ve hareket durumu hakkında bilgi alınmasında aktif olarak kullanılmaktadır (Scaioni vd., 2014).

Tez kapsamında, çalışma alanlarındaki heyelanlar SAR görüntüleri kullanılarak PSInSAR tekniği ile belirlenmiştir. Bir sonraki bölümde heyelanların tespit edilmesinde ve izlenmesinde kullanılan SAR uydu görüntülerine ve özelliklerine değinilmiştir.

3. HEYELANLARIN TESPİT EDİLMESİNDE VE İZLENMESİNDE KULLANILAN BAŞLICA SAR UYDULARI VE ÖZELLİKLERİ

Heyelanların tespit edilmesinde ve izlenmesinde kullanılan SAR görüntüleri ERS, TerraSAR-X, ALOS, COSMO-SkyMED ve Sentinel gibi uydulardan elde edilmektedir. Azimut çözünürlüğü (radarın uçuş yönü doğrultusundaki çözünürlük) ve menzil çözünürlüğü (radarın uçuş yönündeki dik olan doğrultudaki çözünürlük) birbirinden farklı olan bu uydular için kısa açıklamalara ilerleyen başlıklarda yer verilmiştir.

3.1. ERS-1 ve ERS-2

ERS uyduları, dünyayı gözlemlemek amacıyla ESA tarafından yürütülen çalışma kapsamında geliştirilmiştir. ERS-1 uydusu 1991 yılında ve ERS-2 uydusu 1995 yılında aynı yörüngede olacak şekilde fırlatılmıştır. Uydular, sentetik açıklıklı görüntüleme radarı (C-bant), radar altimetresi, okyanus yüzey sıcaklığını ve rüzgar alanlarını ölçen sensörleri içermektedir. ERS-2’de ek olarak, atmosferik ozon takibi için ek bir sensör bulunmaktadır. ERS-1 uydusu 10 Mart 2000 tarihine kadar, ERS-2 uydusu 5 Eylül 2011 tarihine kadar veri sağlamıştır. ERS uydularına ait SAR görüntülerinin çözünürlüğü, menzilde 26 metre, azimutta 6-30 metre arasında değişmektedir (URL-1, 2019).

3.2. TerraSAR-X

Alman dünya gözlem uydusu olan TerraSAR-X, araştırma, geliştirme, bilimsel ve ticari amaçlı olarak X-bant SAR verisi üretmek amacıyla fırlatılmıştır. Hidroloji, jeoloji, klimatoloji, oşinografi, çevre ve afet izleme ve kartografi (SYM üretimi) yapımı gibi alanlarda çok çeşitli bilimsel uygulamalar için çok modlu ve yüksek çözünürlüklü veriler sağlamaktır. TerraSAR-X, 2007’den beri faaliyet göstermektedir (URL-2, 2019). Bu uydudan elde edilen görüntülerin menzil ve azimut çözünürlükleri ScanSAR Wide (SCW) modunda 40 metre, ScanSAR (SC) modunda 18 metre ve StripMap (SM) modunda 3 metredir (URL-3, 2019).

3.3. ALOS-1 ve ALOS-2

Gelişmiş Arazi İzleme Uydusu kısaca ALOS olarak adlandırılmaktadır. Japon Uzay Ajansı (JAXA) tarafından haritalama, gözlem, afet izleme ve kaynak araştırması amacıyla geliştirilmiştir. JERS-1 ve ADEOS uydularından sonra fırlatılmıştır. ALOS uydusu üzerinde bulunan PALSAR sensörü, L-bant SAR verisi üretmektedir. Görev süresi 2011 yılında bitmiştir. 24 Mayıs 2014 tarihinde yörüngesine fırlatılan ALOS-2, ALOS-1'in takip eden görevidir (URL-4, 2019; URL-5, 2019). PALSAR sensörü ile azimut ve menzil çözünürlüğü Fine Resolution (FBS, FBD) modunda 10-20 metre, ScanSAR (WB1, WB2) modunda 100 metre ve Polarimetric (PLR) modunda 30 metredir (URL-6, 2019).

3.4. COSMO-SkyMed

Akdeniz Havzası Gözlemine Yönelik Küçük Uyduların Eşitlenmesi anlamına gelen COSMO-SkyMed, çevresel izleme ve gözetim uygulamaları amacıyla ilk uydusu 2007 yılında fırlatılan X-bant SAR sensörüne sahip dört uydudan oluşmaktadır (URL-7, 2019). İtalyan yapımı olan uyduların üzerinde SAR-2000 sensörü bulunmaktadır. SAR-2000 sensörü ile azimut ve menzil çözünürlüğü Spotlight modunda 1 metre, Stripmap modunda 3-15 metre ve ScanSAR modunda 30-100 metredir (URL-8, 2019).

3.5. Sentinel-1

Copernicus; Avrupa Uzay Ajansı (ESA), Avrupa Birliği üyeleri ve ajansları ile birlikte Avrupa Komisyonu tarafından yürütülen dünya gözlem programıdır. Sentinel-1 uydu sistemi bu program kapsamında yürütülmektedir. Sentinel-1 uyduları, küresel kara kütlelerini, kıyı bölgelerini, deniz-buz bölgelerini, kutup bölgelerini, yüksek çözünürlükteki denizyolu güzergâhlarını ve dünyadaki okyanusları görüntülemek üzere tasarlanmış olup uzun zaman serilerine dayanan uygulamalar için tutarlı ve uzun vadeli bir veri arşivi oluşturmaktadır.

Sentinel-1, Avrupa Uzay Ajansı tarafından yürütülen ilk uydu programı olup aynı yörünge düzlemini paylaşan iki uydudan (Sentinel-1A ve Sentinel-1B) oluşmaktadır. 2014 yılının Nisan ayında Sentinel-1A uydusu, 2016 yılının Nisan ayında ise Sentinel-1B uydusu fırlatılmıştır. C-bantla çalışan iki uydunun birlikte görüntü sağlamasıyla beraber 12 gün olan zamansal çözünürlük 6 güne inmiştir. Sentinel-1 uydusu, ERS-1/2 ve Envisat ASAR'a

göre daha iyi zamansal çözünürlük sunar. Bu tez çalışmasında Sentinel 1A görüntüleri kullanılmıştır.

Sentinel-1 uydusu, şerit (SM: stripmap) modu, interferometrik geniş tarama alanı (IW: interferometric wide-swath) modu, ekstra geniş tarama alanı (EW: extra wide swath) modu ve dalga (WV: Wave) modu olmak üzere 4 farklı modda veri edinimi sağlamaktadır. Dağıtılan veri ürünleri ise; RAW (ham veri), SLC (Single Look Complex, genlik ve faz gibi karmaşık görüntüler), GRD (Ground Range Detected, çok bakış yoğunluklu) ve OCN (Ocean, okyanusun jeofizik parametreleri) formatındadır. Her görüntü modunun erişim açısı, çözünürlüğü ve şerit alan genişliği gibi temel özellikleri farklı olup Tablo 2'de kısaca özetlenmiştir.

Tablo 2. Sentinel-1 uydusunun edinim modları ve temel özellikleri

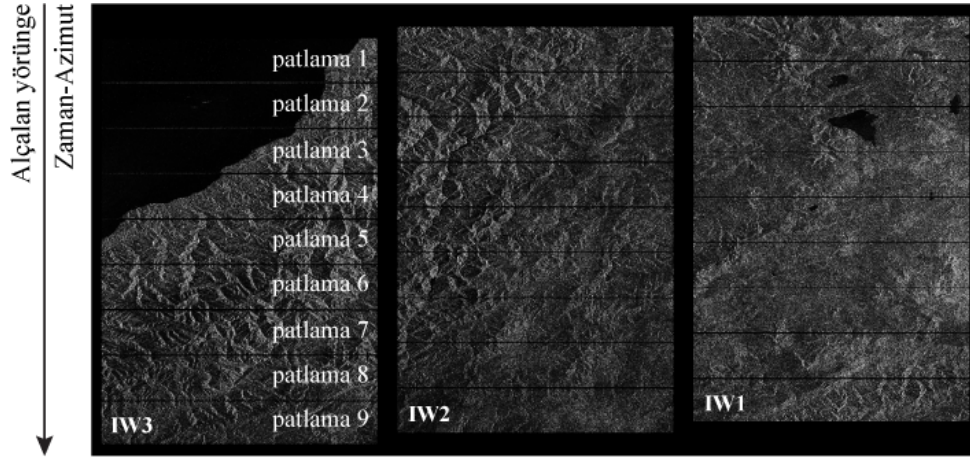
Görüntü Modu	Erişim Açısı	Çözünürlük (menzil x azimut)	Şerit Alan Genişliği	Polarizasyon
SM	20°-45°	5 x 5m	>80 km	HH / VV / HH+HV / VV+VH
IW	>25°	5 x 20m	>250 km	HH / VV / HH+HV / VV+VH
EW	>20°	20 x 40m	>400 km	HH / VV / HH+HV / VV+VH
WM	23° ve 36.5°	5 x 5m	>20x20 km	HH / VV

Bir SLC ürünü, azimut doğrultusu boyunca eğik menzil mesafesinde oluşan görüntüdür. Görüntüdeki her bir piksel, genlik ve faz bilgilerini içeren karmaşık değerlerle (I ve Q) temsil edilir. Tüm SLC ürünlerinin işlenmesi, mevcut tam sinyal bant genişliğini kullanan her boyutta tek bir görünüme yol açar. Görüntüler, uydudaki yörünge ve yükseklik verileri kullanılarak jeo-referanslandırılır (Bourbig vd., 2016).

Tez kapsamında IW modunda edinilmiş SLC formatındaki görüntüler kullanılmıştır. İnterferometrik geniş tarama alanı modunda elde edilen veri, 250 kilometrelik bir şerit alanı kapsar. Tek bir Sentinel-1 uydusu, tek bir geçişte IW modunda küresel kara kütlelerini haritalayabilecek potansiyele sahiptir. Bir IW SLC ürünüde, IW1, IW2 ve IW3 olarak adlandırılan 3 farklı alt şerit alan bulunur. Her bir alt şerit alan görüntüsü bir dizi patlamadan (burst) oluşur. Tek tek odaklanmış karmaşık patlama görüntüleri, azimut-zaman sırasıyla, araları siyah dolgululu tek bir alt şerit alan görüntüsüne dahil edilir (Şekil 3).

Patlama (burst) ve alt şerit alan birleşiminden sonra tüm ürün yaratılır. Bu işlem sırasında ScanSAR veya TOPSAR tekniği kullanılır. TOPSAR tekniği, geleneksel ScanSAR'a göre olumsuz etkileri azaltmada daha başarılıdır. Çözünürlük, Sentinel-1 görüntülerinde her seviye ve her ürün için farklılık gösterir. Tez kapsamında kullanılmış olan IW modundaki SLC verisinin menzil ve azimut çözünürlüğü sırasıyla 5 metre ve 20

metredir.



Şekil 3. IW modundaki SLC görüntüsüne ait alt şerit alanlar ve patlamalar (URL-9, 2018)'den değiştirilerek

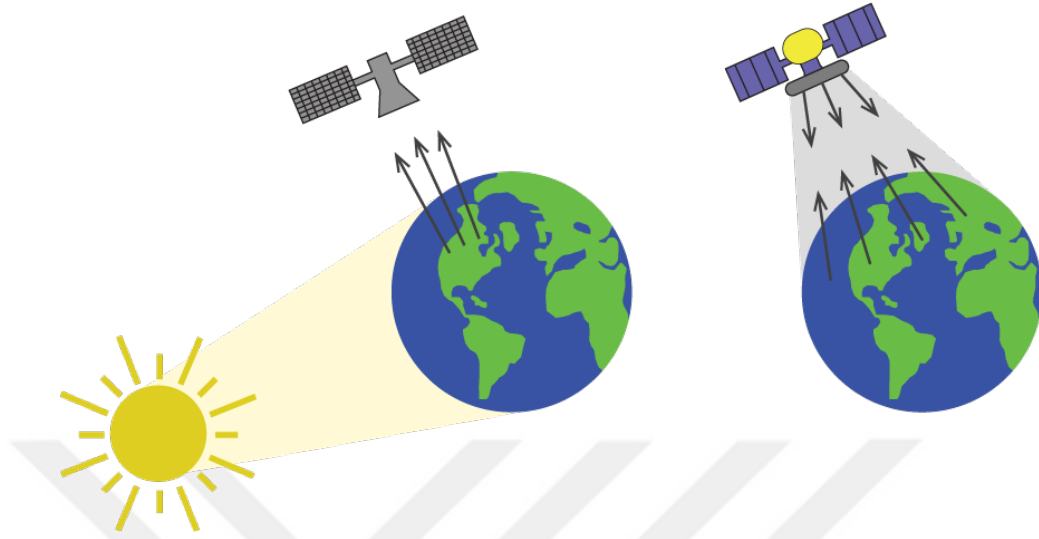
4. SAR TEKNOLOJİSİ VE PSInSAR TEKNİĞİ

Bölümün daha anlaşılır olabilmesi için SAR teknolojisi ve PSInSAR tekniğine kısa bir giriş yapmakta fayda bulunmaktadır. Bir SAR sinyali, genlik ve faz bilgisini içerir. Genlik radar yansımasının gücüdür ve faz bir sinüs dalga döngüsünün (tek bir SAR dalgaboyu) bir parçasıdır. SAR görüntüsünün fazı, temel olarak uydu anteni ve yerdeki hedef arasındaki uzaklık tarafından belirlenir. İnterferometrik SAR (InSAR) aynı alanın iki karmaşık SAR gözlemi arasındaki faz farkını kullanarak dünyadaki topografya hakkında uzaklık bilgisi alır. Çakıştırmadan (coregistration) sonra bu iki görüntüye ait fazın birleştirilmesiyle, fazın topografya ile yüksek oranda korelasyonlu olduğu ve deformasyon modelinin haritalanabildiği bir interferogram oluşturulabilir. Eğer topografya ile ilgili olan faz değişimi interferogramlardan kaldırılırsa, sonuç (ortaya çıkan) ürünler arasındaki fark iki alım tarihi arasında meydana gelen yüzey deformasyon modellerini gösterecektir. Bu metodolojiye Diferansiyel İnterferometre (DInSAR) denir. Daimi yansıtıcı interferometrisi (PSI), güçlü saçılımı olan yansıtıcıları kullanarak hedef noktanın zaman içerisindeki faz geçmişini (bilgisini) sağlamaktadır. Daimi yansıtıcılar zamanla korelasyonlu olan küçük, genellikle insan yapımı nesnelere olabilmektedir. Geleneksel DInSAR'ın yer değiştirme ve atmosferik imza etkileri arasındaki ayırım konusunda bazı kısıtlamaları olabilmektedir. PSI teknikleri, olağan baz uzunluğu ve zaman sınırlamalarını hafifleterek ve kullanılabilir interferogramların sayısını artırarak bu tür kısıtlamaların üstesinden gelebilmektedir. Sadece yeterince yüksek tutarlılığı olan hedefler dikkate alınır ve piksel yoğunluğunun azalmasına neden olmaktadır. Doğal afetlerin jeofiziksel olarak izlenmesi (deprem, volkanlar, heyelanlar vb.), yüzey deformasyonlarının zaman serisi analizi, buzul hareketlerinin incelenmesi ve sayısal yükseklik haritalarının oluşturulması başlıca InSAR uygulamaları arasında gösterilebilir (URL-10, 2019). Bu bölümün ilerleyen kısımlarında sentetik açıklıklı radarlar, InSAR, DInSAR ve PSInSAR teknikleri hakkında detaylı bilgilere yer verilmiştir.

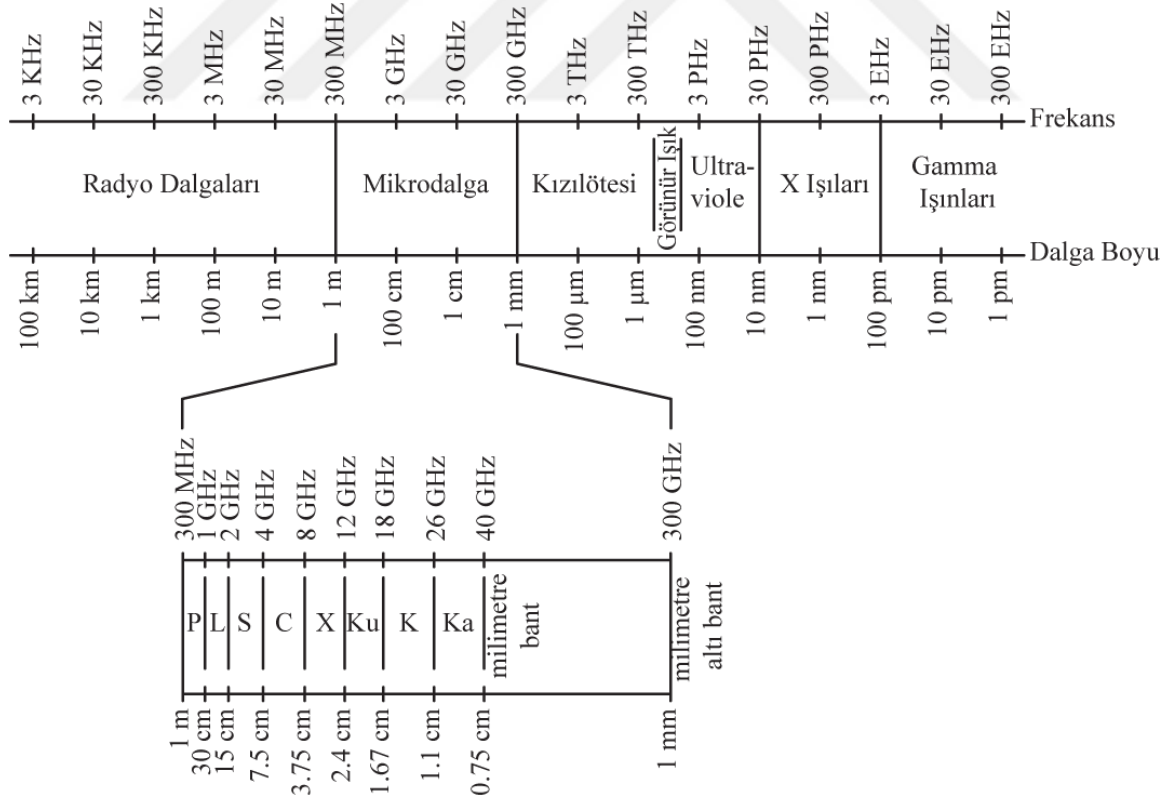
4.1. Sentetik Açıklıklı Radar (SAR)

Radar sensörleri, çalışma prensiplerine göre aktif ve pasif olarak iki gruba ayrılırlar (Şekil 4). Pasif sensörler alandan yansıyan radyasyonu ölçerken, aktif sistemler kendi gönderdiği radyasyonu ve yansıyan radyasyonu ölçer. Pasif sistemler içerisinde

mikrodalga radyometre; aktif sistemler içerisinde RADAR görüntüleme sistemleri, altimetre, scatterometer, Lidar ve SONAR sistemleri bulunmaktadır.



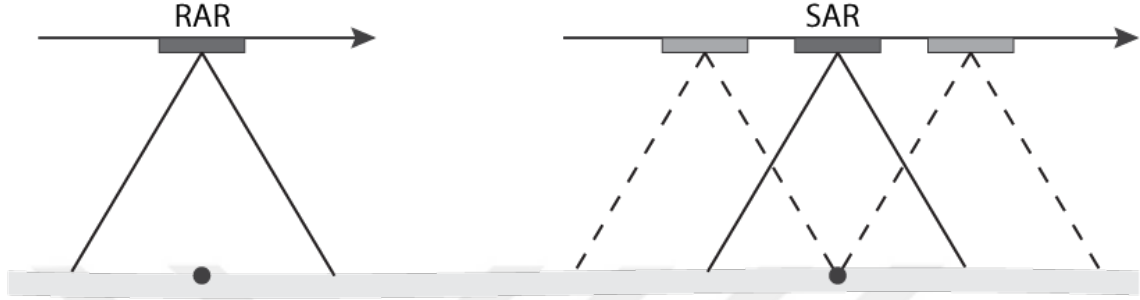
Şekil 4. Aktif ve pasif algılama (CCRS/CCT'den değiştirilerek)



Şekil 5. Elektromanyetik spektrum (Pozar (2004)'ten değiştirilerek)

Yerkabuğundaki değişimleri ölçmek için aktif sistemler içerisinde yer alan RADAR

görüntüleme sistemleri yoğun olarak kullanılmaktadır. Hem uydu hem de hava aracı üzerinde kullanılabilen radar görüntüleme sistemlerinden biri gerçek açıklıklı radar (RAR) ve diğeri sentetik (yapay) açıklıklı radardır (SAR). Sentetik ve gerçek açıklıklı radarlar, elektromanyetik spektrumda frekansı 300 MHz - 300 GHz ve dalga boyu 1 m - 1 mm arasında değişen mikrodalga ışınları kullanırlar (Şekil 5).

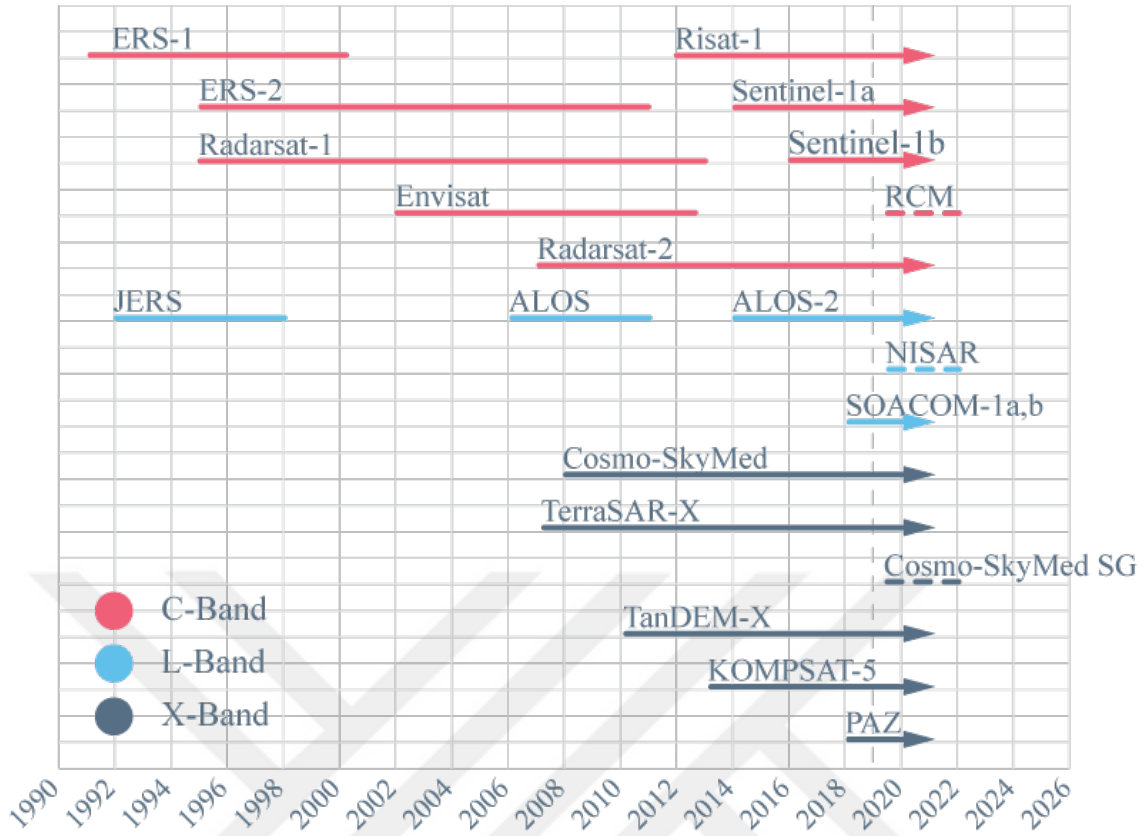


Şekil 6. RAR ve SAR anten genişlikleri (Sandwell vd. (2011)'den değiştirilerek)

Sentetik açıklıklı radarlar, gerçek açıklıklı radarlardaki anten yüksekliği ve azimut çözünürlüğü gibi kısıtlamaların üstesinden gelmek için geliştirilmiştir (Şekil 6). Temel prensipte, sentetik açıklıklı radar uçuş güzergahı boyunca hareket eder ve sistem belleğine sinyalleri belirli aralıklarla kaydetmeye başlar. Kaydın başlangıcı ve bitişi arasındaki mesafe yapay açıklık olarak ifade edilir. Bir başka deyişle radarın ileri hareketi ile bir yapay açıklık üretilir (URL-11, 2018). Uçuş güzergahı boyunca kaydedilen sinyallerin işlenmesi ile gerçek açıklıklı radarlara kıyasla çözünürlüğü daha iyi görüntüler elde edilir.

Gerçek Açıklıklı radarlar genellikle SLAR (yana bakışlı hava radarı) olarak adlandırılır. Hem gerçek hem de sentetik açıklıklı radarlar, genellikle uçuş hattına dik olan yan görünüşlü sistemlerdir. İki sistem arasındaki fark azimut yönündeki çözünürlükte yatmaktadır. Gerçek açıklıklı radarlar, anten ışın genişliği tarafından belirlenen azimut çözünürlüğüne sahiptir. Sentetik açıklıklı radarlar, gerçek antenden çok daha uzun olan bir açıklığı sentezlemek için bir dizi sinyali işlerler. Bu yetenekleri sayesinde, anten ve hedef arasındaki mesafeden bağımsız olan bir azimut çözünürlüğü elde edilir.

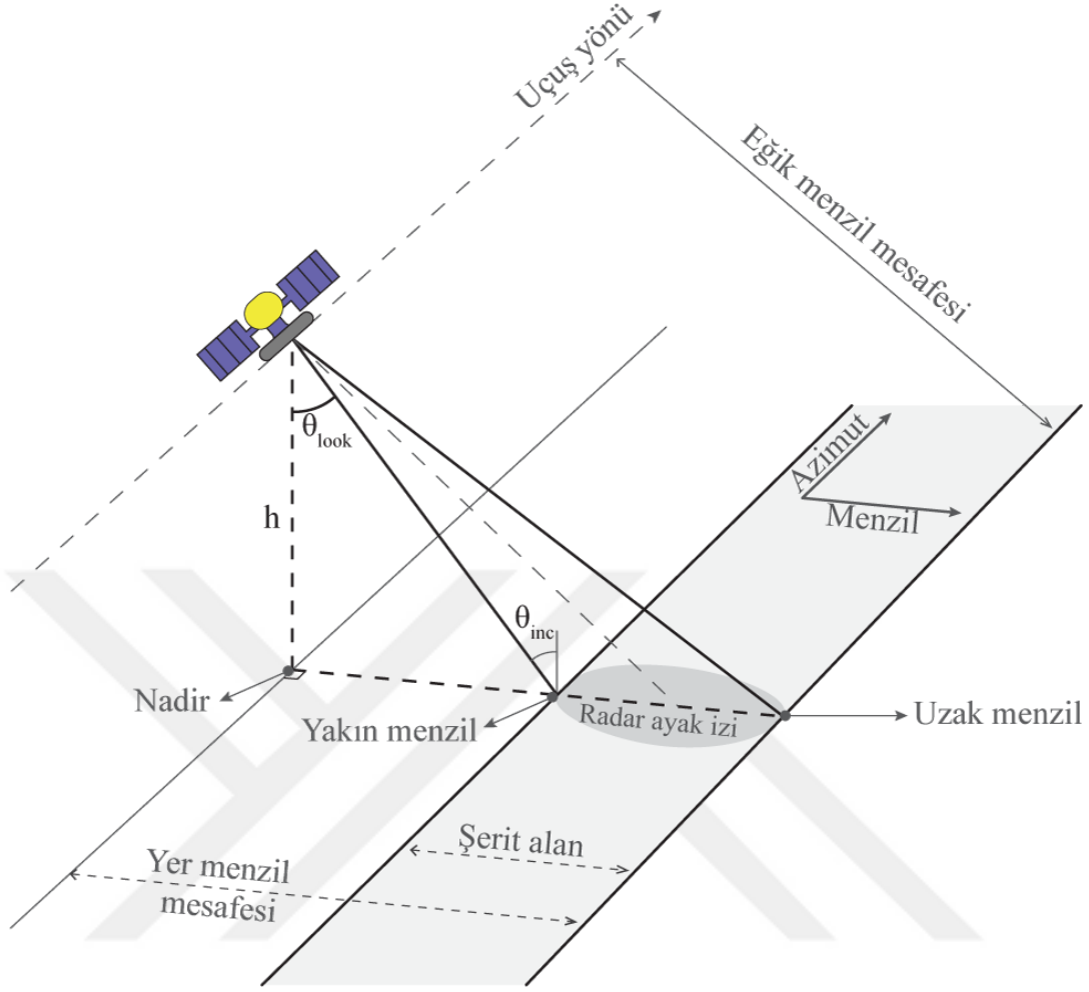
İlk SAR uydusu ERS-1'in fırlatılması ile başlayan süreçte, bazı SAR uydularının görev süresi dolmuş (ERS, Envisat, Radarsat vb.) ve bazı SAR uyduları ise (Sentinel, ALOS, Cosmo-SkyMed SG vb.) halen aktif olarak görüntü toplamaktadır (Şekil 7). Görev süresi bitmiş uydulardan elde edilen görüntüler geçmiş veya geçmişle bağlantılı olayları analiz etmek için halen daha yoğun bir şekilde kullanılmaktadır.



Şekil 7. Eski ve güncel SAR uydu görevleri

Bir SAR sisteminin genel çalışma prensibi Şekil 8'de gösterilmiştir. Bir SAR uydusu, belirli bir yükseklikte (h), yörüngesi boyunca hareket etmektedir. Bakış açısı (θ_{look} : look angle), radarın yüzeye baktığı açıdır. Eğik menzil mesafesi (slant range), uydu yörüngesine dik olan, radar sensörü ile hedef nesne arasındaki mesafedir. Eğik menzil mesafesi farklı kaynaklar tarafından radarın bakış yönü (LOS: line of sight), sensör hedef doğrultusu ve eğik uzunluk olarak da adlandırılır. SAR uydusunun bakış açısına ve yerden yüksekliğine bağlı olarak sınırlı bir alana sinyal gönderilir. Bu alan, şerit alan (swath) olarak tanımlanır. Azimut, radar uçuş yönüne paraleldir. Azimut yönü (azimuth direction), menzil yönüne (range direction) diktir.

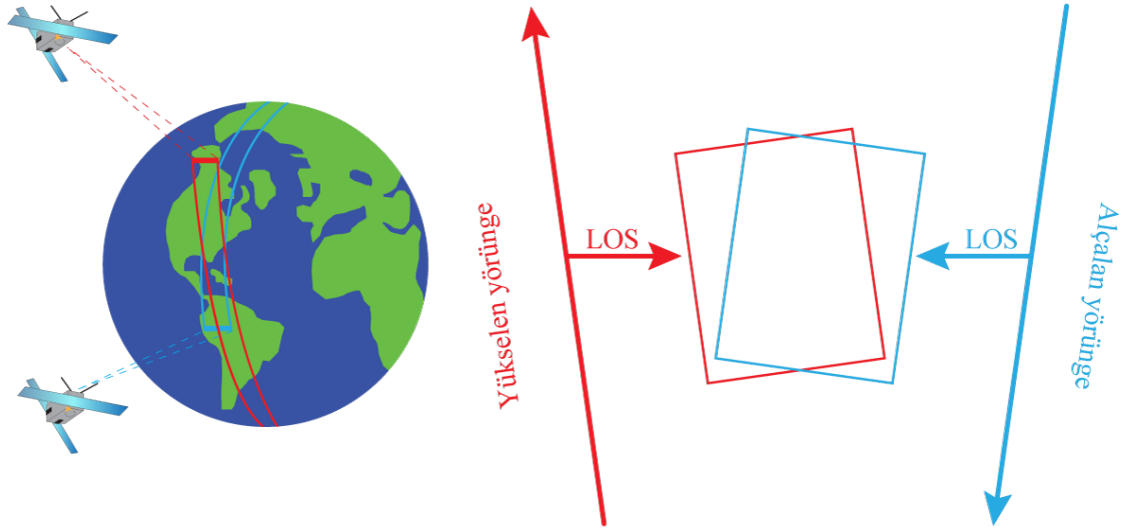
Yer menzil mesafesi ya da yer aralığı (ground range), eğik menzil mesafesinde ölçülen her noktaya karşılık gelen gerçek yatay mesafedir. Yer aralığı projeksiyonu (ground range projection), eğik menzil mesafesinden yer menzil mesafesine bir geometrik dönüşümü gerektirir; uzay aracı verileri için bir jeoit modeli kullanılırken hava radar verilerinde düzlemsel bir yaklaşım yeterlidir. Bu, radar görüntülerinde rölyef veya yükseklik yer değiştirmesine, kısaltıma (foreshortening) ve kaplamaya (layover) yol açabilir. Ancak, arazi



Şekil 8. SAR çalışma prensibi (Curlander (1982); Jackson ve Apel (2004); Ferretti vd. (2007)'den değiştirilerek)

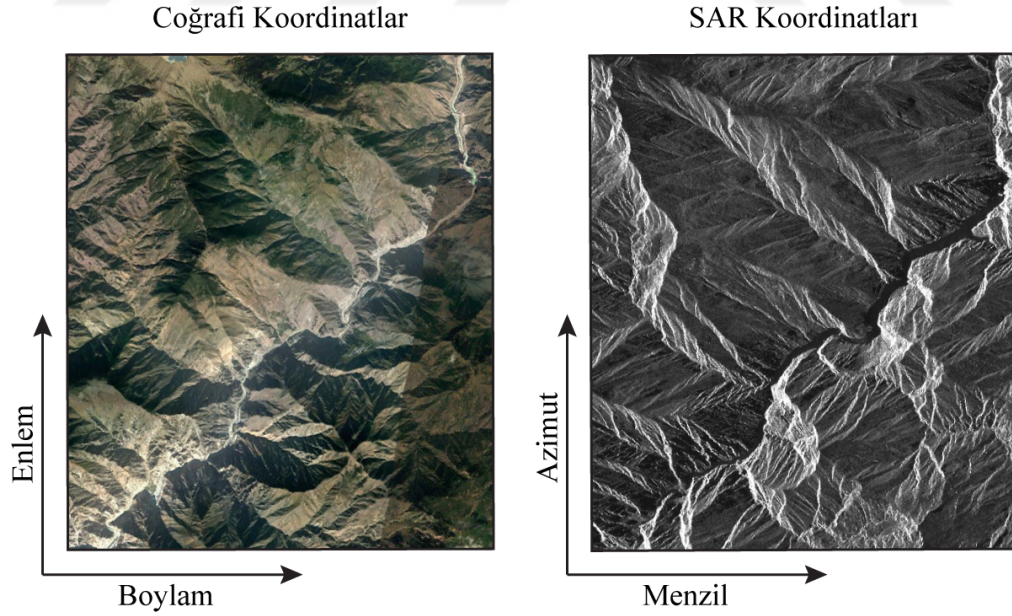
yükseklik bilgisi kullanılırsa, görüntüleme geometrisindeki etkisi en aza inebilir. Geliş açısı (θ_{inc} : incidence angle), radar ışını ve yer yüzeyi arasındaki açıdır. Şerit alan (swath) boyunca, yakın mesafeden uzak mesafeye doğru giderken artış gösterir.

