



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI YERYÜZÜ ÖZELLİKLERİNDE İLERİ INSAR TEKNİKLERİ KULLANILARAK YÜZEY DEFORMASYONLARININ BELİRLENMESİ

Fatma CANASLAN ÇOMUT

DOKTORA TEZİ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2016
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

DOKTORA TEZİ

FARKLI YERYÜZÜ ÖZELLİKLERİNDE İLERİ INSAR TEKNİKLERİ KULLANILARAK YÜZEY DEFORMASYONLARININ BELİRLENMESİ

Fatma CANASLAN ÇOMUT

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Aydın ÜSTÜN

2016, 187 Sayfa

Jüri
Doç. Dr. Aydın ÜSTÜN
Prof. Dr. Cevat İNAL
Prof. Dr. Adnan ÖZDEMİR
Doç. Dr. İhsan ÖZKAN
Doç. Dr. Ekrem TUŞAT

Bu çalışma Konya Kapalı Havzası'nda oluşan çökmelerin ve Denizli İli Babadağ İlçesi'nde gerçekleşen heyelanların İleri InSAR teknikleri yardımıyla belirlenmesi için gerekli yöntem ve deformasyon türlerinin anlatıldığı bir doktora tez çalışmasıdır. Çalışmada çoklu band (L-Band, C-Band, X-band) uydu sensörleri kullanılarak, farklı yüzey karakteristikleri ve farklı deformasyon türleri için seçilen ileri InSAR yöntemlerinin uygunluğu araştırılmaktadır.

Doktora tez çalışması kapsamında, uygulama verilerinin işlenme süreçlerine yer verilerek, uygulamada karşılaşılan problemlere çözüm aranmış ve bu amaçla çeşitli yöntemler denenerek görüntü işlemeye yönelik sorunların çözümü yoluna gidilmiştir. Zemin ve deformasyon karakteristiğinin yöntem seçiminde etkisinin yüksek olması sebebiyle, Konya Kapalı Havzası için zemin özellikleri ve yüzey yansıma karakterleri dikkate alınarak, uygun ileri InSAR teknikleri seçilmiştir. Bu amaçla, yansıma özelliği yüksek olan kaya bloklarının oldukça fazla gözlemlendiği yüksek kotlu dağlık bölgeler ve yüksek katlı ve düzlemsel olarak inşa edilmiş çatılara sahip yapıların bulunduğu kent merkezleri için PSInSAR tekniğinden, yansıma özelliği sürekli ve benzer karakteristikte olan kırsal ve ekili alanlar için ise Kısa baz uzunluk yöntemlerine dayalı SBAS ve Quasi-PS yöntemlerinden yararlanılmıştır. Aynı zamanda optimal geometrik ve zamansal baz uzunluk değerlerine sahip SAR verileri kullanılarak Havza genelinde DInSAR uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Babadağ heyelanlarının gözlemlenebilmesi için, yapılaşmanın seyrek olduğu çevre alanların görüntülenebilmesi amacıyla Quasi-PS tekniği kullanılmış, ancak yansıma değerleri Konya örneğinde olduğu gibi yüksek olan yapılaşmış alanlar için PSInSAR tekniklerinden yararlanılmıştır. Bu yolla sonuçların güvenilirliği arttırılmıştır.

Havza genelinde 1990 yılından 2015 yılına kadar belirli periyotlar ile elde edilen Envisat ASAR, ERS-2, ALOS PALSAR, CosmoSkyMed ve Sentinel-1 uydu verilerinden oluşan toplam 167 adet SAR görüntüsü ile Konya Kent Merkezi ve çevresinde özellikle son bir yılda 30 - 60 mm/yıl oranına varan çökme tespit edilmiştir. Kırsal alanlarda bu değer yılda yer yer 10 - 25 mm civarındadır. Tarihsel gelişim göz önünde bulundurulduğunda genel anlamda; 1995-2000 yılları arasında geçen sürede yerdeğiştirme yaklaşık 15 mm/yıl, 2002 - 2010 yılları arasında yaklaşık 30 mm/yıl, 2014 - 2015 arasında 50 mm/yıl olarak belirlenmiştir. Tarihsel süreçte deformasyon oranında görülen artışın nedenleri arasında havzanın jeolojik yapısı ile birlikte yeraltı sularının özellikle son dönemlerdeki aşırı kullanımı yer almaktadır.

Babadağ Bölgesi heyelanının zamansal ve konumsal olarak gözlemlendiği ve haritalandığı çalışma için ise, 2002-2008 yılları arasında geçen 6 yıllık sürede Envisat ASAR ve ALOS PALSAR uydu verilerinden elde edilen toplam 27 adet SAR görüntüsü yardımıyla topoğrafik kitlelerin 300 mm oranında yer değiştirdiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca Eylül 2015- Mart 2016 tarihleri arasında edinilen sadece 12 adet Sentinel-1 verisi ile de radarın bakış yönünde (LOS) 100 mm oranına varan kütle hareketinin halen varlığını sürdürdüğü PSInSAR çalışması sınucunda belirlenmiştir.

Böylelikle, doktora tez çalışmasının ana hedefi kapsamında, çökme ve heyelanlar için elde edilen sonuçlar, InSAR tekniklerinin hem farklı yüzey karakteristiklerindeki hem de farklı deformasyon türlerindeki kabiliyetini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Çoklu bant sensörleri, çökme, DInSAR, heyelan, PSInSAR zaman serileri.

ABSTRACT

Ph.D THESIS

DETECTING OF SURFACE DEFORMATIONS ON DIFFERENT GROUND CHARACTERISTICS USING ADVANCED INSAR TECHNIQUES

Fatma CANASLAN ÇOMUT

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN GEOMATICS ENGINEERING

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Aydın ÜSTÜN

2016, 187 Pages

Jury
Assoc. Prof. Dr. Aydın ÜSTÜN
Prof. Dr. Cevat İNAL
Prof. Dr. Adnan ÖZDEMİR
Assoc. Prof. Dr. İhsan ÖZKAN
Assoc. Prof. Dr. Ekrem TUŞAT

This study describes required approaches for determining deformation types that is needed for subsidence monitoring over Konya Closed Basin and for determination of landslides over Denizli – Babadağ county using advanced InSAR techniques. Compatibility of selected advanced InSAR method is being investigated for different surface characteristics and different nature of deformation by means of Multi-band (L-band, C-band, and X-band) satellite sensors.

In the scope of this dissertation; data processing steps are described, solutions of encountered problems are sought and various InSAR methods for solving the problems related to image processing are tried out. Due to the high impact of the selection of an appropriate method for ground and deformation characteristics, appropriate advanced InSAR techniques are chosen taking into account the soil and surface reflection characters of the Konya Closed Basin. For this purpose, PSInSAR methods were utilized for the areas having strong reflection features that were found in high elevation mountainous fields (i.e. covered by high rock blocks) and city centers (especially including high-floor buildings with the flat roof). On the other hand, SBAS and Quasi-PS methods based on small baseline algorithms were used for the areas with permanent and similar reflection characteristics such as rural and vegetated areas. Special SAR data having optimal geometric and temporal baseline characteristics were processed using DInSAR applications over whole Basin. In order to observe the Babadag landslide, Quasi-PS technique was used for the purpose of evaluation of movements at city center surrounded by vegetated areas, but for strong reflected fields such as high built-up structures as it is in Konya, the PSInSAR technique was used. In this way the reliability of the results was increased.

Between years from 1990 to 2015 by certain periods, thanks to 167 SAR images from Envisat ASAR, ERS-2, ALOS PALSAR, Cosmo SkyMed and Sentinel-1 satellite data, the amount of subsidence has been identified especially in last years which is in the rate of up to around 30 – 60 mm/yr over Konya City Center and its surrondings. In rural areas these values are approximately 10 - 25 mm within one year. Considering the historical development in general; displacement rates in the period between 1995-2000 is about 15 mm/yr, between 2002 - 2010 is about 30 mm/yr and from 2014 to 2015 amount of the displacement was determined around 50 mm/yr. During historical period, the geological structure of the

basin and excessive use of groundwater especially in this last term are reasons for the increase rate of deformation.

In the interest of Babadağ Region Landslide Mapping Study, which is observed by spatial and temporal aspect, in the last 6 years between from 2002 to 2008, a total of 27 Envisat ASAR and ALOS PALSAR SAR images were processed and as conclusion, the displacement of topographical masses was identified up to around 300 mm. Also with only 12 Sentinel-1 images used from September 2015 – March 2016, the PSInSAR processing allowed detection of movement in the rate of almost 100 mm/year in the satellite line-of-sight (LOS), and it can be clearly said that the mass movement in study area is still continuing.

Within the scope of the main objectives of this PhD thesis, significant deformation results for subsidence and landslides have demonstrated the capability of InSAR technique for usage in both types of a different deformation type and different surface characteristics.

Keywords: DInSAR, land subsidence, landslides, multiband sensors, PSInSAR Time Series.

ÖNSÖZ

Bu tez, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ndeki doktora eğitimim süresince çalıştığım ileri InSAR teknikleri hakkında öğrendiklerimi özetler niteliktedir. Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde birçok projeden destek alınmıştır. Envisat ASAR, ERS ve ALOS PALSAR görüntüleri Konya için 2853 ve Babadağ için 14218 numaralı (Category-1) projeleri kapsamında, Sentinel-1 verileri ise ücretsiz olarak Avrupa Uzay Ajansı'ndan (ESA) temin edilmiştir. CosmoSkyMed görüntüleri, 248 numaralı proje ile İtalyan Uzay Ajansı (ASI)'ndan elde edilmiştir. Yüksek dosya boyutuna sahip Sentinel-1 görüntüleri ise DD-16-3 numaralı ITI4InSAR projesi kapsamında VSB Teknik Üniversitesi Süper Bilgisayar Labrotuvarına erişim sağlanarak işlenmiştir. Ayrıca bu tez 110Y121 proje numarası ile TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Sağladıkları destekten ötürü tüm proje ortaklarına teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, değerli bilgilerini bizlerle paylaşan, kullandığı her kelimenin hayatıma kattığı önemini asla unutmayacağım saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Aydın Üstün'e sonsuz şükranlarımı sunarım. Tezi değerlendirmeleri ve katkılarından dolayı Tez Jüri Üyelerim; Prof. Dr. Cevat İNAL, Prof. Dr. Adnan ÖZDEMİR, Doç. Dr. İhsan ÖZKAN ve Doç. Dr. Ekrem TUŞAT'a teşekkür ederim. Çalışmam boyunca benden bir an olsun yardımlarını esirgemeyen sevgili arkadaşlarım Yüksek Mühendis Sefa Yalvaç'a, Dr. Milan Lazecky'e, Dr. Joaquim J. Sousa'ya ve Dr. Matus Bakon'a; SarProz yazılımı için demo versiyonunu ücretsiz kullanıma açan Prof. Dr. Daniele Perrisin'e ve StaMPS yazılımı için Prof. Dr. Andrew Hooper'a teşekkürü bir borç bilirim.

Denizli AFAD'ta çalışan mühendis arkadaşlarım başta olmak üzere tüm mesai arkadaşlarıma destekleri için teşekkür ederim. Çalışmam süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen ve hayatımın her evresinde bana destek olan çok değerli babam Hasan Canaslan, annem Şahsenem Canaslan, ablam Ümran Canaslan'a ve sevgisi ile beni her an yüreklendiren sevgili eşim Ali Çomut'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Fatma CANASLAN ÇOMUT
KONYA- 2016

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **vi**

ÖNSÖZ ..... **viii**

İÇİNDEKİLER ..... **ix**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **xi**

1. GİRİŞ **1**

1.1. InSAR Uygulamaları ve Yüzey Deformasyonları 1
1.1.1. InSAR Tekniği 2
1.1.2. DInSAR - Diferansiyel InSAR Tekniği 2
1.1.3. PSInSAR - Persistent Scatterers InSAR (Daimi Yansıtıcı InSAR) Tekniği 3
1.1.4. İleri InSAR Teknikleri ile Gerçekleştirilen Çalışmalara Genel Bakış 4
1.2. Uygulama Bölgesi 10
1.2.1. Konya Kapalı Havzası (KKH) 10
1.2.2. Denizli İli Babadağ İlçesi 11
1.3. Tez Çalışmasının Amacı 12
1.3.1. Tez Bölümlerinin İçeriği 14

2. SAR TEKNOLOJISI VE TEMEL PRENSIPLERI **16**

2.1. Radar Görüntüleri ve Polarizasyon Çeşitleri 18
2.2. SAR Sistemlerinin Çalışma Prensipleri 20
2.3. İnterferometrenin Uygulanabilmesi için Gerekli Koşullar 21
2.3.1. İnterferometrik Faz 23
2.3.2. Baz (Baseline) Kavramı 26
2.3.3. Seçilen Sayısal Yükseklik Modelinin Sonuç İnterferograma Etkisi 28
2.3.4. Yükseklik Belirsizliği ve Baz Uzunluğu Değerleri İle İlişkisi 31
2.3.5. Faz Çözümleme 34
2.4. SAR Uygulamalarını Etkileyen Problemler 36
2.4.1. Geometrik Bozukluk Çeşitleri 36
2.4.2. Artan ve Azalan Geçiş 39
2.4.3. Karmaşık SAR Görüntüleri 41
2.5. Temel SAR Platformları ve Özellikleri 41
2.6. InSAR Uygulamalarında Kullanılan Yazılımlar ve Özellikleri 43
2.7. InSAR Veri İşleme Adımları 45

3. ÇOKLU İNTERFEROMETRE ve PSInSAR TEKNİĞİ **50**

3.1. PSInSAR Tekniğinin Temelleri 50
3.2. Matematiksel Esaslar 51
3.3. PSInSAR Tekniğinde Kullanılan Veriler ve PS Ölçüm Duyarlılığı 55
3.4. PSInSAR Tekniğinde Farklı Yaklaşımlar ve İşleme Adımları 57
3.5. PSInSAR Tekniğinin DInSAR'dan Olan Farklılıkları 64

4. KONYA KAPALI HAVZASI'NDA ZEMİN ÇÖKMELERİNİN İLERİ INSAR TEKNİKLERİ İLE BELİRLENMESİ.....66

4.1. Konya Kapalı Havzası ve Özellikleri 66
4.2. Yeraltı Sularının Çekilmesi ve Sonucu: Çökme.....68
4.3. Çalışma Alanının Sınıflandırılması ve Buna Uygun Olarak Seçilen Yöntemler .71
4.4. Kullanılan Veriler 73
4.5. Havza Genelinde DInSAR Tekniği ile Yüzey Deformasyonu Araştırması.....76
4.6. Yerleşim Alanlarında İleri InSAR Uygulamaları.....81
4.6.1. Konya Kent Merkezinde Yapılan Çalışmalar.....82
4.6.2. Karaman Kent Merkezinde Yapılan Çalışmalar.....121
4.7. Kırsal Alanlarda İleri InSAR Uygulamaları 124
4.7.1. StaMPS ile gerçekleştirilen ERS çalışmaları 125
4.7.2. StaMPS ile Gerçekleştirilen Envisat Çalışmaları 129
4.7.3. StaMPS Sonuçlarının GPS Sonuçları ile Karşılaştırılması: Küçükköy Örneği 139
4.7.4. ALOS PALSAR Verileri ile Gerçekleştirilen Çalışmalar.....143
4.8. KKH için Genel Değerlendirme 149

5. DENİZLİ BABADAĞ İLÇESİ HEYELAN AFETİNİN İLERİ INSAR TEKNİKLERİ YARDIMIYLA BELİRLENMESİ 153

5.1. Çalışma Alanındaki Geçmiş Çalışmalar 153
5.2. Çalışma Alanı ve Görüntü Seçimi 156
5.3. ALOS PALSAR Uygulaması.....158
5.4. Envisat ASAR Uygulaması.....165
5.5. Sentinel-1 Uygulaması.....169

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 172

6.1. Genel Değerlendirme 175

KAYNAKLAR 177

ÖZGEÇMİŞ.....185

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ρ : Eğik anten-hedef arasındaki eğik uzunluk

c : Işık Hızı

β : radar pulsu sinyal bant genişliği

τ : radar pulsu uzunluğu

Δ_{azi} : Azimut çözünürlüğü

V_{uydu} : Uydu hızı

β_{Dop} : Doppler bant genişliği

φ : İnterfarometrik faz

R_B, $R_İ$: Birincil ve ikincil geçiş için uydu-hedef arasındaki mesafe

λ : Dalga boyu

P : Arazi noktası

B : Baz uzunluğu

$B_{\perp}$: Dik baz uzunluğu

B_t : Zamansal baz uzunluğu

B_{II} : Paralel baz uzunluğu

B_{kr} : Kritik baz uzunluğu

R_r : Nominal piksel çözünürlüğü (Aralıktaki piksel boşluğu)

γ : Uyuşum (coherence) değeri

h : SRTM yüksekliklerinin duyarlılığını belirten yükseklik değeri

θ : Radarın bakış açısı

H_{amb} : Yükseklik belirsizliği

σ : Standart sapma

D_{LOS} : Radarın bakış doğrultusundaki deformasyon

L_a : Radar anteni uzunluğu

H_{UYDU} : Uydu yüksekliği

H_P : P arazi noktasının yüksekliği

y_B, $y_İ$: Genlik ve faz bilgisini içeren birincil ve ikincil bileşenler

ϑ : Yörünge geometrisinden türeyen referans yüzeydeki umulan faz

$\Delta\varphi$: İnterferometrik faz farkı

Kısaltmalar

3D	:	Three-Dimensional
ALOS	:	Advanced Land Observation Satellite
AOE	:	Atmospheric and Orbit Errors
APS	:	Atmospheric Phase Screen
ASAR	:	Advanced Synthetic Aperture Radar
ASI	:	Agenzia Spaziale Italiana (İtalyan Uzay Ajansı)
CBS	:	Coğrafi Bilgi Sistemleri
CHUK	:	The Chinese University of Hong Kong
CONAE	:	Argentina National Space Activities Commission
COSMO/Skymed	:	COnstellation of small Satellites for Mediterranean basin Observation
CSA	:	Canadian Space Agency
CSK	:	CosmoSkyMed
DEM	:	Digital Elevation Model
DePSI	:	Delft PS-InSAR processing package
DInSAR	:	Differential SAR Interferometry
DLR	:	Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt - Alman Ulusal Havacılık ve Uzay Araştırma Merkezi
DORİS	:	Delft Institute of Earth Observation and Space Systems
DS	:	Distributed Scatterer
DSM	:	Digital Surface Model
ENVISAT	:	European Environment Satellite
ERS-1/2	:	European Remote Sensing Satellite- 1/2
ESA	:	European Space Agency
FBS	:	Fine Beam Single Polarization
FM	:	Frekans Modülasyonu
GCP	:	Ground Control Point
GDEM	:	Global Digital Elevation Model
GHz	:	gigahertz
GMT	:	Generic Mapping Tools
GNSS	:	Global Navigation Satellite System
GPS	:	Global Positioning System
HH	:	Transmitting and Receiving Horizontally Polarized Radiation
IAS	:	Integer Ambiguity Search
IDW	:	Inverted Distance Weighting algorithm
IMS	:	Image Mode Single Look Complex
InSAR	:	Interferometric Synthetic Aperture Radar
IP	:	Inverted Parameters

IR	:	Inverted Residuals
IS	:	Image Swath
INTA	:	Instituto Nacional de Tecnica Aerospacial - İspanyol Uzay Ajansı
IW3	:	Interferometric Wide swath 3
JAXA	:	Japan Aerospace Exploration Agency
JERS	:	Japanese Earth Resource Satellite
JPL	:	Jet Propulsion Laboratory
KKH	:	Konya Kapalı Havzası
LOS	:	Line of Sight
MCF	:	Minimum Cost Flow
Mhz	:	megahertz
MST	:	Minimum Spanning Tree
MTI	:	Multitemporal SAR Interferometry
PALSAR	:	Phased Array L-band SAR (ALOS)
PS	:	Persistent Scatterers Pixel
PSC	:	Persistent Scatterer Candidate
PSI	:	Permanent / Persistent Scatterers Technique
PSInSAR	:	Permanent / Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar
QGIS	:	Quantum Geographic Information Systems
QPS (Quasi-PS)	:	Quasi-Permanent Scatterers
RADAR	:	Radio Detection and Ranging
RADARSAT	:	Radio Detection and Ranging Satellite
RAR	:	Real Aperture Radar
RCM	:	RADARSAT Constellation Mission
RF	:	Radyo Frekansı
RMSE	:	Root Mean Square Error
ROI_PAC	:	Repeat Orbit Interferometry PACkage
SAOCOM	:	Satellites for Observation and Communications
SAR	:	Synthetic Aperture Radar
SB	:	Small Baselines
SBAS	:	Small Baseline Subset
SCLA	:	Spatially-Correlated Look Angle Error
SLC	:	Single Look Complex
SqueeSAR	:	Squeeze SAR
SRTM	:	Shuttle Radar Topography Mission
StaMPS	:	Stanford Method for Persistent Scatterers
STBAS	:	Small Temporal Baseline Subset
STUN	:	Spatio-Temporal Unwrapping Network
SYM	:	Sayısal Yükseklik Modeli
TRAIN	:	Toolbox for Reducing Atmospheric InSAR Noise

TSX	:	TerraSAR-X
VV	:	Transmitting and Receiving Vertically Polarized Radiation
WGS84	:	World Geodetic Survey 1984
YAS	:	Yeraltı Suları

1. GİRİŞ

Doğal ve insan kaynaklı bazı olayların bir sonucu olan yüzey değişimlerinin tespiti, incelenmesi ve takip edilmesi amacıyla birçok mühendislik disiplini tarafından farklı ölçme, tespit ve yorumlama yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler bilimsel ve/veya uygulamaya dönük amaçları kapsayacak geniş bir yelpazeye sahiptir. Söz konusu yöntemlerden biri uzaktan algılama çalışmalarıdır. Özellikle son yıllarda yeryuvarının uzaktan algılama yöntemleri ile incelenmesi, uzay teknolojilerinin her geçen gün ilerlemesi ile daha kolay hale gelmiştir. Günümüzde en etkili uzaktan algılama yöntemlerinden biri İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar (Interferometric Synthetic Aperture Radar – InSAR) tekniğidir. Genel tanımıyla SAR veya InSAR teknolojisi uydular üzerinde bulunan radar platformları sayesinde zaman serisi şeklinde alınan verilerin analiz edilmesi temeline dayanmaktadır. Bu yöntemle yeryüzünde meydana gelecek alansal deformasyon miktarları mm-cm/yıl duyarlılığında gözlemlenebilmektedir.

Doktora tez çalışmasının genel anlamda odak noktası, farklı yeryüzü özelliklerinde İleri InSAR Tekniklerini kullanarak yüzey deformasyonlarının belirlenmesidir. Bu kapsamda, çalışma bölgesi olarak çökme ve heyelan oluşumlarının gözlemlendiği iki farklı bölge seçilmiştir. Bu alanlardan ilki; yer altı su seviyelerinin değişimi ve zemin özelliklerine bağlı oluşan çökmelerin gözlendiği, Konya Kent Merkezi ve çevresi olmak üzere Konya Kapalı Havzası (KKH)'dır (Ustun ve ark., 2010). İleri InSAR tekniklerinin farklı alanlarda ve farklı jeolojik oluşumlar üzerinde yer değiştirmelerin görüntülenmesindeki kabiliyetinin ortaya konulması amacıyla seçilen bir diğer bölge, Denizli İli Babadağ İlçesi ve çevresidir. Bu bölgede, aşırı yağışların tetiklediği yüzey su hareketleri ile yer değiştirmeye duyarlı zemin özellikleri, sürekli heyelanlara neden olmaktadır (Çevik, 2003; Kumsar ve ark., 2012).

1.1. InSAR Uygulamaları ve Yüzey Deformasyonları

InSAR uygulamaları ve yüzey deformasyonlarını belirlemedeki performansını daha net anlayabilmek için InSAR'ın başlangıçtaki uygulama gelişimi ve ortaya çıkan sorunların sonucu olarak değişik (ileri) tekniklerin gelişimi/evrimi hakkında bahsetmek gerekmektedir. Giriş bölümünün alt başlıkları şeklinde özetlenen InSAR yöntemleri hakkında teknik bilgilere Bölüm 2 ve Bölüm 3'de ayrıntılı olarak yer verilmiştir.

1.1.1. InSAR Tekniği

InSAR tekniği pratikte, aynı bölge üzerinde birbirinden çok az farklı görüntüleme açıları ile elde edilmiş iki radar görüntüsünün kullanılmasını gerektirir. Aynı yüzeye ait görüntü çiftleri özel yazılımlarla karşılaştırılırlar. Bu karşılaştırma iki görüntü edinimi arasındaki zaman aralığında meydana gelen yüzey değişimini ortaya koymakta kullanılır. Uzayda hareketli bir platform üzerindeki radar sensörler tarafından bir hedefe doğru mikrodalga sinyaller iletilir; bazıları hedeften geri yansır. Hedefin radar görüntüsünü oluşturabilmek için yansıyan sinyaller mikrodalga sensörler tarafından kaydedilirler (Ferretti ve ark., 2001). Hedef ve sensör arasındaki menzil farkı ölçümlerine dayanan InSAR, karmaşık (kompleks) radar sinyallerini kullanır. Bu yolla elde edilen fark ve sensörün yörünge parametreleri kullanılarak, belirgin yüzeylerin yükseklik bilgileri türetilebilir. Eğer topoğrafik yükseklikten kaynaklanan faz interferogramdan çıkarılabilirse (kaldırılabilirse) radarın bakış doğrultusunda (line-of-sight) olan hedef yüzeylerdeki hareketler elde edilebilir (Hanssen, 2001).

1.1.2. DInSAR - Diferansiyel InSAR Tekniği

InSAR veri işlemede, *N* sayılı interferogram birincil (master) görüntü üzerinden uygun bütün *N*+1 görüntüler kullanılarak oluşturulur. Örnek bir SYM kullanılarak, bilinen topoğrafik fazın ortadan kaldırılmasıyla da DInSAR elde edilir. Diferansiyel InSAR veri işleme; görüntü çiftlerinin seçimi, görüntülerin birbiriyle bağdaştırılması (co-registration), Sayısal Yükseklik Modeli (SYM)'nin oluşturulabilmesi için veri dahil edilmesi, interferogram oluşturma ve iyileştirme, faz çözümlemesi, SYM üretimi ve yer değişim modelinin oluşturulması ve son olarak coğrafi referanslama (geo-coding) aşamalarından oluşmaktadır (Kampes ve ark., 1999). Zaman farkı göz önüne alındığında, DInSAR bağıl yer değişimleri ölçmede santimetre altı duyarlılığa sahip kullanışlı bir ölçme tekniğidir (Agram, 2010). Ancak jeodezik ölçme yöntemleri arasında DInSAR oldukça etkin bir yöntem olsa bile, tekniğin bazı sınırlamalarından söz edilebilir. Örneğin, atmosferik etkilerden kaynaklanan hataların, yörüngesel hataların ve diğer gürültülerin giderilememe olasılığı ve bu olasılıklara bağlı olarak sadece toplam (olası hatalardan net olarak arındırılmamış) yer değişimini ölçmesi gibi sınırlamalar, lineer ve lineer olmayan hareketler arasındaki farkın ayırt edilmesini zorlaştırmaktadır (Zebker ve ark., 1997; Ferretti ve ark., 2000).

1.1.3. PSInSAR - Persistent Scatterers InSAR (Daimi Yansıtıcı InSAR) Tekniği

InSAR veya DInSAR'ın sınırlamalarının üstesinden gelebilmek için yeni bir teknik olan ve Daimi Yansıtıcı InSAR (PSInSAR) olarak adlandırılan teknik geliştirilmiştir. Daimi veya Kalıcı Yansıtıcı (PS) teknikleri, son zamanlarda klasik InSAR tekniği ile oluşturulan bir dizi uyuşumlu interferogramın aynı pikselleri üzerindeki gelişimidir. Bu yeni teknik; genel anlamda InSAR teknikleri kullanılarak daha yüksek duyarlılık istendiği ve daha önceden klasik InSAR yöntemleri ile zamana dayalı periyotlar için başarılı olunamamış durumlarda yer değişimleri ölçmek amacıyla kullanır. PSInSAR için en iyi yansıtıcı özelliğe sahip nokta kümesi tanımlanır ve SYM hatası ve yer değiştirme tahmin edilir. Bu teknikte tüm interferogramlar ilişkili oldukları aynı birincil görüntü ile oluşturulur. Ardından kalibrasyon işlemi gerçekleştirilir.

InSAR tekniği; mekansal çözünürlük, milimetre ve santimetre ölçeğinde yüksek doğruluk ve konumsal alanın genişliliği yönü ile bir çok avantaja sahiptir. Ancak bununla birlikte, yeryüzü değişimlerini belirlemede yine bir takım sınırlamalar söz konusudur. Radarın bakış yönündeki (line-of-sight) rasgele hatalar, görüntü çiftleri arasında zamansal ve geometrik uyuşumsuzluk (değişken zemin özellikleri, arazi kullanımı, büyük deformasyon gradyenti, bitki örtüsü, v.b) ve platformun uçuş yörüngesine paralel olan yatay değişimlerdeki düşük duyarlık tekniğin dezavantajları arasındadır. Su buharı yoğunluğu, anlamlı faz gecikmelerine neden olabilir (Colesanti ve ark., 2003). Böylesi faz değişimleri bazen interferogramın yorumlanmasını zorlaştırır (Zibret ve ark., 2012).

