

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ISLAH ARAZİLERİNDE İNŞAA EDİLEN MÜHENDİSLİK YAPILARINDA
OLUŞAN DEFORMASYONLARIN TESPİTİNDE PSI VE SBAS MT-INSAR
TEKNİKLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ: HATAY HAVALİMANI
ÖRNEĞİ

GEOMATİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

MAHMUT GÖRKEN

EYLÜL 2024

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ISLAH ARAZİLERİNDE İNŞAA EDİLEN MÜHENDİSLİK YAPILARINDA
OLUŞAN DEFORMASYONLARIN TESPİTİNDE PSI VE SBAS MT-INSAR
TEKNİKLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ: HATAY HAVALİMANI
ÖRNEĞİ

GEOMATİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

Mahmut GÖRKEN

DANIŞMAN: Prof. Dr. Umut Güneş SEFERCİK

ZONGULDAK

Eylül 2024

KABUL:

Mahmut GÖRKEN tarafından hazırlanan “İslah Arazilerinde İnşaa Edilen Mühendislik Yapılarında Oluşan Deformasyonların Tespitinde PSI ve SBAS MT-InSAR Tekniklerinin Karşılaştırmalı Analizi: Hatay Havalimanı Örneği” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 09/09/2024

Danışman: Prof. Dr. Umut Güneş SEFERCİK
Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü

Üye: Prof. Dr. Ayhan ATEŞOĞLU
Bartın Üniversitesi, Bartın Orman Fakültesi, Orman Mühendisliği Bölümü

Üye: Prof. Dr. Mehmet ALKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü

Üye: Doç. Dr. Hakan AKÇIN
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü

Üye: Dr. Öğr. Üyesi K. Sedar GÖRMÜŞ
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım./....../20....

Prof. Dr. Fikret GÖLGELEYEN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Mahmut GÖRKEN

ÖZET

Doktora Tezi

ISLAH ARAZİLERİNDE İNŞAA EDİLEN MÜHENDİSLİK YAPILARINDA OLUŞAN DEFORMASYONLARIN TESPİTİNDE PSI VE SBAS MT-INSAR TEKNİKLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ: HATAY HAVALİMANI ÖRNEĞİ

Mahmut GÖRKEN

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Umut Güneş SEFERCİK

Eylül 2024, 117 sayfa

Hızlı nüfus artışı ile birlikte ortaya çıkan yeni yaşam alanı ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla ıslah edilen araziler üzerine mühendislik yapıları inşa edilmektedir. Islah arazilerinin toprak yapılarındaki gevşeklik ve heterojenlik, bu araziler üzerine inşa edilen büyük mühendislik yapılarında daha kolay deformasyon oluşumuna sebebiyet verebilmektedir. Bu yapılarda oluşan deformasyonların tespiti ve takibi oldukça önemlidir. Bu tez çalışmasında, ıslah edilmiş bir arazi üzerine kurulmuş olan Hatay Havalimanı'nda oluşan deformasyonların Çok Zamanlı İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar (MT-InSAR) teknikleri ile tespiti, izlenmesi ve bu tekniklerin birbirleri ile karşılaştırmalı analizleri yoluyla uyum seviyelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, dünya genelinde deformasyon tespitinde en yoğun şekilde tercih edilen PSI ve SBAS MT-InSAR teknikleri kullanılmıştır. Bu teknikler, deformasyon tespitinde milimetre mertebesine varan hassasiyette sonuçlar sunabilme yeteneğine sahiptir. Çalışma

ÖZET (devam ediyor)

kapsamında, Aralık 2017-Ocak 2023 tarih aralığını kapsayan süreçte 151 adet Sentinel-1A yapay açıklıklı radar (SAR) uydu görüntüsü kullanılmıştır.

Gerçekleştirilen PSI ve SBAS analizleri sonucunda Hatay Havalimanı'nda 2017-2023 yılları arasındaki süreçte oluşan deformasyonların hız ve miktarlarını yansıtan istatistiki sonuçlar ve haritalar üretilmiştir. SBAS analizleri lineer, lineer periyodik, kuadratik ve kübik olmak üzere dört farklı deformasyon hesaplama modeli ile gerçekleştirilmiştir. PSI ile elde edilen sonuçlara göre havalimanında uydu bakış doğrultusunda (LOS) yıllık ortalama -6.25-9.02 arasında bir deformasyon hızı tespit edilmiştir. SBAS sonuçlarında ise LOS yönünde lineer deformasyon modelinde yıllık ortalama -18.70-9.95, lineer periyodik modelde -17.97-8.77, kuadratik modelde -35.22-11.30 ve kübik modelde -32.46-11.90 arasında deformasyon hızı saptanmıştır. Sonuçlar irdelendiğinde, PSI ve SBAS deformasyon haritalarının büyük ölçüde uyum sağladığı ortaya çıkmıştır.

SBAS yöntemi temelinde lineer, lineer periyodik, kuadratik ve kübik deformasyon hesaplama modelleri ile üretilen düşey deformasyon haritaları ve bu haritaların birbirlerine göre korelasyonunu detaylı olarak açıklayan istatistiki değerler, histogramlar ve fark haritaları oluşturulmuştur. Bu modellerden hesaplanan deformasyon miktarları arasındaki farkların standart sapmasının $\pm 6-18$ mm arasında olduğu ve bölgesel farkların ise ± 42 mm'ye kadar ulaştığı tespit edilmiştir. Yapılan analizler neticesinde SBAS yöntemi ile deformasyon haritası üretiminde lineer periyodik modelin lineer, kuadratik ve kübik modeller ile dikkate değer farklılıklar gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: MT-InSAR, PSI, SBAS, deformasyon, havalimanı, ıslah arazisi

Bilim Kodu: 616.02.04

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

COMPARATIVE ANALYSIS OF PSI AND SBAS MT-INSAR TECHNIQUES IN DETECTING DEFORMATIONS IN ENGINEERING STRUCTURES CONSTRUCTED ON RECLAIMED LAND: CASE STUDY HATAY AIRPORT

Mahmut GÖRKEN

**Zonguldak Bülent Ecevit University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Geomatic Engineering**

Thesis Advisor: Prof. Dr. Umut Güneş SEFERCİK

September 2024, 117 pages

In order to meet the new living space needs that emerged with the rapid population growth, engineering structures are being constructed on reclaimed lands. The looseness in the soil structures of reclaimed lands can cause deformations in the structures built on these lands. Detection and monitoring of the deformations in these structures are very important. In this thesis study, the aim is to detect and monitor the deformations in Hatay Airport, which was built on reclaimed land, using MT-InSAR techniques and to make comparative analyzes of these techniques. PSI and SBAS MT-InSAR techniques were used in the study. These techniques provide results down to millimeters in deformation detection. Within the scope of the study, 151 Sentinel 1A satellite images were used in the period of December 2017-January 2023. As a result of the PSI and SBAS analyses, maps showing the average line-of-sight (LOS) deformation velocities occurring at Hatay Airport between 2017 and 2023 were produced. SBAS analyses were performed with four different deformation calculation models: linear, linear periodic, quad, and cubic.

ABSTRACT (continued)

According to the results obtained with PSI, an average deformation velocity between -6.25 and 9.02 occurred in the LOS direction at the airport. In the SBAS results, average deformation velocities between -18.70 and 9.95 occurred in the linear deformation model in the LOS direction, -17.97 and 8.77 in the linear periodic, -35.22 and 11.30 in the quad and -32.46 and 11.90 in the cubic. When the results were examined, it was concluded that the PSI and SBAS average LOS deformation velocity maps were in good agreement to a large extent.

Based on the SBAS method, vertical deformation maps produced with linear, linear periodic, quad, and cubic deformation calculation models and statistical values, histograms, and difference maps explaining the correlation of these maps with each other in detail were created. It was determined that the standard deviation of the vertical deformation maps produced from these models was $\pm 6-18$ and the differences reached up to ± 42 mm. As a result of the analyses, it was concluded that the linear periodic model showed significant differences with the linear, quad and cubic models in the production of deformation maps with the SBAS method.

Keywords: MT-InSAR, PSI, SBAS, deformation, airport, reclaimed land

Science Code: 616.02.04

TEŞEKKÜR

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi'nde lisans eğitimime başladığım andan itibaren desteğini esirgemeyen, yüksek lisans ve doktora sürecimde danışmanlığımı üstlenerek karşılaştığım zorlukları aşmamda yanımda olan ve akademik hayatım boyunca bilgi ve birikiminden faydalandığım ve faydalanmaya devam edeceğim çok değerli Prof. Dr. Umut Güneş SEFERCİK hocama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince Gebze Teknik Üniversitesi'nde gerçekleştirdiğimiz analizlerde sağlamış olduğu desteklerden dolayı değerli kardeşim Arş. Gör. Mertcan NAZAR'a ve hem yüksek lisans hem de doktora eğitimim boyunca vermiş olduğu desteklerden dolayı Arş Gör. Can ATALAY'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince vermiş oldukları desteklerden dolayı tez izleme komite üyeleri Prof. Dr. Ayhan ATEŞOĞLU ve Doç. Dr. Hakan AKÇIN hocalarıma, eğitim hayatım boyunca bana destek olan tüm hocalarıma ve çalışmalarım sırasında manevi desteklerini esirgemeyen tüm dost ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Hayatımın her anında bana yol gösteren, hayatım boyunca maddi ve manevi olarak beni destekleyen anne ve babama, hayatımın her aşamasında destekleri ile yanımda olan ablam abilerim ve kardeşime şükranlarımı sunuyorum.

Zorlu doktora sürecim boyunca vermiş olduğu destek, motivasyon ve tez çalışmam boyunca gerek yaptığım seyahatlerden gerekse uzun çalışma periyotlarımdan dolayı göstermiş olduğu sabır ve anlayıştan dolayı sevgili eşim Öğr. Gör. Dr. Kübra SAĞLAM GÖRKEN'e ve tez sürecimin son dönemine şahit olan varlığı ile bana güç veren biricik oğlum Yusuf Eymen GÖRKEN'e sonsuz teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL:	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
EK AÇIKLAMALAR DİZİNİ.....	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xix
 BÖLÜM 1 GİRİŞ.....	 1
1.1 MOTİVASYON	1
1.2 ÇALIŞMANIN ÖNEMİ	2
1.3 ÇALIŞMANIN YAPISI	3
 BÖLÜM 2 İNTERFEROMETRİK YAPAY AÇIKLIKLI RADAR TEKNOLOJİSİNİN TEMELLERİ.....	 5
2.1 UZAY KAYNAKLI UZAKTAN ALGILAMA TEKNOLOJİLERİ.....	5
2.1.1 Uzay Kaynaklı Optik Görüntüleme	7
2.1.2 Uzay Kaynaklı Radar Görüntüleme	10
2.2 İNTERFEROMETRİK YAPAY AÇIKLIKLI RADAR TEKNOLOJİSİ.....	19
2.2.1 InSAR Veri Alım Geometrisi ve Temel Formülleri	20
2.2.2 Tek Geçişli InSAR Tekniği	22

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
2.2.3 Çift (Tekrarlı) Geçişli InSAR Tekniği	23
2.2.4 DInSAR Tekniği ile Deformasyon Tespiti	23
2.2.5 MT-InSAR PSI Tekniği ile Deformasyon Tespiti	25
2.2.6 MT-InSAR SBAS Tekniği ile Deformasyon Tespiti	26
2.2.7 Diğer Çok Zamanlı InSAR Teknikleri ile Deformasyon Tespiti	28
 BÖLÜM 3 ÇALIŞMA ALANI VE MATERYELLER	 31
3.1 ÇALIŞMA ALANININ KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLERİ	31
3.2 KULLANILAN MATERYELLER	34
3.2.1 Sentinel-1 SAR Uydu Görüntüleri	34
3.2.2 Hatay Havalimanı Metrik Verileri	35
3.3 KULLANILAN YAZILIMLAR	36
3.3.1 SNAP Sentinel ToolBox	36
3.3.2 StaMPS	37
3.3.3 ENVI SARscape	37
3.3.4 Diğer Yazılımlar	37
 BÖLÜM 4 METODOLOJİ	 39
4.1 SENTİNEL-1 VERİLERİNİN ELDE EDİLMESİ	39
4.1.1 Veri Kümesi Tayini	39
4.1.2 Verilerin Temini	40
4.2 DEFORMASYON HARİTALARININ ÜRETİMİ	40
4.2.1 PSI Tekniği ile Üretim İşlemleri	48
4.2.2 SBAS Tekniği ile Üretim İşlemleri	54
4.3 DEFORMASYON HARİTALARININ DEĞERLENDİRMELERİ	58
4.3.1 Çevresel ve Meteorolojik Verilere Göre Değerlendirmeler	58
4.3.2 PSI- SBAS Deformasyon Haritaları Uyum Değerlendirmeleri	64

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 5 BULGULAR.....	67
5.1 ÜRETİLEN DEFORMASYON HARİTALARI.....	67
5.1.1 PSI Deformasyon Haritaları.....	67
5.1.2 SBAS Deformasyon Haritaları	72
5.2 DEFORMASYON HARİTALARININ DEĞERLENDİRME BULGULARI	76
5.2.1 Çevresel ve Meteorolojik Verilere Göre Değerlendirme Bulguları.....	76
5.2.2 PSI- SBAS Deformasyon Haritaları Uyum Değerlendirme Bulguları	79
BÖLÜM 6 SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	87
KAYNAKLAR.....	91
EK AÇIKLAMALAR	101
ÖZGEÇMİŞ	117



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Algılama sistemleri.	6
Şekil 2.2 Elektromanyetik spektrum	6
Şekil 2.3 Uzay kaynaklı optik görüntüleme (pasif algılama) sistemi	7
Şekil 2.4 Enerjinin dijital formu olan görsel ürün.....	8
Şekil 2.5 Radar sistemlerin çalışma prensibi	11
Şekil 2.6 Uzay kaynaklı radar görüntüleme (aktif algılama) sistemi.	12
Şekil 2.7 Doppler radarın çalışma prensibi.	12
Şekil 2.8 Düzlemsel Göstergeli Radar'ın çalışma prensibi.....	13
Şekil 2.9 Yan Bakışlı Radar (SLC) geometrisi.	14
Şekil 2.10 SLR sisteminde mesafe çözünürlüğü.	15
Şekil 2.11 Optik ve SAR tekniklerinin görüntüleme geometrileri arasındaki fark.	16
Şekil 2.12 SAR sisteminin distorsiyon geometrisi.....	17
Şekil 2.13 InSAR veri alım geometrisi	20
Şekil 2.14 Interferogram (Fringe map)	22
Şekil 2.15 Tek geçişli InSAR tekniğinin çalışma prensibi.....	22
Şekil 2.16 Çift geçişli InSAR tekniğinin çalışma prensibi.....	23
Şekil 3.2 Çalışma alanının sınırlarını gösteren Google Earth görüntüsü.	32
Şekil 3.3 Çalışma alanının jeoloji haritası.....	33
Şekil 4.1 Görüntülere ait kapsama alanı ve ön izlemesi.	40
Şekil 4.2 DInSAR tekniği ile deformasyon haritalarının üretilmesine ait işlem adımları.	41
Şekil 4.3 Faz açma prensibi.....	47
Şekil 4.4 PSI tekniği ile deformasyon haritalarının üretilmesine ait işlem adımları.....	49
Şekil 4.5 SBAS tekniği ile deformasyon haritalarının oluşturulmasına ait işlem adımları.....	55
Şekil 4.6 Aylık ve yıllık Ortalama yağış grafiği	61
Şekil 4.7 Çalışma periyodu içerisindeki aylık ortalama sıcaklık grafiği.....	62
Şekil 4.8 Çalışma periyodu içerisindeki aylık ve yıllık ortalama sıcaklık grafiği	63

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.1 Veri kümesinin PSI uygulaması için seçilen master görüntüye göre zamansal ve dik baz masafeleri.....	68
Şekil 5.2 Çalışma alanı üzerinde ve çevresinde oluşan sürekli saçıcı noktalarının dağılımı... 69	
Şekil 5.3 PSI uygulaması ile Hatay Havalimanı ve çevresinde oluşan yıllık ortalama yer değiştirme hızı haritası.	70
Şekil 5.4 PSI uygulaması sonucunda oluşan yıllık ortalama yer değiştirme hızı haritası.....	71
Şekil 5.5 Veri kümesinin SBAS uygulaması için seçilen master görüntüye göre zamansal ve dik baz masafeleri.....	72
Şekil 5.6 Lineer modelleme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen SBAS uygulaması sonucunda LOS yönünde oluşan yıllık ortalama yer değiştirme hızı haritası.....	73
Şekil 5.7 Lineer Periyodik modelleme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen SBAS uygulaması sonucunda LOS yönünde oluşan yıllık ortalama yer değiştirme hızı haritası.	74
Şekil 5.8 Kübik modelleme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen SBAS uygulaması sonucunda LOS yönünde oluşan yıllık ortalama yer değiştirme hızı haritası.....	75
Şekil 5.9 Kuadratik modelleme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen SBAS uygulaması sonucunda LOS yönünde oluşan yıllık ortalama yer değiştirme hızı haritası.....	76
Şekil 5.10 Hatay Havalimanı'nın terminal binası ve çevresi.	77
Şekil 5.11 Havalimanının güneybatısında oluşan su göletinin zaman içerisindeki değişimi... 78	
Şekil 5.13 SBAS deformasyon noktaları: (a) lineer, (b) lineer periyodik, (c) kuadratik, (d) kübik.	81
Şekil 5.14 SBAS deformasyon haritaları: (a) lineer, (b) lineer periyodik, (c) kuadratik, (d) kübik.	82
Şekil 5.15 SBAS modellerinden üretilen deformasyon haritaları farklarının frekans ve standart sapma histogramları: (a) lineer-lineer periyodik, (b) lineer-kuadratik, (c) lineer-kübik, (d) lineer periyodik-kuadratik, (e) lineer periyodik-kübik, (f) kuadratik-kübik.	84
Şekil 5.16 SBAS modellerinden üretilen deformasyon farkı haritaları: (a) lineer-lineer periyodik, (b) lineer-kuadratik, (c) lineer-kübik, (d) lineer periyodik-kuadratik, (e) lineer periyodik-kübik, (f) kuadratik-kübik	85
Şekil B.1 Faz açma işlemi uygulanmış interferogram örneği.	115

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 Başlıca optik görüntüleme uydularının özellikleri.....	10
Çizelge 2.2 SAR bandları ve özellikleri.....	18
Çizelge 2.3 Başlıca SAR uyduları ve özellikleri.....	19
Çizelge 3.1 Sentinel-1A uydusunun teknik özellikleri.....	35
Çizelge 3.2 Hatay havalimanının genel bilgileri.	36
Çizelge 4.1 Veri kümesindeki SAR görüntülerinin özellikleri.	39
Çizelge 4.2 Hatay Havalimanı'na ait aylık ortalama yağış bilgileri.	60
Çizelge 4.3 Hatay Havalimanı'na ait aylık ortalama sıcaklık bilgisi.	62
Çizelge 5.1 SBAS deformasyon modelleri arasındaki korelasyon (REF= referans model, KM= Karşılaştırılan model, EB= Elemine edilen bias).	83
Çizelge A.1 Veri kümesinin master görüntü seçiminde dikkat edilen parametre bilgileri. ...	101



EK AÇIKLAMALAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
EK A: Çizelgeler	101
EK B: Şekiller	115





SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

ξ	: Deklinasyon
Δ	: Delta
α	: Alpha
β	: Beta
θ	: Theta
λ	: Lamda
μ	: Mu
π	: Pi
ρ	: Rho
σ	: Sigma
Σ	: Sigma
φ	: Phi
Ψ	: Roll

KISALTMALAR

ALOS	: Gelişmiş Kara Gözleme Uydu Sistemi
ALS	: Hava Kaynaklı Lazer Tarama
APS	: Atmosferik Faz Ekranı
CBS	: Coğrafi Bilgi Sistemi
CCD	: Charge-Coupled Device
CPT	: Coherent Pixels Technique
DInSAR	: Diferansiyel İnterferometrik Yapay Açıklı Radar
DS	: Distributed Scatterer

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

DYM	: Dijital Yüzey Modeli
EMR	: Elektromanyetik Radyasyon
ESA	: Avrupa Uzay Ajansı
GACOS	: Generic Atmospheric Correction Online Service
GMES	: Global Monitoring for Environment and Security
GNSS	: Küresel Konumlama Sistemi
InSAR	: İnterferometrik Yapay Açıklı Radar
IPTA	: Interferometric Point Target Analysis
IW	: İnterferometrik Geniş Tarama
KOH	: Karesel Ortalama Hata
MAD	: Medyan Mutlak Sapma
MCF	: Minimum Cost Flow
MERIS	: Medium Resolution Imaging Spectrometer
MODIS	: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MS	: Multi Spektral
MT-InSAR	: Çok Zamanlı İnterferometrik Yapay Açıklı Radar
NAD83	: National American Datum 1983
NASA	: Amerikan Ulusal Havacılık Uzay Dairesi
NIR	: Yakın Kızıl Ötesi
NMAD	: Normallendirilmiş Medyan Mutlak Sapma
PALSAR	: Phased Array Type L-Band Synthetic Aperture Radar
PAN	: Pankromatik
PPI	: Düzlemsel Göstergeli Radar
PRISM	: Panchromatic Remote Sensing Instrument For Stereo Mapping
PS	: Sürekli Saçıcılar
PSI	: Sürekli Saçıcılar İnterferometrisi
PSP	: Persistent Scatterer Pair
RADAR	: Radio Detection And Ranging
RAR	: Gerçek Açıklıklı Radar
S-1A	: Sentinel-1A
SAR	: Yapay Açıklıklı Radar

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

SBAS	: Small Baseline Subset
SCLA	: Mekansal Olarak Korele Bakış Açısı
SLC	: Single Look Complex
SLR/SLAR	: Yan Bakışlı Radar
SNAP	: Sentinel Application Platform
SNAPHU	: Statistical-Cost Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping
SNR	: Sinyal-Gürültü Oranı
SPN	: Stable Point Network
SRTM	: Shuttle Radar Topography Mission
StaMPS	: Stanford Method for Persistent Scatterers
SVD	: Tekil Değer Ayrışımı
SWIR	: Kısa Dalga Kızıl Ötesi
SZ	: Standard Sapma
YKN	: Yer Kontrol Noktası



BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 MOTİVASYON

1712 yılında meydana gelen sanayi devriminden sonra endüstrinin gelişimine paralel olarak dünya nüfusu hızla artmıştır (Derya 2018). Birinci sanayi devriminde 1 milyar civarında olan dünya nüfusu ikinci sanayi devriminde 2 milyara yaklaşmıştır. İkinci dünya savaşından sonra başlayan endüstri 3.0 ile birlikte dünya nüfusu artmaya devam ederek yaklaşık 3 milyara ulaşmıştır. Günümüze geldiğimizde endüstri 4.0 ile birlikte dünya nüfusu 8 milyar olmuştur. Dünya nüfusundaki ve sanayi gelişimindeki bu hızlı artışla beraber sosyal ve ekonomik refah gibi faktörlerin de etkisiyle kentleşme hızı da artmaya başlamıştır. Kentleşmede gerçekleşen bu hızlı artış kentlerde yaşayan nüfus sayısını arttırmış ve yeni yaşam alanlarının oluşturulmasını tetiklemiştir. Buda topografyada önemli değişimler meydana getirmektedir (Martín et al. 2016). Vadilerin doldurulması, tepelerin düzleştirilmesi, sulak alanların kurutulması gibi değişimler topografik yapıyı değiştiren başlıca etmenlerdir. Bu değişimler içerisinde sulak alanların kurutulması sonucunda ortaya çıkan alanlar tarım, ulaşım, sosyal alan gibi birçok amaçla kullanılmaktadır. Islah edilen bu yerlerde amaçlanan yaşam alanlarının oluşturulabilmesi için köprü, tünel, havalimanı gibi büyük mühendislik yapıları inşa edilmektedir. İnşa edilen bu yapılarda çevresel ve meteorolojik etkilerden dolayı zamanla deformasyonlar meydana gelmektedir. Bu deformasyonların büyük yıkımlara sebep olmaması için takibi, izlenmesi ve tespiti oldukça önemlidir (Shi et al. 2023).

Büyük mühendislik yapılarında meydana gelen deformasyonların tespiti ve analizi için birçok mühendislik disiplininde farklı ölçme ve izleme teknikleri geliştirilmiştir. Bu kapsamda harita mühendisliği alanında yersel ölçme ve uzaktan algılama yöntemleri ön plana çıkmaktadır. Yersel ölçme yöntemi zaman, iş gücü, donanım gibi dezavantajlarından dolayı pek fazla tercih edilmemektedir. Uzaktan algılama alanında sürekli yaşanan ilerlemeler yer kürenin daha kolay ve hızlı bir şekilde izlenmesini sağlamaktadır. Uzaktan algılama yöntemleri ile deformasyon tespitinde uygulanan en önemli teknik İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar (InSAR)

teknikidir (Sefercik 2013; Sefercik et al. 2020). İleri InSAR teknikleri, hızlı ve santimetre altında sonuç vermesinden dolayı gerek büyük mühendislik yapılarında meydana gelen deformasyonların tespitinde gerek yüzey deformasyonlarının tespitinde sıklıkla kullanılmaktadır (Lu et al. 2007). Bu tez çalışmasında ana motivasyonlarımızdan birincisi kurutularak ıslah edilen amik gölünün sınırları içerisine inşa edilen Hatay Havalimanı'nda 2017-2023 yılları arasında oluşan deformasyonu Çok Zamanlı InSAR (MT-InSAR) tekniklerini kullanarak belirlemek. İkincisi ise MT-InSAR PSI ve MT-InSAR SBAS teknikleri ile üretilen Hatay Havalimanı'na ait deformasyon haritalarının uyum değerlendirmelerini gerçekleştirerek birbirleri ile karşılaştırmaktır. Son motivasyon kaynağımız ise SBAS yöntemi temelinde lineer, lineer periyodik, kuadratik ve kübik deformasyon hesaplama modelleri ile üretilen düşey deformasyon haritaları ve bu haritaların birbirlerine göre korelasyonunu detaylı olarak ortaya koymaktır.

1.2 ÇALIŞMANIN ÖNEMİ

Havalimanları yalnızca ulaşım alanında değil, aynı zamanda ekonomi, turizm, kültürel ve sosyal etkileşim, acil durum ve insani yardım gibi birçok alanda önemli rol oynamaktadır. Tüm bu bileşenler düşünüldüğünde havalimanlarının çok önemli işlevlerinin olduğu görülmektedir (Jarach 2004). Havalimanları bulundukları bölgelerin jeolojik, meteorolojik ve çevresel özelliklerinden dolayı yıllar içerisinde deformasyona uğrayabilirler. Bu deformasyonların tespit edilip takip edilmesi havalimanlarının işlevlerinin aksamaması açısından oldukça önemlidir.

Bu tez çalışması kapsamında 1950 yılında kurutulmaya başlanan ve kademeli olarak 1970'li yıllarda tamamen kurutulan amik gölü sınırları içerisine inşa edilen Hatay Havalimanı'nın yıllar içerisinde oluşan deformasyon trendi analiz edilecektir. Havalimanının kurutulan ve alüvyonal bir toprak yapısına sahip olan bir zemin üzerine inşa edilmiştir. Bununla beraber bölgede yağış oranının yüksek olması neticesinde havalimanında su baskınları gerçekleşmektedir. Tüm bu faktörler düşünüldüğünde Türkiye'de en fazla deformasyona uğrayabilecek potansiyele sahip havalimanlarından olan Hatay Havalimanı'nın son teknolojik yöntemler ile takip edilmesi önem arz etmektedir.

Çeyrek asırdır her geçen gün popüleritesi artan MT-InSAR yöntemleri havalimanlarında deformasyon tespiti konusunda önemli ve güncel bir tekniktir. Bu kapsamda havalimanları ve diğer mühendislik yapıları üzerinde birçok bilimsel çalışma yapılmıştır. Ancak yapılan çalışmalar incelendiğinde çoğunlukla tekil yöntem kullanıldığı görülmüştür (Bao et al. 2022;

Gao et al. 2016; Jiang et al. 2016; Zhao et al. 2011). Bu çalışmaların aksine bu tez çalışmasında MT-InSAR PSI ve MT-InSAR SBAS yöntemleri ayrı ayrı uygulanmış olması literatüre önemli bir katkı sunacağı düşünülmektedir. Ayrıca yine yapılan bilimsel çalışmalar incelendiğinde gerek PSI gerekse SBAS uygulamalarından atmosferik, meteorolojik ve çevresel etkilerin genellikle ihmal edildiği görülmektedir. Yapılan bu çalışmada meteorolojik ve çevresel etkilerin dikkate alınmış olması ve özellikle MT-InSAR uygulamalarında oldukça önemli olan ve sonuçları ciddi bir şekilde etkileyen atmosferik etkilerin giderilmiş olması çalışmaya ayrı bir boyut kazandırmıştır.

Çalışmayı önemli kılan en büyük faktör ise lineer, lineer periyodik, kuadratik ve kübik deformasyon hesaplama modelleri ile üretilen deformasyon haritalarının birbirlerine göre istatistiksel olarak karşılaştırılarak analiz edilmesidir. Nitekim bu analizin literatüre yeni ve önemli bir kazanım getireceği düşünülmektedir.

1.3 ÇALIŞMANIN YAPISI

Tez giriş, interferometrik yapay açıklıklı radar teknolojisinin temelleri, çalışma alanı ve materyaller, metodoloji, bulgular, sonuç ve öneriler olmak üzere toplam altı ana bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde, giriş olarak çalışmanın motivasyonu, çalışmanın önemi ve çalışmanın yapısı verilmiştir.

İkinci bölümde, interferometrik yapay açıklıklı radar teknolojisinin temelleri kapsamında ilk olarak uzay kaynaklı uzaktan algılama teknolojileri olan optik ve radar görüntüleme verilmiştir. Daha sonra sırasıyla InSAR veri alım geometrisi ve temel formülleri, Diferansiyel InSAR (DInSAR) ve MT-InSAR teknikleri ile deformasyon tespiti geniş bir literatür taraması ile açıklanmıştır. Ayrıca diğer MT-InSAR teknikleri de bu bölümde verilmiştir.

Üçüncü bölümde, çalışma alanının karakteristik özellikleri, kullanılan materyaller, kullanılan yazılımlar verilmiştir. Bu kapsamda Sentinel-1 uydu görüntülerinin özellikleri, çalışma alanının metrik bilgileri ve kullanılan yazılımların hangi amaca hizmet ettiği açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde, metodoloji verilmiştir. Bu kapsamda tez çalışmasında kullanılan Sentinel-1 uydu görüntülerinin nasıl elde edildiği, MT-InSAR teknikleri ile deformasyon haritalarının üretim işlemleri açıklanmıştır. Ayrıca üretilen deformasyon haritalarının bir birleri ile olan uyum, çevresel ve meteorolojik açıdan değerlendirmeleri yapılmıştır.

Beşinci bölümde, MT-InSAR teknikleri ile oluşturulan deformasyon haritaları ve bu haritaların değerlendirme bulguları verilmiştir. Bulgular, PSI- SBAS deformasyon haritaları uyum değerlendirme bulguları ve çevresel-meteorolojik verilere göre değerlendirme bulguları olmak üzere iki başlık altında açıklanmıştır.

Altıncı bölümde, bulgular doğrultusunda sonuçlar açıklanmış ve tez sonucu kapsamında gerekli öneriler verilerek tez sonuçlandırılmıştır.



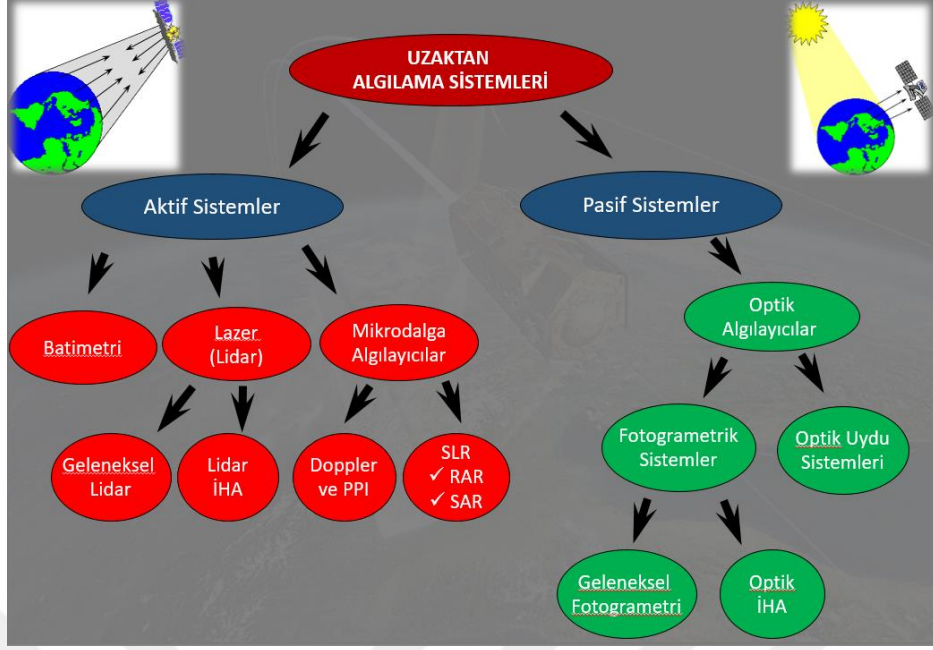
BÖLÜM 2

İNTERFEROMETRİK YAPAY AÇIKLIKLI RADAR TEKNOLOJİSİNİN TEMELLERİ

2.1 UZAY KAYNAKLI UZAKTAN ALGILAMA TEKNOLOJİLERİ

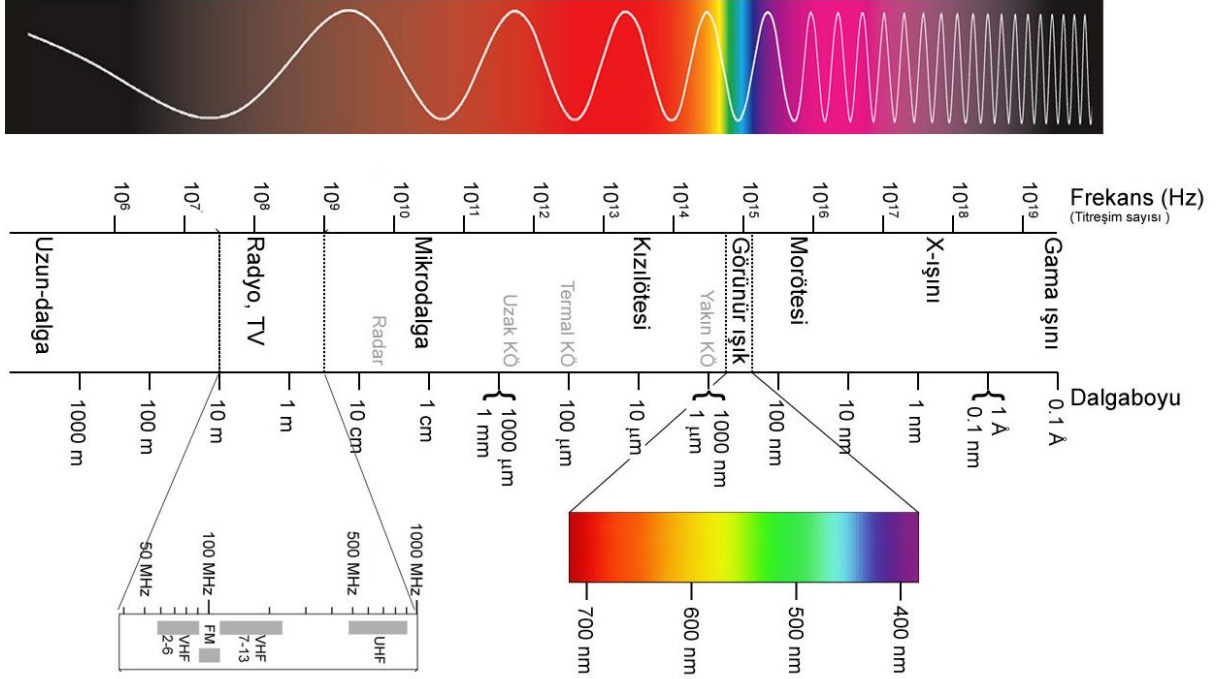
Uzaktan algılama, bir nesne veya obje ile yakın temas halinde olmadan ilgili nesnenin kimyasal veya fiziksel özellikleri hakkında bilgi edinilmesidir. Bu işlemi gerçekleştirirken kullanılan teknolojiye ise uzaktan algılama teknolojileri denilmektedir. Uzaktan algılama, uzay ve hava kaynaklı olmak üzere iki ana başlık altında incelenebilir. Hava kaynaklı uzaktan algılamada, bir hava aracı ile bir bölgenin veya herhangi bir nesnenin fotoğrafları çekilerek, lazer veya radar verileri alınarak bilgi elde edilmesidir. Uzay kaynaklı uzaktan algılamada ise bir yörüngede hareket eden bir uzay aracı üzerine yerleştirilmiş sensörler veya antenler yardımıyla bilgi çıkarımıdır. Uzay kaynaklı uzaktan algılamanın çözünürlüğü hava kaynaklı uzaktan algılamaya göre daha düşük olmasına karşın, teknolojinin gelişimi ile birlikte çözünürlüğü yüksek uydu sensörleri gelişmekte ve her geçen yıl daha iyi bir seviyeye gelmektedir. Ayrıca uzay kaynaklı uzaktan algılama teknolojisinin global çalışma imkanı, hızlı veri sunması, düşük maliyetli olması ve güçlü obje çıkarmaya olanak sağlaması bakımından oldukça üstün avantajları bulunmaktadır.

Uzaktan algılamanın en önemli parçalarından biri olan algılayıcılar, görüntüleme prensiplerine göre aktif algılayıcılar ve pasif algılayıcılar olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Kendi enerjisini kullanan algılayıcılar aktif algılayıcılar, enerjisini güneşten alan algılayıcılar ise pasif algılayıcılar şeklinde adlandırılmaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Algılama sistemleri.

Uzay kaynaklı uzaktan algılama araçları; elektromanyetik spektrumun görünür ve kızılötesi bölgesinde çalışan, pasif algılama sistemine sahip optik sensörler ve elektromanyetik spektrumun mikrodalga diliminde çalışan, aktif algılama prensibine sahip radar sensörleridir (Şekil 2.2).

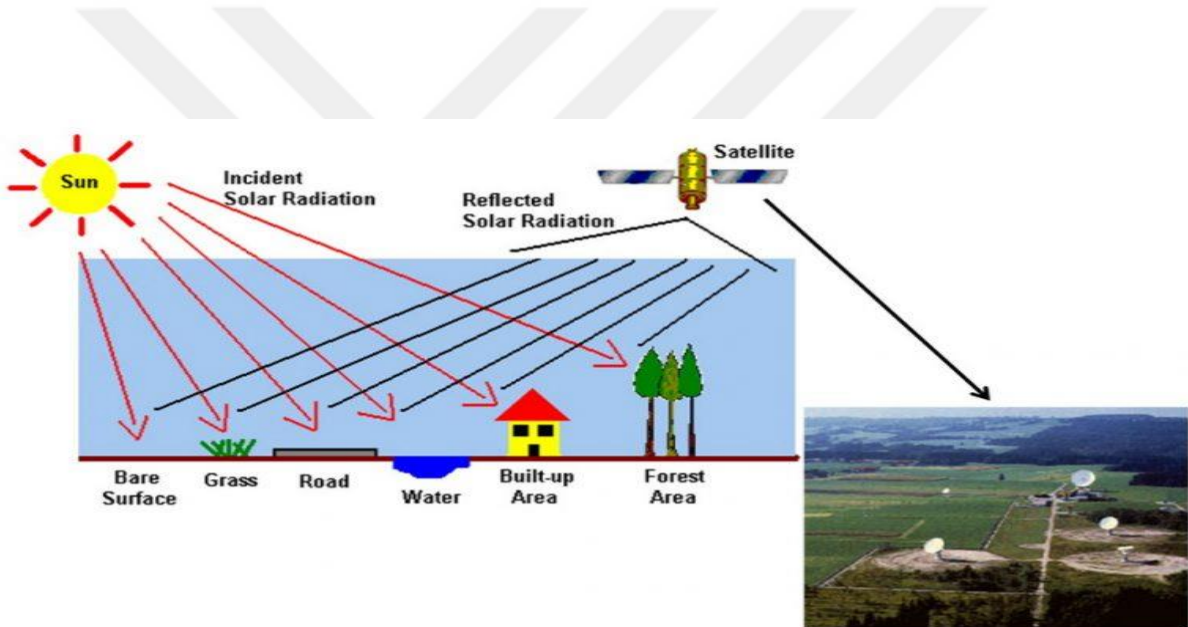


Şekil 2.2 Elektromanyetik spektrum (URL 1).