Bir SAR uydusu, yükselen (ascending) ve alçalan (descending) olmak üzere iki yörünge doğrultusu boyunca hareket eder (Şekil 9). Bazı çalışmalarda tek yörünge doğrultusundan elde edilmiş görüntüler yeterli olurken, bazı çalışmalarda ise hem yükselen hem de alçalan yörünge doğrultusundan elde edilmiş görüntüler kullanılır. SAR uydusunun hem yükselen hem alçalan yörünge hareketi sayesinde, geometrik bozuklukları giderme, tek yörünge geçişi ile elde edilen verilerin kalitesini iyileştirme ve sayısal yükseklik modellerinin (SYM) hata oranlarını azaltma gibi uygulamalarda önemli kazanımlar elde edilmiştir.



Şekil 9. Yükselen ve alçalan yörünge

Normal bir optik görüntüde, görüntü koordinatları enlem ve boylam ile ifade edilir. SAR görüntülerinde ise, uçuş yönüne paralel olan azimut ve azimuta dik olan menzil (range) ile ifade edilir. Şekil 10’da optik bir görüntü (solda) ile SAR görüntüsünün (sağda) koordinat sistemleri görülmektedir.



Şekil 10. Coğrafi ve SAR koordinat sistemleri

4.1.1. SAR Görüntülerinde Faz ve Genlik Kavramı

SAR tekniği ile uzay, hava ve hatta yere monte edilen yana bakışlı aletlerle elde edilen verilerden yüksek çözünürlüklü radar görüntüleri oluşturulur. Bunu, bir radar ışını ile elektromanyetik darbeleri ileterek ve dünyanın yüzeyinden yansıyan radar yankılarını, bir başka deyişle ekolarını, kaydedererek yapar. Radardan farklı uzaklıkta bulunan saçıcılar (farklı eğik menzil mesafesi), elektromanyetik darbelerin iletilmesi ve alınması arasında farklı gecikmeleri ortaya çıkarır. Bu gecikme (τ), iletilen ve alınan sinyaller arasındaki bir faz değişikliğine eşittir. Faz değişimi (ϕ), bu nedenle, iletilen dalga boyu (λ) tarafından bölünmüş radyasyonun çift yönlü (gidiş ve geliş) seyahat mesafesiyle ($2r$) orantılıdır (Eşitlik 4.1) (Ferretti vd., 2007).

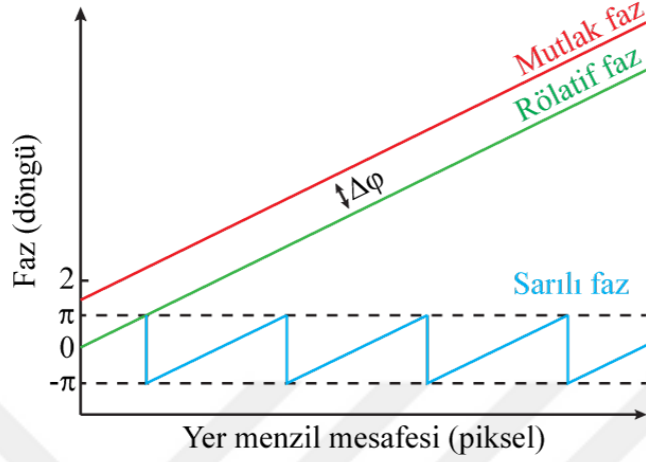
$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} 2r \quad (4.1)$$

Bir görüntü iki boyuttan oluşur. Bunlardan birisi menzil (range) ve diğeri azimuttur. Bir görüntünün her pikseli, radar tarafından yayılan elektromanyetik darbeleri alan ve geri saçan zemindeki bir çözünürlük elemanına karşılık gelir. Bir piksel genlik (amplitude) ve faz (phase) olmak üzere iki değerle ifade edilir. Genlik, geri saçılımın yoğunluğu hakkında bilgi verir ve yüzeyin geri saçılma özelliklerine göre yorumlanabilir. Büyük ölçüde arazideki saçıcıların pürüzlülüğüne bağlıdır. Mostra veren kayaların ve kentsel alanların genlikleri büyük olduğundan dolayı iyi saçılım gösterirler. Düz yüzeylerin genliği düşük olduğu için iyi saçılım göstermezler. Faz ise bir hedefe çarptığında dalganın konumu hakkında bilgi verir. Kendi başına bilgilendirici değildir. Çünkü çözünürlük elemanı içindeki bütün saçılım yapan nesnelerin konfigürasyonu yüzünden aldattıcıdır.

İki görüntünün fazı karşılaştırıldığında, uyduların farklı bakış açılarına göre sensöre olan uzaklığı tanımlayan bir interferogram elde edilir. Faz sadece dalgaboyu ölçeğinde ölçülebilir olduğundan faz açma (phase unwrapping) işlemi uygulanmalıdır. Faz açma işlemi de, tüm faz bilgisini toplamak için bu dairesel bilgiyi ölçülebilir metrik birime dönüştürmek anlamına gelir.

İnterferometrik faz değeri, $-\pi$ ile $+\pi$ arasındadır (mod 2π). Bu nedenle, 2π 'den büyük olan değerler 0'dan başlar. 0'dan küçük olan faz değerleri ise 2π 'den tekrar çözümlenir (Şekil 11). SYM ve deformasyon haritaları faz çözümlemesi yapılarak oluşturulur (Comut, 2016).

Faz çözümlemesi ne kadar doğru yapılmışsa oluşturulan haritalar o kadar doğru olur. InSAR ölçümleri göreceli olduğundan dolayı mutlak faz ve göreceli açılmamış faz arasındaki ofset ($\Delta\theta$), sadece GPS ölçümleri gibi ek bilgiler kullanılarak çözülebilir (Şekil 11).



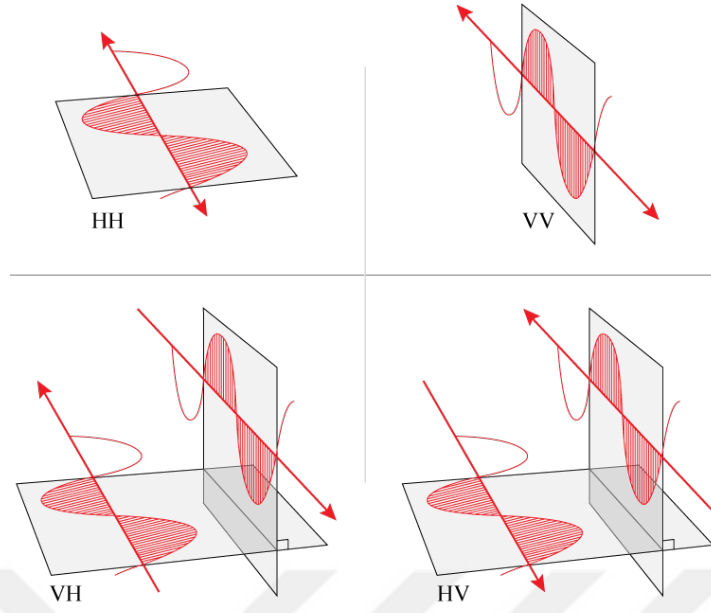
Şekil 11. Sarılı (wrapped phase-mavi) faz, göreceli açılmamış (unwrapped phase-yeşil) faz ve mutlak (kırmızı) faz (Osmanoğlu vd. (2016)'dan değiştirilerek)

SAR görüntüleri genellikle gri renk skalasıyla görselleştirilir. Parlak pikseller güçlü saçılım gösteren yüzeyleri, koyu pikseller düşük saçılım gösteren yüzeyleri temsil eder (Curlander ve McDonough, 1991; Ferretti vd., 2007; Pinel vd., 2014).

4.1.2. Polarizasyon Çeşitleri

Radar polarizasyonu, geleneksel radar görüntüleme sistemlerinde, elektromanyetik dalgadaki elektrik vektörünün yönüdür. Uzaktan algılama radarları genellikle ya dikey ya da yatay polarizeli radyasyonu iletmek üzere tasarlanmıştır. Bu, dalganın elektrik alanının dikey veya yatay bir düzlemde olduğu anlamına gelir. Radar ya dikey ya da yatay polarizeli radyasyonu veya bazen her ikisini de alabilir. İletilen ve alınan polarizasyon düzlemleri, dikey için V (Vertical) ve yatay için H (Horizontal) harfleri ile ifade edilir. Bir radar görüntüsünün polarizasyonu VV olduğunda dikey iletim-dikey alım, VH olduğunda dikey iletim-yatay alım olduğu anlaşılır. Alınan ve iletilen radyasyonun polarizasyonu aynı olduğunda, görüntü polarize olarak ifade edilir. Alınan ve iletilen radyasyonun polarizasyonu farklı olduğunda ise görüntü çapraz polarizeli olarak ifade edilir (URL-12, 2019).

Dairesel sağ el (R: right hand circular) ve dairesele sol el (L: left hand circular)



Şekil 12. İletilen ve alınan polarizasyon düzlemleri

gibi polarizasyon çeşitleri de hava durumu gibi uygulamalarda kullanılır. Yatay ve dikey polarizasyon en yaygın kullanılan iki polarizasyondur. Bir radar sistemi farklı polarizasyon seviyelerine sahip olabilir (Şekil 12). Tekli, ikili ve dörtlü polarizasyon çeşitleri (Tablo 3)'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Radar sistemlerindeki farklı polarizasyon seviyeleri

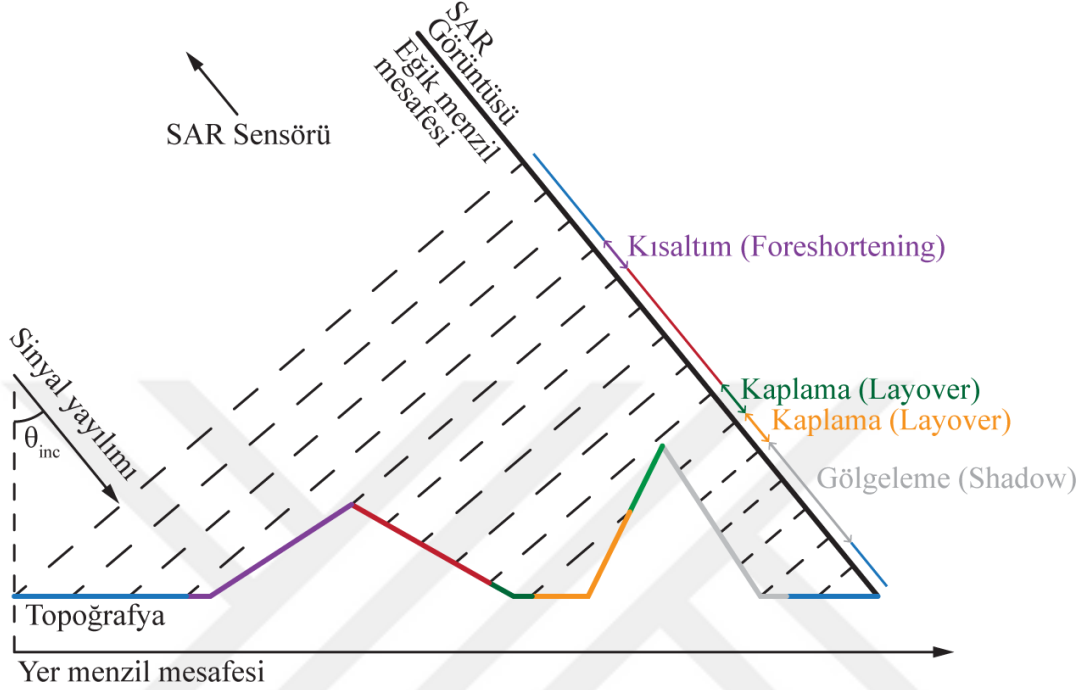
Polarizasyon seviyesi	Polarizasyon düzlemi
Tekli polarizasyon	HH, VV, HV veya VH
İkili polarizasyon	HH ve HV, VV ve VH veya HH ve VV
Dörtlü polarizasyon	HH, VV, HV ve VH

4.1.3. Geometrik Bozukluk Çeşitleri ve Benekleme

SAR görüntüleri, topoğrafyaya ve SAR sistemlerinin sinyal süresi ölçüm prensiplerine bağlı olarak bir takım geometrik hataları bünyesinde barındırır. Bir SAR görüntüsündeki her bir yer çözünürlük hücresi, yerel topoğrafyanın bir gösterimidir. Azimut ve menzil yönündeki arazi eğimi, yer çözünürlük hücrelerinde gözlenen bazı geometrik bozukluklara sebep olur. Bu geometrik bozukluklar; kısaltım (foreshortening), kaplama (layover) ve gölgeleme (shadowing) şeklinde adlandırılır (Şekil 13).

Düz bir yatay yüzeye göre arazi eğimi artarsa, yer çözünürlük hücresinin SAR

görüntüsünde kapladığı alan azalır. Bu etki kısaltım olarak adlandırılır. Arazi eğimi radar geliş açısına yakın olduğunda, hücre boyutu çok büyük olur ve bunun sonucu olarak bütün detaylar kaybolur.



Şekil 13. Geometrik bozukluk çeşitleri (Ferretti vd. (2007); Pinel vd. (2014)'den değiştirilerek)

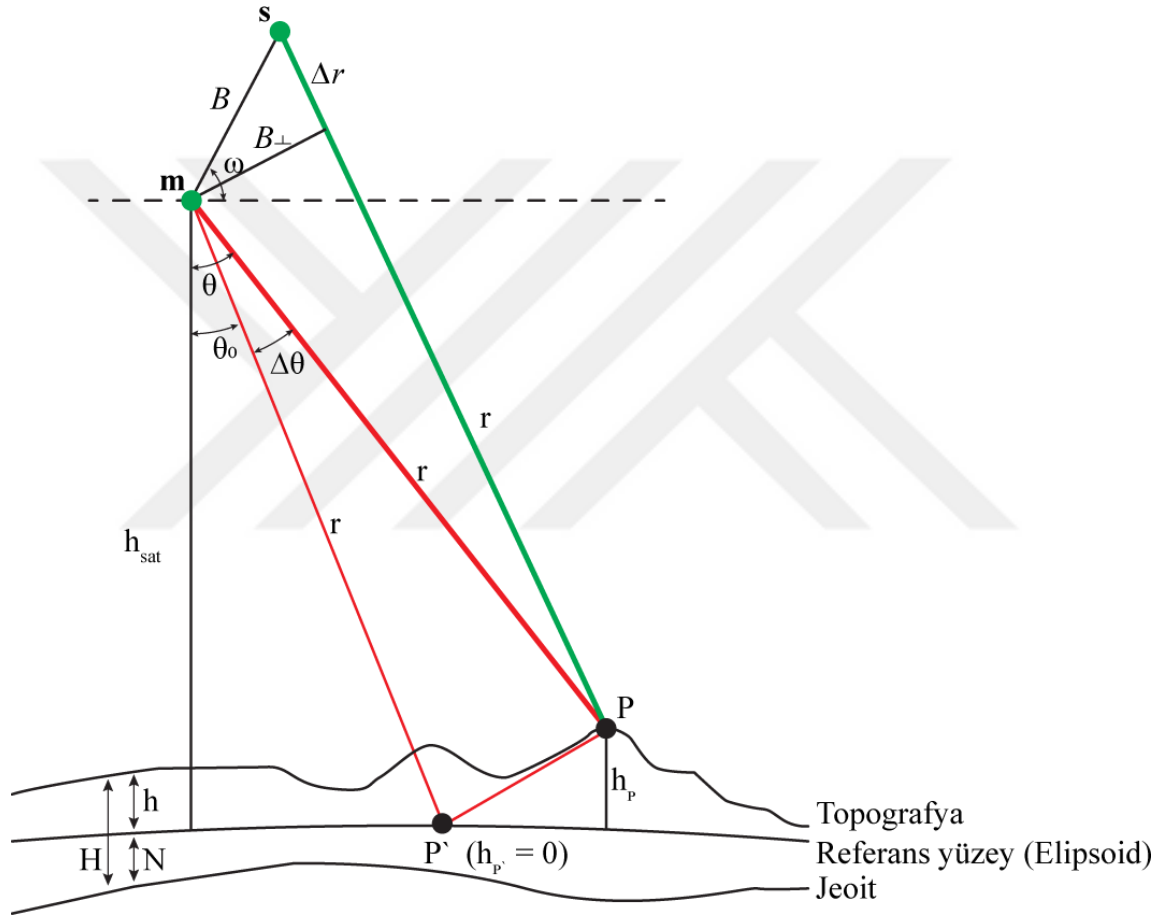
Arazi eğimi, geliş açısını aştığında saçıcılar ters sırada görüntülenir ve diğer alanlardan gelen katkılara bindirilir. Bu efekt kaplama olarak adlandırılır. Yer yüzeyindeki farklı alanların, aynı SAR çözünürlük pikselinde bulunmasıyla sonuçlanır.

Arazi eğimi, düz yatay referans yüzeyine göre düştüğünde çözünürlük hücresi boyutu azalır. Arazi eğik menzil mesafesine paralel olduğunda, minimum çözünürlük hücresi boyutuna ulaşılır. Bu aynı zamanda bir SAR sistemi tarafından hiç görüntülenemeyen daha düşük yamaç eğimi sınırındır. Çünkü bu açının ötesinde arazi gölgedir. Bu etkiye gölgeleme denir.

Benekleme (speckle), optik görüntülerde bulunmayıp SAR görüntülerinde bulunan, SAR çözünürlük hücresinde birkaç yansıtıcı olması durumunda gözlenen bir etkidir. Tekdüze genlik görüntüsü üzerine eklenmiş bir çeşit tuz ve biber efekti olarak gözlenir (Fletcher, 2012).

4.2. İnterferometrik SAR (InSAR) ve Diferansiyel İnterferometrik SAR (DInSAR)

SAR görüntüleri ile heyelan araştırmalarının daha iyi anlaşılabilmesi için interferometrik SAR hakkında bazı temel bilgilerin öğrenilmesi faydalı olacaktır. Başlangıç olarak, birincil ve ikincil görüntülerin kayıt edildiği SAR interferometre görüntüsü Şekil 14'te gösterilmiştir.



Şekil 14. İnterferometri geometrisi (Hanssen (2001); Kampes (2006); Hooper vd. (2007)'den değiştirilerek)

İnterferometrik SAR, farklı yörünge pozisyonunda ve farklı zamanlarda edinilen karmaşık değerli iki SAR görüntüsü arasındaki faz farkını kullanır. P hedef noktası, uçuş yönüne dik düzlemde bulunur. Birincil ve ikincil görüntülerin alındığı noktaların P hedef noktasına olan mesafeleri sırasıyla, r ve $r + \Delta r$ 'dir. Birincil ve ikincil görüntülerin alındığı noktalar arasındaki baz uzunluğu B simgesiyle, B baz uzunluğunun dik bileşeni B_{\perp} simgesiyle gösterilmiştir. Her alınan ekonun fazı zaman gecikmesiyle orantılıysa, bir radarın tutarlı

olduğu söylenir. İki sinyal arasındaki mesafe farkı, alınan yankıların faz farkına bakarak dalga boyunun bir kısmının içindeki doğrulukla belirlenebilir. Yerdeki yansıtıcının edimimleri arasında değişmediği varsayıldığında, ölçülen faz farkı sadece görüntüleme geometrisine dayanır (Lauknes, 2004).

Tespit edilen sinyal, genlik ve fazdan oluşan bir karmaşıktır. Sinyal (g), amplitüt (\mathcal{A}), kayıt edilen faz ($j\varphi$) ve sensör ile belirli bir yansıtıcı arasında eğik menzil mesafesindeki uzaklık (r) olmak üzere (Eşitlik 4.2)'de gösterilmiştir (Höser, 2018; Rosen vd., 2000; Lauknes, 2004; Ferretti vd., 2007; Plank, 2014; Schlögel vd., 2015).

$$g = \mathcal{A}e^{-j\varphi} = \mathcal{A}e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}r} \quad (4.2)$$

SAR sensörü tarafından alınan birincil (ϕ_m) ve ikincil (ϕ_s) görüntülere ait faz, Eşitlik 4.3'de ve Eşitlik 4.4'de gösterilmektedir. Ölçülen sinyal faz gecikmesini temsil ettiği için eşitlik negatiftir.

$$\phi_m = -\frac{2\pi}{\lambda}2r \quad (4.3)$$

$$\phi_s = -\frac{2\pi}{\lambda}(2r + 2\Delta r) \quad (4.4)$$

Daha sonra, (Eşitlik 4.3) ve (Eşitlik 4.4) kullanılarak, interferometrik faz (Eşitlik 4.5)'deki gibi yazılabilir.

$$\Delta\phi = \phi_m - \phi_s = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta r \quad (4.5)$$

İnterferogram oluşturulduktan sonra, görüntünün üzerinde sunulan interferometrik fazın homojen olmadığı düşünülmelidir. Görüntünün bazı bölümlerinde farklı gürültü katkısı olabilir. Görüntünün bazı kısımlarındaki interferometrik faz bilgisi yorumlanabilirken, gürültüden dolayı bazı kısımlarındaki interferometrik faz bilgisi yorumlanamaz (Ferretti vd., 2007; Plank, 2014). Her bir çözünürlük hücresi için tutarlılık (γ) hesaplanarak, hangi faz

bilgisinin güvenilir olduğu ve hangileri üzerinde daha ileri analizlerin uygulanması gerektiği tespit edilir. Tutarlılık (γ), bir başka deyişle karmaşık korelasyon katsayısı, maksimum olabilirlik (ML: maximum likelihood) yöntemi kullanılarak hesaplanır. Eşitlik 4.6'da formülü verilen tutarlılık (γ), 0-1 arasında olup 1 değeri gürültünün hiç olmadığını, 0 değeri ise tamamen gürültü olduğunu ifade eder (Rosen vd., 2000; Lauknes, 2004; Ferretti vd., 2007; Plank, 2014; Schlögel vd., 2015; Höser, 2018).

$$|\gamma|_{ML} = \frac{|\sum_{i=1}^n g_m[i]g_s^*[i]|}{\sqrt{\sum_{i=1}^n |g_m[i]|^2 \sum_{i=1}^n |g_s[i]|^2}} \quad (4.6)$$

İnterferometrik faz ölçümleri, yörüngesel, atmosferik ve topografik faktörler ile görüntü alımı sırasındaki sensör konumlarının farklı olması gibi etmenlerden etkilenirler. Bütün bu etmenler göz önünde bulundurulduğunda interferometrik faz ölçümü,

$$\phi = \phi^{flat} + \phi^{topo} + \phi^{disp} + \phi^{atm} + \phi^{orbit} + \phi^{noise} \quad (4.7)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, düz yeryüzü fazı (ϕ^{flat}), topoğrafik faz (ϕ^{topo}), iki görüntü arasındaki yer değiştirme (ϕ^{disp}), atmosferik etki (ϕ^{atm}), yörüngesel etki (ϕ^{orbit}) ve faz gürültüsü (ϕ^{noise}) olarak ifade edilir.

Denklem girdileri araştırmanın konusuna göre yorumlanır. Örneğin; DInSAR'da önemli olan ϕ^{disp} etkisidir. Diğer etkiler çıkarılarak ya da minimize edilerek yer değiştirme miktarı tespit edilebilir. Heyelan izlemede ise önem arz eden iki bileşen ϕ^{flat} ve ϕ^{topo} 'dur.

Şekil 14'deki geometri üzerinde kosinüs teoremini uygulayarak ve $B \ll r$ paralel ışın yaklaşımını (Zebker ve Goldstein, 1986) kullanarak Eşitlik 4.8 elde edilir.

$$(r + \Delta_r)^2 = r^2 + B^2 - 2.r.B.\cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta + \omega\right) \quad (4.8)$$

$$\Delta_r \approx -B.\sin(\theta - \omega)$$

Daha önce bulduğumuz (Eşitlik 4.5) faz farkı formülü (Eşitlik 4.8) ile birleştirildiğinde (Eşitlik 4.9) elde edilmiş olur.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta r \quad (4.9)$$

$$\Delta\phi \approx -\frac{4\pi}{\lambda}B.\sin(\theta - \omega)$$

Eşitlik 4.9, interferometrik fazı ($\Delta\phi$), görüntülenen noktanın (P) silindirik koordinatıyla (θ) ilişkilendirir. Eğik menzil mesafesi (r), azimut (x) ve bakış açısı (θ) olmak üzere noktanın üç koordinatının tamamı belirlendiğinden, bu eşitlik aslında noktanın 3 boyutlu konumunu çözer. İnterferometrik faz ($\Delta\phi$) ve yükseklik (h_P) arasındaki ilişkiyi elde etmek için, $h_P = 0$ 'daki bir referans düzlemine göre, Eşitlik 4.9'deki $\sin(\cdot)$ fonksiyonu $\theta = \theta_0$ etrafında genişletilir (Lauknes, 2004).

$$\sin(\theta - \omega) = \sin(\theta_0 + \Delta\theta - \omega) \quad (4.10)$$

$$\sin(\theta - \omega) \approx \sin(\theta_0 - \omega) + \cos(\theta_0 - \omega)\Delta\theta$$

$$\Delta\phi \approx -\frac{4\pi}{\lambda}B \sin(\theta_0 - \omega) - \frac{4\pi}{\lambda}B \cos(\theta_0 - \omega)\Delta\theta \quad (4.11)$$

Eşitlik 4.11'deki birinci ve ikinci terimlerin sırasıyla ϕ^{flat} ve ϕ^{topo} InSAR bileşeni oldukları açıkça görülmektedir (Lauknes, 2004).

$$\phi^{flat} \approx -\frac{4\pi}{\lambda}B \sin(\theta_0 - \omega) \quad (4.12)$$

$$\phi^{topo} \approx -\frac{4\pi}{\lambda}B \cos(\theta_0 - \omega)\Delta\theta$$

Uydunun referans yüksekliği $h_{sat} = R' \cos(\theta_0)$ formülü ile ifade edilir. Bakış açısındaki değişikliklere göre uydunun yüksekliğinin türevi alınınca (Eşitlik 4.13) elde edilir.

Yeryüzü fazını (ϕ^{flat}) hesaplamak için, kesin yörünge verisinde sağlandığı gibi sensör geometrisi hakkında bilgiye ihtiyaç duyulur. Bu terim, sadece topografya bilgisi içeren düzleştirilmiş interferogram ile sonuçlanan ölçülmüş interferometrik fazdan hesaplanabilir ve çıkarılabilir. Düzleştirilmiş interferogramdan h_p 'yi türetmek için, Eşitlik 4.13'deki $\Delta\theta$,

Eşitlik 4.12’de yerine konur (Lauknes, 2004; Ferretti vd., 2007; Höser, 2018).

$$\Delta\theta \approx \frac{h_p}{r \sin \theta_0} \quad (4.13)$$

Eşitlik 4.12 ve 4.13 birleştirilince Eşitlik 4.14 elde edilir.

$$\phi^{topo} \approx -\frac{4\pi}{\lambda} B \cos(\theta_0 - \omega) \frac{h_p}{r \sin \theta_0} \quad (4.14)$$

Eşitlik 4.14’ün sağ tarafına bakıldığında, sensör özellikleri ve kesin yörünge verileri kullanılarak, h_p dışındaki tüm değişkenlerin mevcut olduğu görülmektedir. Bu bilinmeyi çözmek ve ϕ^{topo} ’yu hesaplamak için, her hedef hücre için h_p değerlerini içeren bir dijital yükseklik modeli, sensör konumu ve özellik verileriyle birlikte kullanılır. Daha sonra, topografik faz interferometrik fazdan çıkartılabilir. Sonuç olarak, ϕ ’nin ϕ^{flat} ve ϕ^{topo} ’nun toplamı olduğu basitleştirilmesi çıkarılabilir. Eşitlik 4.7’den ϕ^{flat} ve ϕ^{topo} ’nun çıkarılması DInSAR analizleri için uygun interferogramların olmasına yol açar. Değinen ve değinilmeyen diğer (ϕ^{disp} , ϕ^{atm} , ϕ^{orbit} vb.) faz bileşenleri için detaylı anlatıma Zebker ve Goldstein (1986); Ferretti vd. (2007); Simons ve Rosen (2007); Crosetto vd. (2016)’dan erişilebilir.

4.3. Daimi Yansıtıcı InSAR (PSInSAR) Tekniği ve Stanford (StaMPS) Yöntemi

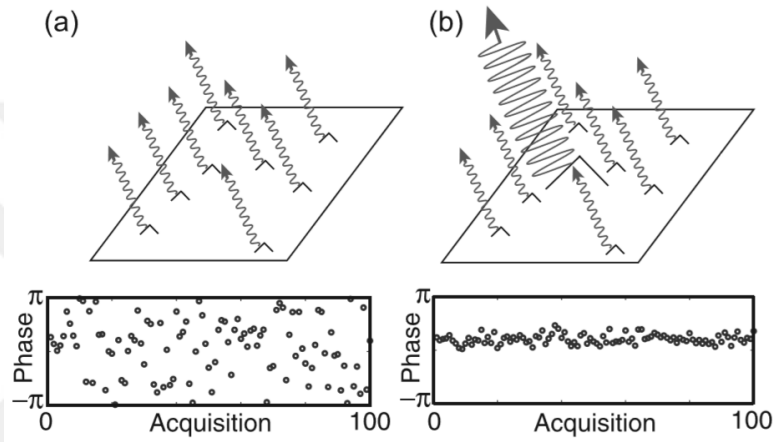
PSInSAR tekniği daha önceden birçok araştırmacı tarafından farklı yaklaşımlarla çalışılmıştır. Baz biçimi (baseline configuration) ve piksel seçimi gibi kriterler sonucunda elde edilen deformasyon modeli bu yaklaşımları birbirinden ayırmaktadır. Tablo 4’de PSInSAR tekniği için geliştirilmiş farklı yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler incelendiğinde, baz biçimi seçiminde genel olarak tek birincil görüntü ve kısa baz uzunluğunun tercih edilmiş olduğunu görürüz. Piksel seçimleri ise genlik, tutarlılık ve istatistik kriterleri etrafında şekillenmiştir. Lineer ve konumsal pürüzsüzlük (spatial smoothness) ise birçok yöntemde elde edilen deformasyon modelleridir.