Klasik InSAR tekniğinin sınırlamalarının üstesinden gelebilmek için PSInSAR tekniğinden yararlanılabilir. Klasik InSAR yönteminde interferogramların doğru bir şekilde yorumlanamamasına neden olan en büyük faktörler atmosferik, yörüngesel ve topoğrafik hatalardan kaynaklanan bozucu etkilerdir. Söz konusu etkiler nedeni ile sınırlanmış interferogramlar; yüksek duyarlıklı SYM ve hava koşulları dikkate alınarak seçilen en az 20 veya daha fazla görüntü çifti sayesinde iyileştirilebilirler (Ferretti ve ark., 2000; Hooper, 2008). Bu teknikte, piksel boyutundan daha küçük radar yansıtıcılar analiz edilir, lineer ve lineer olmayan deformasyon örnekleri tanımlanabilir ve hareketin zamansal geçmişi her bir radar hedefi için oluşturulabilir (Kampes, 2005).

PSInSAR ile yerleşim alanlarında hedef (daimi yansıtıcıların) tanımı kolay yapılabilmektedir. Bu durum düzenli nokta dağılımı, rahat ve ekonomik ölçüm olanağı sağlar. Görüntü çiftleri daha hızlı ve yüksek doğrulukla işlenebilir; sonuçlar CBS ile

kolay entegre edilebilir. Bitki örtüsü ile kaplı alanlarda yapay yansıtıcı kullanılmadan verim alınması genellikle zordur. PSInSAR uygulamasının zor çalıştığı yerlerde, SBAS - Small Baseline Subset veya Quasi-PS (Quasi-Permanent Scatterers - QPS) / Minimum spanning tree (MST)) gibi kısa baz uzunluğuna sahip görüntü çiftlerinin ilişkilendirilmesine dayalı farklı "İleri InSAR Tekniklerinden" yararlanılabilir. Çeşitli denemelerden çıkan sonuçların tutarlılığı deformasyon değerlerinin birbiriyle olan güvenilirliğini arttıracaktır.

1.1.4. İleri InSAR Teknikleri ile Gerçekleştirilen Çalışmalara Genel Bakış

Doğal zeminlerde deprem, heyelan veya yeraltı suyu çekilmesine bağlı düşey yönlü yüzey deformasyonları çeşitli disiplinler tarafından farklı yöntemler kullanılarak modellenmiştir. Modelleme çalışmaları kapsamında özellikle uzaktan algılama yöntemlerine yönelik farklı algoritmalar geliştirilmiştir. InSAR çalışmalarında da sonuçların duyarlılığını etkileyen en önemli işlem adımlarından biri olan çözümleme aşaması için değişik algoritmalar geliştirilerek sonuçların iyileştirilmesi mümkün olabilmektedir. Söz konusu algoritma geliştirme çalışmaları ve buna bağlı olarak edinilen kazanımların anlatıldığı bazı önemli yayınlardan örnek vermek, tez çalışmasının önemini ortaya koymak açısından bu alt bölüm başlığı altında kısaca özetlenecektir.

PSInSAR algoritmasının çıkış noktası ve bu alanda yapılan ilk çalışma Ferretti ve ark. (1999) tarafından yayınlanmıştır. Bu çalışmada, Diferansiyel InSAR yöntemiyle genel anlamda deformasyon bilgisi elde edilen İtalya'nın Camaiore kasabası için yüzey hareketinin daha net belirlenebilmesi amacıyla özel bir çalışma (PSInSAR yöntemi) geliştirilmiştir. PSInSAR çalışmalarının çıkış sebeplerinden olan bazı kısıtlamalar (geniş alanlarda çoğunlukla probleme neden olan atmosferik etki ve baz uzunluğu nedeniyle ortaya çıkan sınırlamalar) birden fazla SAR veri setinin birarada çakıştırılarak kullanılmasıyla giderilmiştir. Bu amaçla 45 adet ERS verisi yardımıyla oluşturulan InSAR zaman serisi için, çakıştırılmış interferogramlardaki birbirine karşılık gelen pikseller dikkate alınmıştır. Faz geçmişinin analizi ve yüzey hareketinin izlenmesi amacıyla, bu piksellerden (noktalardan) "doğal bir GPS" ağı gibi yararlanılabileceği için, söz konusu çalışmadan sonra her bir nokta, PS (Permenant Scatterer) olarak adlandırılmıştır. 6 yıldan fazla bir süre aralığı için yapılan analiz işlemi sonucunda, jeofiziksel çalışmalarla da daha önceden hareketli olduğu bilinen zeminin deformasyon

oranı net olarak belirlenmiştir. Bu yolla elde edilen zaman serisi analizlerinden hemen hemen 3 ay sonra, çalışma alanında büyük bir zemin çökmesi gerçekleşmiş ve üzerinde bulunan yapılar harabeye dönmüştür. Böylesi bir tehlikenin, önceden PSInSAR yöntemi ile belirlenmiş olması, tekniğin zamansal, ekonomik ve geniş alanlarda kolay uygulanabilirlik açısından ne denli önemli olduğunun ilk önemli kanıtıdır.

Bu çalışmanın ardından teknik farklı deformasyon türleri için de denenmiştir. InSAR zaman serisi yöntemlerinin en önemli amacı interferogramı etkileyen kısıtlamaların giderilmesi olduğu için, çoklu baz uzunluğu kullanılarak InSAR yöntemiyle elde edilen Sayısal Yükseklik Modelinin atmosferik ve diğer bozucu etkenler ortadan kaldırılarak yeniden yüksek kalitede üretilmesini anlatan çalışmalar geliştirilmiştir (Ferretti ve ark., 2000; 2001). Uygulama alanı olarak Etna yanardağının kullanıldığı, ERS-1/2 Tandem verileri ile gerçekleştirilen çalışmanın ardından, lineer olmayan çökme oranlarının Daimi Yansıtıcı Diferansiyel SAR İnterferometre yöntemiyle çözümlenmesini anlatan bir çalışma ile tekniğin çeşitli deformasyonlardaki uygulanabilirliği ortaya konulmuştur. Kaliforniya'nın Pomona eyaletinde gerçekleştirilen bir diğer çalışma ile PS noktalarının kentsel alanlardaki kullanımı ve yüzey deformasyonu belirlemedeki etkisi anlatılmıştır. Çalışma alanı İtalya'nın Ancona kenti olarak belirlenen ve aynı ekip tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada (Ferretti ve ark., 2001) ise, İnterferometrik SAR verilerinin uzun zaman serilerinden yararlanarak doğal arazilerde bulunan PS noktalarının sabitliği ölçülmüştür. Ayrıca sonuç interferograma etkiyen uyuşum (coherence) haritasının yüksek kalitede olması için yüksek baz değerleri değiştirilerek denemeler yapılmış ve aynı zamanda atmosferik etkinin ortadan kaldırılmasıyla da sonuçlar iyileştirilmiştir. Atmosferik etkinin büyüklüğünün hesaplanması ve kestirimi sonuç interferogramlarda tümüyle gerçek deformasyonun belirlenmesini sağlamaya yardımcı olduğundan, bu çalışma ile optimal kestirim yöntemleri belirlenmiştir.

Hooper ve ark. (2004) ve Hooper (2006), ekili alanlarda ve volkanik olayların gerçekleştiği bölgelerde PSInSAR yöntemini kullanarak, bu alanlardaki deformasyon oranlarını tespit etmişlerdir. Burada PS noktalarının birbiriyle ilişkilerini içeren yeni bir algoritmadan (StaMPS) yararlanılmış ve genel anlamda algoritma detayları verilmiştir. Zamansal ve mekansal (spatiotemporal) çözümleme gerçekleştiren ilk yazılım olan StaMPS, birden fazla noktaya ilişkin deformasyon değerini bir arada ortaya koyabilmektedir. Genellikle InSAR yönteminin kuru ve ekili bölgelerde uygulama alanın çok olmaması nedeniyle, tekniğin volkanik bölgelerdeki uygulanabilirliği

denenmiştir. Yer kabuğu deformasyonu ve volkanik deformasyonların modellenmesi için Kalıcı Yansıtıcı InSAR tekniği kullanılan çalışmada, sadece iki görüntü çifti ile gerçekleştirilen klasik InSAR tekniğinde bile son derece güç olan faz çözümleme işleminin, çoklu interferogram tekniği ile sağlıklı bir şekilde sonuçlandığı ilk örneklerdendir.

Hooper ve ark. (2004) tarafından geliştirilen tekniğin yanı sıra yine aynı dönemlerde gerçekleştirilen ve Daimi yansıtıcı interferometre tekniğinin yer değiştirme büyüklüklerinin kestirimi için kullanılan bir diğer önemli çalışma Kampes'in (2005) doktora tez çalışmasıdır. Bunun için STUN (Spatio-Temporal Unwrapping Network-Üç Boyutlu Çözümleme Ağı) algoritması geliştirilmiştir. Algoritmanın ilk adımı birbiriyle uyuşumlu noktalardan (yansıtıcılardan) bir referans ağı oluşturmaktır. STUN algoritması iki farklı kentsel alanda, Berlin ve Las Vegas'da uygulanmıştır. Çeşitli bozucu etkenler nedeniyle Berlin'de umulan yer değiştirmenin ortaya konulamamasına karşın, Las Vegas'da anlamlı değişim miktarları tespit edilmiştir.

Tüm bu çalışmaların yanı sıra Kısa Baz Uzunluğu Tekniği (Small Baseline Subset - SBAS) kullanılarak da yüzey deformasyonu belirleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Tekniğin detayları Lauknes'in (2004) yüksek lisans tez çalışmasında ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Özetle tez çalışmasında Norveç'in Oslo Kentinde meydana gelen deformasyon ortaya konmuştur. 1992–2000 yılları arasında mevcut ERS verileriyle Oslo'daki Bjorvika bölgesinde yaklaşık yılda 5 mm'lik bir deformasyon tespit edilmiştir. Diğer bir örnek, Lanari ve ark.'nın (2007) yayınladığı makalede yer almaktadır. Burada yine farklı yeryüzü özelliklerinde SBAS algoritması kullanılarak InSAR tekniğiyle yüzey deformasyonu araştırmıştır. Bu çalışmada volkanik alanlar (İtalya'daki Campi Flegrei caldera ve Somma-Vesuvio kompleks volkanizması), akifer alanı (Kaliforniya San Fransisko'daki Santa Clara) ve heyelanlı alanlarda (İtalya'daki Maratea deresi) yüzey deformasyonu belirleme çalışması yapılmıştır.

Farklı algoritma geliştirme yöntemlerinden bir diğer örnek Warren (2007)'de yer almaktadır. Tamsayı Belirsizliği Araştırma (Integer Ambiguity Search - IAS) Yöntemi kullanarak, Üçlü Geçiş Kalıcı Yansıtıcı algoritmasını geliştirmiştir. Çalışmanın amacı yeni geliştirilen IAS yönteminin Sayısal Yükseklik Modeline ihtiyaç duymadan interferogram oluşturabilmesi ve aynı zamanda topoğrafik etkiyi de ortadan kaldırabilmesidir. Bu yöntem İngiltere'nin Londra kentinde iki farklı alan için denenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda yöntemin doğruluğu GPS sonuçları ile karşılaştırılarak test edilmiştir.

İleri InSAR tekniklerinin gelişimi Hooper ve ark. (2008)'ın çoklu interferogram oluşturma yöntemlerinden Kalıcı Yansıtıcı (PS) ve Kısa Baz Uzunluğu (SB) yaklaşımlarını bir arada kullanması ile yeni bir boyut daha kazanmıştır. Aynı bölge üzerinde her iki yöntem de denenmiş ve birbirleri ile tutarlılıkları ele alınmıştır. Çalışma bölgesi İzlanda'nın küçük buzullarından biri olan Eyjafjallajökull ada dağ buzuludur. Yer değiştirme oranı her iki yaklaşımda da birbiriyle tutarlı olduğu için teknik devam eden birçok farklı deformasyon çeşidi için kullanılmaktadır. Farklı bir uygulama ile üç boyutlu çözümleme algoritması geliştiren Hooper ve ark., (2009), bu çalışmasında atmosferik etkiyi komşu PS noktalarını bir bütün olarak düşünerek ortadan kaldırmayı amaçlamıştır. Çalışmada atmosferik etkiden tümüyle arındırılmış PS nokta ağı deformasyonun niceliği hakkında net bilgiler vermektedir. Çalışmanın nihai amacı olan atmosferik hatadan tamamen arındırılmış PS noktalarına ait sonuçlar yorumlanarak buzul hareketine dair haritalama işlemi gerçekleştirilmiştir.

İleri InSAR teknikleri daha önce de bahsedildiği gibi deformasyonun türüne ve görüntülenecek alanın yüzey karakteristiğine uygun olarak sonuçlardan beklenen duyarlılığa göre çeşitli algoritmalar üretmeye imkan sağlayan bir tekniktir. Bu çalışmalardan bir diğer örnek de Agram (2010) doktora tezinde yer almaktadır. Doğal arazilerde PSInSAR tekniğinin jeodezik anlamda yeteneğini ortaya koyabilmek amacıyla iki farklı yaklaşım uygulamıştır. Her iki yaklaşımda da PS noktalarının oldukça fazla olduğu bir ağ tasarlayarak faz çözümleme algoritmalarının güvenilirliğini test etmiştir. Çalışmanın en önemli amacı PS seçimi için oluşturdukları özel faz çözümleme algoritmasının (edgelist), PSInSAR çalışmaları kapsamında test edilebilirliğinin araştırılmasıdır. Bu amaçla San Fransisco Körfezi, Norveç'te bulunan Lyngen Bölgesi ve Merkez San Andreas Fayı çalışma bölgeleri olarak seçilmiş ve faz çözümleme işlemi için geliştirilen algoritma denenerek sonuçlar yorumlanmıştır. PS seçimi piksel bazında yapılmış, seçimi gerçekleştiren algoritmanın arazideki gerçek duruma uygunluğu irdelenmiştir. İkinci adımda 3 boyutlu faz çözümleme problemi oluşturularak InSAR verileri için zaman serisi algoritma örneği elde edilmiştir. Bir diğer çalışma ise NG (2010)'nin, yeryüzü değişimleri denetlenebilirliğini çeşitli zamansal ve mekansal ölçeklerde ele alıdığı uygulamasıdır. Çalışmanın dört ana odak noktası bulunmaktadır. Zamansal ve mekânsal uyuşumsuzluk, çok hızlı gelişen deformasyonlarda faz süreksizliği (Phase discontinuity), atmosferik düzensizlikler ve deformasyon bilgisinin yükseklik bileşeni olarak ele alınan çalışma kapsamında incelemeler ve değerlendirmeler yapılmıştır. Çin'in Beijing bölgesinde özellikle ekili

alanlarda yüzey deformasyonun tespiti için, Envisat ASAR ve Alos PALSAR verileri kullanılarak PSInSAR ve SBAS yöntemleri uygulanmış, çalışmanın amacı doğrultusunda belirlenen 4 ana odak noktasına göre çözümler getirilmiştir.

Tez çalışmasında uygulanan tekniklerden biri olan Quasi-PS tekniği ile ilgili ilk genel bilgiler, Perrisin ve ark. (2011) tarafından SarProz yazılım detaylarının verildiği çalışmada yayınlanmıştır. Çin'in Shangai ve Hong Kong illeri için yapılan deformasyon belirleme çalışmaları için, CosmoSkymed (CSK) ve TerraSAR-X (TSX) verileri kullanılmıştır. Shangai'de CSK verileri ile metro istasyonlarındaki çökme oranları, Hong Kong'ta TSX verileri ile CHUK Üniversitesi Kampüs alanındaki çökmeler belirlenmiştir. Her iki bölge için de hem PSInSAR hem de Quasi-PS teknikleri denenmiş, yöntemler karşılaştırılmış ve deformasyon değerleri yıllık 1-2 cm oranına varan değerlerde tespit edilmiştir. Böylelikle StaMPS algoritması dahilinde kullanılan SBAS yöntemi ile benzer çalışma prensibine sahip Quasi-PS yöntemi de uygulamada kabiliyetini ortaya koymuştur. Özellikle kısa baz uzunluk değerlerine sahip veri setlerinden oluşan SAR veri kümeleri kullanıldığında oldukça başarılı sonuçlar veren Quasi-PS yöntemi, devam eden çalışmalarla da farklı deformasyon türleri için kullanılmıştır.

1999 yılında başlatılan PSInSAR yaklaşımının ileri versiyonu SqueeSAR tekniği ilk olarak Ferretti ve ark. (2009a; 2009b) tarafından tanıtılmıştır. Dağılmış Yansıtıcı (Distributed Scatterer -DS) ve PS noktalarının SqueeSAR uygulamasında birleştirilerek, ERS ve TerraSAR-X verilerinin İtalya'daki Alp dağları üzerindeki uygulaması SqueeSAR ile yapılan ilk çalışma olarak ele alınmıştır. Genel anlamda bu uygulamada SqueeSAR yaklaşımının detayları anlatılmış ancak yöntemin algoritma detayları açıklanmamıştır. Tekniğin sonuca yönelik detayları Ferretti ve ark. (2011a)'de yayınladıkları makalede açıklanmış olup, veri setlerinin birbiriyle olan ilişkilendirilmesi ve yansıtıcı noktaların (PS ve DS (Dağılmış Yansıtıcı)) davranışları incelenmiştir. İtalya'nın Alpine bölgesi için yapılan çoklu interferometre çalışması neticesinde, 2003-2008 yılları arasında elde edilen toplam 65 RADARSAT uydu verisi ile, yansıtıcı değeri düşük olan yoğun bitki örtüsü ile kaplı çalışma alanında deformasyon sonuçlarına ulaşılabilmiştir. Aynı çalışmada Cancano Gölü'nün etrafı ve Alpine dağlık bölgesinde PSInSAR ile yüksek yansıma özelliğine sahip nokta elde etmek çok daha zor iken, SqueeSAR ile neredeyse 9 kat daha fazla yansıtıcı nokta elde edilebilmiştir. Bu başarılı çalışmanın ardından Meisina ve ark. (2013)'de heyelan envanter haritalarının PSInSAR ve SquueSAR yöntemi ile oluşturulması konusunda her iki tekniği karşılaştırmış ve

aslında iki tekniğin de birbirine göre avantajları olduğu ancak SqueeSAR tekniği ile çok daha güvenilir sonuçlar elde edilebildiği açıklanmıştır. Bu çalışmada esas amaç özellikle bitki örtüsü ile kaplı ve eğimli alanlarda gerçekleşen heyelanlar için envanter haritalarının oluşturulmasında her iki tekniğin de kullanılabileceğini göstermektir. Lagios ve ark. (2013), tekniği tektonik çalışmalarda GPS çalışmaları ile karşılaştırarak Santorini volkanı için de uygulamışlardır.

Genel anlamda InSAR uygulamaları için kullanılan en yaygın yer doğrulama yöntemi, GPS ile elde edilen sonuçlarla gerçekleştirilmektedir. Yukarıda SqueeSAR için verilen örneğin dışında, GPS çalışmalarının PSInSAR ile de karşılaştırıldığı uygulamalar literatürde yer almaktadır. GPS yöntemi ile PSInSAR sonuçlarını karşılaştıran önemli çalışmalardan bir tanesi Osmanoğlu (2011)'in doktora tez çalışmasında yer almaktadır. Burada Meksika'nın başkenti Meksiko Şehri'nde meydana gelen yeraltı suyu çekilmesi nedeniyle düşey yönlü değişimi gözlemlemek için PSInSAR yöntemi kullanılmıştır. InSAR zaman serisi tekniklerinin hemen hemen tamamı ile ilgili teknik bilgiye yer verilen çalışmada PSInSAR yöntemi seçilmesinin ana nedeni, uygulama bölgesinin yüksek yansıtıcı özelliğe sahip bina ve benzeri yapıların bulunduğu kent merkezi olmasıdır. Bu çalışmada sonuçlar GPS sonuçları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Tüm alan ilk olarak genel anlamda DInSAR yöntemiyle incelenmiş, bu yolla deformasyonun yoğun olduğu bölgeler (metro hattı ve Metropolitan Katedrali) tespit edilmiştir. Söz konusu alanların çevresine kurulan GPS istasyonlarından elde edilen sonuçlar PSInSAR sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Özellikle deformasyonun yoğun olduğu bölgeler için işlenen SAR verileri ile PSInSAR zaman serileri oluşturulmuştur. Ocak 2004 - Temmuz 2006 yılları arasında geçen süre için, 23 adet Envisat ASAR uydu verisi kullanılarak yapılan PSInSAR sonuçlarında 300 mm/yıl oranında çökmenin varlığı ortaya konmuştur. 8 noktadan oluşan GPS sonuç verileri ile PSInSAR sonuçları karşılaştırıldığında iki teknik arasındaki fark 6,9 mm/yıl olarak tespit edilmiştir. Bu sonuç; duyarlılığı yüksek olan GPS verileri ile karşılaştırıldığında, İleri InSAR tekniklerinin yüksek güvenirlikte olduğunu kanıtlamaktadır.

KKH üzerinde daha önce yapılan çalışmalar da mevcuttur. Bu çalışmalardan biri Üstün ve ark. (2010) tarafından gerçekleştirilmiştir. Konya Kapalı Havzasında gerçekleşen düşey yönlü yüzey deformasyonlarının GNSS gözlemleri ile ortaya konulması çalışmanın odak noktasını oluşturmaktadır. GPS ağından elde edilen deformasyon bilgileri, Canaslan (2010) tarafından InSAR tekniği kullanılarak desteklenmiştir. Ancak havzanın farklı karakteristik özellikler göstermesi nedeniyle

çalışmanın belirli kısımlarında GPS ve InSAR sonuçları tutarlı görülmüş ve bir takım bozucu etkenler (atmosferik ve topoğrafik) dolayısıyla diğer kısımlarında inceleme yapılmasına olanak sağlanamamıştır. Bu çalışmanın ardından, havza genelinde yapılan jeodezik çalışmalar Ustun ve ark. (2014) tarafından tamamlanan 110Y121 numaralı proje kapsamında hazırlanmış sonuç raporunda detayları ile anlatılmaktadır. Çalışma kapsamında 28 noktalı GNSS gözlem istasyonları kurulmuş, proje süresince 10 periyotluk veri toplanmıştır. Tarımsal faaliyetin yoğun olarak gerçekleştiği ve dolayısıyla su kullanımının fazla olduğu ekili alanlarda ve aynı zamanda yerleşim yerlerinde yıllık 3 cm/yıl'a varan çökme hareketi belirlenmiştir. Bu sonuçlar, havza genelinde 2003-2011 tarihleri arası için gerçekleştirilen DInSAR sonuçları (toplam 127 interferogram) ile desteklenmiştir.

Farklı deformasyon türleri için ülkemizin çeşitli bölgelerinde gerçekleştirilen DInSAR ve PSInSAR çalışmaları da mevcuttur (Şengün, 2009; Hastaoğlu ve ark., 2014; Demirel, 2015; Hastaoglu, 2016). Bu çalışmalardan bazıları yüksek lisans ve doktora çalışmaları, bazıları ise proje çalışmalarıdır. Tüm bu çalışmalarda heyelan (Sivas/Koyulhisar) ve deprem (İzmit) gibi deformasyon türlerinin InSAR yöntemi ile incelenmesinin yanısıra GPS ile yer doğrulaması işlemi de gerçekleştirilmiştir.

.

1.2. Uygulama Bölgesi

1.2.1. Konya Kapalı Havzası (KKH)

Çalışmamızın uygulama kısmındaki ilk bölümü oluşturan Konya Kapalı Havzası'ndaki çökmeleri tetikleyen önemli etkenlerden biri su faktörüdür (Roberts ve ark., 1979). Havzadaki suyla ilgili sorunu iki pencereden incelemek gerekirse; birincisi çökmenin iklim değişikliğinin bir uzantısı olması (Erol, 1983; Roberts, 1983), son 10-15 bin yılda (buzul çağı sonrası) bölgenin sulak bir çevreden, kurak bir iklime geçmesi ve dolayısıyla su kaynaklarının azalması (Erol, 1980) olarak değerlendirilebilir. İkincisi son yüzyıldaki insan faktörü; hızlı kentleşme, yüzey ve yeraltı sularına daha fazla bağımlılık, aşırı tüketim ve yapı (nüfus) yoğunluğudur (Ustun ve ark., 2010; Üstün ve ark., 2015).

Günümüzde su; insanların hayatı ve sağlığı ile ekosistemler için yaşamsal öneme sahip olmasının yanında, ülkelerin kalkınması için de temel bir ihtiyaçtır. Su kıtlığı giderek belirgin ve yaygın bir sorun haline gelmektedir. Bu problem sosyal ve

ekonomik açıdan zincirleme pek çok soruna da neden olmaktadır. Su kaynakları yönetimi açısından günümüzde gelişen yaklaşım, kaynak yönetiminin havza bazında ve diğer doğal kaynaklarla "entegre" biçimde gerçekleştirilmesidir. Su kaynaklarının, çevreyle uyumlu ve entegre yönetimi, sürdürülebilir kalkınmanın temel bileşenlerinden biridir. Özellikle havza bazında koruma planları yapılırken tüm gelişmelere ve kullanımlara kontrollü bir şekilde yön verilmesi gerekmektedir. Hızlı nüfus artışına bağlı olarak artan su ihtiyacına karşın, uygun kaynak varlığının azlığı ve gün geçtikçe gelişen sanayi ve tarımsal faaliyetlere paralel olarak ortaya çıkan aşırı kullanım nedeniyle yaşanan sorunlar, havza bazında su kaynakları yönetiminin önemini bir kat daha arttırmıştır.

Yüzeysel ve yeraltı su kaynaklarını içerisinde barındıran havzalar; bir akarsuyun kaynağıyla-sonlandığı yer arasında kalan ve ona su veren tüm kolları kapsayan alandır (MAM, 2012). Kapalı havzalar, sularını denizlere kadar ulaştıramayıp kuruyan, yer altına sızdıran veya göle dökülüp kalan akarsulardır. Kapalı havzaların oluşmasında; yer şekillerinin oluşumu ve iklim etkilidir. Kapalı havzalar genellikle iç kesimlerde, kurak iklim bölgelerinde görülür (OSİB, 2012). Bu tez çalışmasında, tarımsal ve ekonomik açıdan önemli bir üretim bölgesi olan Konya Kapalı Havzası, havzadaki yeraltı suyu çekilmesine bağlı olarak ortaya çıkan çökmelerin belirlenmesi amacıyla öncelikli olarak çalışma bölgesi seçilmiştir.

Daha önce de değinildiği gibi, Konya Kapalı Havzası'nda en önemli sınırlayıcı faktör sudur. Bilinçsizce yapılan tarım faaliyetleri mevcut kullanılabilir alanları verimsiz hale getirmiştir. Havzada suyun %88'i tarımda kullanılmakta ve bu suyun %61'i ise yeraltı su kaynaklarından karşılanmaktadır (Berke ve ark., 2014). Su ihtiyacı fazla olan mısır, ayçiçeği, şeker pancarı gibi ürünlerin ekilmesinin yanı sıra yeraltı su kaynaklarının tarımda aşırı kullanımı Havza'daki su kaynaklarının azalmasına ve bu nedenle özellikle tarım alanlarında jeolojik bir oluşum olan çökmelerin yaşanmasına neden olmaktadır (Üstün ve ark., 2015). Ayrıca, kentsel gelişime de vurgu yapmak gerekirse, son 25-30 yılda şehrin yapısal gelişimi, hem deformasyonları arttıran hem de bunların izlenmesini zorunlu kılan bir nedendir.

1.2.2. Denizli İli Babadağ İlçesi

Denizli ilinin Kuzey batısında yer alan Babadağ, 180 km^2'lik bir alan üzerinde ve İl Merkezine yaklaşık 30 km uzaklıkta bulunan bir ilçedir. Aktif bir heyelan bölgesi

olarak, Mülga Afet İşleri Genel Müdürlüğü tarafından 19.09.2006 tarihli Jeolojik Etüt Raporuna göre heyelanın önlenemeyeceği belirtilerek, afete maruz alan sınırları tespit edilmiş ve afetzede ailelerin nakledilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Bunun üzerine 7269 sayılı Afet Kanunun 1. maddesine göre muhtemel heyelan afeti için Mülga Afet İşleri Genel Müdürlüğünce 24.11.2006 gün ve 52/20407 sayılı olur ile "Genel Hayata Etkilik Oluru" alınmıştır. Böylece Afet Kanunu kapsamında afetzedelerin nakledilmeleri kesinleşmiştir. Tüm bu veriler ışığında yapılan değerlendirme sonucunda, bu alan üzerindeki konutlar kaldırılmış, yapılaşmaya kapatılmış ve Denizli'nin 10 km KB'sında seçilen bir alanda Babadağ Afet Konutları (406 Konut ve 101 iş yeri) inşa edilmiş ve Gündoğdu Mahallesi halkı da yeni yerleşim yerine taşınmıştır. Sonuç olarak afet olmadan halkın yaşamını riske etmemeye yönelik tüm çalışmalar tamamlanmıştır.

Birçok bilimsel çalışmaya konu olan Gündoğdu heyelanı için bir çok mühendislik uygulaması yapılmış, bu uygulamaların hepsi arazi ve gözlemsel çalışmalara dayandırılırmış ve sonuç olarak önemli veriler ortaya konmuştur (Kumsar ve ark., 2012). Özet olarak, bu çalışmalar sonucunda kayma miktarı yaklaşık 4-10 cm/yıl olarak tespit edilmiştir (Kumsar ve ark., 2004). Fakat uzun yıllardır aktivitesi bilinen bu heyelan kütlesi hiçbir uzaktan algılama çalışması ile incelenmemiştir. Çalışmamızın uygulama kısmında ikincil olarak Babadağ heyelanları İleri InSAR teknikleri ile incelenecektir.