2.1.1 Uzay Kaynaklı Optik Görüntüleme

Optik görüntüleme, yeryüzünde yer alan yayılım enerjisi veya güneş enerjisinin yansıtımını algılayan elektromanyetik spektrumun görünür ve kızılötesi bölgesinde çalışan pasif bir görüntüleme sistemidir (Smith 2000). Optik görüntüleme, gözlemlenen hedef nesneden yayılan, yansıyan, yutulan, iletilen elektromanyetik radyasyonun algılanıp o nesnenin fiziksel ve kimyasal mahiyetleri hakkında bilgi edinme ve yorumlamadır.

Optik görüntüler, görünür ve yakın kızılötesi CCD (charge-coupled device) sensörleri veya diğer sensörler kullanılarak hedef nesnelerden yansıyan güneş ışınının ölçülmesiyle elde edilen gri değerlerden oluşur. Bu şekilde optik görüntüdeki her bir nesne spektral değerine göre ayırt edilebilmektedir. Optik uzaktan algılamaya ait görüntüleme sistemi Şekil 2.3 verilmiştir.

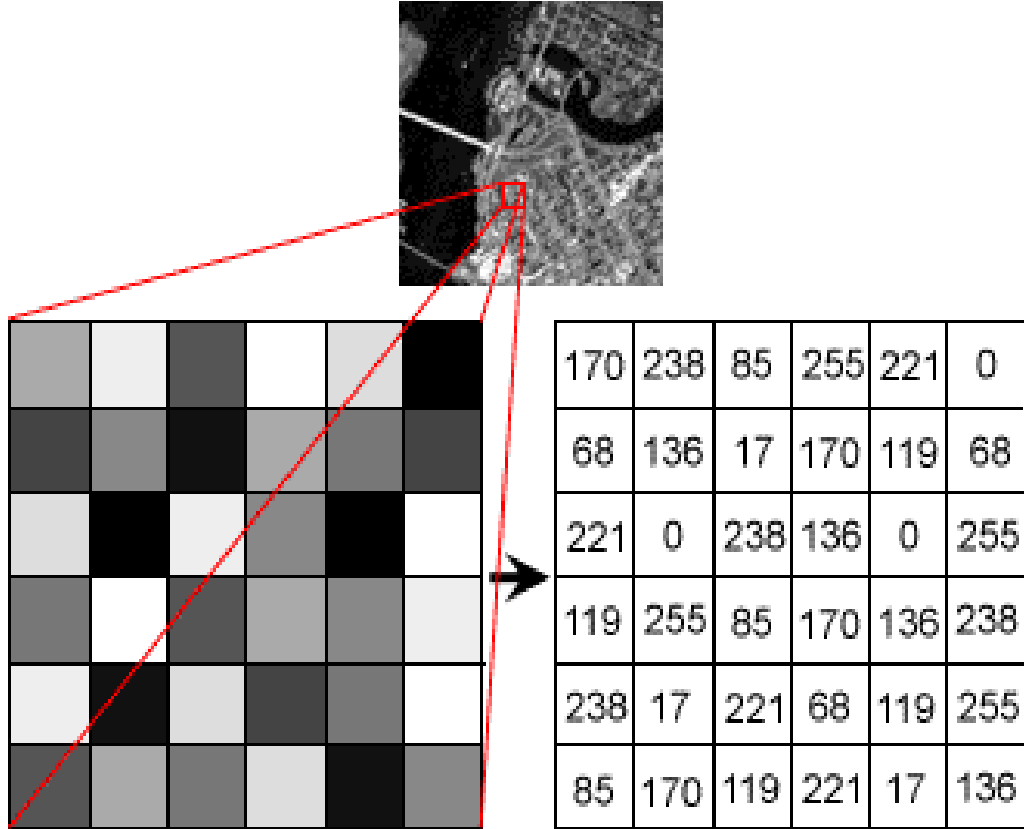


Şekil 2.3 Uzay kaynaklı optik görüntüleme (pasif algılama) sistemi

Güneş'e bağımlı pasif algılama yöntemi ile çalışan optik görüntüleme sistemleri hava ve uzay kaynaklı olarak iki temel sınıfa ayrılmaktadır. Hava kaynaklı optik görüntülemede yerküre üzerindeki herhangi bir nesne veya olay hakkında ki bilgi bir hava aracından (uçak, helikopter, balon, insansız hava aracı vs.) faydalanılarak fotoğraflama yoluyla toplanır. Uzay kaynaklı optik görüntülemede ise bu bilgi 500-1500 km irtifada önceden tayin edilmiş yörüngesini takip eden bir uzay aracı tarafından taşınan algılayıcılar ile seyrek ya da sık görüntüleme ile sağlanır. Uzay araçları ve bu uzay araçlarına monte edilen algılayıcıların ömrü yörünge yüksekliğine bağlıdır. Düşük yükseklik, atmosferdeki sürtünme ve yerçekimi nedeniyle uzay araçlarının ömrünü azaltır. Örneğin; 150 km yükseklikteki bir uydunun ömrü en fazla 1 hafta olabilir. Uzay

kaynaklı optik algılayıcılar önceden dizayn edilen yörüngeleri doğrultusunda hareket ederler. Bu doğrultu azimut doğrultusu olarak ifade edilmektedir.

Uzay kaynaklı optik sistemler, yukarıda da ifade edildiği üzere görünür ve yakın kızılötesi CCD (charge-coupled device) algılayıcılar yardımıyla güneş ışığı ile aydınlanan hedef nesnelerden yansıyan solar radyasyonun miktarını belirleme yoluyla nesnelere ait renk değerlerini oluştururlar (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Enerjinin dijital formu olan görsel ürün.

Uzay kaynaklı optik görüntülemelerde radyometrik (parlaklık, ton, yoğunluk vb.), görüntüleme geometrisi, spektral bantlar (renk, renk tonu vb.), dokusal ve bağlamsal bilgiler kaynaklı bir kaç görüntüleme sistemi mevcuttur. Bunlar monokromatik, pankromatik, multispektral, süperspektral ve hiperspektral görüntüleme sistemleridir.

Monokromatik Görüntüleme Sistemi

Monokromatik görüntüleme sistemleri ışığı yalnızca bir dalga boyunda ifade eden sistemlerdir. Bu sistemde tek bir renk ve bu rengin ton ve gölgeleri kullanılmaktadır. Renk tonlaması, siyah

gri ve beyaz renklerinin eklenmesi ile oluşur. Örneğin; OrbView-1 uydusu monokromatik görüntüleme sistemine sahip bir uydudur.

Pankromatik Görüntüleme Sistemi (PAN)

Pankromatik görüntüleme sisteminde algılayıcı (sensör) geniş dalga boyunda radyasyon kaydeden tek kanallı bir detektördür. Bu sistem içerisinde görüntüler tek bir bantta meydana gelmektedir. Hedef nesnelerin spektral özellikleri hakkında bilgi elde edilemez. Gri tonlamalı olarak görüntülendiklerinden dolayı siyah-beyaz hava fotoğraflarına benzerler. Pankromatik sistemde radyometrinin önemli bir yeri vardır. Pankromatik görüntüleme sistemine Worldview-1 uydusu örnek verilebilir.

Multispektral Görüntüleme Sistemi (MS)

Multispektral görüntüleme sistemlerinde algılayıcı az sayıda (bir kaç tane) spektral banttan oluşan çok kanallı bir detektördür. Her kanal, geniş dalga boyu bandındaki radyasyona duyarlıdır. Ayrıca sistem, hedeflenen nesnelerinin spektral bilgilerini ve parlaklığını içeren görüntüler sunmaktadır. Multispektral Görüntüleme Sistemleri aynı zamanda pankromatik bantlara da sahiptir ve bu bantlardan elde edilen görüntülerin mekânsal çözünürlükleri, aynı sistemlerin multispektral bantlarından elde edilen görüntülere göre yaklaşık dört kat daha yüksektir. Bu sebeple hem en yüksek çözünürlüğü hem de renkli görüntüyü elde etmek amacıyla pan-keskinleştirme olarak adlandırılan özel bir teknik geliştirilmiştir. Bu teknikte, ortak çalışma alanına ait dört kat yüksek çözünürlüklü PAN ve renkli MS görüntüleri birleştirilerek yüksek çözünürlüklü (PAN çözünürlüğüne eşit) renkli, keskinleştirilmiş görüntü elde edilmiş olur. Multispektral görüntüleme sistemleri için Worldview-2, IKONOS MS, SPOT HRV-XS uyduları örnek verilebilir.

Süperspektral Görüntüleme Sistemi

Multispektral görüntüleme sistemlerinde algılayıcı en az 10 spektral kanal içermektedir. Bandlar daha geniş dalga boylarına sahiptirler. Nesnelerin spektral özellikleri içeren bilgiler detaylı ve daha fazla bir şekilde elde edilir. Süper spektral görüntüleme sistemlerine örnek olarak MODIS ve MERIS verilebilir.

Hiperspektral Görüntüleme Sistemi

Görüntüleme spektrometresi olarak da bilinen Hiperspektral Görüntüleme Sistemi, bitişik bir şekilde çalışan 100 ve üzeri spektral bandı kullanarak yüksek çözünürlüklü görüntü elde eden bir sistemdir. Hiperspektral görüntünün içerdiği yüksek spektral çözünürlük, hedef nesnelerin daha iyi karakterizasyonuna ve tanımlanmasına olanak sağlar. Bu sistem özellikle tarım alanında bitki sağlığı, nem durumu, rekoltesi gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır.

Uzay kaynaklı optik görüntüleme amacıyla fırlatılmış birçok uydu bulunmaktadır. Çizelge 1’ de uzay kaynaklı optik görüntüleme yapan bazı uydular ve bu uyduların özellikleri beraber verilmiştir. Çizelgedeki uydular incelendiğinde, teknolojinin gelişimi ile paralel bir şekilde çözünürlükte de yukarı yönlü gelişmenin gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Nitekim Amerika Birleşik Devletlerinin 2016 yılında devreye aldığı Worldview-4 uydusunda çözünürlüğün 30 santimetreye kadar yükseldiği görülmektedir.

Çizelge 2.1 Başlıca optik görüntüleme uydularının özellikleri.

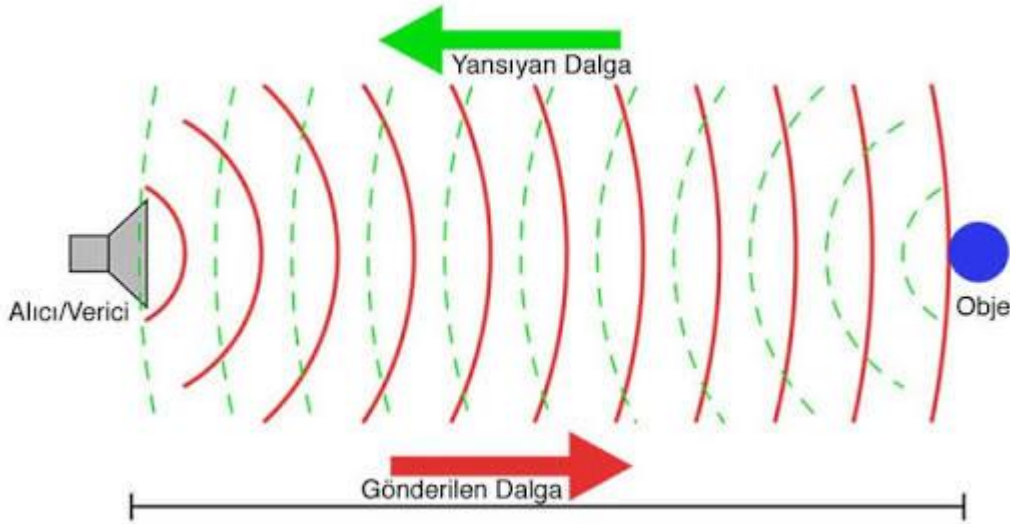
Uydu (Ülke)	Fırlatılma Tarihi	Mekansal Çöz. (m)	Zamansal Çöz.(gün)	Spektrum Aralığı (µm) ve Band Sayısı
Rasat (Türkiye)	2011	7,5-15	4	0.42-0.73 (4 Band)
Göktürk1 (Türkiye)	2016	0.5-2	2-3	0.45-0.94 (5Band)
Göktürk2 (Türkiye)	2012	2,5-5	2,5	0.42-1.7 (6 Band)
İmece (Türkiye)	2023	0.99-3.96	-	-
Landsat 1-8 (USA)	1972,1975,1978,1982, 1984,1993,1999, 2013	15–120	16	0.45-12 (11 Band)
Worldview 1 (USA)	2007	0.50	1.7	0.4-0.90 (1 Band)
Worldview 2 (USA)	2009	0.46–2.4	1.1-3.7	0.4-1.05 (8 Band)
Worldview 3 (USA)	2014	0.31–30	<1.0-4.5	0.4-23 (26 Band)
Worldview 4 (USA)	2016	0.31–1	<1.0–4.5	0.65-0.92 (4Band)
SPOT (France)	1985, 1990, 1993, 1998 2002, 2012, 2014	10–20	26	0.45-1.75 (5Band)
Sentinel-2 (ESA)	2015, 2017	10–60	5	0.04-2.2 (12Band)
IRS (India)	1988, 1991, 1995, 1996 1997, 1999	5.8–70	5–24	0.52-1.7 (4 Band)

2.1.2 Uzay Kaynaklı Radar Görüntüleme

Radar teknolojisi 2. Dünya Savaşı sırasında hedef objelerin tespiti ve takibi amacıyla geliştirilmiştir. “Radio Detection And Ranging” sözcüklerin baş harflerinin bir araya getirilmesi

ile oluşan RADAR, telsizle saptama ve mesafe tayini olarak ifade edilebilir. Radar görüntüleme, aktif algılama yapan mikrodalga sistemleri içerisinde en çok kullanılan sistemdir. Bu sebeple bilim dilinde mikrodalga algılamanın diğer adı olarak radar kullanılmaktadır. 1950’li yıllara kadar Radar teknolojisi uçaklar yardımıyla hava kaynaklı olarak kullanılmıştır. 1950’li yıllardan sonra Radarlar uydular üzerine monte edilmeye başlanmış ve artık uzay kaynaklı radar görüntüleme dönemi başlamıştır.

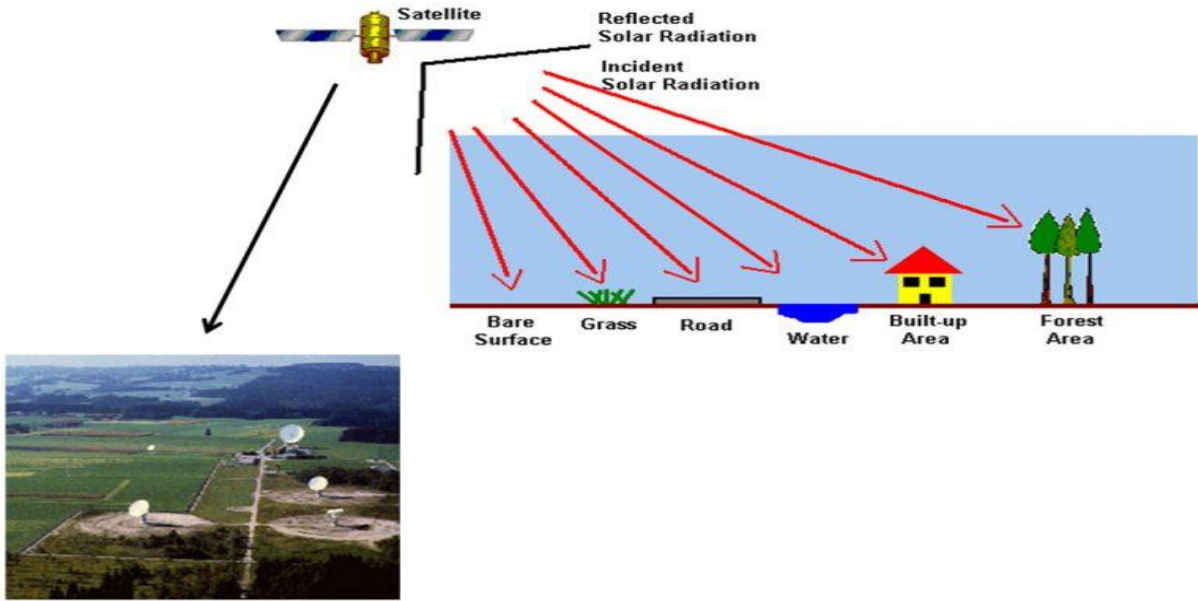
Radar görüntüleme ile optik görüntülemenin çalışma prensipleri birbirlerinden tamamen farklıdır. Optik görüntüleme sisteminin çalışma prensibi hedef nesnelerden yansıyan spektral değerlere bağlı olarak kimyasal bir işleme dayanmaktadır. Radar görüntülemenin çalışma prensibinde ise; hedef objelere gönderilen ve bu objelerden yansıyan sinyallerin alıcı antenler yardımıyla kaydedilip fiziksel işlem gerçekleştirilmektedir. Mikrodalga sinyallerin gönderilmesi ve tekrar algılanması için kullanılan antenler 300 MHz ile 30 GHz frekanslarına ve 1 cm’den 1 m’ye kadar değişen dalga boylarına sahiptir. Bu antenler yardımıyla çalışma yapılacak alana sinyallere gönderilmekte ve hedef objelerden yansıyan sinyaller tekrar kaydedilmektedir (Curlander 1991). Radar görüntüleme sisteminin çalışma prensibi Şekil 2.5’ de basit anlamada açıklanmıştır.



Şekil 2.5 Radar sistemlerin çalışma prensibi (URL 2).

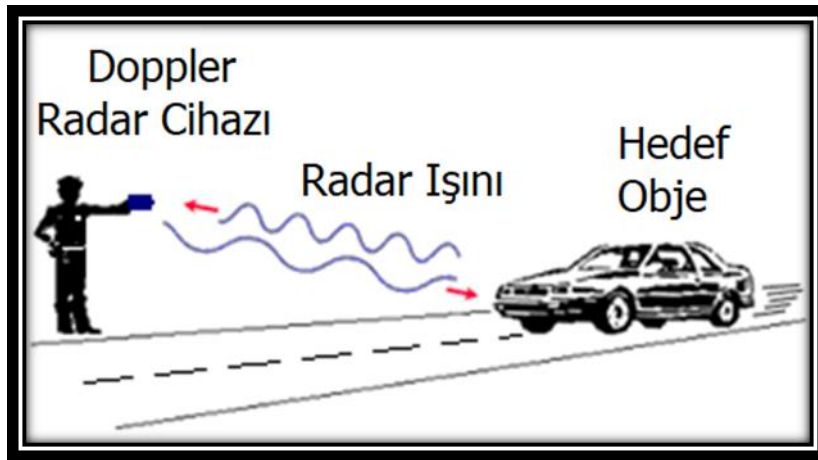
Bir aktif algılama sistemi olan radar görüntüleme bu özelliğinden dolayı bazı avantajlara sahiptir. Aktif algılama sistemlerinin vermiş olduğu bu avantajların en başında kullandığı enerjiyi kendisi üreterek Güneş’ e bağımlı olmadan gece-gündüz çalışması gelmektedir. Ayrıca hava şartlarından (yağmurlu, bulutlu, sisli vb.) bağımsız olarak çalışabilme özelliğine

sahiptir. Uzay kaynaklı radar görüntülemenin de çalıştığı aktif algılama sistemin çalışma prensibi Şekil 2.6’da açıklanmıştır.



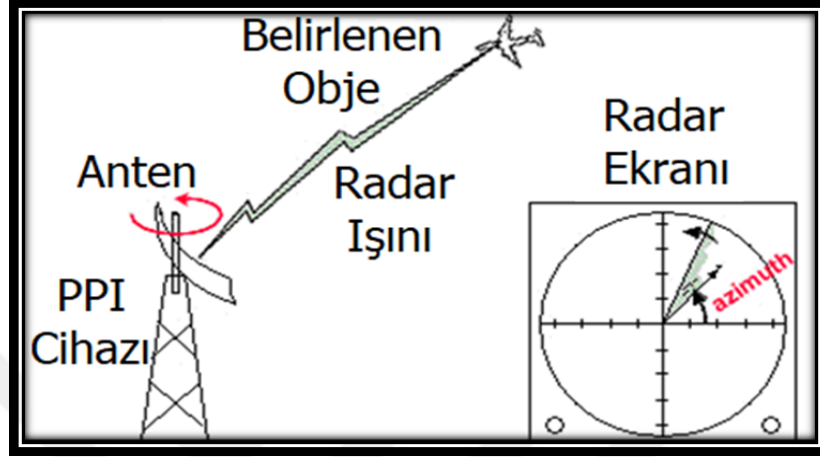
Şekil 2.6 Uzay kaynaklı radar görüntüleme (aktif algılama) sistemi.

Radar sistemleri kullanım amaçlarına bağlı olarak üç farklı grupta incelenebilir. Bunlardan ilki Doppler Radar’dır. Doppler Radar’ da hedef nesneye çarpıp dönen radar ışını kaydedilerek dalga boyu ve frekans kullanılarak radyal hareket hızı belirlenir. Görüntü kaydı sunmayan bu sistemde diğer radar sistemlerinden farklı olarak hedef objenin konumunu tespit etmekle birlikte objenin radara yaklaşıp yaklaşmadığı hakkında da bilgi sunar. Doppler radar sistemi, polis hız tespiti çalışmalarında, hava savunma ve radyoloji gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Doppler Radar sistemine ilişkin çalışma prensibi Şekil 2.7’de açıklanmıştır.



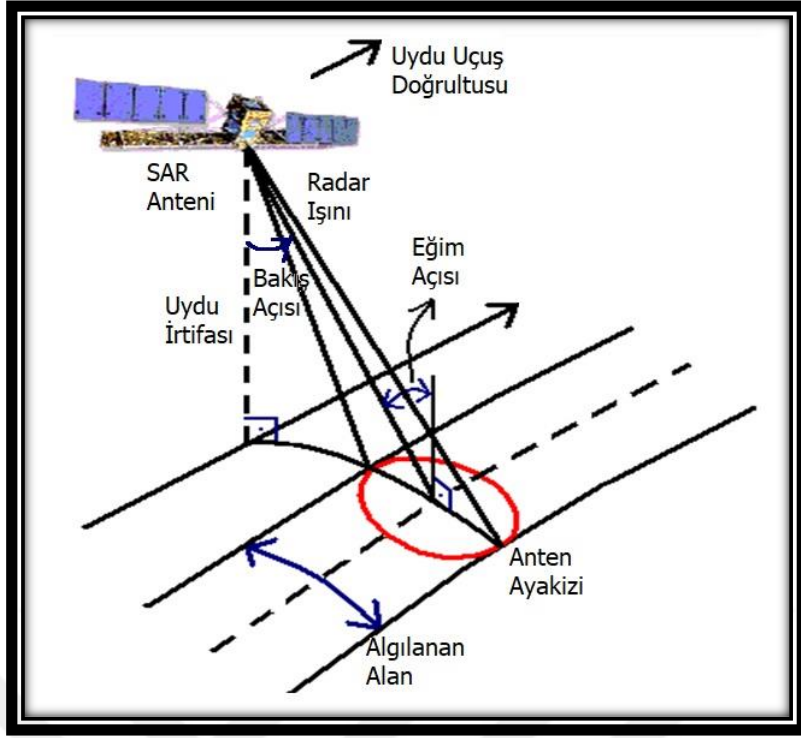
Şekil 2.7 Doppler radarın çalışma prensibi.

Radar sistemlerinden ikincisi ise Düzlemsel Göstergeli Radar (PPI) sistemidir. PPI, bir dönel antenin etrafında tespit ettiği nesneler hakkında sürekli güncellenen bir ekran görünümü sağladığı ve bu şekilde hedef objelerin uzaklığı ve yerden olan yüksekliğin sürekli bir şekilde çizdirildiği bir sistemdir. Meteoroloji, hava trafik kontrolü ve gemiler ile uçaklarda sıklıkla kullanılan PPI sisteminin çalışma prensibi Şekil 2. 8’ de sunulmuştur.



Şekil 2.8 Düzlemsel Göstergeli Radar’ın çalışma prensibi.

Uzaktan algılamada üçüncü ve en çok tercih edilen radar sistemi ise II. Dünya Savaşı'ndan sonra arazi gözetleme amacıyla geliştirilen Yandan Bakışlı Radarlardır (SLR). Yan bakışlı radar platformu uçuş doğrultusundaki bir istikamette ve belirli bir yükseklikteki bir uzay veya hava aracı olabilir. SLR sisteminin çalışma mantığında, radar uçuş doğrultusuna paralel bir şekilde yeryüzü üzerinde antenler yardımıyla bir şerit aydınlatılmakta ve aydınlatılan bu bölgeden veri elde edilmektedir. Şekil 2.9’da SLR sistemine ait geometri görülmektedir.



Şekil 2.9 Yan Bakışlı Radar (SLC) geometrisi.

SLR sisteminde aydınlatılan şeridin genişliği yan bakış özelliği ile sağlanmaktadır. Anten ışın genişliği (β), anten uzunluğu (AL) ile ters orantılı, yayılan ışının dalga boyu(λ) ile doğru orantılıdır. Bu doğrultuda β Eşitlik 2.1 ile elde edilebilir.

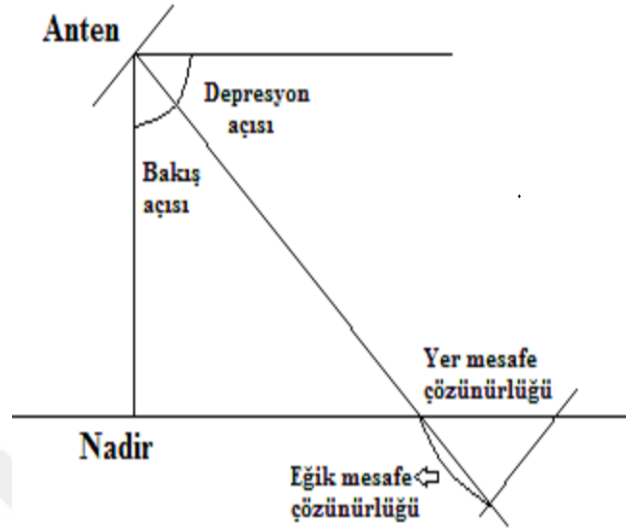
$$\beta = \frac{\lambda}{AL} \quad (2.1)$$

Enerjinin havada yaklaşık olarak ışık hızında yayıldığı göz önüne alındığında cisme olan eğik mesafe (S_R) ışık hızı (c) ve zamana (t) bağlı olarak Eşitlik 2.2 ile bulunabilir.

$$S_R = \frac{c \times t}{2} \quad (2.2)$$

SLR sisteminde Mesafe ve Azimut olmak üzere iki temel çözünürlük söz konusudur. Eğik mesafe çözünürlüğü antene olan uzaklık ile değişmemekle birlikte yatay mesafeye dönüştürüldüğünde yer çözünürlüğü depresyon açısına göre değişmektedir. Bakış açısının tümleri olan depresyon açısı, yatay yer düzlemi ile radar anteni ve algılanan cismi birleştiren

doğru arasındaki açıdır (Şekil 2.10). Mesafe yönündeki yer çözünürlüğü depresyon açısının cosinüsü ile ters orantılı olarak değişmektedir (Lillesand and Kiefer 2000).



Şekil 2.10 SLR sisteminde mesafe çözünürlüğü.

Mesafe yönündeki yer çözünürlüğü (R_{es}); depresyon açısına (θ_d), ışık hızına (c) ve puls süresine (t) bağlı olarak Eşitlik 2.3 ile hesaplanır.

$$R_{es} = \frac{c \times t}{2 \cos \theta_d} \quad (2.3)$$

Radarın uçuş doğrultusundaki çözünürlüğü azimut çözünürlüğü olarak ifade edilmektedir. Anten ışın genişliğinin (β) açısal olarak radyan değeri ile eğik uzaklıktan dönüştürülen yatay yer uzunluğunun (GR) çarpımı azimut çözünürlüğünü (R_{AZ}) verir (Eşitlik 2.4).

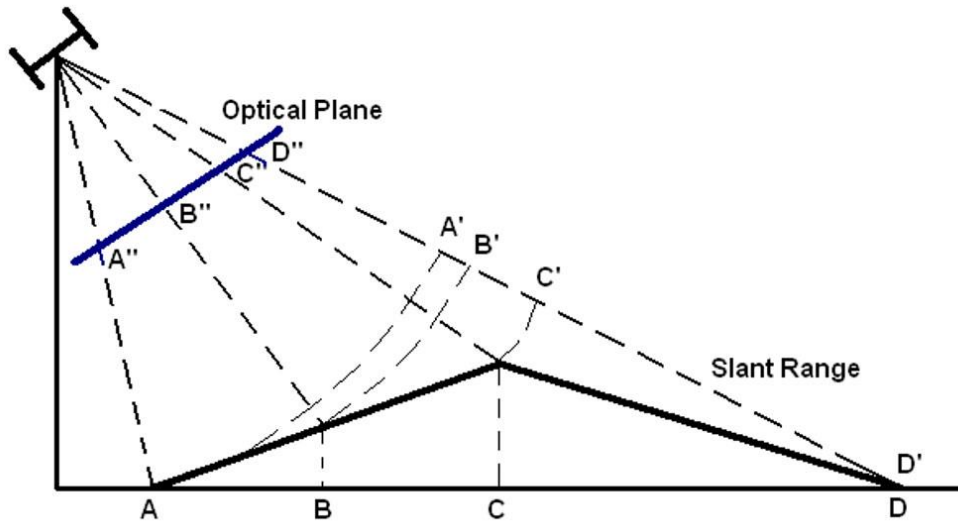
$$R_{AZ} = GR \times \beta \quad (2.4)$$

SLR sistemi, anten ışın genişliğinin kontrolüne bağlı olarak iki gruba ayrılmaktadır. Bunlardan ilki Gerçek Açıklıklı Radar (RAR) sistemidir. RAR'da anten ışın genişliği fiziksel anten uzunluğuna bağlı olması nedeniyle sistemin mekânsal çözünürlüğü kullanılan antenin uzunluğuna göre değişmektedir. Bu doğrultuda anten boyu büyüdükçe mekânsal çözünürlükte artmaktadır. Anten ışın genişliğinin antenin fiziksel uzunluğu tarafından kontrol edildiği RAR sisteminde çözünürlük kilometre düzeyinde kalmaktadır (Sarmap 2008). Daha iyi çözünürlük

elde edebilmek amacıyla anten uzunluğunun kilometrelere çıkarılması gerekmektedir. Ancak bu derece uzun bir anteni bir platforma yerleştirmek oldukça zor ve anlamsızdır. RAR sisteminin getirmiş olduğu düşük irtifada ve dalga boylarında çalışma zorunluluğu ve düşük çözünürlük gibi dezavantajlardan dolayı Yapay Açıklıklı Radar (SAR) sistemi geliştirilmiştir.

RAR sisteminde ki düşük çözünürlük sorunu, geliştirilen SAR sistemi ile giderilmiştir. RAR sisteminde yüksek çözünürlük için gerekli olan ve platformlara monte edilmesi imkânsız olan çok uzun antenlerin yapaylaştırılması düşünülmüştür. Bu doğrultuda anten uzunlukları matematiksel formüllerden faydalanılarak yapaylaştırılmış ve SAR sistemi geliştirilmiştir. Kısaca ifade edilecek olursa bu sistem çok kısa radar antenlerinden matematik yardımıyla çok uzun anten etkisi oluşturan ileri sinyal işleme tekniğidir. Bir aktif algılama sistemi olan SAR kendi enerjisini kullanarak gece-gündüz ayırt etmeksizin hava şartlarına bağlı kalmadan çalışabilmektedir.

SAR ve optik sistemlerin algılama prensipleri birbirlerinden tamamen farklıdır. Şekil 2.11’de verilen SAR ve optik sistemlerin algılama geometrileri incelendiğinde optik sensörler C ve D noktalarını birbirlerinin yanındaymış gibi algılarken, SAR sisteminde ise noktalar arasında bulunan mesafeyi sinyallerden elde edilen değerler doğrultusunda olduğu şekliyle algılar.

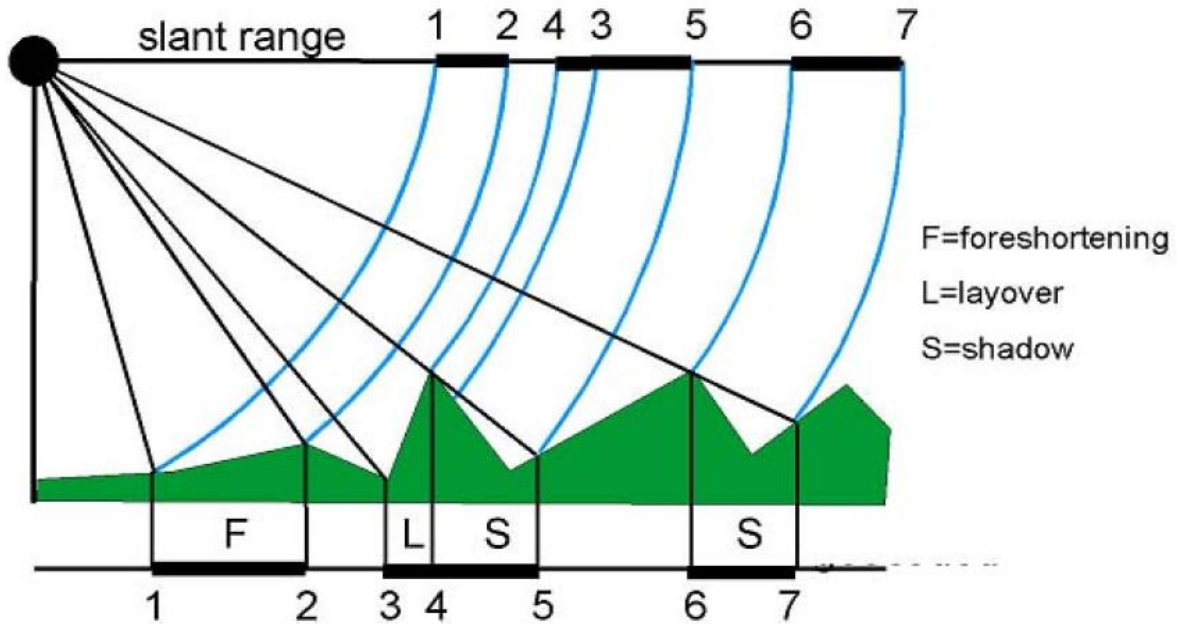


Şekil 2.11 Optik ve SAR tekniklerinin görüntüleme geometrileri arasındaki fark.

Algılama sistemlerinin tümünde olduğu gibi SAR sisteminde yeryüzünü algılarken bazı hatalar (distorsiyonlar) meydana gelmektedir. Farklı bir algılama yapısına sahip olan SAR diğer algılama sistemlerinden farklı hatalara da sahiptir. SAR görüntülerinde; kısa görüntüleme

(foreshortening), ters görüntüleme (layover), ters gölge (pseudo-shadow) ve gölge (shadow) distorsiyonları bulunabilmektedir (Elachi 1987).

Dik olan topografyaya bağlı olarak ortaya çıkan ters görüntüleme distorsiyonu topografinin puls yayılım doğrultusundan daha eğimli olmasından kaynaklanmaktadır. Bu distorsiyonda dağın tepesinden dönen sinyal, tabanından dönen sinyalden daha erken kaydedildiğinden dolayı dağın tabanı ve tepesi görüntüde yer değiştirir. Genellikle dağlık alanlarda ortaya çıkan bir distorsiyon olan kısa görüntüleme, algılanan objenin tepesinin antene yakın olmasından erken kaydedilerek objenin tepesi ile tabanı arasındaki mesafe olması gerekenden daha kısa görülür. Görüntüleme yapılan objenin eğiminin SAR anteninin depresyon açısından daha dik olmasından dolayı bazı bölgeler aydınlatılmamakta ve gölge distorsiyonu oluşmaktadır. Gölge distorsiyonunun olduğu bölge görüntüde karanlık olarak görünür. Şekil 2.12’ de verilen SAR distorsiyon geometrisinde; ters görüntüleme, kısa görüntüleme ve gölge distorsiyonları görülmektedir. 1 ve 2 noktaları arasında kalan F alanında kısa görüntüleme, 4-5 ve 6-7 noktaları arasında aydınlatılma gerçekleşemediğinden gölgelenme ve L bölgesinde de ters görüntülenme gerçekleşmiştir.



Şekil 2.12 SAR sisteminin distorsiyon geometrisi (Sefercik 2006).

SAR sistemleri, elektromanyetik spektrumda bulunan mikrodalga bandlarını kullanmaktadırlar. Bu bandlara ait özellikler Çizelge 2.2’de detaylandırılmıştır.

Çizelge 2.2 SAR bandları ve özellikleri.

Band	Frekans (GHz)	Dalga Boyu (cm)
P	0.225-0.390	1.33-76.9
L	0.390-1.550	76.9-19.3
S	1.550-4.200	19.3-7.10
C	4.200-5.750	7.10-5.20
X	5.750-10.90	5.20-2.70
K _u	10.90-22.00	2.70-1.36
K _a	22.00-36.00	1.36-0.83
Q	36.00-46.00	0.83-0.65
V	46.00-56.00	0.65-0.53
W	56.00-100.00	0.53-0.30

Bu bandlardan P,L,S yüksek ayırma gücüne (penetrasyona) sahip olmakla beraber çözünürlükleri düşüktür. Bu özelliklerinden dolayı bu bandlar daha çok ormancılık alanında, obje çıkarımında kullanılmaktadırlar. C ve X bandlarının ayırma güçleri P,L, X bandlarına göre düşük, çözünürlükleri ise yüksektir. Bu bandlar ise haritacılık faaliyetlerinde kullanılan banların başında gelmektedir. Ayrıca S ve C bandları meteorolojik amaçlı, X bandı polis radarlarında ve L bandı askeri ve sivil amaçlı uçakların algılanmasında kullanılmaktadır.

Uzay kaynaklı Radar görüntüleme amacıyla günümüze kadar birçok SAR uydusu faaliyet göstermiştir. Başlıca SAR uyduları ve bu uyduların özelliklerinin verildiği Çizelge 2.3' de görüldüğü üzere 1978 yılında ABD tarafından fırlatılan Seasat uydusunun mekânsal çözünürlüğü 25 metre iken 2016'lı yıllara geldiğimizde SAR çözünürlüğünün 1 metre altına kadar iyileştiği görülmektedir. Önümüzdeki yıllarda fırlatılması planlanan yeni SAR uydu misyonları düşünüldüğünde çözünürlükteki iyileşmenin devam edeceği ve yakın dönemde 30 cm'nin altına kadar ineceği anlaşılmaktadır.