PSInSAR tekniği, daimi yansıtıcı özelliği olan pikseller (bina, altyapı ve diğer insan yapımı yapılar, kayalık vb.) ile ilgilenir. SAR görüntüsündeki her piksel, yerdeki birçok

Tablo 4. PSInSAR tekniğinde temel yaklaşımlar (Crosetto vd., 2016)

PSI Yönteminin Referansı	Baz uzunluğu yapılandırması / Piksel seçim kriteri	Deformasyon modeli
Ferretti vd. (2000, 2001)	Tek birincil / Genlik dağılımı	Zamanda doğrusal deformasyon
Berardino vd. (2002)	Kısa baz uzunluğu / Tutarlılık	Mekansal düzgünlük
Mora vd. (2003)	Kısa baz uzunluğu / Tutarlılık	Zamanda doğrusal deformasyon
Schmidt ve Bürgmann (2003)	Kısa baz uzunluğu / Tutarlılık	Mekansal ve zamansal düzgünlük
Werner vd. (2003)	Tek birincil / Genlik dağılımı - Spektral faz çeşitliliği	Zamanda doğrusal deformasyon
Duro vd. (2004)	Kısa baz uzunluğu / Genlik dağılımı, tutarlılık, spektral tutarlılık	Zamanda doğrusal deformasyon
Crosetto vd. (2008)	Kısa baz uzunluğu / Genlik dağılımı, tutarlılık, spektral tutarlılık	Zamanda doğrusal deformasyon
Kampes (2006)	Tek birincil / Genlik dağılımı - Sinyal dağınıklık oranı	Farklı deformasyon modelleri
Hooper vd. (2004)	Tek birincil / Genlik ve faz kriteri	Mekansal düzgünlük
Crosetto vd. (2005)	Kısa baz uzunluğu / Tutarlılık	Zamanda adım adım doğrusal fonksiyon
Costantini vd. (2008)	Tek birincil / Genlik dağılımı	Zamanda doğrusal deformasyon
López-Quiroz vd. (2009)	Kısa baz uzunluğu / Tutarlılık	Mekansal düzgünlük
Ferretti vd. (2011)	Üçgenlemeden sonra tek birincil / İstatistiksel homojenlik testi	Zamanda deformasyon modeli
Perissin ve Wang (2012)	Hedefe bağlı interferogram altkümesi / Quasi-PS yaklaşımı	Zamanda doğrusal deformasyon
Hetland vd. (2012)	Kısa baz uzunluğu / Tutarlılık	Farklı deformasyon modelleri
Van Leijen (2014)	Tek birincil görüntü / Genlik dağılımı	Farklı deformasyon modelleri
Goel ve Adam (2014)	Kısa baz uzunluğu / İstatistiksel homojenlik testi	Zamanda doğrusal deformasyon
Lv vd. (2014)	Tek birincil / İstatistiksel homojenlik testi	Zamanda doğrusal deformasyon
Devanathéry vd. (2014)	Kısa baz uzunluğu / Genlik dağılımı - Kuzen PS	Mekansal düzgünlük

yansıtıcıdan geri dönüşlerin tutarlı bir toplamından meydana gelmektedir. Bir piksel, diğer saçıcılardan daha parlak olan stabil bir saçıcı tarafından domine edilirse, eko fazındaki varyans arkaplandaki saçıcıların göreceli hareketine göre azalmış olacaktır ve temel deformasyon sinyalinin çıkarılmasını sağlamak için yeterince küçük olabilir. Bu tarz bir piksel daimi yansıtıcı olarak tanımlanır (Hooper vd., 2004, 2007). Şekil 15'te, bir pikselin fazına katkıda bulunan dağınık yansıtıcı piksel (a) ve daimi yansıtıcı piksel (b) görülmektedir (üstte). İterasyonlu faz simülasyonunda küçük yansıtıcıların her iterasyonda rasgele hareket ettiği görülmektedir (altta).



Şekil 15. Dağınık (a) ve daimi (b) yansıtıcı piksellerin gösterimi ve faz simülasyonları. a) Dağınık yansıtıcılar, çok sayıda nesnenin benzer bir güçte daha zayıf bir yansıtıcı özellik gösterdiği piksellerdir. b) Daimi yansıtıcılar, yüksek yansıtıcı özelliklerine sahip olan ve yansıtıcı özellikleri zaman içerisinde istikrarlı olan piksellerdir. (Hooper vd., 2007)

PS piksellerini tanımlamak ve ayırmak için geliştirilen bazı çalışmalar (Ferretti vd., 2001; Crosetto vd., 2003; Werner vd., 2003; Kampes, 2005), kentsel alanlarda PS piksellerinin belirlenmesinde çok başarılıdırlar. Bu algoritmalarda, bir interferogram serisi içinde, yüksek sinyal gürültü oranına (SNR) sahip bir başlangıç PS piksel seti, amplitüd değişkenliği analiz edilerek tanımlanır. Her bir aday piksel yakınlardaki adaylarla olan faz farklılıkları incelenerek faz kararlılığı açısından test edilir. Faz geçmişisi varsayılan deformasyon modeline benzeyen sadece bir piksel kararlı kabul edilir. Bu şekilde, bir referans PS piksel ağı tanımlanır ve sonra kalan piksellerin hepsi analiz edilerek ek PS pikselleri bulmada kullanılır. Bu yaklaşım iki nedenden ötürü başarısız olabilir. İlk sınırlama, komşu PS pikselleri arasındaki mesafenin çok fazla olması durumunda faz açma işlemi

başarısız olabilir. Faz değişimini kullanan ilk seçim daha parlak PS pikselleri bulur, insan yapımı yapılar gibi, ve bu nedenle yapı yoğunluğunun yüksek olduğu kentsel alanlarda iyi çalışır. Bununla birlikte, volkanların da içinde bulunduğu çoğunlukla doğal arazilerde, parlak yansıtıcılar azdır ve referans PS piksellerin yoğunluğu yakın aralıklı bir referans ağını oluşturmak için genellikle çok düşüktür. İkinci sınırlama, deformasyondaki zamansal değişim için yaklaşık bir modele ihtiyaç duyulmasıdır. Bu yaklaşık model ile deformasyon sinyali atmosferik, topografik ve diğer faz hatalarından izole edilir. Deformasyonun zamana bağımlılığı genellikle çalışmadan önce bilinmediğinden, genellikle yaklaşık olarak sabit veya doğada periyodik olarak kabul edilir. Eğer PS pikselleri tanımlanabilirse, ilk parametrik modelden sapmalar faz kalıntılarında (residuals) tahmin edilebilir (Ferretti vd., 2000; Colesanti vd., 2003; Kampes, 2005). Pikseller, ancak modelden sapmalar yeterince küçük olduğunda faz açma güvenilirdir (Hooper vd., 2007).

Hooper vd. (2004) tarafından, bütün bu olumsuzlukları ortadan kaldırmak için Stanford Yöntemi (StaMPS: Stanford Method for PS) geliştirilmiştir. İlerleyen paragraflarda hem Stanford yöntem adımları hem de bu yöntemin diğer geleneksel InSAR süreçlerinden farklılık gösteren kısımları kısaca aktarılacaktır.

Zamansal modele dayanan PS sistemlerinde, genellikle, en azından 25 interferograma ihtiyaç duyulur. StaMPS kullanılarak, 12 interferogramla tutarlı sonuçlar alınabilmektedir. PS noktalarını tespit etmedeki sınırlayıcı faktör, yüksek SNR ve bakış açısı hatasının (look angle error) tahmin doğruluğudur. İnterferogramların sayısı arttıkça, tahmini bakış açısı hatasının ve bundan dolayı tahmini deformasyon sinyalinin doğruluğu artar. Bu sebeple, mümkün olduğunca fazla görüntünün kullanılması arzu edilir (Hooper vd., 2007).

Stanford yönteminde, tek bir birincil (master) görüntüye göre, $N+1$ görüntü kullanılarak N interferogram oluşturulur. Birincil görüntünün amacı, tüm interferogramların toplam korelasyonunu (Eşitlik 4.15) arttırmaktır. Toplam korelasyon (ρ), zaman aralığı (T), dik baz uzunluğu (B_{\perp}), Doppler centroiddeki farklılık (F_{DC}) ve termal gürültüyle çözülür (Hooper vd., 2007).

$$\rho_{\text{topl}} = \rho_{\text{zamansal}} \cdot \rho_{\text{konumsal}} \cdot \rho_{\text{doppler}} \cdot \rho_{\text{termal}} \quad (4.15)$$

Çözünürlüğü kabalaştırabileceğinden dolayı, menzilde veya azimutta, herhangi bir spektral filtre uygulanmaz. Genel olarak, çözünürlük ne kadar iyi olursa, her bir çözünürlük

hücrelerinde daha az yansıtıcı bulunacak ve hücrenin bir yansıtıcı tarafından domine edilme şansı o kadar fazla olacaktır.

Bazı interferogramlar normalden daha büyük olan dik baz uzunluğu ve doppler ayrımı değerine sahiptir. Korelasyonu azaltması nedeniyle, bu problemi önlemek için, iyi korelasyona sahip görüntü çiftlerini kullanan bir bağdaştırma (coregistration) algoritması geliştirilmiştir.

Ham interferogramlar, uyduların farklı noktalardan edindiği birincil ve ikincil görüntülere bağlı bir geometrik faz terimi içerirler. Bu geometrik faz iki adımda düzeltilir. Bu adımlardan ilki, interferogramların düzleştirilmesidir. Yansıtıcı yüzeyi bir referans elipsoid üzerinde uzanmış gibi her pikselin fazı düzeltilerek interferogramlar düzleştirilir. Daha sonra, bir SYM radar koordinat sistemine dönüştürülerek, gerçek yüzeyin referans elipsoitten sapması sebebiyle faz tahmin edilir. Bu işlemde bakış açısı hatası (look angle error) ve sapma açısı hatası (squint angle error) olmak üzere iki hata terimi ortaya çıkmaktadır.

Son olarak, yörünge parametrelerini ve sayısal yükseklik modelleri (SYM) kullanarak coğrafi kodlama (geocoding) işlemi ile her bir pikselin konumu tahmin edilir.

İnterferogram oluşturulduktan sonra faz stabilite tahmini yapılır. Genlik analizi ile, PS pikseli olma ihtimali en düşük olanlar çıkarılarak, bir piksel alt kümesi oluşturulur. Daha sonra, bu piksellerin faz stabilitesi bir iterasyon serisi ile tahmin edilir. Son olarak, genlik analizi sırasında çıkarılan piksellerin faz stabilitesi, isteğe bağlı bir adım sayesinde tahmin edilebilir.

Her pikselin faz stabilitesi için yapılan tahminlerden sonra, PS pikseli olması en muhtemel olanlar bir eşik değer yardımıyla seçilir. PS pikseli seçiminin ardından yer değiştirme tahmini yapılır. En uygun PS piksellerini seçtikten sonra, diğer bütün PS pikselleri çıkarılır ve orjinal sarılmış interferogram fazına geri dönülür. Deformasyona bağlı olan fazı almak için, faz açılmalıdır. Bu fazı açmak için bir strateji, her bir komşu (zaman içinde) interferogram çifti arasındaki faz farkını uzamsal olarak açmaktır (Hooper vd., 2004). Faz verisi üç boyutlu olduğundan dolayı, ikisi uzay ve biri zaman, Hooper ve Zebker (2007) tarafından tanımlanan üç boyutlu faz açma algoritmaları kullanılarak daha güvenilir sonuçlar elde edilebilir (Hooper vd., 2007).

4.4. InSAR Uygulamaları İçin Geliştirilmiş Yazılımlar

InSAR uygulamaları için üniversitelerin bilimsel amaçla geliştirdikleri ücretsiz yazılımların yanı sıra firmaların ve kişilerin bilimsel veya ticari amaçlı olarak geliştirdikleri ücretli yazılımlar da bulunmaktadır. Yazılımların geliştirilme amaçları InSAR uygulamaları başlığı altında toplanmış olsa da her bir yazılımın özel olarak bir amacı bulunmaktadır. ESA tarafından geliştirilmiş olan SNAP yazılımı ile Sentinel-1 uydularına ait görüntüler rahatlıkla işlenebilmektedir. StaMPS/MTI yazılımı ile çok zamanlı interferometri (MTI) uygulamaları rahatlıkla yapılabilir. InSAR uygulamalarında kullanılan yazılımlar Tablo 5’de gösterilmiştir.

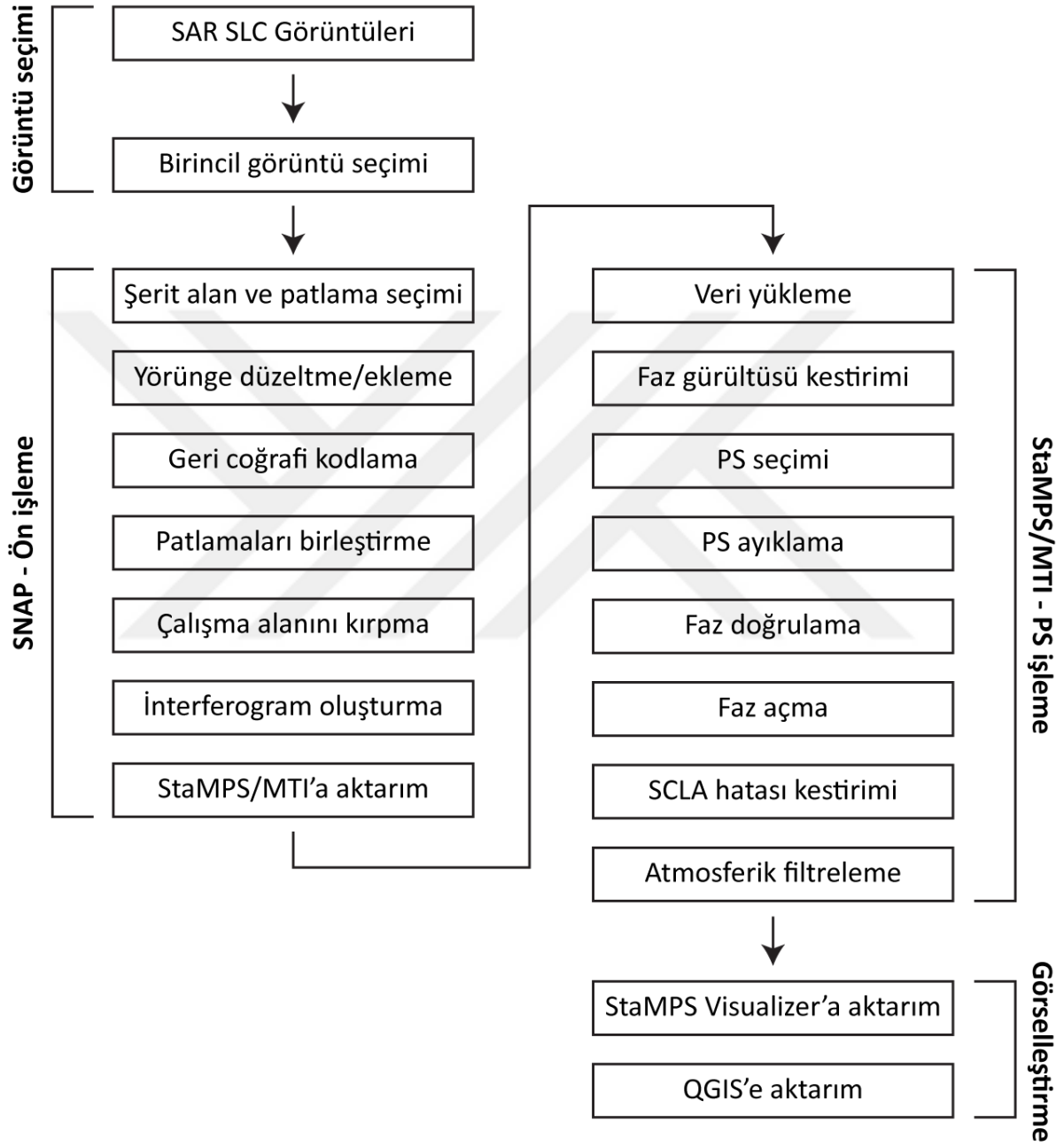
Tablo 5. SAR uygulamaları için geliştirilmiş yazılımlar (Comut (2016)’dan değiştirilerek)

Yazılım	Kullanım	Üniversite / Şirket / Kişi	Standart DInSAR Yeteneği	MTI Yeteneği
DORIS	Genel	Delft Teknoloji Üniversitesi	+	-
ROI_PAC	Genel	Cornell Üniversitesi	+	-
NEST	Genel	ESA	+	-
GMTSAR	Genel	ConocoPhillips, NCFGP, SDSU, SCRIPPS	+	-
Adore_doris	Genel	Miami Üniversitesi	+	-
π _rate	Genel	Leeds Üniversitesi	+	-
Imagine SAR	Ticari	ERDAS/DLR	+	-
RAT	Genel	Berlin Teknik Üniversitesi	+	-
Diapason	Ticari	CNES	+	-
viStaMPS	Genel	UTAD	+	-
SNAP	Genel	ESA	+	+
StaMPS/MTI	Genel	Delft Teknoloji Üniversitesi	+	+
EarthView	Ticari	MDA	+	+
SARscape	Ticari	Harris Geo. Sol.	+	+
GAMMA	Ticari	GAMMA Remote Sensing	+	+
DePSI	Genel	Delft Teknoloji Üniversitesi	+	+
SARPROZ	Ticari	Kişi: D. Perissin	+	+

5. YAPILAN ÇALIŞMALAR

PSInSAR tekniğini kullanarak, heyelanların tespit edilmesi ve izlenmesi ile ilgili yapılan bütün çalışmalara bu bölümde kısaca değinilecek, ancak ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

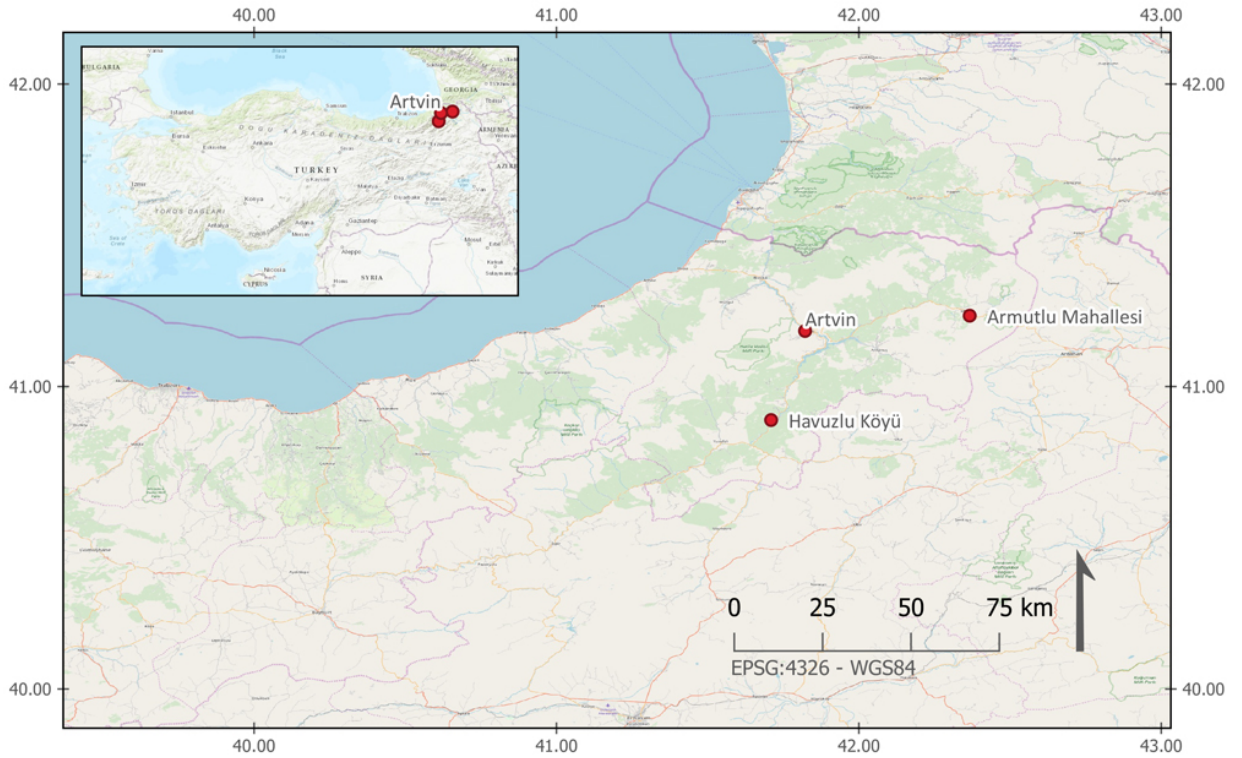
Çalışmaya başlamak için öncelikli olarak bir tarih aralığı seçilmiş ve bu tarih aralığında Sentinel-1A uydusu ile edinilmiş olan C-Band SAR görüntüleri derlenmiştir. Derlenen bu görüntüler arasından bir adet birincil görüntü seçilerek ön işleme olarak adlandırılan (Şekil 16) bölüme geçilmiştir. Bu bölümde, görüntüler üzerinde yörünge düzeltme, coğrafi kodlama ve interferogram oluşturma gibi işlemler uygulanmıştır. Bu işlemlerin sonucunda elde edilen veri, bir sonraki bölüm olan PS işleme adımında kullanılmak üzere dışa aktarılmıştır. PS işleme adımları ise faz gürültüsü kestirimi ile başlayıp, PS seçimi, PS ayıklama, faz açma ve konumsal olarak korelasyonlu bakış açısı (SCLA) kestirimi gibi işlemlerden geçtikten sonra tamamlanmıştır. Daha sonra elde edilen çıktı veriler metin editörleri yardımıyla düzenlenip analiz edilmiş ve görselleştirilmiştir. İşlemler sonucunda yersel ölçü verileri ile doğruluk kıyaslaması yapılmış ve çalışmalar sonlandırılmıştır. Bütün yapılan çalışmaları içeren iş akış şeması Şekil 16'da verilmiştir.



Şekil 16. Çalışma iş akış şeması

5.1. Çalışma Alanı

Tez kapsamında iki farklı heyelanlı alan çalışılmıştır. Çalışma alanlarının ikisi de Artvin il sınırları içerisinde bulunmaktadır. İlk çalışma alanı Şavşat ilçe merkezinde bulunan Armutlu Mahallesinin kuzey kesimidir. Yerleşim alanlarına yaklaşık olarak 50-100 metre uzaklıkta yer almaktadır. 1988 yılında İller Bankası tarafından (Melek, 1988) aktif ve muhtemel heyelan bölgesi olarak belirlenmiştir. 2015 yılında çalışma alanı tekrar çalışılmış (Ozkan vd., 2015), heyelan aktivitesi ve mekanizmasının ayrıntılı olarak değerlendirilmesine yönelik Ayrıntılı Jeoteknik Etüt Gerektiren Alan (AJE) olarak belirlenmiş, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Mekansal Planlama Genel Müdürlüğü tarafından onaylanmıştır. Son olarak 2018 yılında tekrar çalışılarak (Kırbaşoğlu ve Yağız, 2018) Uygun Olmayan Alan (UOA) olarak yerleşime uygunluğu değerlendirilmiş olup Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Mekansal Planlama Genel Müdürlüğü tarafından onaylanmıştır. Heyelan aktivitesi ve alanda yapılan birçok çalışma olması sebebiyle çalışma alanı olarak seçilmiştir.



Şekil 17. Çalışma alanlarının coğrafi konumu

İkinci çalışma alanı, Artvin ilinin Yusufeli ilçesine bağlı olan Havuzlu Köyüdür. Havuzlu Köyü, Yusufeli ilçe merkezinin yaklaşık olarak 16 kilometre kuzeydoğusunda bulunmaktadır. Artvin Çoruh Enerji Planı kapsamındaki Artvin Barajı rezervuar alanı

içerisinde kalan Havuzlu Köyü, heyelan aktivitesi nedeniyle kamulaştırılarak boşaltılmıştır. Köy boşaltıldıktan sonra yersel ölçü yöntemleri ile hareket izlenmektedir. Havuzlu köyünün heyelan aktivitesi nedeniyle boşaltılması ve heyelanın izlenmesi sebebiyle çalışma alanı olarak seçilmiştir.

5.2. Çalışmalarda Kullanılan Veriler ve Yazılımlar

PSInSAR tekniğinin uygulanabilmesi için, ilk olarak, izlenmesi düşünülen hareketin tarih aralığını içeren SAR görüntülerinin temin edilmesi gerekmektedir. Çeşitli SAR uyduları tarafından elde edilen bu görüntüler, bilimsel veya ticari amaçlı kullanılmak üzere çeşitli platformlardan dağıtılmaktadır. Tez kapsamında kullanılan Sentinel-1 uydu sistemine ait görüntüler (Tablo 6), Copernicus'a ait Copernicus Açık Erişim Merkezi'nden (Copernicus Open Access Hub) (URL-13, 2018) ve Alaska Uydu Tesisi'nin (ASF) veri portalı olan Vertex'den (URL-14, 2018) sağlanmıştır.

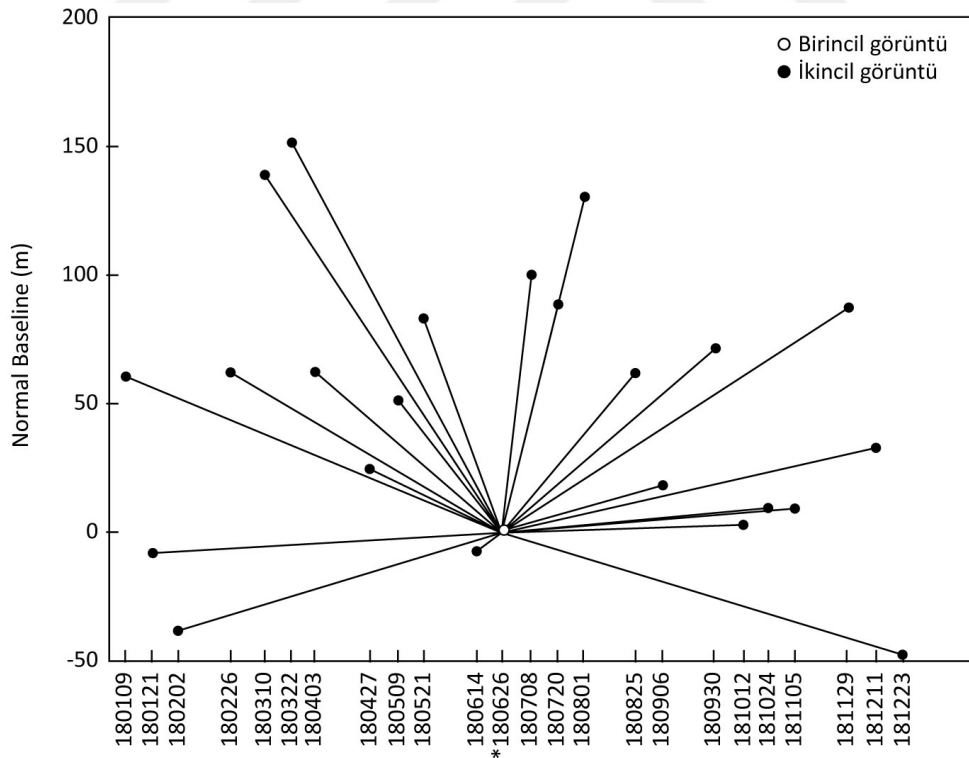
PSInSAR tekniği ile uygulanan birçok yöntemin olduğuna daha önceden değinmiştik (Tablo 4). Hazırlanan tez kapsamında PSInSAR tekniği Stanford Yöntemi kullanılarak uygulanmıştır. Stanford Yöntemi'ni uygulayan StaMPS/MTI (Hooper vd., 2012), ana yazılım olarak kullanılmıştır. StaMPS/MTI yazılımı, LINUX ortamında MATLAB yazılımı ile entegre çalışmaktadır.

Stanford Yöntemi ile PSInSAR tekniğini uygulayabilmek için görüntülerin birtakım ön işleme adımlarından geçmesi gerekmektedir. Ön işleme adımları, ISCE, SNAP, GAMMA gibi yazılımlar tarafından yapılabilmektedir. Tez kapsamında ön işleme adımları için SNAP yazılımı tercih edilmiştir. SNAP yazılımı, ESA tarafından Sentinel uydu görüntülerini kullanmak ve işlemek için geliştirilen bir yazılımdır.

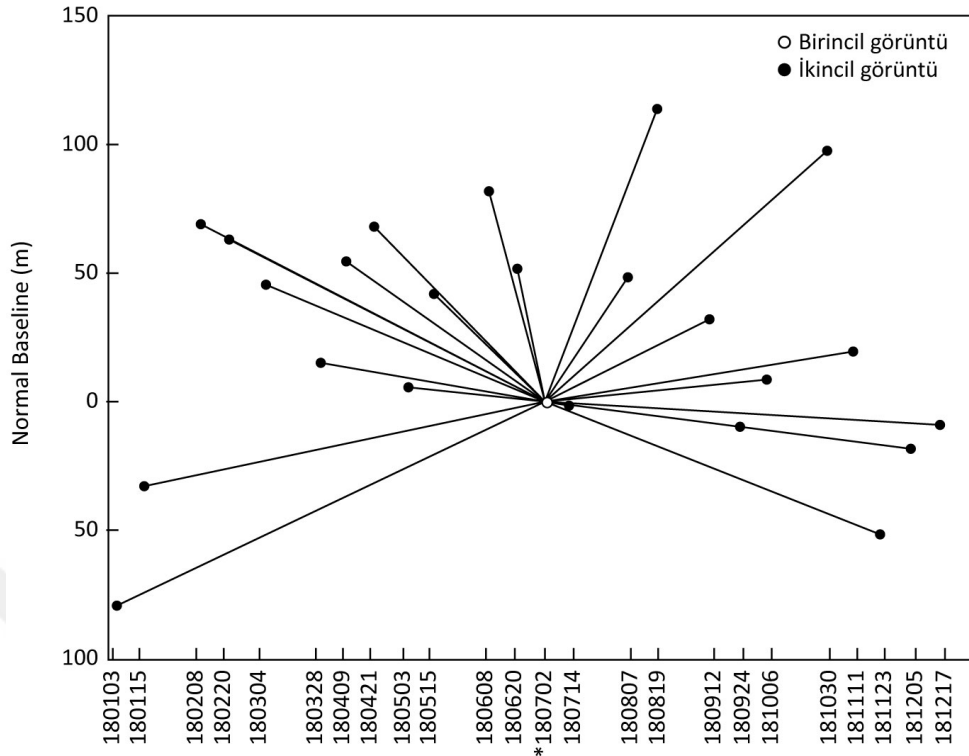
StaMPS/MTI yazılımında elde edilen sonuçlar ilk olarak StaMPS Visualizer (Höser, 2018) yazılımında görüntülenmiştir. Sonuçların tutarlı olduğu görüldükten sonra, sonuç verileri LibreOffice yazılımı ile düzenlenip coğrafi bilgi sistemleri yazılımı olan QGIS yazılımına aktarılmıştır. Sonuç verileri QGIS yazılımında detaylı olarak analiz edilmiş ve görselleştirilmiştir. Zaman serilerini görebilmek için PS Time Series Viewer adlı QGIS eklentisi kullanılmıştır.

5.3. Görüntü Seçimi ve Ön İşleme Adımları

Aynı uçuş yönündeki (yükselen veya alçalan) görüntüler arasından aynı çerçeve numarasına sahip görüntüler, incelenecek zaman aralığını yansıtacak şekilde ve incelenecek alanı kapsayacak şekilde belirlendikten sonra bu görüntüler arasından bir adet birincil (master) görüntü seçilmiştir. Birincil görüntü seçilirken zamansal baz uzunluğu ön planda tutulur. Birincil görüntünün diğer bütün ikincil (slave) görüntülerin zamansal baz uzunluğu anlamında ortasında olmasına dikkat edilir. Ayrıca, görüntünün elde edildiği günlerde yağışın olmaması sonuçları olumlu yönde etkilemektedir. Bu sebeple, birincil görüntü olabilecek görüntüler yağış durumuna göre tekrar değerlendirilmiş ve aralarından en uygunu olanı seçilmiştir. PSInSAR tekniğinde, farklı yöntemlere göre birçok grafik kullanılmaktadır. Bu grafiklere göre sonucu doğrudan etkileyecek olan interferogramlar oluşturulduğundan dolayı, tekniğin uygulanması açısından önemli bir aşamadır. SBAS, QPS gibi diğer yöntemlerde MST, Full Graph, Small Temporal Baselines gibi grafikler kullanılmakta olup, Stanford Yöntemi için yıldız grafik (Star Graph) (Şekil 18 ve 19) kullanılmaktadır.



Şekil 18. Armutlu Mahallesinde uygulanan PSInSAR tekniğinde birincil ve ikincil görüntülerin zamana göre dağılımlarını ve baz uzunluklarını gösteren yıldız grafik



Şekil 19. Havuzlu Köyünde uygulanan PSInSAR tekniğinde birincil ve ikincil görüntülerin zamana göre dağılımlarını ve baz uzunluklarını gösteren yıldız grafik

Birincil görüntü seçildikten sonra, çalışma alanının içinde bulunduğu alt şerit alanları ve patlamaları belirlemek için SNAP yazılımında görüntüler açılır. TOPSAR tekniği kullanılarak, çalışma alanının içinde bulunduğu alt şerit alanlar ve patlamalar bütün görüntü içerisinde çıkarılır ve yeni bir görüntü oluşturularak farklı kaydedilir. Bu sayede sadece çalışılacak alana odaklanılmış olur. Ayrıca, oluşturulan yeni görüntü daha az hücreye sahip olduğundan dolayı sonraki işlem adımlarının süresi de kısalmış olur.

Hassas yörünge verilerinin hesaplanması zaman alıcı bir işlem olduğundan dolayı SAR uydu görüntülerinin çoğunda hassas yörünge verileri bulunmaz ya da doğru değildir. Görüntünün üretilmesinden sonraki haftalarda hazır olan (Sentinel-1 görüntüleri için bu süre yaklaşık olarak iki haftadır.) hassas yörünge verilerinin görüntüye uygulanması gerekmektedir. Bu nedenle, kullanılacak bütün görüntülere hassas yörünge verileri uygulanmıştır.