1.3. Tez Çalışmasının Amacı

InSAR verilerinin zaman serisi analizleri; depremler, volkanik olaylar, heyelanlar, yer yüzeyindeki su seviyesi değişimleri ve sulak alanların gözlenmesine kadar geniş çaplı kullanım alanlarının olması nedeniyle yeryüzünde meydana gelen söz konusu yer değiştirmelerin gözlenmesinde önemli bir bilimsel araç haline gelmiştir. Gözlem altına alınan bölgelerden KKH için havzanın tamamı yerine özellikle yeraltı suyunun yoğun olarak kullanıldığı alanlar öncelikli olarak incelenerek, bu çerçevede tarımsal sulama alanları ve geniş bir alana yayılmış Konya kent merkezi için çökme nedeniyle oluşan deformasyonların incelenmesi amaçlanmıştır. Söz konusu alanlardaki zemin çökmelerinin belirlenmesi ve izlenmesi için ileri InSAR tekniklerinden yararlanıldığından, bu teknikler için geliştirilmiş zaman serisi algoritmaları kullanılarak

yüzey deformasyonlarının konumsal boyutlarda (belirli piksel boyutlarında) ölçülmesi hedeflenmiştir.

Konya Kapalı Havzası'ndaki zemin çökmelerinin belirlenmesi için yapılan çalışmanın amacı, havzadaki kentsel, endüstriyel, tarımsal, ekonomik vb. faaliyetler sonucu oluşan yeraltı su kaybının neden olduğu düşey yönlü zemin çökmelerinin tespit edilerek havzanın korunması ve iyileştirilmesi için kısa, orta ve uzun vadede alınacak tedbirlere yönelik çalışmaların ve planlamaların yapılması için yol gösterici deformasyon haritalarının InSAR Zaman Serileri yöntemleriyle oluşturulmasıdır. Havzanın genişliği nedeniyle farklı zemin özellikleri ile karşılaşılmaktadır. Çalışma alanının farklı karakteristik (dağlık, ovalık, ekili ve kentsel) özellikler göstermesi nedeniyle burada yüzey değişimini en iyi şekilde tanımlamak için birkaç farklı algoritma uygun kısımlar için farklı yazılımlar ile uygulanacak ve sonuçlar bir bütün halinde değerlendirilecektir.

Çalışma bölgesinin tamamının (veya büyük bir kısmının) düşey yönlü yüzey deformasyonunu başka jeodezik yönteme ihtiyaç duymadan modelleyebilmek için ileri InSAR tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Literatürdeki benzerleri incelendiğinde farklı yüzeylerde çeşitli deformasyon türleri için birçok algoritma uygulanmış ve yine birçoğunda başarı elde edilmiştir. Ancak bu çalışmaların tamamı tek bir karakteristik özelliğe sahip yüzeyde (örneğin sadece kırsal veya ekili alanda ya da tamamen yapılaşmanın olduğu kentsel alanlarda) gerçekleştirilmiş böylece sadece tek bir algoritma (StaMPS, SBAS, vd.) kullanılması yeterli olmuştur. Ancak bu tez çalışmasında ilk olarak Konya için seçilen bölge birbirinden çok farklı karakteristik özelliğe sahiptir (Göçmez ve İşçioğlu, 2004). Bu nedenle bu tezin anlamlı bir kısmında uygulamaya esas teknik ve metodoloji incelenecek, en uygun teknik uygun yüzeylerde optimal algoritmalar kullanılarak işlenecek ve sonuçlar bir bütün halinde değerlendirilecektir.

Bir diğer yandan, Denizli İli Babadağ İlçesi ve çevresinde 1960'lı yıllardan bu yana etkisini gösteren heyelan afeti yine aynı teknikle gözlemlenecek, bu amaçla özellikle son 10 yıllık periyottaki yer değiştirme durumu ortaya konulacaktır. İleri InSAR tekniklerinin çeşitli deformasyon türleri ve farklı yüzey karakteristikleri üzerindeki etkisinin karşılaştırmalı olarak incelenebilmesi amacıyla görüntüler işlenerek bu bölge için de yer değiştirme haritalarının oluşturulması amaçlanmıştır.

Bu çalışmada ileri InSAR teknikleri, Konya Kapalı Havzasındaki çökmeleri ve Denizli Babadağ İlçesi'ndeki heyelanları belirlemek için kullanılmaktadır. Tez kapsamında aşağıdaki problemlerin çözümü aranmaktadır:

- İleri InSAR tekniklerinin temel esaslarını tanımlamak, bilinen yaklaşımların yüzey deformasyonlarını belirlemedeki başarısını irdelemek.
- İnterferometrik SAR ölçme doğruluğunu etkileyen faktörleri ve gözlem duyarlılığını ve farklı yaklaşımlardan elde edilen yer değiştirme büyüklüklerinin doğruluğunu araştırmak.
- Geleneksel InSAR ve ileri InSAR tekniğini kısıtlayan durumları ele almak.
- Aynı çalışma bölgesinde farklı karakteristik özellikler gösteren yüzeylerde ileri InSAR tekniklerinin uygulanabilirlik ilişkisinin koşullarını belirlemek.
- Tüm bunların sonucu olarak, Konya Kapalı Havzası ve Babadağ bölgelerinde yüzey deformasyonlarını çok bandlı SAR görüntüleri yardımıyla tespit etmek, deformasyon büyüklüklerini zamanla ilişkilendirerek yüzey değişimlerinin tarihsel gelişimini ortaya çıkarmak ve sonuçlarını yorumlamak.

1.3.1. Tez Bölümlerinin İçeriği

Giriş bölümünün haricinde bu tez 5 ana bölümden oluşmaktadır.

İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar teknolojisiyle ilgili teknik bilgiler ve temel prensipler bu çalışmanın ikinci bölümünde yer almaktadır. Radar görüntü ve polarizasyon çeşitleri, SAR sistemlerinin çalışma prensipleri, SAR platformları ve SAR verilerinin kullanım alanları, interferometrenin uygulanabilmesi için gerekli koşullar, InSAR veri işleme adımları ve kısıtlamalar gibi detaylara bu bölümde değinilecektir.

Üçüncü bölümde çoklu İnterferometre oluşturmanın esasları, matematiksel ve geometrik yasalar, hata kaynakları, ölçme duyarlılığı, deformasyon haritası (zaman serilerine dayalı interferogramlar) oluşturmak için gerekli işlem adımları, PSInSAR veri işleme esasları ve kısıtlamalar anlatılacaktır.

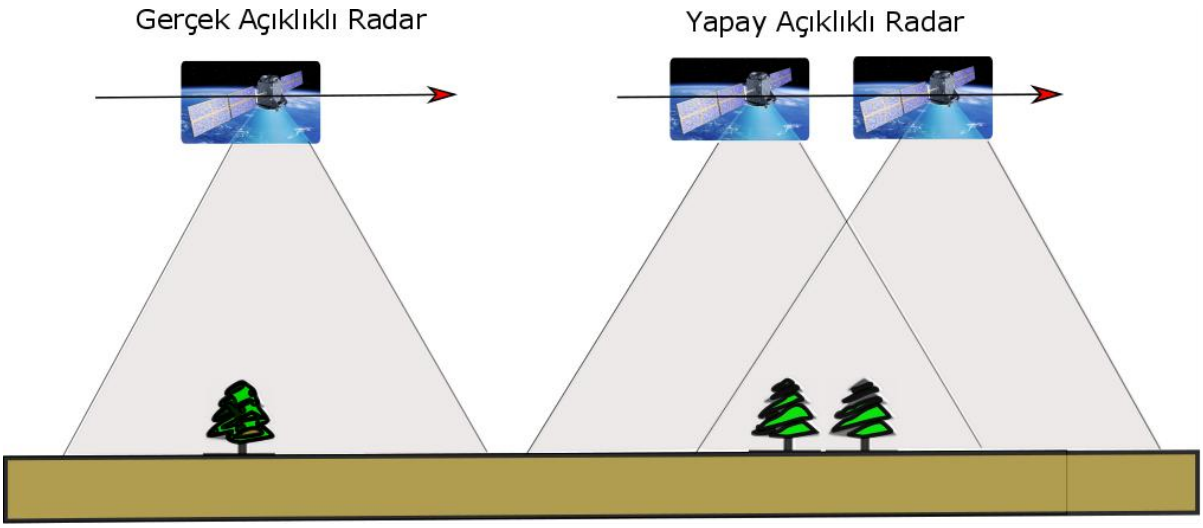
Dördüncü bölümde; birinci uygulama bölgesi olan Konya Kapalı Havzası ve jeolojik özelliklerine yer verilerek, çökme nedeniyle oluşan yüzey deformasyonu için PSInSAR, SBAS ve Quasi-PS yöntemlerinin sonuçları irdelenecektir.

Beşinci bölümde ise; İleri InSAR tekniklerinin farklı deformasyon özelliklerinde uygulanabilirliğini göstermek amacıyla, Babadağ İlçesi ve çevresinde meydana gelen heyelana ilişkin yer değiştirme büyüklükleri ortaya konulacaktır. InSAR sonuçları daha önce yapılmış çalışmalardan elde edilenlerle karşılaştırılarak, deformasyon haritası ile tutarlılığı araştırılacaktır. Dördüncü ve beşinci bölümün; farklı deformasyon, zemin karakteristiği ve InSAR teknikleri temelinde sonuçların irdelenmesi ve yöntemlerin kullanılabilirliği üzerine tartışma ile sonlandırılması amaçlanmaktadır.

Altıncı ve son bölümde, tez çalışmasının sonuçları değerlendirilerek, ileri InSAR tekniklerinin farklı zemin ve deformasyon türleri karşısında başarısına etki eden faktörlerin sıralanması amaçlanmaktadır. Son olarak benzerleriyle birlikte Konya Kapalı Havzası'nda ve Babadağ heyelan bölgesindeki deformasyon izleme çalışmalarına yönelik öneriler getirilecektir.

2. SAR TEKNOLOJISI VE TEMEL PRENSIPLERI

Yapay açıklıklı radar (Synthetic Aperture Radar - SAR) sistemleri bir uydu veya hava aracına yerleştirilmiş sensörler yardımıyla, 1–10 GHz arasındaki frekanslarda çalışan mikrodalga sinyallerini yeryüzüne ileten ve geri alan sistemlerdir. Aynı zamanda anten görevini gören bu sensörler; yeryüzünden yansıyan sinyalleri toplamak için kullanılırlar. Gerçek açıklıklı radarlarda (Real Aperture Radar - RAR) kullanılan büyük antenlerin tersine, yapay açıklıklı radarlarda küçük boyutlu ancak çözünürlüğü yapay yöntemlerle iyileştirilmiş antenler kullanılır (Şekil 2.1).



Şekil 2. 1. Gerçek açıklıklı radar anteni (sol panel), uydunun yörünge hareketine bindirilmiş çoklu başka deyişle yapay açıklıklı radar anteni (sağ panel)

Yapay açıklık, uydu platformunun ilk ve son gözlem arasındaki zaman aralığı boyunca kat ettiği mesafedir. SAR görüntüsü Yeryüzünün belli bir kesiminin bu yol boyunca algılanması ile sonuçlanır. RAR ve SAR sistemleri için konumsal çözünürlük ilişkisi Çizelge 2.1'de gösterilmektedir.

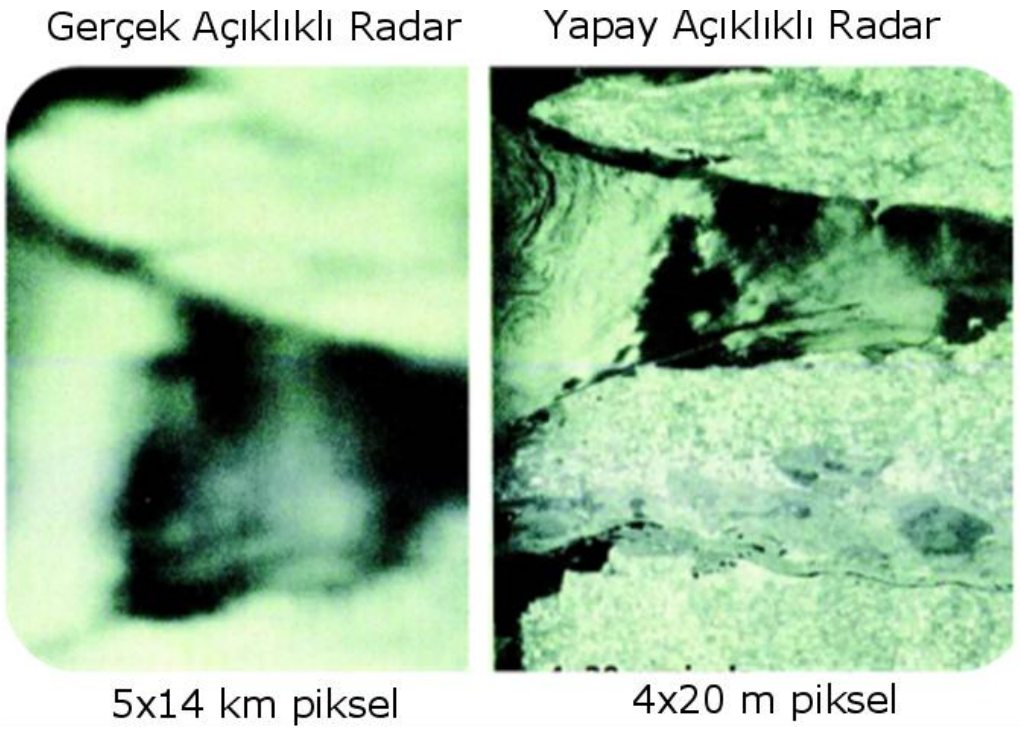
Çizelge 2. 1. RAR ve SAR sistemleri için konumsal çözünürlüğün fonksiyonel ilişkisi(L_a radar anteni uzunluğu, ρ eğik anten-hedef arasındaki eğik uzunluk, τ puls uzunluğu)

Konum bileşeni	**RAR**	**SAR**
Azimut	$\rho\frac{\lambda}{L_a}$	$\frac{L_a}{2}$
Uzunluk (yatay)	$\frac{c\tau_p}{2}$	$\frac{c}{2\beta}$

Uzunluk doğrultusundaki konumsal çözünürlük; uzunluğa veya dalga boyuna bağlı değildir. RAR sistemlerde eğik çözünürlüğü (eğik), τ puls uzunluğunun ışık hızı c ile çarpımının yarısına eşittir. SAR sistemlerde aynı çözünürlük radar pulsu bant genişliği β ile hesaplanır. Bu değer ışık hızı ile puls bant genişliğinin yarısına eşittir. Örneğin 16 MHz'lik Envisat ASAR bant genişliği için eğik uzunluk doğrultusundaki çözünürlük yaklaşık 9 m'dir.

Yukarıdaki (Çizelge 2.1) formüllerden de anlaşılacağı üzere, uzunluk çözünürlüğü ile pulsun bant genişliği arasında doğrusal bir ilişki vardır. Çözünürlük artışı toplanan veri miktarının artması demektir. En modern radar sistemleri (SAR sistemleri de dahil olmak üzere) "lineer frekans modülasyonu (FM)" olarak adlandırılan bir sinyal iletirler. Verici belirli bir frekans aralığı üzerinden radar pulslarının frekanslarını değiştirir. Frekanstaki bu değişim, sistemin radyo frekans (RF) bant genişliği olarak tanımlanır. RAR ve SAR sistemlerinin her ikisi de bakış doğrultusundaki uzunluk boyunca çözünürlüklerini bu yolla elde ederler. Genellikle SAR radar pulsları için bant genişlikleri 10 ve 40 MHz arasındadır (Jackson ve Apel, 2004).

Yapay ve gerçek açıklıklı radar sistemleri ile elde edilen görüntülere ilişkin çözünürlük farkı Şekil 2.2'deki örnekler ile daha iyi anlaşılabilir. Azimut ve uzaklık yönünde ortalama 1000 kat çözünürlük iyileşmesi karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 2. 2. RAR ve SAR görüntüleri arasındaki çözünürlük farkı (Massonnet ve Feigl, 1998)

SAR uydunun güzergâhını kullanarak antenyüzey açıklığının (aperture) elektronik benzetimini (simulation) yapabilen bir sistemdir. Belli bir zaman dilimi içerisinde radar sinyalinin gönderim-alım çevrimleri uydunun hassas göreceli konum koordinatları ile birlikte elektronik ortama kaydedilir. Her çevrimde ortaya çıkan değişik Doppler frekansları hedefin geometrisinin çiziminde hesaba katılır. Böylece gerçek bir antenin açıklık açısının elverebildiğinin çok ötesinde yüksek açısal çözünürlüklü bir radar resmi elde edilir.

2.1. Radar Görüntüleri ve Polarizasyon Çeşitleri

Radar görüntüleri, gri tonda gösterilir. Gri ton, yeryüzü üzerindeki nesnelerden yansıyan radyo dalgalarının genlik (amplitude) görüntüsüdür. Ton farklılıkları, görüntüdeki belirli özelliklerin yorumlanabilmesine olanak sağlamaktadır. Örneğin, sakin ve pürüzsüz su birikintilerinin bulunduğu bölgelere ait radar görüntülerinden alınan sinyaller uydu platformu üzerindeki alıcı sisteminden, beklenen yansıma bölgesine çok az açıyla daha uzak/farklı bölgelere iletildiği için koyu renkte (siyah renge çok yakın bir tonda) görünmektedir. Binalar, köprüler ve metal yapılar gibi yapay unsurları temsil eden radar görüntülerine ait sinyaller (sinyalin yeryüzünden radara geri yansıması) ise uydu platformu üzerindeki alıcı sistemine çok daha yakın yerlere

iletildiği için parlak (açık gri ton) noktalar halinde görünmektedir. Tepeler ve eğimli bölgelerde ise, mikrodalga ışınımlarının ulaştığı kesimler parlak, ulaşamadığı diğer (gölgelenmiş) kesimler ise koyu renkler halinde görüntülenir.

Radar görüntüleme tekniğinde, her görüntü tek bir polarizasyon modundan elde edilmiş dalgalardan oluşmaktadır. Ayrıca radar görüntüsü tek bir polarizasyona sahip olabileceği gibi birkaç polarizasyonu bir arada bulundurma özelliğine de sahip olabilir. Böyle radarlara çoklu polarizasyon radar denir. Genellikle araştırma radarları çoklu polarizasyona sahiptir. Son yıllarda uzaya fırlatılan birçok yeni uyduda (Radarsat-2, TerraSAR-X, CosmoSkyMed, vb.), eş zamanlı çalışan ve dört farklı modda olan HH, VV, HV ve VH polarizasyonları, geri yansıyan sinyalleri belirlemede kullanılmaktadır (ESA, 2014).

Radar sinyalinin iletim ve geri alım olarak anılan bu her iki aşamanın birer sembolü olarak radar sistemleri H ve V lineer polarizasyonları kullanır. Tekli polarizasyon (single polarized) sınıflandırılması aşağıda verilen şekilde sınıflandırılabilir:

- HH - yatay (horizontal) iletim ve yatay geri alım,(YY)
- VV - dikey (vertical) iletim ve dikey geri alım(DD)
- HV - yatay iletim ve dikey geri alım (YD)
- VH - dikey iletim ve yatay geri alım (DY)

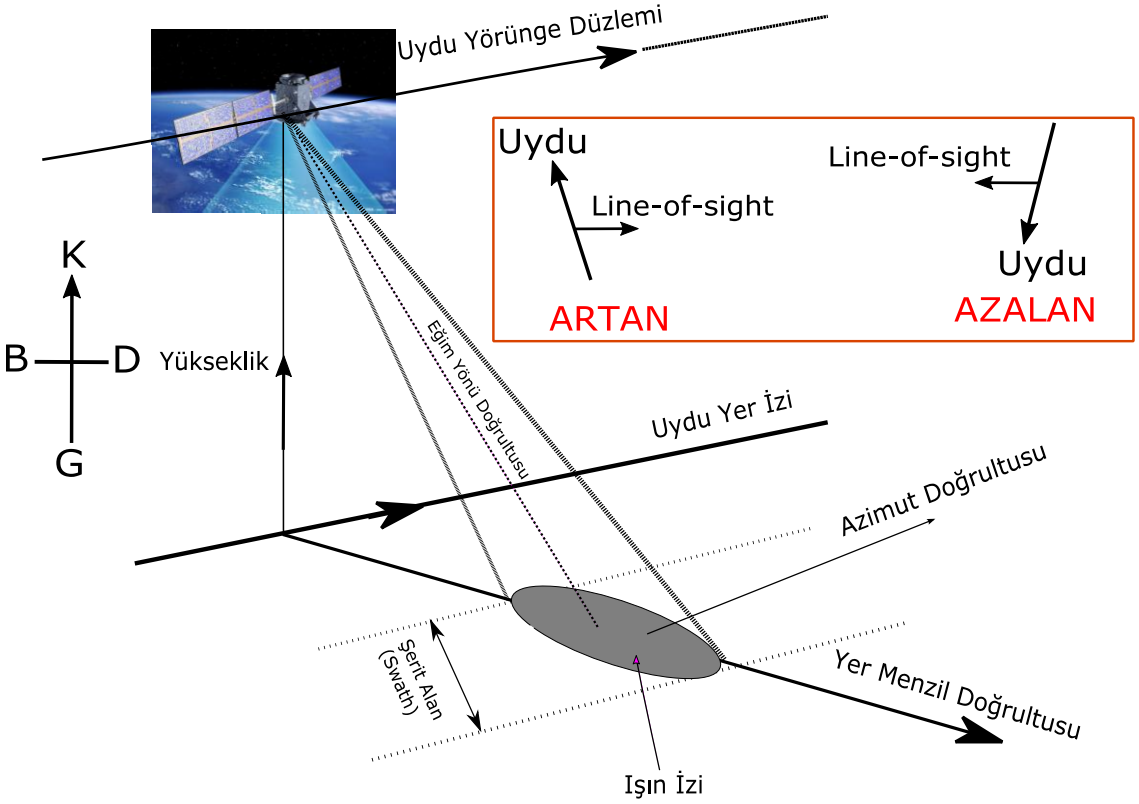
Bir diğer polarizasyon eşleştirmesi ise üç farklı şekilde karşımıza çıkabilecek ikili polarizasyon (dual polarized) eşleştirmesidir (HH ve HV, VV ve VH, ya da HH ve VV). Son olarak dörtlü polarizasyon (four polarizations) eşleştirmesinden söz etmek mümkündür (HH, VV, HV ve VH). Burada tüm kombinasyonların birarada kullanılmasıyla oluşmuş tek bir polarizasyon eşleşmesi söz konusudur.

Ancak tez çalışmamızda kullanılan uydu verilerinin (ERS-2, Envisat ASAR, ALOS PALSAR, CosmoSkyMed ve Sentinel-1) tekli polarizasyon özellikleri umulan sonuçları elde etmemizde yeterli olduğundan sadece tek polarizasyon özellikli SAR verilerinin kullanılması tercih edilmiştir.

2.2. SAR Sistemlerinin Çalışma Prensipleri

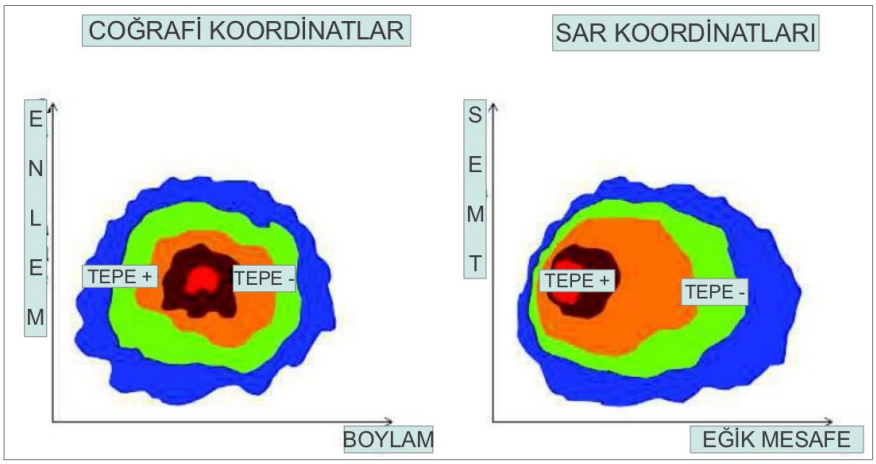
Mikrodalga ışınımlar, uydu platformu üzerinde bulunan antenler yardımıyla kısa sinyaller şeklinde yayılırlar. Sinyaller belirli bir dalga boyu, genlik ve polarizasyona sahiptirler. Yeryüzü üzerindeki hedefe gönderilen sinyallerin özelliklerinde; atmosfer boyunca iletim ve geri alım sürecinde bir takım değişimler gerçekleşir. Bu sinyaller aynı anten tarafından geri alınır ve faz, polarizasyon ve genlik cinsinden kaydedilir. Son olarak, boyutu uydu sensörüne bağlı olarak değişen ve hedef alanı kaplayan görüntü üretimi işlemi gerçekleşmiş olur (örneğin; Envisat uydusunun ASAR verisi için IS2 modlu görüntü boyutu 100 km x 100 km'lik, ALOS PALSAR verisi (FBS mod) 70 km x 70 km'lik bir çerçeveyi kapsamaktadır).

Uydu yörüngesine dik sensör-hedef doğrultusu; radarın bakış yönü (Line Of Sight -LOS) veya eğik uzunluk olarak tanımlanır. Bir radar görüntüsünün koordinatları hedef-sensör mesafesinden ve sensörün yörüngesi boyunca gösterilen konum bileşeninden oluşmaktadır. İkincisine azimut adı verilir. SAR sisteminin geometrik açıklaması Şekil 2.3'de geometrik elemanlarla gösterilmektedir.



Şekil 2. 3. SAR sisteminin geometrik açıklaması

Bir SAR görüntüsünün koordinat sistemi yer koordinat (ya da coğrafi) koordinat sisteminden farklıdır. *x* ve *y* eksenleri coğrafi sistemde enlem ve boylam, SAR sisteminde azimut ve eğik mesafe olarak değerlendirilir (Şekil 2.4).



Şekil 2. 4. Coğrafi Koordinatlar ile SAR koordinatlarının karşılaştırılması ((Hooper, 2006)'dan değiştirilerek)

2.3. İnterferometrenin Uygulanabilmesi için Gerekli Koşullar

Diferansiyel interferometre belirli koşulların geçerli olduğu durumlarda uygulanabilir. Genel anlamıyla bu koşullar şu şekilde sıralanabilir:

- Görüntü çiftleri arasındaki mesafe belirli bir değerden büyük olmamalıdır (Örneğin bu değer ERS uyduları için yaklaşık 1 km'dir (Hanssen, 2001)).
- Görüntülenecek yüzey üzerindeki eğimli kısımların çok dik olmaması gerekir. Böyle bir durumda olası bozucu etkinin ortadan kaldırılabilmesi için yeterince uzun dalga boyları gereklidir, aksi halde piksel çözünürlüğünün düşük olma olasılığı vardır (Cumming ve Wong, 2004). Eğimin derecesi, dalga boyu ve kabul edilebilir düzeydeki piksel çözünürlüğü, iki edinim arasındaki mesafe farkı (geometrik baz) ile ilgilidir.
- Başka bir koşul, yeryüzünün elde edilecek iki görüntüsünün de aynı yörünge ve doğrultuda (artan ya da azalan) gözlenmesi gerekmektedir. Dalga boyu ve polarizasyon gibi farklı sensör özelliklerine sahip uydulardan elde edilen görüntü çiftleri ile interferometre uygulaması gerçekleştirilemez. Fakat bu durum ERS-1 ve ERS-2 uyduları için geçerli değildir; çünkü iki uydunun da

sensör özellikleri benzerdir. Aynı durum Radarsat-1, Radarsat-2 ve Radarsat-3 uydu misyonları için de geçerlidir. Çünkü her iki uydu verisiyle de kendi içlerinde Tandem eşleştirmesi oluşturmak mümkündür.

İnterferometrenin uygulanabilmesi için gerekli olan koşulların detaylarını anlatmadan önce, İnterferometreyi etkileyen bazı kısıtlamalardan söz etmekte yarar vardır. Bunlar;

- geometrik uyuşumsuzluk
- zamansal uyuşumsuzluk
- kesin olmayan mutlak faz değişimlerinin ölçülmesi
- atmosferik etkiler
- faz gürültüsü

başlıkları altında listelenir. Ayrıntılara aşağıda sırasıyla yer verilmektedir.

Geometrik uyuşumsuzluk: Bir görüntünün bakış açısının diğerinkinden anlamlı ölçüde farklı olmasından kaynaklanır. Bu durum dik bazın olması gerekenden daha büyük gerçekleşmesiyle ortaya çıkar. Bundan sakınmak için, baz değerinin her koşulda kritik dik baz uzunluğunun altında seçilmesi gerekmektedir. Uydulara göre değişen kritik baz uzunluğu uygulamaya göre de farklılık gösterebilir. Örneğin deprem gibi anlık deformasyon türleri için özellikle zamansal baz uzunluk değeri çok daha kısa alınabilir.

Zamansal uyuşumsuzluk, hedef nesnenin zamanla konumun ve uyumunun değişmesi ile ortaya çıkar. Radara geri dönen yansıtılmış enerjinin iki görüntü arasında önemli ölçüde farklı olmasından kaynaklanır. Özellikle çökme gibi uzun süre zarfından gelişen yerdeğiştirmelerin gözlemlenmesinde zamansal baz uzunluğu doğal olarak dik baz uzunluğu ile orantılı olacak şekilde mümkün olduğunca uzun (300 - 500 gün) seçilebilir.

Kesin olmayan mutlak faz değişimlerinin ölçülmesi: İnterferogramlar kesin faz değişimlerinin yerine mutlak değişimleri gösterirler. Bunun anlamı, deformasyonlu bir noktanın diğer ölçümlere de referans olabileceğinin bilinmesi gerektiğidir. Bir başka deyişle, tüm değişimler; deformasyon olmadığı varsayılan tek bir nokta ile ilişkilendirilir ve böylece göreli deformasyon hesaplanmış olur.