Çizelge 2.3 Başlıca SAR uyduları ve özellikleri

Uydu	Ülke	Band/Dalga Boyu(cm)	Mekansal Çözünürlük	Faaliyet Süresi
Seasat	ABD	L/23.5	25m	1978
ERS-1	ESA	C/5.66	26m	1991-2000
JERS-1	Japonya	L/23.5	18m	1992-1998
ERS-2	ESA	C/5.66	26m	1995-2011
Radarsat 1	Kanada	C/5.66	1-100m	1995–2013
Envisat	ESA	C/5.66	30-150m	2002-2012
ALOS	Japonya	L/23.5	10m	2006–2011
Radarsat 2	Kanada	C/5.66	3m	2007-
TerraSAR-X	Almanya	X/3.1	1m	2007–
Cosmo-SkyMed	İtalya	X/3.1	3-5m	2007–
TanDEM-X	Almanya	X/3.1	1m	2010–
Sentinel-1A	ESA	C/5.66	5m	2014-2022
ALOS 2	Japonya	L/23.5	10m	2014-
Sentinel-1B	ESA	C/5.66	5m	2016-
Gaofen-3	Çin	C/5.66	1m	2016–
PAZ	İspanya	X/3.1	25cm-1m	2018–

2.2 İNTERFEROMETRİK YAPAY AÇIKLIKLI RADAR TEKNOLOJİSİ

Interferometric Synthetic Aperture Radar kelimelerinin baş harflerinden oluşan ve İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar anlamına gelen InSAR, yeryüzünü üç boyutlu olarak hesaplama imkânı sunan bir tekniktir. Bu teknikte, bir uzay aracı üzerine monte edilmiş yapay açıklıklı radar, yeryüzüne radar dalgaları gönderir ve bu dalgaların yansımalarını tekrar toplayarak kaydeder. Sinyal ve faza dayalı bir işlemin söz konusu olduğu SAR sisteminden farklı olarak InSAR tekniğinde genlik ile beraber faz bilgisi de kullanılarak objelere ait yükseklik bilgisi oluşturulur (Ferretti et al. 2001). InSAR sisteminde yükseklik bilgisinin elde edilebilmesi için, aynı bölgeden farklı bakış açılarıyla alınmış 2 SAR görüntüsüne ihtiyaç vardır. Bu karmaşık SAR görüntüleri arasındaki faz farkı ortak pikseller temelinde hesaplanır (Massonnet et al. 1993; Goldstein and Zebker 1987; Hanssen 2001; Sefercik 2006). InSAR

Faz farkı hesaplandıktan sonra eşitlik 2.8' deki kosinüs teoremi yardımıyla gerekli matematiksel işlemler Eşitlik 2.9-2.19 yapılır (Zebker and Goldstein 1986).

$$r_2^2 = r_1^2 + B^2 - 2r_1 \times B \times \cos\gamma \quad (2.8)$$

$$r_2^2 = r_1^2 + B^2 + 2r_1 \times B \times \sin(\theta - \xi) \quad (2.9)$$

$$\sin(\theta - \xi) = (r_2^2 - r_1^2 - B^2)/(2r_1 \times B) \quad (2.10)$$

$$\sin(\theta - \xi) = \frac{(r_2 - r_1)(r_2 + r_1)}{2r_1 \times B} - \left(\frac{B^2}{2r_1 \times B}\right) \quad (2.11)$$

$$\text{Eğer } B \ll r_1 \text{ olarak düşünülürse, } 2r_1 + \Delta_r \approx 2r_1 \text{ şeklinde yazılabilir.} \quad (2.12)$$

$$\text{Bu durumda: } \frac{(r_2 - r_1)(r_2 + r_1)}{2r_1 \times B} \approx \left(\frac{\Delta_r \times 2r_1 + \Delta_r}{2r_1 \times B}\right) \quad (2.13)$$

$$\approx \left(\frac{\Delta_r \times 2r_1}{2r_1 \times B}\right) \quad (2.14)$$

$$\approx \frac{\Delta_r}{B} \quad (2.15)$$

$$\text{Eşitlik 2.7 kullanıldığında : } \Delta_r = (\Delta_\varphi \times \lambda)/2\pi \quad (2.16)$$

$$\text{Bu durumda : } \sin(\theta - \xi) \approx \Delta_r/B \approx (\Delta_\varphi \times \lambda)/(2\pi \times B \times P) \quad (2.17)$$

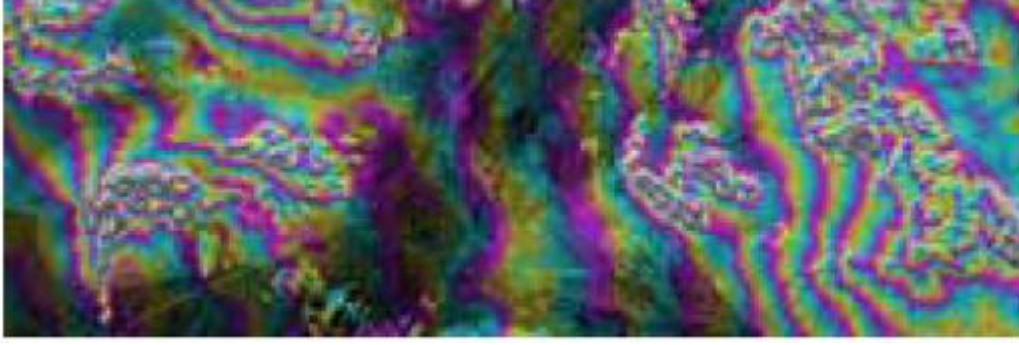
$$\theta = \xi + \arcsin((\Delta_\varphi \times \lambda)/(2\pi \times B \times P)) \quad (2.18)$$

$$\Delta Z = H - r_1 \times \cos\theta \quad (2.19)$$

Sonuç olarak hedef objenin yüksekliği ΔZ Eşitlik 2.20 ile bulunur.

$$\Delta Z = H - r_1 \times \cos[\xi + \arcsin((\Delta_\varphi \times \lambda)/(2\pi \times B \times P))] \quad (2.20)$$

InSAR tekniğinde dalga boylarına bağlı olarak faz farklarını algılayabildiğimiz görüntülere interferogram (fringe map) denilmektedir(Zebker and Goldstein 1986; Bürgmann et al. 2000). İnterferogramlar Radar interferometrisinin sonuç ürünleri olarak da ifade edilebilir (Şekil 2.14).

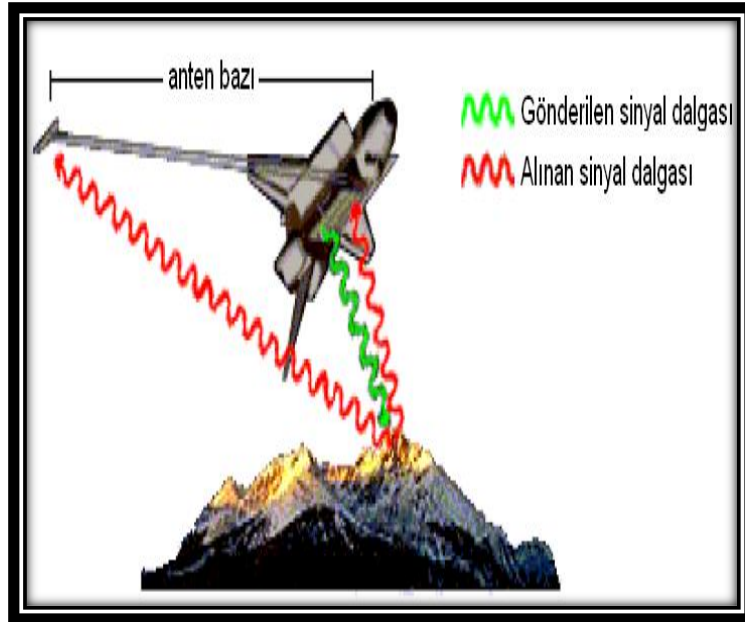


Şekil 2.14 Interferogram (Fringe map) (Sefercik 2006).

InSAR’ da gerekli olan iki SAR görüntüsünün alım yöntemi farklılık göstermektedir. Bu farklılık alım zamanı ile ilgilidir. SAR görüntüleri farklı zamanlarda alınabilirken eş zamanlı olarak da alınabilir. SAR görüntülerinin elde edilme yöntemi Tek Geçişli InSAR ve Çift (Tekrarlı) Geçişli InSAR olmak üzere ikiye ayrılır.

2.2.2 Tek Geçişli InSAR Tekniği

Tek geçişli InSAR tekniğinde uydu üzerindeki antenler aynı bölgeden farklı bakış açılarında eş zamanlı olarak veri elde etmektedir (Şekil 2.15). Eş zamanlı olarak işlem yapılmasından dolayı tek geçişli InSAR tekniğinde atmosferik etkiler sabit ve etkisizdir.

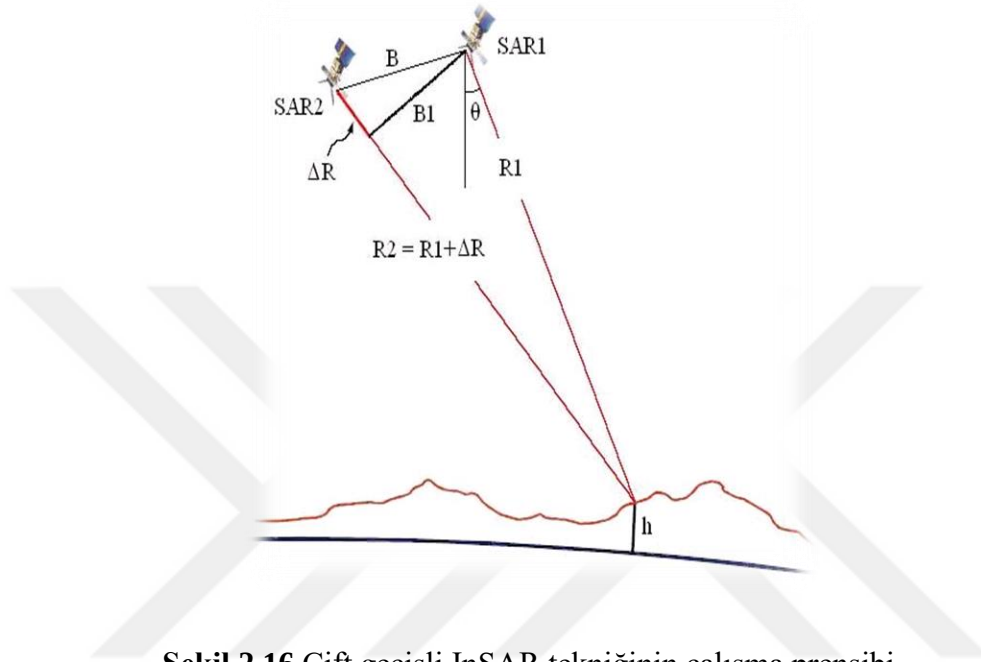


Şekil 2.15 Tek geçişli InSAR tekniğinin çalışma prensibi.

Tekniği kullanmış en önemli uydu misyonları SRTM ve TanDEM-X'dir.

2.2.3 Çift (Tekrarlı) Geçişli InSAR Tekniği

Çift geçişli InSAR tekniğinde ise taşıyıcı platform farklı zamanlarda hedef bölgeden iki ve üzeri sayıda tekrarlı geçiş yaparak bu şekilde veri elde etmektedir (Şekil 2.16).



Şekil 2.16 Çift geçişli InSAR tekniğinin çalışma prensibi.

Çift geçişte işlem farklı zamanlarda algılanmış görüntülerden gerçekleştirilmektedir. Aynı bölgeden uygun koşullarda algılama yapabilmek için bazen farklı mevsimlerde geçişle işlem yapılmaktadır. Bu şekilde farklı zamanlarda algılama yapmasından dolayı yöntemin en büyük dezavantajı, bölgedeki mevsimsel ve atmosferik değişimlerdir. Ormanlık alanlarda, bitki örtüsünde vb. değişimler sonuçlara olumsuz olarak etki etmektedir.

2.2.4 DInSAR Tekniği ile Deformasyon Tespiti

Diferansiyel InSAR (DInSAR) tekniğinde, hedef alandan tekrarlı geçiş yapılarak alınan minimum iki SAR görüntüsü (repeat-pass, double-pass, multi-pass) arasındaki faz farkının ölçümü prensibi ile diferansiyel interferogramlar üretilerek hedef alanda cm-mm düzeyine dek deformasyon tespiti yapılmaktadır (Hanssen 2001; Kampes 2006; Agram, 2010; Yonezawa et al. 2012). Deformasyonun tespit edildiği interferometrik fazda Eşitlik 2.21' de görüldüğü üzere deformasyon fazıyla beraber diğer faz bileşenleri de bulunmaktadır.

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{flat} + \Delta\varphi_{elevation} + \Delta\varphi_{displacement} + \Delta\varphi_{atmosphere} + \Delta\varphi_{noise} \quad (2.21)$$

$\Delta\varphi_{flat}$ = Düz yeryüzü faz bileşeni

$\Delta\varphi_{elevation}$ = Topografik faz bileşeni

$\Delta\varphi_{displacement}$ = Deformasyon faz bileşeni

$\Delta\varphi_{atmosphere}$ = Atmosferik faz bileşeni

$\Delta\varphi_{noise}$ = Faz gürültü bileşeni

Deformasyon fazını elde etmek için interferometrik faza etki eden bu bileşenlerin kaldırılması gerekmektedir. Eşitlik 2.21’de verilen bileşenlerinin giderilmesi matematiksel temelleri ile birlikte metodoloji kısmında detaylı olarak anlatılacaktır.

DInSAR Tekniğinin Avantajları

DInSAR tekniğinin popülerliğini arttıran bazı avantajları aşağıda sunulmuştur.

- Yeni nesil radar sensörlerinin yüksek mekansal çözünürlüğü (1–3 m)
- Yerelden globale çok ölçekli araştırma şansı ile geniş alan kapsamı (binlerce km²)
- Kötü hava koşullarından minimum olarak etkilenen çok yüksek hassasiyetli (cm-mm) yüzey deformasyon belirleyebilme
- Uzun dönemler (yıllar) boyunca düzenli, yüksek sıklıkta (günler-haftalar) ölçüm şansı
- Uzun dönem (20 yıl) arşivlenmiş radar görüntülerini kullanan geriye dönük çalışmalara olanak vermesi

DInSAR tekniği bu avantajlarından dolayı geliştirildiği 1986 yılından günümüze kadar birçok farklı deformasyon alanında kullanılmış ve olumlu sonuçlar alınmıştır. Teknik ilk olarak 1993 yılında Landers depremine tam anlamıyla uygulanmıştır (Massonnet et al 1993). Daha sonraki yıllarda deprem (Ozawa et al. 1997; Ryder et al. 2007; Atzori et al. 2009; Qiang et al. 2011; Stramondo et al. 2011; Salvi et al. 2012; Cheloni et al. 2017), heyelan (García-Davalillo et al.

2014; Bovenga et al. 2017; Ambrosi et al. 2018; Pastor et al. 2019; Sarychikhina et al. 2021), madencilğe dayalı çökmeler (Carnec et al. 1996; Haynes et al. 1997; Ren and Feng 2020), volkanik hareketler (Rosen et al. 1996; Fujiwara et al. 1998; Alimuddin et al. 2011) gibi birçok afet türünden kaynaklanan deformasyonların tespitinde ve izlenmesinde kullanılmıştır.

DInSAR tekniği mm hassasiyetinde sonuç vermesine karşın tekrarlı geçiş DInSAR yönteminde dik baz uzunluğunun fazla olmasından kaynaklanan geometrik bozukluklar, görüntüler arasındaki zamansal baz uzunluğunun yüksek olması sebebiyle zamansal korelasyon bozuklukları ve görüntüler arası atmosfer koşullarının homojen olmaması gibi dezavantajlara sahiptir (Zebker et al. 1997; Ferretti et al. 2000). Diferansiyel InSAR tekniğinin bu sınırlamalarının üstesinden gelebilmek amacıyla Multi-Temporal InSAR (MT-InSAR) teknikleri geliştirilmiştir.

Radar sinyallerinin ulaştığı bazı hedefler yıllar boyunca iyi bir geri yansıtım gösterebilmektedir. Sabit bir şekilde yıllarca geri yansıtım yapabilen ve test edilebilen bu tür hedeflerden alınan faz bilgileri ve bu hedefler üzerindeki kararlı piksellerden alınan geri dönüşler (radar sinyalinin dönüş bilgileri) dikkate alınarak Multi-Temporal SAR verilerinin birleştirilmesi işlemine MT-InSAR zaman serileri tekniği denilmektedir. İncelenen alanın multi-temporal (çok zamanlı) SAR görüntüleri, hem heyelan deformasyonu hem de kalitatif (nitel) deformasyon tahmini gibi konularda klasik DInSAR tekniğinde ilerleme sunmaktadır. Multi-temporal InSAR zaman serileri teknikleri, yıllar içinde yüzey hareketinin neden olduğu yer değiştirme modellerinin yanı sıra mevsimsel değişimler nedeniyle yüzeyde meydana gelen kabarmaları veya çökmeleri tespit etmek için belirli zaman periyotlarında alınan çoklu görüntülerin işlenmesi prensibi ile çalışır.

2.2.5 MT-InSAR PSI Tekniği ile Deformasyon Tespiti

Persistent Scatterer Interferometry (PSI) tekniği olarak adlandırılan Sürekli Saçıcılar İnterferometrisi yöntemi, 1990'larda Politecnico di Milano SAR grubu tarafından oluşturulmuştur (Calo 2012). Uydu radar görüntülerinin zaman serilerinin kullanımına dayanan PSI, Dünya yüzeyindeki deformasyon olaylarını milimetrik hassasiyetle takibi için oldukça etkili MT- InSAR tekniğidir. Bu teknik, tümü sürekli saçıcılardan (PS) oluşan küçük bir radar hedefi alt kümesinin, uyuşumsuzluğun etkilerine karşı bağışık olduğu gözlemine dayanmaktadır. Radar görüntülerini alım geometrisi ve iklimsel şartlar değiştikçe PS'lerde aynı "elektromanyetik form" korunur (Hooper et al. 2004). Bu şekilde faz bilgileri de korunmuş olur.

Tekniğin temel esası SAR verilerinden elde edilen çok sayıda interferogramı kullanarak işlem yapmaktır. Ne kadar fazla görüntü kullanılırsa interferogram sayısı o kadar fazla olacaktır bu da tekniğin başarısını arttıracaktır. Çünkü PSI interferometrisinde görüntülerden sadece biri ana görüntü olarak kullanılmakta ve toplam görüntü sayısından bir eksik sayıda interferogramlar oluşturularak zamansal uyumluluk gösteren pikseller (PS) dikkate alınarak yüzey deformasyonları belirlenmektedir. PSI tekniğinde başarılı sonuçlar elde edilebilmesi için en az 15 görüntü kullanılmalıdır (Ferretti et al. 2000; Hanssen 2001).

PSI ile deformasyon tespitinin güvenli yapılabilmesi için interferogramlara etki eden atmosferik etki ve diğer etkilerin de giderilmesi gerekmektedir. Bunun için bazı istatistiksel analizler gerçekleştirilerek atmosferik faz katkısı elde edilebilir. Ayrıca kilometrekareye düşen PS sayısı da atmosferik etkiyi gidermekte önemlidir. Bunun için kilometrekarede en az 5 PS noktasının bulunması elzemdir (Perissin et al. 2009).

Başarımın arttırılmasında rol alan bir diğer etmen ise PS kalitesidir. PSI, binaların, metal yapıların, açıktaki kayaların gibi genel olarak elektromanyetik özelliklerin veri alımından veri alımına önemli ölçüde değişmediği yeryüzü hedeflerini PS olarak kullanır. Sürekli geri saçılım yapısı değişen hedefler (bitki örtüsü gibi) PS koşullarına uymamaktadır. Bu yapıdaki PS'lerin kullanılmaması deformasyon tespitindeki doğruluğun milimetre seviyesine yükselmesi için oldukça önemlidir (Ferretti et al. 2001).

PSI tekniği ilk olarak 1999 yılında İtalya'nın bir kasabası olan Camaiore' de yüzey deformasyonunun tespiti amacıyla kullanılmıştır (Ferretti et al. 1999). Bu uygulamada elde edilen başarının ardından teknik birçok araştırmacı tarafından farklı alanlarda deformasyon tespitinde kullanılmış ve gelişimini devam ettirmiştir (Ferretti et al. 2000; 2001). PSI başta heyelan (Farina et al. 2006; Chen et al. 2008; Greif and Vlcko 2012; Tofani et al. 2013; Silvia et al. 2013; Kiseleva et al. 2014; Mirzaee et al. 2017a; Dong et al. 2018; Huang Lin et al. 2019; Xu et al. 2021) olmak üzere, volkanik (Hooper et al. 2004; Hooper, 2006; Vilardo et al. 2009; Dias et al. 2018) ve maden kaynaklı çökmeler ((Jung et al. 2007; Goel et al. 2011; Grzovic and Ghulam 2015; Huang et al. 2019) gibi afetlerden kaynaklanan deformasyonların izlenmesinde kullanılmaktadır.

2.2.6 MT-InSAR SBAS Tekniği ile Deformasyon Tespiti

Small Baseline Subset (SBAS) yöntemi kısa baz uzunluğu interferometrisi anlamına gelen, bir SAR interferogram yığını kullanarak yavaş hareket eden deformasyonları mm hassasiyetinde

tespit etmek için kullanılan InSAR zaman serisi tekniğidir. Yapay açıklıklı radar görüntülerinin alım zamanında hedef alanda faz korelasyonunun düşük seviyelerde bulunması uygun görüntü çiftleri oluşturulamamasına sebep olmaktadır. Bu sebeple uzun periyotlarda yavaş hareket eden yüzey deformasyonlarının istenilen şekilde izlenmesi mümkün olmamaktadır. Görüntü çiftleri oluşturulurken dikkat edilmesi gereken önemli parametreleri; geometrik dik baz uzunlukları, zamansal değişim, yörünge, topografya ve hava koşulları olarak ifade edebiliriz. Bu parametrelerden kaynaklı bozuklukları ortadan kaldırılmak veya azaltmak amacıyla çok zamanlı elde edilen bir görüntü serisi kullanılarak SBAS algoritması geliştirilmiştir (Berardino et al. 2002).

Bu algoritma, deformasyon trendinin tespit edilmesinde bir diğer MT-InSAR tekniği olan PSI yönteminin farklı olarak, faz korelasyonunun yüksek olduğu tüm pikselleri değerlendirmeyerek, görüntünün bütününde yüksek korelasyona sahip dağılmış hedefleri (DS-Distributed Scatterer) bir arada inceler. SBAS, düşük zamansal (temporal) baz uzunluğuna sahip görüntü çiftlerinden oluşturulan interferogramları değerlendirerek, görüntüler arasındaki mekânsal korelasyonsuzluğu (spatial decorrelation) sınırlandırmayı amaçlayan bir yöntemdir.

SBAS çalışma prensibini kısaca özetlemek gerekirse; görüntülerdeki pikseller, bir süper master (referans) görüntüye göre eşleştirilir. Toplam görüntü sayısının (n) ikili kombinasyonu kadar diferansiyel interferogram oluşturulur. Bu interferogramların faz farkı hesaplanır. Yüksek korelasyon sağlanabilmesi amacıyla, temporal baz uzunluğu diğerlerine göre daha küçük olan görüntü çiftleriyle oluşturulmuş veriler seçilir. Daha sonra bu verilerdeki yüksek uyuma (high coherence) sahip hedeflere, lineer cebirde (linear algebra) kullanılan tekil değer ayrışımı (SVD) yöntemi tabanlı bir yaklaşım uygulanarak deformasyon hızı elde edilmiş olur (Casagli et al. 2016).

SBAS tekniği daha çok açık alanlarda güzel sonuçlar vermektedir. Bu doğrultuda özellikle şehir merkezlerinde gerçekleşen yüzey değişimleri ve arazi çökmelerinin tespitinde ve izlenmesinde sıklıkla kullanılmaktadır (Dehghani et al. 2009; Zhao et al. 2011; Sun et al. 2015; Novellino et al. 2017; Zhang et al. 2019). Ayrıca heyelan (Casteneda et al. 2009; Liu et al. 2013; Huang Lin et al. 2019; Dong et al. 2018), madencilik (Gourmelen et al. 2007; Baek et al. 2008; Choi et al. 2011; Grzovic and Ghulam, 2015) volkanik (Lanari et al. 2007; Stramondo et al. 2008), deprem (Guzzetti et al. 2009; Salvi et al. 2012; Jebur et al. 2015) gibi afetlerden kaynaklanan deformasyonların tespiti ve analizinde de kullanılmaktadır.

2.2.7 Diğer Çok Zamanlı InSAR Teknikleri ile Deformasyon Tespiti

PSI ve SBAS deformasyon tespitinde kullanılan en önemli Çok Zamanlı InSAR teknikleridir. Bu tekniklerden farklı olarak deformasyon tespitinde kullanılan diğer MT-InSAR tekniklerinden bazıları aşağıda sunulmuştur.

- Stable Point Network (SPN)
- A Persistent Scatterer Pair (PSP)
- Coherent Pixels Technique (CPT)
- Interferometric Point Target Analysis (IPTA)
- SqueeSAR

Stable Point Network (SPN)

Kararlı nokta ağı anlamına gelen SPN, SAR görüntü yığınına kullanarak kusurlu PS seçimine neden olan mekânsal korelasyonsuzluğu ortadan kaldırmak amacıyla geliştirilmiştir. SPN, PS seçiminde genlik stabilitesi, interferometrik ve spektral tutarlık olmak üzere üç farklı kriteri baz alarak elektromanyetik formun korunduğu kararlı noktaları belirlemek amacıyla minimum görüntü gerektirmektedir. Kesin deformasyon tespitleri elektromanyetik olarak kararlı olan noktalar üzerinden gerçekleştirildiğinden PS seçim süreci oldukça önemli bir adımdır (Duro et al. 2003). SPN tekniği birçok deformasyon tespiti işleminde başarı ile uygulanmıştır (Crosetto et al. 2008; Herrera et al. 2011; Duro et al. 2013; Sillerico et al. 2015).

A Persistent Scatterer Pair (PSP)

PSP, tam çözünürlüğe sahip bir SAR görüntü serisindeki PS' lerin tanımlanması amacıyla geliştirilen bir tekniktir. Bu teknik çözünürlük kaybıyla sonuçlanan filtreleme işlemine güvenmeyerek atmosferik etki, yörünge hataları ve yavaş yavaş değişen bozulmalar gibi sorunları ortadan kaldırma becerisinden dolayı diğer sürekli saçıcı interferometri tekniklerinden farklıdır (Costantini et al. 2008; 2010; 2013). Bu beceri, göreceli sinyaldeki aynı bozulmadan etkilenen yakın mesafeli nokta çiftlerindeki PS' lerin hem tanımlanmasına hem de analizine bağlıdır. Costantini ve arkadaşları geliştirdikleri bu teknik hakkında birçok örnek uygulama gerçekleştirmişlerdir (Costantini et al. 2014).

Coherent Pixels Technique (CPT)

CPT tekniği deformasyonu, atmosferik etkiyi ve DEM hatalarını interferogram yığınının çıkarmayı esas alan bir PSI tekniğidir. CPT doğrusal veya doğrusal olmayan deformasyon çıkarımına bağlı olarak iki adıma ayrılır. İlk adımda deformasyonun doğrusal hızını ve DEM hatasını dikkate alan doğrusal bir modelin mevcut verilere göre ayarlanmasıdır. Deformasyonun doğrusal terimi ve DEM hatası tahmin edildikten sonra algoritma, doğrusal olmayan deformasyonu elde etmek amacıyla ilgili faz katkılarını atmak için uzaysal ve zamansal atmosferik etkilerin farklı davranışlarını hesaba katar. CPT tekniği geliştirip birçok uygulamada başarı ile test edilmiştir (Mora et al. 2003; Mallorqui et al. 2004; Blanco et al. 2008).

Interferometric Point Target Analysis (IPTA)

IPTA, uzun bir gözlem süresi boyunca sürekli saçılma davranışı gösteren seçilmiş nokta hedeflerine uygulanan bir tekniktir. Uzun baz SAR verilerindeki atmosferik etkiden kaynaklanan hatalar çalışma alanının birden fazla görüntüsü kullanılarak azaltılır ve daha yüksek doğruluk elde edilir. IPTA tekniği deformasyon tespitinde milimetre hassasiyetinde sonuçlar sunmaktadır (Werner et al. 2003; Chen et al. 2012).

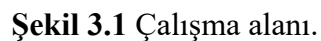
SqueeSARTM

SqueeSARTM PSI tekniğine ilerleme sağlayan bir tekniktir. PSI sadece sürekli saçıcıları kullanırken SqueeSARTM sürekli saçıcılar ile beraber dağıtılmış hedefleri de kullanarak veri kombinasyonunu sağlamaktadır. Dağıtılmış hedefler genellikle zayıf tutarlı saçıcıların olduğu kentsel olmayan alanlarda görülen noktalardır. Bu nedenle teknik özellikle kentsel alan dışındaki bitki örtüsünün olduğu alanlarda etkin olarak çalışmaktadır (Ferretti et al. 2011; Tofani et al. 2013; Mirzaee et al. 2017b).

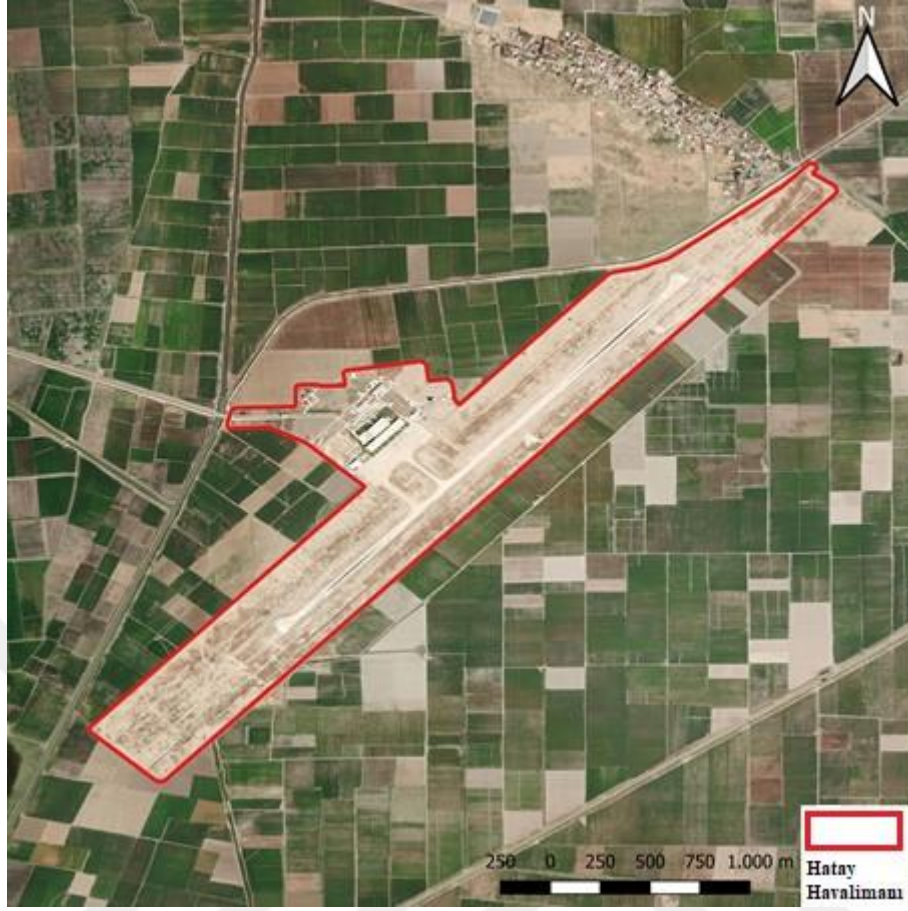


ÇALIŞMA ALANI VE MATERYALLER

Hatay Havalimanı Doğu Akdeniz havzası içerisinde, Türkiye'nin en güneyinde yer alan Hatay ilinin sınırları içerisinde yer almaktadır (Şekil 3.1). 2007 yılında faaliyete geçen havalimanı 2.70 km^2 alana sahip $36^{\circ}21'46''$ Kuzey, $36^{\circ}16'56''$ Doğu koordinatlarında yer almaktadır. Havalimanı coğrafi olarak Antakya ilçesine 25 km, İskenderun ilçesine 45 km uzaklıkta olup, batıdan Amanos Dağları, doğudan Amik Ovası, güneyden ise Kuseyr Platosu tarafından çevrilmiştir.

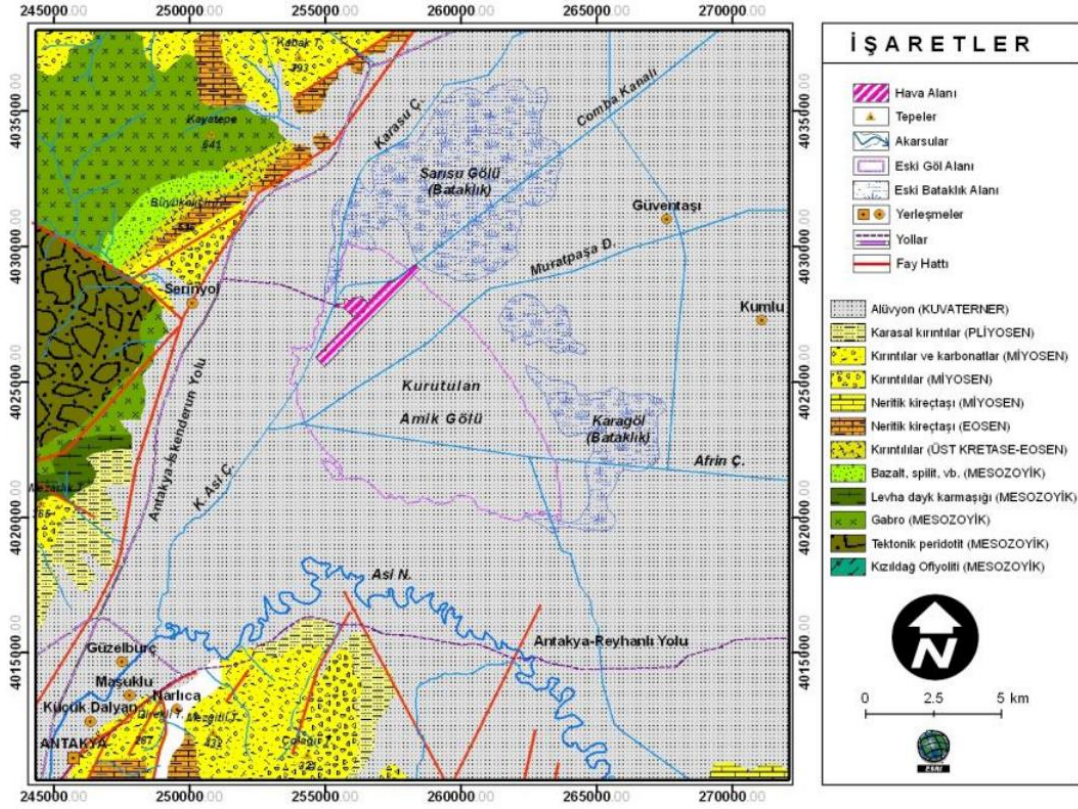


31



Şekil 3.2 Çalışma alanının sınırlarını gösteren Google Earth görüntüsü.

Çalışma alanı ve çevresi incelendiğinde birçok farklı jeolojik birimin olduğu görülmektedir. Özellikle çok uzun yıllar içerisinde oluşan kil dolgular, kireç taşları, killi kireçtaşı, kumtaşı gibi birimler havalimanının yerleştiği zemin yapısında görülmektedir. Amik ovası başta olmak üzere çalışma alanının genelinde görülen alüvyonlar en genç jeolojik birimlerdir (Ateş vd. 2004; Özşahin 2010). Bu alüvyonlar Amik Ovası'nın oluşumunda etkili olmuştur. Amik Ovası bölgede bulunan Asi, Afrin ve Karasu akarsularının taşıdığı alüvyonların birikmesi ile oluşmuştur (Özşahin ve Kaymaz 2013).



Şekil 3.3 Çalışma alanının jeoloji haritası (Özşahin 2010).

Çalışma alanının olduğu bölgede şiddetli ve çok şiddetli yağışların olması nedeniyle sel ve taşkınlar meydana gelmektedir. Taşkınların oluşmasında yağışların yanında jeolojik ve jeomorfolojik yapıda etkili olmaktadır. Havalimanının kurutulan amik gölü sınırları içerisinde olması nedeniyle şiddetli yağışlarda yer altı sularının seviyesi artmaktadır. Bu nedenle sel ve su baskınları oluşmaktadır. Ayrıca havalimanı çevresinde de göllenmeler olmakta bu sebeple havalimanı ve çevresinde açık ve kapalı drenaj kanalları yapılmıştır.

Havalimanı, bulunduğu bölgeden geçen diri fay hatları sebebiyle I. Derece deprem bölgesidir. Bu sebeple tarih boyunca bölgede büyük çaplı depremler gerçekleşmiştir. Havalimanının konumlandırıldığı zeminin jeolojik olarak zayıf olması nedeniyle meydana gelen depremlerden çok ciddi etkilenmektedir. Kuvaterner alüvyon yapıya sahip olan çalışma alanında gerçekleşecek bir depremde zemin sıvılaşması gerçekleşebilir. Böyle bir durumda zeminde çökmeler, kabarmalar ve kırılmalar oluşabilir.

3.2 KULLANILAN MATERYALLER

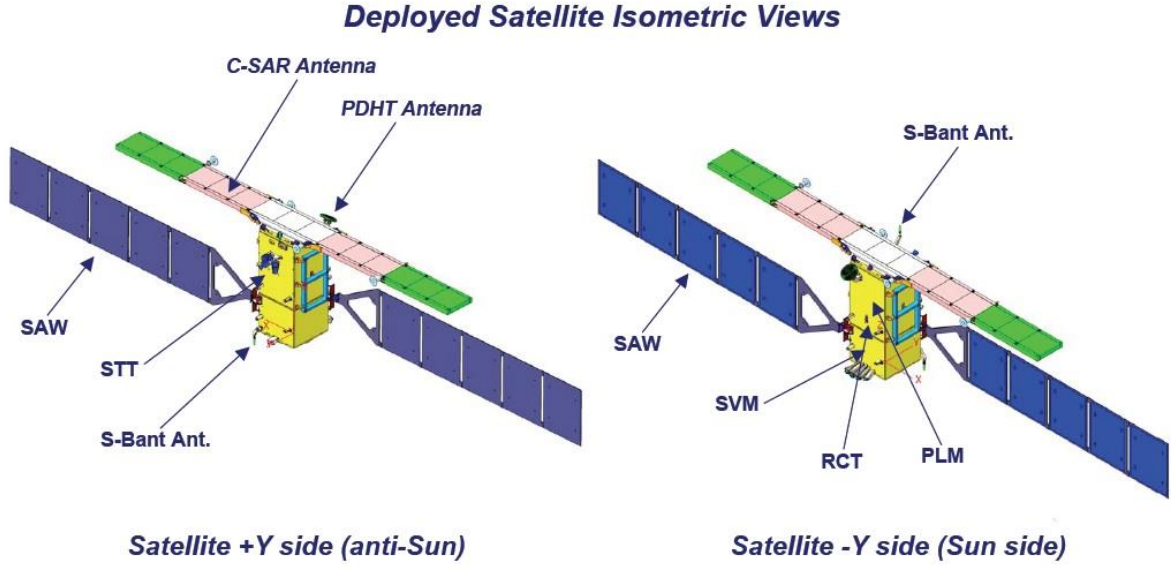
3.2.1 Sentinel-1 SAR Uydu Görüntüleri

Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından geliştirilen Sentinel uydusu, ESA'nın GMES (Global Monitoring for Environment and Security) olarak adlandırdığı Copernicus Dünya Gözlem Programı çerçevesinde sunulan bir programdır. Bu program kapsamında 7 farklı radar ve optik uydunun fırlatılması hedeflenmiştir. Ayrıca bu 7 farklı uydunun her birinin 2 uydu içermesi planlanmıştır. Bu kapsamda planlanan SAR uyduları Sentinel 1A ve Sentinel 1B uydularıdır. Planlama doğrultusunda 3 Nisan 2014 tarihinde Sentinel 1A uydusu, 25 Nisan 2016 tarihinde ise Sentinel 1B uydusu fırlatılmıştır. Sentinel 1B uydusunda yaşanan teknik bir arıza nedeniyle uydunun misyonu ESA tarafından 23 Aralık 2021 tarihinde sonlandırılmıştır.

Bu çalışmada Sentinel 1A uydusunun sağladığı SAR görüntüleri kullanılmıştır. ESA tarafından fırlatılan ERS ve Envisat uydularının devamı niteliğinde olan Sentinel 1A uydusu French Guina bölgesinden fırlatılmıştır. ERS ve Envisat uydularında bulunan veri boşluklarını doldurmak ve SAR –C band verisinin sürekliliğinin sağlanması hedeflenmiştir.

Sentinel 1A uydusunun birçok üstün özelliği bulunmaktadır. En büyük üstün özelliği ise geniş alanlarda (ortalama 250 km'ye varan) burst görüntüleme geometrisini kullanarak interferometriye uygun veri sunabilmesidir. Sentinel 1A İnterferometrik geniş tarama (IW) görüntü geometrisini diğer SAR uydu misyonlarından ayıran en büyük fark sağladığı 250 km şerit genişliği özelliğidir. Bir IW görüntüsü, IW-1, IW-2 ve IW-3 şeklinde isimlendirilen üç alt görüntüden oluşmaktadır. Bu alt görüntülerin her biri kademeli taramalar (TOPS) yöntemi ile elde edilen 9 burstan meydana gelmektedir. Sonuç olarak bir Sentinel 1A IW görüntüsü 27 adet burstten oluşur ve deburst tekniği kullanılarak burstler birleştirilerek tek bir görüntü elde edilmiş olur.

Sentinel 1A uydusunun birçok haritalama görevinde bulunması planlanmıştır. Bu görevlere, deniz çevresi ve kıyı bölgelerinin takibi, okyanus ve buzul kütle takibi, tarım, orman, topoğrafik haritalama, afet durumlarında acil haritalama örnek verilebilir. Sentinel 1A uydusuna ilişkin sistem bileşenleri Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.4 Sentinel-1A uydusunun sistem bileşenleri.