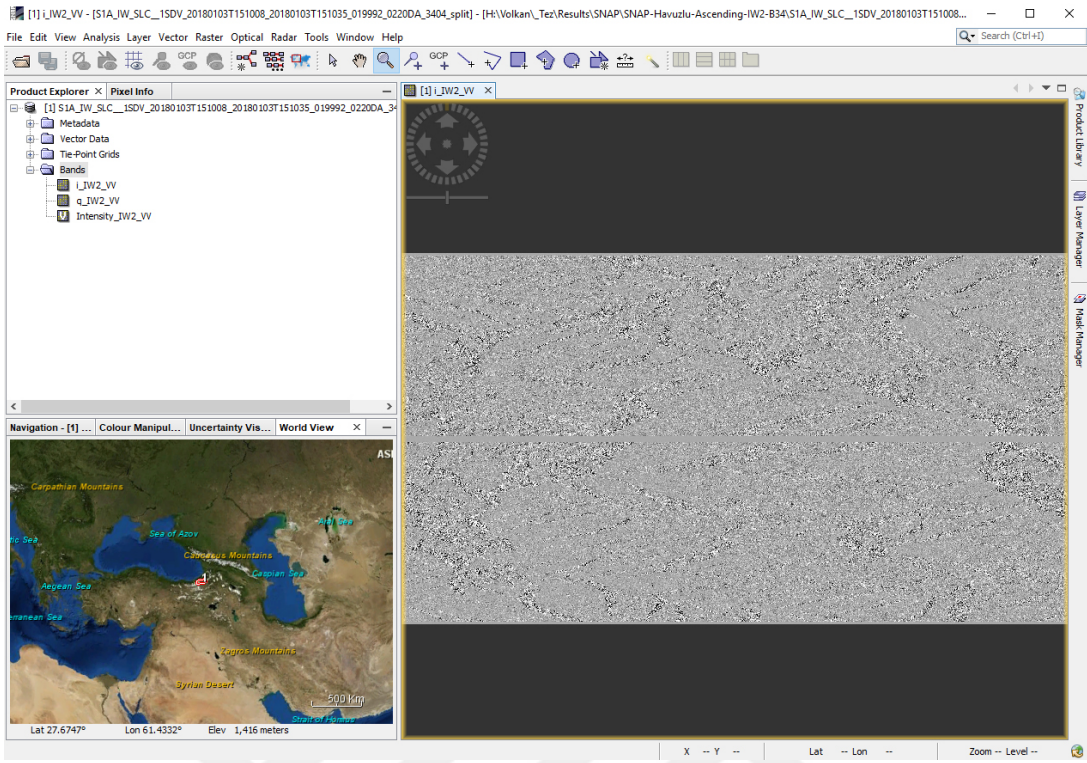
Hassas yörünge verilerinin uygulandığı görüntülere geri coğrafi kodlama (Back Geocoding) uygulanarak bütün görüntüler bir yığın haline getirilir. Bu işlem, görüntülerin yörünge bilgilerini ve bir sayısal yükseklik modelini (SYM) kullanarak, birincil ve ikincil

Tablo 6. Çalışmalarda kullanılan görüntüler. Armutlu heyelan sahası için alçalan, Havuzlu heyelan sahası için yükselen yörünge görüntüleri kullanılmıştır. Birincil görüntüler yıldız (*) sembolüyle işaretlenmiştir.

Aramutlu (Alçalan yörünge)					Havuzlu (Yükselen yörünge)				
Tarih	Sensör	Çerçeve (İz)	Yörünge	Btemp (gün)	Tarih	Sensör	Çerçeve (İz)	Yörünge	Btemp (gün)
2018-01-09	S-1A	456	20072	168	2018-01-03	S-1A	145	19992	180
2018-01-21	S-1A	456	20247	156	2018-01-15	S-1A	145	20167	168
2018-02-02	S-1A	456	20422	144	2018-02-08	S-1A	145	20517	144
2018-02-26	S-1A	456	20772	120	2018-02-20	S-1A	145	20692	132
2018-03-10	S-1A	456	20947	108	2018-03-04	S-1A	145	20867	120
2018-03-22	S-1A	456	21122	96	2018-03-28	S-1A	145	21217	96
2018-04-03	S-1A	456	21297	84	2018-04-09	S-1A	145	21392	84
2018-04-27	S-1A	456	21647	60	2018-04-21	S-1A	145	21567	72
2018-05-09	S-1A	456	21822	48	2018-05-03	S-1A	145	21742	60
2018-05-21	S-1A	456	21997	36	2018-05-15	S-1A	145	21917	48
2018-06-14	S-1A	456	22347	12	2018-06-08	S-1A	145	22267	24
2018-06-26*	S-1A	456	22522	0	2018-06-20	S-1A	145	22442	12
2018-07-08	S-1A	456	22697	-12	2018-07-02*	S-1A	145	22617	0
2018-07-20	S-1A	456	22872	-24	2018-07-14	S-1A	145	22792	-12
2018-08-01	S-1A	456	23047	-36	2018-08-07	S-1A	145	23142	-36
2018-08-25	S-1A	456	23397	-60	2018-08-19	S-1A	145	23317	-48
2018-09-06	S-1A	456	23572	-72	2018-09-12	S-1A	145	23667	-72
2018-09-30	S-1A	456	23922	-96	2018-09-24	S-1A	145	23842	-84
2018-10-12	S-1A	456	24097	-108	2018-10-06	S-1A	145	24017	-96
2018-10-24	S-1A	456	24272	-120	2018-10-25	S-1A	145	24862	-156
2018-11-05	S-1A	456	24447	-132	2018-10-30	S-1A	145	24367	-120
2018-11-29	S-1A	456	24797	-156	2018-11-11	S-1A	145	24542	-132
2018-12-11	S-1A	456	24972	-168	2018-11-23	S-1A	145	24717	-144
2018-12-23	S-1A	456	25147	-180	2018-12-17	S-1A	145	25067	-168

görüntüleri çakıştırır. Bu işlem sırasında, yazılım tarafından sunulan dijital yükseklik modelleri (ASTER, GDEM, SRTM vb.) ya da harici olarak başka bir dijital yükseklik modeli kullanılabilir. Sayısal yükseklik modelinin yeniden örnekleme metodu (DEM resampling) olarak en yakın komşu, bilinear, kübik, bikübik ve bisinc interpolasyonları arasından uygun olanı seçilir. Aynı interpolasyon yöntemleri yeniden örnekleme tipi olarak da seçilebilir. Bu işlem uygulanırken birincil görüntünün ilk sırada olmasına dikkat edilmelidir.

İnceleme alanı birden fazla patlamanın içinde yer alıyorsa, azimut-zaman sırasıyla elde edilmiş olan patlamaların arasındaki siyah dolgunun kaldırılması gerekmektedir. Her patlamanın başlangıcında ve bitiminde bir sonraki veya bir önceki patlama ile çakışan ortak bir alan vardır. S1 TOPSAR tekniği ile çakışan ortak alanlardan yararlanılarak, patlamalar arasındaki siyah dolgu kaldırılır ve yeni görüntü oluşturulur.



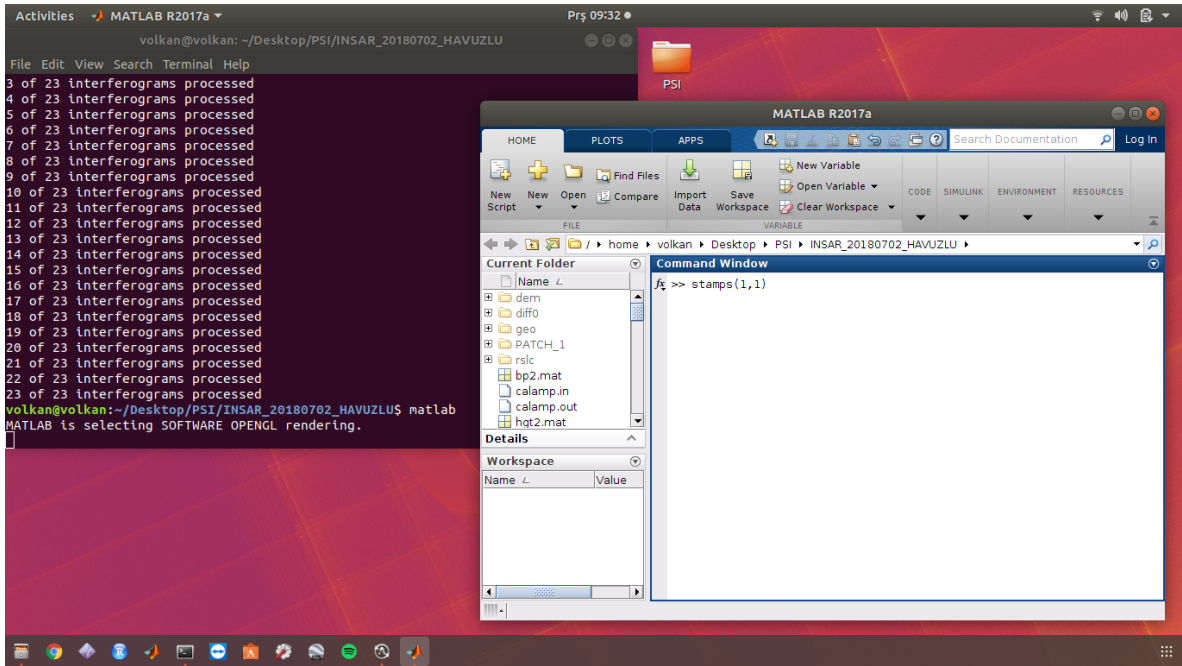
Şekil 20. SNAP yazılımında açılmış Sentinel-1A uydusu tarafından edinilen SAR görüntüsüne ait ekran alıntısı

Oluşturulan yeni görüntünün bir kenarı alt şerit alanının uzunluğunda ve diğer kenarı ise kullanılan patlamaların uzunluğundadır. Bu görüntü içerisinde, incelenecek alan kırpılır. Bu işlem subset aracı ile uygulanır.

Görüntü kırıldıktan sonra interferogramın hesaplanması adımına geçilir. İnterferogram, düz yeryüzü fazı çıkarılarak ya da çıkarılmadan hesaplanır. Bütün işlemler sonucunda elde edilen görüntü, StaMPS/MTI yazılımında kullanılmak üzere dışa aktarılır.

5.4. PS İşleme Adımları

Ön işleme adımının ardından StaMPS/MTI yazılımı kullanılarak PS işleme adımına başlanır. Genlik dağılımı, menzilde ve azimutta kaç parça halinde çalışılacağı gibi değerler belirlenir. StaMPS/MTI, MATLAB programlama dilinde yazılmış kodlar içeren bir yazılım olduğundan ötürü MATLAB başlatıldıktan sonra, StaMPS/MTI yazılımına ait kodlar çalıştırılır (Şekil 21).



Şekil 21. StaMPS/MTI yazılımına ait ekran görüntüsü

StaMPS/MTI yazılım kılavuzunda (Hooper vd., 2018) anlatılan PS işleme adımları aşağıdaki paragraflarda da verilmiştir.

Veri yükleme: Veriler PS işleme için belirli formatlara çevrilir ve MATLAB çalışma alanında saklanır.

Faz gürültüsü kestirimi: Sonraki adımda, interferogramlardaki aday piksellerin faz gürültüsü iteratif olarak tahmin edilir. Bu aşamada SYM hatası yüksek olan pikselleri elemek için bir eşik değeri kullanılabilir. Ayrıca, aday pikseller, konumsal olarak korelasyonlu fazı belirlemek için bir gride göre yeniden örneklenirler. Bu işlem için grid boyutu (metre) tanımlanabilir ve ağırlıklandırma yöntemi (P square veya SNR) seçilebilir. Bu işlemin kaç iterasyon sonunda bitirileceği de kullanıcı tarafından seçilebilir.

PS seçimi: Tahmin işleminin ardından, PS pikselleri gürültü özelliklerine göre seçilir.

Bu işleme varsayılan olarak bütün interferogramlar dahil edilir ancak kullanıcı istediği interferogramları dahil etmeyebilir.

PS ayıklama: Seçilen PS pikselleri, komşu yer çözünürlük elemanlarından gelen sinyal katkıları ve çok gürültülü sayılanlar sebebiyle ayıklanır. Bu aşamada, faz gürültüsüne ait standart sapma bütün pikseller için hesaplanır. Bir eşik değeri kullanılarak, standart sapması eşik değerden yüksek olanlar elenir. Aynı işlem, interferogramlardaki her piksel için hesaplanan gürültü için de geçerlidir. Belirlenen bir eşik değeri ile, gürültüsü eşik değerden yüksek olan pikseller elenir. PS seçiminde olduğu gibi, bu işleme kullanıcı istediği interferogramları dahil etmeyebilir.

Faz doğrulama: Seçilen piksellerin sarılı fazı (the wrapped phase), konumsal olarak korelasyonsuz bakış açısı (SULA) hatası için düzeltilir. İncelenen alan parçalar halinde çalışılmışsa, bu parçalar birleştirilir. Sarılı faz bu aşamadan sonra görüntülenebilmektedir.

Faz açma: Daha sonra faz açma metodu seçilerek, faz açma işlemi gerçekleştirilir. Bu aşamada, faz açma metodu, Goldstein filtesi için pencere büyüklüğü ve işleme kullanıcının dahil etmek istemediği interferogramlar seçilebilir.

SCLA hatası kestirimi: 3. adımda hesaplanan konumsal olarak korelasyonsuz bakış açısı (SULA) hatası, 5. adımda kaldırılır. 7. adımda ise neredeyse sadece konumsal olarak korelasyonlu SYM hatasından kaynaklanan konumsal olarak korelasyonlu bakış açısı (SCLA) hatası hesaplanır. Birincil atmosfer ve yörünge hatası (AOE) fazı aynı anda tahmin edilir. Konumsal olarak korelasyonlu SYM hatası, SYM'nin kendisindeki hatayı ve SYM'nin radar koordinatlarına yanlış eşleştirilmesini içerir.

Atmosferik filtreleme: İsteğe bağlı olan son aşamada aykırı değerlerin filtrelenmesi istenen (Comut, 2016) durumlarda uygulanan atmosferik filtrelemedir.

Bu çalışmada PSInSAR tekniği uygulanırken ön işleme ve PS işleme adımları sırasında kullanılan önemli parametreler, Höser (2018) tarafından yapılan çalışmada olduğu gibi, tablo halinde hazırlanarak Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Çalışmalar sırasında SNAP ve StaMPS/MTI yazılımlarında kullanılmış olan önemli parametre değerleri

Yazılım	Parametre Açıklaması	Parametre	Armutlu	Havuzlu
SNAP	SYM Adı (geri coğrafi kodlama ve interferogram oluşturma)	Back-Geocoding and Interferogram Formation	SRTM 3 Sec	SRTM 3 Sec
SNAP	SYM yeniden örnekleme metodu (geri coğrafi kodlama)	Back-Geocoding -DEM Resampling Method	Bilinear Interpolation	Bilinear Interpolation
SNAP	SYM yeniden örnekleme tipi (geri coğrafi kodlama)	Back-Geocoding - Resampling Type	Bilinear Interpolation	Bilinear Interpolation
SNAP	Düz yeryüzü fazı çıkarımı	Interferogram Formation - Subtract Flat Earth Phase	Kullanıldı	Kullanıldı
SNAP	Düz yeryüzü polinom derecesi	Interferogram Formation - Degree of Flat Earth Polynomial	5	5
SNAP	Yörünge interpolasyon derecesi	Interferogram Formation - Orbit Interpolation Degree	3	3
SNAP	Topografik faz çıkarımı	Interferogram Formation - Subtract Topographic Phase	Kullanıldı	Kullanıldı
StaMPS/MTI	Grid piksel boyutu	filter grid size	15	15
StaMPS/MTI	Faz sıçraması kestirimi	scla deramp	y	y
StaMPS/MTI	Faz açma metodu	unwrap method	3D	3D
StaMPS/MTI	Gridler arası boşluk	unwrap grid size	200	200
StaMPS/MTI	Goldstein filtresi için pencere boyutu	unwrap gold n win	32	32
StaMPS/MTI	Goldstein filtresi için α değeri	unwrap gold alpha	0.8	0.8
StaMPS/MTI	Referans noktası (Boylam/Enlem)	ref centre lonlat	42.361860 41.247810	41.716260 40.885728
StaMPS/MTI	Referans noktası yarıçapı	ref radius	1	20
StaMPS/MTI	Seçilen referans nokta sayısı	ref point	1	1

5.5. Armutlu Mahallesi Heyelanının PSInSAR Tekniği ile Belirlenmesi

Armutlu Mahallesi, Şavşat ilçe merkezinde bulunmaktadır. Çalışmalar kapsamında incelenen alan Armutlu Mahallesinin kuzey kısmında kalmaktadır. İnceleme alanındaki ilk çalışma 1988 yılında gözlemsel olarak yapılmıştır. 16 Haziran 1988 tarihinde onaylanan bu çalışma ile çalışma alanı, "İller Bankası" tarafından "Aktif ve Muhtemel Heyelan Bölgesi" olarak değerlendirilmiştir (Melek, 1988).

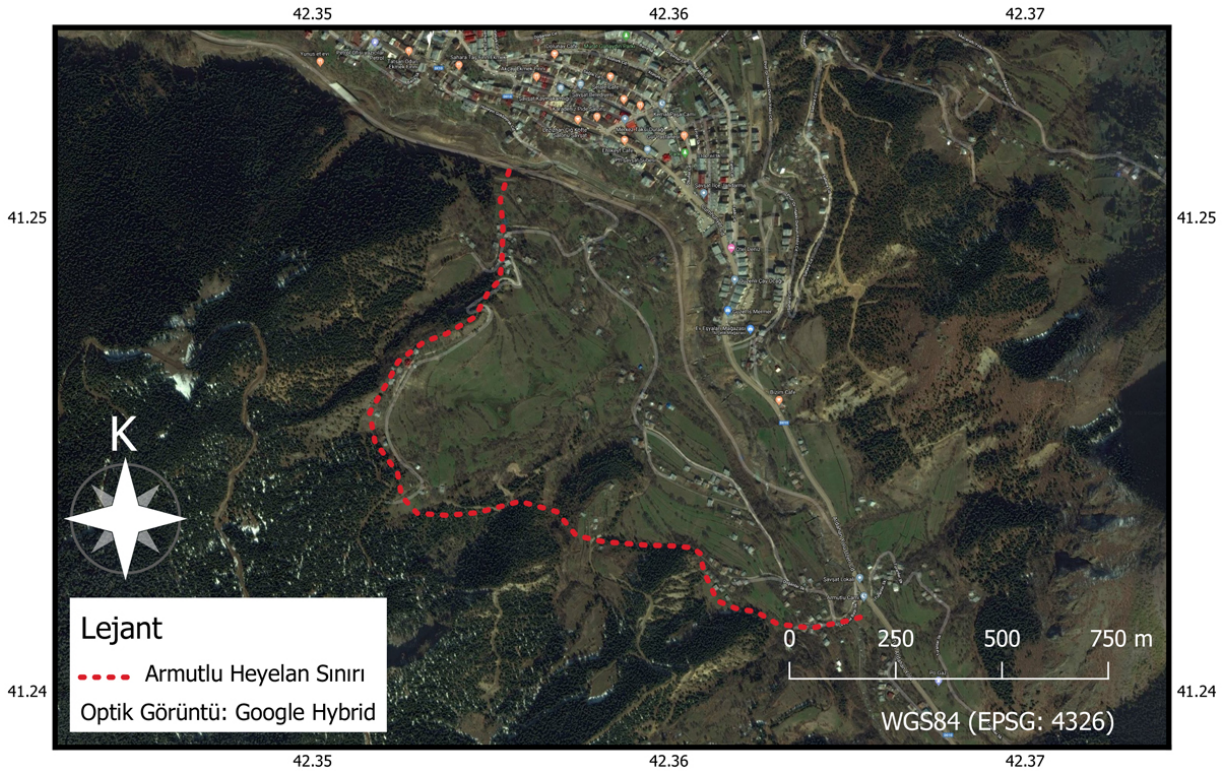


Şekil 22. Armutlu çalışma sahasının uzaktan görünümü

2015 yılında Şavşat ilçesinde imar planlarının yeniden düzenlenmek istenmesi sonucunda, planların hazırlanabilmesi için gerekli olan jeolojik-jeoteknik altlığa ihtiyaç duyulmuştur. Bu ihtiyacı karşılamak için "Şavşat (Artvin) İmar Planına Esas Jeolojik-Jeoteknik Etüt Raporu" hazırlanmıştır (Ozkan vd., 2015). Söz konusu bu raporda, Armutlu Mahallesinin kuzey kesimi "Ayrıntılı Jeoteknik Etüt Gerektiren Alan (AJE)" olarak değerlendirilmiş ve "Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Mekansal Planlama Genel Müdürlüğü" tarafından 28.08.2015 tarihinde onaylanmıştır. AJE olarak belirlenen bu alan için incelemelerin detaylı olarak yapılması planlanmış ve "Artvin İli Şavşat İlçesi Armutlu ve Yeniköy Mahallelerindeki AJE alanlarının İmar Planına Esas Jeolojik-Jeoteknik Etüt Raporu" hazırlanmıştır (Kırbaşoğlu ve Yağız, 2018). Hazırlanan bu son rapor sonucunda, çalışma alanının bir kısmı "Uygun Olmayan Alan" olarak ve bir kısmı "Önlemler Alan" olarak belirlenmiş ve 17.12.2018 tarihinde "Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Mekansal Planlama Genel

Müdürlüğü" tarafından onaylanmıştır.

İnceleme alanının jeolojisini rezidüel birimler ve Şavşat Formasyonu (Teş) oluşturmakta olup çalışma alanında yapılan jeolojik-jeoteknik çalışmalarda da (Kırbaşoğlu ve Yağız, 2018) Şavşat Formasyonu'na ait rezidüel birimler ve devamında Şavşat Formasyonu'na ait Eosen yaşlı kıltaşı, marn ve kumtaşı birimler gözlenmiştir. Sondajlarda, rezidüel birimin en az 4 metre ve en fazla 38 metre derinliğe kadar uzandığı, kayaç birimlerin 4 metre derinlikten itibaren bulunduğu tespit edilmiştir. Şekil 22'de Yeniköy Mahallesinden çekilmiş çalışma alanına ait fotoğraf, Şekil 23'de uydu görüntüsü üzerinde heyelan sınırı gösterilmiştir.

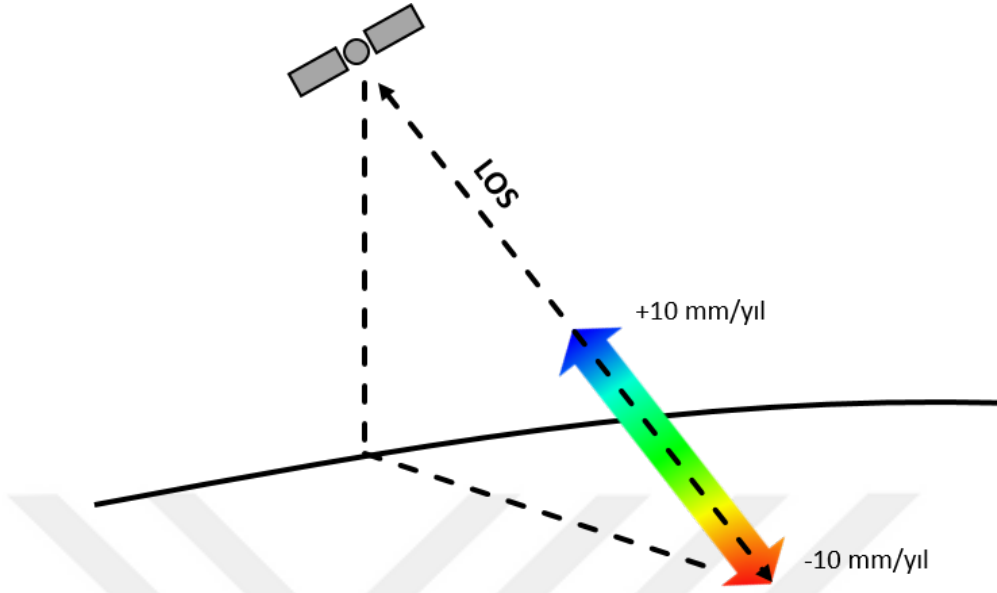


Şekil 23. Armutlu Mahallesiindeki heyelanlı bölge sınırı. Heyelan sınırı inceleme alanında daha önceden yapılmış çalışmalardan ve arazi gözlemlerinden yararlanılarak çizilmiştir

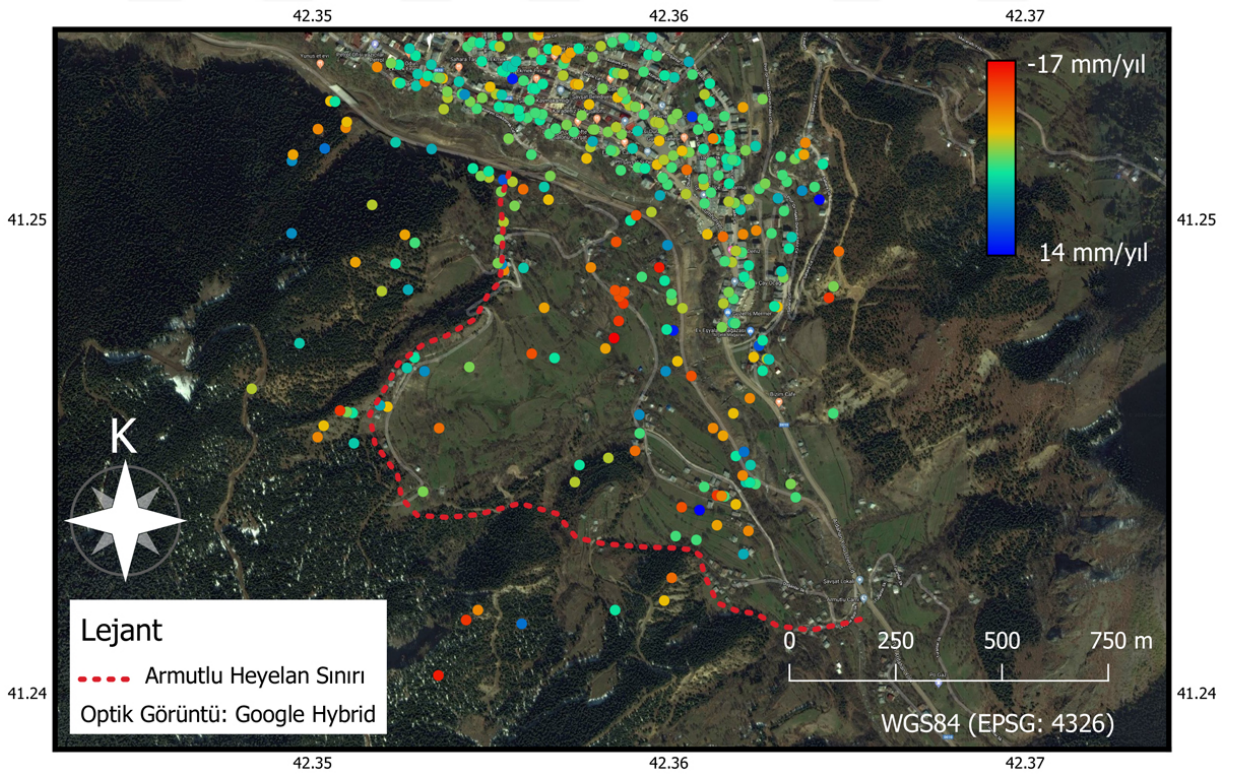
Alçalan yöreğe ait, VV polarizasyonlu 24 adet Sentinel-1A uydusuna ait SAR (C-band) görüntüsü (Tablo 6) kullanılarak PSInSAR tekniği inceleme sahasına uygulanmıştır. 2018-06-26 tarihli görüntü birincil görüntü olarak seçilmiştir. Çalışma sonucunda radarın bakış yönündeki yer değiştirmenin miktarı -27 ile 18 mm arasında hesaplanmış olup Şekil 25'de PS noktaları gösterilmiştir. Uygulama sırasında, SNAP ve StaMPS/MTI programlarında kullanılmış olan önemli parametre değerleri Tablo 7'de verilmiştir.

Çalışmalar sonucunda elde edilen + ve - değerler radarın bakış yönüne (LOS) göre yorumlanmalıdır. + yönlü hareket radara doğru yaklaşan yer değiştirmeyi, - yönlü hareket

radardan uzaklaşan yer değiştirmeyi ifade etmektedir (Şekil 24).



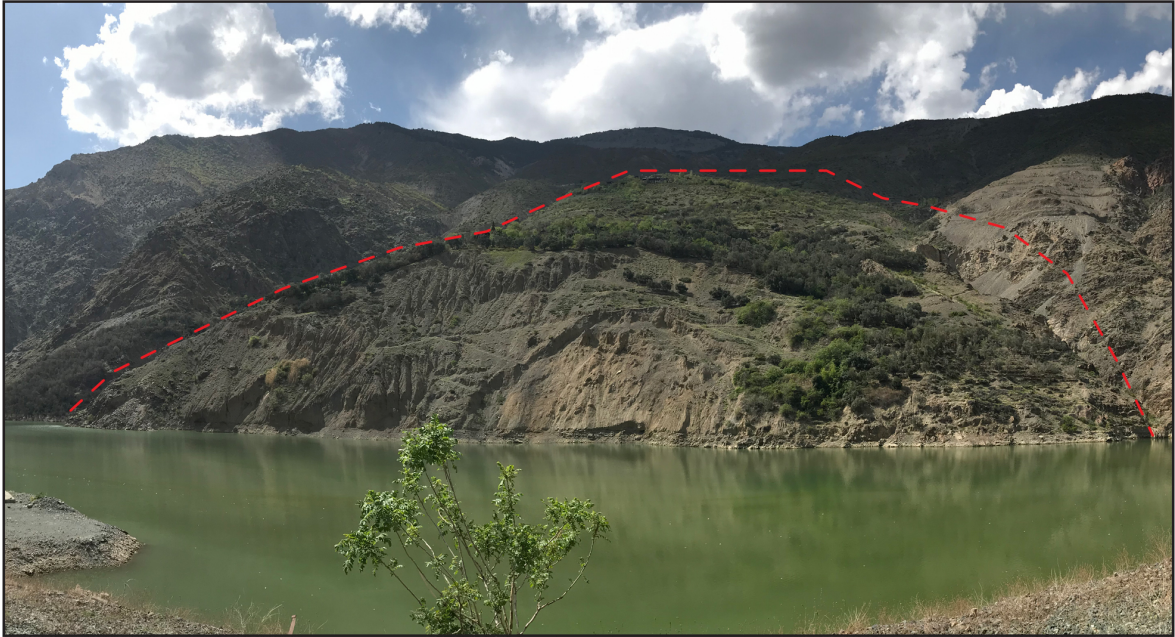
Şekil 24. Radarın bakış yönündeki (LOS) hareketin tanımlanması. Mavi renk radara yaklaşan yer değiştirmeyi, kırmızı renk radardan uzaklaşan yer değiştirmeyi ve yeşil renk stabil noktaları ifade etmektedir



Şekil 25. Armutlu Mahallesinde elde edilen PS noktaları

5.6. Havuzlu Köyü Heyelanının PSInSAR Tekniği ile Belirlenmesi

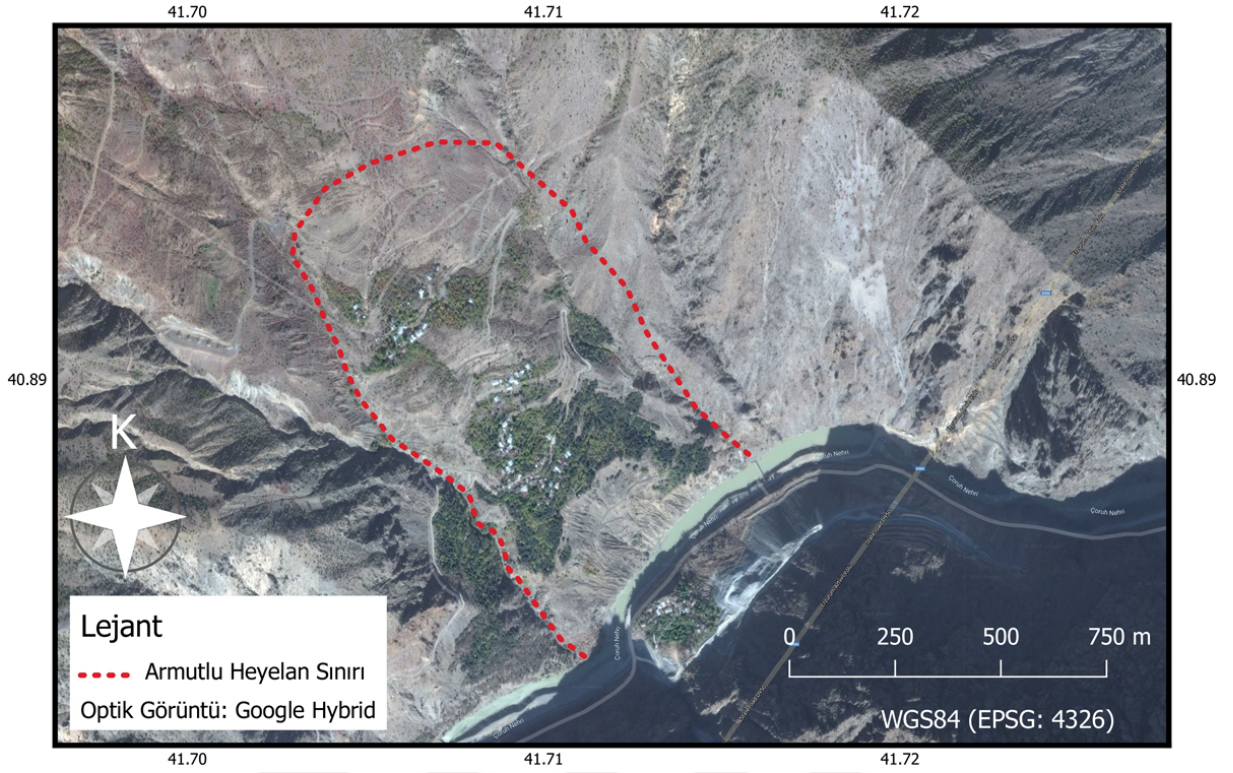
Artvin Barajı rezervuar alanında kalan Havuzlu heyelan bölgesi, ilk olarak Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİEİ) tarafından 1970’li yıllarda yapılan çalışmalarla tespit edilmiş ve Havuzlu Paleo-Heyelanı olarak tanımlanmıştır. 1990’lı yıllarda ise, Artvin Barajı faaliyete başlayınca heyelanın topuk kısmı su altında kalacağından ötürü, heyelanın hareket etmesiyle baraj rezervuar alanına dolacak malzemenin hacmini belirlemeye yönelik çalışmalar yapılması önerilmiştir. 2013-2014 yılları arasında detaylı jeoteknik bilgiye erişebilmek için sondajlı çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalarda kalınlığı 30-100 metre arasında değişen yamaç molozu ve devamında Mudurnu (andezit-bazalt ve piroklastları) ve Berta (metakumtaşı, metasilttaşı, kalkşist ve fillat) Formasyonu’na ait Liyas-Dogger yaşlı kayalar kesilmiştir. Daha sonra, heyelanın yanal ve düşey devamlılığını ve heyelan malzemesinin stabilitesini araştıran çalışmalar yapılmıştır (Ersoy vd., 2015).