Atmosferik etkiler: Radar sinyalleri atmosfer tabakasındaki nemli bölgelerden geçerken, sinyalin dalga boyu genişler veya kısalır. Bu genişleme ve kısalma sinyal fazının farklı yerlerle taşınmasına ve böylelikle faz değerinin yanlış olmasına sebebiyet verir. Böylesi bir hata sadece Daimi Yansıtıcılara Dayalı İnterferometre Tekniği ile giderilebilir. İleri InSAR teknikleri, özellikle atmosferik uyuşumsuzluk nedeniyle yüzey deformasyonu ölçmek için uygun olmayan koşullarda bile radar yansıtıcıların gelişmiş özellikleri sayesinde, anlamlı sonuçlar verir (Hanssen, 2001). Atmosferik faz etkileri tek bir SAR görüntüsünde mekansal olarak korelasyonludur, fakat günlerden haftalara olan zaman ölçeğinde korelasyonsuz hale gelir (Hanssen ve Feijt, 1997). Genellikle yüzey hareketleri oluşum anında neredeyse çok yüksek korelasyona sahiptir. Örneğin düşey yönlü yüzey deformasyonu aylık ve yıllık periyotlarda hemen hemen yok denecek kadar az olabilir. Bu yüzden, zamansal dalgalanmalar dışında, atmosferik etkiler tahmin edilebilir ve SAR görüntülerinin uzun zaman serilerinden veri kombinasyonu oluşturularak ortadan kaldırılabilir (Bürgmann ve ark., 2000).

Faz Gürültüsü: Faz gürültüsü ile, interferogram üzerinde noktalı bir sonucun üretilmesi şeklinde karşılaşılabilir. Eğer faz gürültüsü varsa interferogram üretilemez. Geometrik ve zamansal uyuşumsuzluk bir görüntü üzerindeki faz gürültüsüne sebep olur. Bu gürültünün büyüklüğü 0 ile (faz bilgisi yok) 1 (faz gürültüsü yok) arasında sınırlıdır.

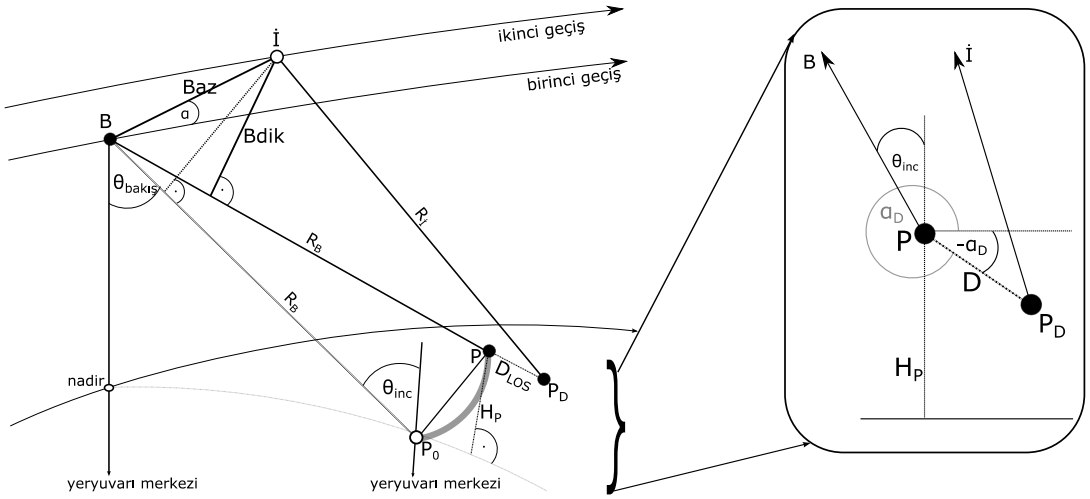
Sonuç olarak, interferogramlar bazı sınırlamaların etkisi altında kalırlar. Bunların dışında bir diğer belirsizlik ise, Bölüm 2.4.3'de detayları ile bahsedilecek yüksek deformasyon gradyanlarının ölçülemeyeceği konusudur. Buradaki limit piksel başına düşen interferometrik örüntüdür. Bir de boyutsal bir sınırlama söz konusudur. İnterferometre birçok piksel üzerinden uygulanmalıdır çünkü tek bir piksel atmosferik hata veya diğer hatalardan arındırılamamış olabilir. Dolayısıyla jeofiziksel uygulamalar için en az 10 piksel üzerinden çalışmak gerekir.

Yukarıda maddeler halinde verilen genel koşulların ve interferometre kalitesini etkileyen unsurların ardından özel durumlar geometrik ve matematiksel gösterimlerle alt bölüm başlıkları şeklinde detaylandırılmaktadır.

2.3.1. İnterferometrik Faz

İki kompleks SAR görüntüsü arasındaki interferometrik faz (φ); birincil ve ikincil geçişler için uydu ve hedef arasındaki mesafelere ilişkin (R_B, R_i) farkın

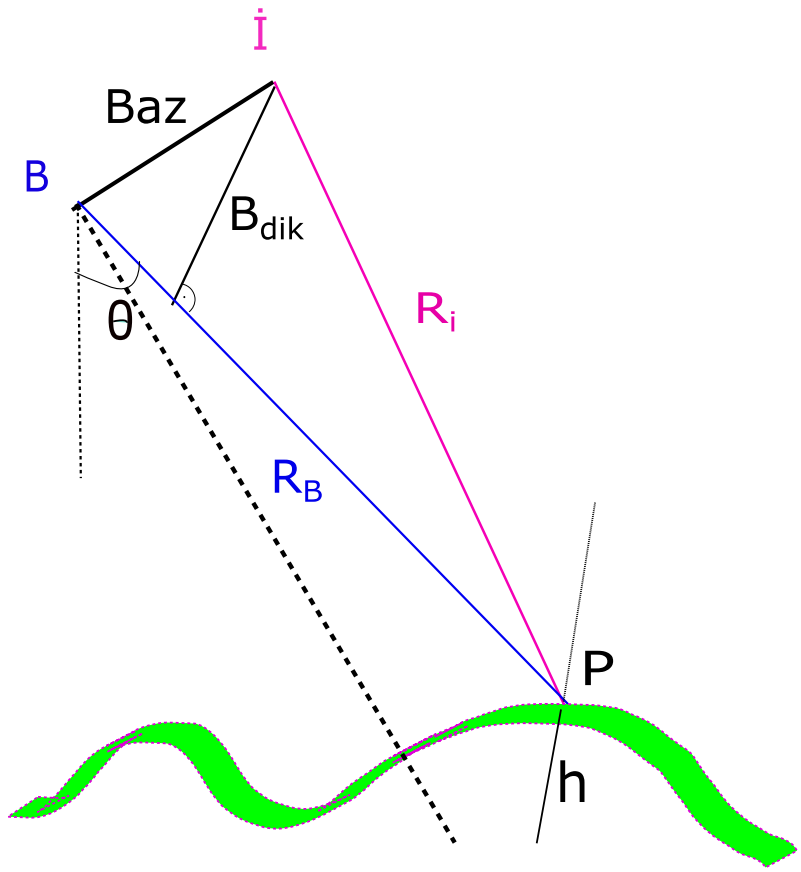
bilinmesiyle ölçülebilir (Ferretti ve ark., 2001; Colesanti ve ark., 2003). Bu işlem; bir görüntünün diğer kompleks eşlenik görüntü ile çarpımı ile gerçekleşir ve interferogram oluşturulmuş olur. İnterferogram fazı; topografyanın izini (görüntüsünü) kontur çizgileri gibi örüntüler şeklinde gösterir. Sonuç harita (interferogram) üzerinde oluşan her bir renk cetveli radarın yarım dalga boyu ($\lambda / 2$) kadar bir uzunluktur. Bu uzunluk örneğin ALOS uydusu için (*L* band) 11.8 cm, Envisat veya ERS uyduları için (*C* band) 2.8 cm, CosmoSkyMed uydusu için (*X* band) 1.55 cm'ye karşılık gelir. Sonuç interferogramlardaki her bir sıralı renk geçişi bu değerler yardımıyla ölçeklendirilir. İnterferometrik faz oluşumu için kapsamlı geometrik model Şekil 2.5'de gösterildiği gibidir.



Şekil 2. 5. İnterferometre geometrisi. İlk edinim Birincil (B),ikinci edinim İkinicil (İ) (Curlander ve McDonough, 1991; Hanssen, 2001; Lauknes, 2004; Lazecky, 2011)'den değiştirlerek.

Şekil 2.5 yeryüzünde bulunan *P* noktasının SAR prensiplerine uygun olarak Birincil *(B)* ve İkincil *(İ)* uydu geçişleri yardımıyla görüntülenme geometrisini anlatmaktadır. *P* arazi noktasında gerçekleşen yer değiştirme birinci ve ikinci geçiş zaman aralığında belirlenir ancak elde edilen deformasyon değeri radarın bakış doğrulusundadır (D_{LOS}). Bu değer ile gerçek yer değiştirmenin belirlenmesi için esas alınan temel mantık Şekil 2.5'de sağ panelde verilen büyütülmüş geometri ile ifade edilmektedir. Tez çalışmamızın uygulama kısmında elde edilen D_{LOS} deformasyon değerinin özellikle GPS sonuçları ile karşılaştırılabilmesi için söz konusu geometri sayısal örnek ile Bölüm 4.6.1'de detayları ile birlikte verilmektedir.

İnterferometrik faz (φ) oluşumu için Şekil 2.5'de verilen geometri sadeleştirildiğinde (Şekil 2.6), deformasyonu belirleyen faz oluşumu için oluşturulan eşitlikler (2.1 - 2.6) rahatlıkla yorumlanabilir.



Şekil 2. 6. İnterferometrik faz oluşumu için sadeleştirilmiş geometrik model

$$\Delta_R = R_I - R_B \tag{2.1}$$

$$\varphi = 4\pi \times \frac{\Delta_R}{\lambda} \tag{2.2}$$

$$\varphi_B = \frac{4\pi}{\lambda} \times R_B \tag{2.3}$$

$$\varphi_i = \frac{4\pi}{\lambda} \times R_i \tag{2.4}$$

$$\varphi_I = \frac{4\pi}{\lambda} \times (R_i - R_B) \tag{2.5}$$

$$I = B \times \dot{I}^* \tag{2.6}$$

λ: Dalga boyu I : Birincil ve ikincil görüntünün eşleğinin çarpımı

SAR verilerinin işlenmesi temelde, kompleks birincil (master) verinin ikincil (slave) veri ile piksel bazlı eşleştirilmesi (coregistration) esasına dayanmaktadır. Bu yolla birbirine karşılık gelen pikseller arasındaki faz farkı değeri, bozucu etkenler de ortadan kaldırılarak deformasyon oranı verir. Başka bir deyişle, uydu görüntüleri ile tekrarlı geçiş interferometri yöntemi kullanılarak iki görüntü alımı arasında oluşan zemin hareketi, iki görüntünün faz farkı $\Delta\varphi$ hesaplanarak üretilen interferogram görüntüsü ile elde edilir (2.7)

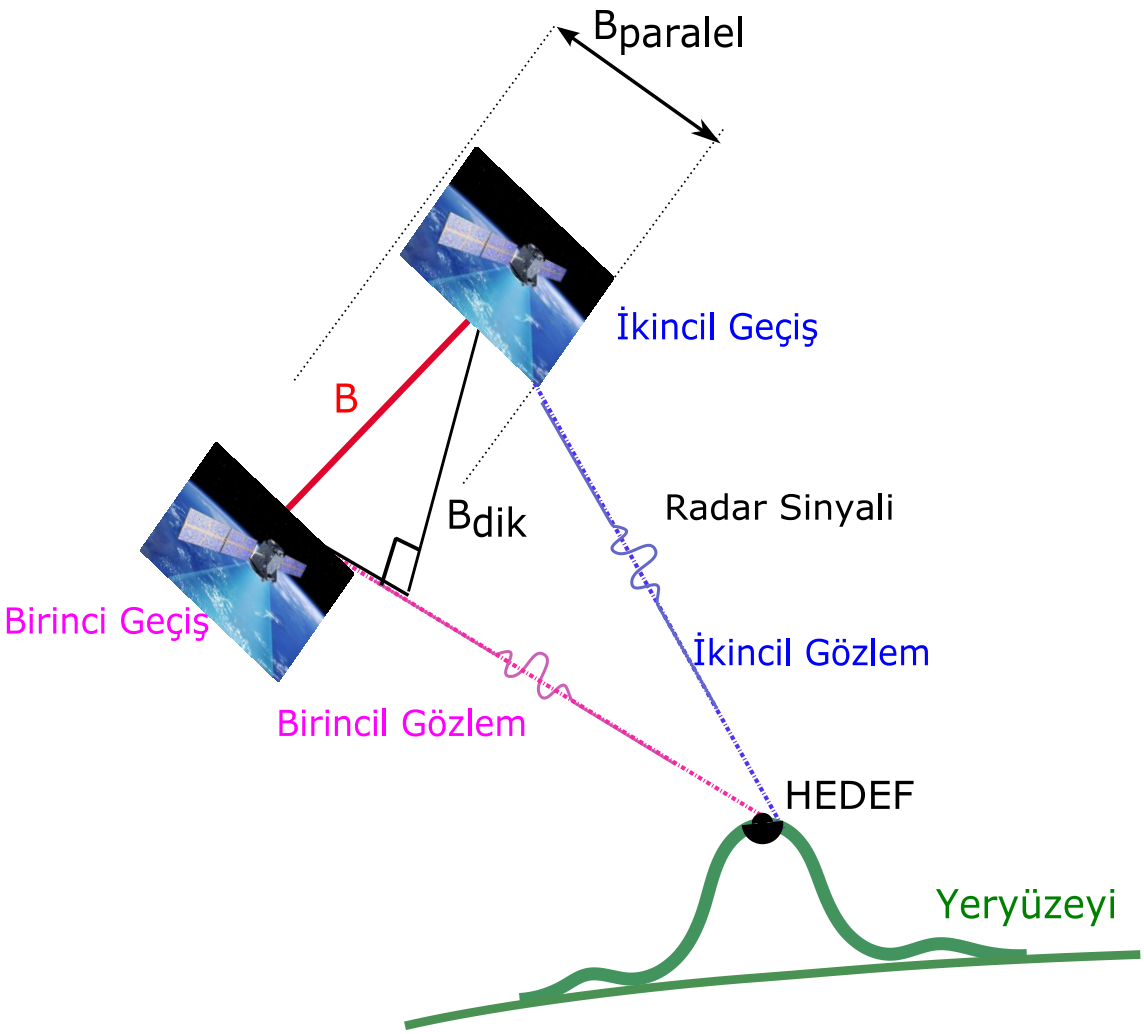
$$\Delta\varphi = \varphi_{baz} + \varphi_{topo} + \varphi_{defo} + \varphi_{atm} + \varphi_{gürültü} \quad (2.7)$$

Faz farkı, baz uzunluğundan kaynaklanan etki, topoğrafik etki, deformasyon, atmosferik etki ve diğer gürültüleri içeren bir değerdir. Söz konusu etkilerin ortadan kaldırılmasıyla deformasyona ait faz elde edilir. 2.7 eşitliği Bölüm 3'de matematiksel esaslar kısmında detaylandırılacaktır.

2.3.2. Baz (Baseline) Kavramı

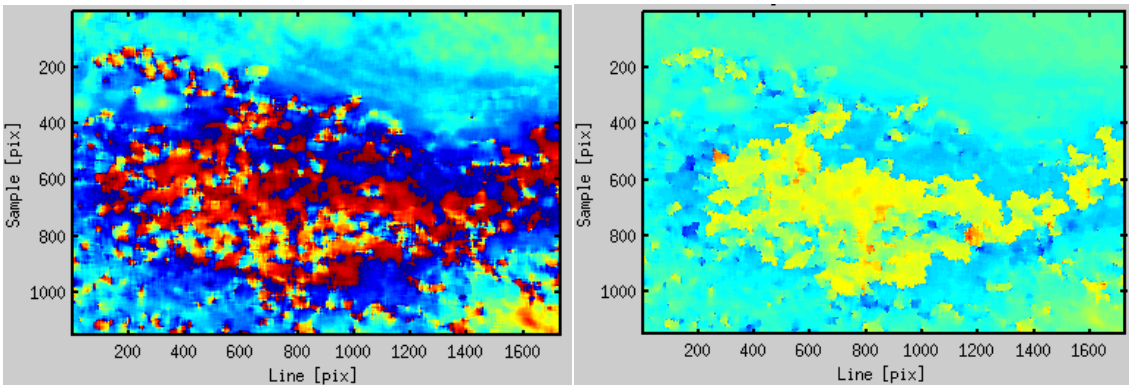
SAR interferometre tekniği ile iyi bir sonuç alabilmek için interferogram oluşturma aşamasında bazı kurallara dikkat etmek gerekir. Görüntü çiftleri arasındaki geometrik ve zamansal uyuşumsuzluk interferogramı zorlaştırır veya imkansız hale getirir. Bu uyuşumsuzluk SAR sistemlerinde iki farklı baz kavramı ile açıklanır: Dik baz uzunluğu (perpendicular baseline) ve zamansal baz uzunluğu (Temporal baseline). Bu iki değere uygulamada yeterli özenin gösterilmemesi, interferogramda faz gürültüsüne neden olur.

Dik baz uzunluğu B_{dik} ($B_{\perp}$), görüntünün farklı iki açıdan edinimi sırasında SAR platformunun yörüngesi boyunca yol aldığı radarın bakış doğrultusuna göre dik uzaklık değeridir. Zamansal baz ise gün biriminde iki görüntünün edinimi arasındaki zaman farkı değeridir. Ayrıca diğer bir durum ise, SAR uydularının kendi yörüngeleri etrafında periyodik hareketleri ile ilgilidir ki bu da paralel baz uzunluğu (B_{II}) değeri ile ilişkilendirilir (Şekil 2.7).



Şekil 2. 7. Faz gürültüsünün oluşmasına neden olan baz uzunluklarının geometrik gösterimi

Özellikle dik baz uzunluk değerleri ile ilgili yapılacak seçimde deformasyonun türüne uygun bir seçim gerekmektedir. Hızlı gelişen deformasyonlarda kısa dik baz uzunluğu yavaş gelişen deformasyonlara oranlara daha yüksek tutulabilir. Ancak örneğin Konya Kapalı Havzası için gerçekleştirdiğimiz uygulamada hassas bir şekilde seçilmesi gereken dik baz uzunluk değerinin sonuçlara etkisi Şekil 2.8'de gösterilmektedir.



$B_{\perp}$ = 30 m $B_{\perp}$ = 105 m

Şekil 2. 8. Dik baz uzunluk değerlerinin sonuç interferogramlara etkisi (uygulama alanı Konya Kapalı Havzası; 114 iz, artan mod)

Şekil 2.8-sol panelde gösterilen interferogram oluşumu için iki görüntü arasındaki dik baz uzunluğu 30 m olarak seçilmiştir. Burada renk geçişleri, sağ panelde 105 m dik baz uzunluğuna sahip interferograma göre çok daha sistematiktir. Sol resimde neredeyse bir örüntüyü tanımlayacak renk geçişleri (sarı-kırmızı-mavi) sağlanabilmişken, sağ resimde tamamen uzun baz uzunluk değeri nedeniyle gürültüye maruz kalan sonuç ortaya çıkmaktadır.

2.3.3. Seçilen Sayısal Yükseklik Modelinin Sonuç İnterferograma Etkisi

Sayısal Yükseklik Modeli (SYM), 3 boyutlu uzayda yersel yükseklik özellikleri gösteren işlemlerin ürünüdür. Ancak nadiren, yükseklik noktalarını raster ve bağıl gridler şeklinde ifade eder. SYM, topoğrafyanın en basit anlamda sayısal ortamda sunumunu sağlarken, Sayısal Yüzey Modeli (Digital Surface Model – DSM) yeryuvarının görülebilen (açık) yüzeylerini ifade eder.

Radar yeryüzü ve gezegenin yüzey modellemesi (haritalanması) için yararlı bir araçtır. Radar ile elde edilen yüzey verileri, bir arazi çalışması için gerekli olan genel jeolojik bilgilerin edinilmesine olanak sağlar. Zaman, bakış açısı, çözünürlük ve alan bilgisi gibi tüm parametreler, sonuçlar açısından önemli rol oynarlar.

InSAR, single look complex (SLC) formatındaki yapay açıklıklı radar görüntülerini eşleştirme esası ile çok yönlü radar verilerini işleyerek (processing) interferogram oluşturur ve faz katkısını kullanarak SYM, yüzey deformasyon ve değişim haritaları ve hedefler hakkında vektörel hız bilgileri elde edilmesini sağlar. İnterferogram iki görüntüdeki faz farklarını içerir ki bu fark; görüntüleme geometrisi,

topoğrafya, yüzey yer değiştirme, atmosferik değişim ve gürültü gibi parametrelerin birleşimidir.

Uydu veya hava araçlarından elde edilen verilerle oluşturulmuş yüksek kaliteli SYM ile InSAR birçok önemli deformasyon belirleme çalışmaları kapsamında uygulanabilir. InSAR yardımıyla elde edilecek santimetre altı duyarlıktaki değişim haritaları için, 10 m duyarlılığında SYM oluşturmak mümkündür (Attema ve Alpers, 1998).

InSAR'ın SYM oluşturulması için yersel kullanım ilk olarak 1974'de rapor edilmiştir. Heyelanlar, çökmeler, volkanik olaylar, depremler gibi yersel tehlikeler için kullanılmıştır.

Doktora tez çalışmamızda, özellikle Konya bölgesi için topografyanın çok büyük farklılık göstermemesi ve genellikle düz ve düze yakın topoğrafik özelliğe sahip olması nedeniyle, kullanılan SYM'nin sonuç interferograma çözünürlük bakımından bozucu etkisi çok fazla olmamaktadır. Bu nedenle Konya çalışması için kullanılan SYM'nin SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) (JPL, 2000; Van Zyl, 2001)) veya Aster GDEM (JPL, 2009) olması sonuç intereferogramlarımızda çok büyük bir fark yaratmaz. Bu nedenle görüntü işleme aşamasında, daha önce DInSAR çalışmalarında da kullandığımız SRTM verileri tercih edilmiştir. SRTM verilerinin tercih edilmesinin bir diğer nedeni de, görüntü işlemede kullanılan yazılımlar arasında SarProz'un SYM verisini otomatik olarak SRTM'den sağlamasıdır. Ancak isteğe bağlı olarak bu durum manual olarak değiştirilebilir ve Aster GDEM verisi de ihtiyaç doğrultusunda edinilebilir. Çizelge 2.2'de verilen SYM parametreleri dikkate alındığında, topoğrafya hatasının giderilebilmesi için yeterli kalitede olan 2 farklı SYM modeli çalışmamız için kullanılabilir.

Çizelge 2. 2. InSAR uygulamaları için kullanılabilecek uygun SYM'lere ait parametreler

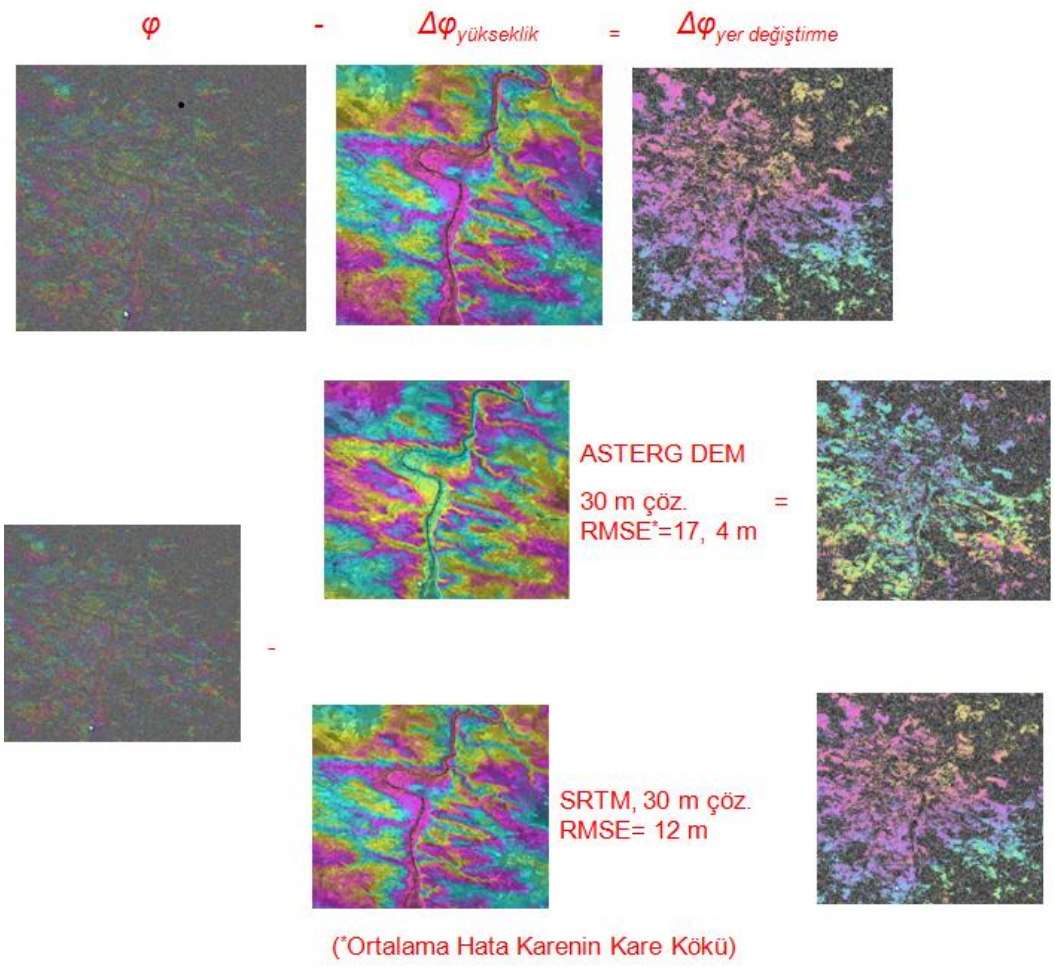
SYM Modeli	**Menzil**	**Teknoloji**	**Edinme Tarihi**	**Çözünürlük**	σ **düşey**
SRTM	-56^{o} /60 enl.	C-band InSAR	2000 Şubat	90×90	10 m
Aster GDEM	-83^{o} /83 enl.	Stereo multispec.	2000 -	30×30	15 m

SYM için kullanılan veri parametrelerinin incelenmesi ve RMSE değerleri için daha ayrıntılı bilgiye Guth (2010)'dan ulaşılabilir.

Bu çalışma için kullanılan SYM'nin çözünürlük açısından sonuçlara çok büyük etkisi olmamasına rağmen, topoğrafik özelliği büyük farklılık gösteren veya çok dik eğimli alanlar için topoğrafik hatanın sorunsuz bir şekilde kesin olarak giderilebilmesi amacıyla çözünürlüğü daha iyi olan SYM tercih edilebilir. (2.8) ve (2.9) eşitliklerinde belirtildiği gibi yer değiştirme bilgisini doğrudan etkileyen yükseklik fazının giderilebilmesi için kullanılan SYM örnekleri ve sonuçlardaki gelişme Şekil 3.1'de gösterilmektedir.

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{yerdeğerdirme} + \Delta\varphi_{yükseklik} + \Delta\varphi_{atmosfer} + \Delta\varphi_{gürültü} \qquad (2.8)$$

$$\Delta\varphi_{yerdeğerdirme} = \Delta\varphi - \left(\Delta\varphi_{yükseklik} + \Delta\varphi_{atmosfer} + \Delta\varphi_{gürültü}\right) \qquad (2.9)$$



Şekil 2. 9. Global Modeller olan SRTM ve Aster-GDEM verilerinin uygulanabilirliğinin kontrolü (Součková ve Slačíková, 2011)

2.3.4. Yükseklik Belirsizliği ve Baz Uzunluğu Değerleri İle İlişkisi

Bu alt bölümde topoğrafik yükseklik belirsizliğinden kaynaklanan sorunlar ve baz uzunluk değeri ile olan ilişkisi ele alınacaktır. Yükseklik belirsizliği (hight ambiguity - H_{amb}), InSAR tekniğinin yükseklik bilgisine karşı duyarlılığını yansıtır. İnterferogram faz bilgisi bilindiği gibi 2π uzunluğundadır ($-\pi$'den $+\pi$'ye). Bu uzunluk radarın yarım dalga boyuna karşılık gelir. Envisat için 2π'lik bir örüntü radarın bakış doğrultusunda 2.8 cm'dir. Örüntüler sadece deformasyonu işaret etmezler, topografya bilgisini de içeriyor olabilirler. Yüksek dik baz uzunluğu kullanılan durumlarda, hatalı topoğrafya bilgisi (2.7)'de φ_{topo} bileşeni ile verilen etkiyi yaratır. Doğal olarak bu etki uygun bir SYM kullanılarak giderilebilir.