Sentinel 1A uydusunun ağırlık, fırlatma yeri ve görüntüleme tipi gibi teknik özelliklerine ilişkin bilgiler Çizelge 3.1’de sunulmuştur.

Çizelge 3.1 Sentinel-1A uydusunun teknik özellikleri (URL 3).

	Sentinel-1A
Ağırlık	≈ 1157 kg
Fırlatma Yeri Ve Aracı	French Guina, Soyuz roketi
Tahmini Ömrü	7.25 Yıl
Uçuş Yüksekliği Ve Yörünge Tipi	693 km, Güneş Senkronize, Yakın-kutupsal,Dairesel
Zamansal Çözünürlük	12 Gün
Görüntüleme Tipi	Stripmap, Interferometric Wide Swath, Extra-Wide Swath, Wave
Mekansal Çözünürlük	Stripmap= 5 m, Interferometric Wide Swath= 20 m Extra-Wide Swath= 100 m,Wave= 20 m
Kullanılan Band Tipi	C band
Tarama Genişliği	Stripmap= 80 m, Interferometric Wide Swath= 250 m Extra-Wide Swath=400 m, Wave= 20 m

3.2.2 Hatay Havalimanı Metrik Verileri

Hatay Havalimanının yapımına 2001 yılında başlanmış, 2007 yılında hizmete açılmıştır. Havalimanı, Antakya ilçesine 25 km, İskenderun’a 45 km, Reyhanlı’ya 41 km ve Kırıkhan

ilçesine 25 km uzaklıktadır. Havalimanı iç ve dış hatlar terminal binası 8 Mart 2011 tarihinde bitirilerek hizmete açılmıştır. Terminal binasının alanı $5000 m^2$ olup toplam büyüklüğü ise $46826 m^2$ 'dir. Havalimanında 3 km uzunluğunda, 45 m genişliğinde bir adet pist bulunmaktadır. Hatay Havalimanına ilişkin genel bilgiler Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Hatay havalimanının genel bilgileri.

Hatay Havalimanı	
Bulunduğu Şehir	Hatay
Hizmete Giriş Yılı	09.12.2007
Statüsü	Sivil
ICAO Kodu	LTDA
Trafik Tipi	İç hat/Dış hat
IATA	HTY
Terminal Binası Toplam Büyüklüğü	$46826 m^2$
Pist Sayısı	1
Pist büyüklüğü	3000x45 m
Coğrafi Koordinatlar	36°22'20N - 036°17'55E

3.3 KULLANILAN YAZILIMLAR

3.3.1 SNAP Sentinel ToolBox

Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından geliştirilen SNAP (Sentinel Application Platform) Sentinel ToolBox, uydu görüntülerinin işlenmesi ve analizi için kullanılan bir yazılım paketidir. Sentinel uydularından elde edilen verilerin işlenmesi amacıyla tasarlanan bu yazılım, Sentinel ile beraber diğer uydu verilerini de işleyebilmektedir.

SNAP, Sentinel uydularından elde edilen verileri indirip farklı bantlarda görüntüleyebilmektedir. Ham uydu verilerinin daha doğru analiz edilebilmeleri için gerekli olan ön işleme adımlarını başarı ile gerçekleştirmektedir. Gelişmiş görüntü işleme becerisi ile uydu görüntülerinden bilgi çıkarmada yüksek başarımlar göstermektedir. Ayrıca birçok veri analiz aracı sunan SNAP, tarım, orman, su kaynakları, çevre izleme, deformasyon tespiti ve afet yönetimi gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

SNAP Sentinel Toolbox, Windows, macOS ve Linux işletim sistemlerinde çalışabilen Java dilinde yazılmış açık kaynak kodlu bir yazılımdır. ESA tarafından ücretsiz olarak sunulmakta ve sürekli güncellenmektedir.

3.3.2 StaMPS

StamPS (Stanford Method for Persistent Scatterers), radar uydularından elde edilen verilerin işlenmesi ve analiz edilmesi amacıyla geliştirilen bir yazılımdır. InSAR verilerini analiz etmede yüksek başarıma sahip bir yazılımdır. Özellikle yeryüzündeki çok küçük deformasyonları hassas bir şekilde takip edilmesi için kullanılan PSI ve SBAS gibi tekniklerin analizinde kullanılmaktadır. Ayrıca jeoloji ve çevre bilimleri gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır.

MATLAB programlama dilinde yazılan StaMPS, farklı yazılım ve araçlar ile bütünleşebilmekte ve kullanıcılara kendi verilerini işleyebilme imkânı sunmaktadır. Yazılım araştırma amacıyla ücretsiz olarak kullanılabilir.

3.3.3 ENVI SARscape

ENVI SARscape, uzaktan algılama ve yer gözlem verilerinin işlenmesi ve analizi amacıyla akademik ve özel sektör tarafından yaygın olarak kullanılan oldukça gelişmiş bir yazılımdır. SAR verilerinin analiz ve yorumlanması amacıyla geliştirilen bu yazılım ENVI yazılımı ile bütünleşik çalışarak uydu radar verilerinin analizlerini detaylı bir şekilde gerçekleştirme imkânı sunmaktadır. Geniş bir araç setine sahip olan ENVI SARscape, veri işleme, interferometri, deformasyon analizi, gelişmiş görüntü analizi gibi birçok analizi ve görevi başarı ile yapabilmektedir.

ENVI'nin CBS yazılımları ile bütünleşik çalışabilen SARscape zengin görseller sunmaktadır. Ayrıca MATLAB ve Python gibi programlama dilleri ile bütünleşik çalışabilmede ve bu şekilde özel analizler yapabilmeye imkân sunmaktadır. SARscape, Sentinel gibi radar uydularından elde edilen tüm verileri işleyebilmektedir.

3.3.4 Diğer Yazılımlar

Tez çalışması kapsamında atmosferik filtreleme amacıyla GACOS (Generic Atmospheric Correction Online Service), harita üretimi ve düzenlemesi işlemlerinde ArcGIS ve QGIS, PSI uygulaması gerçekleştirilirken MATLAB yazılımları kullanılmıştır. İstatistiki analizler ve deformasyon fark haritası üretimlerinde ise BLUH ve LISA yazılımlarından fayda sağlanmıştır.



BÖLÜM 4

METODOLOJİ

4.1 SENTİNEL-1 VERİLERİNİN ELDE EDİLMESİ

4.1.1 Veri Kümesi Tayini

SAR görüntüleri yardımıyla deformasyon tespiti yapılırken doğru ve güvenilir sonuçlar elde edebilmek için veri kümesi tayini oldukça önemlidir. Bu doğrultuda veri kümesi belirlenirken gözlem süresi, görüntü alım sıklığı, geçiş yörüngesi gibi faktörlere dikkat edilmelidir. Uzun süreli ve yavaş hareket eden deformasyonları tespit edebilmek için veri setinin gözlem süresi uzun bir zamana yayılmalıdır. Deformasyonları daha hassas bir şekilde tespit edebilmek için ise görüntü alım periyodunun sık olmasına dikkat edilmelidir. Ayrıca seçilen görüntülerin aynı yörüngede olması geometrik tutarlığı arttıracığından analiz sonuçlarını olumlu yönde etkilemektedir.

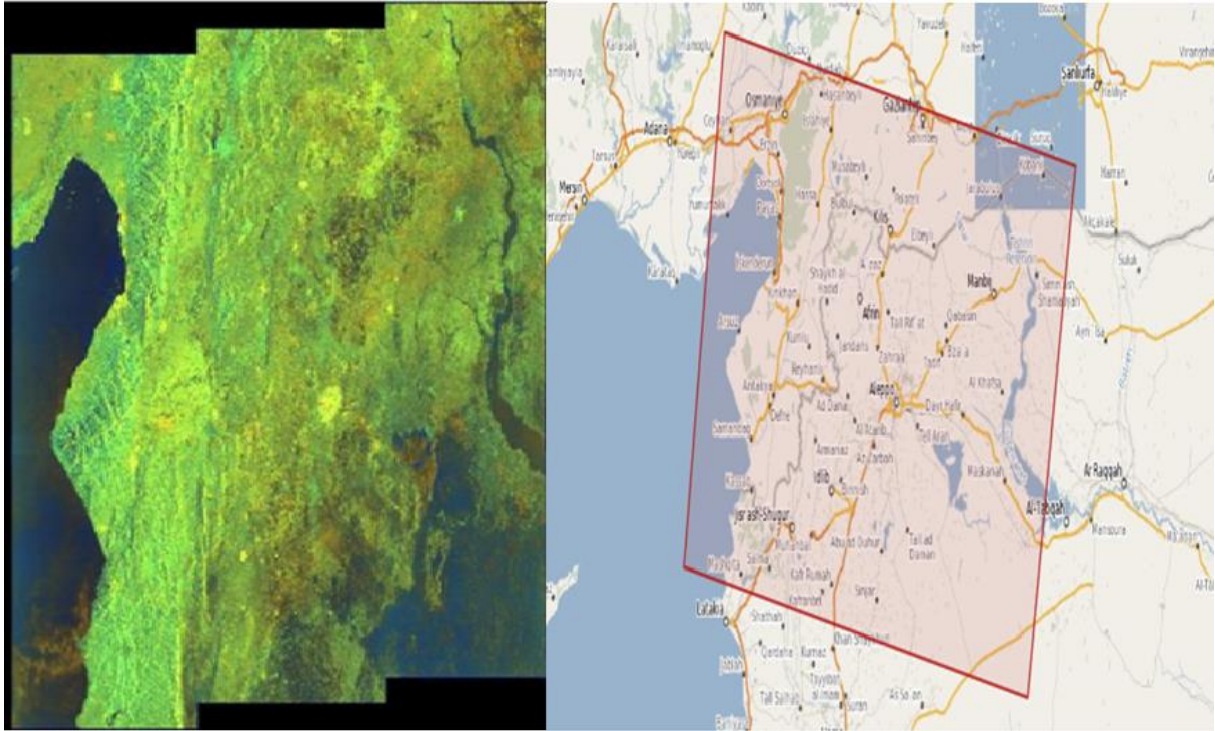
Bu kapsamda tez çalışmasında 02/12/2017-29/01/2023 tarihlerini kapsayan 151 adet Sentinel SAR SLC veri kümesi kullanılmıştır. Kullanılan görüntüler VV VH polarizasyonunda ve Interferometric Wide Swath (IW) modundadır. Ayrıca görüntüler 5.6 cm dalga boyuna sahip ve alçalan geçiş yörüngesinde elde edilmiştir. Tez çalışmasında kullanılan veri kümesindeki görüntülere ait özellikler Çizelge 4.1’de sunulmuştur.

Çizelge 4.1 Veri kümesindeki SAR görüntülerinin özellikleri.

Sentinel-1A	
Mod	IW
Bant	C
Dalga boyu	5.6cm
Yörünge	21
Geçiş Yörüngesi	Alçalan
Polarizasyon	VV VH
Alım Periyodu	02/12/2017-29/01/2023
Görüntü Sayısı	151

4.1.2 Verilerin Temini

Tez çalışmasında kullanılacak SAR görüntüleri, Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından ücretsiz bir şekilde sunulan Sentinel 1A uydusunun sağladığı görüntülerden elde edilmiştir. Bu kapsamda ESA copernicus üzerinden Single Look Complex (SLC) formatında, Aralık 2017-Ocak 2023 periyodunda 36 günde 1 görüntü olacak şekilde toplam 151 adet görüntü indirilmiştir. Çalışmada kullanılacak görüntülere ait kapsama alanı ve ön izlemesi Şekil 4.1de sunulmuştur.

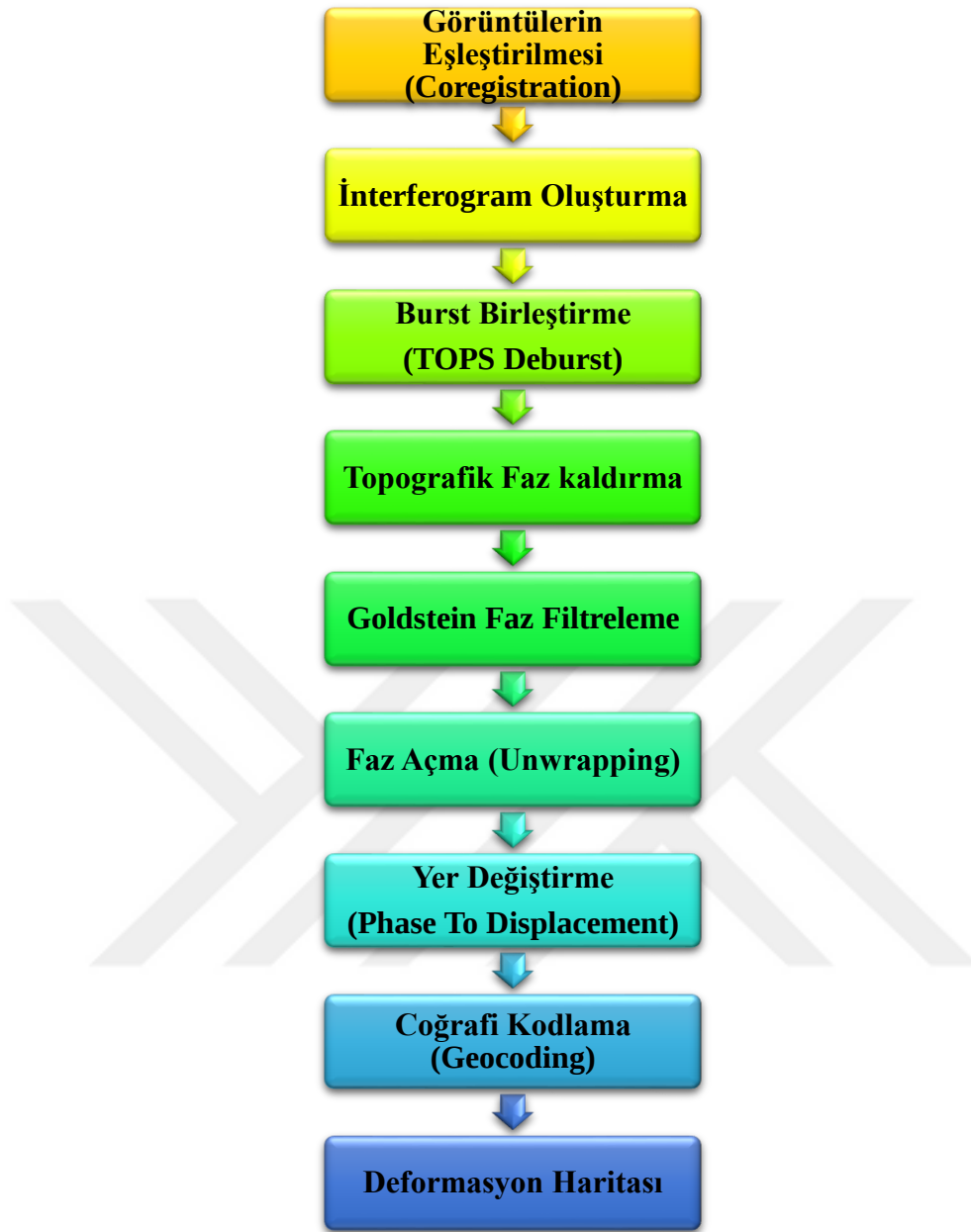


Şekil 4.1 Görüntülere ait kapsama alanı ve ön izlemesi.

4.2 DEFORMASYON HARİTALARININ ÜRETİMİ

MT-InSAR teknikleri ile deformasyon haritalarının üretiminin temelini DInSAR tekniği oluşturmaktadır. Bu doğrultuda PSI ve SBAS teknikleri ile deformasyon haritalarının üretimi açıklanmadan önce DInSAR tekniği ile deformasyon haritalarının üretim işlemleri açıklanmalıdır.

DInSAR tekniği, yeryüzünde meydana gelen deformasyonları tespit etmek amacıyla geliştirilmiş bir uzaktan algılama tekniğidir. Teknik, iki veya daha fazla SAR görüntüsünü kullanarak yüzey deformasyonlarını oldukça hassas bir şekilde haritalandırmaktadır. DInSAR tekniği ile deformasyon haritalarının oluşturulmasına ait işlem adımları Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2 DInSAR tekniği ile deformasyon haritalarının üretilmesine ait işlem adımları.

- **Görüntülerin Eşleştirilmesi (Coregistration)**

DInSAR uygulamasında kullanılacak görüntüler belirlendikten sonra görüntü eşleştirme (Coregistration) işlemi gerçekleştirilir. Bu işlem iki SAR görüntüsünün piksel altı doğrulukta eşleştirilmesi anlamına gelmektedir. Yani coregistration, master görüntünün slave görüntü ile piksel bazlı eşleştirilmesi (coregistration) esasına dayanmaktadır. Bu işlem DInSAR uygulaması için oldukça önemli bir adımdır. Eşleştirme işlemi kaba ve hassas olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmektedir. Kaba eşleştirme aşamasında, genellikle yörünge bilgileri ve iki görüntüdeki ortak noktalar kullanılarak kayıklıklar hesaplanır. Hassas aşamada ise, piksel altı

eşleşmeyi sağlayabilmek için kaba eşleşmede çıkan kayıklıklardan da faydalanılarak otomatik korelasyon teknikleri kullanır. Bu tekniklerden, iki görüntünün genliklerinin karelerinin çapraz korelasyonu tekniği sıklıkla kullanılmaktadır (Gabriel ve Goldstein 1988; Rosen et al. 2000; Hanssen 2001).

• İnterferogram Oluşturma

Görüntüler eşleştirilip hassas bir şekilde hizalandıktan sonra interferogram oluşturma adımına geçilir. İnterferogram, en az iki SAR görüntüsünün faz bilgilerinin karşılaştırılması sonucu meydana gelen görüntüye verilen isimdir. SAR görüntülerindeki faz farklarını içeren interferogramlar, yüzey deformasyonlarının tespiti amacıyla kullanılmaktadır.

SAR görüntüleri kompleks sayılar şeklinde ifade edilir (Eşitlik 4.1). İnterferogram master görüntünün slave görüntünün kompleks eşleniği ile çapraz çarpılmasıyla elde edilir.

$$S = A \cdot e^{i\varphi} \quad (4.1)$$

- S: Kompleks SAR sinyali
- A: Genlik (Amplitüd)
- φ : Faz

Eşitlik 4.2 ve 4.3'deki S_1 master görüntü olsun, slave görüntü ise S_2 olsun.

$$S_1 = A_1 \cdot e^{i\varphi_1} \quad (4.2)$$

$$S_2 = A_2 \cdot e^{i\varphi_2} \quad (4.3)$$

Bu iki görüntü arasındaki faz farkı Eşitlik 4.4 ile hesaplanır.

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 \quad (4.4)$$

İnterferogramların iki SAR görüntüsünün kompleks çarpımı sonucu oluştuğunu ifade etmiştik. Bunu matematiksel olarak Eşitlik 4.5 şeklinde ifade edelim. Eşitlikte verilen S_2^* , S_2 'nin kompleks eşleniğidir.

$$I = S_1 \cdot S_2^* \quad (4.5)$$

Eşitlik (4.5) açık bir şekilde yazılırsa, yüzey deformasyonunu temsil eden faz farkı ($\Delta\varphi$), Eşitlik 4.8' de görüldüğü gibi olur.

$$I = A_1 \cdot e^{i\varphi_1} \cdot A_2 \cdot e^{-i\varphi_2} \quad (4.6)$$

$$I = A_1 \cdot A_2 \cdot e^{i(\varphi_1 - \varphi_2)} \quad (4.7)$$

$$I = A_1 \cdot A_2 \cdot e^{i\Delta\varphi} \quad (4.8)$$

Faz farkı yüzey deformasyon fazı ile birlikte birden fazla bileşenden meydana gelmektedir. Bu bileşenler Eşitlik 4.9'da sunulmuştur.

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{flat} + \Delta\varphi_{elevation} + \Delta\varphi_{displacement} + \Delta\varphi_{atmosphere} + \Delta\varphi_{noise} \quad (4.9)$$

$\Delta\varphi_{flat}$ = Düz yeryüzü faz bileşeni

$\Delta\varphi_{elevation}$ = Topografik faz bileşeni

$\Delta\varphi_{displacement}$ = Deformasyon faz bileşeni

$\Delta\varphi_{atmosphere}$ = Atmosferik faz bileşeni

$\Delta\varphi_{noise}$ = Faz gürültü bileşeni

Bu bileşenler matematiksel olarak aşağıda sunulan Eşitlikler ile ifade edilmektedir.

$$\Delta\varphi_{flat} = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n S}{R \tan \theta} \quad (4.10)$$

- $\Delta\varphi_{flat}$: Düz yeryüzü faz bileşeni (Dünyanın eğriliğinin faza etkisi)
- λ : Dalga boyu
- B_n : Baz uzunluğu
- R : Uydu hedef arasındaki mesafe
- θ : Bakış açısı

- S : Uydu yörüngesi arasındaki mesafe

$$\Delta\varphi_{elevation} = -\frac{\Delta h}{\sin \theta} \frac{4\pi B_n}{\lambda R} \quad (4.11)$$

- $\Delta\varphi_{elevation}$: Topografik faz bileşeni (Topografik yükseklik değişiklikleri)
- Δh : Yükseklik farkı
- $\sin \theta$: Bakış açısının sinüsü

$$\Delta\varphi_{displacement} = \frac{4\pi}{\lambda} d \quad (4.12)$$

- $\Delta\varphi_{displacement}$: Deformasyon faz bileşeni
- d : Yüzey deformasyonu
- λ : Dalga boyu

• Burst Birleştirme (TOPS Deburst)

Bölüm 3.2.1’ de detaylı bir şekilde açıklandığı üzere TOPS modundaki radar görüntüleri 27 alt burstten meydana gelmektedir. Çalışma alanının birden fazla burst içerisinde yer alması durumunda veya birbirini izleyen burstleri tek bir görüntü haline getirilmesi için deburst işlemi uygulanır. Bu işlem gerçekleştirilirken tüm burstler mesafe ve azimut yönünde yeniden örneklendirilirler.

Mesafe yönünde, tüm burstlerdeki ve aynı hizadaki yan burstler ortak zamanda (t anında) birleşir. Mesafe yönünde örtüşen alanlar için, birleştirmeler burstlerin ortasından gerçekleştirilir. Azimut yönünde ise burstler sıfır Doppler zamanına göre birleştirilir.

Deburst işlemi genel olarak üç matematiksel adımdan oluşur. Öncelikle burstlerin örtüşmesi Eşitlik 4.13 ve Eşitlik 4.14 ile hesaplanır. Örtüşmeler sağlandıktan burstler arasındaki tutarlılığı sağlamak amacıyla gerekli faz düzeltmeleri yapılır (Eşitlik 4.15). Son adımda ise düzeltilen burstlerin örtüşen alanları hizalanarak birleştirme işlemi gerçekleştirilir (Eşitlik 4.16).

$$\Delta t = t_{burst2} - t_{burst1} \quad (4.13)$$

$$\Delta \varphi = \varphi_{burst2} - \varphi_{burst1} \quad (4.14)$$

- Δt : İki burst arasındaki zaman farkı
- $\Delta \varphi$: İki burst arasındaki faz farkı

$$\varphi_{düzeltilen} = \varphi_{burst} + \Delta \varphi \quad (4.15)$$

$$I_{birleştirilen}(x, y) = \sum_{i=1}^n I_{burst}^i(x, y) \quad (4.16)$$

- $I_{birleştirilen}(x, y)$: Birleştirilmiş interferogram
- $I_{burst}^i(x, y)$: i'ninci burstün interferogramı

• Topografik Faz Kaldırma

İnterferogram oluşturma adımında değindiğimiz faz farkında katkı olarak bulunan topografik faz bileşeni bu adımda giderilir. Bu katkı bileşeni genel olarak bir referans Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) kullanılarak giderilmektedir. Bu işlem birçok yazılımın sunmuş olduğu Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) tarafından üretilen SYM kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SRTM 60° kuzey enlemi ile 56° güney eylemi arasını (Dünya yüzeyinin yaklaşık %80'ni) kapsamaktadır. 3arc-sec (3x3 saniye) yani yaklaşık olarak 90x90 m örneklem aralığına sahiptir. Ayrıca 1 arc-sec çözünürlüğü de mevcuttur.

• Goldstein Faz Filtreleme

Goldstein Faz Filtreleme, İnterferometrik fazda zamansal, geometrik uyumsuzluk, hacimsel yayılım ve diğer görüntü işleme hatalarından kaynaklı bulunan gürültüyü en düşük seviyeye indirmek amacıyla kullanılan bir filtreleme işlemidir. Bu işlemde interferogramda bulunan bu

faz gürültüsünü azaltmak ve faz bilgisinin bozulmasının önüne geçmek için spektral bir yöntem uygulanır. Bu yöntem iki adımda gerçekleştirilir. İlk olarak interferogramın frekans bileşenlerini elde etmek amacıyla interferogramın fourier dönüşümü uygulanır (Eşitlik 4.17).

$$H(u, v) = |Z(u, v)|^\alpha \quad (4.17)$$

Goldstein filtresi yüksek frekanslı gürültü bileşenlerini baskılamak amacıyla frekanslara uygulanır. Eşitlik 4.18 ile tanımlanan goldstein filtresi interferogramın fourier dönüşümüne uygulanır.

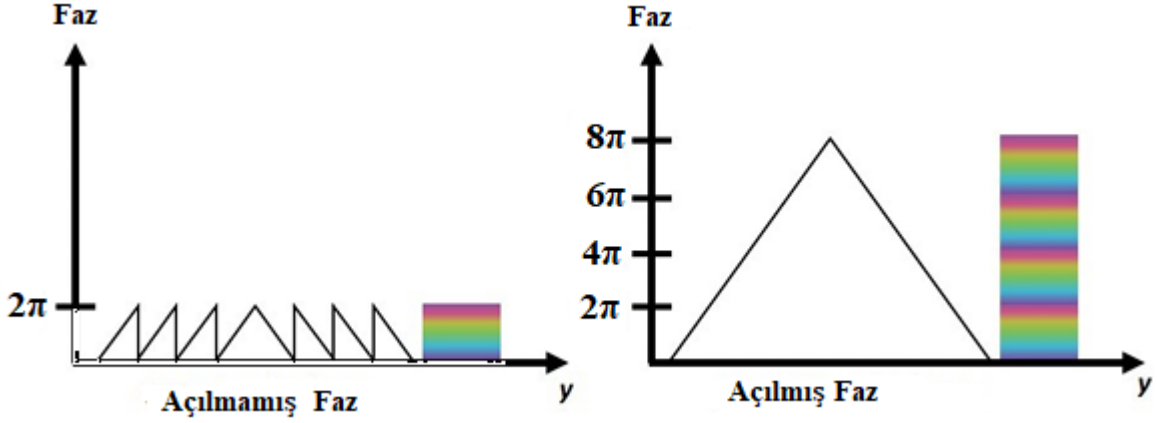
$$Z(u, v) = \exp - \left(\frac{\frac{u^2}{\sigma_u^2} - \frac{2uv}{\sigma_u \sigma_v} + \frac{v^2}{\sigma_v^2}}{2(1 - \rho^2)} \right) \quad (4.18)$$

Filtreleme sonunda bant genişlikleri $(1 + \alpha)^{-1}$ bağıntısı ile indirgenmiş olur. $\alpha = 1$ durumunda bant genişlikleri yarıya iner ve SLR yaklaşık olarak karesine eşit olur.

- **Faz Açma (Unwrapping)**

DInSAR ile deformasyon belirlemede en önemli adımlardan birisi faz açma adıımıdır. Çünkü deformasyon miktarını belirleyen en önemli etken açılmış mutlak fazdır. Yani dairesel olan faz bilgisini metrik ölçülebilen bir birime dönüştürme işlemidir.

İnterferogramdaki faz değerleri mod 2π yani $-\pi$ ile $+\pi$ arasında değer alır. Bu sebeple 2π 'den büyük olan faz değerleri sıfırdan tekrar başlar. Buda arazi yüksekliğinde bir belirsizlik meydana getirir. Bu belirsizlikten kurtulup sürekli bir faz elde edebilmek için doğru sayıda 2π eklenmelidir (Şekil 4.3) (Takajo and Takahashi 1988).



Şekil 4.3 Faz açma prensibi.

Faz açma işlemini gerçekleştirmek için çeşitli algoritmalar kullanılmaktadır. Sıklıkla kullanılan algoritmalar; en küçük kareler, dal kesim (branch Cut), ağ akış gibi algoritmalar. Bu algoritmalar faz sürekliliğini ve koherens bilgilerinden faydalanarak faz açma işlemini gerçekleştirirler (Goldstein et al. 1988). Ayrıca SNAPHU (Statistical-Cost Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping) yaygın kullanılan bir yazılımdır. Bu yazılım ağ akış algoritması ile çalışmaktadır.

- **Yer Değiştirme (Phase To Displacement)**

Faz açma işleminden sonra sürekli bir halde olmasına karşın faz farkları ölçülebilen metrik bir değer değildir. Radyan fazları mutlak yer değiştirmelere dönüştürmek için Phase To Displacement işlemi uygulanır. Bu işlem sonucunda faz açma işleminin sonucunda oluşan görüntüye benzer bir çıktı oluşur ancak faz bakış doğrultusu (LOS) yönünde metre cinsinden yüzey değişimlerine dönüşmüş olur. Bu şekilde her pikseldeki yüzey değişim değerleri elde edilmiş olur.

- **Coğrafi Kodlama (Geocoding)**

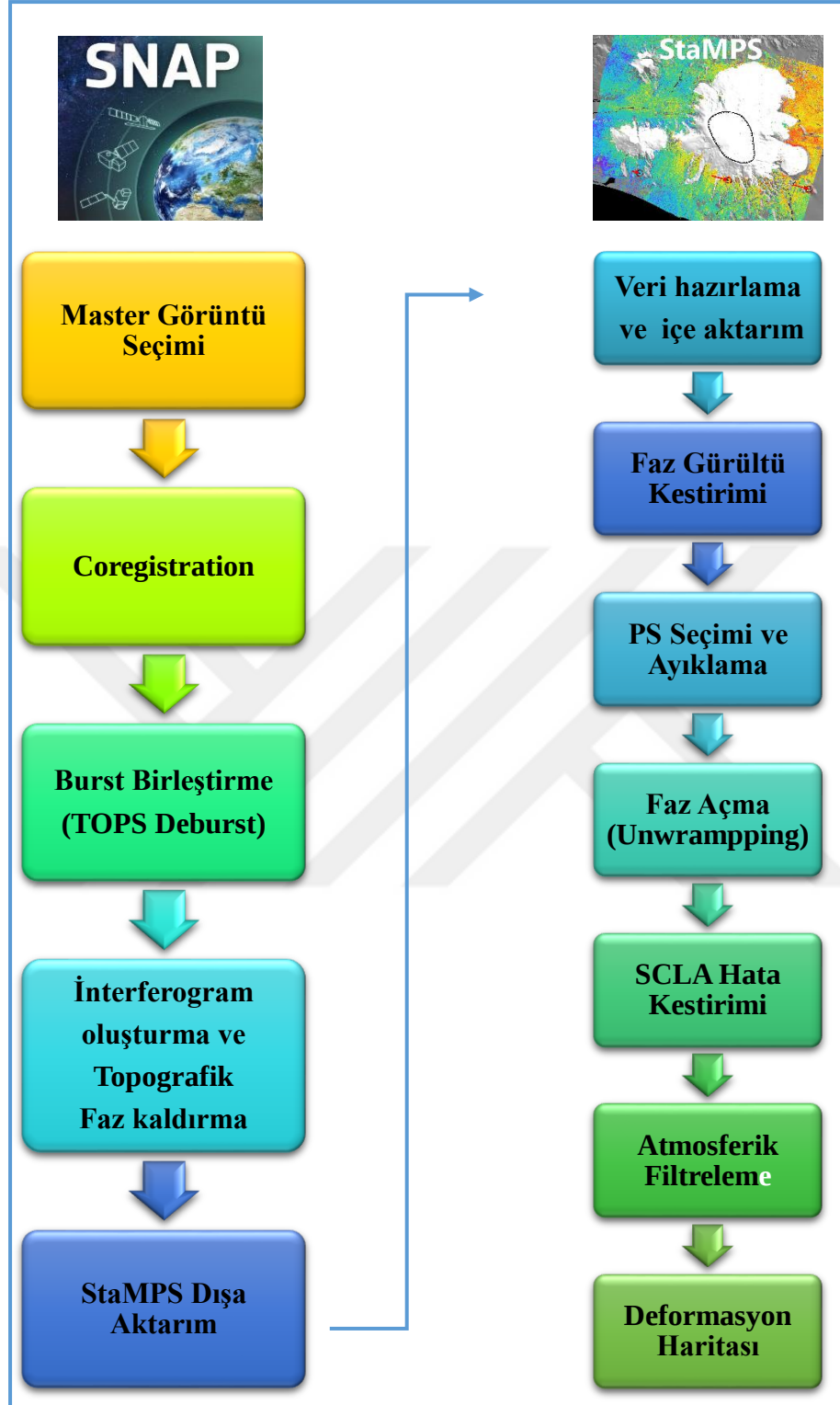
Yer değiştirme adımıyla sonra oluşan SAR görüntüsü menzil-azimut projeksiyonunda konumlandırılır. Elde edilen yer değiştirme sonuçlarının analiz edilip anlamlandırılabilmesi için standart bir coğrafi koordinat sistemine dönüştürülmesi gerekmektedir. İşte SAR görüntüsünü radar koordinat sisteminden coğrafi koordinat sistemine dönüştürme işlemine coğrafi kodlama (geocoding) veya coğrafi referanslama denilmektedir. Bu işlemi gerçekleştirmek için genellikle

Range Doppler ortorektifikasyon metodu kullanılmaktadır. Bu adım sonunda anlamlı deformasyon haritası oluşturulmuş olur.

4.2.1 PSI Tekniği ile Üretim İşlemleri

PSI tekniği ile deformasyon haritası üretme işlemleri iki bölümden oluşmaktadır. İlk olarak Sentinel-1A SLC görüntülerinin interferometrik işlem adımları, ESA tarafından sunulan Sentinel Uygulama Platformu (SNAP) yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra PS seçimi, DSM hata düzeltmesi ve interferogramların açma (unwrapping) işlemi açık kaynaklı StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers) yazılımı ile yapılmıştır. Ubuntu 18.04 işletim sistemi ve StaMPS 4.1 sürümü kullanılmıştır. PSI tekniği ile deformasyon haritalarının üretilmesine ait işlem adımları Şekil 4.4’de verilmiştir.





Şekil 4.4 PSI tekniği ile deformasyon haritalarının üretilmesine ait işlem adımları.

- **Master Görüntü Seçimi**

PSI ile deformasyon analizinde master görüntünün seçimi oldukça önemlidir. Çünkü master görüntünün seçimi interferogramların kalitesini dolayısıyla deformasyonun doğruluğunu direkt etkilemektedir. Master görüntü seçilirken birçok parametre göz önünde bulundurularak işlem gerçekleştirilmektedir. Bu parametreler dik baz uzunluğu (Perpendicular baseline), zamansal baz uzunluğu (Temporal baseline), ortalama Doppler frekans farkı (Doppler centroid frequency difference) ve yükseklik belirsizliği (Height ambiguity) parametreleridir. Kullanılan parametreler doğrultusunda görüntü yığını ile en yüksek korelasyona sahip görüntü master görüntü olarak seçilir (Ferretti 2004; Hooper et al. 2004; Kampes et al. 2004; Chen et al. 2007; Liu et al. 2018). Master görüntü seçiminde kullanılan parametreler aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

- **Dik Baz Uzunluğu (Perpendicular Baseline)**

InSAR analizlerinde oldukça önemli bir yere sahip olan dik baz uzunluğu, iki radar görüntüsü arasındaki uzamsal mesafedir. Bu uzamsal mesafe, farklı zamanlarda elde edilen iki SAR görüntüsünün alımı anında radar antenlerinin konumlarının birbirlerine olan dik uzaklığıdır. Yani yörünge düzlemine dik olan mesafedir. Bu mesafe büyük olması iki görüntü arasında geometrik farklılıkların oluşmasına sebebiyet vermektedir. Buda görüntüler arasındaki uyumu (coherence) düşürerek interferogramların kalitesini negatif yönde etkilemektedir. Dik baz uzunluğu literatürde dik baz uzunluğu, uzamsal baz uzunluğu gibi farklı isimlendirmelere sahiptir.

- **Zamansal Baz Uzunluğu (Temporal Baseline)**

İki SAR görüntüsünün alım tarihleri arasındaki süreye zamansal baz uzunluğu denmektedir. Genellikle gün şeklinde belirtilmektedir. Zamansal baz uzunluğunun yüksek veya düşük olması interferogram kalitesini etkilemektedir. Yüksek zamansal baz uzunluğu olması deformasyonu detaylandırırken, düşük olması deformasyon tespitinin yeterli seviyede belirlenememesine sebebiyet vermektedir. Master görüntünün diğer görüntüler ile olan zamansal baz uzunluğu optimal olmalıdır.

- **Ortalama Doppler Frekans Farkı (Doppler Centroid Frequency Difference)**

Ortalama Doppler frekans farkı, iki SAR görüntüsünün arasında bulunan ortalama Doppler frekanslarının farkıdır. Bu frekans hedef nesnelerden yansıyor geri dönen sinyalin kaydedilme

anına kadar geçen sürede gerçekleşen frekans kaymalarıdır. Bu frekans kayıklıklarının temel sebebi radar anteni ve hedef nesnelerdeki harekettir. Düşük doppler frekans farkına sahip görüntünün master olarak seçilmesi, interferogramların kalitesini pozitif yönde etkileyerek analizlerin güvenilirliğini arttırmaktadır.

- Yükseklik Belirsizliği (Height Ambiguity)

Height Ambiguity, faz rakına karşılık gelen yükseklik değişimidir. Dik baz uzunluğuyla ters orantılıdır. Yükseklik değişimlerine karşı hassasiyeti fazla interferogramlar oluşturulması için yükseklik belirsizliğinin düşük olduğu görüntünün master görüntü olarak seçilmesi gerekmektedir.

En optimal görüntünün master görüntü olarak seçilmesinde yukarıda ifade edilen tüm parametrelerin toplam korelasyonu etkilidir. Toplam korelasyon, konumsal, zamansal ve diğer parametreleri dikkate alarak görüntüler arasında oluşan uyuşumun totalidir. Toplam korelasyon Eşitlik 4.19 ile hesaplanmaktadır.

$$r_{toplaml} = r_{zam} \cdot r_{mek} \cdot r_{doppler} \cdot r_{ter} \quad (4.19)$$

Burada $r_{toplaml}$, toplam korelasyon katsayısını, r_{zam} zamansal, r_{mek} mekansal (konumsal), $r_{doppler}$ doppler, r_{ter} ise termal korelasyonun katsayısını ifade etmektedir. Tüm görüntüler içerisinde $r_{toplaml}$ 'in maksimum olduğu görüntü master görüntü olarak seçilir.

• Coregistration

Optimal master görüntünün seçiminden sonra Coregistration adımına geçilir. Bu adımda öncelikle Split ve Apply Orbit işlemleri gerçekleştirilir. Split işlemi ile çalışma alanının içerisinde kaldığı burstler bölünür. Bu şekilde veri hacmi azaltılarak işleme süresi kısaltılmaktadır. Daha sonra apply orbit işlemi uygulanır. Bu işlem ise görüntülerin coğrafi kodlamasının sağlıklı yapılması için gereklidir. İşlem kapsamında uydunun görüntüyü aldığı andaki konumunu içeren yörünge bilgileri görüntülere uygulanır. Bu ESA tarafından sağlanan yörünge dosyaları ile gerçekleştirilmektedir. Yörünge dosyaları uydunun yörüngesi hakkında hassa bilgiler içermektedir. Bu şekilde görüntülerin daha doğru bir şekilde hizalanması sağlanır.

Daha sonra back geocoding işlemine geçilir. Bu işlem ile tüm görüntüler radar koordinat sisteminden coğrafi koordinat sistemine dönüştürülür. Bu şekilde coğrafi referanslandırılması gerçekleştirilen görüntüler master görüntüye göre birbirlerine hizalandırılarak bir yığın haline getirilmiş olur.

- **İnterferogram Oluşturma**

Coregistration işlemi ile görüntüler referanslandırılıp hizalanarak eşleştirildikten sonra interferogram oluşturma adımına geçilir. DInSAR ile deformasyon haritası üretme bölümünde detaylı bir şekilde anlatılan interferogram oluşturma işlemi burada da aynı şekilde uygulanır. PSInSAR tekniğinde DInSAR tekniğinden farklı olarak bir interferogram yığını oluşturulur. Bunun için N adet SAR görüntüsü kurllanılarak master görüntü referansında N-1 adet interferogram oluşturulur. Tez çalışmasında 151 SAR görüntüsü kullanılarak 150 adet interferogram oluşturulmuştur.