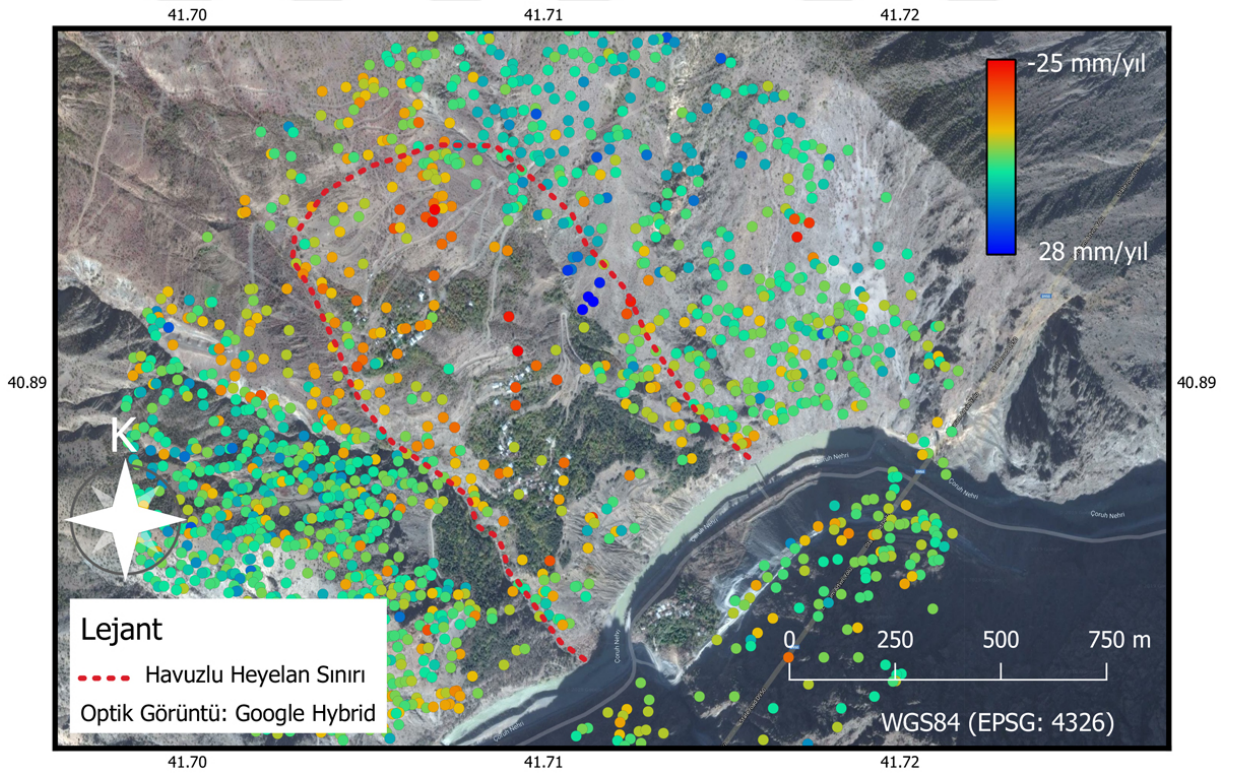
Şekil 26. Havuzlu çalışma sahasının uzaktan görünümü

Şekil 26’da Havuzlu Köyü çalışma alanının karşıdan çekilmiş fotoğrafı, Şekil 27’de uydu görüntüsü üzerinde heyelan sınırı gösterilmiştir.

Yükselen yörüngeye ait, VV polarizasyonlu 24 adet Sentinel-1A uydusuna ait SAR (C-band) görüntüsü (Tablo 6) kullanılarak PSInSAR tekniği inceleme sahasına uygulanmıştır. 2018-07-02 tarihli görüntü birincil görüntü olarak seçilmiştir. Çalışma sonucunda radarın bakış yönündeki yer değiştirmenin miktarı -25 ile 28 mm arasında hesaplanmış olup Şekil



Şekil 27. Havuzlu Köyündeki heyelanlı bölge sınırı. Heyelan sınırı inceleme alanında daha önceden yapılmış çalışmalardan ve arazi gözlemlerinden yararlanılarak çizilmiştir



Şekil 28. PSInSAR tekniği ile elde edilmiş olan PS noktaları

28’de PS noktaları gösterilmiştir.

Her iki uygulama sırasında, SNAP ve StaMPS/MTI programlarında kullanılmış olan önemli parametre değerleri Tablo 7’de verilmiştir.

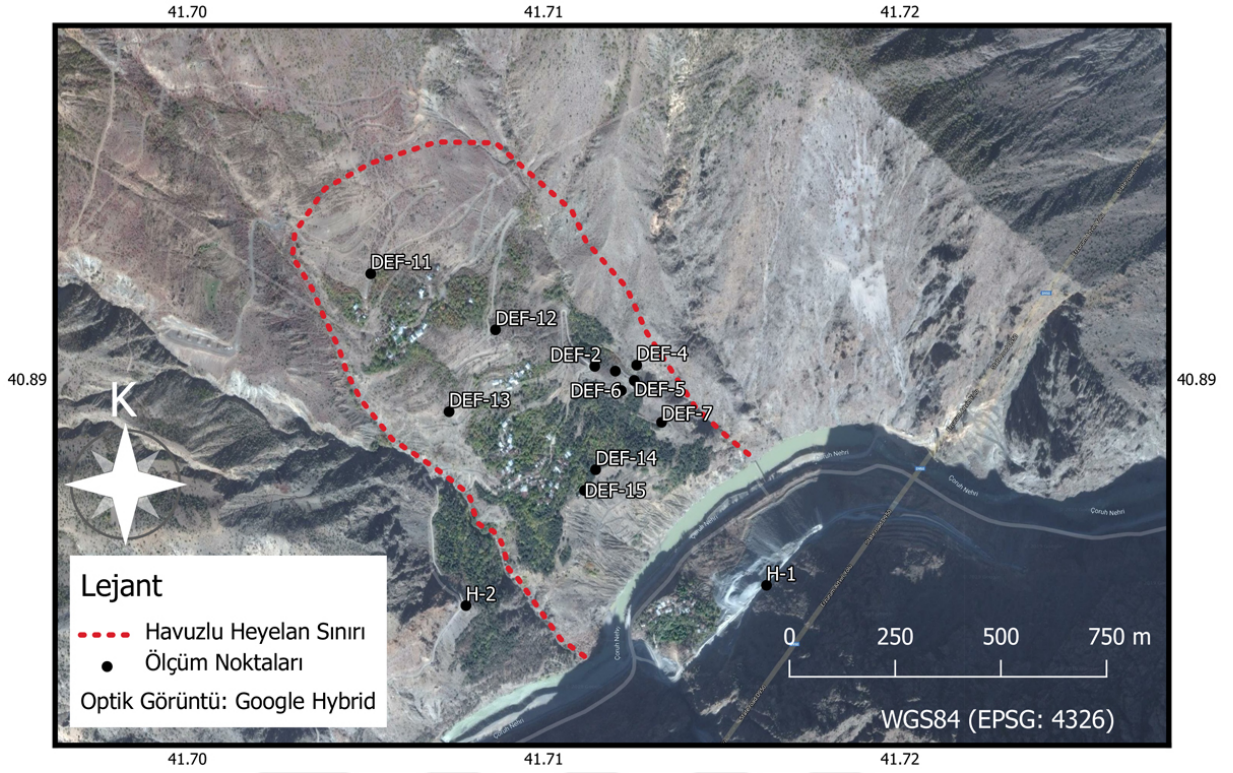
5.7. PSInSAR Sonuçlarının Yersel Ölçümlerle Karşılaştırılması: Havuzlu Köyü Örneği

Havuzlu Köyündeki heyelanı incelemek için, Doğuş Enerji Üretim ve Yatırım A.Ş. tarafından Artvin HES projesi kapsamında yersel ölçü yöntemleri ile düzenli olarak ölçümler aldırılmaktadır. Sabit olduğu düşünülen noktalar yardımıyla farklı noktalara ölçümler yapılarak inceleme sahasındaki hareketin izlenmesi amaçlanmıştır. Ölçüm noktaları (DEF) Şekil 30’da gösterilmiştir. Bütün ölçüm noktaları araziye pilye olarak tesis edilmiştir. Pilyeler üzerinde reflöktör bulunmaktadır. Araziye tesis edilen pilyelerden bir kısmı Şekil 29’da gösterilmiştir. Deformasyon noktalarını ölçmek amacıyla, araziye tesis edilen bu pilyelerden iki tanesinin (H-1 ve H-2) koordinat bilgileri hassas şekilde tespit edilmiştir. H-1 pilye noktasına alet kurularak H-2 pilye noktasından referansla beraber tüm deformasyon noktaları üçer kez ölçülmüştür. Ölçümlerin ortalamaları alınarak ölçüm değerleri belirlenmiştir. Yapılan ölçümlerde Leica TS-06 aleti kullanılmıştır.

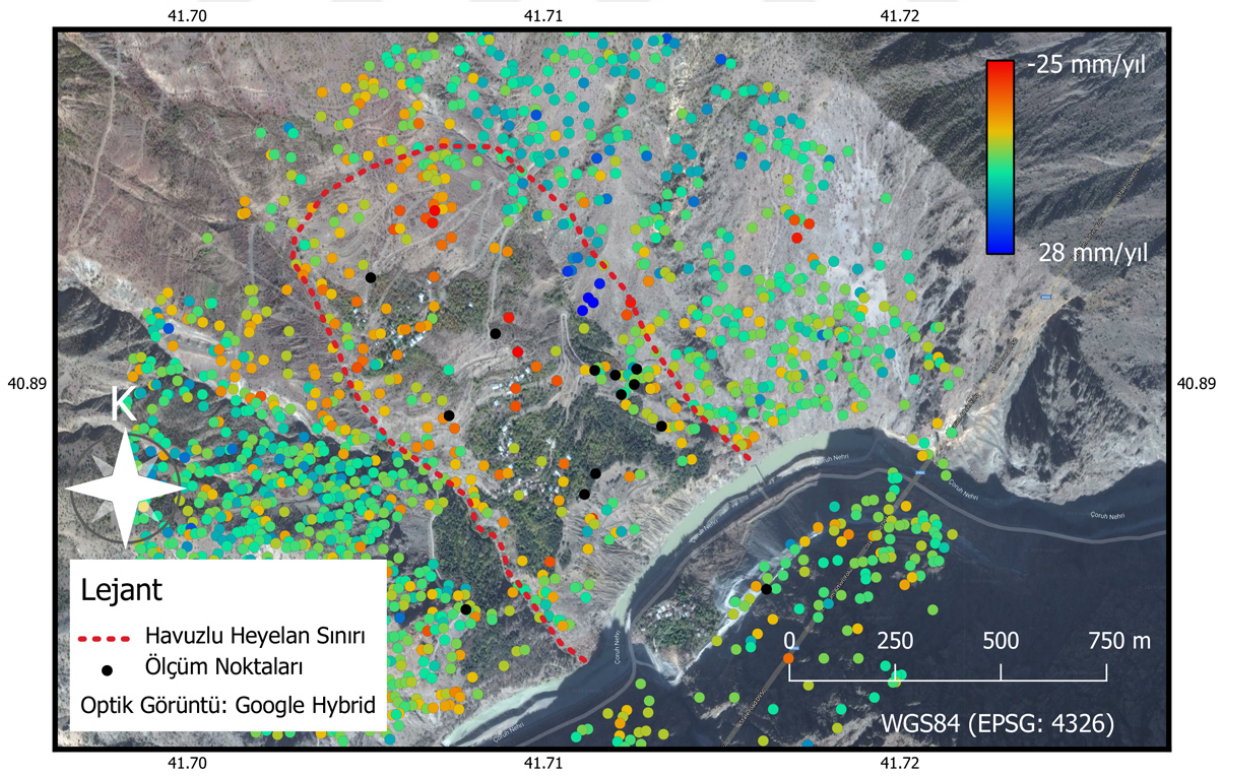


Şekil 29. Araziye tesis edilmiş ölçüm noktaları. Soldan sağa doğru sırasıyla H-1, H-2, DEF-2 ve DEF-13

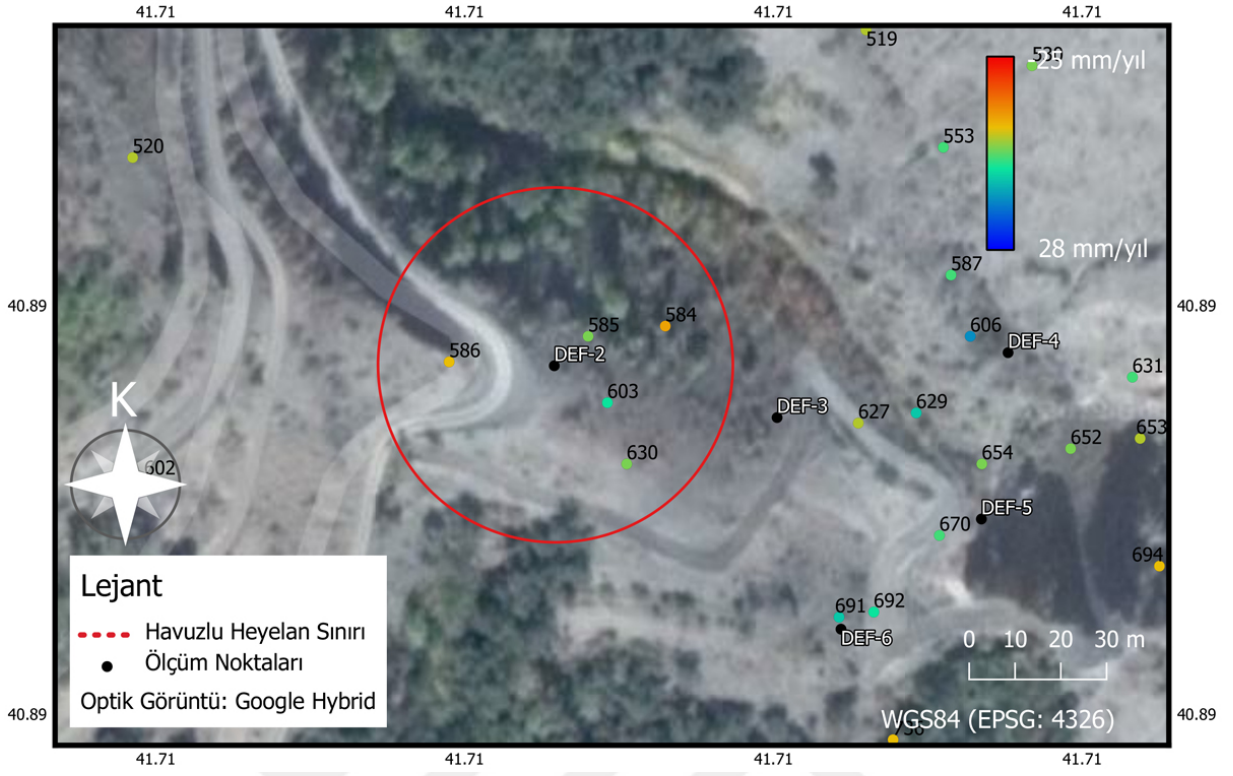
Ölçümü yapılan noktalar ve PS noktaları Şekil 31’de görülmektedir. Ölçümü yapılan noktalara birebir isabet eden PS noktası tespit edilememiş olsa da yakınlarında birçok PS noktası elde edilmiştir.



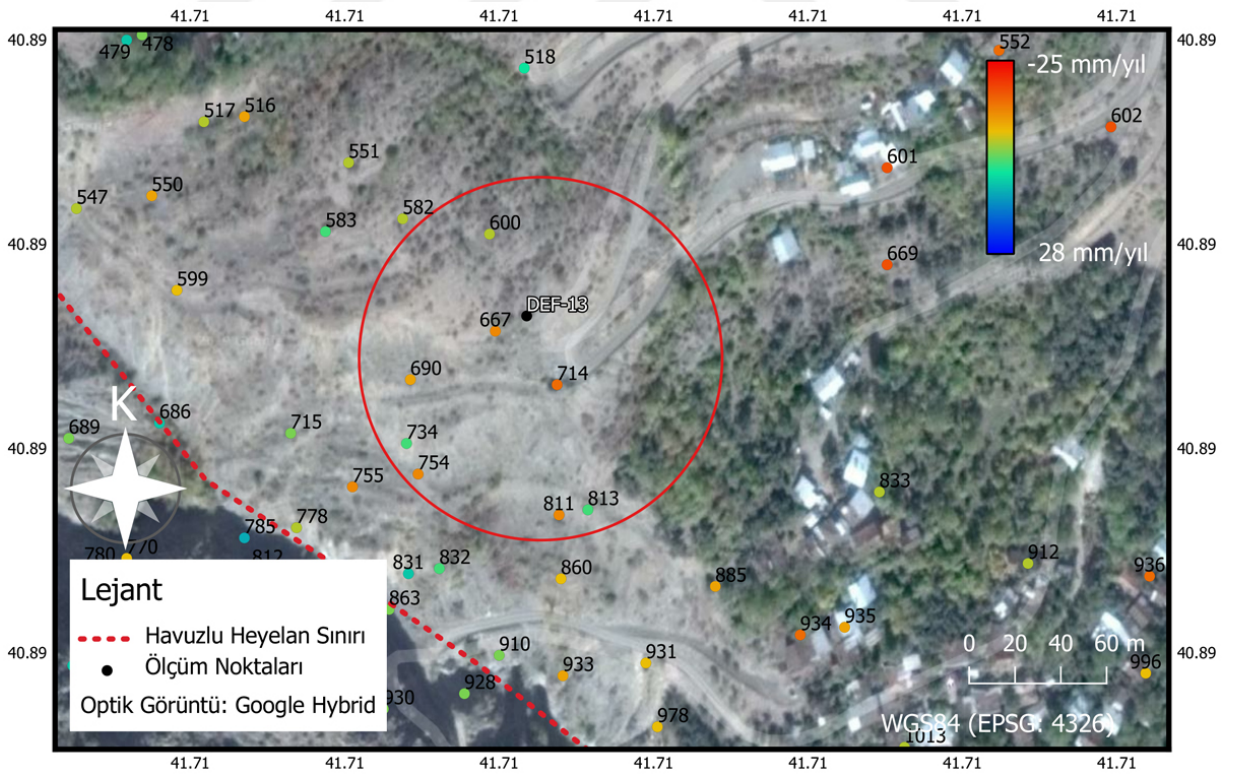
Şekil 30. Yersel ölçü yöntemleri kullanılarak ölçülmüş olan noktalar



Şekil 31. Ölçüm noktaları ve PS noktaları



Şekil 32. DEF-2 ölçüm noktası ve etrafındaki PS pikselleri



Şekil 33. DEF-13 ölçüm noktası ve etrafındaki PS pikselleri

PSInSAR tekniği ile elde edilen yer değiştirme miktarlarının tutarlı olup olmadığını gözlemleyebilmek için PSInSAR tekniğiyle ve yersel ölçü yöntemiyle edinilen yer değiştirme miktarları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, yersel ölçü yöntemiyle alınmış DEF-2 ve DEF-13 noktalarına ait ölçümler ve bu noktalar etrafında bulunmuş olan PS noktalarına ait veriler arasında yapılmıştır. DEF-2 ve DEF-13 noktaları etrafında belirli bir yarıçapa göre seçilmiş olan PS noktaları Şekil 32’de ve Şekil 33’te gösterilmiştir. DEF-2 ve DEF-13 noktalarına ait ölçümler üç boyutlu ve PS noktalarına ait ölçümler tek boyutlu olduğundan dolayı, karşılaştırma işleminin yapılabilmesi için öncelikli olarak bazı adımların uygulanması gerekmektedir.

Yersel ölçü yöntemleri ile elde edilen üç boyutlu yer değiştirme vektörleri kullanılarak, radarın bakış yönüne (LOS) ait yer değiştirme miktarı bir ileri model kullanılarak hesaplanabilir. Dünya yüzeyinde ölçülen bir noktanın yer değiştirme vektörleri, doğu (dx), kuzey (dy) ve dikey (dz) olmak üzere, $D = (dx, dy, dz)$ şeklinde düzenlenir. Daha sonra, yer değiştirme vektörünün (D), radarın bakış yönüne projeksiyonu,

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

$$\hat{s} = (-\cos \alpha_h \sin \theta_{inc} \quad \sin \alpha_h \sin \theta_{inc} \quad \cos \theta_{inc})^T \quad (5.2)$$

şeklinde formüle edilir. d_{LOS} , \hat{s} , θ_{inc} ve α_h sırasıyla radarın bakış yönündeki yer değiştirmeyi, uydunun birim vektörünü, saçılma noktasındaki geliş açısını ve uydunun azimut yönünü ifade eder (Arıkan ve Hanssen, 2008).

Radarın bakış yönündeki yer değiştirmeyi hesaplayabilmek için gerekli olan geliş açısını ve uydunun azimut yönünü ifade eden değerler, PSInSAR tekniği uygulanırken birincil görüntü olarak seçilmiş görüntüden elde edilmiştir.

5.8. PSInSAR Sonuçlarının Enterpole Edilen Yersel Ölçümlerle Karşılaştırılması: Havuzlu Köyü Örneği

Bir önceki bölümde, PSInSAR tekniği ile elde edilen yer değiştirme miktarlarının tutarlı olup olmadığını gözlemleyebilmek için PSInSAR tekniğiyle ve yersel ölçü yöntemiyle elde edilen yer değiştirme miktarları karşılaştırılmıştır. Bu bölümde ise farklı bir karşılaştırma yöntemi kullanılmıştır. PS noktalarının yer değiştirme miktarlarını kullanarak enterpolasyon haritası (Şekil 34) oluşturulmuş ve DEF noktalarında hesaplanan yer değiştirme miktarları ile enterpolasyonla elde edilen yer değiştirme miktarları karşılaştırılmıştır.

Enterpolasyon haritası, kriging enterpolasyon (ordinary) tekniği ile oluşturulmuştur. Kriging enterpolasyonu, ölçüm değeri bilinmeyen noktaların ölçüm değerini kestirmek için etraftaki ölçülmüş değerlerden ağırlıkları oranında yararlanan bir enterpolasyon tekniğidir. Bu yöntemde hem doğrudan ölçüm değerleri, hem de istatistiksel yöntemlerden yararlanılmaktadır. Yakınındaki noktalardan daha fazla etkilenmeyi sağlayan bir ağırlık modeli kullanan kriging yönteminin denklemi Eşitlik 5.3'te verilmiştir (Tural, 2011).

$$N_p = \sum_{i=1}^n P_i \times N_i \quad (5.3)$$

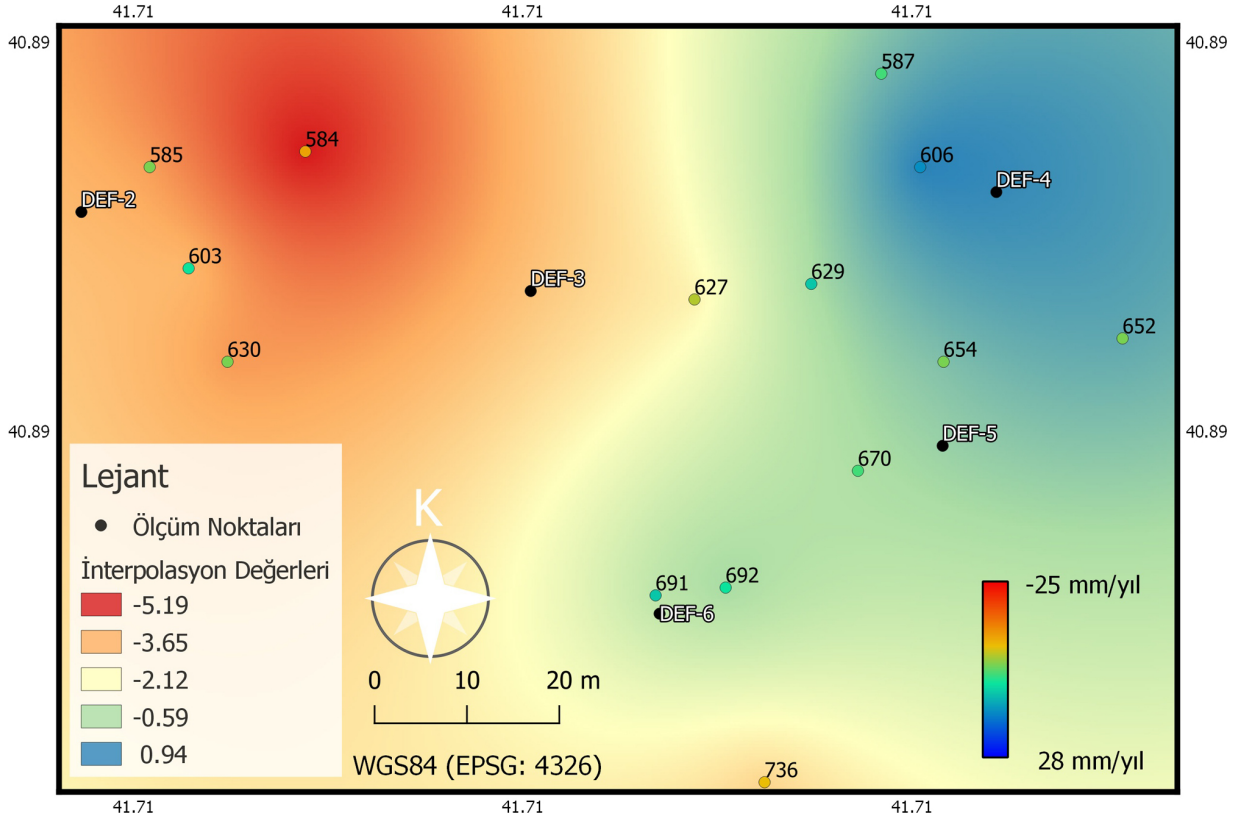
Bu formüldeki değişkenler sırasıyla; aranan ölçüm değeri (N_p), modeli oluşturan nokta sayısı (n), N_p 'nin hesaplanmasında kullanılan her N_i değerine karşılık gelen ağırlık değeri (P_i), N_p 'nin hesaplanması sırasında kullanılan noktaların ölçüm değerleri (N_i) olarak ifade edilmektedir (Yaprak ve Arslan, 2008).

Enterpolasyon haritası hazırlanırken, ilk adımda, DEF ölçüm noktalarının ve PS noktalarının birbirine yakın ve yoğun olduğu bir bölge seçilmiştir. Seçilen bölge içerisinde DEF-2, DEF-3, DEF-4, DEF-5, DEF-6 ölçüm noktaları ve 584 - 585 - 587 - 603 - 606 - 627 - 629 - 630 - 652 - 654 - 670 - 691 - 692 - 736 numaralı PS noktaları bulunmaktadır. DEF ölçüm noktalarına ait yersel ölçümlerle hesaplanan yer değiştirme miktarları, bir önceki bölümde olduğu gibi, Eşitlik 5.1 ve Eşitlik 5.2 kullanılarak tek boyuta dönüştürülmüş ve ölçüm noktalarının radarın bakış yönündeki yer değiştirme miktarları hesaplanmıştır (Tablo 8).

Daha sonra, 14 adet PS noktasına ait radarın bakış yönündeki yer değiştirme değerleri kullanılarak kriging enterpolasyonu uygulanmıştır. Kriging enterpolasyonu ile oluşturulan

harita üzerinden, DEF ölçüm noktalarına isabet eden radarın bakış yönündeki yer değiştirme verileri okunmuştur.

Son olarak, iki farklı yöntemle elde edilen DEF ölçüm noktalarına ait radarın bakış yönündeki yer değiştirme miktarları birbirleriyle karşılaştırılmıştır.



Şekil 34. DEF-2, DEF-3, DEF-4, DEF-5 ve DEF-6 ölçüm noktaları etrafında bulunan PS noktalarının radarın bakış yönündeki yer değiştirme miktarlarını kullanarak oluşturulan enterpolasyon haritası

Tablo 8. Yersel ölçüler kullanılarak hesaplanan radarın bakış yönündeki yer değiştirme miktarları ve PS noktalarındaki yer değiştirme miktarlarının enterpolasyonu sonucunda hesaplanan radarın bakış yönündeki yer değiştirme miktarları

Ölçüm Noktası	Yersel Ölçülerle Hesaplanan Yer Değiştirme Miktarı (mm/yıl)	Enterpolasyon ile Hesaplanan Yer Değiştirme Miktarı (mm/yıl)
DEF-2	-0.43	-3.45
DEF-3	-2.40	-3.23
DEF-4	2.75	0.81
DEF-5	-0.27	-0.37
DEF-6	-2.18	-1.04

6. BULGULAR VE İRDELEME

Bu bölümde Armutlu Mahallesi ve Havuzlu Köyünde yapılan heyelan tespit etme ve izleme çalışmaları kapsamında bulunan sonuçlar gösterilip irdelenecek ve sonrasında yersel ölçüler ile karşılaştırılmasına yer verilecektir.

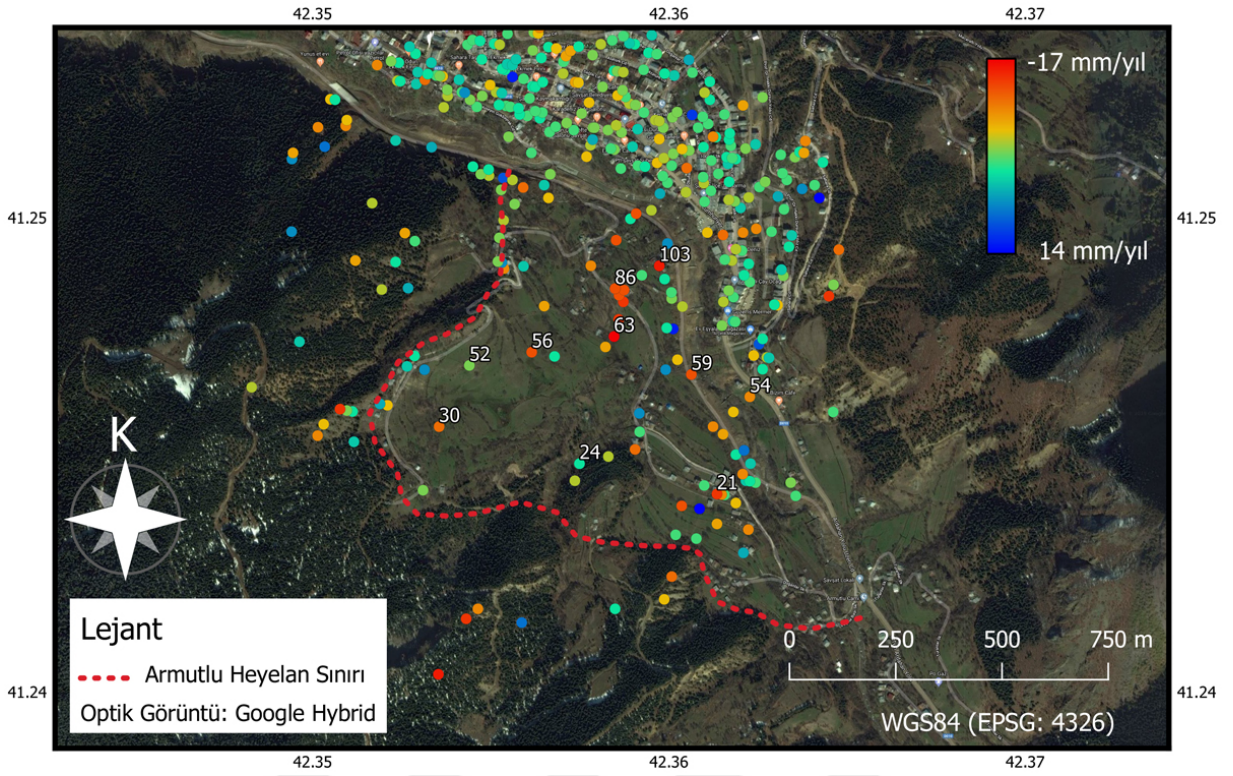
6.1. Armutlu Mahallesi Heyelanı

Bulunan PS pikselleri incelendiğinde (Şekil 35), PS piksel yoğunluğunun şehir merkezinden uzaklaştıkça azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi, daimi yansıtıcı durumundaki nesnelere kırsal bölgelerde daha az olmasıdır. Aynı yaklaşımla, daimi yansıtıcı durumundaki nesnelere daha çok olması sebebiyle şehir yerleşkelerinde daha fazla PS pikseli bulunmaktadır.