Gözlemlenen deformasyon türüne göre 1 örüntü ($2\ \pi$) çok büyük bir yükseklik farkıdır (H_{amb} büyük bir rakam ise), bu durumda örneğin 10 m doğruluk için SRTM kullanılabilir. SRTM, InSAR uygulamalarında çok kullanılan bir Sayısal Yükseklik Modeli olsa da, bazı durumlarda diğer SYM'lere göre düşük kalitededir. Yine de kısa dik baz uzunluğu kullanıldığı durumlarda iyi sonuçlar verir (Hanssen, 2001). Ancak çok büyük dik baz uzunluğu değerleri ile interferogram oluşturmak durumunda kalınmışsa, bir örüntü küçük yükseklik değişimleri için bile ortaya çıkabilir (Örneğin H_{amb} =1 m / 2 π (1 örüntü için 1m)). Bu durum zaman zaman problem olabilir. Çünkü SRTM verisi kullanılsa bile residual topoğrafya hatası hala mevcuttur ve bu da deformasyon sinyallerini ayırmamızı engeller. Yani, H_{amb} bize örüntülerin gerçekten örneğin 2.8 cm'ye karşılık gelip gelmediğini anlamamıza yardımcı olur. Ya da elde edilen sonuç topoğrafik hata (yani sadece topoğrafik bilgi) olabilir (Örneğin H_{amb} =50 m ise bunun anlamı örüntülerin topografya olabileceğidir). Gerçekten bir örüntü 50 m mi yoksa 50 m'den büyük bir tepe mi bunu ayırt etmek deformasyon çalışmalarını InSAR ile belirleme açısından son derece önem arz etmektedir. Bu durumu belirlemenin en uygun yolu mümkünse arazi gözlemleri gerçekleştirmektir. Eğer arazi gözlemleri sonucunda, deformasyon umulan bölge için 50 m'yi aşan bir tepe yoksa ve bu durum InSAR sonuçları ile coğrafi olarak karşılaştırılmışsa, böylesi bir sonuç yorumlanabilir ve sonuç interferogramın topografya olmadığını, bunun gerçek deformasyon olduğunu (örneğin 2.8 cm'lik bir deformasyon gibi) söylemek mümkündür.

Özetle;

- ✓ Bir örüntü 2π 'dir (-π'den + π'ye) (Şekil 2.10)



Şekil 2. 10. İnterefogramlarda faz değişimini ifade eden renk göstergesi

- ✓ Deformasyon, yarım dalga boyuna karşılık gelen bir örüntüdür.
- ✓ Envisat, ERS ve Sentinel uyduları (C band) için bir örüntü radarın bakış doğrultusunda 2.8 cm, ALOS uyduları için (L band) 11.8 cm, TerraSAR-X ve CosmoSky-Med uyduları için (X band) 1.55 cm'dir.
- ✓ Büyük dik baz uzunluğu değeri kullanılan durumlarda, örüntüler sadece deformasyonu işaret etmezler, topoğrafya bilgisini de gösteriyor olabilirler.
- ✓ Topoğrafik hata uygun bir SYM kullanılarak giderilebilir.
- ✓ Yükseklik Belirsizliği;

$$H_{amb} = \frac{\lambda R \sin\theta}{2B_{\perp}} \tag{2.10}$$

eşitliği ile ifade edilebilir (Osmanoglu, 2011).

2.3.4.1 Kısa Dik Baz Uzunluğu'nun Önemi

Kısa dik baz uzunluğu ve topoğrafik yükseklik bilgisi topoğrafik fazların hesabında kullanılabilir. Topoğrafik faz (2.11) eşitliği ile hesaplanırsa;

$$\varphi_{topo} = \frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda R \sin\theta}\sigma_h \tag{2.11}$$

- Kullanılan uydunun Envisat ASAR olması durumunda;

R : bakış açısı doğrultusundaki düşey mesafe : 847.000 (m)

θ : bakış açısı : 22.9 (derece)

λ : dalga boyu : 0.056 (m)

Değerleri için (2.11) eşitiliği,

$$\varphi = 0.00068085\, B_{\perp} h$$

basit eşitliğine dönüşür.

SRTM yüksekliklerinin doğruluğu (%90 güven düzeyinde) 6 m olduğu göz önüne alınarak (Rodriguez ve ark., 2006),

[Durum 1] $B_{\perp}$ = 100 (m) için φ_{topo}= 0.41 rad.

[Durum 2] $B_{\perp}$ = 900 (m) için φ_{topo} = 3.68 rad.

sonucu çıkar. ALOS PALSAR için aynı dik baz uzunluklarına karşılık gelen etki değerleri sırasıyla (Durum 1 ve Durum 2 için), 0.059 ve 0.53 radyandır.

Sonuç olarak, InSAR uygulamalarında SRTM yükseklik hataları daha küçük baz uzunluğu değerleri kullanılarak azaltılabilir.

2.3.4.2 Kritik Baz Uzunluğu ve Önemi

Daha önce belirtildiği gibi, interferogram oluşumu zamanda ya da konumda farklı iki yeryüzü yansımasının (görüntünün) eşleştirilmesiyle mümkün olur. Ancak, baz uzunluğunun dik bileşeni ($B_{\perp}$), kritik değeri ($B_{\perp,kr}$) aşarsa, bu durumda faz bilgisine dayalı görünüm benzerliği korunamaz, korelasyon seviyesi düşer ve interferometre tekniği başarısız olur.

Kritik baz uzunluğu; bakış açısını etkileyen yeryüzü eğiminin düşürülmesi ile önemli ölçüde azaltılabilir. Uydu özelliklerine göre Kritik Baz Uzunluğu değerleri (2.12) eşitliği ile hesaplanabilir (Gatelli ve ark., 1994).

$$B_{kr} = \frac{\lambda R \tan\theta}{2R_r} \qquad (2.12)$$

R_r : Nominal piksel çözünürlüğü (aralıktaki piksel boşluğu)

$$\gamma = 1 - \frac{B_{\perp}}{B_{kr}} \qquad (2.13)$$

(2.13) eşitliği ile de Uyuşum (Coherence) değeri belirlenir.

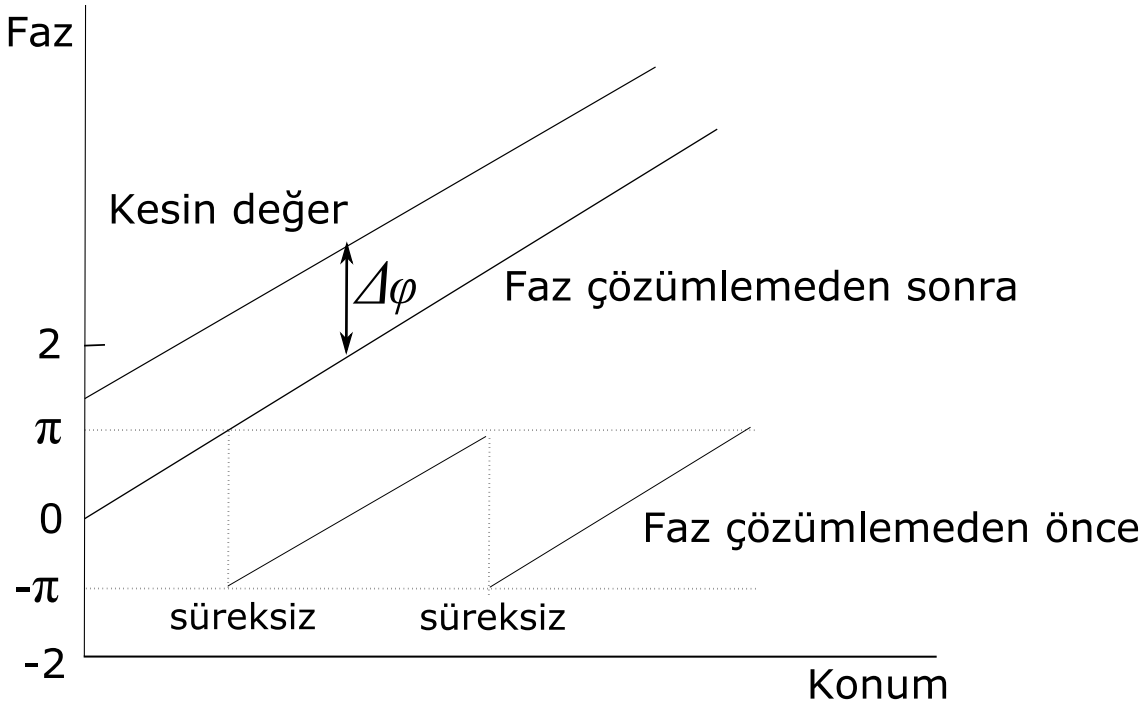
Bu tez çalışmasında kullanılan ve gelecekte kullanılması planlanan uydular için kritik baz uzunluğu değerleri (2.12) formülüne göre hesaplanmış ve uygulamada gerçekleştirilen İleri InSAR uygulamaları esnasında bu değerler dikkate alınarak veri kombinasyonları gerçekleştirilmiştir. Kritik Baz Uzunluğu değerini hesaplamak için uydu özellikleri ile ilgili gerekli değerler ve hesaplanan kritik baz uzunluğu değerleri Çizelge 2.3'de gösterilmektedir.

Çizelge 2. 3. Uydu Özelliklerine Göre Kritik Baz Uzunluğu Değerleri

	Bakış Açısı Uzunluğu (m) **R**	**Bakış Açısı (derece)** **θ**	**Nominal Aralık Çözünür. (m)** **R_r**	**Dalgaboyu (m)** **λ**	**Kritik Baz Uz. (m)** **B_{kr}**
ALOS/PALSAR FBS	870.000	38.7	5	0.236	16.449
ERS-1/2 ENVISAT/ASAR	847.000	22.9	8	0.056	1.252
TerraSAR-X	642.700	38.7	3.3	0.031	2.418
Cosmo-SkyMed	619.000	38	3	0.031	2.208
Sentinel-1	698.000	38.3	3.1	0.056	4.479

2.3.5. Faz Çözümleme

İnterfeometrik faz, [-π,+π] aralığında değişen bir değerdir. 2π'den büyük olan faz değerleri "0" değerinden yeniden başlar (phase wrapped). 0'dan küçük olan faz değerleri de "2π" değerinden tekrar çözümlenir. SYM veya deformasyon haritasını doğru bir şekilde oluşturmak için faz çözümlemesi gerekmektedir. Şekil 2.11'de faz çözümlemesinin matematiksel mantığını içeren grafiksel gösterim yer almaktadır.



Şekil 2. 11. İnterferometrik faz çözümlemesinin matematiksel grafik gösterimi

Fazın bir devri, yarım dalga boyuna eşittir:

- L-band kullanıldığında (ALOS PALSAR), 2π (λ/2) = 11.8 cm
- C-band kullanıldığında (ENVİSAT ASAR), 2π (λ/2) = 2.8 cm
- X-band kullanıldığında (CosmoSkyMed), 2π (λ/2) = 1.5 cm

Faz çözümleme aşaması; 2π'den hesaplanmaya başlanan sınırlandırılmış diferansiyel fazın, tam faz değişim sinyalinin ve oluşan deformasyon ile ilgili ikinci bağlantı probleminin geri alınması için yapılan ve SAR interferometre için en kritik ve zor işlem adımlarından biri olan aşamadır. Bu aşamada karşılaşılan problemler, fazla örüntü ve düşük uyuşumun neden olduğu faz gürültüsüden ortaya çıkan spektral örtüşme hatalarından oluşur (Casu, 2009).

Son yıllarda, bir interferograma ilişkin faz çözümleme işleminin gerçekleştirilebilmesi için etkin yöntemler geliştirilmiştir (Goldstein ve ark., 1988; Ghiglia ve Romero, 1994; Fornaro ve ark., 1996; Costantini, 1998; Ghiglia ve Pritt, 1998; Davidson ve Bamler, 1999; Chen ve Zebker, 2001). Minimum Maliyet Akışı (Minimum Cost Flow - MCF) olarak isimlendirilen algoritma aralıklı mekânsal bir

sistemde verilerin çözümlenmesine olanak sağlar. Öte yandan, büyük boyutlu interferogram veri setleri ile oluşturulan çoklu - zamansal DInSAR çalışmalarında, farklı interferometrik fazlar arasında zamansal ilişkilerin kullanılması gerekebilir. Pepe ve Lanari (2006) tarafından önerilen genişletilmiş MCF algoritması, faz çözümleme hatalarının azaltılması seçeneği sunar. Yöntem, diferansiyel faz üzerinde hem mekânsal hem de zamansal kısıtlamaların ortak bir analizini gerçekleştirir. Konu ile ayrıntılı bilgeye Bölüm 2.4.3 "Karmaşık SAR Görüntüleri" ve Bölüm 3.3 "PSInSAR veri işleme adımları" bölümünde de yer verilmiştir.

2.4. SAR Uygulamalarını Etkileyen Problemler

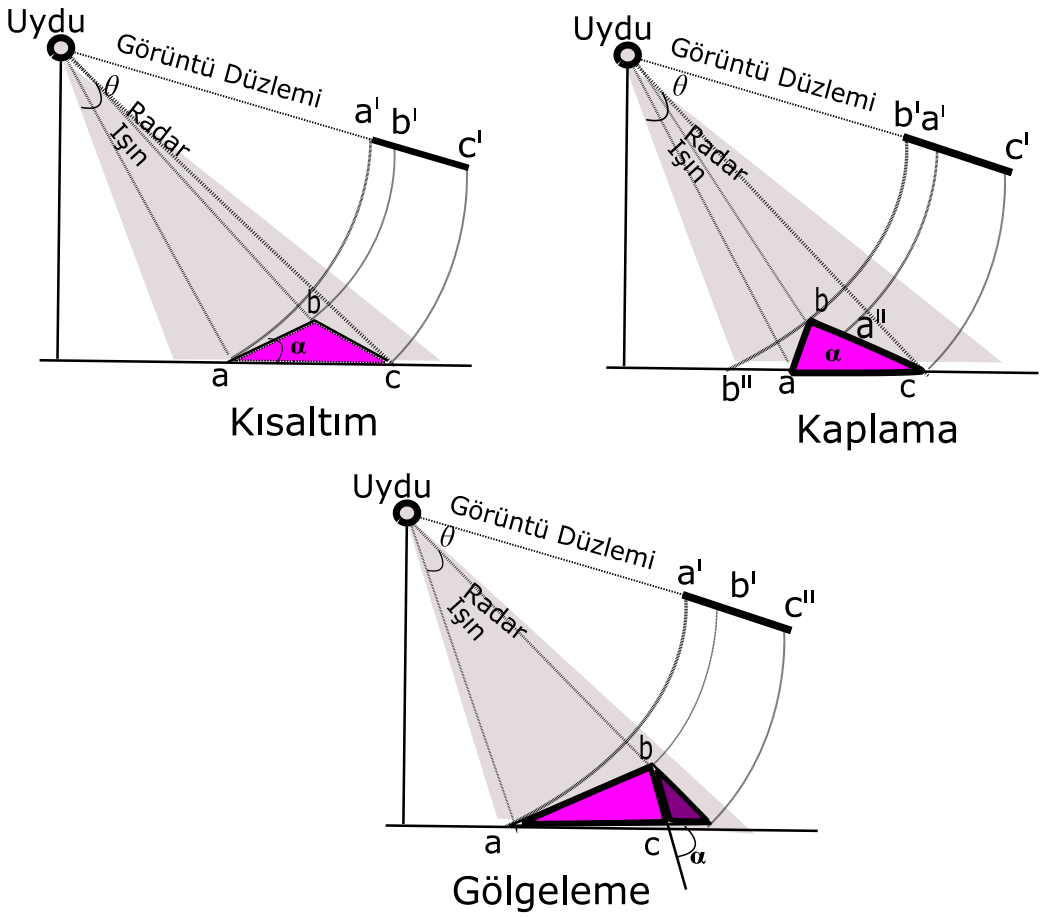
Yeryuvarının kendi ekseni etrafındaki dönme eylemi ile birlikte uyduların hızları (V_{uydu}) nedeniyle, radar sinyalleri değişikliğe uğrar. Radar yoluyla görüntülenen hedef, uydunun her geçişinde farklı Doppler frekans kaymasının etkisi altındadır. Belli bir hedeften yansıyan tüm bu kaymalar Doppler band genişliği β_{Dop} olarak tanımlanırlar (Hanssen, 2001; Kampes ve ark., 2003). Bu büyüklük hedefin görüntülediği andaki azimut ışın genişliği ve yapay açıklık boyutu ile ilişkilidir. Böylece SAR görüntülerinin odak noktası olan azimut çözünürlüğü belirlenebilir. Azimut çözünürlüğü aşağıda verilen (2.14) eşitliği yardımıyla hesaplanabilir:

$$\Delta_{azi} = \frac{V_{uydu}}{\beta_{Dop}} \qquad (2.14)$$

Yukarıda belirtildiği gibi, sistem yapılandırmasında zero Doppler frekans aralığı olması nedeniyle, uyduya en yakın aralıkta görüntülenen hedef, en baskın geri yansıtıcıya sahiptir. Bu temel prensip gözönüne alınarak, SAR uygulamalarını etkileyen üç ana problemden söz etmek mümkündrü.

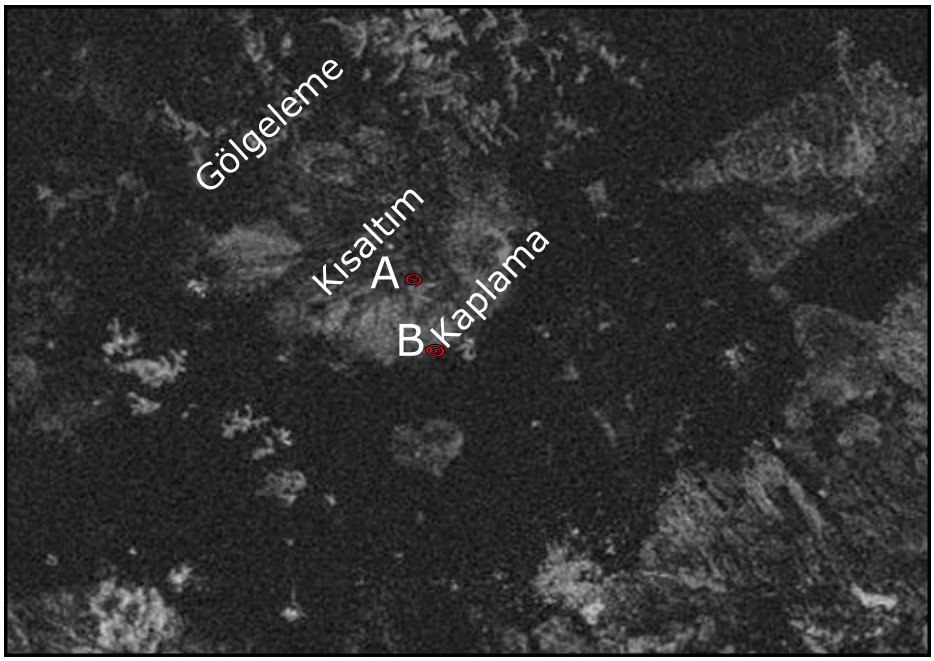
2.4.1. Geometrik Bozukluk Çeşitleri

SAR görüntüleri optik veya radar görüntüleme sistemlerinde olduğu gibi geometrik bozukluklara maruz kalırlar (Şekil 2.12-2.13). Bunlar; gölgeleme (shadowing), kısaltım (foreshortening), kaplama (layover) görüntü piksel çözünürlülüğünün değişimi, bekleme süresi ve beneklenme (speckle) olarak ifade edilir.



Şekil 2. 12. Geometrik bozukluk çeşitleri ((ESA, 2010)'dan değiştirilerek)

Görüntü üzerindeki gölgeler (shadow), uydulara sinyallerin ya hiç ya da çok zayıf yansıması sonucunda meydana gelirler. Çünkü gölge kısımlar radar sinyal vericilerine uzakta ya da görüş alanı dışındadırlar. Görüntüde gölge parlak hedef yüzeyin hemen yanında karanlık alan olarak ortaya çıkar (Şekil 2.13).



Şekil 2. 13. Geometrik bozukluk çeşitlerinin yeryüzü üzerinde gösterimi (KKH - 2853 numaralı çerçeve, azalan mod, Karadağ Bölgesi)

Tepe gibi doğal yüzeylerin eğimli kısımları, iletilen sinyal doğrultusuna dik konumda ise radarın bakış yönünde (LOS) olduğundan daha kısa yani sıkıştırılmış olurlar. Bu etki kısaltım (foreshortening) olarak adlandırılır. Özellikle dağlık bölgelerde veya kısa bakış açısı ile gözlemlenen durumlarda, yüksek kotlu bölgelerden geri yansıyan sinyal (Şekil 2.13, B noktası) A noktasına göre coğrafi olarak uyduya daha yakın olduğu için alıcıya daha hızlı ulaşır ve B noktası A'dan daha önde yer alır. Bu durum kaplama (layover) etkisi olarak sonuç görüntüye yansır.

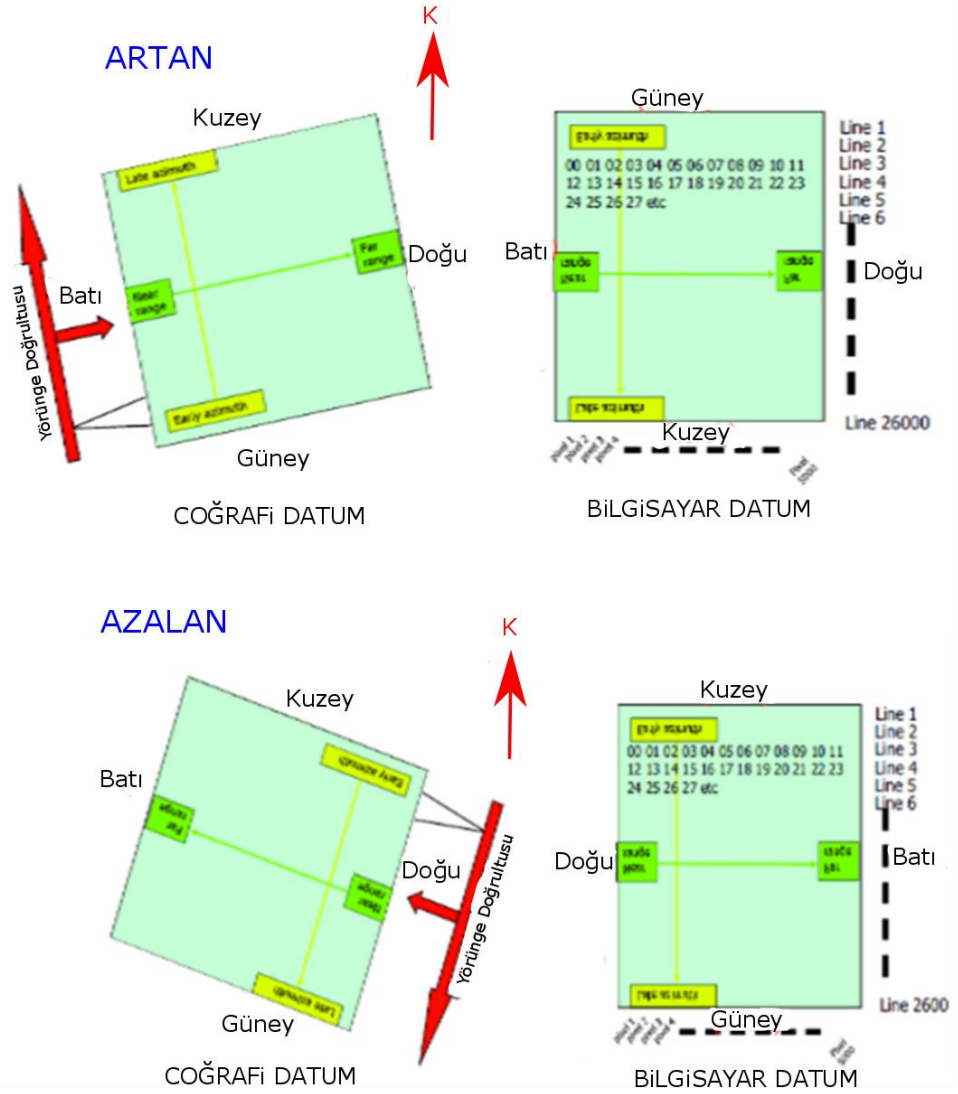
Beneklenme (Speckle) etkisinde ise radar görüntüsünün üzerindeki ayrıntılar çok koyu ve çok açık piksellerle kaplı, karıncalanmış bir görüntü şeklinde oluşur. Bunun nedeni, güçlü bir yansıtıcı gibi davranan ve belirli bir alım geometrisi sonucunda edinilen görüntüdür. Ya da belirli bir çözünürlükte tüm nesneler tarafından yansıtılan toplam radar sinyallerinin uyumu da bu duruma sebep olabilir. Böylesi bir durum düzensiz bir yoğunluk görüntüsüyle sonuçlanır.

Kaplama, kısaltım ve eğimli yerin tam ters yüzeylerinde oluşabilen gölgelenme etkilerine dayanan problemler çoğu zaman özellikle PSInSAR uygulamaları sayesinde çözülebilir. Örneğin, genellikle radarın bakış yönünde, uydunun iki bitişik izinden seçilen radar görüntüleri görüntülenebilmektedir. En uygun izin seçilmesiyle gölgelenen alanlar azaltılabilir. Ancak 60^{o}'den daha eğimli tepelerde oluşan deformasyonların

belirlenebilmesinde, PS noktasının tepenin uygun bir yerinde bulunamamasından kaynaklanan zorluklarla da karşılaşılabilir (Lazecky, 2011).

2.4.2. Artan ve Azalan Geçiş

Uydu platformları artan ve azalan olmak üzere iki farklı moda göre görüntü üretirler. Artan (ascending) modun geometrisi uydunun Güney-Kuzey geçişinde gerçekleşir ve hedef batıdan gözlemlenir, azalan (descending) modda ise hedef Kuzey-Güney geçişi sırasında doğudan gözlemlenir. Artan ve azalan modun coğrafi ve bilgisayar datum gerçekleşmesi Şekil 2.14'de tanımlanmaktadır.



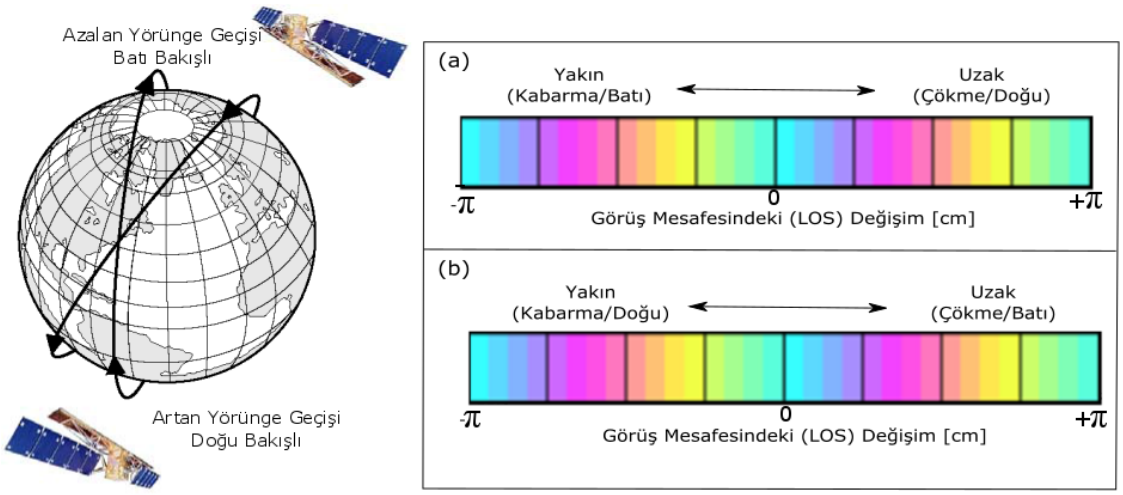
Şekil 2. 14. Artan (ascending) ve azalan (descending) geçişlerin coğrafi ve bilgisayar datum gösterimleri ((Hooper, 2006)'dan değiştirilerek)

Şekil 2.15'de coğrafik datumları karşılaştırılan artan ve azalan bakış veri edinim biçimlerinin InSAR uygulama sonuçlarına etkisi üzerinde durmak gerekir. Bunun için SAR çalışma prensibinin geometrik temeli hatırlanmalıdır. Burada SAR sitemlerinin nasıl çalıştıkları ve sonuç ürünlerin (örneğin örüntülerden (fringe) oluşan interferogramların) kırmızı-yeşil-mavi gibi görüntülenen bir renk yelpazesi şeklinde olduğu anımsanırsa, InSAR sonucunda elde edilen haritadaki renk değişimlerinin zemin deformasyon oranlarını belirlediği sonucuna varılmaktadır. Şekil 2.15'de gösterilen, yumuşak deformasyonlu zeminlerde renk geçişleri daha kalın ve göreceli olarak yumuşak; sert veya dik deformasyonlarda renk geçişleri daha kısa ve göreceli olarak serttir.



Şekil 2. 15. Deformasyon oluşum çeşitlerinin InSAR renk gösterge çizelgesi ile gösterimi

SAR uydularının gözlem esası, yüzeyi düşey yerine eğimli olarak görüntülemesidir. Zemin batıya doğru hareket ettiğinde, eğer uydu kuzeye doğru artan yörüngede gözlem yapıyorsa, yer hareketi uyduya yakındır. Tam tersi olarak, eğer uydu güneye doğru azalan modda gözlem yapıyorsa, yer hareketi uydudan uzaktır.



Şekil 2. 16. Doğu ve batı bakış perspektifine sahip kutupsal yörüngeli uyduların şematik gösterimi (sol panel).Artan (a) ve Azalan (b) yörüngelerden yapılan gözlemler (sağ panel)

Şekil 2.16'da renk gösterge çizelgeleri altında yazılı rakamlar; uydunun görüş mesafesindeki (Line-of-sight - LOS) yer ve uydu arasındaki mesafe değişimini göstermektedir. Negatif değerler uydu ve zemin arasındaki mesafenin azaldığını göstermektedir.