Daha sonra DInSAR ile deformasyon haritası üretme bölümünde açıklanan Deburst ve Topografik faz kaldırma işlemleri uygulanarak StaMPS analizi bölümüne geçmek amacıyla deburst edilmiş stack görüntüler ve topografik fazı giderilmiş interferogramlar dışa aktarılır. Dışa aktarılan veriler ve bu verilerin bilgilerinin StaMPS yazılımında okunması için konfigürasyon dosyaları hazırlanır. Bu işlemin ardından faz gürültü kestirimi adımına geçilir.

- **Faz Gürültü Kestirimi**

Faz gürültü kestirimi veya tahmini, interferogramların faz bilgilerini daha hassas bir hale getirip güvenilirliğini yükseltmek amacıyla uygulanan bir işlemdir. Yüzey deformasyonlarının daha iyi bir şekilde tespiti için önemli bir adımdır. Faz gürültüsü atmosferik etkiler, sensör hataları, geometrik hatalar gibi farklı faktörlerden kaynaklanabilir. Yazılım faz ve genlik bilgilerini değerlendirerek çeşitli filtreler kullanarak gürültü tahminini gerçekleştirir. Ayrıca bu adımda Sürekli saçıcı (PS) adaylarının tahmini de gerçekleştirilir.

- **PS Seçimi ve Ayıklama**

PS'ler yüksek faz kararlılığına sahiptir. Faz stabilitesi, Eşitlik 4.9'da belirtilen ve Atmosferik Faz Ekranı (APS), Dijital Yükseklik Modeli (DEM) gibi hataları içeren bileşenlerin bertaraf edilmesi ile belirlenebilir. Yüksek geometrik ve zamansal korelasyona sahip hedefler PS adayı oldukları için sabit genlik değeri olan pikseller PS potansiyeli taşımaktadır. Faz kestirimi ile

oluşan PS adayları içerisinde gerekli işlemler yapıldıktan sonra PS seçimi gerçekleştirilir. PS seçimi Eşitlik 4.20 dikkate alınarak yapılır.

$$D_A = \frac{\sigma_A}{\mu_A} \quad (4.20)$$

Eşitlik 4. 20’ de D_A , Genlik dağılım indeksini, σ_A veri kümesi (genlik görüntülerinin) içerisindeki her bir pikselin zamansal standart sapmasını μ_A ise veri kümesi içerisindeki her bir pikselin zamansal ortalamasını ifade etmektedir. Bu hesaplama sonucunda ortaya çıkan değer altında kalan değerlere sahip noktalar PS olarak seçilir. Genlik dağılım eşiğini belirten bu değer su yüzeyi ve bitki örtüsü içeren düzensiz genliğe sahip piksellerin PS seçiminde kullanılmaması için bir eşik değer ortaya koyar. Tavsiye edilen D_A değeri 0.4-0.42 aralığındadır. Bu değer arttıkça işleme giren piksellerin sayısı da artacaktır. PS seçimi yapılırken korelasyon ve genlik dağılım eşiğinin üzerinde olan PS’ler ayıklanmaktadır. Ayrıca PS noktalarının zaman serisi içerisindeki faz değişimleri değerlendirilip faz stabilitesi düşük olan PS noktaları da ayıklanır. Son olarak PS noktaları içerisinde faz standart sapması yüksek olanlar çıkartılarak ayıklama tamamlanır.

- **Faz Açma (Unwrapping)**

Bölüm 4.2.1’de detaylı bir şekilde açıklanan faz açma işlemi PSInSAR tekniğinde de uygulanmaktadır. Burada faz açma işlemi gerçekleştirilmeden önce Eşitlik 4.18’ de verilen Goldstein filtresi ile bir ön filtreleme uygulanabilir. Daha sonra faz açma işlemi 3 boyutlu faz açma tekniği kullanılarak gerçekleştirilir. 3 boyutlu faz açma tekniğinde, 2 boyut mekânsal bileşeni diğer boyut ise zaman bileşenini ifade etmektedir. Öncelikle PS’leri temsil eden tüm PS piksellerinin zaman boyutunda faz çözme işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu işlem zaman serileri veya faz modelleme teknikleri kullanılarak gerçekleştirilir. Daha sonra zaman boyutunda çözülen faz farkları, her bir zaman adımı için yinelemeli bir algoritma kullanılarak mekânsal faz açma işlemi gerçekleştirilir. Bu işlem komşu pikseller arasındaki faz farkları kullanılarak gerçekleştirilir. Son aşamada konum ve zaman boyutu birbirine entegre edilerek işlem tamamlanır.

- **SCLA Hata Kestirimi**

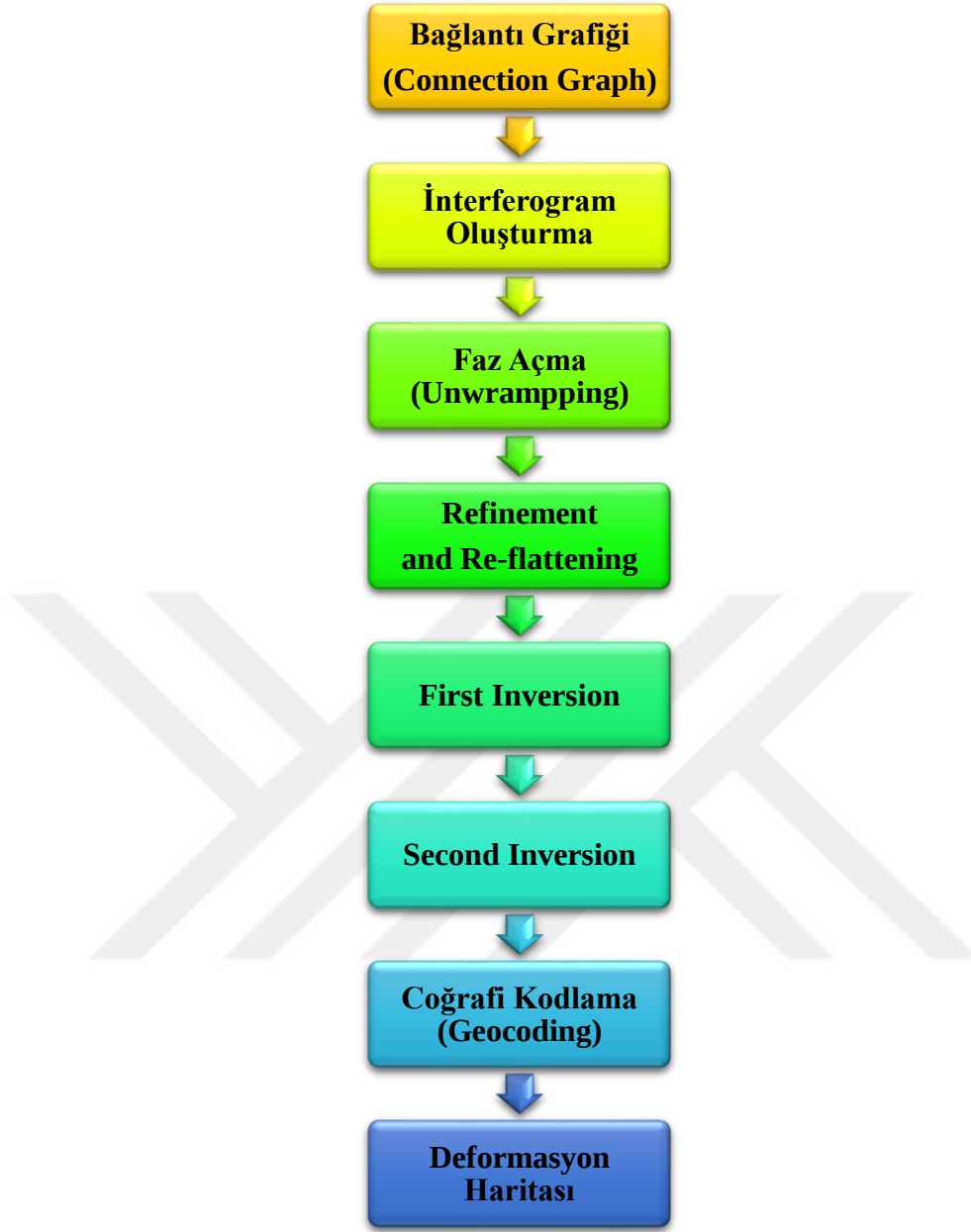
Açma işlemi tamamlanan faz, SCLA hatası, atmosfer ve yörünge hatalarından kaynaklanan bazı bileşenleri içermektedir. SCLA, “Mekânsal Olarak Korele Bakış Açısı” anlamına gelmekte ve SAR görüntülerinin alındığı bakış açısının mekânsal korelasyonunu ifade etmektedir. Radar görüntüsünün geometrisi, topografik yükseklik değişiklikleri ve atmosferik koşullar dolayısıyla ortaya çıkan SCLA, topografik ve atmosferik modeller kullanılarak giderilir.

- **Atmosferik Filtreleme**

Bu aşamada, atmosferik ve yörünge hataları (AOE) giderilir. Giderme işlemi atmosferik filtreleme yöntemleri ile gerçekleştirilir. Atmosferik filtreleme, atmosferik gecikmelerden kaynaklanan faz hatalarının tahmini ve giderilmesi için kullanılan bir tekniktir. Bu atmosferik gecikmeler troposferik ve iyonosferik gecikmelerdir. Bu gecikmelerden troposferik gecikme iyonosferik etkiye göre daha baskın olduğundan dikkat edilmesi elzemdir. Bu hatalar konumsal, zaman serisi ve yükseklik filtrelemeleri yapılarak giderilmektedir. Troposferik gecikmeleri tahmin etmek için atmosferik gürültüyü azaltmak için kullanılan TRAİN araç kutusu kullanılabilir. Ayrıca bu tez çalışmasında da kullanılan ve atmosferik gecikmeleri gideren bir araç olan GACOS’da (Generic Atmospheric Correction Online Service) kullanılabilir. Bu filtreleme sonunda artık deformasyon haritası hazır hale gelmiştir.

4.2.2 SBAS Tekniği ile Üretim İşlemleri

SBAS tekniği ile deformasyon haritası üretme işlemleri ENVI SARscape yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. SBAS işlem adımları Şekil 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.5 SBAS tekniği ile deformasyon haritalarının oluşturulmasına ait işlem adımları.

- **Bağlantı Grafiği (Connection Graph)**

Connection Graph, SBAS yönteminde kullanılacak SAR SLC görüntüleri arasındaki ilişkiyi ifade eden bir yapıdır. İnterferogramların oluşturulmasında kullanılan bu yapı SBAS yönteminde oldukça önemlidir. Bu bağlantı grafiği, interferogramların zaman içerisindeki bağlantılarını, birbirleri ile olan ilişkilerini görselleştirir. İnterferogram çiftlerinin seçiminde ve yönetiminde kullanılan bu bağlantı grafiği, SBAS analizinin etkin bir şekilde yapılması ve güvenilirlik seviyesinin yüksek olması için küçük baz aralıklı interferogram çiftlerinin doğru seçimini gerçekleştirir. Bu işlemi gerçekleştirirken zamansal ve mekânsal baz uzunluklarını

dikkate alarak temel eşik değerler belirler ve bu değerlere göre interferogram çiftleri oluşturulur. SARscape yazılımı bu grafiği otomatikleştirmiş ve kullanıcıların hizmetine sunmuştur.

- **İnterferogram Oluşturma**

Connection Graph ile tanımlanan uyumlu her SAR görüntü çifti ile bir interferogram oluşturulur. Bu işlem gerçekleştirilirken gerekli olan radar görüntüleri ve bağlantı grafiğine ek olarak bir sayısal yükseklik modeli de kullanılmalıdır. Bu çalışma kapsamında 30 m çözünürlüklü SRTM 1 arcsecond kullanılmıştır. İnterferogram adımına geçmeden önce coregistration işlemi gerçekleştirilir. Bu işlem ile tüm SAR görüntüleri ana görüntüye göre hizalanarak aynı geometriyi oluşturmak amacıyla bir yığın halinde kaydedilir. Coregistration işleminden sonra çalışma alanını kapsayan ve sıralı bir zaman aralığında ($t_0, \dots, t_N$) elde edilen $N+1$ adet SAR görüntüsü dikkate alındığında bağlantı grafiği ile temel eşik değerlere bağlı olarak seçilen M sayıda interferogram oluşturulur. Oluşturulan interferogram sayısı M eşitlik (4.21) ile ifade edilir. Bu işlemler birlikte SYM ile topografik faz kaldırma işlemi Eşitlik 4.11' de ifade edildiği şekliyle gerçekleştirilmiştir.

$$\frac{N+1}{2} \leq M \leq N \left(\frac{N+1}{2} \right) \quad (4.21)$$

Ayrıca sinyal-gürültü oranı, menzil ve azimut yönlerinde multi-looking tekniği ve Eşitlik (4.18) ile ifade edilen goldstein filtreleme yöntemi kullanılarak iyileştirilmiştir. Özellikle multi-looking gibi tekniklerin uygulanması sinyal gürültü oranını pozitif yönde etkilemekte ve tutarlılık tahmininin kalitesini arttırmaktadır.

- **Faz Açma (Unwrapping)**

Fazı sürekli bir hale getirmek için Unwrapping işlemi uygulanır. Bu işlem 4.2.2 başlığında detayları verildiği üç boyutlu faz açma (3D) yöntemi ve minimum cost flow (MCF) ağı kullanılır. MCF yöntemi uygulanırken 0.35'lik bir tutarlılık eşik değeri kullanılır. Bu değer altında kalan ve zayıf açılan interferometrik çiftler nihai sonuçların güvenilirliğini azaltacağından dolayı analizlerden çıkarılır.

- **Refinement and Re-flattening**

Refinement ve Re-flattening, faz açma işleminden sonra deformasyonların doğruluğunu ve kalitesini arttırmak için uygulanan işlemlerdir. Refinement, faz açma sonucunda ortaya çıkan sonuçları iyileştirerek hatalardan arındırma sürecidir. Re-flattening ise daha önce yapılan topografik faz kaldırma ve faz açma işlemlerinden kalan atık topografik fazın ve yörünge hatalarının tekrar giderilmesi işlemidir. Bu işlemler gerçekleştirilirken Yer Kontrol Noktaları (YKN) kullanılmaktadır. Bu yer kontrol noktalarının yükseklikleri SYM'den elde edilir. YKN seçimi yapılırken dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıda verilmiştir.

- Seçilen noktalar yüksek tutarlılığa sahip olmalıdır.
- Karmaşık olmamalı, kararlı alanlardan seçilmelidir.
- Seçilen noktalar deformasyonun kenarında (fringe) olmamalı ve deformasyonsuz alanlardan seçilmelidir.
- Geometrik olarak düzgün dağılmış olmalarına dikkat edilmelidir.

- **Birinci ve İkinci İnversiyon**

İyileştirme adımları uygulandıktan sonra sırasıyla birinci ve ikinci inversiyon işlem adımları gerçekleştirilir. Birinci inversiyonda, çalışma alanının davranışına göre deformasyon trendine uygun modelin parametreleri hesaplanır. Bu hesaplama açılmış interferogram yığınının karşılık gelen denklem sisteminin inversiyonu ile gerçekleştirilir. Bu matris inversiyon işlemi en küçük kareler yöntemi veya Tekil Değer Ayrışımı (SVD) yolu ile yapılır. İnversiyon işlemi sadece bağlantı grafiğinde belirlenen eşik değere uygun pikseller üzerinde uygulanır.

Bu adımda kullanılacak deformasyon modelin seçimi güvenilirlik açısından oldukça önemlidir. Özellikle ikinci dereceden veya kübik modeller, uyumu yüksek olan interferogramlar ve eşik değeri yüksek bir bağlantı grafiği gerektirdiğinden doğrusal bir inversiyon modeli kullanılmalıdır. Yer değiştirme hızlarının doğruluklarını arttırmak amacıyla ikinci inversiyon adımı uygulanmalıdır. Aşağıda inversiyon işleminin matematiksel prensibi açıklanmıştır.

İnterferogram k 'nın, t_A ve t_B zamanlarında ($t_A > t_B$) elde edilen SAR görüntülerinin birleştirilmesiyle oluşturulduğu düşünülürse, azimut ve menzil koordinatlarına (x, r) sahip bir pikseldeki interferometrik faz Eşitlik 4.22 ile ifade edilir.

$$\begin{aligned} \delta\varphi_k(x, r) &= \varphi(t_B, x, r) - \varphi(t_A, x, r) \approx \frac{4\pi}{\lambda} [d(t_B, x, r) - d(t_A, x, r)] + \\ &\Delta\varphi_k^{topo}(x, r) + \Delta\varphi_k^{atm}(t_B, t_A, x, r) + \Delta n_k(x, r) \end{aligned} \quad (4.22)$$

$$\Delta\varphi_k^{topo}(x, r) \approx \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{n_k} B_n \Delta h(x, r)}{R \sin \theta} \quad (4.23)$$

Eşitlik (4.21) dikkate alındığında Eşitli 4.22’ deki $k \in (1, 2, \dots, M)$, $\varphi(t_B, x, r)$ ve $\varphi(t_A, x, r)$ SAR görüntülerinin faz değerlerini, $d(t_B, x, r) - d(t_A, x, r)$ t_A ve t_B zamanlarındaki deformasyon fazını ifade eder. Eşitlik 4.23’ de bulunan $\Delta h(x, r)$, interferogram oluşturma sürecinde topografik faz katkısını kaldırmak için kullanılan SYM’de oluşabilecek topoğrafik yapaylıkları temsil eder. $\Delta\varphi_k^{atm}(t_B, t_A, x, r)$, İki görüntü alımı arasındaki atmosferik farklılıklardan kaynaklı etkiyi, $\Delta n_k(x, r)$ ise gürültü etkisini ifade etmektedir.

Eşitlik 4.22 ve Eşitlik 4.23, her kararlı piksel için SVD yöntemini kullanarak N+1 bilinmeyenli bir denklem sistemini $[\varphi(t_1, x, r), \dots, \varphi(t_N, x, r), \Delta h(x, r)]$ oluşturmamızı sağlar. Bu şekilde inversiyon işlemi gerçekleştirilmiş olur (Berardino et al. 2002; Hooper et al. 2007).

İnversiyon adımı bittikten sonra kalan gürültüden (atmosferik gecikmeler) kurtulmak için atmosferik filtreleme yapılmalıdır. Bu işlem hem zamansal hem de mekânsal filtreleme yolları ile gerçekleştirilir. Bunun için hazır yapılmış paket yazılımlar kullanılabilir. Bu çalışma kapsamında GACOS yazılımı kullanılmıştır. Son olarak coğrafi kodlama işlemi yapılarak deformasyon haritası oluşturulmuş oldu.

4.3 DEFORMASYON HARİTALARININ DEĞERLENDİRMELERİ

4.3.1 Çevresel ve Meteorolojik Verilere Göre Değerlendirmeler

MT-InSAR teknikleri ile elde edilmiş deformasyon haritalarının değerlendirilmesinde çevresel ve meteorolojik verilerin kullanılması gerekmektedir. Haritalarda deformasyon trendi oluşan noktaların bulunduğu bölgelerin jeolojik olarak yapısı ve çalışma alanında oluşan sıcaklık ve yağış bilgilerinin bilinmesi değerlendirmenin daha doğru bir şekilde yapılmasını mümkün kılmaktadır. Ayrıca çalışma alanının bulunduğu bölgenin taşkın riski, deprem riski gibi faktörlerde değerlendirme sürecinde dikkate alınması gerek etmenlerdendir. Şimdi deformasyon haritalarının değerlendirilmesinde etkili olan çevresel ve meteorolojik verileri inceleyelim.

- **Zemin ve Toprak Koşulları**

Deformasyon haritası oluşturulacak alanın toprak tipi ve toprak koşulları deformasyonda önemli rol oynamaktadır. Kil, kum, çakıl gibi her bir toprak türü farklı deformasyon özellikleri göstermektedir. Yer altı suları, zemin sıvılaşması gibi faktörler zemin stabilizesini etkileyerek çökme veya kayma deformasyonlarına sebep olabilmektedir.

- **Hidrolojik Faktörler**

Özellikle aşırı yağışlar sonucunda oluşan sel ve su baskınları zamanla bölgedeki toprak erozyonunu artırarak deformasyonlara tetikleyebilir. Bu sebeple bölgede bulunan drenaj sistemleri ve su akış yolları önemli rol oynamaktadır.

- **İklim ve Meteorolojik Etkiler**

Yüksek sıcaklık değişimleri yapı malzemelerinde termal genleşmeye ve büzölmelere sebebiyet verebilir. Bu sebepler de zamanla deformasyonların oluşması ile neticelenebilir. Ayrıca gevşek veya dengesiz zeminlerin olduğu bölgelerde kuvvetli rüzgârlar ve fırtınalar yüzey değişimlerine sebep olabilmektedir.

- **Tektonik Faktörler**

Yer altında meydana gelen tektonik hareketler, depremler ve volkanik hareketler gibi faktörler zeminde büyük çaplı deformasyonlara ve aynı zamanda yavaş yavaş hareket eden deformasyonlara neden olmaktadır.

Tez çalışma alanı olan Hatay Havalimanı'nın ve çevresinin toprak yapısı incelendiğinde (Şekil 3.3) genel olarak alüvyonal yapıya sahip olduğu görölmektedir. Havalimanının güney ve güneybatısında çakıl taşı, sill taşı, killi kireç taşı, jips ara düzeyli kumtaşı ve kil taşı gibi formasyonlar bulunmaktadır. Çalışma alanının kuzeybatısı ve kuzeydoğusunda ise farklı kireç taşları görölmektedir (Ateş vd. 2004; Özşahin 2010).

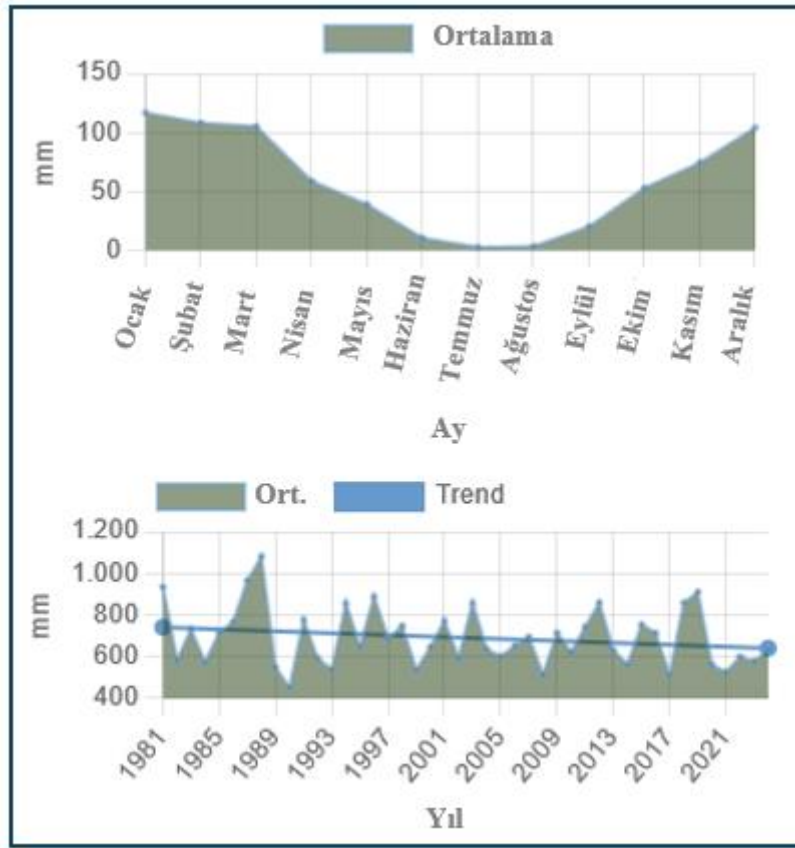
Asi nehrinin havzası içerisinde yer alan havalimanında yıllar içerisinde büyük ve küçük çaplı seller, taşkınlar ve su baskınları oluşmuştur. Özellikle etrafı yüksek dağlarla çevrilmiş amik ovası içerisinde bulunan havalimanı bölgesinde yükseklerden gelen yağmur suları ve amik gölünün bakıyeleri olan sulak alanlar dolayısıyla bu taşkınların oluşmaktadır. Taşkınları ve selleri etkileyen bir diğer etken ilkbahar ve yaz aylarında artan yağışlardır. Havalimanı

bölgesinde deformasyonun izlendiği yıllarda oluşan aylık ortalama yağış bilgisi çizelge 4.1’de sunulmuştur.

Çizelge 4.2 Hatay Havalimanı’na ait aylık ortalama yağış bilgileri.

Yıl/Ay	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2017	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.2	1.2
2018	7.8	2.4	0.5	0.2	0.3	0.1	0	0	0.1	3.7	3.2	3.6
2019	8.2	4.7	4.9	2.1	0	0	0	0	0	0.5	1.1	6.8
2020	3.5	2.0	3.3	2.3	1.3	0.2	0	0	0	0	1.2	1.9
2021	7.9	1.0	1.5	1.3	0	0	0	0.1	0.1	0.1	1.0	6.8
2022	6.1	1.4	3.2	0.2	1.0	0.5	0	0	0.4	0.4	1.6	1.1
2023	2.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Ayrıca Şekil 4.6’da bölgede oluşan aylık ortalama yağış bilgisi ve ortalama yıllık yağış bilgisi mm cinsinden verilmiştir.



Şekil 4.6 Aylık ve yıllık Ortalama yağış grafiği (URL 4).

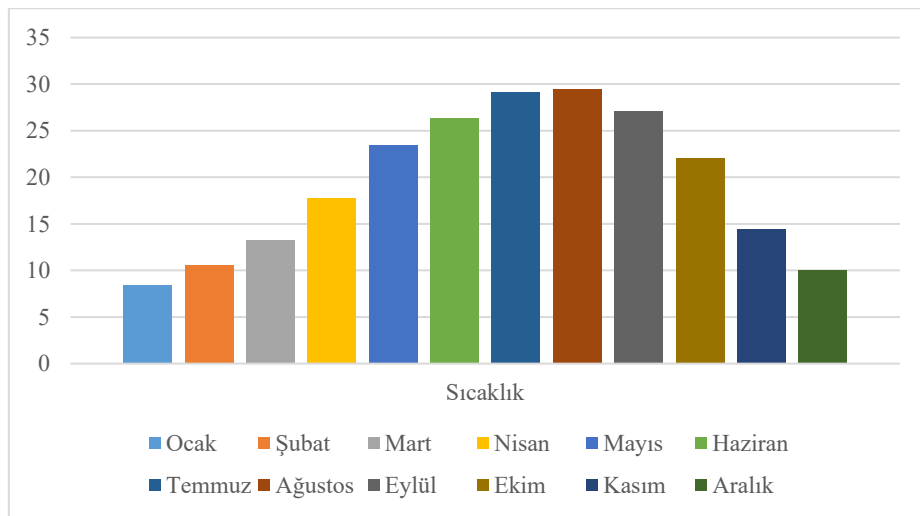
Çizelge 4.2 ve Şekil 4.6 incelendiğinde özellikle kış ve ilkbahar aylarında aylık ortalama yağış bilgilerinde bir artış olduğu görülmektedir. Ortalama aylık yağış, günlük toplam yağışın ($mm = kg \div m^2$) aylık toplamının ortalaması alınarak elde edilmiştir. Ayrıca Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilen Hatay Havalimanı'na ait çalışma periyodu (02/12/2017-29/01/2023) içerisindeki günlük toplam yağış bilgileri incelendiğinde kış aylarında günlük toplam yağışların 91 mm seviyelerini bulduğu görülmektedir. Bununla birlikte yine çalışma bölgesinde yaz aylarında az da olsa günlük toplam yağışın yüksek düzeyde olduğu yağmurlu günler bulunmaktadır. Şekil 4.6'da bulunan yıllık ortalama yağış grafiği incelendiğinde yıllara göre yağış eğiliminin azaldığı görülmektedir.

Deformasyon trendini etkileyebilecek bir diğer etken olan sıcaklık bilgisidir. Hatay Havalimanı'na ait aylık ortalama sıcaklık bilgisi Çizelge 4.3'de sunulmuştur. Çizelgedeki sıcaklık bilgisi bir ayda oluşan ortalama sıcaklığı ifade etmektedir.

Çizelge 4.3 Hatay Havalimanı'na ait aylık ortalama sıcaklık bilgisi.

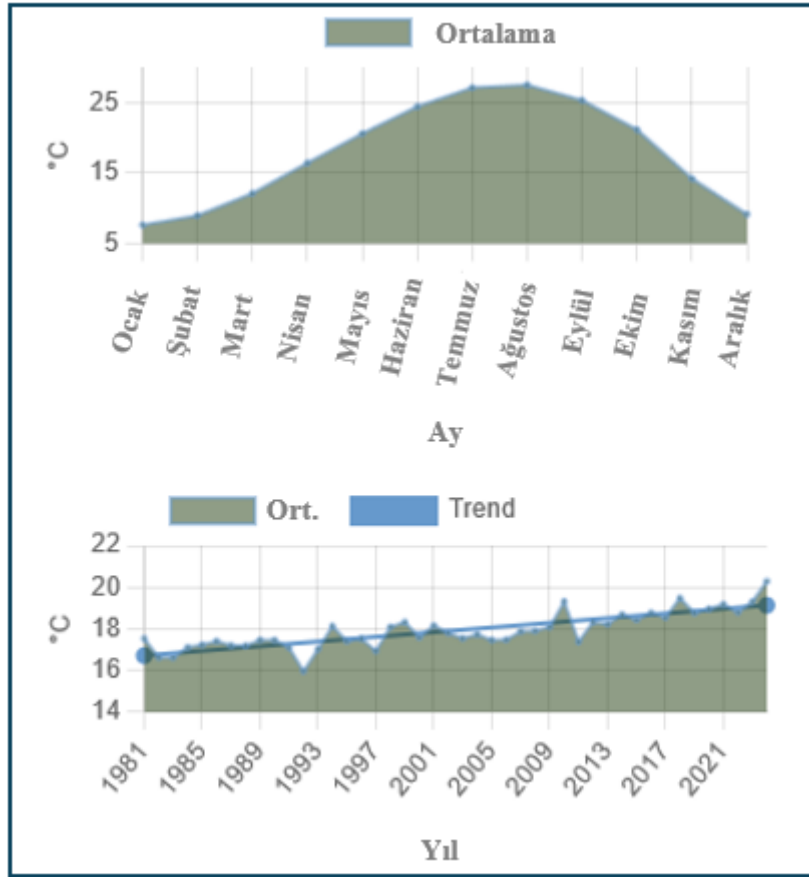
Yıl/Ay	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2017	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14.1	9.6
2018	9.0	11.6	15.6	18.7	23.9	26.9	29.1	29.6	27.5	21.4	14.2	10.8
2019	8.8	10.8	13.6	16.7	23.9	27.4	28.6	29.2	26.9	22.4	14.7	9.8
2020	8.7	9.0	14.4	17.5	22.9	25.2	29.0	29.4	28.5	23.6	13.8	10.3
2021	8.7	10.9	12.7	17.4	23.9	25.9	29.9	30.1	26.2	21.1	14.8	9.7
2022	7.5	10.6	9.9	18.8	22.6	26.2	29.0	28.8	26.4	21.8	15.2	10.3
2023	7.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Çizelge 4.3 incelendiğinde Hatay Havalimanı'nda sıcaklığın kış aylarında 7-8°C dolaylarında olduğu yaz aylarında ise sıcaklığın 28-29°C düzeyinde olduğu görülmektedir. Çalışma periyodu içerisindeki aylık ortalama sıcaklık grafiği Şekil 4.7'da sunulmuştur. Grafik her ay oluşan ortalama günlük sıcaklık verisine göre oluşturulmuştur.



Şekil 4.7 Çalışma periyodu içerisindeki aylık ortalama sıcaklık grafiği.

Bununla beraber bölgedeki ortalama aylık ve yıllık ortalama sıcaklık bilgilerini içeren grafikler Şekil 4.8’ de birlikte verilmiştir.



Şekil 4.8 Çalışma periyodu içerisindeki aylık ve yıllık ortalama sıcaklık grafiği (URL 4).

Grafikler incelendiğinde kış aylarından yaz aylarına doğru artış gösteren bir sıcaklık trendi olduğu görülmektedir. Yıl içerisinde maksimum 23°C' lik bir sıcaklık farkı olduğu anlaşılmaktadır. Bu fark yüksek olmakla beraber geniş bir mevsimsel fark olarak ifade edilemez. Geniş mevsimsel fark oluşması için 30 °C bir farkın oluşması gerekmektedir. Şekil 4.8'de verilen ortalama yıllık sıcaklık bilgisi incelendiğinde yıllar içerisinde bir artış eğilimi olduğu görülmektedir. Şekil 4.6 ve Şekil 4.8 birlikte incelendiğinde bölgede yıllara göre yağış ve sıcaklık farklılıkları olduğu görülmektedir. Bu durum bölge için sürekli bir ortam değişikliği olduğunu ifade etmektedir.

Hatay Havalimanının bulunduğu Amik Ovası yüksek toprak nemine sahiptir. Toprak neminin yüksek olmasının başlıca sebepleri; yeraltı suyunun yüksek seviyelerde olması, Akdeniz ikliminin getirmiş olduğu yoğun kış yağışları, tarımsal uygulamaların getirdiği sulama, yüksek su tutma kapasitesine sahip olan alüvyal toprak yapısıdır. Toprak neminin düzenlenmesi ve

takip edilmesinde mevsimsel değişimler ve su yönetimi uygulamaları ciddi rol oynayan etmenlerdir.

Son olarak bölgede bulunan ve deformasyonu doğrudan etkileyebilecek fay hatlarından bahsetmek gerekirse Türkiye'nin önemli bir fay hattı olan Doğu Anadolu Fay Hattı Hatay'a kadar uzanmaktadır. Bu fay hattının bir kolu havalimanının kuzeydoğusuna oldukça yakın geçmektedir. Diri olan bu fayın tarih boyunca küçük ve büyük çaplı depremleri doğurduğu bilinmektedir.

4.3.2 PSI- SBAS Deformasyon Haritaları Uyum Değerlendirmeleri

Üretilen PSI ve SBAS deformasyon haritalarının uyum değerlendirmeleri LOS yönünde ve düşey olarak yapılmıştır. Deformasyon haritalarının uyum değerlendirmeleri yapılmadan önce Hatay Havalimanı sınırları GoogleEarth üzerinden vektörleştirme ile belirlenmiştir.

PSI ile oluşturulan deformasyon hız haritalarının değerlendirmeleri vektörleştirilen Hatay Havalimanı bölgesi ile havalimanı ve çevresi için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. PSI deformasyon hız haritaları LOS yönünde oluşturulmuş ve bu şekilde değerlendirilmiştir.

SBAS deformasyon haritalarının uyum değerlendirmeleri, SBAS yöntemi temelinde lineer, lineer periyodik, kuadratik ve kübik deformasyon hesaplama modelleri ile üretilen düşey deformasyon haritaları ve bu haritaların birbirlerine göre korelasyonunu detaylı olarak ortaya koyan istatistiki değerler, histogramlar ve fark haritaları ile yapılmıştır. SBAS deformasyon haritalarının uyum değerlendirmeleri vektörleştirilerek sınırları belirlenen Hatay Havalimanı üzerinde yapılmıştır.

Dört farklı yöntemle elde edilen SBAS düşey deformasyon noktalarından deformasyon haritalarının oluşturulmasında Surfer yazılımı kullanılmıştır. Bu işlem gerçekleştirilirken vektör nokta bulutlarının raster haritalarına dönüşümünde en yakın komşuluk (Nearest Neighbour) enterpolasyon yöntemi tercih edilmiştir. Lineer, lineer periyodik, kuadratik ve kübik SBAS deformasyon modellerinden üretilen haritaların istatistiki korelasyon analizleri BLUH (Bundle Block Adjustment Leibniz University Hannover) yazılımında standart sapma uluslararası değerlendirme metriği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Korelasyon değerlerinin daha iyi yorumlanabilmesi amacıyla farkların frekans ve standart sapma histogramları ile fark haritaları üretilmiştir.

PSI ve SBAS deformasyon haritalarının birbirleri ile olan uyum değerlendirmeleri ise LOS yönünde yapılmıştır. Değerlendirme yapılırken SBAS yöntemi ile oluşturulan lineer, lineer periyodik, kuadratik ve kübik deformasyon hesaplama modelleriyle oluşturulan LOS yönündeki deformasyon haritaları ile PSI ile oluşturulan LOS yönündeki deformasyon haritasının bir birleri ile olan uyumu hareket yönünde (çökme, kabarma) incelenmiştir.





BÖLÜM 5

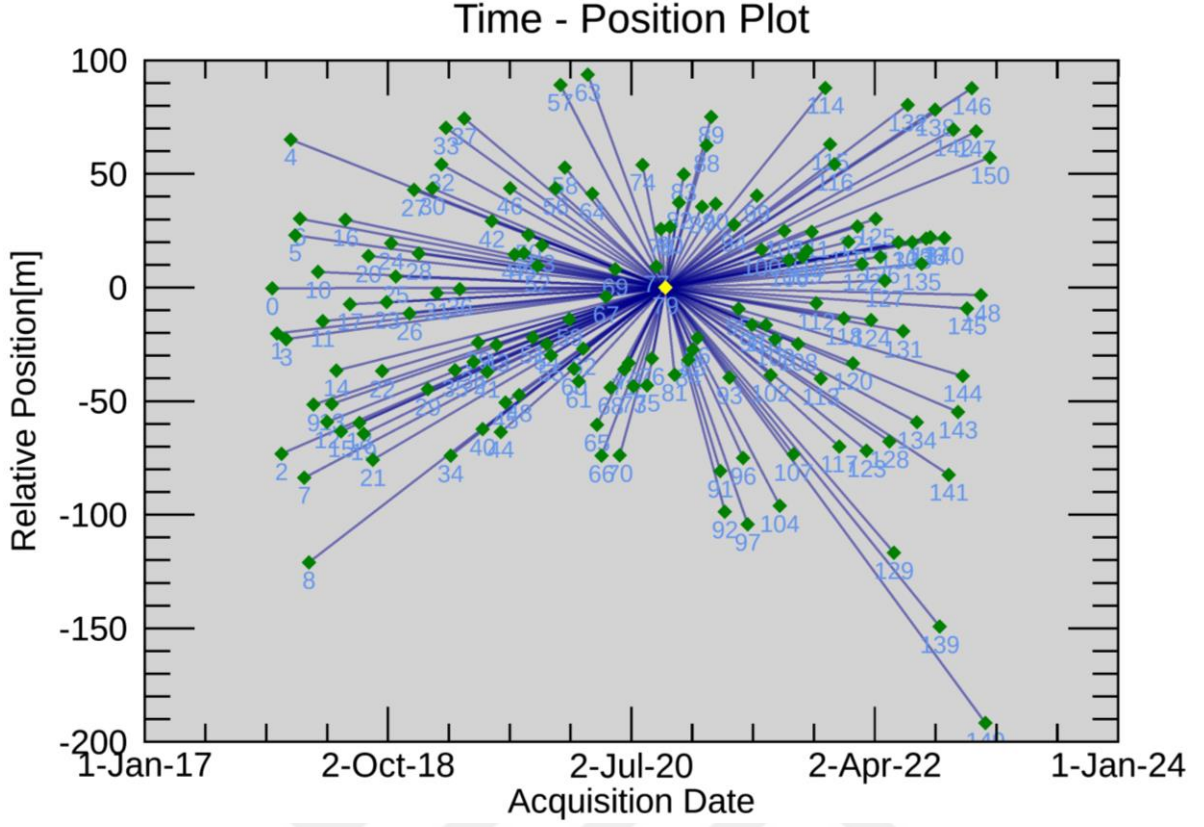
BULGULAR

5.1 ÜRETİLEN DEFORMASYON HARİTALARI

Hatay Havalanı'nın terminal binası, pist ve çevresi üzerinde meydana gelen deformasyonların tespiti ve takibi amacıyla gerçekleştirilen MT-InSAR analizinde PSI ve SBAS tekniklerinin uygulamaları yapılmıştır. Çalışma kapsamında 151 Sentinel-1A SLC görüntüsü kullanılmıştır. Kullanılan tüm görüntüler, C band, alçalan yörünge, IW modunda temin edilmiştir. PSI uygulamasında interferometrik ön işleme adımları SNAP yazılımı gerçekleştirilmiştir. Deformasyon haritası ise StaMPS yazılımı ile oluşturulmuştur. SBAS uygulaması ise ENVI SARscape yazılımı ile yapılmıştır. Her iki uygulamada atmosferik düzeltmeler için GACOS yazılımı kullanılmıştır.