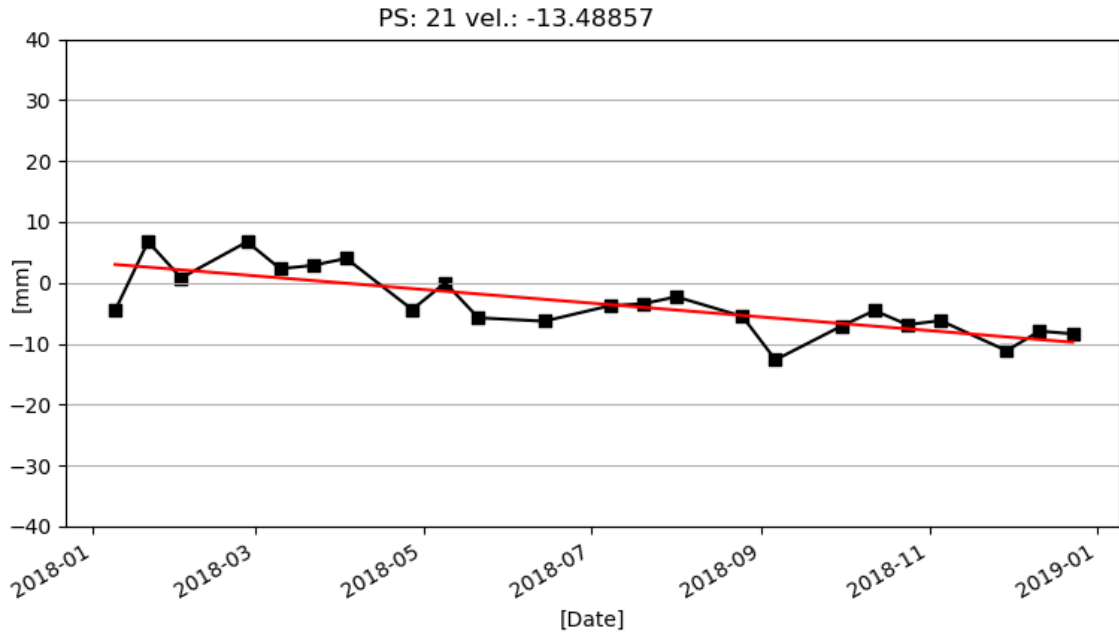
Elde edilen PS piksellerinin sayısını etkileyen bir başka faktör ise kullanılan görüntülerin zaman aralığıdır. Kullanılan görüntülerin zaman aralığı ne kadar geniş olursa, tüm görüntülerde aynı PS pikselini yakalama ihtimali o kadar az olur. Bu yüzden bazı örneklerde zaman aralığını yakın tutmak gerekebilmektedir.

PS piksellerine ait hızların ilçe merkezinde sifıra yakın olduğu, buna karşın heyelan alanında sifirdan belirgin bir şekilde uzak olduğu görülmektedir. PS piksellerinin daha hareketli olması sebebiyle heyelan alanı diğer alanlardan kolaylıkla ayrılabilir.

Çalışmalar sırasında elde edilen PS piksellerinden on tanesi rastgele seçilmiş olup seçilen piksellerin yer değiştirmelerini gösteren zaman serileri Şekil 36 - 37 - 38 - 39 - 40 - 41 - 42 - 43 - 44 ve 45'de verilmiştir. Zaman serilerindeki kırmızı renkli çizgiler yer değiştirmenin doğrusallığını ifade etmektedir.

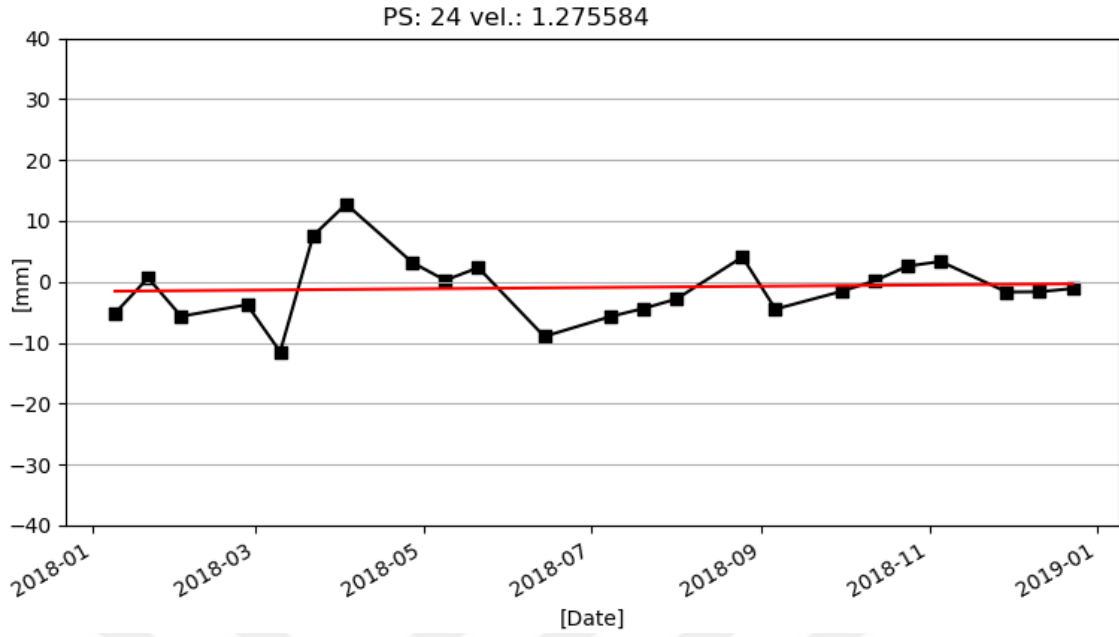


Şekil 35. Zaman serilerini göstermek amacıyla seçilen PS noktaları



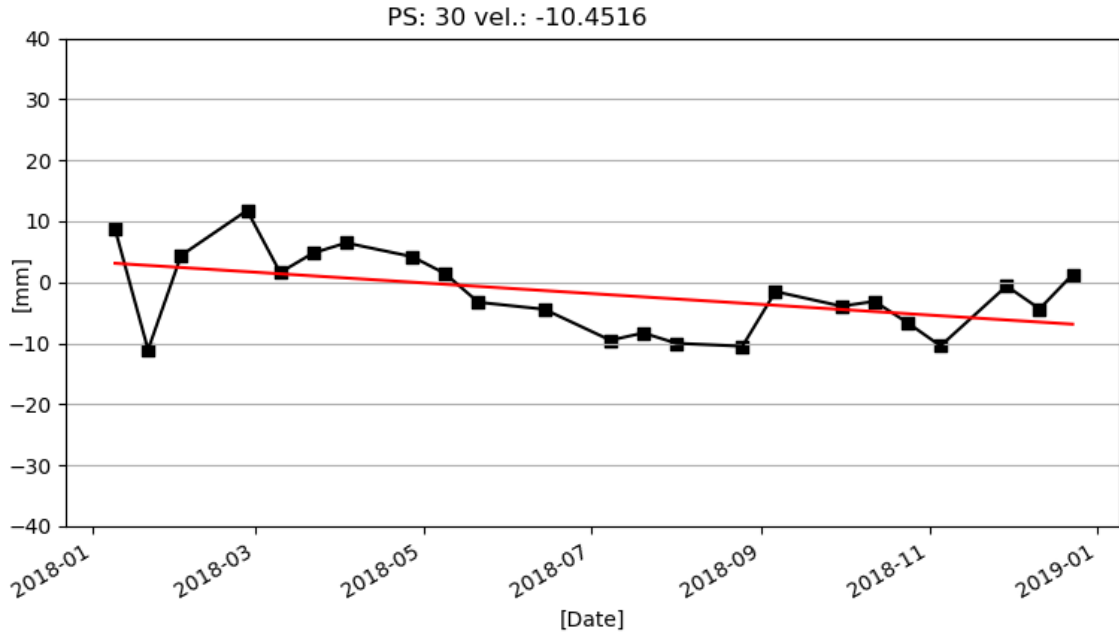
Şekil 36. Armutlu sahasındaki 21 numaralı PS noktasının zaman serisi

21 numaralı PS noktasının zaman serisine göre ilk ve son görüntü tarihleri arasındaki yer değiştirme miktarı yaklaşık olarak -3.81 mm/yıl olarak tespit edilmiştir. Doğrusallık yönü incelendiğinde, PS noktasının radarın bakış yönüne göre sensörden uzaklaştığı görülmektedir.



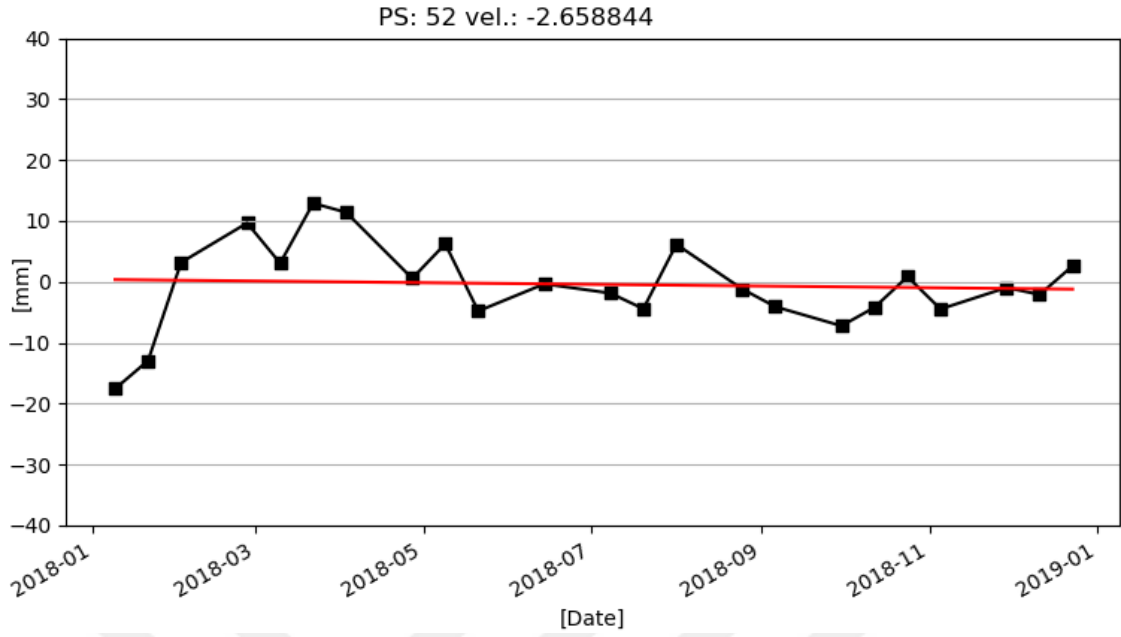
Şekil 37. Armutlu sahasındaki 24 numaralı PS noktasının zaman serisi

24 numaralı PS noktasının zaman serisine göre ilk ve son görüntü tarihleri arasındaki yer değiştirme miktarı yaklaşık olarak 4.05 mm/yıl olarak tespit edilmiştir. Doğrusallık yönü incelendiğinde, PS noktasının radarın bakış yönüne göre sensöre yaklaştığı görülmektedir.



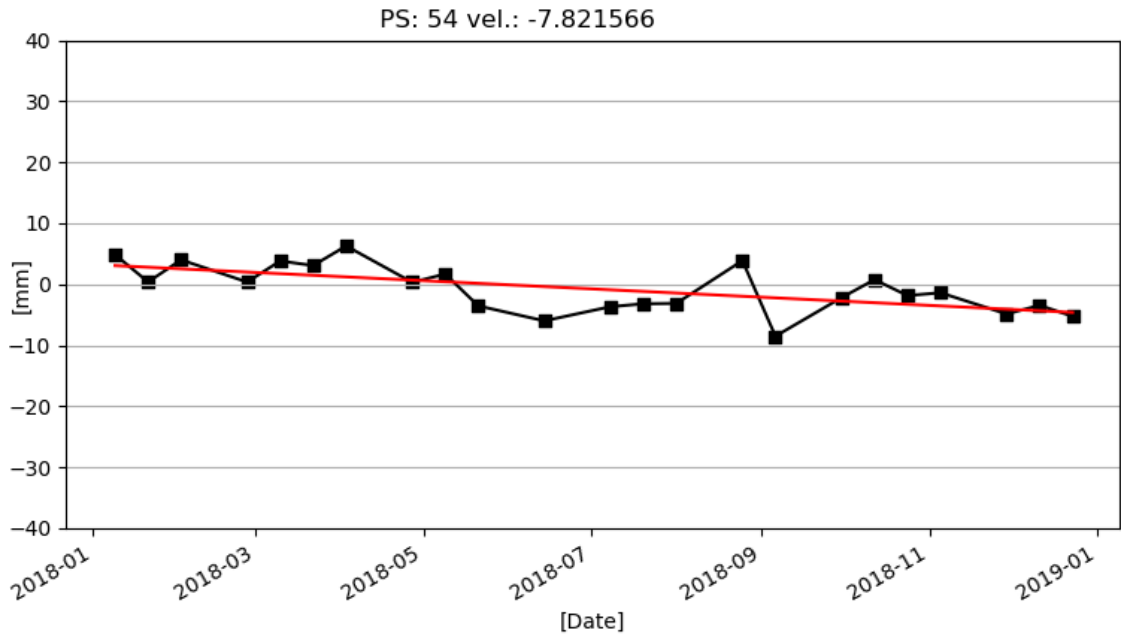
Şekil 38. Armutlu sahasındaki 30 numaralı PS noktasının zaman serisi

30 numaralı PS noktasının zaman serisine göre ilk ve son görüntü tarihleri arasındaki yer değiştirme miktarı yaklaşık olarak -7.46 mm/yıl olarak tespit edilmiştir. Doğrusallık yönü incelendiğinde, PS noktasının radarın bakış yönüne göre sensörden uzaklaştığı görülmektedir.



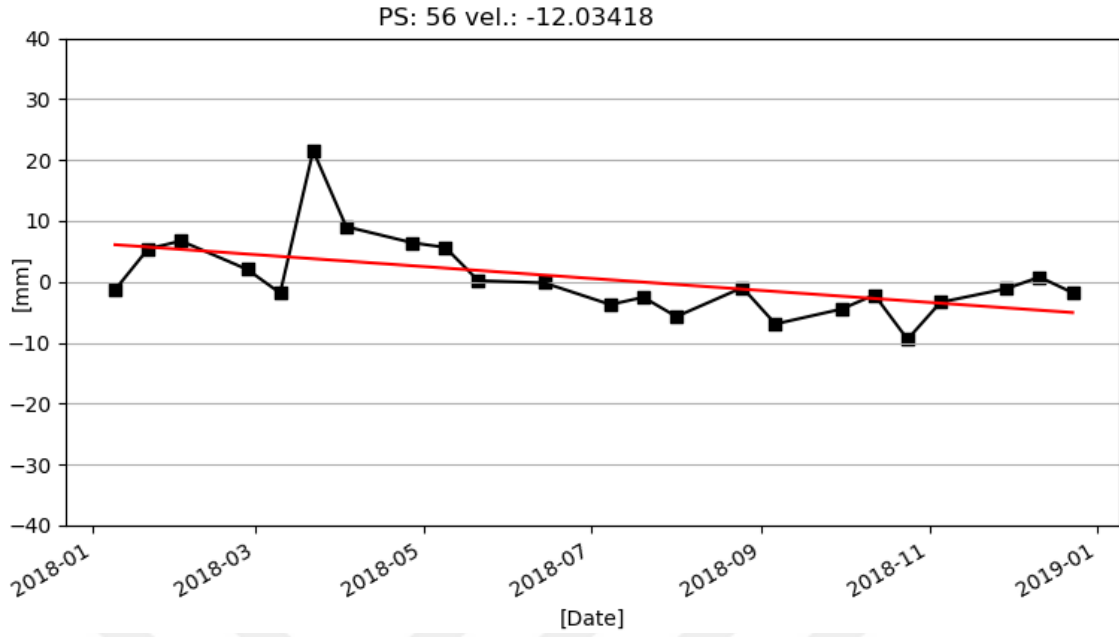
Şekil 39. Armutlu sahasındaki 52 numaralı PS noktasının zaman serisi

52 numaralı PS noktasının zaman serisine göre ilk ve son görüntü tarihleri arasındaki yer değiştirme miktarı yaklaşık olarak 20.16 mm/yıl olarak tespit edilmiştir. Doğrusallık yönü incelendiğinde, PS noktasının radarın bakış yönüne göre sensörden uzaklaştığı görülmektedir.



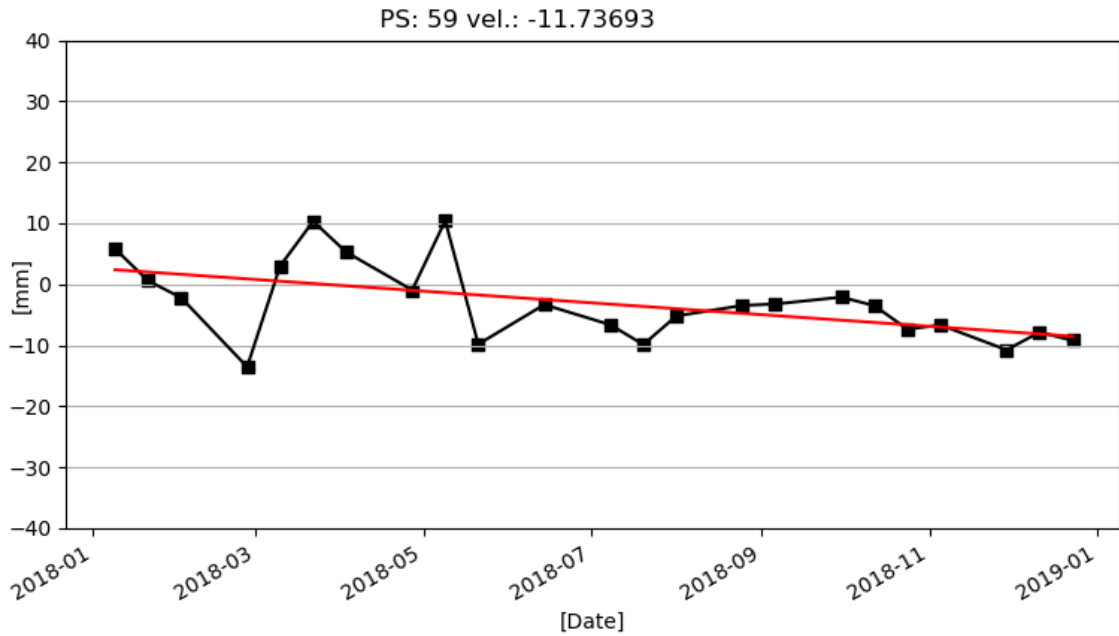
Şekil 40. Armutlu sahasındaki 54 numaralı PS noktasının zaman serisi

54 numaralı PS noktasının zaman serisine göre ilk ve son görüntü tarihleri arasındaki yer değiştirme miktarı yaklaşık olarak -10.11 mm/yıl olarak tespit edilmiştir. Doğrusallık yönü incelendiğinde, PS noktasının radarın bakış yönüne göre sensörden uzaklaştığı görülmektedir.



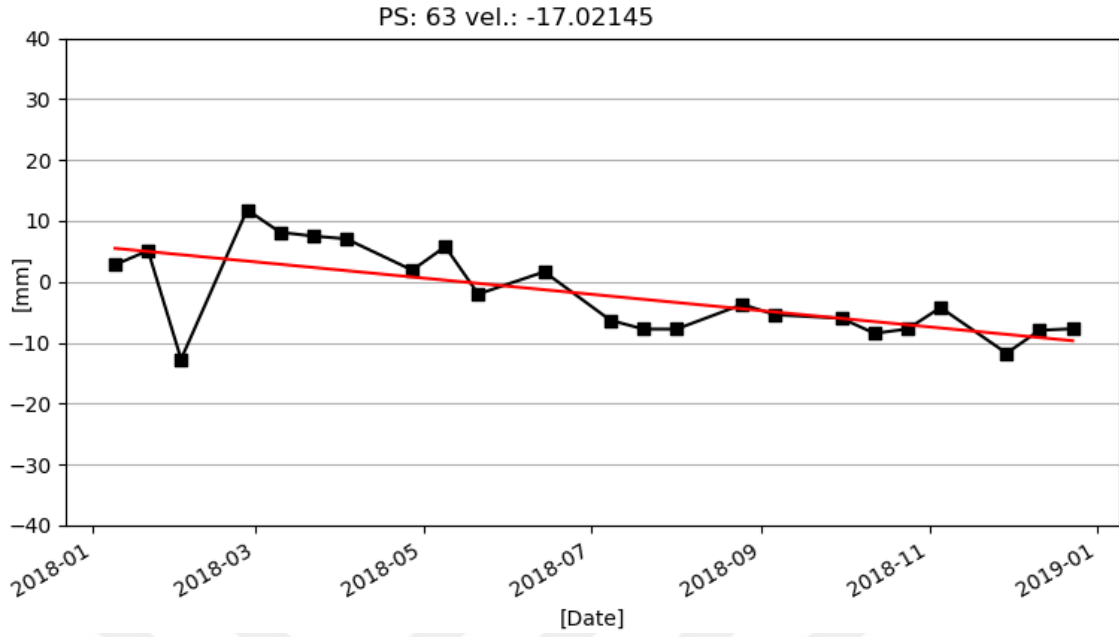
Şekil 41. Armutlu sahasındaki 56 numaralı PS noktasının zaman serisi

56 numaralı PS noktasının zaman serisine göre ilk ve son görüntü tarihleri arasındaki yer değiştirme miktarı yaklaşık olarak -0.48 mm/yıl olarak tespit edilmiştir. Doğrusallık yönü incelendiğinde, PS noktasının radarın bakış yönüne göre sensörden uzaklaştığı görülmektedir.



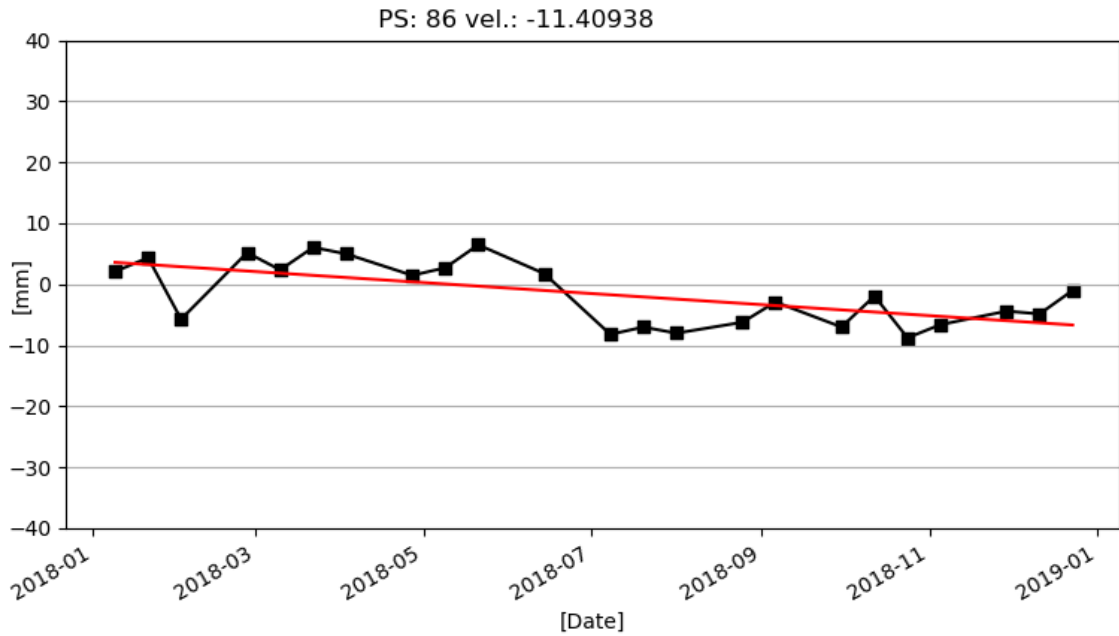
Şekil 42. Armutlu sahasındaki 59 numaralı PS noktasının zaman serisi

59 numaralı PS noktasının zaman serisine göre ilk ve son görüntü tarihleri arasındaki yer değiştirme miktarı yaklaşık olarak -15.03 mm/yıl olarak tespit edilmiştir. Doğrusallık yönü incelendiğinde, PS noktasının radarın bakış yönüne göre sensörden uzaklaştığı görülmektedir.



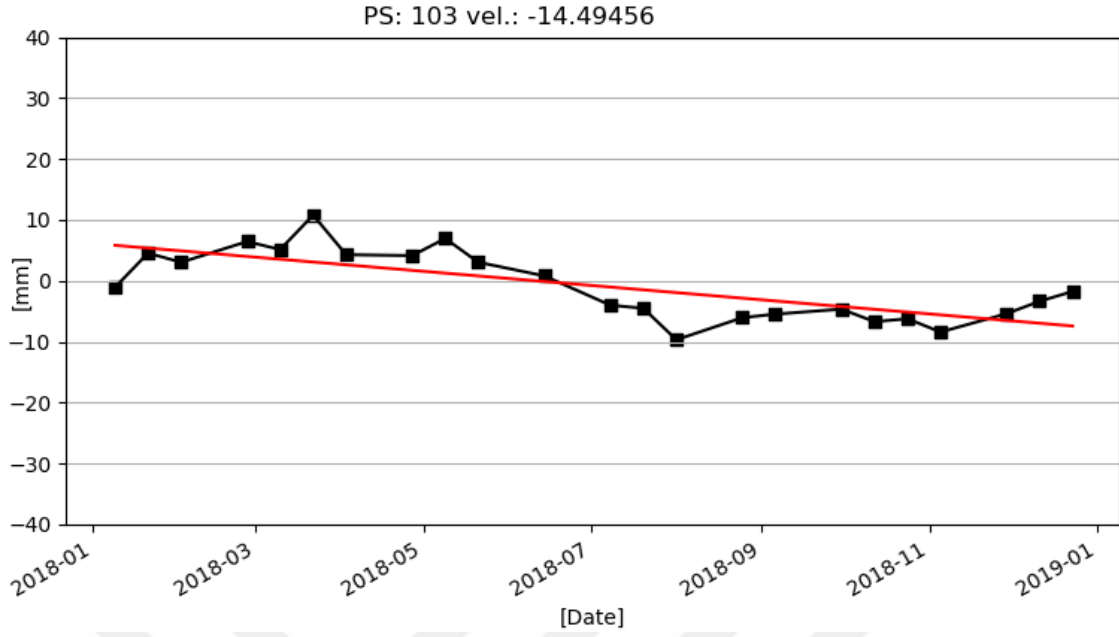
Şekil 43. Armutlu sahasındaki 63 numaralı PS noktasının zaman serisi

63 numaralı PS noktasının zaman serisine göre ilk ve son görüntü tarihleri arasındaki yer değiştirme miktarı yaklaşık olarak -10.51 mm/yıl olarak tespit edilmiştir. Doğrusallık yönü incelendiğinde, PS noktasının radarın bakış yönüne göre sensörden uzaklaştığı görülmektedir.



Şekil 44. Armutlu sahasındaki 86 numaralı PS noktasının zaman serisi

86 numaralı PS noktasının zaman serisine göre ilk ve son görüntü tarihleri arasındaki yer değiştirme miktarı yaklaşık olarak -3.09 mm/yıl olarak tespit edilmiştir. Doğrusallık yönü incelendiğinde, PS noktasının radarın bakış yönüne göre sensörden uzaklaştığı görülmektedir.



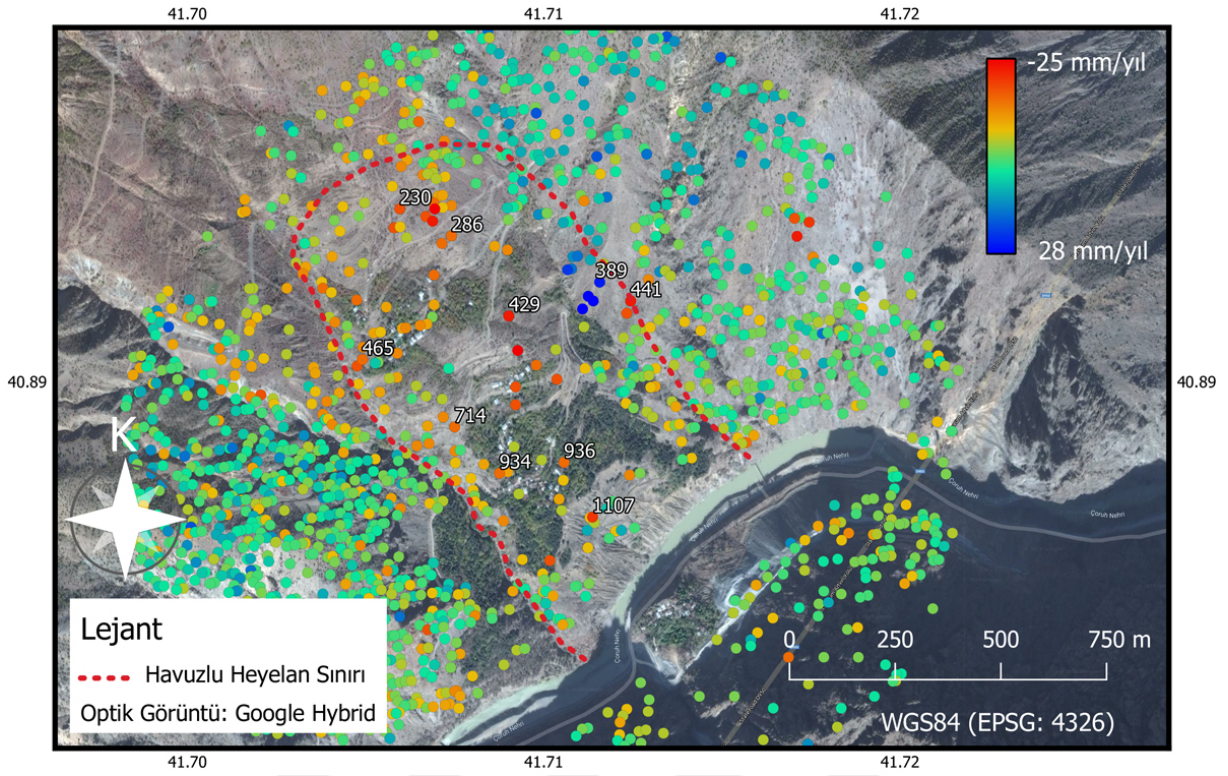
Şekil 45. Armutlu sahasındaki 103 numaralı PS noktasının zaman serisi
103 numaralı PS noktasının zaman serisine göre ilk ve son görüntü tarihleri arasındaki yer değiştirme miktarı yaklaşık olarak -0.69 mm/yıl olarak tespit edilmiştir. Doğrusallık yönü incelendiğinde, PS noktasının radarın bakış yönüne göre sensörden uzaklaştığı görülmektedir.