2.4.3. Karmaşık SAR Görüntüleri

SAR görüntüleri karmaşık (complex) sayılar içerir. SAR platformları üzerindeki sensörler sadece faz bilgisini değil, geri yansıyan sinyallerin kullanılan polarizasyona göre yoğunluk (genlik) bilgisini de kaydeder. Yoğunluk (genlik) ve faz değerleri, bir karmaşık sayıya dönüştürüldükten sonra kaydedilir (Gabriel ve ark., 1989; Zebker ve Rosen, 1994). Yeryüzü üzerindeki en küçük alan (çözünürlük hücresi) bir piksel ile ilişkilidir. Sayısal SAR görüntüsü; satır ve sütunlardan oluşan iki boyutlu bir dizilim şeklinde tanımlanabilen küçük resim elemanlarının oluşturduğu bir mozaik şeklinde görülebilir.

Özellikle InSAR zaman serisi çalışmalarında, eğer küçük veri setleri kullanılıyorsa; faz atımı (phase jump) söz konusu olabilir ve bu durumda düzgün çözümleme işlemi gerçekleştirilemez. Düzgün çözümleme olması PS noktalarının yoğunluğuna bağlıdır. Bir diğer yandan, en uygun çözümleme için görüntülenecek pikselin radarın dalga boyunun yarısı boyutunda olması gerekir (Hanssen, 2001). Birbirine yakın sabit olmayan (yer değiştiren) bir nokta ile sabit bir nokta arasındaki faz atımı, yer değişim miktarının yarım dalga boyundan daha büyük olması durumunda gerçekleşir. Başka bir deyişle, eğer deformasyon dalga boyunun yarısından büyük ise faz atımı nedeniyle deformasyon tespit edilemez. Bu durumda maksimum belirlenebilecek deformasyon oranı $[-\pi,+\pi]$ aralığındadır.

Örneğin Envisat için: λ=5.6 cm, λ /2=2.8 cm'dir. Bu durumda 2.8 cm'den daha büyük deformasyon düzgün yansıtıcı değer içermeyen kısıtlı PS noktaları ile hesaplanamaz. Bu durumun örneğin en az 100 adet iyi PS ile mekansal-zamansal çözümleme yapılarak çözülebilir (Hanssen, 2001).

2.5. Temel SAR Platformları ve Özellikleri

PSInSAR tekniği bilindiği gibi uydu sensörlerinden elde edilen radar uydu verilerini kullanır. Bu verileri sağlayan uydu platformlarından bazıları; Avrupa Uzay

Ajansı (ESA)'nın ERS, Envisat, ALOS, Sentinel; Kanada'nın Radarsat; Japonya'nın JERS, Almanya'nın TessaSAR-X (TSX) ve İtalya'nın (ASI) Cosmo-SkyMed (CSK) uydularıdır. SAR sistemlerini taşıyan uydular genellikle, dalga boyu, frekans, polarizasyon ve yörüngesel parametreler gibi bir takım özellikleri açısından eşsiz bir kombinasyonla tasarlanmışlardır. Bu nedenle, farklı radar sistemlerinden elde edilen verilerin eşleştirilmesi mümkün değildir. Fakat daha önce de değinildiği gibi ERS-1 ve ERS-2 uydularına ait veriler bir arada kullanılabilirler çünkü bu uydulara yerleştirilen SAR sensörlerine ait özellikler birbirleriyle uyumludur. Aynı durum Radarsat-1 ve Radarsat-2 uyduları için de geçerlidir.

Çizelge 2.4'de İnterferometrik SAR yeteneğine sahip ana uyduların listesi ve görevleri yer almaktadır. Ayrıca tez çalışmamız için kullanacağımız uydulara ait daha detaylı bilgiler Çizelge 2.5'de verilmektedir.

Çizelge 2. 4. İnterferometrik SAR yeteneğine sahip güncel uydu görevleri

Uydu	Şirket	Sistem Frekansı (MHz)	Dalgaboyu (cm)	Görev Başlagıç	Görev Bitiş	Kullanma Bandı
Seasat	JPL	1275	23.5	1978	1978	L
ERS_1	ESA	5300	5.6	1991	2000	C
ERS_2	ESA	5300	5.6	1995	2005	C
JERS-1	JAXA	1275	23.5	1992	1998	L
Radarsat-1	CSA	5300	5.6	1995	-	C
Envisat	ESA	5331	5.6	2002	2012	C
Radarsat-2	CSA	5300	5.6	2006	-	C
ALOS	JAXA	1270	23.6	2006	2011	L
COSMO-SkyMed	ASI	9650	3.1	2007	-	X
TerreSAR-X	DLR	9650	3.1	2007	-	X
TanDEM-x	DLR	9650	3.1	2010	-	X
SeoSAR	INTA	9650	3.1	2013	-	X
Sentinel-1	ESA	5405	5.5	2014	-	C
SAOCOM	CONAE	1275	23.5	2013	-	L
RCM	CSA	5405	5.5	2016	-	C

JPL:	Jet Propulsion Laboratory (NASA)	ASI:	İtalyan Uzay Ajansı
ESA:	Avrupa Uzay Ajansı	DLR:	Alman Ulusal Havacılık ve Uzay Araştırma Merkezi
JAXA:	Japon Havacılık Araştırma Şirketi	INTA:	İspanyol Uzay Ajansı
CSA:	Kanada Uzay Ajansı	CONAE:	Arjantin Uzay Ajansı

Çizelge 2. 5. Tez çalışması kapsamında kullanılan uydular için detay bilgiler

	ERS	ENVISAT	ALOS PALSAR	Sentine1-1	Cosmo-SkyMed
Gözlem Modu	-	IS2	Fine beam FBS/FBD	IW3	StripMap
Fırlatma Tarihi	Temmuz 1991	Aralık 2002	Ocak 2006	Nisan 2014	Kasım 2010
Yörünge Yüksekliği	790 KM	800 km	692 km	698 km	628 km
Periyodik Devir	35 gün	35 gün	46 gün	12 gün	min. 4 gün
Frekans	5.3 GHz	5.3 GHz	1.26 GHz	5.3 GHz	9.6 GHz
Bant	C	C	L	C	X
Dalga Boyu	5.66 cm	5.66 cm	23.6 cm	5.66	3.1 cm
Polarizasyon	VV	HH, VV, HV, VH	HH, VV, VH, HV	HH +HV, VV, VH	HH, VV, VH, HV
Nadir Açısı	23 der.	23 der.	34.3 der.	30-42 der.	38 der.
Kapsadığı Alan	100 km×100 km	100 km×100 km	70 km×70 km	250 km x250 km	40 km×40 km
Yersel Çözünürlük	25 m	25 m	10 m/20 m	5m/20m	3 m
Kritik Baz Uzunluğu	1.250 km	1.250 km	16.500 km	4.500 km	2.200 km

2.6. InSAR Uygulamalarında Kullanılan Yazılımlar ve Özellikleri

InSAR uygulamaları için ticari ve ticari olmayan çeşitli yazılımları kullanmak mümkündür. DORIS, ROI_PAC, GMTSAR gibi yazılımlar yaygın olarak kullanılan açık kaynak kodlu yazılım paketleridir. Söz konusu yazılımlarla çalışma alanına ve var olan veri cinsine uygun olarak klasik InSAR uygulamaları gerçekleştirilebilir. DORIS SLC (Single Look Complex) formatında, 1. Seviye (Örneğin Envisat için; Level-1,

IMS) verileri işleme kabiliyetine sahiptir. ROI_PAC ve GMTSAR raw (Örneğin Envisat için; Level-0, IMP) verileri kullanır. İstenirse bu yazılımlarla raw veriler işlenerek SLC formatına dönüştürülebilir ve StaMPS'in de çalışma yazılımlarından biri olan DORIS'te interferometre oluşturmak amacıyla kullanılabilir. İleri InSAR yöntemlerinin gerçekleştirilebilmesi için bu tez çalışması için DORIS ve GMTSAR yazılımlarının yanısıra çoklu interferogram oluşturulması amacıyla, Delft Üniversitesinde Hopper ve ark. (2004) tarafından geliştirilen StaMPS/MTI ve Perissin (2009) tarafından geliştirilen SarProz yazılımı kullanılmıştır.

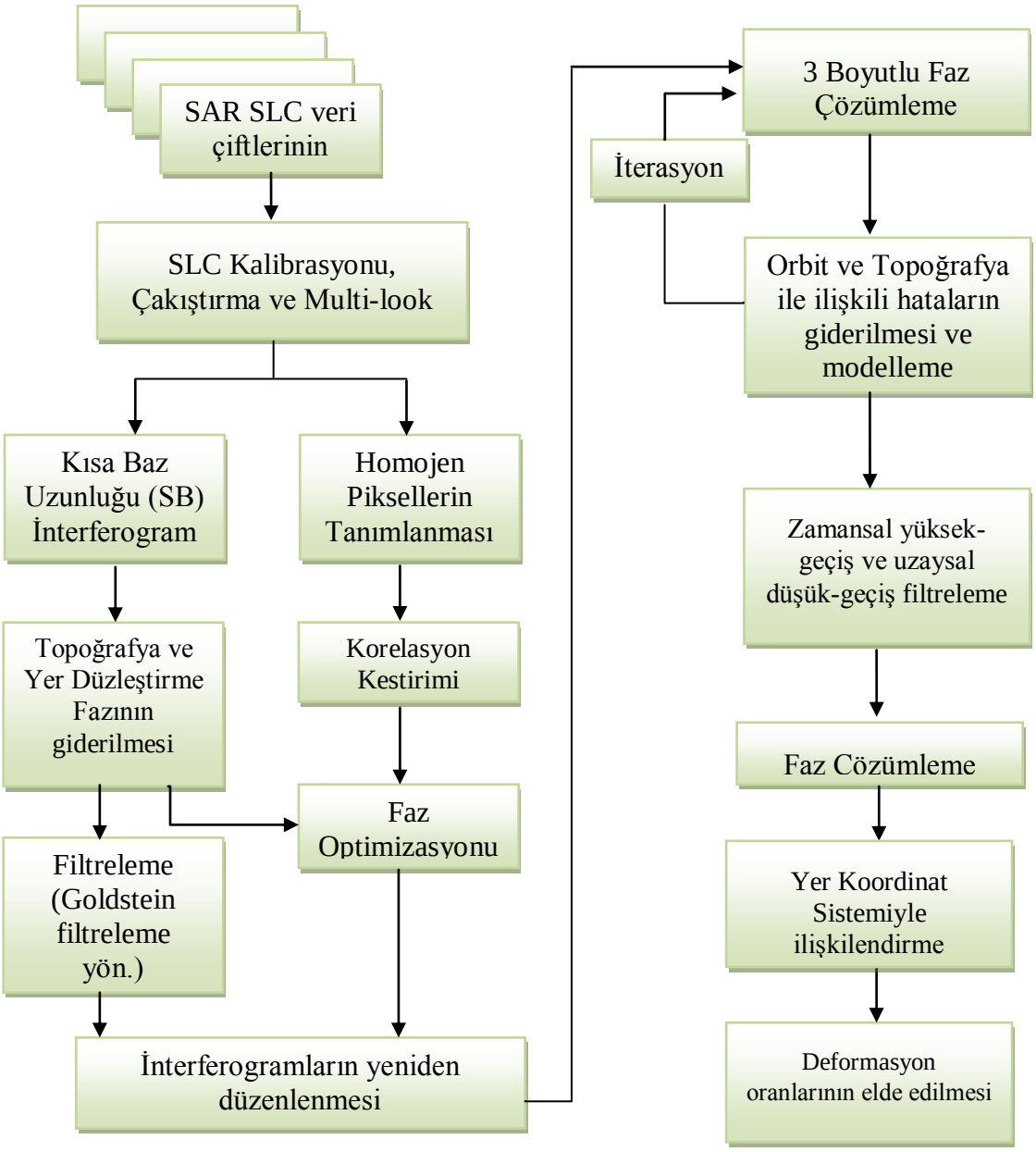
Gelişen teknoloji ile birlikte SAR verilerini işleme kabiliyetine sahip çeşitli yazılımlar geliştirilmiştir. Bu yazılımların çoğu ihtiyaca yönelik özel algoritmalar içeren yazılımlardır. Çizelge 2.6'da Standart DInSAR ve/veya Zaman Serileri (Multi-Temporal InSAR - MTI) uygulamaları için uygun olan ticari ve ticari olmayan yazılım paketleri, bu yazılımlara dair web site adresleri ve yazılımlar tarafından desteklenen uydu sensör bilgileri yer almaktadır.

Çizelge 2. 6. Standart DInSAR ve/veya Zaman Serileri (MTI) uygulamaları için ticari ve ticari olmayan yazılım paketleri

	Yazılım İsmi	**Lisans**	**Şirket /Üniversite**	**Website**	**Destekleyen Uydular (sensörler)**						
					ers	**env**	**rad**	**alo**	**jer**	**tsx**	**csk**
	Doris	Genel	Delft Tek. Üniv.	http://doris.tudelft.nl/	x	x	x	x	x	x	x
	ROI_PAC	Genel	Berkeley Üniv.	http://www.roipac.org/	x	x	x	x	x	x	x
Standart	NEST	Genel	ESA+Uluslar arası	http://nest.array.ca/web/nest/ ya da	x	x	x	x	x	x	x
DInSAR			kurul	http://www.ppolabs.com/nestdoris.html/							
yeteneği	Adore_doris	Genel	Miami Üniv.	http://code.google.com/p/adore-doris/	x	x	x	x	x	x	x
olanlar	π_rate	Genel	Leeds Üniv.	http://homepages.see.leeds.ac.uk/_earhw/pirate	x	x	x	x	x	x	x
	RAT	Genel	Berlin Tek. Üniv.	http://radartools.berlios.de/	x	x		x			
	GMTSAR	Genel	Kaliforniya Ünv.	http://topex.ucsd.edu/gmtsa/r/	x	x		x			
	Diapason	Ticari	CNES	http://www.altamira-information.com	x	x	x	x	x		
	Imagine SAR	Ticari	ERDAS/DLR	http://geospatial.intergraph.com/products/	x	x	x	x	x	x	x
Standart	EarthView	Ticari	MDA	www.mdacorporation.com/	x	x	x	x	x		
DInSAR	SARscape (ENVI)	Ticari	SARMAP	http://www.sarmap.ch/	x	x	x	x	x	x	x
ve	Gamma	Ticari	Gamma Remote Sensing	http://www.gamma-rs.ch/	x	x	x	x	x	x	x
MTI	StaMPS-MTI	Genel	Delft Tek. Üniv.	http://radar.tudelft.nl/~ahooper/stamps/	x	x	x	x	x	x	x
yeteneği	viStaMPS	Genel	UTAD	http://vistamps.utad.pt/?page_id=38	x	x	x	x	x	x	x
olanlar	DePSI*	Genel	Delft Tek. Üniv.	www.tudelft.nl/hanssen%20(for%20contacting)/	x	x	x	x	x	x	x
	SARPROZ*	Genel	Hong Kong Üniv.	Www.sarproz.com	x	x	x	x	x	x	x

2.7. InSAR Veri İşleme Adımları

InSAR uygulamalarında az önce sözü edilen işlenmiş SLC görüntüler kullanılabileceği gibi, işlenmemiş ham (raw) veriler de tercih edilebilir. İşlenmiş görüntüler için interferogram oluşturma genel anlamda Şekil 2.17'de gösterilen işlem adımlarıyla gerçekleştirilir.



Şekil 2. 17. InSAR veri işlem akış şeması

Başlangıç olarak, iki görüntü arasında geometri veya başka nedenlerle meydana gelen kayıklıkları gidermek için resimlerin birbirine göre hizalanması istenir. Hizalama işleminden sonra referans görüntüdeki her bir piksele ilişkin karmaşık değerli sinyal, diğer görüntüdeki eşlenik sinyal ile çarpılır. Ortaya çıkan sonuç yine bir karmaşık görüntü olup, interferogram adını alır. Birincil (master) ve ikincil (slave) görüntülerdeki sinyal faz farklarına karşılık gelen interferogramın faz değerleri 2π'nin aralığında sıralanırlar.

İnterferogram oluşturulmasını filtreleme aşaması izler. Yeryuvarının geometrik referans yüzeyi elipsoit interferometrik faza etki etmektedir. Etki faz değerlerinden çıkarıldığında, interferometrik düzleştirme (flattening) gerçekleştirilmiş olur.

Sonuç interferogramdaki örüntüler yerel olduklarından pratik olarak göz önüne alınabilmeleri için çözümleme (unwrapping) işlemi gerekmektedir. Çözümleme işleminde daha önce filtrelenmiş olan interferogram için seçilen filtre türü bu işleminin başarıyla tamamlanabilmesi için büyük önem taşımaktadır.

PSInSAR veri işleme adımlarının temeli ve en önemli kısmı olan Standart veri işleme adımları, kullanılan yazılımlara bağlı olarak kısmen değişiklik göstermektedir. Ancak genel anlamda DInSAR veri işlem adımları (ya da algoritmaları) aşağıda belirtildiği gibi adım adım açıklanabilir. Yaklaşık sekiz genel adımdan ve ayrıca ara işlemlerden oluşan InSAR görüntü çiftleri analizi aşamaları özetle şu şekilde tanımlanabilir:

• İlk aşamada birbiriyle örtüşen birincil ve ikincil görüntünün ilgili parametreleri, bir başka deyişle konum, elde edinim zamanı, dalga boyu, uydunun cinsi, sinyal tekrarlama frekansı ve sensör özellikleri gibi meta bilgileri okunur.

• Uydulardan edinilen SAR verileri her ne kadar radar görüntüleme prensiplerine uygun olarak uydu uçuşu sırasında (ya da öncesinde) hesaplanan uydu pozisyonunu içerse de gözleme dayanan hassas yörünge efemerisleri kullanılarak iyileştirilmiş yörünge bilgisi hazırlanabilmektedir. Büyük hatalar içeren başlangıç yörüngeler sonuç interferogramda artık faz hatasına sebep olurlar. Bu nedenle, hassas yörünge verilerinin en doğru ve güncel hali ilgili uzay ajanslarından edinilmeli ve mutlaka işleme dahil edilmelidir.

•Uydulardan elde edilen görüntü çerçeveleri genellikle büyük bir alan kaplamaktadır. Tüm görüntü alanının işlenmesi büyük bir bellek israfına, ayrıca disk alanı ve vakit kaybına neden olacaktır. Sadece deformasyon umulan bölge için SAR

verilerinin analiz edilmesi, bu doğrultuda görüntünün kesilmesi veya küçültülmesi daha uygundur. Burada dikkat edilecek en önemli nokta, ikincil görüntünün de birincil görüntü ile aynı oran ve büyüklükte kesilmesi gerektiğidir. Çünkü yeryüzünün görüntülenmesi esnasında uydu özellikleri; bakış açısı ya da uydu konumuna göre radarın bakış doğrultusu açısından büyük farklılıklar gösterir ve master ve slave görüntülerin bu aşamada tam olarak örtüşme durumlarının sağlama alınması gerekmektedir.

•Piksel çözünürlüğünü arttırma amaçlı enterpolasyon (Oversample): Bir interferogram spektrumunun yumuşatma özelliğini önlemek için, bu adımda her komşu pikseller arasında yeni noktalar için enterpolasyon yapmak mümkündür. Çözünürlük arttırma nedeni, görüntüdeki gürültü seviyesini düşürmek ve frekans kaybını önlemektir.

• İnterferometrik görüntü işlemenin en önemli gerekliliklerinden biri her bir alt piksel düzeyinde görüntülerin birbiri ile düzgün eşleşmesini sağlamaktır. Bununla görüntü çakıştırma parametreleri (coregistration parameters) kademeli olarak hesaplanır. İlk aşamada kabaca yaklaşık 30 piksel duyarlılıkla (coarse co-registration) gerçekleştirilen bu işlem, daha sonra yaklaşık 1 piksel doğruluğa, son aşamada isealt-piksel doğruluğa ulaşıncaya kadar (fine-coregistration) devam ettirilir. Böylelikle slave görüntünün master görüntüye hizalanması sağlanmış olur. Bütün bu işlemler için yüksek doğruluklu yörünge bilgisine gereksinim duyulur. Görüntü çakıştırma işlem adımında bir diğer önemli nokta, birincil ve ikincil görüntü konumlarının referans olması açısından Sayısal Yükseklik Modeli ile dahil edilmesidir ki bu durum birincil ve ikincil görüntülerin iyi korele olması açısından son derece önemlidir.

• Azimut Filtreleme: Bu işlem adımı azimut doğrultusundaki üst üste örtüşmeyen veya tam anlamıyla piksel bazında çakışmayan veri kısımları için görüntülerin filtrelenmesine imkan sağlar. Azimut filtreleme, korelasyona dayalı kaba çakıştırma işleminden sonra ve alt-piksel bazında arıtılmış-çakıştırma (fine-coregistration) işleminden önce gerçekleştirilirse sonuç interferogram üzerinde korelasyonsuzluğu gidermek açısından daha etkilidir.

• Birincil ve İkincil Görüntülerin aynı hizaya sokulması için oluşturulan matematiksel model: Görüntü çakıştırma (coregistration) parametreleri kullanılarak belli bir aşamanın iki boyutlu polinom modeli, ikincil görüntünün birincil görüntüye hizalanma oranı ile ilgili davranış biçiminin belirlenmesi şeklinde tanımlanabilir.

• İkincil Görüntünün tekrar örneklenmesi (Resampling): Matematiksel model kullanılarak, ikincil görüntü alt-piksel duyarlılığında uygun olacak şekilde birincil görüntüye bazı enterpolasyon yöntemleri kullanılarak örneklenir.

• Aralık (Range) Filtreleme: SAR sistemlerinde kullanılan sensörlerin görüntüleme açılarında biraz fark olması nedeniyle, aralıktaki spektrum tam olarak örtüşmez, bu nedenle görüntü işleme adımları arasında yer alan aralık filtreleme işleminin gerçekleştirilmesi sonuç interferogramın iyileştirilmesi açısından önemlidir. Aralık filtreleme genellikle uydu konumları arasındaki büyük uzaysal baz uzunluğuna (dik baz uzunluğu) sahip olan SAR veri çiftleri ile gerçekleştirilen işlemler için çok daha yararlıdır.

• İnterferogram Hesaplama: İnterferogram, faz farkları hakkında gerekli bilgiyi içeren her iki görüntüye ait dalgaboyu, genlik değeri ve faz değerlerinin kompleks çarpımı şeklinde hesaplanır.

• Yeryuvarı Düzleştirmesinin Doğrulanması: Bu aşamada, görüntü koordinatları (WGS84) için kullanılan yüzey referans sisteminin neden olduğu faz değişim trendleri hesaplanır ve ayrıca hassas yörünge verilerine dayalı olarak üretilen interferogramdan çıkartılır.

• Topografik Fazın Filtrelenmesi: Bu işle adımı ile; yüzeydeki deformasyona bağlı olarak sadece bir faz değerinin elde edilmesi için topografyadaki gereksiz faz katkısı, bazı sayısal yükseklik modelleri yardımıyla filtrelenebilir.

• Faz Filtreleme: Diferansiyel interferogramdaki gürültüyü azaltmak ve/veya sonuç interferogramda ortaya konulan örüntüleri daha belirgin hale getirmek için, faz görüntüsü kernel yöntemi kullanılarak filtrelenir, genellikle Hızlı Fourier Dönüşümü sonrasında uygulanır.

• Faz Çözümleme: Radar interferometrenin en zor görüntü işleme aşaması faz değerinin tamamının tahmin edilme aşamasıdır. Çünkü radar anteni ve hedef arasındaki dalga devri sayısı ölçülememektedir. Fakat sadece bir dalga periyodunun bir kısmı belirlenebilmektedir ki bu çözümlenmemiş faz (wrapped phase - ϕ) olarak isimlenidirlir, çeşitli algoritmalar ile tam çözümlenmiş fazın oluşturulabilmesi için çalışmalar yapılmaktadır. Söz konusu algoritmalardan en etkin olanı Bölüm 2.3.5'de bahsedildiği gibi Minimum Zarar Akışı (Minimum Cost Flow - MCF) yöntemidir. Faz çözümleme işleminin klasik InSAR çalışmalarında oldukça karmaşık olmasına karşın, İleri InSAR uygulamalarında bu durum özellikle kısa baz uzunluğu (SB) yönteminde elde edilecek sonuçlar için daha kolaydır. Görüntü işlemede sadece deformasyon umulan alan için

yapılmış küçük alanların işlenmesi esnasında bu sorun neredeyse tamamen ortadan kalkar, bunun nedeni çoklu interferometre tekniğinde sadece PS noktalarının da kullanılması durumunda, klasik InSAR uygulamalarındaki gibi ağır bir faz çözümleme işlemine gerek duyulmamasıdır.

• Radar Bakış Açısındaki Faz Değerlerinin Elipsoidal Yüksekliğe Çevrilmesi: Bu işlem, radarın bakış açısındaki çözümlenmiş fazdan radar kodlu sistemdeki yüksekliğin hesaplanması yoluyla yapılır. Daha sonra her bir pikselde referans elipsoidine (WGS84) göre coğrafi kodlama işlemi gerçekleştirilmiş olur.

Birincil ve ikincil görüntülerin daha iyi kombinasyonunun sağlanması veya alternatif filtreleme işlemleri için birçok farklı yöntem kullanmak mümkündür. Aynı zamanda örneğin DORIS yazılımının içinde, Sayısal Yükseklik Modeli ve birincil görüntü arasındaki zamanlama hatası da; yörüngesel bilgiler ve topoğrafik veri bilgileri ile simule edilmiş yapay birincil görüntü genliği kullanılarak da tahmin edilebilir. Birincil görüntü zamanlamasını geliştirdikten sonra, SYM ya da interferogramlardaki hesaplanmış referans fazının kullanılmasıyla çakıştırma metotları da kullanılabilir. İleri filtrelemeye örnek olarak, bazı atmosferik modeller, atmosfer üzerindeki faz değerlerinin azaltılması için kullanılabilir. Atmosferik doğrulama için StaMPS yazılımında kullanılmak üzere Bekaert (2015) tarafından geliştirilen TRAIN – (Toolbox for Reducing Atmospheric InSAR Noise) modülü kullanılmaktadır (http://homepages.see.leeds.ac.uk/~eedpsb/TRAIN/version_1beta/TRAIN_manual.pdf).

Bu işlemlerden sonra, PSInSAR çalışmalarına esas olmak üzere, PS noktalarının seçimi ve atmosferik doğrulama gibi işlem adımlarıyla devam eden PSInSAR analizlerine geçilir.

Şimdiye kadar anlatılan işlem adımları klasik InSAR tekniğinin tüm aşamaları ile uygulanmasına imkan sağlayan (çözümlenmiş interferogram işlemi ile birlikte) ve bu amaçla geliştirilmiş ilk yazılım olan DORIS veri işlem adımlarının temellerini oluşturmakla birlikte, SAR veri işleme kabiliyetine sahip olan diğer tüm yazılımlarda tamamlanması gereken işlem adımları benzer aşamalardan oluşmaktadır. Bu amaçla özellikle tez çalışması kapsamında kullanılan tüm yazılımlara dair detay bilgi verilmesine gerek duyulmamaktadır. İleri InSAR teknikleri için çoklu interferometre oluşturma aşamalarına dair genel bilgiye Bölüm 3.4'de yer verilecektir.

3. ÇOKLU İNTERFEROMETRE ve PSInSAR TEKNİĞİ

Daimi yansıtıcılara dayalı interferometre (Persistent Scatterer Interferometry - PSI), yüzey hareketlerini sabit yansıtıcılar (yüzeyler) yardımıyla izleyen, interferometre tekniğidir; ikinci nesil InSAR olarak da bilinir.

Bu teknoloji, çoklu interferogram yaklaşımını kullanır. Deformasyonu tek bir interferogram çifti ile belirleyen diferansiyel InSAR'ın aksine çoklu interferogramlardan yararlanır. Teknik, 1999 yılında Milano Politeknik Üniversitesi'nde (POLIMI), SAR ekibi tarafından geliştirilmiştir (Ferretti ve ark., 2009a; Ferretti ve ark., 2009b; Falorni ve ark., 2011; Ferretti ve ark., 2011a).

Bu tekniğin uygulama alanları; çökme ve yükselme alanlarının belirlenmesi, heyelan veya toprak kayması, petrol ve doğal gaz alanlarının çıkış ve üretimi ile kentsel aktivitelerin (boru hattı, ulaşım hatları, karayolu ve tren yolu, v.b.) takibi, , sismik faylar ve volkanik alanların izlenmesi ve yapıların sağlamlığının kontrol edilmesi biçiminde sıralanabilir (Ferretti ve ark., 2011a).

3.1. PSInSAR Tekniğinin Temelleri

PSInSAR ya da kısaca PSI, uydu bazlı çoklu radar görüntülerinin analizi yardımıyla, yeryüzünde meydana gelen deformasyonların yüksek doğrulukla ölçülmesine imkân sağlayan gelişmiş bir InSAR teknolojisidir. Bu teknikle, belirli bir zaman farkında hesaplanan sinyal faz değişimleri sabit radar yansıtıcıları kullanılarak ölçülür.

PSI tekniği, birden fazla ham SLC formatında elde edilmiş SAR verilerinden üretilen çoklu interferogramları esas alır. Tekniğin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için en az 15 – 20 görüntünün kullanılması gerekmektedir (Ferretti ve ark., 2000; Hanssen, 2001). Sayı ne kadar çok olursa teknik o kadar başarılı olur.

İnterferogramlar çeşitli sayısal ve istatistiksel analizlere tabi tutularak, olası bazı belirsizliklerden arındırılmaya çalışılır. Sinyal fazındaki atmosferik bozulma veya farklı bitki örtüsü, erozyon ya da ters geometri edinimi gibi diğer bozucu etkenlerin tanınması ve kaldırılması için bu analizlerin yapılması şarttır. Böylesi bir arındırma sayesinde, yer değiştirme büyüklükleri güvenli bir biçimde tahmin edilebilmektedir.