5.1.1 PSI Deformasyon Haritaları

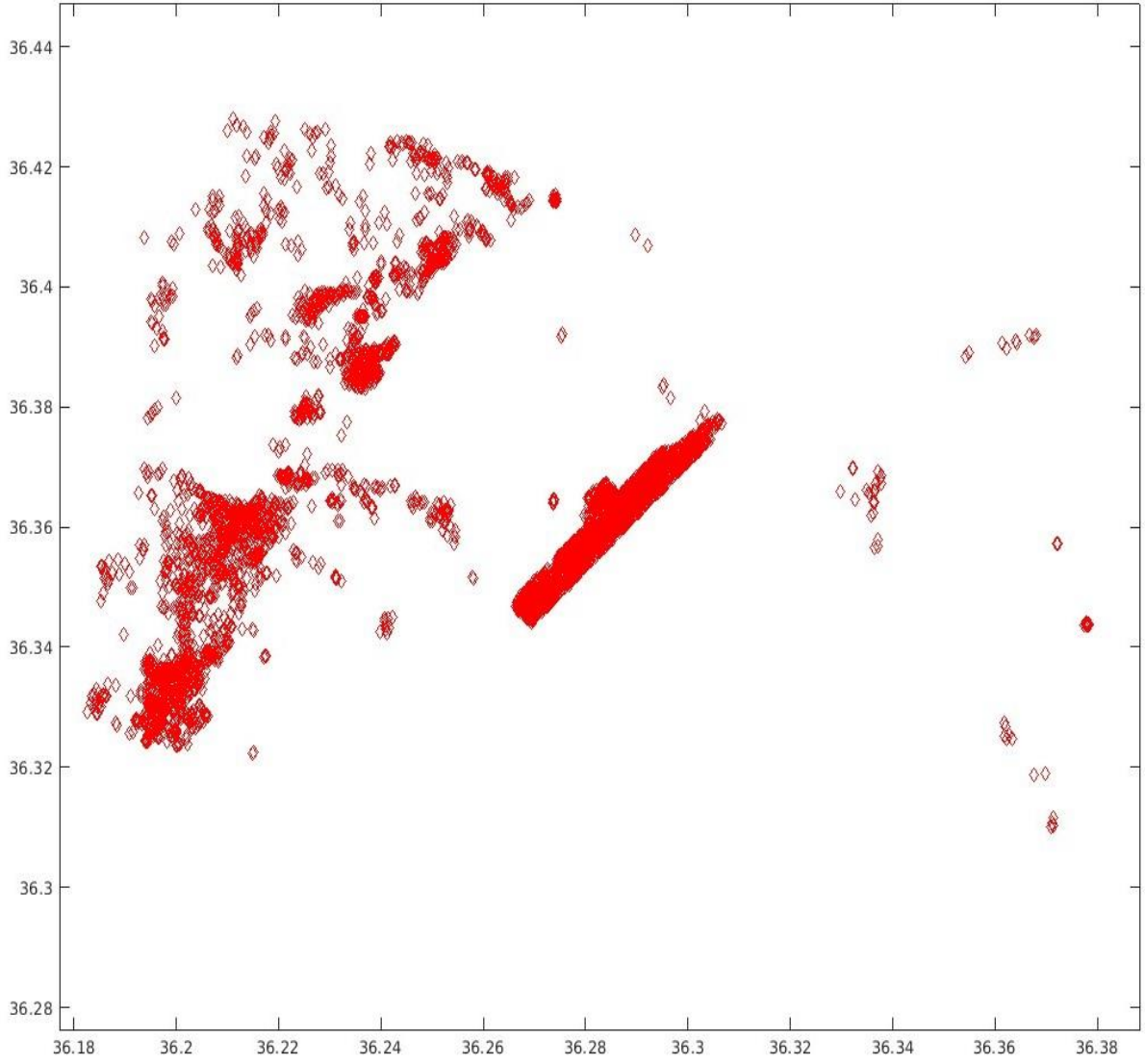
PSI deformasyon haritalarını oluşturmak amacıyla ESA tarafından sağlanan 02/12/2017-29/01/2023 tarihlerini kapsayan 151 adet Sentinel-1A TOPS SLC görüntüsü kullanılmıştır. İnterferometrik ön işleme adımlarının gerçekleştirildiği SNAP yazılımında öncelikle master görüntü seçimi gerçekleştirilmiştir. Görüntüler arasındaki Dik Baz Uzunluğu (Perpendicular Baseline), Zamansal Baz Uzunluğu (Temporal Baseline), Ortalama Doppler Frekans Farkı (Doppler Centroid Frequency Difference), Yükseklik Belirsizliği (Height Ambiguity) parametreleri göz önünde bulundurularak 29 Eylül 2020 tarihli görüntü master görüntü seçilmiştir. Sentinel-1A veri kümesinin seçilen master görüntüye göre zamansal ve dik baz masafeleri Şekil 5.1'de verilmiştir. Veri kümesinin master görüntü seçiminde dikkat edilen parametre bilgileri Ek Açıklamalar bölümünde sunulmuştur.



Şekil 5.1 Veri kümesinin PSI uygulaması için seçilen master görüntüye göre zamansal ve dik baz masafeleri.

Master görüntü seçiminden sonra diğer interferometrik işlem adımları gerçekleştirilerek 150 adet interferogram oluşturulmuştur. Oluşturulan interferogramlara ait örnekler ek açıklamalar bölümünde sunulmuştur.

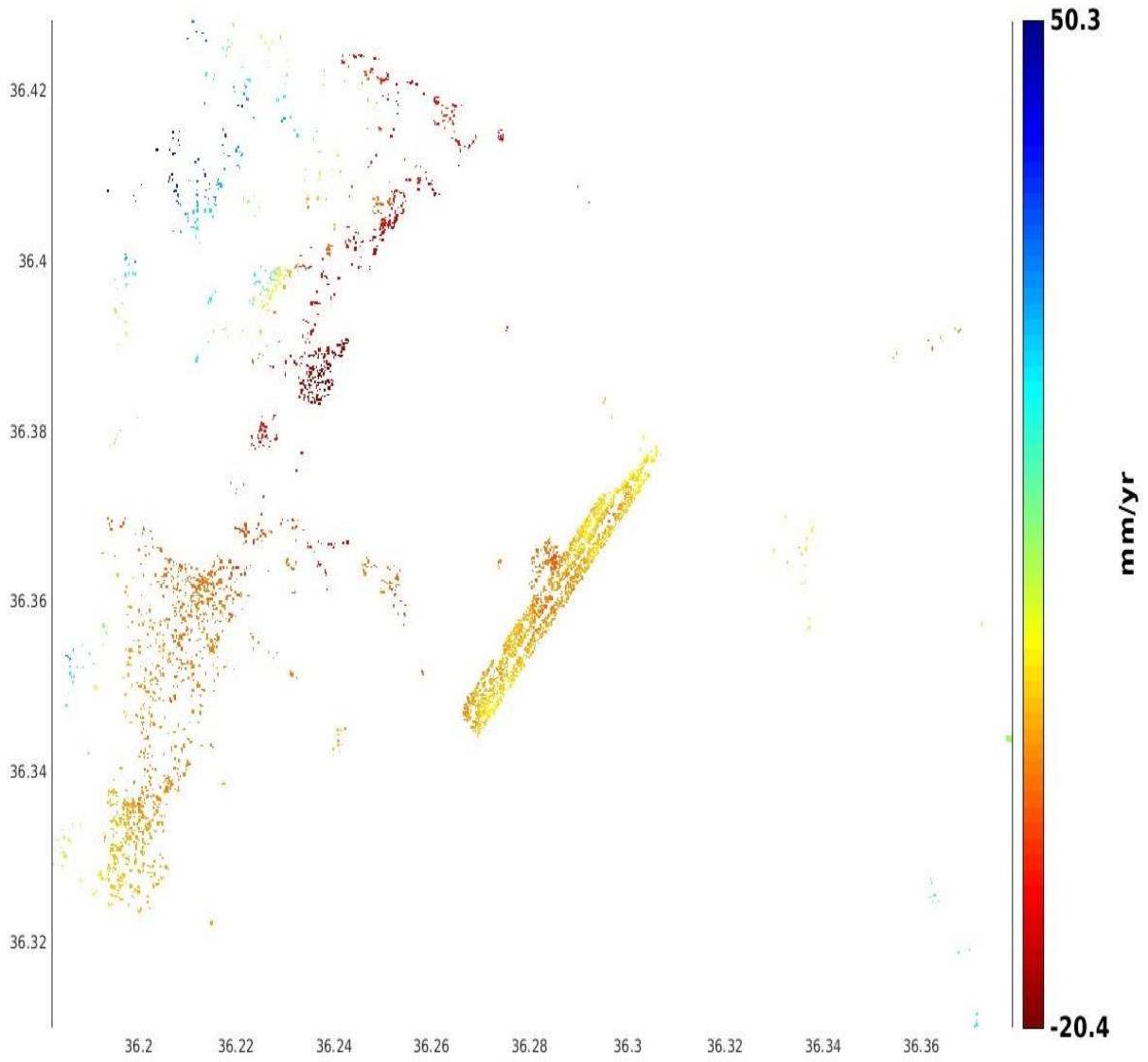
İnterferomerogramlar oluşturulduktan sonra StaMPS yazılımında deformasyon haritasını oluşturma süreci başlamıştır. Linux işletim sisteminde MATLAB R2022b yazılımı yardımıyla StaMPS 4.1b sürümü kullanılmıştır. Öncelikle interferogramlar üzerinde faz gürültü kestirimi uygulandıktan sonra PS seçimi ve ayıklama işlemi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda çalışma alanında 4041 PS noktası oluşmuştur. Çalışma alanı üzerinde oluşan sürekli saçıcı noktalarının dağılımı Şekil 5.2’de sunulmuştur.



Şekil 5.2 Çalışma alanı üzerinde ve çevresinde oluşan sürekli saçıcı noktalarının dağılımı.

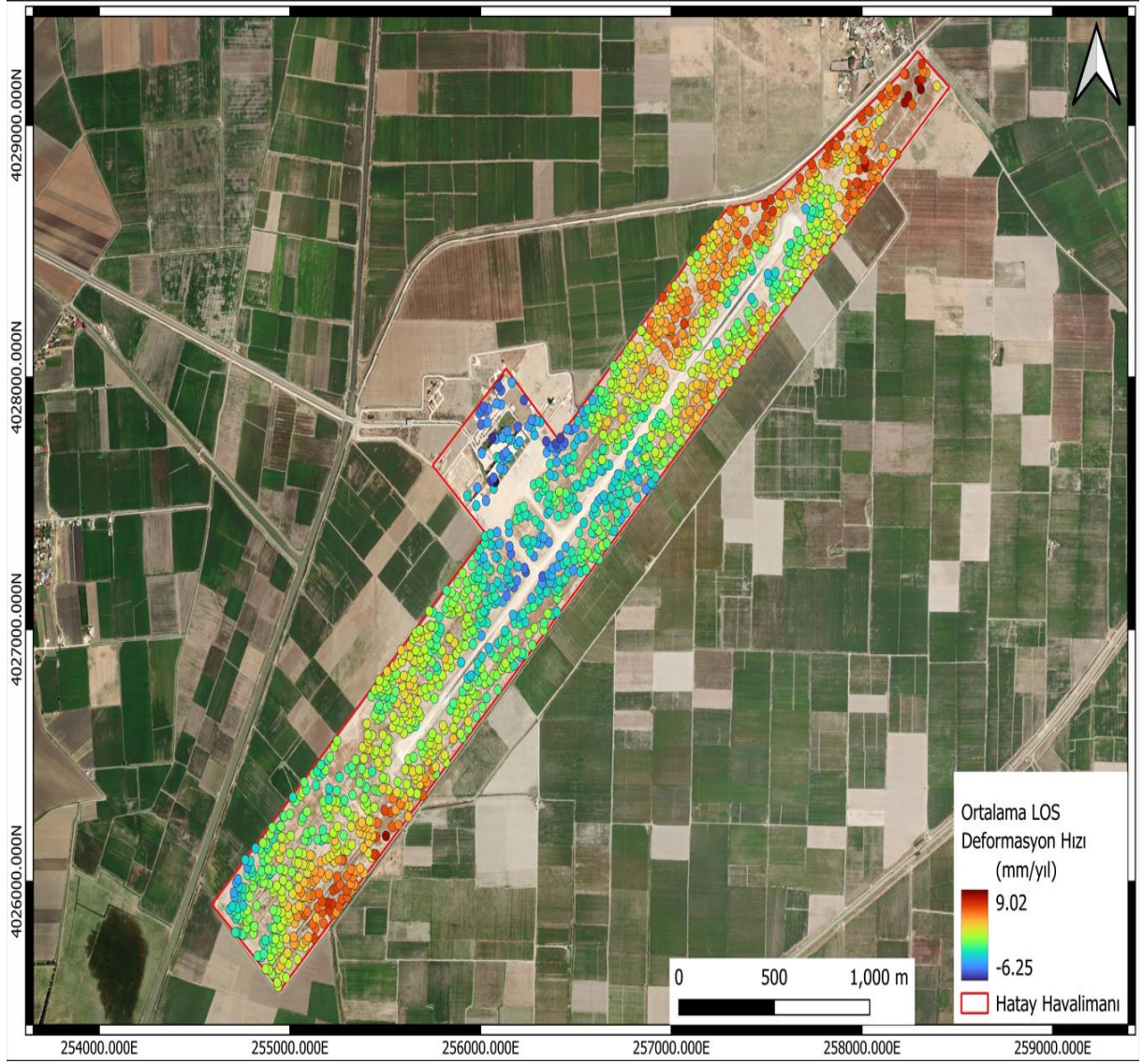
PS seçimi ve ayıklama işleminin sonuçları alındıktan sonra diğer işlem adımları olan faz açma, SCLA kestirimi ve atmosferik düzeltme uygulama adımları yapıldı. Atmosferik faz gecikme düzeltmesi GACOS verileri kullanılarak gerçekleştirildi.

Gerçekleştirilen PSI uygulaması sonucunda Hatay Havalimanı ve çevresinde oluşan yıllık ortalama yer değiştirme hızı haritası Şekil 5.3’ de görülmektedir. Şekil 5.3 incelendiğinde çalışma alanı olan havalimanı ve çevresinde yıllık ortalama -20.4 ile 50.3 mm/yıl arasında bir hareketin olduğu görülmektedir.



Şekil 5.3 PSI uygulaması ile Hatay Havalimanı ve çevresinde oluşan yıllık ortalama yer değiştirme hızı haritası.

Tez çalışmasının ana motivasyonlarından biri olan PSI tekniği ile Hatay Havalimanı'nda meydana gelen deformasyonu tespit etmek amacıyla sadece havalimanını içine alan yıllık ortalama LOS deformasyon hızı haritası üretilmiş ve Şekil 5.4'de verilmiştir.

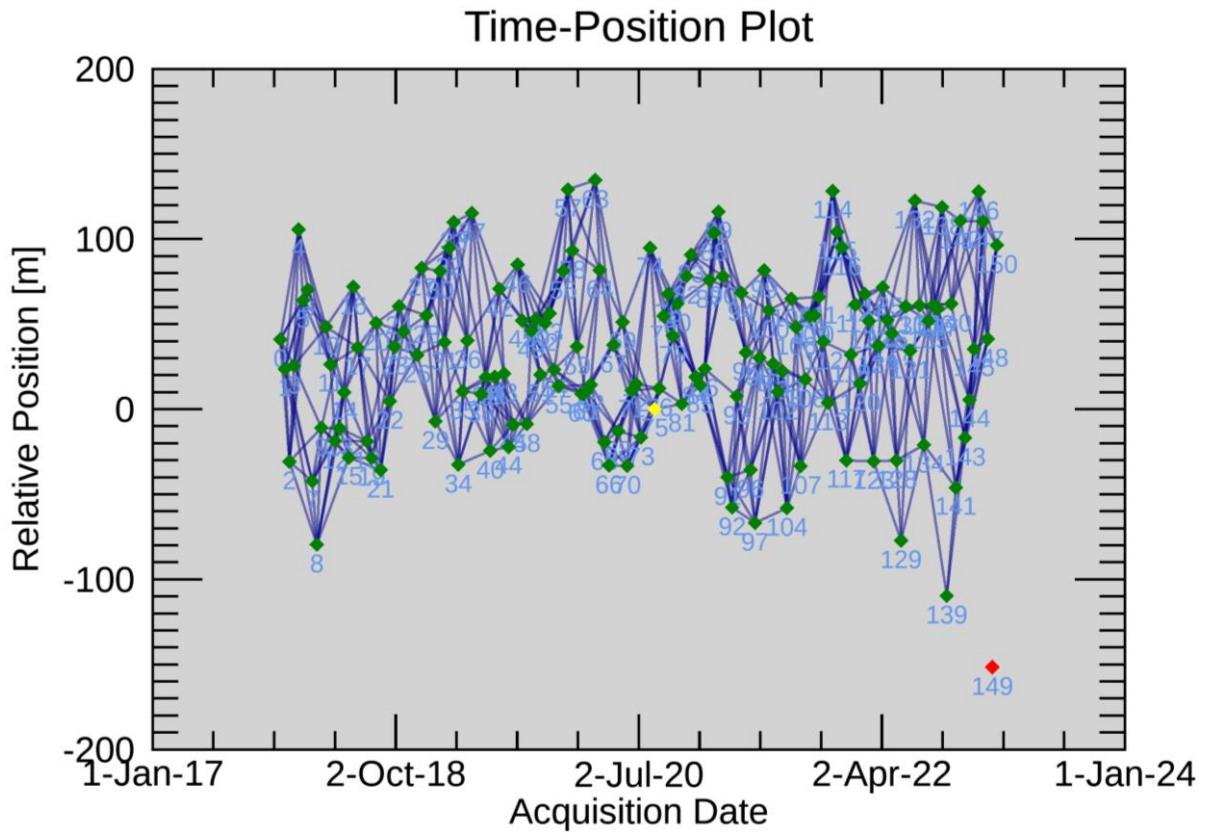


Şekil 5.4 PSI uygulaması sonucunda oluşan yıllık ortalama yer değiştirme hızı haritası.

Şekil 4.4’de bulunan PSI işlem adımlarının uygulanması sonucunda oluşan deformasyon haritalarını gösteren Şekil 5.3 ve 5.4 incelendiğinde, Hatay Havalimanı’nda LOS yani bakış açısı yönünde yıllık -6.25 ile 9.02 mm/yıl arasında bir yer değiştirme hareketinin olduğu görülmektedir.

5.1.2 SBAS Deformasyon Haritaları

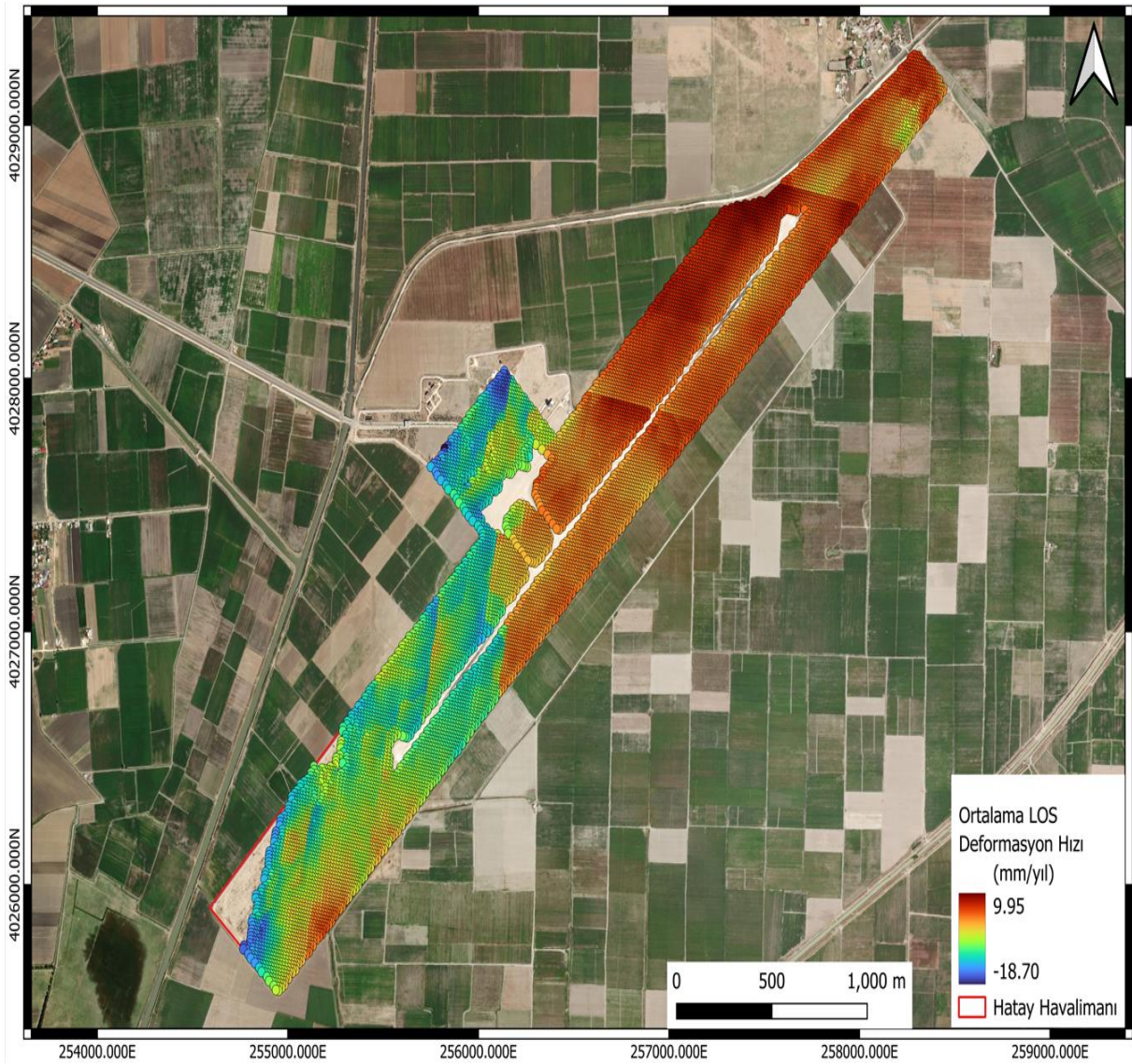
SBAS uygulaması, ENVI 5.6.3 yazılım paketi aracılığıyla erişilebilen ve SAR verilerini işleme amacıyla geliştirilen bir yazılım uygulaması olan SARscape 5.6.2.1 kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Uygulama kapsamında 151 Sentinel-1A SLC görüntü kullanılmıştır. Öncelikle veri kümesinin dik baz uzunluğu, zamansal baz uzunluğu ve ortalama doppler frekans farkı dikkate alınarak master görüntü 12 Ağustos 2020 olarak belirlenmiştir. Diğer görüntüler ise slave görüntü olarak yazılıma tanıtılmıştır. Sentinel-1A veri kümesinin seçilen master görüntüye göre zamansal ve dik baz masafeleri Şekil 5.5’da verilmiştir.



Şekil 5.5 Veri kümesinin SBAS uygulaması için seçilen master görüntüye göre zamansal ve dik baz masafeleri.

Master görüntünün seçimi sonrasında interferogram oluşturma işlemine geçilmiştir. Yapılan uygulama neticesinde uygun görüntü çiftlerinden 613 adet interferogram oluşturulmuştur. İnterferogram oluşturma işleminin sonuçları elde edildikten sonra Şekil 4.5’ deki diğer işlem adımları olan faz açma, Refinement and Re-flattening, inversiyon ve atmosferik düzeltme işlem adımları gerçekleştirildi. Atmosferik faz gecikme düzeltmesi PSI analizinde olduğu gibi GACOS verileri kullanılarak yapılmıştır.

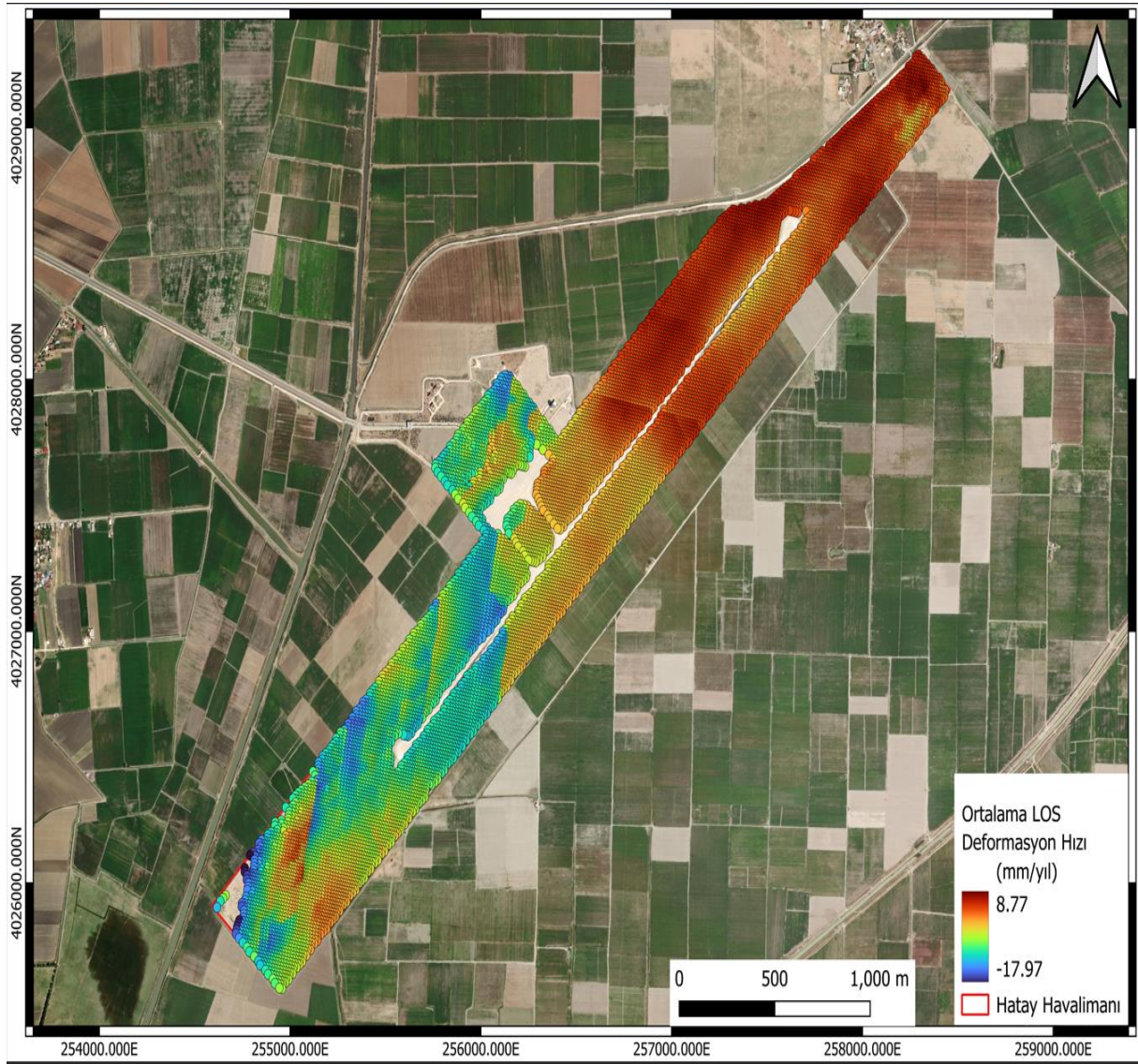
SBAS InSAR tekniğinde, zaman içerisinde oluşan farklı deformasyon trendlerini tanımlamak ve bu trendleri modellemek amacıyla birçok deformasyon modelleme yöntemi tasarlanmıştır. Bu kapsamda SBAS uygulamasında farklı deformasyon modelleme yöntemleri kullanılmıştır. İlk olarak lineer deformasyon modelleme yöntemi ile SBAS uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu model deformasyonun zaman içinde sabit bir hız ile oluştuğunu varsayan deformasyon modelleme yöntemidir. Lineer modelleme yöntemi kullanılarak elde edilen LOS yönündeki ortalama deformasyon hızı haritası Şekil 5.6’da verilmiştir.



Şekil 5.6 Lineer modelleme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen SBAS uygulaması sonucunda LOS yönünde oluşan yıllık ortalama yer değiştirme hızı haritası.

Şekil 5.6 incelendiğinde lineer deformasyon modelleme yöntemi ile gerçekleştirilen SBAS uygulaması sonucunda -18.70 ile 9.75 mm/yıl arasında bir deformasyonun olduğu görülmektedir.

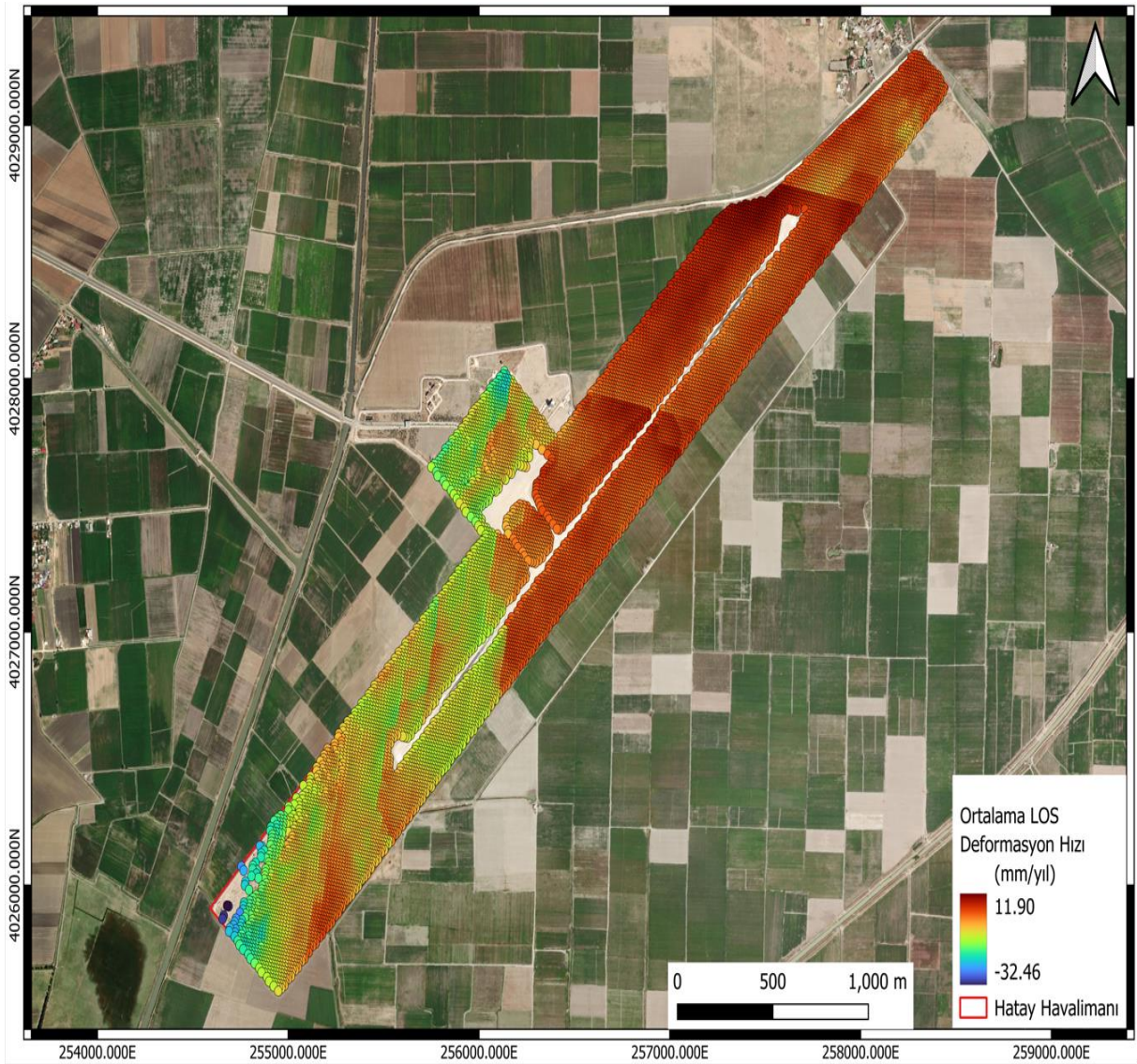
Lineer modelleme yönteminden sonra bir diğer deformasyon modelleme yöntemi olan hem doğrusal hemde periyodik bileşenleri içeren Lineer Periyodik yöntem kullanılarak SBAS uygulaması gerçekleştirilmiştir. Uygulama sonucunda oluşan LOS yönündeki ortalama deformasyon hızı haritası Şekil 5.7’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde Lineer periyodik yöntem ile oluşturulan deformasyon modelinde -17.97 ile 8.77 mm/yıl değerleri arasında yer değiştirme hareketlerinin olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 5.7 Lineer Periyodik modelleme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen SBAS uygulaması sonucunda LOS yönünde oluşan yıllık ortalama yer değiştirme hızı haritası.

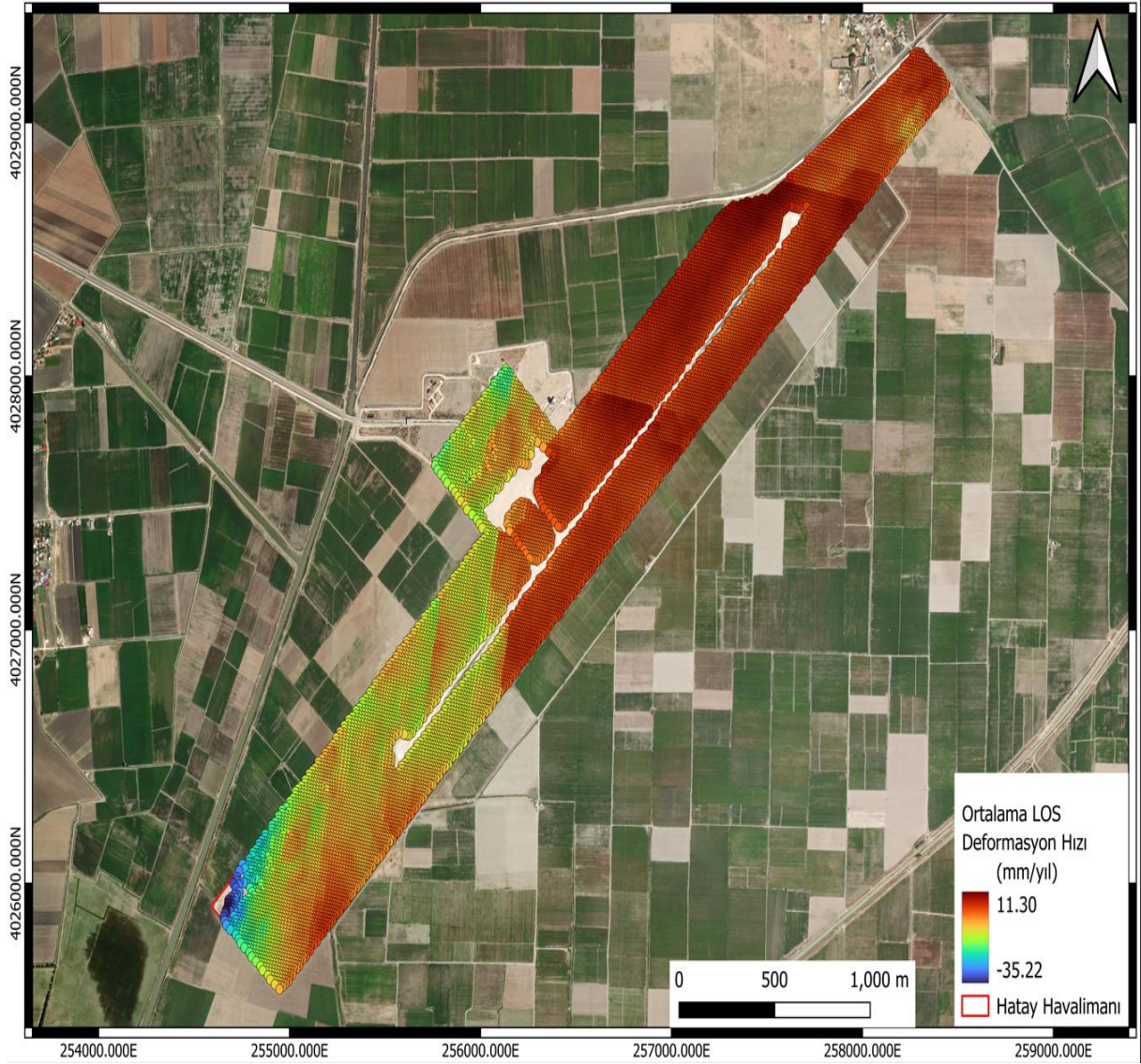
SBAS uygulamasında üçüncü deformasyon modelleme yöntemi olarak kübik modelleme yöntemi kullanılmıştır. Bu model ise lineer deformasyon modelleme yönteminin aksine deformasyonun zamanla değişkenlik göstererek oluştuğunu varsaymaktadır. Yapılan uygulama neticesinde oluşan LOS yönündeki ortalama deformasyon hızı haritası Şekil 5.8’de

sunulmuştur. Harita analiz edildiğinde -32.46 ile 11.90 mm/yıl değerleri arasında bir hareketin olduğu görülmektedir.



Şekil 5.8 Kübik modelleme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen SBAS uygulaması sonucunda LOS yönünde oluşan yıllık ortalama yer değiştirme hızı haritası.

SBAS uygulamasında son olarak kuadratik modelleme yöntemi ile deformasyon tespiti yapılmıştır. Yapılan uygulama sonucunda oluşan LOS yönündeki ortalama deformasyon hızı haritası Şekil 5.9’da görülmektedir. Şekildedeki görüldüğü üzere kuadratik modelleme yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerde çalışma alanında -35.22 ile 11.30 mm/yıl değerleri arasında deformasyon gerçekleştiği anlaşılmaktadır.



Şekil 5.9 Kuadratik modelleme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen SBAS uygulaması sonucunda LOS yönünde oluşan yıllık ortalama yer değiştirme hızı haritası.

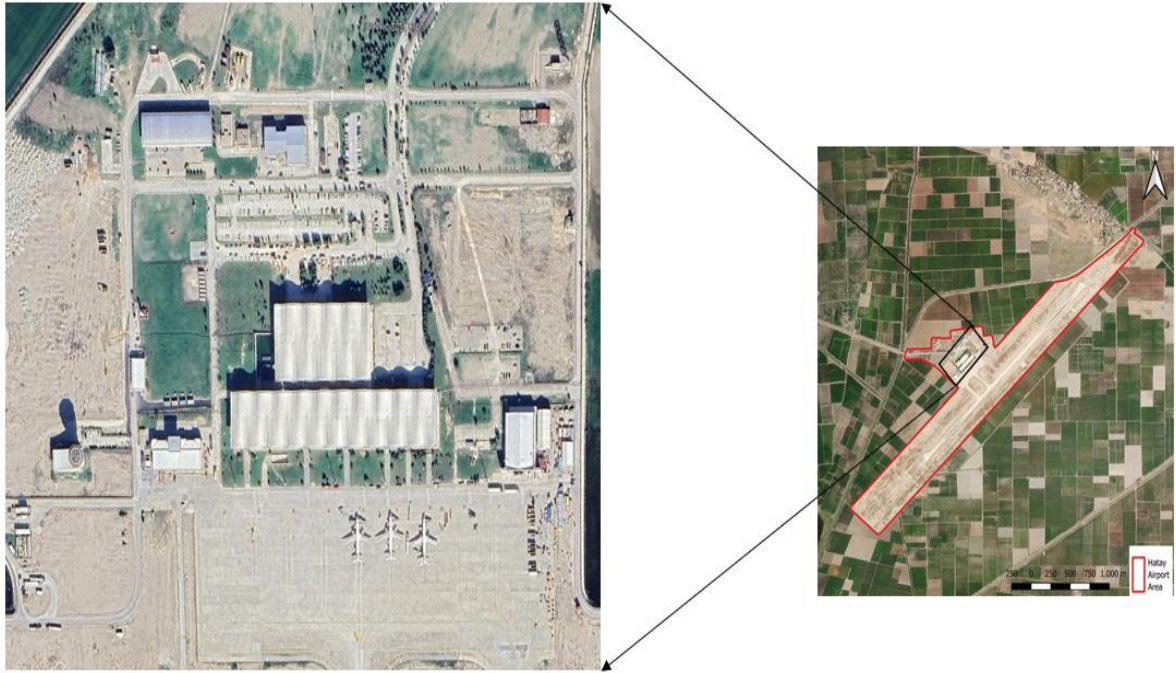
5.2 DEFORMASYON HARİTALARININ DEĞERLENDİRME BULGULARI

5.2.1 Çevresel ve Meteorolojik Verilere Göre Değerlendirme Bulguları

PSI ve SBAS teknikleri ile oluşturulan ve Şekil 5.4, Şekil 5.6, Şekil 5.7, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da sunulan deformasyon haritaları incelendiğinde havalimanı bölgesinde genel anlamıyla çökmelerin ve kabarmaların gerçekleştiği görülmektedir. Havalimanında meydana gelen bu yer değiştirmelere çevresel ve meteorolojik birçok faktörün sebep olduğu düşünülmektedir. Haritalar genel olarak analiz edildiğinde havalimanının bulunduğu alanın tarım arazisi olduğu görülmektedir. Amik gölünün kurutulması neticesinde elde edilen bu tarım arazilerinin yüksek su tutma özelliğine sahip alüvyal toprak yapısında olması, özellikle yoğun yağışlar nedeniyle

yeraltı su seviyesinin yüksek olması ve amik gölünden geriye kalan küçük su göletlerinin bulunması nedeniyle bölgede çökme ve kabarma deformasyonlarının olduğu düşünülmektedir. Ayrıca deformasyon trendinin oluşmasındaki diğer iki önemli faktör ise bölgede görülen mevsimsel sıcaklık farklılıkları ve havalimanından geçen aktif fay hattıdır. Özellikle sıcaklık farklılıkları neticesinde toprakta sıkılaşma ve büzüşmeler gerçekleşmektedir. Buda toprak erozyonunu tetikleyerek yüzey deformasyonunun artmasına sebep olmaktadır.