6.2. Havuzlu Köyü Heyelanı

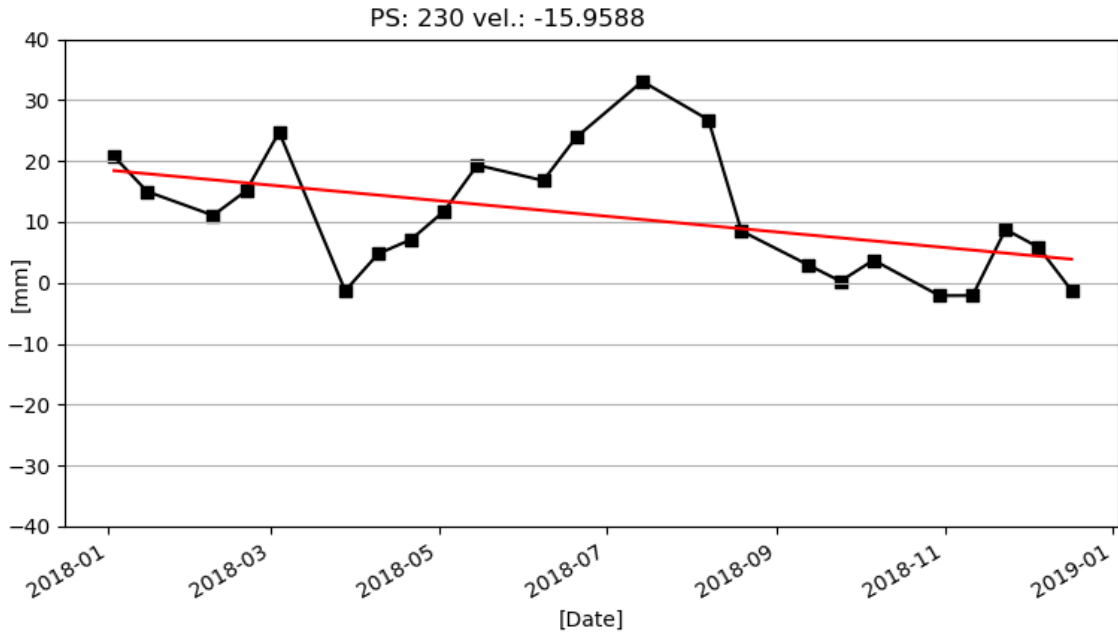
Şekil 46'da PS noktalarının radarın bakış yönündeki hızları görülmektedir. PS noktalarına ait hızlar incelendiğinde, kırmızı, turuncu ve mavi renkli noktaların heyelan bölgesinde yoğunlaştığı ve bu noktaların Havuzlu Köyündeki heyelanın sınırı ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Heyelan bölgesinde daha az, heyelan bölgesinin etrafında daha çok PS noktası elde edilmiştir. Heyelan bölgesinde daha az PS noktası elde edilmesinin sebebi, Armutlu Mahallesinde yapılan çalışmada olduğu gibi, daimi yansıtıcı özelliği gösteren nesnelerin daha az olmasıdır. Şekil 46 incelendiğinde, özellikle yeşil alanlarda ve Çoruh Nehrine sınırı bulunan şevlerde çok az PS noktası bulunmuştur.

Çalışmalar sırasında elde edilen PS piksellerinden on tanesi rastgele seçilmiş olup seçilen piksellerin yer değiştirmelerini gösteren zaman serileri Şekil 47 - 48 - 49 - 50 - 51 - 52 - 53 - 54 - 55 ve 56'da verilmiştir.

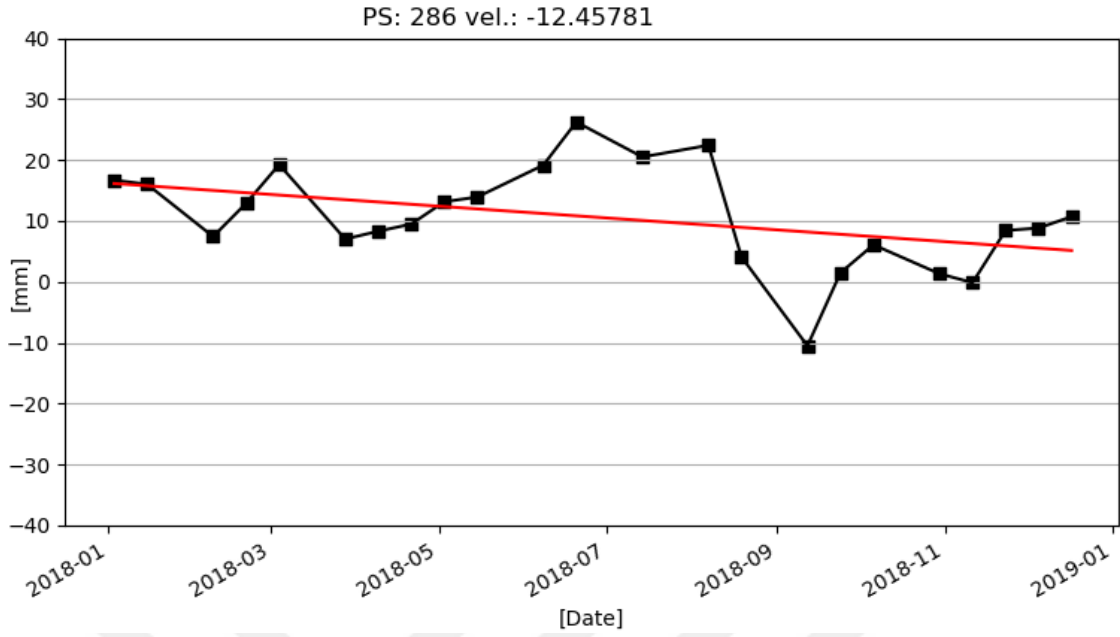


Şekil 46. Zaman serilerini göstermek amacıyla seçilen PS noktaları



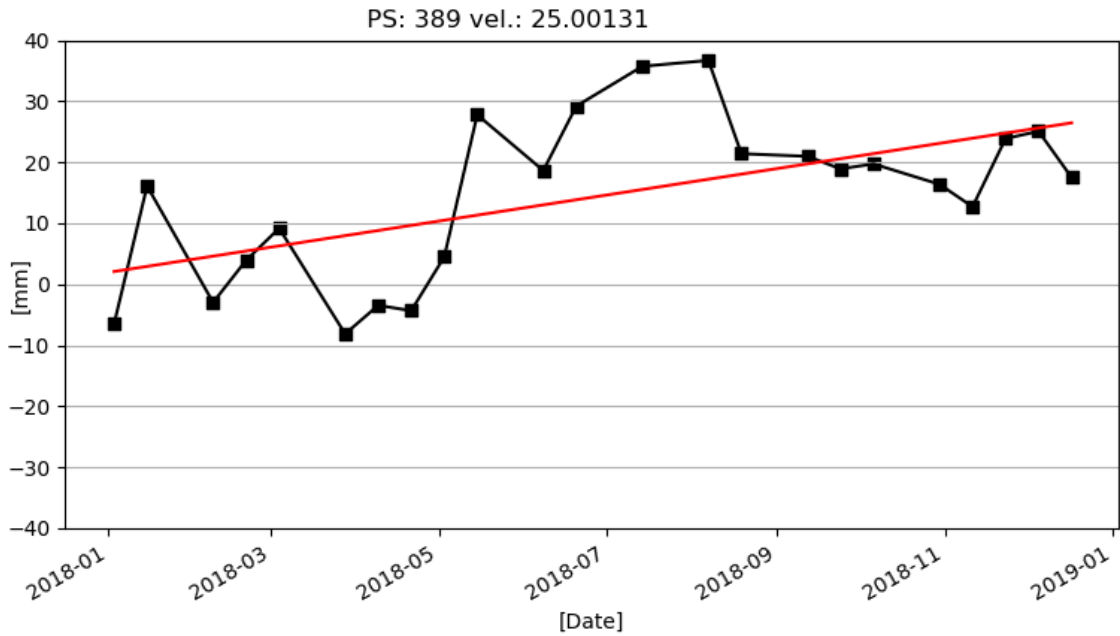
Şekil 47. Havuzlu sahasındaki 230 numaralı PS noktasının zaman serisi

230 numaralı PS noktasının zaman serisine göre ilk ve son görüntü tarihleri arasındaki yer değiştirme miktarı yaklaşık olarak -22.01 mm/yıl olarak tespit edilmiştir. Doğrusallık yönü incelendiğinde, PS noktasının radarın bakış yönüne göre sensörden uzaklaştığı görülmektedir.



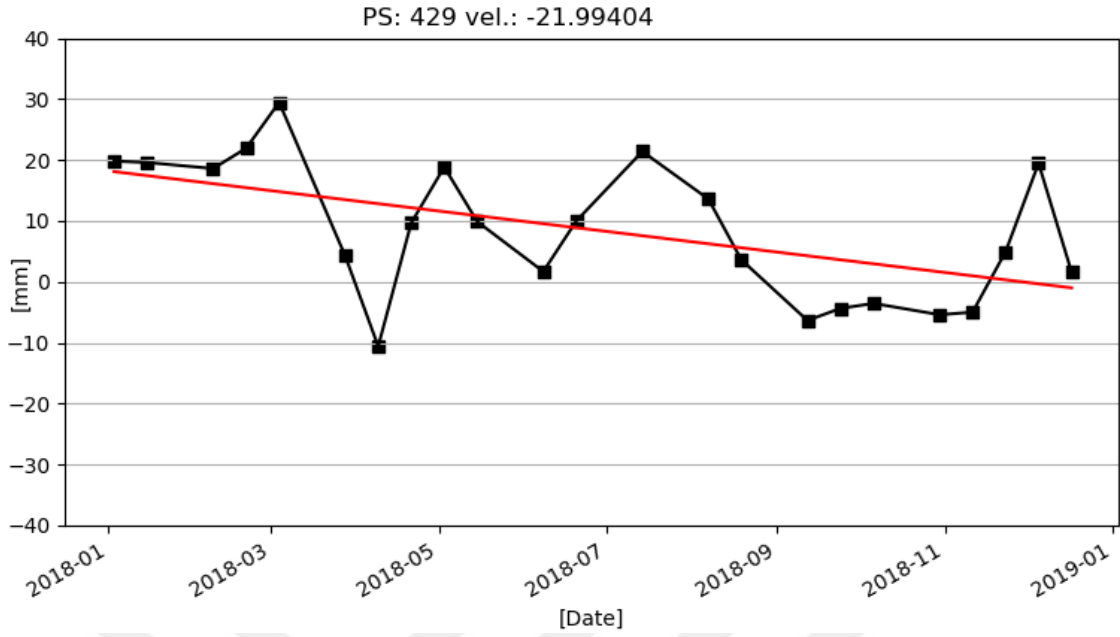
Şekil 48. Havuzlu sahasındaki 286 numaralı PS noktasının zaman serisi

286 numaralı PS noktasının zaman serisine göre ilk ve son görüntü tarihleri arasındaki yer değiştirme miktarı yaklaşık olarak -5.99 mm/yıl olarak tespit edilmiştir. Doğrusallık yönü incelendiğinde, PS noktasının radarın bakış yönüne göre sensörden uzaklaştığı görülmektedir.



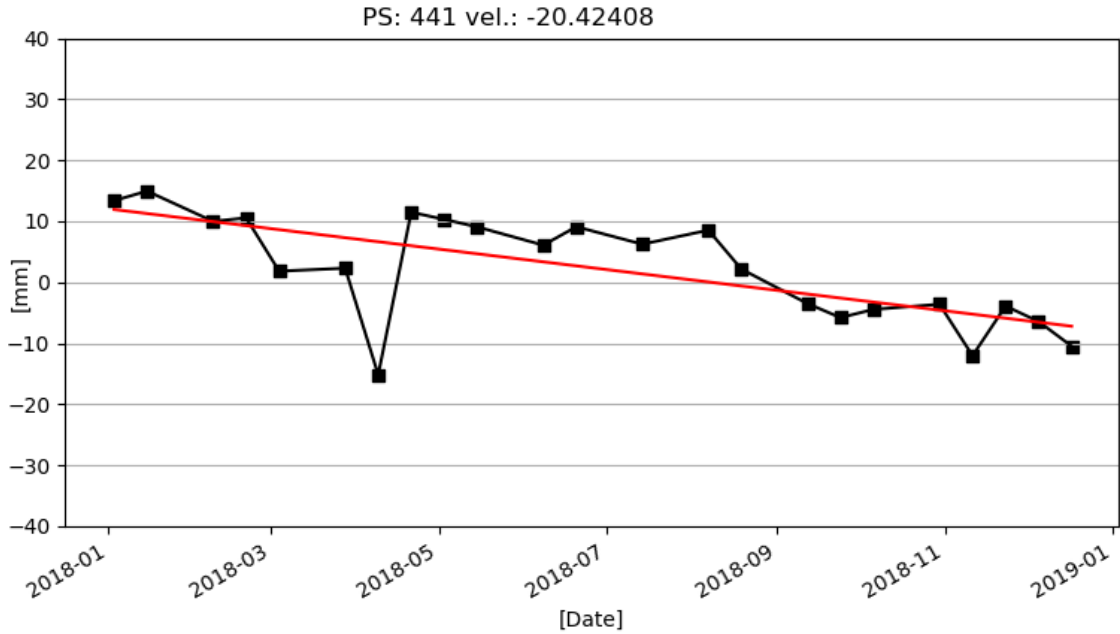
Şekil 49. Havuzlu sahasındaki 389 numaralı PS noktasının zaman serisi

389 numaralı PS noktasının zaman serisine göre ilk ve son görüntü tarihleri arasındaki yer değiştirme miktarı yaklaşık olarak 24.02 mm/yıl olarak tespit edilmiştir. Doğrusallık yönü incelendiğinde, PS noktasının radarın bakış yönüne göre sensöre yaklaştığı görülmektedir.



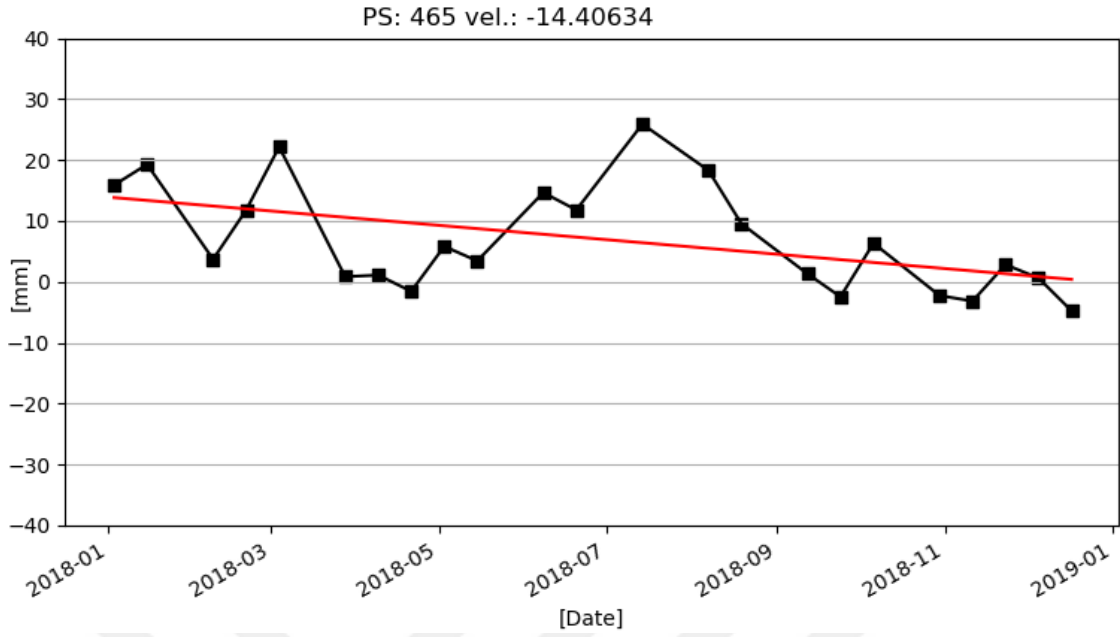
Şekil 50. Havuzlu sahasındaki 429 numaralı PS noktasının zaman serisi

429 numaralı PS noktasının zaman serisine göre ilk ve son görüntü tarihleri arasındaki yer değiştirme miktarı yaklaşık olarak -18.23 mm/yıl olarak tespit edilmiştir. Doğrusallık yönü incelendiğinde, PS noktasının radarın bakış yönüne göre sensörden uzaklaştığı görülmektedir.



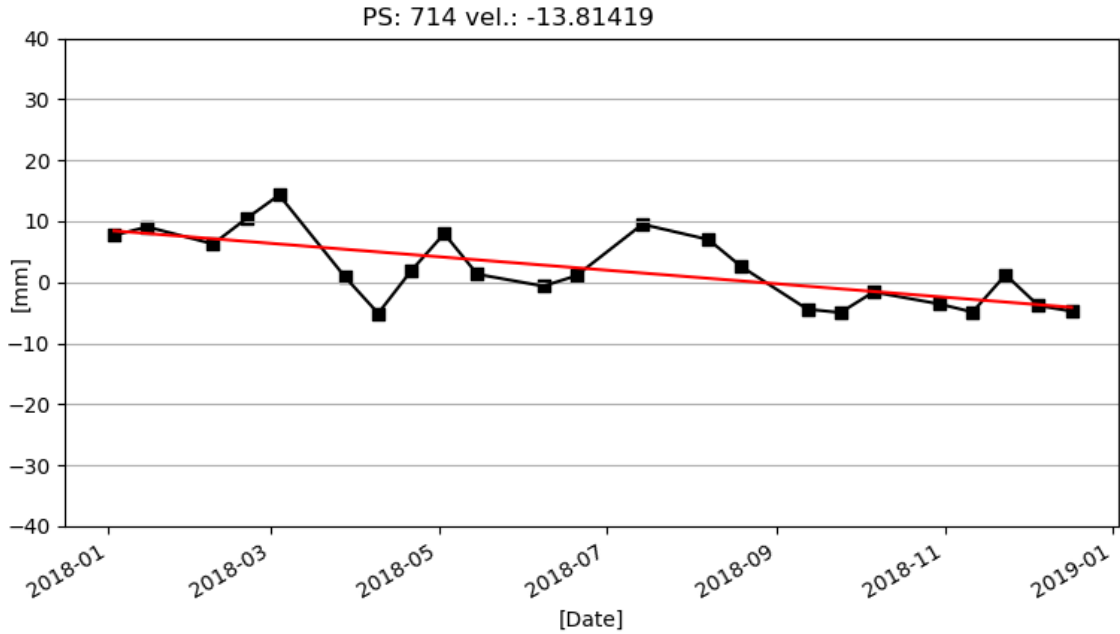
Şekil 51. Havuzlu sahasındaki 441 numaralı PS noktasının zaman serisi

441 numaralı PS noktasının zaman serisine göre ilk ve son görüntü tarihleri arasındaki yer değiştirme miktarı yaklaşık olarak -23.85 mm/yıl olarak tespit edilmiştir. Doğrusallık yönü incelendiğinde, PS noktasının radarın bakış yönüne göre sensörden uzaklaştığı görülmektedir.



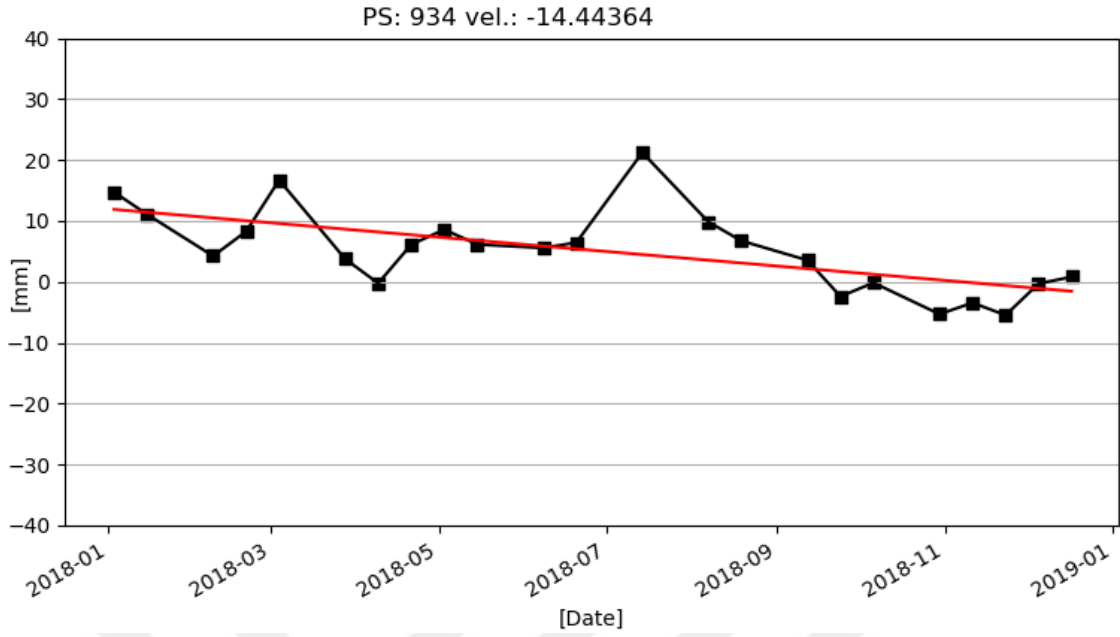
Şekil 52. Havuzlu sahasındaki 465 numaralı PS noktasının zaman serisi

465 numaralı PS noktasının zaman serisine göre ilk ve son görüntü tarihleri arasındaki yer değiştirme miktarı yaklaşık olarak -20.65 mm/yıl olarak tespit edilmiştir. Doğrusallık yönü incelendiğinde, PS noktasının radarın bakış yönüne göre sensörden uzaklaştığı görülmektedir.



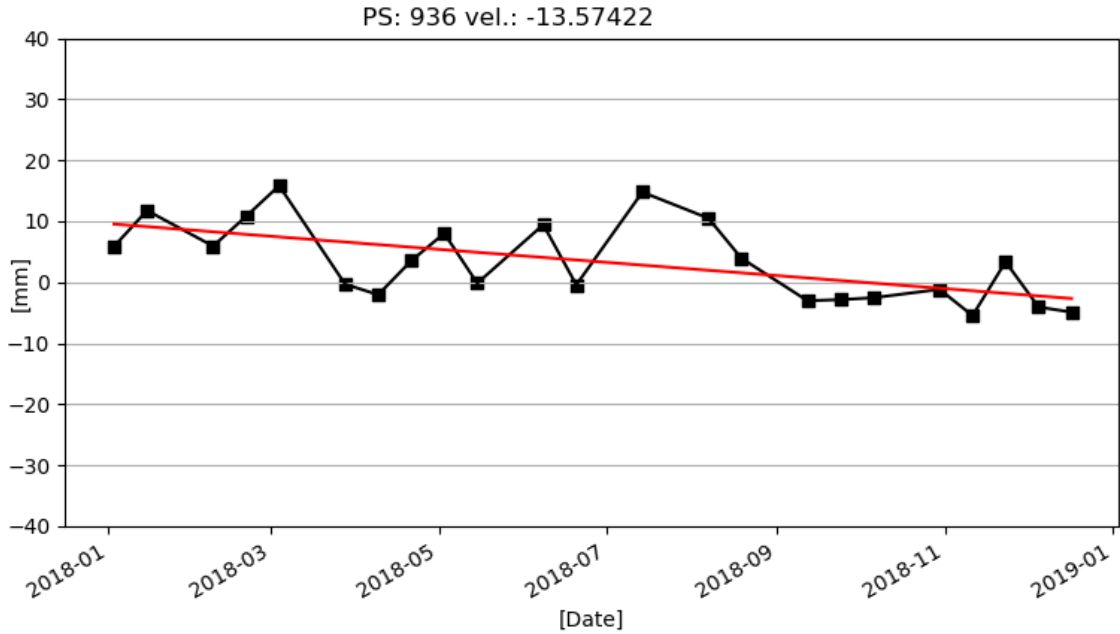
Şekil 53. Havuzlu sahasındaki 714 numaralı PS noktasının zaman serisi

714 numaralı PS noktasının zaman serisine göre ilk ve son görüntü tarihleri arasındaki yer değiştirme miktarı yaklaşık olarak -12.43 mm/yıl olarak tespit edilmiştir. Doğrusallık yönü incelendiğinde, PS noktasının radarın bakış yönüne göre sensörden uzaklaştığı görülmektedir.



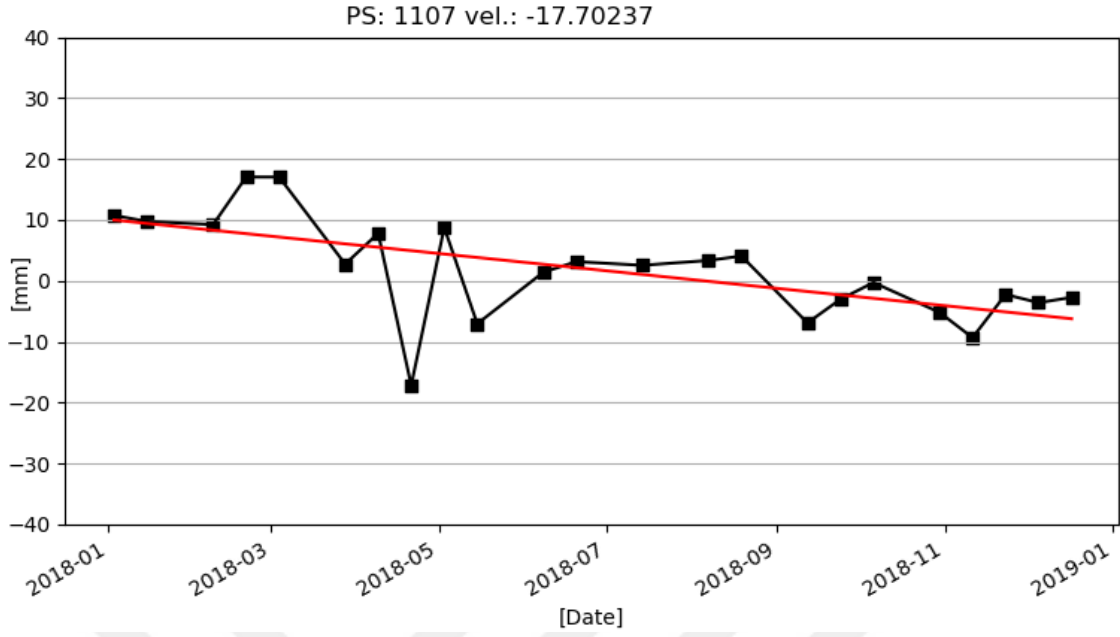
Şekil 54. Havuzlu sahasındaki 934 numaralı PS noktasının zaman serisi

934 numaralı PS noktasının zaman serisine göre ilk ve son görüntü tarihleri arasındaki yer değiştirme miktarı yaklaşık olarak -13.91 mm/yıl olarak tespit edilmiştir. Doğrusallık yönü incelendiğinde, PS noktasının radarın bakış yönüne göre sensörden uzaklaştığı görülmektedir.



Şekil 55. Havuzlu sahasındaki 936 numaralı PS noktasının zaman serisi

936 numaralı PS noktasının zaman serisine göre ilk ve son görüntü tarihleri arasındaki yer değiştirme miktarı yaklaşık olarak -10.78 mm/yıl olarak tespit edilmiştir. Doğrusallık yönü incelendiğinde, PS noktasının radarın bakış yönüne göre sensörden uzaklaştığı görülmektedir.

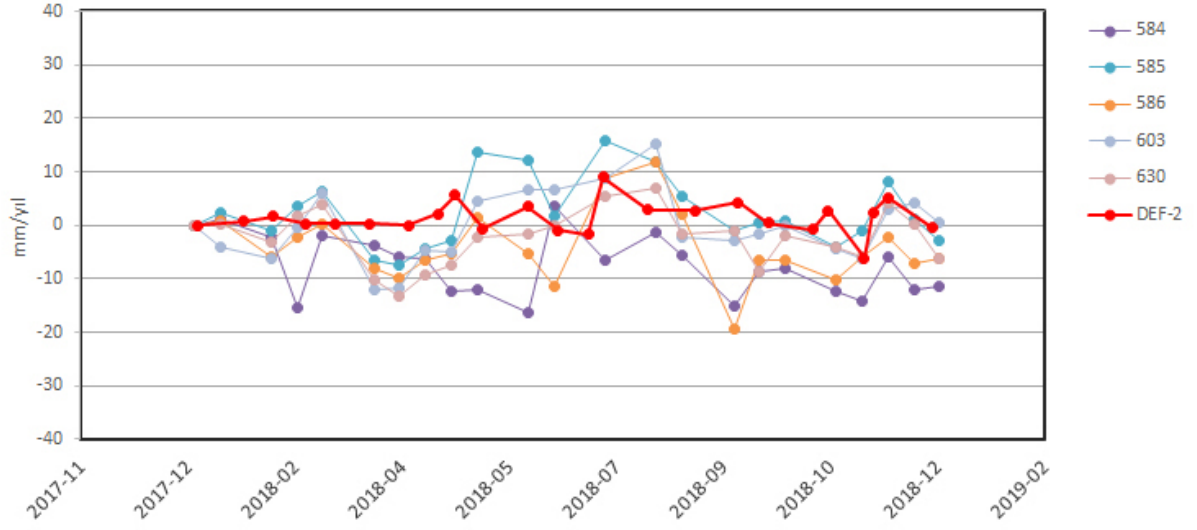


Şekil 56. Havuzlu sahasındaki 1107 numaralı PS noktasının zaman serisi

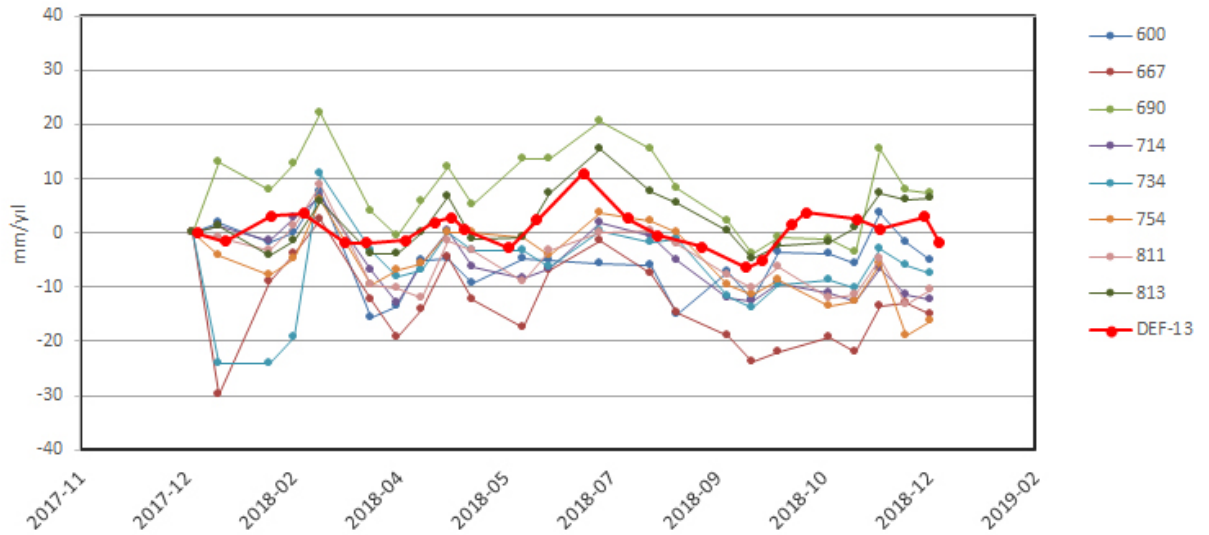
1107 numaralı PS noktasının zaman serisine göre ilk ve son görüntü tarihleri arasındaki yer değiştirme miktarı yaklaşık olarak -13.47 mm/yıl olarak tespit edilmiştir. Doğrusallık yönü incelendiğinde, PS noktasının radarın bakış yönüne göre sensörden uzaklaştığı görülmektedir.