PS (Daimi Yansıtıcı), yeryüzündeki özelliklerin yansıtılması için kullanılan "noktalar"dır. Noktalar farklı iklimsel ve atmosferik koşullara ve uydu açısındaki küçük değişimlere dirençlidir, kısaca aynı elektromanyetik davranışları sergiler.

PS noktaları genelde, beton ve metal yapılar, yeryüzünde görünen kaya parçaları veya taş blokları gibi objelerdir. Bu ve benzeri objelerin her biri nokta davranışı göstermeli, eğer söz konusu nokta deformasyon etkisi altında ise yer değiştirmenin büyüklüğü görüntünün çözünürlüğünden veya başka bir deyişle kullanılan uydunun dalga boyunun yarısından daha küçük olmalıdırlar.

PS noktaları, yer değiştirme bilgisi veren yüksek frekanslı ve yüksek duyarlıklı GPS istasyonlarından oluşan GPS ağları gibi de düşünülebilir. PS tekniğinin uygulanabilmesi için kilometrekarede en az 4–5 PS noktasının bulunması yeterlidir (Perissin ve ark., 2009). Aksi durumda atmosferik etkinin ortadan kaldırılması zorlaşır.
Her bir PS'nin yapısal özellikleri hakkında bilgi sahibi olmak, PSInSAR analizlerinin ve deformasyon ölçümlerinin daha iyi yorumlanabilmesini sağlar. Binalar, köprüler, barajlar, su boru hatları, büyük antenler gibi yapay unsurlar veya doğal büyük kaya parçalarının maruz kaldığı kuvvetler ve deformasyon tepkileri farklıdır. PSInSAR, zemin hareketini sabit yansıtıcı noktalar üzerinde ölçer. Hareket büyüklüğü milimetre doğruluğunda gözlenebilir (Ferretti ve ark., 2000; 2001).

3.2. Matematiksel Esaslar

InSAR ölçümleri topografya, yer (zemin) hareketi, atmosferik koşullar, uydular arasındaki konumsal farklılıklar ve yerin elektriksel özellikleri gibi etkenlere karşı duyarlıdırlar. Dolayısıyla bu etkenler PSInSAR tekniğinin matematiksel temelini oluşturmaktadır (Ferretti ve ark., 2001; Colesanti ve ark., 2003). InSAR faz gözlemleri tüm bu etkenlerde ortalama değişimleri temsil eder, geride kalanlar ise gürültü olarak nitelendirilirler. Çalışma konusuna göre, faz denklemi bileşenleri farklı yorumlanabilir. Örneğin hedef Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) oluşturmaksa, deformasyon gürültü olarak kabul edilebilir. Tersi durumda, yer değişimi araştırılırken topografik faz bileşeni gözlemlerden çıkarılmak durumundadır. Buna göre; InSAR gözlem denklemi,

$$\Delta\varphi = \varphi_{flat} + \varphi_{topo} + \varphi_{orbit} + \varphi_{defo} + \varphi_{tropo} + \varphi_{iono} + \varphi_{scat} + \varphi_{noise} \qquad (3.1)$$

faza etki eden bağımsız ve genellikle birbiriyle korelasyonsuz görülen büyüklüklerin toplamı biçiminde yazılır. Burada,

$\Delta\varphi$: İnterferometrik faz (iki SAR görüntüsü arasında aynı piksele ilişkin faz değişimi)

φ_{flat} : düzleştirilmiş yeryuvarı fazı

φ_{topo} : topoğrafik faz etkisi

φ_{orbit} : yörüngesel faz etkisi

φ_{defo} : yüzey (zemin) deformasyonu ile ilgili faz etkisi

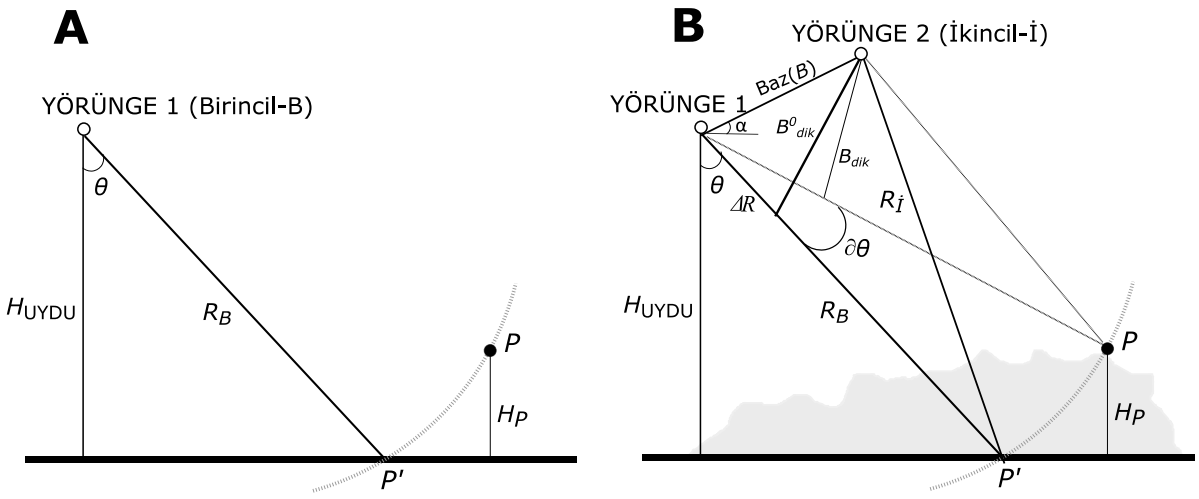
φ_{tropo} : troposferik faz etkisi

φ_{iono} : iyonosferik faz etkisi

φ_{scat} : yansıtıcıların elektriksel özellikleri ile ilişkili faz etkisi

φ_{noise}: bileşke gürültü

InSAR gözlem denkleminin oluşturulmasında gerekli olan faz bileşeni Şekil 3.1'de verilen geometrik gösterim ile açıklanabilir.



Şekil 3. 1. H_P yüksekliği için tek-geçiş interferometrik gösterim ((Hanssen, 2001)'den değiştirilerek)

Hatırlanacak olursa Şekil 3.1, daha önce Bölüm 2.3.1'de interferometrik faz konusu anlatılırken en temel hali ile ele alınmış ancak deformasyona ait faz bilgisinin ve (2.7) eşitliğinin detayları için bu bölüme atıf yapılmıştır. Şekil 3.1 (A), H_P yüksekliğine sahip P noktası ile aynı aralıkta (dizide) bulunan referans yüzeydeki P' ($H_{P'}$=0) noktası arasındaki farkını göstermektedir. P noktası için iki veri edinim zamanı sırasında olası yer değişim farkının interferometrik açıdan gözlemlenmesi ise Şekil 3.1 (B) ile ifade edilmektedir. Burada interferometrik gösterim, aynı platfrom üzerinde B - baz uzunluğu

ile ayrılan iki SAR sensörünün gözlemlenecek objeyi R_B mesafesinden algılaması mantığına dayanır. Bakış açısındaki değişim ($\partial\theta$) ise interferometrik faz yardımıyla hesaplanabilir. R_B ve uydu yüksekliği (H_{UYDU}) kullanılarak da P noktasının yüksekliğini (H_P) hesaplamak mümkündür. (H_P)'nin elde edilmesine kadar geçen matematiksel eşitlikler ve tanımlamaları (3.2)-(3.16) eşitlikleri arasında verilmektedir (Hanssen, 2001).

İnterferometre çalışmaları ile elde edilecek topoğrafik yükseklik ve yüzey deformasyonun tahmini için, iki faz gözlemi arasındaki matematiksel ve fiziksel ilişki Şekil 3.1 (B)'den çıkarılabilir. Bilindiği gibi her iki SAR görüntüsü de düzenli bir grid sistemi (fazörler) üzerindeki kompleks sayılardan oluşan genlik ve faz bilgisini, (y_B) ve ($y_İ$) bileşenleri ile içermektedirler. (3.2) ve (3.3) bu değerleri ifade eden eşitliklerdir.

$$y_B = |y_B| \exp(j y_B) \tag{3.2}$$

$$y_İ = |y_İ| \exp(j y_İ) \tag{3.3}$$

$y_İ$ gridinin sıraya koyma ve örnekleme işlemi y_B grid yeri ile ilişkili olarak gerçekleştirildikten sonra, kompleks interferogramı elde edebilmek için kompleks çarpım gerçekleştirilir.

$$\vartheta = y_B y_İ^{*} = |y_B||y_İ| \exp\left(j(y_B - y_İ)\right) \tag{3.4}$$

İki görüntüdeki P hücre çözünürlüğü için gözlemlenen faz ölçerler φ_{BP} ve $\varphi_{İP}$;

$$\varphi_{BP} = -\frac{2\pi 2R_B}{\lambda} + \varphi_{scat,Bp'} \tag{3.5}$$

$$\varphi_{İP} = -\frac{2\pi 2R_İ}{\lambda} + \varphi_{scat,İp'} \tag{3.6}$$

eşitlikleri ile tanımlanabilir. Burada, $\varphi_{scat,Bp'}$ ve $\varphi_{scat,İp'}$ her iki görüntüdeki yansıtıcı faz bileşenini ifade eder. Sinyal yayılımına dair faz etkisi ihmal edilirse, yani başka bir deyişle her iki veri edinimi için yansıtıcı karakterler birbirine eşit olarak düşünülürse ($\varphi_{scat,Bp'} = \varphi_{scat,İp'}$), bu durumda interferometrik faz (3.7) eşitliği ile ifade edilir.

$$\Delta\varphi_P = \varphi_{Bp} - \varphi_{ip} = -\frac{4\pi\left(R_B - R_i\right)}{\lambda} = -\frac{4\pi\Delta R}{\lambda} \qquad (3.7)$$

(3.7)'nin türevi (3.8) eşitliği ile tanımlanır.

$$\partial\Delta\varphi_P = -\frac{4\pi}{\lambda}\partial\Delta R \qquad (3.8)$$

Geometrik olarak Şekil 3.1 (B)'de ΔR uzunluğu yaklaşık olarak (3.9) ile hesaplanabilir.

$$\Delta R = B\sin\left(\theta - \alpha\right) \qquad (3.9)$$

Bu yaklaşım Zebker ve Goldstein (1986)'a göre uzak-alan veya paralel-ışın tahmini olarak ifade edilir. Faz belirsizliği ve yörünge efemeris hatalarından dolayı ΔR 'nin türevini almak olanaksızdır. Ancak ΔR 'deki değişim ve θ arasındaki ilişki, referans yüzey için elde edilen θ° kullanılarak (3.10) formülü yardımıyla rahatlıkla hesaplanabilir.

$$\partial\Delta R = B\cos(\theta^{\circ} - \alpha)\partial\theta \qquad (3.10)$$

(3.8) eşitliğindeki fiziksel faz gözlemleri, (3.10)'daki geometrik eşitlikle birleştirilirse, atmosferik faz değişimi ve bakış açısındaki değişim $\partial\Delta\varphi$ ile elde edilir. $\partial\Delta\varphi$ 'ye dair eşitlik (3.11) de verilmektedir.

$$\partial\Delta\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda}B\cos(\theta^{\circ} - \alpha)\partial\theta \qquad (3.11)$$

İnterferometrik faz değişimi; çözümlenmiş faz ($\Delta\varphi$) ve yörünge geometrisinden türeyen referans yüzeydeki umulan faz (ϑ) arasındaki fark olarak tanımlanır (3.12).

$$\partial\Delta\varphi = \Delta\varphi - \vartheta \qquad (3.12)$$

Referans yüzeyden uyduya kadar olan yükseklik de (3.13) eşitliği yardımıyla hesaplanır.

$$H_{UYDU} = R_B \cos\theta \tag{3.13}$$

R_{BP} aralığındaki ve bir hücre çözünürlüğünde olan P noktasının türevi ise uydunun yükseklik farkına (∂H_{UYDU}) bağlı olarak, bakış açısındaki değişim ile olan ilişkisini tanımlar (3.14).

$$\partial H_{UYDU} = -H_P = -R_{BP} \sin\theta_P^{\circ} \partial\theta \tag{3.14}$$

(3.14) eşitliğinde tanımlanan yükseklik değeri, referans yüzeyin seçimine göre değişir. Şekil 3.1 (B) yerin düz olduğu varsayılarak geometrileştirilmiş ve formüller bu yüzeye uygun türetilmiştir. Şekil 3.1 (A)'da gösterilen H_P ise aynı görüntüleme hizasında olan P için, sadece P ile P' noktasının benzer çözünürlükte olması durumunda hesaplanan yükseklik değeridir. (3.11) ve (3.14) eşitlikleri kullanılarak faz farkı ($\partial\Delta\varphi_P$) ve referans yüzeye olan yükseklik (H_P) değeri arasındaki ilişki açıklanabilir (3.15).

$$H_P = -\frac{\lambda R_{BP} \sin\theta_P^{\circ}}{4\pi B_{dik,P}^{\circ}} \partial\theta_{P'} \tag{3.15}$$

(3.15) için kullanılan $B_{dik,P}^{\circ}$ bileşeni (3.16) yardımıyla hesaplanır.

$$B_{dik,P}^{\circ} = B\cos\left(\theta_P^{\circ} - \alpha\right) \tag{3.16}$$

Böylelikle P'nin yüksekliği ve interferometrik faz değişimi (deformasyon da interferometrik faz değişiminin bileşenlerinden biridir), (3.2) ve (3.16) arasında tanımlanan eşitlikler yardımıyla hesaplanmış olur.

3.3. PSInSAR Tekniğinde Kullanılan Veriler ve PS Ölçüm Duyarlılığı

Bilindiği gibi PSInSAR tekniği kullanılarak, yer değiştirmeler radarın bakış yönündeki (line-of-sight) her bir PS için ölçülebilir. Orta çözünürlüklü uydu sistemleri (ERS, Envisat gibi), yüksek çözünürlüklü SAR uydu sistemleri ile karşılaştırıldığında (örneğin TerraSAR-X veya COSMO-SkyMed gibi), kilometrekarede yüksek miktarda (yoğunlukta) PS noktaları yüksek çöznürlüklü uydular ile bulunabilir. Her bir PS'in yerini bilmek ve buna topolojik bilgiler eklemek, daha fazla duyarlılık ve daha anlamlı PSInSAR sonuçları elde etme anlamına gelir (Balza ve ark., 2011).

Kentsel alanlarda Daimi Yansıtıcı İnterferometre (PSInSAR) kullanılarak elde edilen düşey yönlü deformasyon ölçümleri (Ferretti ve ark., 2001; Hilley ve ark., 2004), mekansal çözünürlüğün artması ile yansıtıcı başına düşen birçok PS'in ölçülmesi sayesinde daha iyi sonuçlar verir (Adam ve ark., 2008).

ERS verilerinde kilometrekarede yaklaşık 100-500 PS elde edilirken, TerraSAR-X verilerinde yaklaşık 30.000 PS/km^2 elde edilebilir (Adam ve ark., 2009). Bu yüksek yoğunluk (PS sıklığı) PSInSAR analizleri için daha hassas sonuçlar verse de birçok sorunun ve problemin doğmasına da neden olmaktadır. Çeşitli PS noktaları arasındaki mekânsal ve mantıksal yakınlık beraberinde daha fazla ilişkiyi getirir. Aynı yapı üzerinde bulunan PS'lerin yer değişimi birbirleri ile ilişkilidir ve bu bilgi PSInSAR analizlerini geliştirmede kullanılabilir.

Bu tez çalışmasında PS noktalarının seçimi, deformasyon türüne ve alan karakteristiğine uygun olarak optimal düzeyde seçilmiştir. Bu oran uygulanacak İleri InSAR Teknik çeşidi (StaMPS, SBAS veya Quasi-PS, gibi) ve alan büyüklüğüne göre belirlenebilir. Örneğin, sadece Konya Kent Merkezini çevreleyen bir alanda (~1000 (Y) samples x 3500 line (X)), C bantta çalışan Envisat veya ERS uydu verileri için ortalama 2500-3000 nokta arasında PS noktası seçilmesi uygun olacaktır. PS noktalarının seçim yoğunluğu istenilen duyarlılığa göre manüel olarak ayarlanabilir. Kent merkezlerinde özellikle X bantta çalışan uydular için yansıtıcı özelliği yüksek olan objelerin (binalar, yüksek yapılar, v.s.) daha çok olması nedeniyle çok daha fazla nokta olabilir, bu durumda da yine optimal düzeyde nokta yoğunluğuna dikkat edilmelidir.

X bantta işlem gören TSX (TerraSAR-X) ve CSK (CosmoSkyMed) verileri kullanılarak, yüksek zamansal ve mekansal çözünürlük elde edilebilir. X band verileri ile bir PS 2 m'de bir olan aralıklarla bulunabilir (Balza ve ark., 2011). Örneğin, ERS kullanılarak ancak 50 m veya 100 m'de bir PS bulunabilir. ERS'de yansıtıcının bir köşesinden elde edilen PS'in yaklaşık 27 cm'lik bir uzunluğa sahip olması gerekirken, bu değer X band verisi için sadece yaklaşık 6 cm olabilir (Bamler ve ark., 2009). Bu tez

çalışması için TSX verilerinin fiyatlarının akademik çalışmalar da dahil olmak üzere oldukça yüksek olması nedeniyle, akademik çalışmalar için ücretsiz olan yine X bantta çalışan CosmoSkyMed verileri kullanılmıştır. Çalışmamız kapsamında kullanılan bir diğer uydu ise Avrupa Uzay Ajansı tarafından uzaya fırlatılan Sentinel uydusudur. C bantta çalışan uydu her 12 günde bir yörüngedeki tam uçuşunu tamamlayarak veri üretimi gerçekleştirir. PSInSAR ve DInSAR çalışmaları için özellikle menzil çözünürlüğündeki gelişme sayesinde oldukça verimli sonuçlar almak mümkündür. Tez çalışmamız dahilinde kullanılan veriler hakkında Bölüm 4.4'de ve özellikleri hakkında Bölüm 2.5 (Çizelge 2.5)'de ayrıntılı olarak bilgi verilmektedir.

Özetle, PSInSAR tekniği ile gerçekleştirilen ölçüm duyarlılığını üç temel faktör etkilemektedir. Bunlar:

- Görüntü sayısının yeteri miktarda olmaması,
- Seçilen PS noktalarının sabit olmaması
- PS'nin referans noktaya olan uzaklığının fazla olması şeklinde sıralanabilir.

Her bir PS için hesaplanan ortalama yer değiştirme oranı, o noktaya ilişkin korelasyon düzeyi ile anlamlılık kazanır. PSInSAR sonuçları için genellikle doğruluk; işlenmiş veri setlerinin kalitesine (görüntü edinim frekansına bağlı) ve referans noktaya olan uzaklığa bağlı olarak yılda 0.1-1 mm aralığında değişir (Hooper ve ark., 2004). Sadece yer değiştirme ölçülecekse ölçme doğruluğu yaklaşık 1-3 milimetre civarında beklenmelidir (Ferretti ve ark., 2001).

PS'nin yer değiştirme miktarı; sabit olduğu düşünülen referans PS noktasına göredir ve radarın bakış yönünde tanımlanır. Bunun anlamı, bu teknik ilk etapta deformasyonun yönünün yatay ya da düşey yönde mi olduğunu belirleyemez. Ancak, hedefin bakış açısına göre deformasyon yatay ve düşey bileşenlerine ayrılabilir. Söz konusu dönüşüm uygulama kısmında Bölüm 4.6.1.4'de ayrıntılı olarak anlatılmaktadır.

3.4. PSInSAR Tekniğinde Farklı Yaklaşımlar ve İşleme Adımları

Bölüm 3.2'de bahsedilen InSAR ve PSInSAR uygulamalarının temel mantığına dayalı olarak; çoklu interferometre uygulamalarında, görüntü çiftlerinden elde edilen

interferogramların bir zaman serisi olacak şekilde eşleştirilmesi için geliştirilmiş birçok farklı algoritmadan söz etmek mümkündür. Geliştirilen farklı yaklaşımlardan birçoğu, uygulama alanı ve deformasyon türüne göre ihtiyacı karşılayacak şekilde tasarlanmıştır. Ancak bu yaklaşımların kullanılabilmesi için geliştirilen yazılımların bir kısmı sadece ticari amaçlı çalışmalar için olsa da, akademik açıdan da ortak çalışmalar yapılarak açık kullanım imkanı sağlayan algoritmalar mevcuttur. Bunun yanı sıra her kullanıcıya açık olan yaklaşımlar da vardır.

Genel anlamda PSInSAR için birçok zaman serisi analizleri yöntemi geliştirilmiştir. Bunlardan en yaygın olanları aşağıda sıralanmaktadır:

- Daimi Yansıtıcı InSAR (Permanent Scatterer InSAR (PSINSAR^{TM})) (Ferretti ve ark., 2000; 2001)

- Delft InSAR (Delft PS-InSAR processing package (DePSI)) (Ferretti ve ark., 2001; Kampes, 2005)

- Kalıcı Yansıtıcı İnterferometre (Persistent Scatterer Interferometry (PSI)) (Kampes, 2005; Kampes, 2006)

- Quasi-PS (Quasi-Permanent Scatterers - QPS) / Minimum spanning tree (MST) (Perissin, 2009)

- Small Temporal Baseline Subset (STBAS) (Hong ve ark., 2010)

- Kısa Baz Uzunluğu İnterferometre (Small Baselines Interferometry (SBAS)) (Berardino ve ark., 2002)

- Kalıcı Yansıtıcılar için Standford Yöntemi (Standford Method for Persistent Scatterers (StaMPS) - Çoklu Zamansal InSAR (Multi-Temporal InSAR - MT-InSAR) (Hooper ve ark., 2004))

- Sıkıştırılmış SAR (Squeeze SAR by TRE^{TM} (SqueeSAR^{TM})) (Ferretti ve ark., 2009a).

Yukarıda sözü geçen algoritmalar hemen hemen birbirine benzer interferogram ve zaman serisi oluşturma işlem adımları içerse de, sadece PS noktalarının seçimi, noktalar arasında kurulan ilişki ve çözümleme işlem adımlarında kullanılan farklı algoritmalar açısından çeşitlilik gösterirler. Örneğin, PSI algoritmasının genel

prosedürleri, DePSI ve PSInSAR^{TM} ile çok basit teori faklılıkları dışında benzer çalışma prensibine sahiptirler. Bu yöntemler bir SAR çözünürlük hücresinden daha küçük boyuttaki PS'leri kullanır (Ferretti ve ark., 2001). Bu yüzden, PS'ler, baz uzunluğu uyuşumsuzluğundan (baseline decorrelation) etkilenmezler (Bölüm 2.3.4.2'de de bahsedildiği gibi, kritik baz uzunluğu değerinin dik baz uzunluğu değerinden büyük olması gerekir). Baz uzunluğu uyuşumsuzluğu olmadan elde edilen tüm veriler interferogram oluşturmak için kullanılabilirler ki bu da söz konusu algoritmaların avantajlı yanıdır.

SBAS ve QPS tekniklerinin detaylarına ve yöntem karşılaştırılmasına uygulama bölümünde yer verilmiştir. STBAS algoritması ise SBAS yaklaşımına benzemektedir. Aralarındaki en büyük fark STBAS'da interferogram eşleştirme kriteri sadece kısa zamansal baz uzunluklarına dayanır. Bir sonraki bölümde interferogram eşleştirme ayrıntıları verilecek olan QPS tekniği ile algoritma detayları büyük ölçüde benzerlik gösterir.

SqueeSAR^{TM} tekniğinin algoritma detayları ticari bir yazılım olması sebebiyle paylaşılmamaktadır. Ancak bu tekniği diğerlerinden ayıran en önemli özellik; zaman serisi oluşturmak için kullanılan kalıcı ve dağılmış yansıtıcı PS noktalarının birbiriyle olan birleşim (kombinasyon) faklılığından kaynaklanır. PSI, StaMPS, SBAS gibi yöntemlerde ya sadece kalıcı ya da sadece dağılmış yansıtıcı nokta bilgileri yardımıyla deformasyon bilgisi elde edilirken, SquueeSAR'da her iki yansıtıcı nokta bilgileri de aynı anda işleme sokularak zaman serileri oluşturulur. Algoritma bu yönüyle diğerlerine göre oldukça büyük bir avantaja sahiptir. Çünkü hem kentsel hem de kırsal alandan edinilen yer değiştirme bilgilerine güvenilebilir. PS nokta kümeleri birbirinden ne kadar uzak olursa olsun, bu kümeler ayrıca kendi içlerinde değerlendirilir ancak son aşamada tüm kümelerin bir arada değerlendirilmesi yapılarak kesin sonuç tüm çalışma alanı için güvenilir bir şekilde elde edilebilir. (Ferretti ve ark., 2009a; Ferretti ve ark., 2009b; Falorni ve ark., 2011; Ferretti ve ark., 2011a).

Tez çalışmamız için kullanılan yazılımlardan biri olan StaMPS'in algoritma detayları diğer yaklaşımlara da örnek olacak şekilde aşağıda genel hatları ile detaylandırılmaktadır.

Çoklu interferometre özelliği olan tüm PSInSAR teknikleri ile veriler işlenirken DInSAR için takip edilen işlem adımlarının hemen hemen hepsi interferogramların oluşturulması amacıyla uygulanır. Ancak burada, analize giren veri miktarının ve çalışma alanı büyüklüğünün işlem süresini doğrudan etkileyeceği unutulmamalıdır. Bu

süre kullanılan bilgisayarın özelliklerine bağlı olarak bir kaç gün veya haftaya yayılabilir.

PS noktalarının belirlenmesine bağlı olarak, StaMPS Çoklu Zamansal InSAR (MT-InSAR) yaklaşımını esas alır. Yöntem yansıtıcı özelliği görece zayıf ya da bina, yol, vb. insan yapımı hedeflerin yetersiz kaldığı arazilerde oldukça başarılıdır (Sousa, 2009).

Sonuçların başarısı görüntü çiftlerinin piksel bazında istenilen doğrulukta çakıştırılmasına bağlıdır. Bunun için diğer görüntülerle optimal baz uzunluğu değerini veren (tercihen en kısa) birincil görüntü seçilmelidir. Sabitliği belli, uygun noktaların seçimi de gerçekleştikten sonra, en büyük problem uygun faz çözümlemesi ile sonuçların elde edilmesidir.

StaMPS'in son sürümü StaMPS/MTI 3.3b1'in 8 aşamadan oluşan PSI veri işleme adımı mevcuttur. Aşağıda özetlenen bu işlem adımları hakkında daha detaylı bilgi StaMPS'in kullanım kılavuzunda bulunabilir.

1. İlk aşama girdi verilerinin (örneğin SLC verileri) ve parametrelerinin (merkez koordinat bilgisi, piksel ve satır bilgileri, alan büyüklüğü, vb.) okunmasına yönelik konfigürasyon dosyalarının hazırlanması işlemlerinden oluşur.

2. Yansıtıcı nokta adaylarının (PSCs) ve tahmini faz gürültülerinin çeşitli ön verilere bağlı olarak kestirilmesi aşamasıdır. PSC faz gürültü araştırması noktanın üzerinde bulunduğu fiziksel yapının yansıtıcı ve onun resim çiftleri arasındaki mekânsal korelasyon özellikleri sayesinde gerçekleştirilir. Bununla birlikte yerel deformasyon davranışı hakkında bilgi sahibi olunmalı ve gözlem ilişkileri uydunun band ve çözünürlük özelliklerine uygun tasarlanmalıdır.

3. PS noktalarının seçimi kestirilmiş gürültü büyüklüklerine göre gerçekleştirilir. Gürültü düzeyi yüksek noktalar görüntü işlemeyi zorlaştırır. Gürültülü pikseller eğer öngörülen eşik sınırından fazla ise PS nokta kümesinden çıkarılır.

4. 3. aşamada seçilen PS noktaları arasında temizleme işlemine son şekli verilir. Bu aşamada aynı zamanda km^2 başına düşebilecek PS yoğunluğu hakkında yüzdelik tahmin de gerçekleştirilir.

5. Bu aşama faz doğrulama aşamasıdır. Çözümlenmemiş fazdaki seçilmiş pikseller, uyuşumsuz bakış açısı için doğrulanırlar. Başka bir deyişle, bakış açısına göre SYM hatalarından kaynaklanan korelasyon hataları hesaplanır ve bu hatalar ayıklanır.

Deformasyon alanının geniş veya parçalı olması durumunda bu işlem her parça için ayrı uygulanır ve bu aşamadan sonra tüm parçalar (patch) birleştirilir.

6. Faz çözümleme işlemi 3D ve 3D_QUICK olarak adlandırılan iki farklı çözümleme yöntemi ile gerçekleştirilir. Genellikle 3D yöntemi daha iyi bir faz atlama algoritması sayesinde daha güvenilir sonuç üretir. Tabi burada PS'in sabitlik açısından güvenirliği de önemlidir. Faz çözümlemesinden önce Goldstein filtreleme yöntemi ile ön filtreleme işlemi gerçekleştirilebilir. Filtreleme parametreleri, yerleşim yerinin umulan zamansal ve mekansal değişim davranışına göre belirlenmelidir. İnterferogramda PS noktalarının %70'den fazlasında gürültü düzeyi (gürültü-sinyal oranı) görülüyorsa böyle interferogramlar veri işleme aşamasından çıkarılmalı ve işlemler 3. aşamadan tekrar başlatılmalıdır.

7. Konuma bağlı korelasyonlu bakış açısı hataları (spatially-correlated look angle error - SCLA) ve atmosferik ve yörünge hataları (atmospheric and orbit errors - AOE) kestirilir. Burada sadece seçilmiş interferogramlardan yararlanılmalıdır. SCLA hataları, dik baz uzunluğu fazla olan interferogramlarda doğru orantılı olarak artar. Bu aşamanın 6. aşama ile birlikte ikinci bir iterasyon için gerçekleştirilmesi önerilir. Böylelikle SCLA ve AOE hataları interferogramlarda en aza indirgenmiş olacaktır.