Havalimanında oluşan yer değiştirme haritaları daha detaylı olarak incelendiğinde Şekil 5.10'da görülen havalimanının terminal binası ve çevresinde çökme hareketinin gerçekleştiği görülmektedir. Bu çökmenin bina bloğunun kendi ağırlığının, garaj kısmında bulunan uçakların ağırlıklarının etkisi ve alüvyal toprak yapısının çökmeye olan yatkınlığı ile zaman içerisinde olduğu aşikârdır.



Şekil 5.10 Hatay Havalimanı'nın terminal binası ve çevresi.

Havalimanı pistinin bulunduğu alanın kuzeyinde özellikle kuzeybatısında oluşan kabarmaların ise yakın bölgeden geçen fay hattının ve Muratpaşa Çayı'nın oluşturabileceği olumsuz etkilerin önüne geçmek amacıyla gerçekleştirilen zemin güçlendirme çalışmaları neticesinde olduğu ve zamanla arttığı düşünülmektedir.

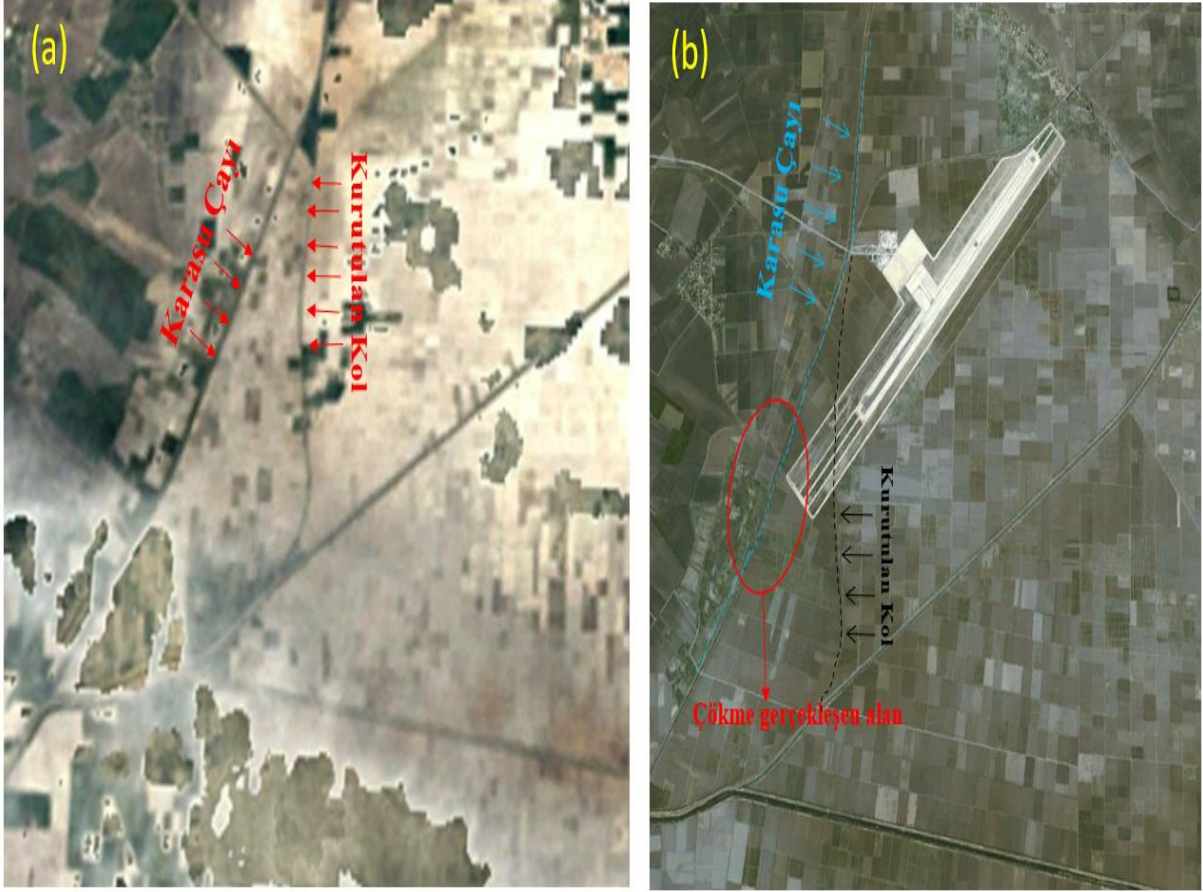
Havalimanlarında genellikle zemin mekaniğinin sonucu olarak pistlerin uç bölgelerinde kabarmaların orta bölümlerde ise çökmelerin oluşması beklenmektedir.

Yukarıda ifade edildiği üzere pistin orta bölümünde ve terminal binasında çökme hareketinin gerçekleştiği, kuzeybatısında kabarmanın gerçekleştiği görülürken havalimanının güneybatısında ise kabarmanın aksine bir çökme hareketinin olduğu görülmektedir. Bunun ana sebebinin o bölgede oluşan su göletinin olduğu düşünülmektedir. Havalimanındaki drenaj sularının ve yoğun yağışların etkisi ile su miktarı artmaktadır. Yaz aylarında ise su göleti tamamen kurumaktadır (Şekil 5.11). Bunlar ile birlikte su miktarının artmasına sebep olan en büyük faktör Karasu Çayı'dır. Havalimanının güneybatısının yaklaşık 100 metre yakınından geçen çayda yıl içinde aşırı yağışlar neticesinde taşmalar gerçekleşmektedir. Karasu Çayı'nın taşması ile bölgede su seviyesi yükselmekte tarım arazileri ve çevredeki binalar sular altında kalmaktadır.



Şekil 5.11 Havalimanının güneybatısında oluşan su göletinin zaman içerisindeki değişimi.

Bu şekilde su seviyesinin artması ve azalması neticesinde toprak neminin artması ile havalimanının güneybatısının içinde kaldığı bölümde çökmelerin olduğu düşünülmektedir. Ayrıca Google Earth görüntüleri geriye doğru incelendiğinde Karasu Çayı'nın bir kolunun havalimanının güney batısından geçtiği ve Afrin Suyu ile birleştiği havalimanı yapım aşamasında kurutulduğu görülmektedir (Şekil 5.12). Bu kol ile Karasu Çayı arasında kalan alanda çökme hareketi izlenmesi bu bölgede artan yeraltı suyu ve killi bir toprak yapısının bulunması hareketi etkileyen diğer etmenlerdir.



Şekil 5.12 Kurutulmuş Karasu Çayı kolunun havalimanı yapılmadan önceki (a) ve sonraki (b) durumu.

Unutulmamalıdır ki fazla yeraltı suyu, killi toprak yapısı ve gevşek zemin çökme deformasyonunu doğuran zemin sıvılaşmasına neden olmaktadır. Nitekim büyük 6 Şubat Maraş depremlerinden sonra bu alanda zemin sıvılaşması gerçekleşmiştir.

5.2.2 PSI-SBAS Deformasyon Haritaları Uyum Değerlendirme Bulguları

PSI-SBAS deformasyon haritaları uyum değerlendirme bulguları, PSI ve SBAS LOS yönünde oluşan deformasyon hız haritalarının birbirleri ile olan uyumu ve SBAS temelinde oluşturulan dört farklı deformasyon hesaplama modeli ile üretilen deformasyon haritalarının birbirlerine göre korelasyonları şeklinde ayrı ayrı analiz edilmiştir.

- **PSI-SBAS Deformasyon Hız Haritaları Uyum Bulguları**

Hatay Havalimanı'nda 2017-2023 yılları arasındaki süreçte Sentinel-1 SAR görüntülerinden PSI ve SBAS yöntemi ile üretilen LOS yönündeki yıllık ortalama deformasyon hız haritaları (Şekil 5.4, Şekil 5.6, Şekil 5.7, Şekil 5.8, Şekil 5.9) incelendiğinde hareket yönünde (çökme, kabarma) genel olarak bir uyumun olduğu görülmektedir. LOS yönünde oluşturulan tüm

deformasyon hız haritalarında havalimanı terminal binası ve güneybatı bölgesinde çökme hareketinin maksimum seviyede gerçekleştiği ve kuzeydoğu bölgesinde ise benzer kabarmaların olduğu anlaşılmaktadır. PSI yıllık ortalama deformasyon hız haritası, SBAS temelli LOS yönünde oluşturulan lineer, lineer periyodik, kuadratik ve kübik deformasyon hız haritaları ile karşılaştırıldığında genel anlamda bir uyum olmakla beraber lineer deformasyon modeli ile oluşturulan deformasyon hız haritasının PSI ile oluşturulan deformasyon hız haritası ile daha iyi bir uyum gösterdiği görülmektedir.

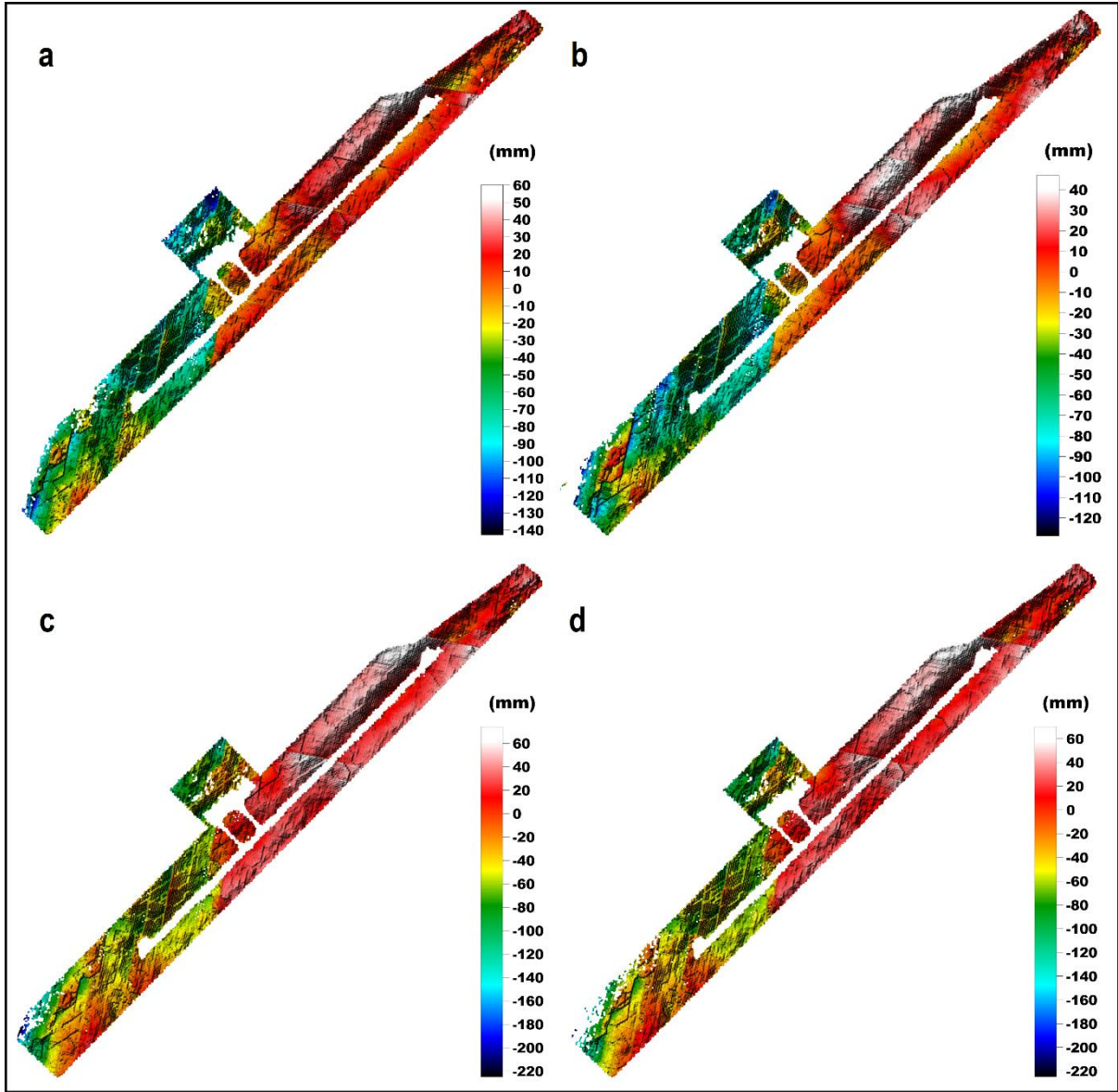
- **SBAS Deformasyon Modelleri Uyum Bulguları**

Bu başlık altında SBAS yöntemi temelinde lineer, lineer periyodik, kuadratik ve kübik deformasyon hesaplama modelleri ile üretilen düşey deformasyon haritaları ve bu haritaların birbirlerine göre korelasyonunu detaylı olarak ortaya koyan istatistiki değerler, histogramlar ve fark haritaları yer almaktadır. Analizlerde, Hatay Havalimanı sınırları GoogleEarth üzerinden vektörleştirme ile belirlenmiş ve lineer, lineer periyodik, kuadratik ve kübik SBAS modellerinden üretilen deformasyon noktaları bu sınırlara göre filtrelenmiştir. Bu sayede, korelasyon analizleri için tam ortak alan sağlanmıştır. Şekil 5.13, Hatay Havalimanı sınırları (sarı renkli) ve alan üzerinde üretilen SBAS noktalarını göstermektedir.



Şekil 5.13 SBAS deformasyon noktaları: (a) lineer, (b) lineer periyodik, (c) kuadratik, (d) kübik.

Dört farklı yöntemle elde edilen SBAS düşey deformasyon noktalarının havaalanı sınırlarına indirgenmesinin ardından Surfer yazılımında deformasyon haritaları üretilmiştir. Üretimde, vektör nokta bulutlarının raster haritalara dönüşümünde en yakın komşuluk (Nearest Neighbour) enterpolasyon yöntemi tercih edilmiştir. Nokta yoğunlukları dikkate alınarak deformasyon haritaları 5 m grid aralığında üretilmiştir. Şekil 5.14, üretilen deformasyon haritalarını ve mm mertebesinde sunulmuş deformasyon miktarlarını göstermektedir.



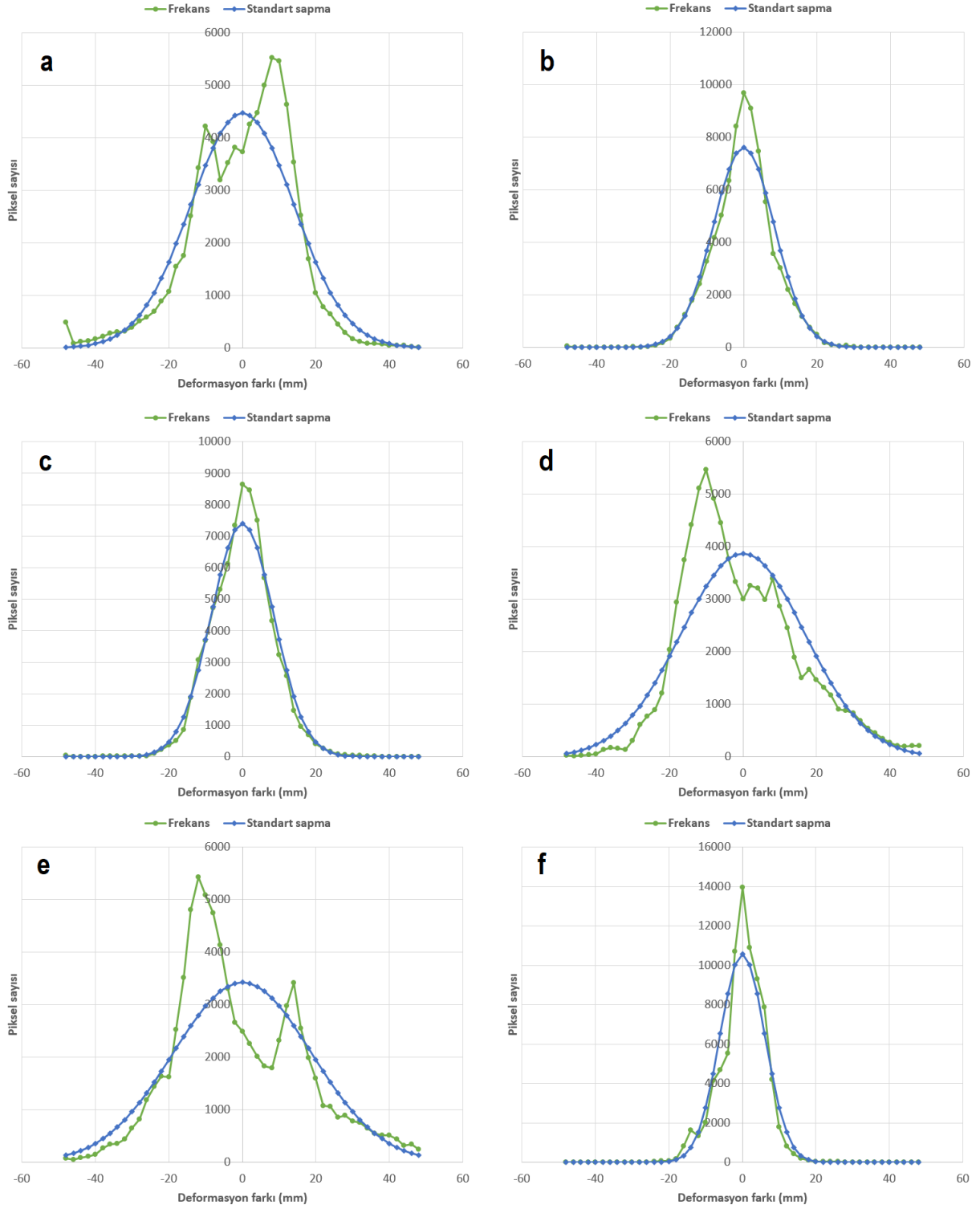
Şekil 5.14 SBAS deformasyon haritaları: (a) lineer, (b) lineer periyodik, (c) kuadratik, (d) kübik.

Lineer, lineer periyodik, kuadratik ve kübik SBAS deformasyon modellerinden üretilen haritaların istatistiki korelasyon analizleri BLUH (Bundle Block Adjustment Leibniz University Hannover) yazılımında standart sapma uluslararası değerlendirme metriği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.1, modellerin standart sapma cinsinden korelasyonlarını yansıtmaktadır. Aynı zamanda, modellere ait deformasyon haritaları arasında hesaplanmış bias (sistemik hata) değerleri de ilgili Çizelge 5.1’de yer almaktadır. Ana değerler bias eliminasyonu sonrası elde edilmiştir.

Çizelge 5.1 SBAS deformasyon modelleri arasındaki korelasyon (REF= referans model, KM= Karşılaştırılan model, EB= Elemine edilen bias).

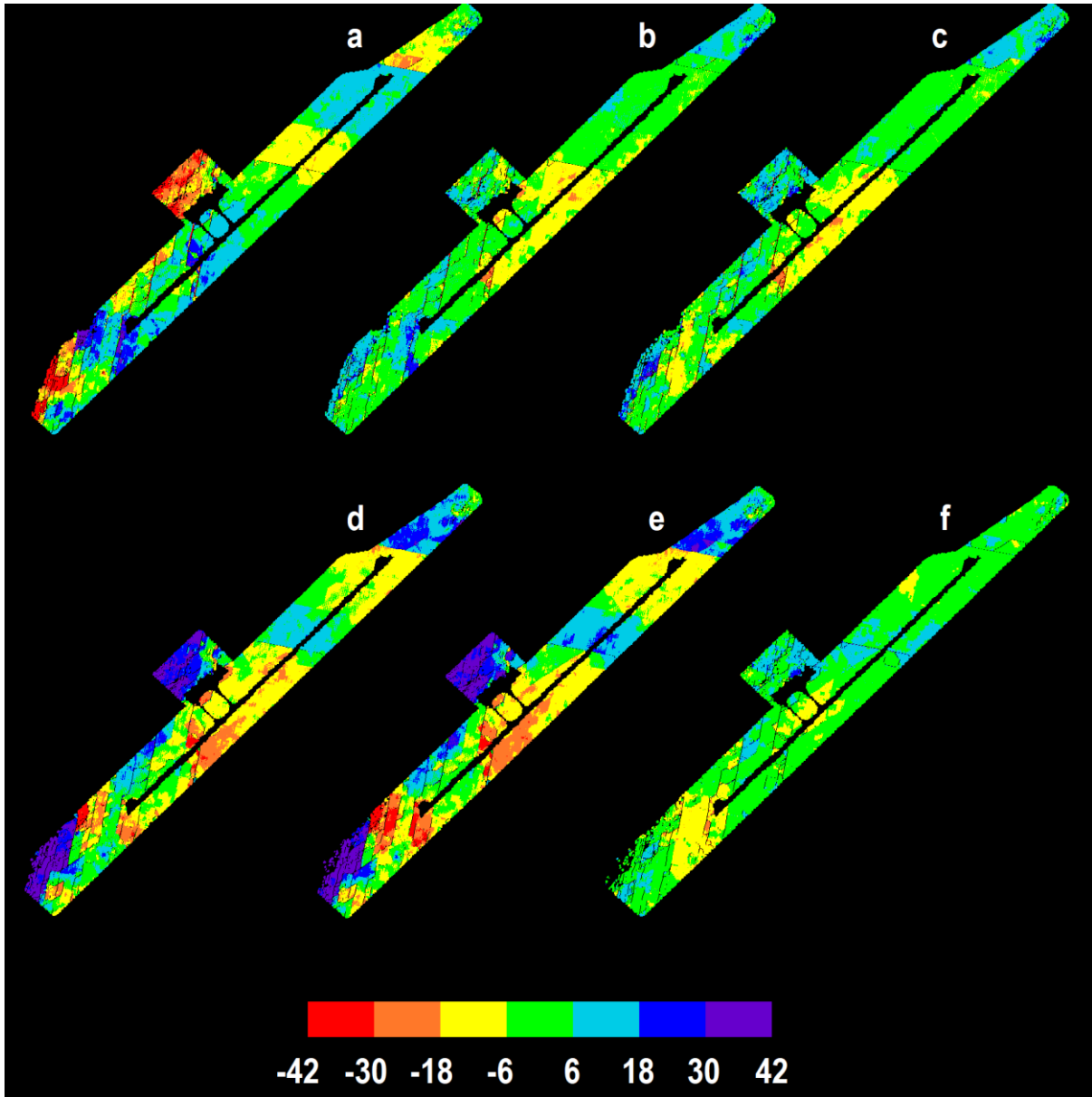
Standart sapma (mm)				
REF KM	Lineer	Lineer_per	Kuadratik	Kübik
Lineer	0.000	14.127 (EB= -1.154)	8.316 (EB= 13.512)	8.525 (EB= 8.452)
Lineer_per	14.127 (EB= 1.154)	0.000	16.835 (EB= 14.228)	18.857 (EB= 9.394)
Kuadratik	8.316 (EB= -13.512)	16.835 (EB= -14.228)	0.000	6.104 (EB= -5.119)
Kübik	8.525 (EB= -8.452)	18.857 (EB= -9.394)	6.104 (EB= 5.119)	0.000

Çizelge 5.1’de açık şekilde görülebileceği gibi dört farklı SBAS modelinden üretilen deformasyon haritalarının korelasyon seviyesi $\pm 6-18$ mm arasında değişmektedir. Şekil 5.13’de yer alan deformasyon haritalarının ölçekleri dikkate alındığında bu değer aralığının yüksek korelasyona işaret ettiği kanaati oluşabilir ancak bu aralığın daha iyi yorumlanabilmesi için farkların frekans ve standart sapma histogramlarının ve deformasyon fark haritalarının üretilmesi gerekmektedir. Şekil 5.15, SBAS modellerinden elde edilen deformasyon değerleri arasındaki farkların frekans ve standart sapma histogramlarını göstermektedir. Histogramlar ışığında, en yüksek korelasyonun kuadratik ve kübik modellere ait deformasyon haritaları arasında olduğu ve analiz edilen 80000 dolayındaki pikselden yaklaşık 14000’inin tam uyum gösterdiği ve fark içermediği saptanmıştır. Ayrıca 10000 üzerinde pikselin de standart sapma değeri sıfırdır. Çok önemli bir diğer çıkarım ise, lineer periyodik modelden üretilen deformasyon haritasının diğer haritalar ile olan farklarının anormal olduğu ve çift tepeli bir dağılım gösterdiğidir. Bu bulgu, Çizelge 5.1’de yer alan istatistiki sonuçlarla da paralellik göstermektedir. Çizelge 5.1 detaylı incelendiğinde lineer periyodik model sonuçları dışında diğer modellerin deformasyon haritalarının korelasyonun $\pm 6-8$ mm dolayında olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 5.14’te, standart sapma olarak en korelasyonu düşük bulguya ise lineer periyodik ve kübik modeller arasında rastlanmıştır. Genel anlamda bakıldığında, karşılaştırılan tüm modeller için standart sapma histogramları normal dağılım göstermektedir.



Şekil 5.15 SBAS modellerinden üretilen deformasyon haritaları farklarının frekans ve standart sapma histogramları: (a) lineer-lineer periyodik, (b) lineer-kuadratik, (c) lineer-küçük, (d) lineer periyodik-kuadratik, (e) lineer periyodik-küçük, (f) kuadratik-küçük.

Şekil 5.15, SBAS modellerinden üretilen deformasyon haritaları arasındaki bölgesel farklılıkları en net şekilde ifade eden fark haritalarını göstermektedir. Fark haritaları üretimlerinde ortak skala ± 42 mm olarak belirlenmiştir. Şekilde, özellikle havalimanı binası ve güneybatı ucunda ıslak zemine yakın bölgede lineer-lineer periyodik, lineer periyodik-kuadratik ve lineer periyodik-kübik modellere ait deformasyon haritalarında ortaya çıkan farkların maksimum seviyede olduğu ve ± 42 mm'ye kadar ulaştığı görülmektedir. Diğer modellere ait fark haritalarında ise açık sarı, yeşil ve mavi bölgelerin dominant olduğu ve bu bölgelerde farkların maksimum ± 18 mm düzeyinde olduğu saptanmıştır.



Şekil 5.16 SBAS modellerinden üretilen deformasyon farkı haritaları: (a) lineer-lineer periyodik, (b) lineer-kuadratik, (c) lineer-kübik, (d) lineer periyodik-kuadratik, (e) lineer periyodik-kübik, (f) kuadratik-kübik



BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

İslah edilerek kazanılan sulak arazilerde inşaa edilen otoyol, köprü, havalimanı vb. büyük mühendislik yapılarında zaman içinde deformasyon oluşum riski oldukça fazla olup bu yapıların formasyonu gelişmiş dünya ülkelerinde hassas gözlem teknolojileri ile sürekli olarak izlenmektedir. Bu tez çalışmasında, ülkemizde, ıslah edilen arazilerde yapılmış en büyük mühendislik yapılarından biri olan Hatay Havalimanı mercek altına alınmıştır. Kurutulan Amik gölünün sınırları içerisine yapılan Hatay Havalimanı'nda yıllar içerisinde oluşan deformasyonlar dünya genelinde en yoğun talep gören MT-InSAR teknikleri olan PSI ve SBAS temelinde izlenmiş, 2017-2023 yılları arasında gerçekleşen deformasyonlar tespit edilmiş ve bu tekniklerin deformasyon tespitindeki karşılaştırmalı analizleri gerçekleştirilerek uyum düzeyleri ortaya konmuştur. Ek olarak, SBAS tekniğinin uygulaması esnasında dünya genelinde kullanılan lineer, lineer periyodik, kuadratik ve kübik deformasyon hesaplama modelleri ile ayrı ayrı deformasyon haritaları üretilmiş ve model-bazlı korelasyon analizleri gerçekleştirilerek modeller arası uyum seviyeleri detaylı şekilde araştırılmıştır. Bu sayede, bilim camiasında özellikle son on yılda çok popüler hale gelmiş PSI ve SBAS uygulamalarının çok daha dikkatli yapılması gerekliliği, uygulanan metotların ve kullanılan model ve parametrelerin sonuç deformasyon miktarlarında ne denli önemli farklılıklara neden olabileceği hususları ortaya konmuştur.

Uygulama ve analizler, 151 adet Sentinel-1A SAR uydu görüntüsü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. PSI tekniği ile deformasyon haritası üretiminde StaMPS, SBAS ile üretimlerde ise ENVI SARscape ve Surfer yazılımları kullanılmıştır. İstatistiki analizler ve deformasyon fark haritası üretimlerinde ise BLUH ve LISA yazılımlarından fayda sağlanmıştır. PSI ile yapılan analizler sonucunda 2017-2023 yılları arasında Hatay Havalimanı'nda LOS yönünde yıllık ortalama -6.25 - 9.02 mm arasında deformasyon hızı tespit edilmiştir. Deformasyonlar incelendiğinde, havalimanı terminal binası ve havalimanının güneybatı bölümünde çökme hareketi, kuzeydoğusunda ise kahir ekseriyette kabarmalar olduğu saptanmıştır.

Yukarıda da belirtildiği gibi, SBAS analizleri gerçekleştirilirken lineer, lineer periyodik, kuadratik ve kübik olmak üzere dört farklı deformasyon hesaplama modeli kullanılmıştır. Bu kapsamda ilk olarak bu dört model ile LOS yönünde ayrı ayrı deformasyon hız haritaları oluşturulmuştur. Bu aşamada yapılan analizler neticesinde, SBAS lineer deformasyon modeli ile oluşturulan haritada LOS yönünde yıllık -18.70 - 9.75 mm arasında deformasyon hızı olduğu, lineer periyodik model ile oluşturulan deformasyon hız haritasında ise LOS yönünde yıllık -17.97 - 8.77 mm arasında bir deformasyon hızı oluşmuştur. Kuadratik ve kübik modeller ile oluşturulan deformasyon hız haritaları irdelendiğinde ise sırasıyla LOS yönünde yıllık ortalama -32.46 - 11.90 mm ve -35.22-11.30 mm arasında bir deformasyon gerçekleştiği saptanmıştır.

Yapılan analizler sonucunda PSI ve SBAS deformasyon modelleri ile oluşturulan LOS yönündeki deformasyon hız haritalarının genel olarak uyum içinde olduğu ve PSI yöntemi ile en yüksek uyumu SBAS lineer modelinin gösterdiği belirlenmiştir. PSI ve SBAS deformasyon hız haritalarında havalimanı binası ile havalimanının güneybatısında çökme hareketinin yakın hızlarda gerçekleştiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca havalimanının kuzeydoğusunda benzer şekilde kabarmaların olduğu anlaşılmıştır.

PSI ve SBAS ile üretilen deformasyon haritalarında havalimanının güneybatısı bölgesinde beklenmedik çökme hareketinin gerçekleşmesindeki çevresel etkenler belirlenmiştir. Bu etkenler aşağıda sunulmuştur.

- Bölgeye çok yakın mesafeden geçen Karasu Çayı'nın yıl içerisinde şiddetli yağışların etkisi ile taşması sonucu bölgede su taşkınlarının oluşması,
- Amik gölünden geriye kalan su bakiyelerinin bu bölgede yıl içinde yükselmesi,
- Havalimanı yapılmadan önce havalimanının bu bölgesinden geçen Karasu Çayı'nın kurutularak ıslah edilip havalimanı sınırlarına dâhil edilmesi

Bununla birlikte havalimanında gerçekleşen kabarma deformasyonlarının, çökmeye karşılık ters yönde yüzey hareketi, sıcaklık ve bölgeden geçen fay hattından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca sıcaklık farklılıkları nedeniyle toprakta bulunan nem miktarının yıl içerisinde değişim göstermesinin zeminde yer yer kabarma ve çökme hareketlerine sebep olduğu sonucuna varılmıştır.

SBAS modellerinden oluşturulan düşey deformasyon haritaları ile gerçekleştirilen analizler neticesinde, lineer, lineer periyodik, kuadratik ve kübik SBAS deformasyon modellerinden

Üretilen deformasyon haritalarının korelasyon miktarının standart sapma olarak $\pm 6-18$ mm dolayında olduğu ve farkların bölgesel olarak incelendiğinde ± 42 mm'ye kadar ulaştığı tespit edilmiştir. Bu, SBAS tekniği ile deformasyon haritası üretiminde tercih edilen modelin sonuçlar üzerinde doğrudan etkili olduğunu gösteren bilimsel anlamda çok önemli bir tespit olmuştur. Özellikle lineer periyodik modelden üretilen deformasyon haritası diğer haritalar ile dikkate değer miktarda farklılıklar göstermekte ve bu farklılıkların özellikle havalimanı binası ve güneybatı bölümünde yer alan ıslak zemine yakın bölgede, genel anlamda tespit edilen maksimum fark olan ± 42 mm seviyelerine kadar çıktığı saptanmıştır. Lineer, kuadratik ve kübik modellerden elde edilen deformasyon haritalarının ise standart sapma cinsinden $\pm 6-8$ mm dolayında uyumlu olduğu, farkların havalimanının %90'nından daha büyük bir bölümünde maksimum ± 18 mm düzeyinde kaldığı belirlenmiştir. Tüm bu sonuçlar ışığında, ıslah arazilerinde inşaa edilmiş Hatay Havalimanı gibi büyük mühendislik yapılarında SBAS yöntemi ile deformasyon haritası üretiminde lineer periyodik modelin diğer modellerden ayrışan deformasyon değerleri sunduğu kanıtlanmıştır. Bu durum, SBAS kullanıcılarının deformasyon hesaplama modeli seçiminde çok dikkatli olması gerekliliğini açıkça ortaya koymaktadır.

Tez çalışmasında gerçekleştirilen tüm bu analizler neticesinde, sonuçları itibariyle birbirleriyle önemli ölçüde uyumlu oldukları saptanan PSI ve SBAS MT-InSAR tekniklerinin ortaya koydukları ciddi deformasyon bulguları ışığında, ıslah edilen araziler üzerine büyük mühendislik yapıları inşaa edilmeden önce arazinin fizibilite çalışmalarına çok daha büyük önem verilmesi ve çevresel etkilerin daha kapsamlı değerlendirilmesi önerilmektedir.