6.3. PSInSAR Sonuçlarının Yersel Ölçümlerle Karşılaştırılması

Ölçüm noktalarının (DEF-2, DEF-13) tek boyuta dönüştürülmüş (Eşitlik 5.1'de ve 5.2) olan yer değiştirme miktarları ve PS noktalarına ait yer değiştirme miktarları Şekil 57 ve Şekil 58'de görüldüğü üzere grafik olarak oluşturulmuştur. Ölçümü yapılan noktalara birebir isabet eden PS noktalarının olmadığı ve bu noktaların etrafında bulunan PS noktaları ile karşılaştırmaların yapıldığı göz önünde bulundurularak, bütün noktalara ait yer değiştirme trendlerinin birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 57. DEF-2 ölçüm noktası ve PS ölçüm noktalarının yer değiştirme grafiği



Şekil 58. DEF-13 ölçüm noktası ve PS ölçüm noktalarının yer değiştirme grafiği

Tablo 9. DEF-2 ve DEF-13 ölçüm noktalarında ve seçili PS noktalarında hesaplanmış radarın bakış yönündeki bir yıllık yer değiştirme miktarları

Ölçüm noktası	Yer değiştirme (mm/yıl)	DEF ölçüm noktası ve PS noktası arasındaki mesafe (m)	PS noktası	Yer değiştirme (mm/yıl)
DEF-2	-0.43	25.74	584	-11.41
		9.78	585	-2.77
		22.96	586	-6.28
		14.12	603	0.48
		26.58	630	-6.10
		Ortalama yer değiştirme:		
DEF-13	-1.84	39.13	600	-5.14
		15.21	667	-14.96
		57.85	690	7.44
		32.72	714	-12.43
		76.35	734	-7.62
		85.55	754	-16.26
		87.69	811	-10.50
		88.47	813	6.30
Ortalama yer değiştirme:			-6.65	

InSAR, DInSAR ve PSInSAR uygulamalarının doğruluğunu araştırmak için genellikle GPS ölçümlerinden elde edilen veriler kullanılmaktadır (Vilardo vd., 2009; Tamburini vd., 2010; Zhang vd., 2012; Lagios vd., 2013). Çalışma alanlarında GPS ölçüm verilerinin bulunmamasından dolayı, Havuzlu Köyünde alınan yersel ölçümlerden yararlanılarak doğruluk araştırması yapılmıştır. Yapılan irdelemede, DEF-2 ve DEF-13 ölçüm noktalarından ve yakın çevrelerinde tespit edilen PS noktalarından (Şekil 32 ve 33) yararlanılmıştır. DEF-2 ölçüm noktasının radarın bakış yönündeki yer değiştirmesi -0.43 mm/yıl olarak, DEF-2 noktasına en yakın konumda (~9.8 metre) bulunan 585 numaralı PS noktasının radarın bakış yönündeki yer değiştirmesi -2.77 mm/yıl olarak bulunmuştur. Şekil 32'deki daire içerisinde bulunan 5 adet PS noktasının (584, 585, 586, 603 ve 630) ortalama yer değiştirmeleri ise -5.21 mm/yıl olarak bulunmuştur. DEF-13 ölçüm noktasının radarın bakış yönündeki yer değiştirmesi -1.84 mm/yıl olarak, DEF-13 noktasına en yakın konumda (~15.2 metre) bulunan 667 numaralı PS noktasının radarın bakış yönündeki yer değiştirmesi -14.96 mm/yıl olarak bulunmuştur. Şekil 33'deki daire içerisinde bulunan 8 adet PS noktasının (600, 667, 690, 714, 734, 754, 811 ve 813) ortalama yer değiştirmeleri ise -6.65 mm/yıl olarak bulunmuştur. Sonuç olarak, yersel ölçümlerle ve PSInSAR uygulamasıyla elde edilen yer değiştirme miktarları arasındaki farkın milimetre hassasiyetinde olduğu tespit edilmiştir (Tablo 9). Ölçüm noktalarına isabet eden PS noktası olmadığından dolayı civardaki PS noktaları ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Ölçüm noktalarına isabet eden ya da daha yakın konumda bulunan bir PS noktasının olması durumunda elde edilen değerlerin birbirine daha

yakın olacağı düşünülmektedir.

6.4. Enterpole Edilen PSInSAR Sonuçlarının Yersel Ölçümlerle Karşılaştırılması

Havuzlu Köyündeki ölçüm noktalarının tek boyuta dönüştürülmüş olan yer değiştirme miktarları Eşitlik 5.1 ve Eşitlik 5.2 ile hesaplanmıştır. Daha sonra, 14 adet PS noktasına ait radarın bakış yönündeki yer değiştirme verileri kullanılarak kriging enterpolasyon tekniği ile enterpolasyon haritası oluşturulmuş ve oluşturulan harita üzerinden DEF ölçüm noktalarına isabet eden radarın bakış yönündeki yer değiştirme verileri elde edilmiştir. Elde edilen değerler ve farklar Tablo 10'da gösterilmiştir.

Tablo 10. Yersel ölçüler kullanılarak hesaplanan radarın bakış yönündeki yer değiştirme miktarları, PS noktalarındaki yer değiştirme miktarlarının enterpolasyonu sonucunda hesaplanan radarın bakış yönündeki yer değiştirme miktarları ve iki yer değiştirme değeri arasındaki farklar

Ölçüm Noktası	Yersel Ölçülerle Hesaplanan Yer Değiştirme Miktarı (mm/yıl)	Enterpolasyon ile Hesaplanan Yer Değiştirme Miktarı (mm/yıl)	Fark (mm/yıl)
DEF-2	-0.43	-3.45	3.02
DEF-3	-2.40	-3.23	0.83
DEF-4	2.75	0.81	1.94
DEF-5	-0.27	-0.37	0.10
DEF-6	-2.18	-1.04	-1.14

Yapılan karşılaştırma sonucunda PSInSAR yöntemi ile bulunan yer değiştirme miktarlarının güvenilir olduğu bir kez daha gösterilmiştir. Buna göre iki yöntem ile elde edilen değerler karşılaştırıldığında, azami yer değiştirme farkı DEF 2'de 3.02 mm/yıl, asgari yer değiştirme farkı ise DEF 5'te 0.10 mm/yıl olarak elde edilmiştir. Ayrıca, Tablo 10'da, yersel ölçülerden elde edilen yer değiştirme ile radarın bakış yönündeki yer değiştirme miktarlarının enterpolasyonu sonucu elde edilen yıllık yer değiştirme miktarlarının aynı işarete sahip olması, bir diğer deyişle, iki yer değiştirmenin de aynı yönde olması, bulunan ölçülerin yer ölçüleri ile yönsel olarak tutarlı olduğunu göstermektedir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Artvin il sınırları içerisinde yer alan Şavşat ilçesinin Armutlu Mahallesi'nin kuzey kesiminde ve Yusufeli ilçesinin Havuzlu Köyünde bulunan heyelanlı alanlar, Sentinel-1A uydusuna ait SAR görüntüleri kullanılarak, PSInSAR tekniği ile tespit edilmiş ve izlenmiştir. Bu çalışmada PSInSAR tekniği, VV polarizasyona sahip toplam 48 adet Sentinel-1A uydusuna ait SAR (C-bant) görüntüsü kullanılarak uygulanmıştır. Armutlu Mahallesi'nde alçalan yörüngeye ait 24 adet, Havuzlu köyünde yükselen yörüngeye ait 24 adet görüntü kullanılmıştır.

Armutlu Mahallesinde yapılan çalışmada, radarın bakış yönündeki yer değiştirmenin miktarı -27 ile +18 mm/yıl arasında hesaplanmıştır. Havuzlu Köyünde yapılan çalışmada, radarın bakış yönündeki yer değiştirmenin miktarı -25 ile +28 mm/yıl arasında hesaplanmıştır.

Heyelanlı alanlara kıyasla ilçe merkezinde ve kayalık arazilerde daimi yansıtıcı özelliği gösteren nesnelere daha fazla bulunmasından dolayı bu alanlarda daha fazla PS noktası elde edilmiştir.

İki çalışmada da heyelanlı alanlara denk düşen PS piksellerine ait hızların belirgin şekilde fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu farklılıktan dolayı heyelanlı bölgeler kolay bir şekilde diğer bölgelerden ayırt edilebilmiştir.

Hesaplanan yer değiştirme miktarları göz önünde bulundurulduğunda, bölgedeki heyelanlar hızlarına göre 'çok yavaş' ve 'yavaş' olarak sınıflandırılmıştır.

PSInSAR tekniği ile elde edilen yer değiştirme miktarlarının tutarlı olup olmadığı, Havuzlu Köyündeki heyelan sahasında iki farklı yöntem ile araştırılmıştır. Birinci yöntemde, Havuzlu Köyündeki heyelanın izlenmesi için PSInSAR tekniği ile elde edilen veriler ve Artvin HES projesi kapsamında düzenli olarak aldırılan ölçüler karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma işleminin yapılabilmesi için üç boyuta sahip olan yersel ölçüler, PSInSAR ölçümleri gibi tek boyuta indirilmiştir. Tek boyuta indirilen DEF-2 ve DEF-13 yersel noktalarına ait ölçümler ve bu noktaların etrafında bulunan PS noktalarına ait değerler zaman serisi grafiği üzerine aktarılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda DEF-2 ve DEF-13 ölçüm noktalarının etraflarında bulunan PS pikselleri ile uyumlu hareket ettikleri ve yer değiştirme trendlerinin örtüştüğü görülmüştür. Sonuçlar üzerinde yapılan irdelemede, DEF-2 ve DEF-13 ölçüm noktalarından ve yakın çevrelerinde tespit edilen PS noktalarından (Şekil 32 ve 33) yararlanılmıştır. DEF-2 ölçüm noktasının radarın bakış yönündeki yer değiştirmesi -0.43

mm/yıl olarak, DEF-2 noktasına en yakın konumda (~9.8 metre) bulunan 585 numaralı PS noktasının radarın bakış yönündeki yer değiştirmesi -2.77 mm/yıl olarak bulunmuştur. Şekil 32'deki daire içerisinde bulunan 5 adet PS noktasının (584, 585, 586, 603 ve 630) ortalama yer değiştirmeleri ise -5.21 mm/yıl olarak bulunmuştur. DEF-13 ölçüm noktasının radarın bakış yönündeki yer değiştirmesi -1.84 mm/yıl olarak, DEF-13 noktasına en yakın konumda (~15.2 metre) bulunan 667 numaralı PS noktasının radarın bakış yönündeki yer değiştirmesi -14.96 mm/yıl olarak bulunmuştur. Şekil 33'deki daire içerisinde bulunan 8 adet PS noktasının (600, 667, 690, 714, 734, 754, 811 ve 813) ortalama yer değiştirmeleri ise -6.65 mm/yıl olarak bulunmuştur. Yersel ölçümlerle ve PSInSAR uygulamasıyla elde edilen yer değiştirme miktarları arasındaki farkın milimetre hassasiyetinde olduğu tespit edilmiştir. Ölçüm noktalarına isabet eden PS noktası olmadığından dolayı civardaki PS noktaları ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Ölçüm noktalarına isabet eden ya da daha yakın konumda bulunan bir PS noktasının olması durumunda elde edilen değerlerin birbirine daha yakın olacağı düşünülmektedir. Kıyaslama sonucunda, PSInSAR ölçüm tekniği ile yüksek duyarlılıkta ölçüm yapılabildiği sonucuna ulaşılmaktadır.

Bu çalışmanın tutarlılığının test edilmesinde kullanılan ikinci yöntemde ise, tek boyuta indirilen yersel ölçüm noktalarının yer değiştirme miktarları ve bu noktalara yakın konumda bulunan PS noktalarının yer değiştirme miktarları ile oluşturulan enterpolasyon haritası kullanılmıştır. Oluşturulan enterpolasyon haritasındaki DEF ölçüm noktalarına isabet eden yer değiştirme miktarları okunarak yersel ölçümlerle elde edilen yer değiştirme miktarları ile karşılaştırılmıştır. İki yöntem ile elde edilen değerler karşılaştırıldığında, azami yer değiştirme farkı DEF 2'de 3.02 mm/yıl olarak ve asgari yer değiştirme farkı DEF 5'te 0.10 mm/yıl olarak elde edilmiştir. Ayrıca, yersel ölçülerden elde edilen yer değiştirme ile PSInSAR yöntemi ile elde edilen yer değiştirme miktarlarının enterpolasyonu sonucu elde edilen yıllık yer değiştirme miktarlarının (Tablo 10) aynı işarete sahip olması, bir diğer deyişle, iki yer değiştirmenin de aynı yönde olması, bulunan ölçülerin yersel ölçüler ile yönsel olarak tutarlı olduğunu göstermektedir.

Bu şekilde PSInSAR yöntemi ile bulunan yer değiştirme miktarlarının güvenilir olduğu yapılan karşılaştırmalar sonucunda gösterilmiştir.

Daimi yansıtıcı özelliği gösterebilecek nesnelere az olduğu alanlarda uzun zaman aralığını kapsayan görüntülerin kullanılması, elde edilecek olan PS noktalarının sayısına olumsuz yönde etki edebilmektedir. Bu nedenle, çalışma alanlarının yansıtıcı özelliklerine göre zaman aralığının kısa veya uzun tutulması önerilmektedir.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda Sentinel-1A uydusuna ait C-bantlı SAR görüntüleri kullanılmıştır. Yapılacak olan çalışmanın önemine göre konumsal çözünürlüğü ve zamansal çözünürlüğü yüksek olan SAR görüntüleri tercih edilebilir. Hatta topografya üzerindeki yansıtıcı özelliklerine (bitki örtüsü, eğim vb.) göre farklı bantlı (L, X vb.) SAR görüntüleri kullanılabilir. Bu sayede elde edilecek olan PS noktalarının sayısı, zaman serilerindeki ölçülerin yoğunluğu ve elde edilen verilerin doğruluğu daha da artacaktır.

Heyelan sınırlarının teknik olarak (jeolojik, jeodezik vb.) ya da diğer sebeplerle (ulaşım veya can güvenliği vb.) tam olarak tespit edilemediği durumlarda PSInSAR tekniği uygulanarak heyelan sınırları belirlenebilmektedir.

PSInSAR tekniği ile heyelanın sınırı ve hızı hakkında bilgi edinilebilmektedir. Ancak, heyelanın mekanizmasını (kayma yüzeyi ve derinliği, heyelan kütlesi, şev stabilite durumu vb.) tam olarak belirleyebilmek için detaylı jeolojik-jeoteknik araştırmaların yapılması gerekmektedir.

PSInSAR tekniği tek başına bir alana uygulandığında etkili sonuçlar elde edilebilmektedir. Ancak araştırmanın türüne göre (heyelan modelleme vb.) PSInSAR tekniği tek başına yeterli olmadığı durumlarda, uydu tabanlı olmayan çalışmalara öncü çalışma olarak uygulanabilmektedir. Bazı durumlarda ise, uydu tabanlı olmayan çalışmalardan sonra teyit etmek veya ek bilgi almak amacıyla uygulanabilmektedir.

PSInSAR tekniğinin en önemli avantajlarından birisi geniş alanlara rahatlıkla uygulanabilmesidir. Bazı durumlarda, heyelanın belirlenmesi ve izlenmesi için uydu tabanlı olmayan çalışmalar zaman ve maliyet açısından çok yük getirmektedir. PSInSAR tekniği kullanılarak geniş alanların taranması, iyi tasarlanmış ve yönetilmiş bir çalışma ile zaman ve maliyet açısından çok önemli katkılar sağlayacaktır.

Heyelan belirleme ve izleme amacıyla araziye tesis edilecek ölçüm noktalarının sayısı genellikle iş gücü ve maliyet açısından değerlendirilerek belirlenir. PSInSAR tekniğinde ise böyle bir kısıtlama olmadan çok sayıda PS noktası elde edilmektedir.

8. KAYNAKLAR

- Arnaud, A., Adam, N., Hanssen, R., Inglada, J., Duro, J., Closa, J. ve Eineder, M., 2003. ASAR ERS interferometric phase continuity, IGARSS 2003 - 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Temmuz, Toulouse, 1133-1135.
- Arikan, M. ve Hanssen, R. F., 2008. Structural Deformation of the High Speed Line HSL Infrastructure in the Netherlands; Observations Using Satellite Radar Interferometry, 13th FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis-4th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, Mayıs, Lizbon.
- Bakon, M., Marchamalo, M., Qin, Y., García-Sánchez, A., Alvarez, S., Perissin, D., Papco, J. ve Martínez, R., 2016. Madrid as Seen from Sentinel-1: Preliminary Results, Procedia Computer Science, 100, 1155 – 1162.
- Bayer, B., Simoni, A., Mulas, M., Corsini, A. ve Schmidt, D., 2018. Deformation responses of slow moving landslides to seasonal rainfall in the Northern Apennines, measured by InSAR, Geomorphology, 308, 293 – 306.
- Beltran, L., Cruden, D. M., Krauter, E., Lefebvre, G., Ter-Stepanian, G. I. ve Zhouyuan, Z., 1993. Multilingual Landslide Glossary, BiTech Publishers, Richmond, Canada.
- 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.
- Bourbig, M., Johnsen, H. ve Piantanida, R., 2016. Sentinel-1 Product Definition, ESA.
- Casagli, N., Cigna, F., Bianchini, S., Hölbling, D., Füreder, P., Righini, G., Conte, S. D., Friedl, B., Schneiderbauer, S., Iasio, C., Vlcko, J., Greif, V., Proske, H., Granica, K., Falco, S., Lozzi, S., Mora, O., Arnaud, A., Novali, F. ve Bianchi, M., 2016. Landslide mapping and monitoring by using radar and optical remote sensing: Examples from the EC-FP7 project SAFER, Remote Sensing Applications: Society and Environment, 4, 92 – 108.
- Ciampalini, A., Raspini, F., Lagomarsino, D., Catani, F. ve Casagli, N., 2016. Landslide susceptibility map refinement using PSInSAR data, Remote Sensing of Environment, 184, 302 – 315.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C. ve Rocca, F., 2003. Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique, Engineering Geology, 68, 1-2, 3–14.
- Comut, F. C., 2016. Farklı Yeryüzü Özelliklerinde İleri InSAR Teknikleri Kullanılarak

Yüzey Deformasyonlarının Belirlenmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

- 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, IGARSS 2008 - 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Temmuz, Boston, 449-452.
- Costantini, M., Iodice, A., Magnapane, L. ve Pietranera, L., 2008. Monitoring terrain movements by means of sparse SAR differential interferometric measurements, IGARSS 2000 - IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Temmuz, Honolulu, 3225-3227.
- Crosetto, M., Arnaud, A., Duro, J., Biescas, E. ve Agudo, M., 2003. Deformation Monitoring Using Remotely Sensed Radar Interferometric Data, 11. FIG Symposium on Deformation Measurements, Mayıs, Santorini Adası.
- 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 & Remote Sensing, 74, 4, 443–450.
- Crosetto, M., Crippa, B. ve Biescas, E., 2005. Early detection and in-depth analysis of deformation phenomena by radar interferometry, Engineering Geology, 79, 1-2, 81–91.
- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthery, N. ve Crippa, B., 2016. Persistent Scatterer Interferometry: A review, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 115, 78–89.
- Cruden, D. M. ve Varnes, D. J., 1996. Landslide Types and Processes. Landslides Investigation and Mitigation, Special Report, National Research Council, 247, 76.
- Curlander, J. C., 1982. Geometric and Radimetric Distortion in Spaceborn SAR Imagery, USA Workshop for Registration/Rectification for Terrestrial Applications, Kasım, Virginia, 163-197.
- Curlander, J. C. ve McDonough, R. N., 1991. Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing, Wiley, New York, USA.
- Czikhart, R., Papčo, J. ve Bakoň, M., 2018. Feasibility of the Sentinel-1 Multi-temporal InSAR system based on the SNAP and StaMPS: Case study from the Tatra Mts., Slovakia, Procedia Computer Science, 138, 366 – 373.
- Devanthery, N., Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M. ve Crippa, B., 2014. An Approach to Persistent Scatterer Interferometry, Remote Sensing, 6, 7, 6662–6679.
- Dias, P., Catalao, J. ve Marques, F. O., 2018. Sentinel-1 InSAR data applied to surface deformation in Macaronesia (Canaries and Cape Verde),

Procedia Computer Science, 138, 382 – 387.

- Duro, J., Inglada, J., Closa, J., Adam, N. ve Arnaud, A., 2004. High Resolution Differential Interferometry using Time Series of ERS and Envisat SAR Data, Envisat & ERS Symposium (ESA SP-572), Eylül, Salzburg.
- Ersoy, H., Gelişli, K., Bayraktar, A., Öztürk, H. H., Seçkin, A. C., Karabrahimoğlu, G., Sağır, G., Özen, M., Tezel, K., Yüregir, B. ve Yahşi, B. K., 2015. Havuzlu Paleo-Heyelanının (Yusufeli, Artvin) Mühendislik Jeolojisi Açısından İncelenmesi, Ulusal Mühendislik Jeolojisi Sempozyumu, Eylül, Trabzon, 90-97.
- Farina, P., Colombo, D., Fumagalli, A., Marks, F. ve Moretti, S., 2006. Permanent Scatterers for landslide investigations: outcomes from the ESA-SLAM project, Engineering Geology, 88, 3, 200 – 217.
- Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F. ve Rucci, A., 2011. 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. ve Rocca, F., 2007. InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation, ESA Publications, Noordwijk, The Netherlands.
- 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.
- Fletcher, K., 2012. Sentinel-1 ESA's Radar Observatory Mission for GMES Operational Services, ESA Communications, Noordwijk, The Netherlands.
- 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, B7, 9183–9191.
- Goel, K. ve Adam, N., 2014. A Distributed Scatterer Interferometry Approach for Precision Monitoring of Known Surface Deformation Phenomena, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 52, 9, 5454–5468.
- Gökçe, O., Özden, S. ve Demir, A., 2008. Türkiye'de Afetlerin Mekansal ve İstatistiksel Dağılımı Afet Bölgeleri Envanteri, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Hanssen, R. F., 2001. Radar Interferometry, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Hertz, H., 1893. Electric Waves: Being Researches on the Propagation of Electric Action with Finite Velocity Through Space, Macmillan, London, England.

- Hetland, E. A., Musé, P., Simons, M., Lin, Y. N., Agram, P. S. ve DiCaprio, C. J., 2012. Multiscale InSAR Time Series (MInTS) analysis of surface deformation, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 117, B2.
- Hooper, A., Bekaert, D., Hussain, E. ve Spaans, K., 2018. StaMPS/MTI Manual, School of Earth and Environment University of Leeds.
- Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K. ve Arıkan, M., 2012. Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation, Tectonophysics, 514-517, 1 – 13.
- 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, 112, B7.
- 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.
- Hooper, A. ve Zebker, H. A., 2007. Phase unwrapping in three dimensions with application to InSAR time series, J. Opt. Soc. Am. A, 24, 9, 2737–2747.
- Höser, T., 2018. Analysing the Capabilities and Limitations of InSAR using Sentinel-1 Data for Landslide Detection and Monitoring, MSc Thesis, Bonn University, Bonn.
- Jackson, C. R. ve Apel, J. R., 2004. Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual, National Environmental Satellite, Data and Information Service, Washington, USA.
- Jung, H. C., Kim, S.-W., Jung, H.-S., Min, K. D. ve Won, J.-S., 2007. Satellite observation of coal mining subsidence by persistent scatterer analysis, Engineering Geology, 92, 1, 1 – 13.
- Kampes, B., 2005. Displacement parameter estimation using permanent scatterer interferometry, PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft.
- Kampes, B. M., 2006. Radar Interferometry Persistent Scatterer Technique, Springer, Dordrecht, The Netherlands.
- Kırbaçoğlu, S. E. ve Yağız, M., 2018. Artvin İli Şavşat İlçesi Armutlu ve Yeniköy Mahallelerindeki AJE alanlarının İmar Planına Esas Jeolojik-Jeoteknik Etüt Raporu, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Mekansal Planlama Genel Müdürlüğü.
- Lagios, E., Sakkas, V., Novali, F., Bellotti, F., Ferretti, A., Vlachou, K. ve Dietrich, V., 2013. SqueeSAR™ and GPS ground deformation monitoring of Santorini Volcano (1992–2012): Tectonic implications, Tectonophysics, 594, 38 – 59.
- Lauknes, T. R., 2004. Long-term surface deformation mapping using small-baseline differential SAR interferograms, MSc Thesis, University of Tromsø, Tromsø.
- López-Quiroz, P., Doin, M.-P., Tupin, F., Briole, P. ve Nicolas, J.-M., 2009. Time

- series analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry, Journal of Applied Geophysics, 69, 1, 1–15.
- Lv, X., Yazici, B., Zeghal, M., Bennett, V. ve Abdoun, T., 2014. Joint-Scatterer Processing for Time-Series InSAR, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 52, 11, 7205–7221.
- Massironi, M., Zampieri, D., Bianchi, M., Schiavo, A. ve Franceschini, A., 2009. Use of PSInSAR™ data to infer active tectonics: Clues on the differential uplift across the Giudicarie belt (Central-Eastern Alps, Italy), Tectonophysics, 476, 1, 297 – 303.
- 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.
- Mateos, R. M., Ezquerro, P., Luque-Espinar, J. A., Béjar-Pizarro, M., Notti, D., Azañón, J. M., Montserrat, O., Herrera, G., Fernández-Chacón, F., Peinado, T., Galve, J. P., Pérez-Peña, V., Fernández-Merodo, J. A. ve Jiménez, J., 2017. Multiband PSInSAR and long-period monitoring of land subsidence in a strategic detrital aquifer (Vega de Granada, SE Spain): An approach to support management decisions, Journal of Hydrology, 553, 71 – 87.
- Maxwell, J. C., 1865. A dynamical theory of the electromagnetic field, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 155, 459–513.
- Meisina, C., Zucca, F., Fossati, D., Ceriani, M. ve Allievi, J., 2006. Ground deformation monitoring by using the Permanent Scatterers Technique: The example of the Oltrepo Pavese (Lombardia, Italy), Engineering Geology, 88, 3, 240 – 259.
- Melek, S., 1988. Şavşat (Artvin) Jeolojik Etüt Raporu, İller Bankası 17. Bölge Müdürlüğü.
- Mora, O., Mallorqui, J. ve Broquetas, A., 2003. Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric sar images, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41, 10, 2243–2253.
- Nahli, A., Simonetto, E., Merrien-Soukatchoff, V., Durand, F. ve Rangeard, D., 2018. Sentinel-1 for monitoring tunnel excavations in Rennes, France, Procedia Computer Science, 138, 393 – 400.
- Oktay, F., Danacı, M. A. ve Biçer, C. T., 2015. Heyelan-Kaya Düşmesi Temel Kılavuz, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- Osmanoğlu, B., Sunar, F., Wdowinski, S. ve Cabral-Cano, E., 2016. Time series analysis of InSAR data: Methods and trends, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 115, 90–102.
- Ozkan, F., Manga, M. M. ve Yılmaz, F. M., 2015. Artvin İli Şavşat İlçesine ait İmar Planına Esas Jeolojik-Jeoteknik Etüt Raporu, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Mekansal Planlama Genel Müdürlüğü.

- Perissin, D. ve Wang, T., 2012. Repeat-Pass SAR Interferometry With Partially Coherent Targets, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 50, 1, 271–280.
- Perski, Z., Hanssen, R., Wojcik, A. ve Wojciechowski, T., 2009. InSAR analyses of terrain deformation near the Wieliczka Salt Mine, Poland, Engineering Geology, 106, 1, 58 – 67.
- Pinel, V., Poland, M. ve Hooper, A., 2014. Volcanology: Lessons learned from Synthetic Aperture Radar imagery, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 289, 81 – 113.
- Plank, S., 2014. Rapid Damage Assessment by Means of Multi-Temporal SAR - A Comprehensive Review and Outlook to Sentinel-1, Remote Sensing, 6, 6, 4870–4906.
- Pozar, D. M., 2004. Microwave Engineering, Wiley.
- Raspini, F., Loupasakis, C., Rozos, D., Adam, N. ve Moretti, S., 2014. Ground subsidence phenomena in the Delta municipality region (Northern Greece): Geotechnical modeling and validation with Persistent Scatterer Interferometry, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 28, 78 – 89.
- Rosen, P., Hensley, S., Joughin, I., Li, F., Madsen, S., Rodriguez, E. ve Goldstein, R., 2000. Synthetic aperture radar interferometry, Proceedings of the IEEE, 88, 3, 333–382.
- Sandwell, D., Mellors, R., Tong, X., Wei, M. ve Wessel, P., 2011. GMTSAR: An InSAR Processing System Based on Generic Mapping Tools.
- Scaioni, M., Longoni, L., Melillo, V. ve Papini, M., 2014. Remote Sensing for Landslide Investigations: An Overview of Recent Achievements and Perspectives, Remote Sensing, 6, 10, 9600–9652.
- Schlögel, R., Doubre, C., Malet, J.-P. ve Masson, F., 2015. Landslide deformation monitoring with ALOS/PALSAR imagery: A D-InSAR geomorphological interpretation method, Geomorphology, 231, 314–330.
- Schmidt, D. A. ve Bürgmann, R., 2003. Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 108, B9.
- Simons, M. ve Rosen, P., 2007. Interferometric Synthetic Aperture Radar Geodesy: Treatise on Geophysics, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Singhroy, V., Mattar, K. ve Gray, A., 1998. Landslide characterisation in Canada using interferometric SAR and combined SAR and TM images, Advances in Space Research, 21, 3, 465 – 476.

- Soeters, R. ve Westen, C., 1996. Transportation Research Board, National Research Council, Special Report: Slope instability Recognition, analysis and zonation, National Academy Press, Washington, USA.
- Tamburini, A., Bianchi, M., Giannico, C. ve Novali, F., 2010. Retrieving surface deformation by PSInSAR™ technology: A powerful tool in reservoir monitoring, International Journal of Greenhouse Gas Control, 4, 6, 928 – 937.
- Tural, S., 2011. Gerçek Zamanlı Meteoroloji Verilerinin Toplanması, Analizi ve Haritalanması, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- URL-1, <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-eo-missions/ers/mission-summary> Mission Summary. 2 Ocak 2019.
- URL-2, https://www.dlr.de/dlr/en/desktopdefault.aspx/tabid-10377/565_read-436/#/gallery/350 TerraSAR-X. 5 Ocak 2019.
- URL-3, <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/t/terrasar-x> TSX (TerraSAR-X) Mission. 20 Mart 2019.
- URL-4, <http://global.jaxa.jp/projects/sat/alos/> Advanced Land Observing Satellite "DAICHI" (ALOS). 5 Ocak 2019.
- URL-5, <http://global.jaxa.jp/projects/sat/alos2/> Advanced Land Observing Satellite-2 "DAICHI-2" (ALOS-2). 5 Ocak 2019.
- URL-6, <https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/about-palsar/> About ALOS PALSAR. 20 Mart 2019.
- URL-7, <http://www.cosmo-skymed.it/en/index.htm> About COSMO-SkyMed. 5 Ocak 2019.
- URL-8, <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/cosmo-skymed> COSMO-SkyMed. 20 Mart 2019.
- URL-9, <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes/interferometric-wide-swath> Interferometric Wide Swath. 13 Kasım 2018.
- URL-10, <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/product-overview/interferometry> Interferometry. 13 Mart 2019.
- URL-11, https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/ers/instruments/sar/applications/radar-courses/content-2/-/asset_publisher/qIBc6NYRXfnG/content/radar-course-2-synthetic-aperture-radar Radar Course 2: Synthetic Aperture Radar (SAR). 15 Ekim 2018.
- URL-12, <https://earth.esa.int/handbooks/asar/CNTR5-5.html> Geometry Glossary. 13 Mart 2019.

- URL-13, <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> Copernicus Open Access Hub. 20 Haziran 2018.
- URL-14, <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/> Alaska Satellite Facility's data portal. 25 Haziran 2018.
- Van Leijen, F., 2014. Persistent Scatterer Interferometry based on geodetic estimation theory, PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft.
- Varnes, D. J., 1958. Landslides and engineering practice: Landslide types and processes, National Research Council, Washington, USA.
- Vilardo, G., Ventura, G., Terranova, C., Matano, F. ve Nardò, S., 2009. Ground deformation due to tectonic, hydrothermal, gravity, hydrogeological, and anthropic processes in the Campania Region (Southern Italy) from Permanent Scatterers Synthetic Aperture Radar Interferometry, Remote Sensing of Environment, 113, 1, 197 – 212.
- Wasowski, J. ve Bovenga, F., 2014. Investigating landslides and unstable slopes with satellite Multi Temporal Interferometry: Current issues and future perspectives, Engineering Geology, 174, 103–138.
- Werner, C., Wegmuller, U., Strozzi, T. ve Wiesmann, A., 2003. Interferometric Point Target Analysis for Deformation Mapping, IGARSS 2003 - 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Temmuz, Toulouse, 4362-4364.
- Yaprak, S. ve Arslan, E., 2008. Kriging Yöntemi ve Geoit Yüksekliklerinin Enterpolasyonu, Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi, 98, 36 – 42.
- Yonezawa, C., Watanabe, M. ve Saito, G., 2012. Polarimetric Decomposition Analysis of ALOS PALSAR Observation Data before and after a Landslide Event, Remote Sensing, 4, 8, 2314–2328.
- Zebker, H. A. ve Goldstein, R. M., 1986. Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations, Journal of Geophysical Research, 91, B5, 4993.
- Zhang, L., Lu, Z., Ding, X., sup Jung, H., Feng, G. ve Lee, C.-W., 2012. Mapping ground surface deformation using temporarily coherent point SAR interferometry: Application to Los Angeles Basin, Remote Sensing of Environment, 117, 429 – 439.

ÖZGEÇMİŞ

Bülent Volkan YAZICI, 03/09/1984 tarihinde Artvin’de doğmuştur. İlkokul öğrenimini Artvin Mehmetçik İlkokulunda, orta öğrenimini Artvin Gazi İlköğretim Okulunda ve lise öğrenimini Artvin Yabancı Dil Ağırlıklı Lisede tamamlamıştır. 2008 yılında Balıkesir Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesinden Jeoloji Mühendisi olarak mezun olmuştur. 2016-2017 eğitim öğretim yılında Karadeniz Üniversitesi Harita Mühendisliği Ana Bilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başlamıştır. Meslek hayatına Sarıgözel Barajı ve HES projesinde çalışarak başlamış, Deriner Barajı ve HES projesiyle devam etmiştir. Daha sonra özel bir firmada, mesleki raporların hazırlanması (zemin etüt raporu, imar planına esas jeolojik-jeoteknik etüt raporu, mühendislik jeolojisi raporu, karayolu güzergah raporu, araştırma raporu), yerleşime uygunluk değerlendirmeleri, heyelan ve duraylılık analizleri, zemin ve kaya deneyleri ve sınıflandırmaları, zemin iyileştirme ve enjeksiyon uygulamaları, HES danışmanlığı ve proje işlerinin yürütülmesi gibi konularda çalışmalar yapmış olup halen daha aynı firmada çalışmaktadır. İngilizce bilmektedir.