KAYNAKLAR

- Agram P S** (2010) Persistent Scatterer Interferometry in Natural Terrain, *PhD Thesis*, Stanford university, Kaliforniya 163 p.
- Alimuddin I, Bayuaji L, Sri Sumantyo J T and Kuz H** (2011). Surface Deformation Monitoring of Miyakejima Volcano Using DInSAR Technique of ALOS PALSAR Images. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 24-29 Haziran 2011, Vancouver, BC, Canada, 1615–1618.
- Ambrosi C, Strozzi T, Scapozza C and Wegmüller U** (2018). Landslide Hazard Assessment in the Himalayas (Nepal And Bhutan) Based on Earth-Observation Data. *Engineering Geology*, 237: 217–228.
- Ateş Ş, Keçer M, Osman Ç R ve Kahraman S** (2004) Antakya (Hatay) İl Merkezi ve Çevresinin Yerbilim Verileri, MTA. Enst., Jeoloji Etütleri Dairesi, Derleme Raporu, No: 10717, Ankara, 2004.
- Atzori S, Hunstad I, Chini M, Salvi S, Tolomei C, Bignami C, Stramondo S, Trasatti E, Antonioli A and Boschi E** (2009) Finite Fault Inversion of Dinsar Coseismic Displacement of the 2009 L'Aquila Earthquake (Central Italy). *Geophysical Research Letters*, 36(15).
- Baek J, Kim S W, Park H J, Jung H S, Kim K D, Kim J W** (2008) Analysis of Ground Subsidence in Coal Mining Area Using SAR Interferometry, *Geosciences Journal*, 12(3): 277-284.
- Bao X, Zhang R, Shama A, Li, S, Xie L, Lv J, Fu Y, Wu R and Liu G** (2022) Ground Deformation Pattern Analysis and Evolution Prediction of Shanghai Pudong International Airport Based on PSI Long Time Series Observations. *Remote Sensing*, 14 (3): 610.
- Berardino P, Fornaro G, Lanari R, Sansosti E** (2002) A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40: 2375-2383.
- Blanco-Sanchez P, Mallorqu JJ, Duque S and Monells D** (2008) The Coherent Pixels Technique (CPT): An Advanced DInSAR Technique for Nonlinear Deformation Monitoring. *Pure and Applied Geophysics*, 165: 1167-1193.
- Bovenga F, Pasquariello G, Pellicani R, Refice A and Spilotro G** (2017) Landslide monitoring for risk mitigation by using corner reflector and satellite SAR interferometry: The large landslide of Carlantino (Italy). *CATENA*, 151: 49–62.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Bürgmann R, Rosen P A and Fielding E J** (2000) Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earth's Surface Topography and Its Deformation. *Annual Review of Earth Planetary Science*, 13: 169-209.
- Calo F** (2012) DORIS project: The European Downstream Service for Landslides and Subsidence Risk Management. *In: Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 22-27 Temmuz 2012, Münih, Almanya, pp: 3018-3021.
- Carnec C, Massonnet D and King C** (1996). Two Examples of The Use of SAR Interferometry on Displacement Fields of Small Spatial Extent. *Geophysical Research Letters*, 23(24): 3579- 3582.
- 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 and 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.
- Castaneda C, Gutierrez F, Manunta M and Galve J P** (2009) DInSAR Measurements of Ground Deformation by Sinkholes, Mining Subsidence, and Landslides, Ebro River, Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(11): 1562-1574.
- Cheloni D, De Novellis V, Albano M, Antonioli A, Anzidei M, Atzori S, Avallone A, Bignami C, Bonano M and Calcaterra S** (2017) Geodetic Model of the 2016 Central Italy Earthquake Sequence Inferred from InSAR and GNSS Data. *Geophysical Research Letters*, 44: 6778-6787.
- Chen F, Lin H, Zhang Y and Lu Z** (2012) Ground Subsidence Geo-Hazards Induced by Rapid Urbanization: Implications from Insar Observation and Geological Analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(4): 935-942.
- Chen Q, Ding X and Liu G** (2007) Method for Optimum Selection of Common Master Acquisition for PS-DInSAR. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 36(4): 395-399.
- Chen Z, Zhang J M, Ho K, Wu F Q and Li Z K** (2008) The Use of PSInsar™ Data in Landslide Detection and Monitoring: The Example of the Piemonte Region (Northern Italy), Landslides and Engineered Slopes. From the Past to the Future, CRC Press, p. 1277-1284.
- Choi J K, Won J S, Lee S, Kim S W, Kim K D, Jung H S** (2011) Integration of a Subsidence Model and SAR Interferometry for a Coalmine Subsidence Hazard Map in Taebaek, Korea. *International Journal of Remote Sensing*, 32(23): 8161-8181.
- Colesanti C, Ferretti A, Novali F, Prati C and Rocca F** (2003) SAR Monitoring of Progressive and Seasonal Ground Deformation Using the Permanent Scatterers Technique. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 41 (7): 1685-1701.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Costantini M, Falco S, Malvarosa F and Minati F** (2008) A New Method for Identification and Analysis of Persistent Scatterers in Series of SAR Images. *IGARSS 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 7-11 Temmuz 2008, Boston, MA, USA, IGARSS 2008- 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, ISSB: 2153-7003, 2: 449-452.
- Costantini M, Falco S, Malvarosa F, Minati F, Trillo F and Vecchioli F** (2010) Persistent Scatterer Pairs (PSP) Approach in Very High-Resolution SAR Interferometry. *8th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, 7-10 Haziran 2010, Aachen, Almanya, VDE, ISBN: 978-3-8007-3272-2, 1-4.
- Costantini M, Falco S, Malvarosa F, Minati F, Trillo F and Vecchioli F** (2014) Persistent Scatterer Pair Interferometry: Approach and Application to COSMO-SkyMed SAR Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(7): 2869- 2879.
- Costantini M, Minati F, Trillo F and Vecchioli F** (2013) Enhanced PSP SAR Interferometry for Analysis of Weak Scatterers and High Definition Monitoring of Deformations Over Structures and Natural Terrains. *2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 21-26 Temmuz 2013, Melbourne, VIC, Avustralya, IEEE, ISBN: 978-1-4799-1114-1, e-book, 876-879.
- Crosetto M, Biescas E, Duro J, Closa J and Arnaud A** (2008) Generation of Advanced ERS and Envisat Interferometric SAR Products Using the Stable Point Network Technique. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 74: 443-450.
- Dehghani M, Valadan Zoj M J, Entezam I, Mansourian A, and Saatchi S** (2009) InSAR Monitoring of Progressive Land Subsidence in Neyshabour, Northeast Iran. *Geophysical Journal International*, 178(1): 47–56.
- Derya H** (2018). Endüstri Devrimleri ve Endüstri 4.0. G. Ü. *İslâhiye İİBF Uluslararası E-Dergi*, 2 (2): 1-20.
- Dias P, Catalao J and Marques F O** (2018) Sentinel-1 InSAR Data Applied to Surface Deformation in Macaronesia (Canaries and Cape Verde). *Procedia Computer Science*, 138: 382 – 387.
- Dong J, Liao M, Xu Q, Zhang L, Tang M and Gong J** (2018) Detection and Displacement Characterization of Landslides Using Multi-Temporal Satellite SAR Interferometry: A Case Study of Danba County in The Dadu River Basin. *Engineering Geology*, 240: 95-109.
- Dong J, Zhang L, Tang M, Liao M, Xu Q, Gong J and Ao M** (2018) Mapping Landslide Surface Displacements with Time Series SAR Interferometry by Combining Persistent and Distributed Scatterers: A Case Study of Jiaju Landslide in Danba, China. *Remote Sensing of Environment*, 205: 180–198.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Duro J, Albiol D, Mora O and Payas B** (2013) Application of Advanced InSAR Techniques for the Measurement of Vertical and Horizontal Ground Motion in Long Wall Minings. *Proceedings of the 2013 Coal Operators' Conference*, 18-20 Şubat 2019, Wollongong, Avustralya, Naj Aziz and Bob Kininmonth (eds.), , Mining Engineering, University of Wollongong, 99-106.
- Duro J, Inglada J, Closa J, Adam N, Arnaud A** (2003) High Resolution Differential Interferometry Using Time Series of ERS and ENVISAT SAR Data. *In Proc Fringe*, pp: 1-5.
- Farina P, Colombo D, Fumagalli A, Marks F and Moretti S** (2006) Permanent Scatterers for Landslide Investigations: Outcomes from the ESA-SLAM Project. *Engineering Geology*, 88: 200-217.
- Ferretti A** (2004) InSAR Permanent Scatterer Analysis Reveals Ups and Downs in San Francisco Bay Area. *Transactions American Geophysical Union*, 85(34): 317.
- Ferretti A, Fumagalli A, Novali F, Prati C, Rocca F and 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, Prati C and Rocca F** (2000) Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 38 (5): 2202-2212.
- Ferretti A, Prati C and Rocca F** (2001) Permanent Scatterers in SAR Interferometry, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 39(1): 8-20.
- Fujiwara S, Rosen P A, Tobita M and Murakami M** (1998) Crustal Deformation Measurements Using Repeat-Pass JERS 1 Synthetic Aperture Radar Interferometry Near the Izu Peninsula, Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B2): 2411-2426.
- Gabriel A K and Goldstein R M** (1988). Crossed Orbit Interferometry: Theory and Experimental Results from SIR-B. *International Journal of Remote Sensing*, 9(5): 857-872.
- Gao M, Gong H, Chen B, Zhou C, Chen W, Liang Y, Shi M and Si Y** (2016) InSAR Time-Series Investigation of Long-Term Ground Displacement at Beijing Capital International Airport, China. *Tectonophysics*, 691:271-281.
- García-Davalillo J C, Herrera G, Notti D, Strozzi T and Álvarez-Fernández I** (2014) DInSAR Analysis of ALOS PALSAR Images for the Assessment of Very Slow Landslides: The Tena Valley case study. *Landslides*, 11(2): 225–246.
- Goel K, Parizzi A and Adam N** (2011) Salt Mining Induced Subsidence Mapping Of Lueneburg (Germany) Using Psi And Sbas Techniques Exploiting Ers And Terrasar-X Data. *Proc. of 'Fringe 2011 Workshop*, Ouwehand L (Ed.), 1609-042X, ISBN: 978-92-9092-261-2, Frascati Italy.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Goldstein R M and Zebker H A** (1987) Interferometric Radar Measurement of Ocean Surface Currents. *Nature*, 328: 707-709.
- Goldstein R, Zebker H and Werner C** (1988) Satellite Radar Interferometry-Twodimensional Phase Unwrapping. *Radio Science*, 23: 713-720.
- Gourmelen N, Amelung F, Casu F, Manzo M and Lanari R** (2007) Mining-Related Ground Deformation in Crescent Valley, Nevada: Implications for Sparse GPS Networks. *Geophysical Research Letters*, 34(9).
- Greif V and Vlcko J** (2012) Monitoring of Post-Failure Landslide Deformation by the PS-InSAR Technique at Lubietova in Central Slovakia. *Environmental Earth Sciences*, 66(6): 1585–1595.
- Guzzetti F, Manunta M, Ardizzone F, Pepe A, Cardinali M, Zeni G, Reichenbach P and Lanari R** (2009) Analysis of Ground Deformation Detected Using the SBAS-DInSAR Technique in Umbria, Central Italy. *Pure and Applied Geophysics*, 166(8–9): 1425–1459.
- Hanssen R F** (2001) Radar Interferometry Data Interpretation and Error Analysis. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, 327 p.
- Haynes M, Capes R, Lawrences G, Smith A, Shilston D and Nicholls G** (1997). Majorurban Subsidence Mapped by Differential SAR Interferometry, *The 3rd ERS Symposium (ESA)*. 17-21 Mart 2017, Florence, Italy, 18-21.
- Herrera G, Notti D, Garcia-Davalillo JC, Mora O, Cooksley G, Sanchez M, Arnaud A and Crosetto M** (2011) Analysis with C-and X-band Satellite SAR Data of the Portalet Landslide Area. *Landslides*, 8: 195-206.
- Hooper A J** (2006) *Persistent Scatter Radar Interferometry for Crustal Deformation Studies And Modeling of Volcanic Deformation*, AAI3219289, ISBN: 9780542706905, Stanford University, 124 pp.
- Hooper A, Segall P and Zebker H** (2007) Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar for Crustal Deformation Analysis, with Application to Volcán Alcedo, Galápagos. *Journal of Geophysical Research: solid Earth*, 112(B7): B07407.
- Hooper A, Zebker H, Segall P and Kampes B** (2004) A New Method for Measuring Deformation on Volcanoes and Other Natural Terrains Using Insar Persistent Scatterers. *Geophysical Research Letters*, 31(23).
- Hu B, Wang H S, Sun Y L, Hou J G and Liang J** (2014) Long-Term Land Subsidence Monitoring of Beijing (China) Using the Small Baseline Subset (SBAS) Technique. *Remote Sensing*, 6(5): 3648–3661.
- Huang C, Xia H and Hu J** (2019) Surface Deformation Monitoring in Coal Mine Area Based on PSI. *IEEE Access*, 7: 29672–29678.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Huang Lin C, Liu D and Liu G** (2019) Landslide Detection in La Paz City (Bolivia) Based on Time Series Analysis of Insar Data. *International Journal of Remote Sensing*, 40(17): 6775–6795.
- Jarach D** (2004) Future Scenarios for the European Airline Industry: A Marketing-Based Perspective. *Journal of Air Transportation*, 9 (2): 23-39.
- Jebur M N, Pradhan B and Tehrany M S** (2015) Using ALOS PALSAR Derived High-Resolution DInSAR to Detect Slow-Moving Landslides in Tropical Forest: Cameron Highlands, Malaysia. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 6(8): 741–759.
- Jiang Y, Liao M, Wang H, Zhang L and Balz T** (2016) Deformation Monitoring and Analysis of the Geological Environment of Pudong International Airport with Persistent Scatterer SAR Interferometry. *Remote Sensing*, 8 (12): 1021.
- Jung H C, Kim S W, Jung H S, Min K D and Won J S** (2007) Satellite Observation of Coal Mining Subsidence by Persistent Scatterer Analysis. *Engineering Geology*, 92(1): 1 – 13.
- Kampes B M** (2006) The Permanent Scatterer Technique. Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique. *The Netherlands: Springer-Verlag*, 12: 5-30.
- Kampes B M and Hassen R** (2004) Ambiguity Resolution for Permanent Scatterer Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(11): 2446-2453.
- Kiseleva E, Mikhailov V, Smolyaninova E, Dmitriev P, Golubev V, Timoshkina E and Hanssen R** (2014) PS-InSAR Monitoring of Landslide Activity in The Black Sea Coast of The Caucasus. *Procedia Technology*, 16: 404-413.
- Lanari R, Casu F, Manzo M, Zeni G, Berardino P, Manunta M and Pep A** (2007) An Overview of the Small Baseline Subset Algorithm: A DInSAR Technique for Surface Deformation Analysis. *Pure and Applied Geophysics*, 164(4): 637-661.
- Liu P, Li Z, Hoey T, Kincal C, Zhang J, Zeng Q, and Muller J P** (2013) Using Advanced InSAR Time Series Techniques to Monitor Landslide Movements in Badong of the Three Gorges Region, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21(1): 253–264.
- Liu X, Cao Q, Wang S and Anastasia C** (2018) Optimized Method for Selecting Common Master Image in PS-DINSAR. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 11(1): 208–215.
- Mallorqui JJ, Blanco P, Broquetas A, Navarrete D, Romero R, Domínguez J and Carrasco D** (2004) ERS and ENVISAT Long-Term Differential Interferometry with the Coherent Pixels Technique (CPT). *ERS-ENVISAT Symposium*, 2004, Proceeding ERS/ENVISAT Symposium, Salzburg, Austria, 6-10.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Martín-Antón M, Negro V, del Campo J M, López-Gutiérrez J S and Esteban M D** (2016) Review of Coastal Land Reclamation Situation in the World. *Journal of Coastal Research*, 75(10075): 667-671.
- Massonnet D, Rossi M, Carmona C, Adragna F, Peltzer G, Feigl K and Rabaute T** (1993) The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry. *Nature*, 364: 138-142.
- Mirzaee S, Motagh M and Akbari B** (2017a) Landslide Monitoring Using InSAR Time-Series and GPS Observations, Case Study: Shabkola Landslide in Northern Iran. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences-ISPRS Archives* 42(1W1): 487-492.
- Mirzaee S, Motagh M, Akbari B, Wetzel H U and Roessner S** (2017b) Evaluating Three InSAR Time Series Methods to Assess Creep Motion, Case Study: Masouleh Landslide in North Iran. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* IV-1(W1): 223-228.
- Mora O, Mallorqui JJ and 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: 2243-2253.
- Novellino A, Cigna F, Brahmi M, Sowter A, Bateson L and Marsh S** (2017) Assessing the Feasibility of a National InSAR Ground Deformation Map of Great Britain with Sentinel-1. *Geosciences*, 7(2): 19.
- Özşahin E** (2010) Hatay Havaalanının Jeomorfolojik Özellikler Ve Doğal Risk Açısından Değerlendirilmesi. *Turkish Studies*, 5(4):1390-1409.
- Özşahin E ve Kaymaz Ç K** (2013). Taşkın Riskinin Değerlendirmesine Bir Örnek: Amik Ovası Taşkınları. *Turkish studies-International periodical for the languages, literature and history of Turkish or Turkic*, 8(8): 2021-2039.
- Pastor J L, Tomás R, Lettieri L, Riquelme A, Cano M, Infante D, Ramondini M and Martire D** (2019) Multi-Source Data Integration to Investigate a Deep-Seated Landslide Affecting a Bridge. *Remote Sensing*, 11(16):1878.
- Perissin** (2009) The Multi-Temporal InSAR Software, <http://www.sarproz.com/>, Purdue University.
- Qiang S, Xuejun Q, Qi W, Jingfa Z, Kai T and Shaomin Y** (2011) Co-seismic Deformation of the 2010 Mw6.9 Yushu Earthquake from InSAR Images. *Geodesy and Geodynamics*, 2(4): 16–20.
- Ren H and Feng X** (2020). Calculating Vertical Deformation Using a Single InSAR Pair Based on Singular Value Decomposition in Mining Areas. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 92: 102115.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, Li F K, Madsen S N, Rodriguez E and Goldstein R M** (2000) Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88(3): 333-382.
- Rosen P A, Hensley S, Zebker H A, Webb F H and Fielding E J** (1996) Surface Deformation and Coherence Measurements of Kilauea Volcano, Hawaii, from SIR-C Radar Interferometry. *Journal of Geophysical Research, Planets*, 101(E10): 23109-23125.
- Ryder I, Parsons B, Wright T J and Funning G J** (2007) Post-Seismic Motion Following the 1997 Manyi (Tibet) Earthquake: InSAR Observations and Modelling. *Geophysical Journal International*, 169: 1009-1027.
- Salvi S, Atzori S, Tolomei C, Antonioli A, Trasatti E, Merryman Boncori J P Pezzo G Coletta A and Zoffoli S** (2012) Results From INSAR Monitoring of the 2010-2011 New Zealand Seismic Sequence: EA Detection and Earthquake Triggering. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 22-27 Temmuz 2012, Münih, Almanya 3544–3547.
- Sarychikhina O, Palacios D G, Delgado Argote L A and Ortega A G** (2021) Application of Satellite SAR Interferometry for the Detection and Monitoring of Landslides Along The Tijuana - Ensenada Scenic Highway, Baja California, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 107: 103030.
- Sefercik U G** (2006) Graduate School of Natural and Applied Sciences Geodesy and Photogrammetry Engineering. *Yüksek Lisans Tezi*, Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Geomatik Anabilim Dalı, Zonguldak, 100 s.
- Sefercik U G** (2013) Productivity of TerraSAR-X 3D Data In Urban Areas: A Case Study In Trento. *European Journal of Remote Sensing*, 46: 597-612.
- Sefercik U G, Buyuksalih G ve Atalay C** (2020). DSM Generation with Bistatic TanDEM-X InSAR Pairs and Quality Validation in Inclined Topographies and Various Land Cover Classes. *Arabian Journal of Geosciences*, 13: 560.
- Shi X, Zhong J, Yin Y, Chen Y, Zhou H, Wang M and Dai K** (2023) Integrating SBAS-InSAR and LSTM for Subsidence Monitoring and Prediction at Hong Kong International Airport. *Ore and Energy Resource Geology*, 15 (3): 100032.
- Sillerico E, Ezquerro P, Marchamalo M, Herrera G, Duro J and Martinez R** (2015) Monitoring Ground Subsidence in Urban Environments: M-30 Tunnels Under Madrid City (Spain). *Ingenieria e Investigacion*, 35: 30-35.
- Silvia B, Francesca C, Chiara D V, Sandro M and Nicola C** (2013) Monitoring Landslide-Induced Displacements with TerraSAR-X Persistent Scatterer Interferometry (PSI): Gimigliano Case Study in Calabria Region (Italy). *International Journal of Geosciences*, 04(10): 1467–1482.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Stramondo S, Bozzano F, Marra F, Wegmuller U, Cinti F, Moro M and Saroli M** (2008) Subsidence Induced by Urbanisation in the city of Rome Detected by Advanced InSAR Technique and Geotechnical Investigations. *Remote Sensing of Environment*, 112(6): 3160-3172.
- Stramondo S, Chini M, Bignami C, Salvi S and Atzori S** (2011) X-, C-, and L-Band DInSAR Investigation of the April 6, 2009, Abruzzi Earthquake. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8(1): 49–53.
- Sun Q, Zhang L, Ding X L, Hu J, Li Z W and Zhu J J** (2015) Slope Deformation Prior to Zhouqu, China Landslide from InSAR Time Series Analysis. *Remote Sensing of Environment*, 156: 45–57.
- Takajo H and Takahashi T** (1988) Least-Squares Phase Estimation from the Phase Difference. *Journal of the Optical Society of America*, 5(3): 416-425.
- Tofani V, Raspini F, Catani F and Casagli N** (2013) Persistent Scatterer Interferometry (PSI) Technique for Landslide Characterization and Monitoring. *Remote Sensing*, 5(3): 1045–1065.
- URL-1** <<http://www.lafsozluk.com/2012/10/elektromanyetik-nedir-ne-demektir.html>>, Ziyaret tarihi: 07.04.2024.
- URL-2** <<http://www.kozmikanafor.com/radar-ve-radardan-gizlenmek/>>, Ziyaret tarihi: 07.04.2024.
- URL-3** <<https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/sentinel-1>>, Ziyaret tarihi: 19.05.2024.
- URL-4** <<https://earthmap.org>>, Ziyaret tarihi: 1.09.2024.
- Vilardo G, Ventura G, Terranova C, Matano F and 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.
- Werner C, Wegmuller U, Strozzi T and Wiesmann A** (2003) Interferometric Point Target Analysis for Deformation Mapping. *2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 21-25 Temmuz 2003, Toulouse, Fransa, IEEE, ISBN: 0-7803-7929-2, 7: 4362-4364.
- Xu Q, Guo C, Dong X, Li W, Lu H, Fu H and Liu X** (2021) Mapping and Characterizing Displacements of Landslides with inSAR and Airborne LiDAR technologies: A case study of Danba county, southwest China. *Remote Sensing*, 13(21).
- Yonezawa C, Watanabe M and Saito G** (2012). Polarimetric Decomposition Analysis of ALOS PALSAR Observation Data before and after a Landslide Event. *Remote Sensing*, 4(8): 2314–2328.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Zebker H A and Goldstein R M** (1986) Topographic Mapping from Interferometric Synthetic Aperture Radar Observation. *Journal of Geophysical Research*, 91: 4993-4999.
- Zebker H A, Rosen P A and Hensley S** (1997) Atmospheric Effects in Interferometric Synthetic Aperture Radar Surface Deformation and Topographic Maps. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B4): 7547-7563.
- Zhang Y, Liu Y, Jin M, Jing Y, Liu Y, Liu Y, Sun W, Wei J and Chen Y** (2019) Monitoring Land Subsidence in Wuhan City (China) Using the SBAS-INSAR Method with Radarsat-2 Imagery Data. *Sensors (Switzerland)*, 19(3).
- Zhao C, Ying Z Q, Yang C and Zou W** (2011) Integration of MODIS Data and Short Baseline Subset (SBAS) Technique for Land Subsidence Monitoring in Datong, China. *Journal of Geodynamics*, 52(1):16–23.
- Zhao Q, Lin, H, Gao W, Zebker H A, Chen A and Yeung K** (2011) InSAR Detection of Residual Settlement of an Ocean Reclamation Engineering Project: A Case Study of Hong Kong International Airport. *Journal of Oceanography*, 67(4): 415-426.

EK AÇIKLAMALAR

EK A: Çizelgeler

Çizelge A.1 Veri kümesinin master görüntü seçiminde dikkat edilen parametre bilgileri.

Görüntü	Dik Baz Uzunluk (m)	Zamansal Uzunluk (gün)	Coherence	Yükseklik Belirsizliği (m)	Doppler Farkı (Hz)
S1A_IW_SLC__1SDV_20200929T033444_20200929T033511_034568_040627_1AED	0	0	1	∞	0
S1A_IW_SLC__1SDV_20171202T033424_20171202T033451_019518_021202_789C	-1.72	1032	0.06	10425.37	2.39
S1A_IW_SLC__1SDV_20171214T033423_20171214T033451_019693_02177B_DF4B	-17.28	1020	0.07	1035.44	-2.47
S1A_IW_SLC__1SDV_20171226T033423_20171226T033450_019868_021CE5_03F9	-70.71	1008	0.07	253.03	-1.09
S1A_IW_SLC__1SDV_20180107T033422_20180107T033449_020043_022267_1DBE	-18.65	996	0.09	959.58	-5.59
S1A_IW_SLC__1SDV_20180119T033422_20180119T033449_020218_0227F7_18FA	64.59	984	0.1	-277.04	-1.15
S1A_IW_SLC__1SDV_20180131T033422_20180131T033449_020393_022D87_1A53	22.43	972	0.11	-797.91	-1.26
S1A_IW_SLC__1SDV_20180212T033422_20180212T033449_020568_023323_9FBC	29.76	960	0.12	-601.2	-5.25

Çizelge A.1 (devam ediyor)

S1A_IW_SLC__1SDV_ 20180224T033421_2018 0224T033448_020743_0 238B9_D909	-82.8	948	0.12	216.11	0.2
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20180308T033421_2018 0308T033448_020918_0 23E3A_BB37	-119.23	936	0.13	150.07	0.76
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20180320T033421_2018 0320T033448_021093_0 243C8_8142	-51.45	924	0.15	347.76	0.14
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20180401T033422_2018 0401T033449_021268_0 24950_D980	8.41	912	0.17	-2126.49	-0.44
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20180413T033422_2018 0413T033449_021443_0 24EC5_B2DE	-15.31	900	0.18	1168.35	-1.57
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20180425T033423_2018 0425T033450_021618_0 25439_3371	-58.92	888	0.18	303.71	-1.05
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20180507T033423_2018 0507T033450_021793_0 259C6_DDD0	-51.33	876	0.19	348.6	-3.4
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20180519T033424_2018 0519T033451_021968_0 25F59_E715	-36.79	864	0.2	486.37	-2.04
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20180531T033424_2018 0531T033452_022143_0 264FB_0FAB	-63.58	852	0.21	281.43	-1.63
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20180612T033425_2018 0612T033453_022318_0 26A6D_C8FC	29.33	840	0.23	-610.04	-0.36
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20180624T033426_2018 0624T033453_022493_0 26FA9_776F	-9.74	828	0.24	1837.93	-1.95

Çizelge A.1 (devam ediyor)

S1A_IW_SLC__1SDV_ 20180718T033428_2018 0718T033455_022843	-59.25	804	0.25	302.02	-0.28
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20180730T033428_2018 0730T033455_023018_0 27FA3_F2F4	-64.84	792	0.26	275.96	-3.74
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20180811T033429_2018 0811T033456_023193_0 28523_3057	14.86	780	0.28	-1204.28	1.71
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20180823T033429_2018 0823T033457_023368_0 28ACB_625F	-75.57	768	0.28	236.78	1.17
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20180916T033431_2018 0916T033458_023718_0 295F7_0E2A	-36.22	744	0.31	494.07	-1.48
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20180928T033431_2018 0928T033458_023893_0 29BA6_B1E7	-7.97	732	0.33	2246.39	-4.59
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20181010T033431_2018 1010T033458_024068_0 2A166_D7DB	19.62	720	0.34	-912	-4.65
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20181022T033431_2018 1022T033458_024243_0 2A717_9564	4.84	708	0.35	-3699.34	-1.96
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20181127T033430_2018 1127T033458_024768_0 2B9C7_89F4	-10.74	672	0.38	1665.44	-0.91
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20181209T033430_2018 1209T033457_024943_0 2BF9D_4241	42.17	660	0.38	-424.33	0.25
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20181221T033430_2018 1221T033457_025118_0 2C5F2_4B02	14.69	648	0.4	-1217.87	-1.64

Çizelge A.1 (devam ediyor)

S1A_IW_SLC__1SDV_ 20190114T033429_2019 0114T033456_025468_0 2D28C_3D6B	-43.84	624	0.41	408.13	-0.98
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20190126T033429_2019 0126T033456_025643	41.85	612	0.43	-427.59	-0.21
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20190207T033428_2019 0207T033455_025818_0 2DF3B_9DDC	-2.46	600	0.45	7280	-0.15
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20190219T033428_2019 0219T033455_025993_0 2E57A_0A60	53.36	588	0.44	-335.31	-2.36
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20190303T033428_2019 0303T033455_026168_0 2EBC0_8DA5	68.37	576	0.45	-261.72	-1.82
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20190315T033428_2019 0315T033455_026343_0 2F229_35D2	-73.6	564	0.45	243.11	1.84
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20190327T033428_2019 0327T033455_026518_0 2F893_10AE	-34.24	552	0.48	522.58	-0.93
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20190408T033428_2019 0408T033455_026693_0 2FF08_7CCD	-2.33	540	0.51	7688.74	-1.94
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20190420T033429_2019 0420T033456_026868_0 3055C_1A32	72.98	528	0.49	-245.19	1.37
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20190514T033430_2019 0514T033457_027218_0 3118D_1833	-31.87	504	0.52	561.45	-1.86
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20190526T033430_2019 0526T033458_027393_0 31706_1A65	-23.72	492	0.54	754.29	-1.26

Çizelge A.1 (devam ediyor)

S1A_IW_SLC__1SDV_ 20190607T033431_2019 0607T033458_027568_0 31C6B_5B8D	-62.53	480	0.53	286.14	-3.45
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20190619T033432_2019 0619T033459_027743_0 321AE_D3DF	-38.75	468	0.55	461.78	-4.12
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20190701T033432_2019 0701T033500_027918_0 326E9_DA83	28.45	456	0.57	-628.95	-1.6
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20190713T033433_2019 0713T033500_028093_0 32C37_C498	-25.93	444	0.58	689.97	-2.69
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20190725T033434_2019 0725T033501_028268_0 3317E_EACD	-62.72	432	0.57	285.3	-4.68
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20190806T033435_2019 0806T033502_028443_0 336DB_939A	-50.24	420	0.59	356.12	-0.82
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20190818T033436_2019 0818T033503_028618_0 33CCF_F0C7	43.01	408	0.6	-416.05	-4.76
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20190830T033436_2019 0830T033503_028793_0 342F2_B43F	15.13	396	0.63	-1182.33	2.15
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20190911T033437_2019 0911T033504_028968_0 34906_ADEA	-47.34	384	0.62	377.99	-1.94
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20190923T033437_2019 0923T033504_029143_0 34EFF_52D9	10.56	372	0.65	-1694.36	3.83
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20191005T033438_2019 1005T033505_029318_0 35507_5355	19.01	360	0.66	-941.38	-2.24

Çizelge A.1 (devam ediyor)

S1A_IW_SLC__1SDV_ 20191017T033437_2019 1017T033505_029493_0 35B12_2DDF	-21.5	348	0.67	832.17	-1.79
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20191029T033432_2019 1029T033459_029668_0 36124_81D0	10.37	336	0.69	-1725.14	-0.1
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20191110T033438_2019 1110T033505_029843_0 36747_7478	16.53	324	0.69	-1082.27	-1.39
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20191122T033437_2019 1122T033504_030018_0 36D54_265B	-21.4	312	0.7	836.28	1.4
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20191204T033437_2019 1204T033504_030193_0 37365_C713	-28.88	300	0.71	619.6	4.3
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20191216T033436_2019 1216T033503_030368_0 37971_6C7B	41.97	288	0.71	-426.37	1.44
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20191228T033436_2019 1228T033503_030543_0 37F75_29DB	88.01	276	0.69	-203.31	2.93
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20200109T033435_2020 0109T033502_030718_0 38585_5E67	52	264	0.72	-344.09	2.05
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20200121T033435_2020 0121T033502_030893_0 38BAC_C5E5	-9.25	252	0.76	1934.86	0.68
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20200202T033435_2020 0202T033502_031068_0 391C6_F8A7	-32.84	240	0.76	544.93	-1.77
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20200214T033434_2020 0214T033501_031243_0 397D8_EADE	-39.04	228	0.76	458.29	2.22

Çizelge A.1 (devam ediyor)

S1A_IW_SLC__1SDV_ 20200226T033434_2020 0226T033501_031418_0 39DDF_EE0B	-26.5	216	0.78	675.33	-3.24
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20200309T033434_2020 0309T033501_031593_0 3A3F2_6EC7	92.09	204	0.75	-194.31	-0.84
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20200321T033434_2020 0321T033501_031768_0 3AA12_A4C6	39.84	192	0.79	-449.11	4.28
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20200402T033435_2020 0402T033502_031943_0 3B03E_3D3E	-60.65	180	0.79	295.01	-3.69
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20200414T033435_2020 0414T033502_032118_0 3B667_F925	-73.54	168	0.79	243.31	2.07
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20200426T033435_2020 0426T033502_032293_0 3BC87_4E28	-4.21	156	0.85	4248.21	-2.69
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20200508T033436_2020 0508T033503_032468_0 3C28F_6C5F	-44.15	144	0.84	405.26	-1.6
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20200520T033437_2020 0520T033504_032643_0 3C7E0_376A	10.5	132	0.87	-1704.04	0.31
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20200601T033437_2020 0601T033504_032818_0 3CD26_6356	-73.45	120	0.84	243.6	0.06
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20200613T033438_2020 0613T033505_032993_0 3D257_70C2	-35.85	108	0.87	499.14	-0.59
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20200625T033439_2020 0625T033506_033168_0 3D7A6_3753	-33.65	96	0.89	531.76	-2.67

Çizelge A.1 (devam ediyor)

S1A_IW_SLC__1SDV_ 20200707T033439_2020 0707T033506_033343_0 3DCF8_F239	-44.03	84	0.89	406.42	-3.86
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20200731T033441_2020 0731T033508_033693_0 3E7B2_A988	52.55	60	0.9	-340.47	2.32
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20200812T033442_2020 0812T033509_033868_0 3ED7E_810C	-42.01	48	0.92	425.91	-2.48
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20200824T033442_2020 0824T033509_034043_0 3F3A9_E4ED	-30.6	36	0.94	584.66	-2.32
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20200905T033443_2020 0905T033510_034218_0 3F9D0_9887	12.61	24	0.97	-1418.68	-0.65
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20200917T033443_2020 0917T033510_034393_0 3FFEF_CB48	26.01	12	0.96	-688.06	-5.14
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20201011T033444_2020 1011T033511_034743_0 40C47_E06D	27.38	-12	0.96	-653.55	-2.54
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20201023T033444_2020 1023T033511_034918_0 41259_0548	-39.42	-24	0.94	453.96	-1.67
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20201104T033444_2020 1104T033511_035093_0 4185E_51B9	37.37	-36	0.93	-478.84	-3.21
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20201116T033444_2020 1116T033511_035268_0 41E74_ED56	49.62	-48	0.92	-360.62	-0.85
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20201128T033443_2020 1128T033510_035443_0 4248A_A561	-31	-60	0.92	577.15	-1.12

Çizelge A.1 (devam ediyor)

S1A_IW_SLC__1SDV_ 20201210T033443_2020 1210T033510_035618_0 42A8F_1095	-28.65	-72	0.91	624.58	-2.99
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20201222T033442_2020 1222T033509_035793_0 43095_E06D	-22.34	-84	0.91	801	0.61
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20210103T033442_2021 0103T033509_035968_0 436AA_3F14	36.73	-96	0.88	-487.1	1.73
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20210115T033441_2021 0115T033508_036143_0 43CCE_5D8D	62.32	-108	0.85	-287.13	0.37
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20210127T033441_2021 0127T033508_036318_0 442E6_4CCB	74.35	-120	0.84	-240.67	-0.29
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20210208T033440_2021 0208T033507_036493_0 448F3_9DC5	37	-132	0.85	-483.59	-0.07
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20210220T033440_2021 0220T033507_036668_0 44F10_AFED	-80.27	-144	0.81	222.91	-4.7
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20210304T033440_2021 0304T033507_036843_0 45519_A392	-97.7	-156	0.79	183.15	0.36
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20210316T033440_2021 0316T033507_037018_0 45B3E_1A8D	-39.86	-168	0.82	448.94	2.19
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20210328T033440_2021 0328T033507_037193_0 46148_8BD1	25.19	-180	0.82	-710.34	-0.35
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20210409T033441_2021 0409T033508_037368_0 46752_90DC	-9.23	-192	0.82	1938.05	2.23

Çizelge A.1 (devam ediyor)

S1A_IW_SLC__1SDV_ 20210421T033441_2021 0421T033508_037543_0 46D66_4D67	-74.85	-204	0.76	239.04	-1.79
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20210503T033442_2021 0503T033509_037718_0 4737A_0A68	-103.57	-216	0.73	172.76	-3.3
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20210515T033442_2021 0515T033509_037893_0 478E1_DBED	-16.38	-228	0.78	1092.16	-2.28
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20210527T033443_2021 0527T033510_038068_0 47E2B_A9A0	37.79	-240	0.75	-473.47	-3.75
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20210608T033444_2021 0608T033511_038243_0 4835C_CDC7	15.92	-252	0.76	-1124.12	-1.36
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20210620T033444_2021 0620T033512_038418_0 48892_F976	-17.23	-264	0.74	1038.59	-7.3
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20210702T033445_2021 0702T033512_038593_0 48DCD_D57D	-38.28	-276	0.72	467.41	-2.16
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20210714T033446_2021 0714T033513_038768_0 4931C_08C2	-22.43	-288	0.72	797.8	-2.77
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20210726T033446_2021 0726T033513_038943_0 49859_C2BC	-94.46	-300	0.67	189.43	-0.97
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20210807T033447_2021 0807T033514_039118_0 49DC9_6232	21.23	-312	0.7	-843.02	0.64
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20210819T033448_2021 0819T033515_039293_0 4A3D3_BDEE	6.23	-324	0.7	-2870.04	-5.43

Çizelge A.1 (devam ediyor)

S1A_IW_SLC__1SDV_ 20210831T033448_2021 0831T033515_039468_0 4A9CB_E34F	-73.42	-336	0.65	243.71	3.64
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20210912T033449_2021 0912T033516_039643_0 4AFDE_21F1	-24.92	-348	0.67	718.04	2.83
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20210924T033449_2021 0924T033516_039818_0 4B5BF_859D	12.87	-360	0.66	-1390.51	0.71
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20211006T033450_2021 1006T033517_039993_0 4BBDA_EBB2	13.29	-372	0.65	-1346.45	-1.76
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20211018T033450_2021 1018T033517_040168_0 4C1EF_29FB	24.31	-384	0.64	-736.18	-1.11
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20211030T033450_2021 1030T033517_040343_0 4C801_4F2E	-86.14	-396	0.59	207.73	1.54
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20211111T033449_2021 1111T033516_040518_0 4CE1B_5FC3	-39.66	-408	0.61	451.15	-3.75
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20211123T033449_2021 1123T033516_040693_0 4D424_B824	86.97	-420	0.57	-205.73	0.61
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20211205T033449_2021 1205T033516_040868_0 4DA40_85F2	62.53	-432	0.57	-286.13	2.72
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20211217T033448_2021 1217T033515_041043_0 4E032_4131	54.03	-444	0.57	-331.17	-5.92
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20211229T033447_2021 1229T033514_041218_0 4E602_5558	-68.97	-456	0.55	259.44	7.23

Çizelge A.1 (devam ediyor)

S1A_IW_SLC__1SDV_ 20220110T033447_2022 0110T033514_041393_0 4EBEC_D57D	-18.68	-468	0.56	957.64	3.08
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20220122T033446_2022 0122T033513_041568_0 4F1AD_29A4	20.96	-480	0.55	-853.76	-0.23
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20220203T033446_2022 0203T033513_041743_0 4F79B_7B8F	-31.84	-492	0.54	562.05	-0.43
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20220215T033446_2022 0215T033513_041918_0 4FDC2_5D90	26.49	-504	0.53	-675.45	-4.56
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20220227T033446_2022 0227T033513_042093_0 503C8_8F48	11.55	-516	0.52	-1549.08	-3.5
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20220311T033446_2022 0311T033513_042268_0 509B7_5597	-71.52	-528	0.49	250.19	0.71
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20220323T033446_2022 0323T033513_042443_0 50FAE_1F0D	-15.46	-540	0.5	1157.52	1.12
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20220404T033446_2022 0404T033513_042618_0 515A0_F790	28.56	-552	0.48	-626.58	-0.06
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20220416T033446_2022 0416T033513_042793_0 51B85_3854	9.03	-564	0.48	-1981.82	-1.47
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20220428T033447_2022 0428T033514_042968_0 5213B_557B	2.44	-576	0.47	-7343.28	-2.88
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20220510T033448_2022 0510T033515_043143_0 52712_916F	-66.97	-588	0.44	267.19	-1.27

Çizelge A.1 (devam ediyor)

S1A_IW_SLC__1SDV_ 20220522T033448_2022 0522T033515_043318_0 52C48_2A8B	-115.54	-600	0.41	154.87	1.22
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20220603T033450_2022 0603T033517_043493_0 5316E_108D	19.47	-612	0.43	-919.12	-2.22
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20220615T033450_2022 0615T033517_043668_0 536A9_082F	-18.98	-624	0.42	942.5	-0.43
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20220627T033451_2022 0627T033518_043843_0 53BEA_567C	78.57	-636	0.39	-227.72	-1.06
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20220709T033452_2022 0709T033519_044018_0 54118_7278	19.28	-648	0.4	-928.1	-3.5
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20220721T033452_2022 0721T033519_044193_0 54659_CE57	-58.99	-660	0.38	303.33	-7.78
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20220802T033453_2022 0802T033520_044368_0 54B80_E7FF	9.45	-672	0.38	-1893.37	-4.2
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20220814T033454_2022 0814T033521_044543_0 550F1_3F47	18.65	-684	0.37	-959.32	-1.05
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20220826T033454_2022 0826T033521_044718_0 556D6_B0C6	18.34	-696	0.36	-975.51	0.65
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20220907T033455_2022 0907T033522_044893_0 55CBE_5105	77.28	-708	0.33	-231.55	-1.12
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20220919T033455_2022 0919T033522_045068_0 562A3_C35F	-147.53	-720	0.3	121.29	4.03

Çizelge A.1 (devam ediyor)

S1A_IW_SLC__1SDV_ 20221001T033456_2022 1001T033523_045243_0 5687F_B554	23.22	-732	0.32	-770.59	-2.12
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20221013T033455_2022 1013T033522_045418_0 56E5E_C02D	-81.09	-744	0.3	220.66	-6.74
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20221025T033456_2022 1025T033523_045593_0 5738F_8F7A	68.69	-756	0.29	-260.49	1.08
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20221106T033455_2022 1106T033522_045768_0 5797A_032B	-53.53	-768	0.29	334.25	-0.53
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20221118T033455_2022 1118T033522_045943_0 57F5F_FF62	-39.73	-780	0.28	450.32	1.15
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20221130T033455_2022 1130T033522_046118_0 58552_E326	-14.74	-792	0.27	1213.57	2.3
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20221212T033454_2022 1212T033521_046293_0 58B47_7B28	86.89	-804	0.25	-205.93	-4.48
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20221224T033454_2022 1224T033521_046468_0 59144_9E98	68.27	-816	0.24	-262.1	3.56
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20230105T033453_2023 0105T033520_046643_0 5972C_417C	-2.03	-828	0.24	8814.86	-1.02
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20230117T033452_2023 0117T033519_046818_0 59D16_B96A	-188.94	-840	0.2	94.71	-1.2
S1A_IW_SLC__1SDV_ 20230129T033452_2023 0129T033519_046993_0 5A2FE_BE0B	57.37	-852	0.21	-311.87	3.76

Ek B: Şekiller



Şekil B.1 Faz açma işlemi uygulanmış interferogram örneği.



ÖZGEÇMİŞ

Mahmut GÖRKEN, ilk ve ortaokul eğitimini Tarsus Fevzi Çakmak İlkokulu'nda aldı. Tarsus Ayhan Bozpınar Anadolu Lisesi'nden 2009 yılında mezun olarak lise eğitimini tamamladı. 2010 yılında başladığı Düzce Üniversitesi Kaynaşlı Meslek Yüksekokulu Mimarlık ve Şehir Plamlama Bölümü Harita ve Kadastro programından 2012 yılında mezun oldu. 2012 yılında başladığı Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Geomatik Mühendisliği bölümünü 2015 yılında başarı ile tamamladı. Aynı yıl Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda lisansüstü eğitime başladı. 2017 yılında Geomatik Mühendiliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2019 yılında Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora eğitime başladı. 2018 yılından beri Yozgat Bozok Üniversitesi Şefaati Meslek Yüksekokulu Mimarlık ve Şehir Planlama bölümünde öğretim görevlisi olarak görev yapmaktadır.