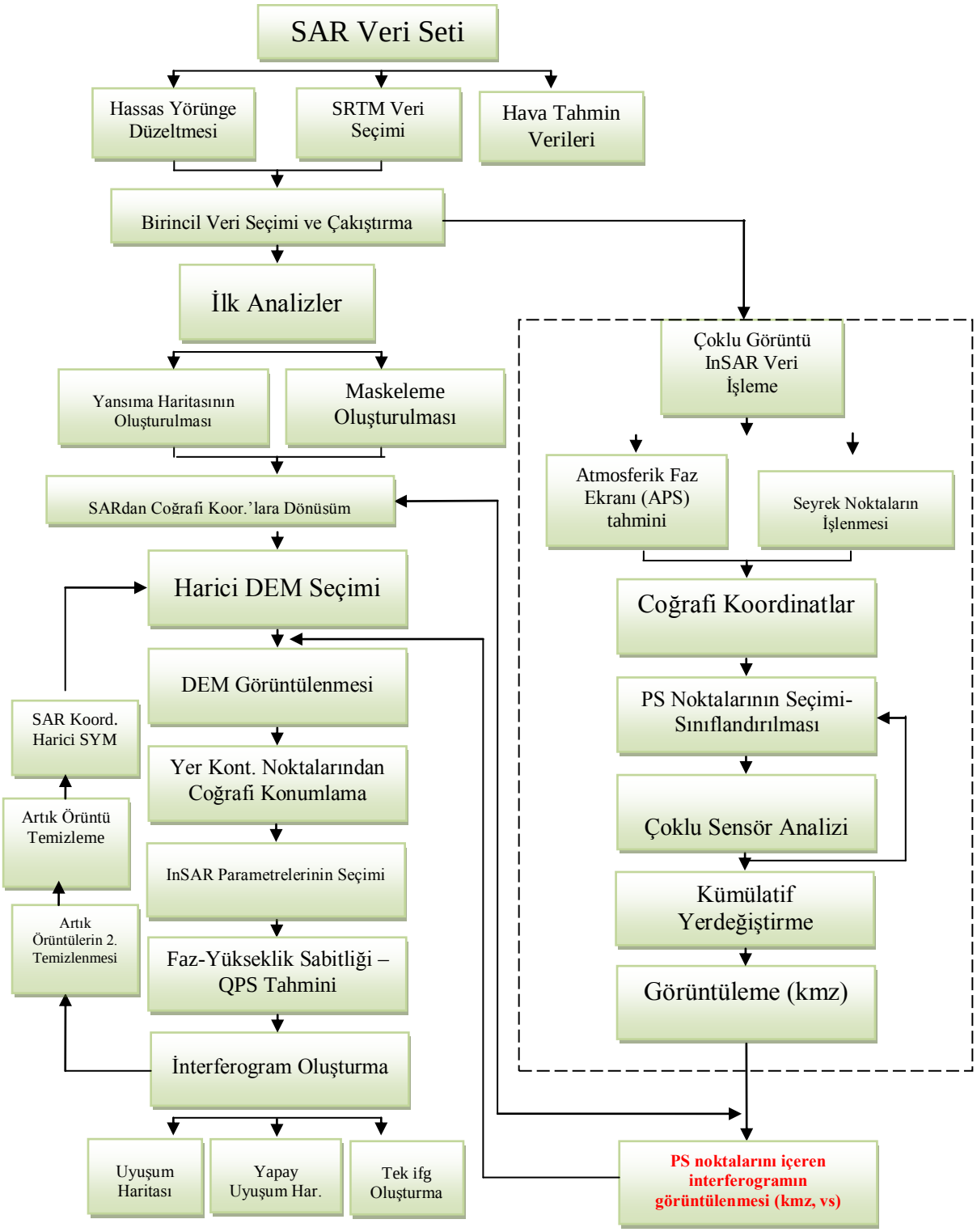
8. Son aşama isteğe bağlıdır. Sonuçların daha fazla yumuşatılması başka bir deyişle aykırı değerlerin filtrelenmesi istendiği durumlarda uygulanabilir.

Faz çözümleme aşamasında, ayrıca bazı düzenlemeler yapmak mümkündür. Uyarlanabilir Goldstein filtreleme sırasında faz çözümlemesi için bir ön filtreleme gerçekleştirilebilir (Baran ve ark., 2003). Ayrıca, olabildiğince çözümleme penceresi zaman ve yer tasarrufu açısından kolaylık sağlar. İşlemler 7. aşamadan itibaren tekrar edildikten sonra daha yumuşatılmış sonuçlara ulaşılmış olur. Yine de deformasyon sonuç haritası her zaman tekrar kontrol edilmelidir.

Tekrar özetlemek gerekirse, nokta seçimleri gerçekleştirildikten sonra yeteri miktarda interferogram üretildiği takdirde, yer değiştirme zaman serileri ve yer değiştirme oranı hesaplanabilir. Hassas bir ölçüm için, veri işlemede kullanılacak görüntü miktarının çok büyük öneminin olduğu unutulmamalıdır. Bu miktar doğrudan, birincil ve ikincil görüntü arasındaki normal baz değerini ve görüntüler arasındaki zaman dağılımını etkiler. Görüntü miktarının artmasıyla ölçme duyarlılığı da artar. Yapılan tüm bu işlemler sonucunda faz gürültüsünden arındırılmış sonuç ürün elde edilmiş olur. Ayrıca, sonuçların yörüngesel hatadan arındırılabilmesi için uygun

yörünge parametreleri kullanılarak başlangıçta hassas yörünge düzeltmesinin yapılması gerektiği de unutulmamalıdır.

Şekil 3.2'de verilen akış diyagramında PSInSAR için veri işlem adımları gösterilmektedir. Bu işlemleri gerçekleştirebilmek için yukarıda işlem sıralaması verilen Delft Üniversitesi'nde 2010 yılında geliştirilen StamPS/MTI yazılımından yararlanılabilir. Tez çalışmamızda InSAR ve DInSAR uygulamaları için DORIS, GMTSAR yazılımları ve görselleştirmek için destekleyici yazılımlardan yararlanılmıştır. İleri InSAR Teknikleri ile Zaman Serilerinin oluşturulabilmesi için ise StamPS/MTI ve SarProz yazılımlarından ayrı ayrı yararlanılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 3.2'de hem StaMPS hem de SarProz ile yapılan görüntü işlem adımları en genel anlamda gösterilmektedir.



Şekil 3. 2. PSInSAR veri işlem akış şeması

3.5. PSInSAR Tekniğinin DInSAR'dan Olan Farklılıkları

PSInSAR tekniği diğer interferometrik tekniklere göre birçok avantaja sahip olsa da uygulamada bazı zorluklar ile karşılaşılır. Bu zorluklar DInSAR tekniği için de geçerli olmakla birlikte şu şekilde özetlenebilir:

- Tarım alanlarına, otlaklara ve ormanlara ulaşan sinyaller, nadiren uydudan geri yansıtılırlar. Çünkü bu alanların yüzey karakteristikleri devamlı olarak değişim halindedir. Bu nedenle görüntü çiftleri arasında korelâsyonsuzluk meydana gelir.
- Bir diğer sınırlama su yüzeylerinin sürekli olarak hareket halinde olmasıdır. Buna rağmen sonuç görüntüde su yüzeyleri durgun görünürler. Böylesi alanlarda gerçekleşen düzenli salınım hareketleri görüntü çiftleri arasında uyuşumsuzluğa neden olur.
- Karlı alanlarda ise, karın SAR sinyallerini çekmesi nedeniyle herhangi bir yansıma gerçekleşmez.
- Diğer bir sınırlama, sensör-hedef doğrultusu boyunca hareket eden yer değiştirmelerin ölçümleridir. Bu durum dalga boyunun kesintiye uğraması ile sınırlanır. Deformasyonun kesintiye uğramayan dalga boyundan daha büyük olduğu durumlarda, tam bir değer hesaplamak mümkün olmamaktadır. İnterferometrik tekniklerde de olduğu gibi günümüz teknolojisi sadece geri dönen sinyal fazının bir parçasını çözümleyebilmektedir (unwrap).
- PSInSAR tekniği ile tespit edilebilmesi en güç alanlardan biri de, erozyonlu alanlardır. Erozyon, yeryüzünün yüzey karakterini değiştirdiği için potansiyel bir uyuşumsuz görüntünün var olmasına neden olmaktadır. Fakat PSInSAR tekniği erozyon ile ilgili sınırlamalarda DInSAR tekniğine göre daha avantajlı durumdadır.

DInSAR tekniğinde arazinin genel anlamda deformasyon bilgisi elde edilebilir. Ancak korelasyonu düşük olan alanlarda (bitki örtüsü ile kaplı, vs.) faz gürültüsü çok olacağından iyi sonuçlar alınamayabilir. Faz gürültüsünü DInSAR tekniğine göre daha net bir şekilde ortadan kaldırabilmek için sabit noktalardan yararlanılan PSInSAR tekniğini kullanmak daha uygun olacaktır. PS noktaları, görüntülerin farklı edinim tarihleri olmasına karşın spektral yansımalarında asla bir değişiklik olmayan yüksek radar yansıtıcı objelerdir.

Özetle, PSInSAR tekniğinin DInSAR tekniğinden olan başlıca farklılıkları şu şekilde sıralanabilir:

- PSInSAR yüzey deformasyonlarını DInSAR'dan daha doğru bir şekilde ölçme yeteneğine sahiptir.

- Geometrik ve zamansal uyuşumsuzluk etkilerinin giderilmesi DInSAR yöntemiyle daha sınırlı iken PSInSAR tekniği bu konuda oldukça başarılıdır.

- PSInSAR tekniği SAR görüntülerinde uzun zaman serileri kullandığı için sinyal fazındaki atmosferik etkinin giderilmesinde daha etkin iken DInSAR tekniği bu denli başarılı değildir.

- PSInSAR çeşitli geometrik edinimlerin kullanılmasında daha büyük bir esneklik sağlar. DInSAR ise normal baz kullanımda 200 metrenin üzerindeki uygulamalar için bir takım sınırlamalara maruz kalır. PSInSAR için normal baz kullanımında herhangi bir sınırlama yoktur, 200 metrenin üzerinde seçilmiş baz uzunluklarında bile problemsiz çalışma olanağı sağlar.

- Ancak PSInSAR'da görüntü işlemek için en az 15–20 görüntüye ihtiyaç duyulur. DInSAR da ise böyle bir görüntü sınırlaması yoktur, uygun koşulları içeren iki görüntüyle deformasyon analizi çok daha hızlı bir şekilde yapılabilir.

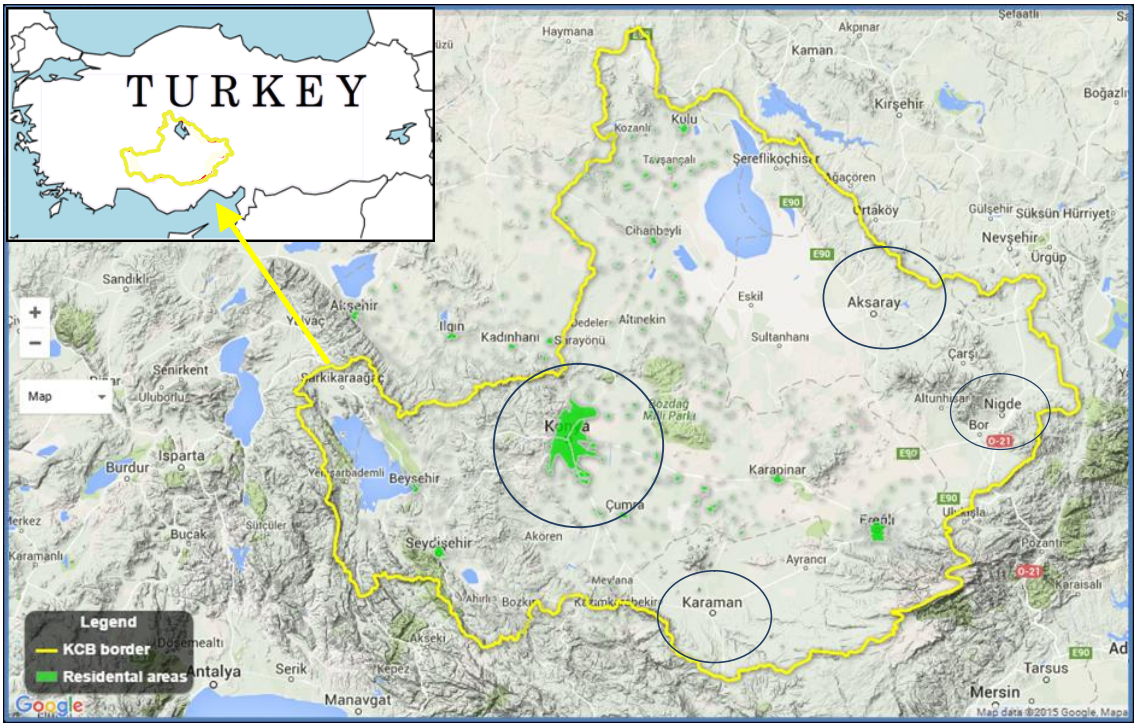
4. KONYA KAPALI HAVZASI'NDA ZEMİN ÇÖKMELERİNİN İLERİ INSAR TEKNİKLERİ İLE BELİRLENMESİ

Yeryüzünde meydana gelen yavaş ve hızlı kütle hareketleri, insan yaşamını ve çevresini önemli kayıplara uğratmaktadır. Özellikle yavaş hareket eden çökmelerin gözlemsel takibi ve incelenmesi kadar zaman içindeki değişimleri de büyük önem arz etmektedir. Bu değişimlerin en anlaşılır şekilde ortaya konması, zamana bağlı ve üç boyutlu uzayda konum bileşenlerinin ölçülmesiyle mümkün olabilmektedir. Üç boyutlu konum bileşenlerini hassas bir şekilde ortaya koyan GPS etkin bir jeodezik ölçme yöntemi olmasına rağmen, sadece nokta bazlı yer değişim bilgileri verir. Uzaktan algılama yöntemlerine oranla nokta yoğunluk dağılımı çoğu kez kısıtlıdır. GPS aksine sadece radarın bakış doğrultusunda yüksek duyarlılıkta yer değiştirme bilgisi veren InSAR teknikleri özellikle geniş alanlarda avantaj sağlar. Yüzey deformasyon karakteristiği birbirinden farklı uygulamalarda bile etkin bir biçimde kullanılabilen bu teknik, uzaktan algılama, jeodezi ve jeodinamik uygulamaların vazgeçilmez araçlarından biri haline gelmiştir.

Konya Kapalı Havza'sının farklı yüzey ve deformasyon karakterleri göz önüne alınarak gerçekleştirlen ileri InSAR teknikleri bu bölümde ayrıntılı olarak anlatılmaktadır. Çalışma alanı ve çökme ile ilgili genel bilgilerin ardından, kullanılan veriler, InSAR değerlendirme sonuçları, ve bu araştırmanın temel bulgularına ilişkin detaylar sistematik bir biçimde ele alınacaktır.

4.1. Konya Kapalı Havzası ve Özellikleri

Konya Kapalı Havzası Türkiye'nin Orta Anadolu Bölgesinde 36°51' ve 39°29' kuzey enlemleri ile 31°36' ve 34°52' doğu boylamları arasında yer alır. Yüzölçümü 4.980.534 ha olup Türkiye'nin yaklaşık %7'sini teşkil eder. Havzayı kuzeyde Sakarya ve Kızılırmak, doğuda Kızılırmak ve Seyhan, güneyde Doğu Akdeniz, batıda Antalya ve Akarçay havzaları çevrelemektedir. Konya Kapalı Havzası sınırları içinde Konya, Niğde, Isparta, Aksaray, Ankara, Karaman ve Nevşehir illerine bağlı bölgeler yer almaktadır. Ayrıca İçel ve Antalya illerinin yerleşim olmayan bazı bölgeleri de havza sınırları dâhilindedir (Şekil 4.1).



Şekil 4. 1. Konya Kapalı Havzası ((Ustun ve ark., 2014)© 110Y121 - Tübitak Projesi, web sayfası: http://galileo.selcuk.edu.tr/~kcb/)

Havza doğal topografyası nedeniyle sularını denize boşaltma yeteneğine sahip değildir. Düz bir ova (900-1050 m arasında bir yükseklik) havzanın çoğunu kaplamaktadır. Ova, havzanın yukarı su tutma birimlerini oluşturan kireç taşıyla ve volkanik dağlık alanlarla (3534 metreye varan yüksekliklerle) kaplıdır. Aynı dağlar denize drenajı da önler ve etkin olarak Türkiye'nin en büyük havzasını oluştururlar (Göçmez ve İşçioğlu, 2004). Yüksek bir plato olan Konya Kapalı Havzası'nı başlıca güneyde Toroslar ve devamında Sultan Dağları, batıda Gavur Dağları, doğuda Melendiz Dağları kuşatır. Havzanın orta kısmında ise Bozdağ ve Karacadağ gibi yükseklikler bulunmaktadır. Havzanın büyük kısmını düz ve düze yakın topoğrafyadaki taban arazileri kaplamaktadır. Yoğun yerleşim birimleri bakımından doğuda Ereğli, Karapınar, Niğde, Bor; kuzeyde Cihanbeyli, Aksaray, Şereflikoçhisar; batıda Beyşehir, Seydişehir; güneyde Karaman, Suğla; orta kısımda Konya ve Çumra'yı içerir. Devlet Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınan bilgilere göre, yağışların düzensiz ve az olduğu Konya Kapalı Havzası'nda mevcut akarsuların rejimleri de düzensizdir. Daha çok Toroslar ile ilintili olarak doğu, batı ve güneyinde bulunan akarsular havza su ihtiyacını sınırlı düzeyde karşılar. Kurak geçen yaz aylarında birçok dere ve akarsu kurumakta ya da debileri ciddi ölçüde azalmaktadır.

4.2. Yeraltı Sularının Çekilmesi ve Sonucu: Çökme

Çökme; yeraltı boşluğu üzerinde bulunan örtü malzemesinin, aşağıya doğru düşey yönde yer değiştirmesi olarak tanımlanır (Canik, 1997; Yıldırım ve Gökaşan, 2013). Yeraltı su kaynaklarının uzun süreli ve yoğun çekildiği, buna karşılık beslenmenin yetersiz oluğu bölgelerde yer veya zemin çökmesi (land subsidence) potansiyel bir risk olarak değerlendirilir. Yeraltı suyu, kayaçların gözenek ve boşluklarında bulunur ve destek görevi görür. Suyun gözeneklerden çekilmesi ile akiferi oluşturan taneler, yüzey katmanlarının ağırlığı ve aşağı yönlü yüklenmesiyle düzensiz bir şekilde sıkışır. Doğal zeminin düşey veya düşeye yakın bir şekilde hareket etmesi olarak adlandırılan çökme, yüzeyde ya da yüzeye yakın mühendislik yapılarına önemli hasarlar verir. Çökme gibi jeolojik olaylarda yatay doğrultulu hareket ya pek azdır veya hiç yoktur. Çökmenin doğal ve yapay olmak üzere iki nedeni vardır. Yeraltında bulunan tuz, jips, kalker gibi kayaçların sular tarafından eritilmesi gibi doğal nedenler ile çökmeler ve oturmalar oluşur. Yapay olarak ise; insanların çeşitli faaliyetleri sonucunda oluşan çökmelerden söz edilebilir. Bu faaliyetlerin en önemlileri, yer altından çekilen fazla su, kazılar, tünel açma, maden çıkartma v.b. faktörlerdir (Ertunç, 2003).

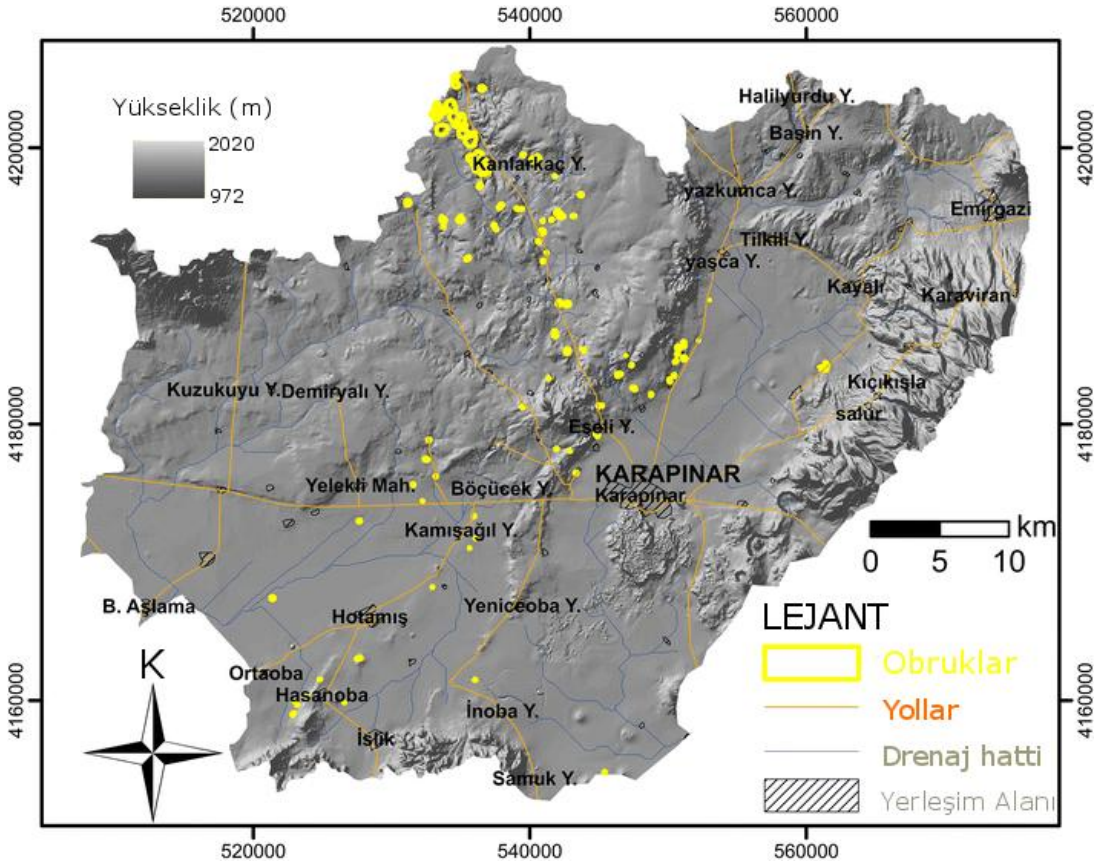
Konya Kapalı Havzası jeolojik ve topografik yapısının sağlamış olduğu avantajlar sayesinde tarımsal faaliyetler açısından Türkiye'nin önde gelen merkezidir. Bu bölgede tarımsal üretimin yoğunluğu ile doğru orantılı olarak bilinçli ve bilinçsiz su kullanımı oldukça fazla gerçekleşmektedir. Özellikle ekili alanlardaki bilinçsiz sulamanın zamanla söz konusu çökmeleri ortaya çıkaran nedenlerden biri olduğu düşünülmekte, yıllar içinde çökmeye bağlı yerdeğiştirme oranlarının düşey yönde arttığı çeşitli çalışmalarla desteklenmektedir (Göçmez ve İşçioğlu, 2004; Bozyiğit ve Güngör, 2011; Kaya ve Kılcı, 2011). Ancak çalışma bölgesindeki çökmelerin bir nedeni olarak yeraltı suları ve bilinçsiz kullanımı gösterilse de, bölgenin jeolojik geçmişi gözardı edilmemelidir. Havzanın genel anlamda jeolojik yapı itibariyle bir çöküntü alanı olduğu ve bu sayede bugünkü görünümüne ulaştığı unutulmamalıdır. Literatür çalışmaları değerlendirildiğinde, milyonlarca yıldır gerçekleşen ve halen devam eden jeolojik evrim, özellikle Konya Kent Merkezi ve çevresi için geniş bir çöküntü alanının varlığını göstermektedir. Bunun yanısıra, bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen uygulama sonuçları değerlendirildiğinde, çökme değerlerinin özellikle son on yıllık periyotta hızla arttığı ve bunun nedeni olarak sadece jeolojik yapı değil, beklentilerden daha yüksek bir hareketin olduğu ve potansiyel kaynak olarak Yeraltı Suyu (YAS) değişimlerinin büyük

oranda etken olabileceği sonucuna varılmıştır. YAS değişimini tetikleyen veya doğalın dışına çıkaran insan faktörünün, elde edilen çökme değerleri ile YAS sonuçlarının korelasyonlu çıkması sebebiyle, dolaylı yoldan sorumlu olduğu söylenebilir.

Ayrıca bölgede hemen hemen eski ve güncel olmak üzere toplam 182 adet obruk oluşumu tespit edilmiştir (Ozdemir, 2015).

Bu obrukların ne zaman ve ne boyutta gerçekleşeceği belli olmamakla birlikte, yine de özellikle oluşumlarından sonra gözlem altında tutulmaları, ne oranda değişim gösterdiklerinin incelenmesi ve birbirlerine göre lokasyonlarının belirlenmesi açısından önemlidir (Tapur ve Bozyiğit, 2015).

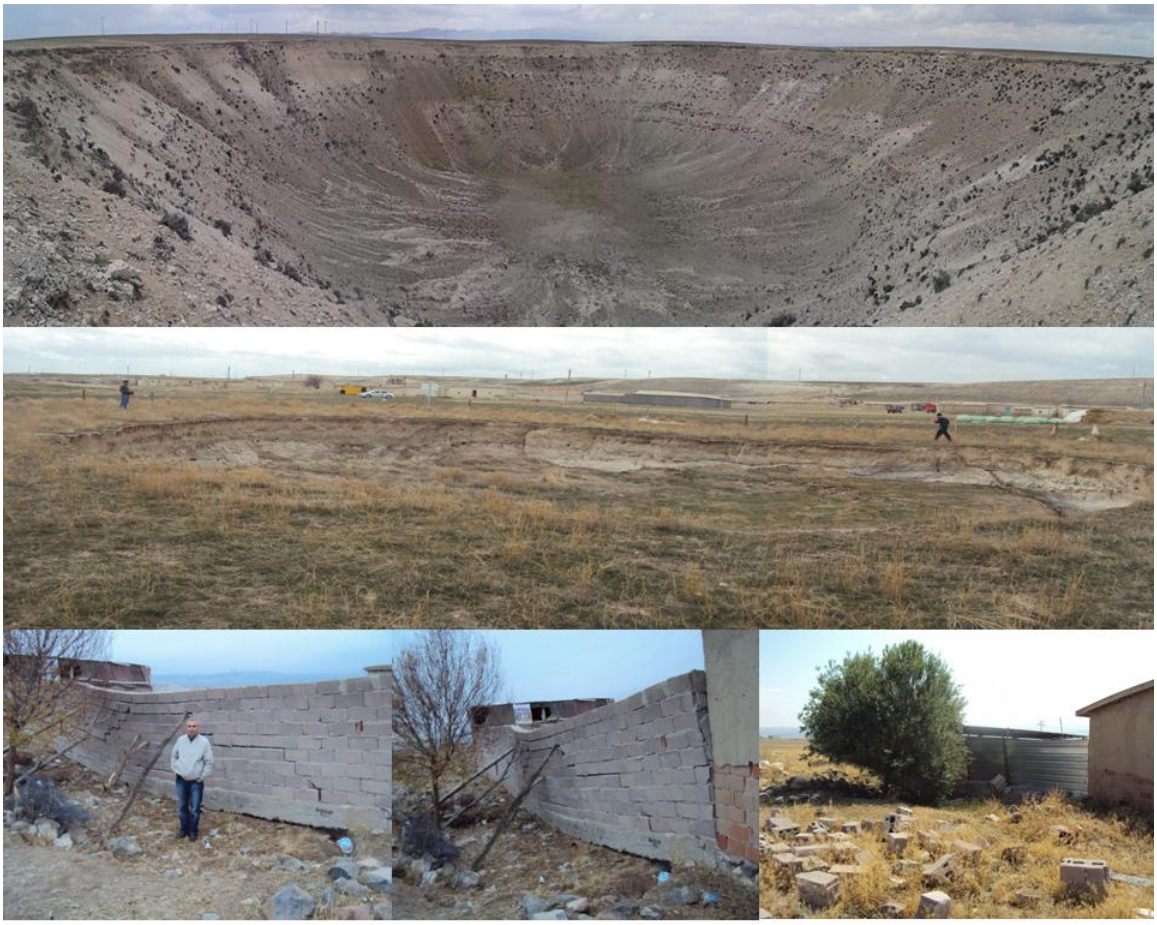
Bölgede gerçekleşen obruklara örnek teşkil edecek resim Şekil 4.2'de verilmektedir.



Şekil 4. 2. Konya İli Obruklarının dağılımı ((Ozdemir, 2016)'dan değiştirilerek)

Şekil 4.2'de verilen ve çeşitli büyüklüklerdeki obrukların bazıları yerleşim yerlerine yakın yerlerde tespit edilmiş ve Şekil 4.3'de verilen fotoğraflarda görüldüğü gibi yaşamsal faaliyetlerin kısıtlanmasına neden olabilecek düzeyde gerçekleşebilmektedir. Tez çalışmasının uygulama kısmında yer alan Konya Kent

Merkezi ve çevresi için yapılan deformasyon belirleme çalışmaları incelendiğinde, özellikle kent merkezi için tespit edilen deformasyon alanının büyük bir obruk görünümünde olduğu dikkat çekmektedir.

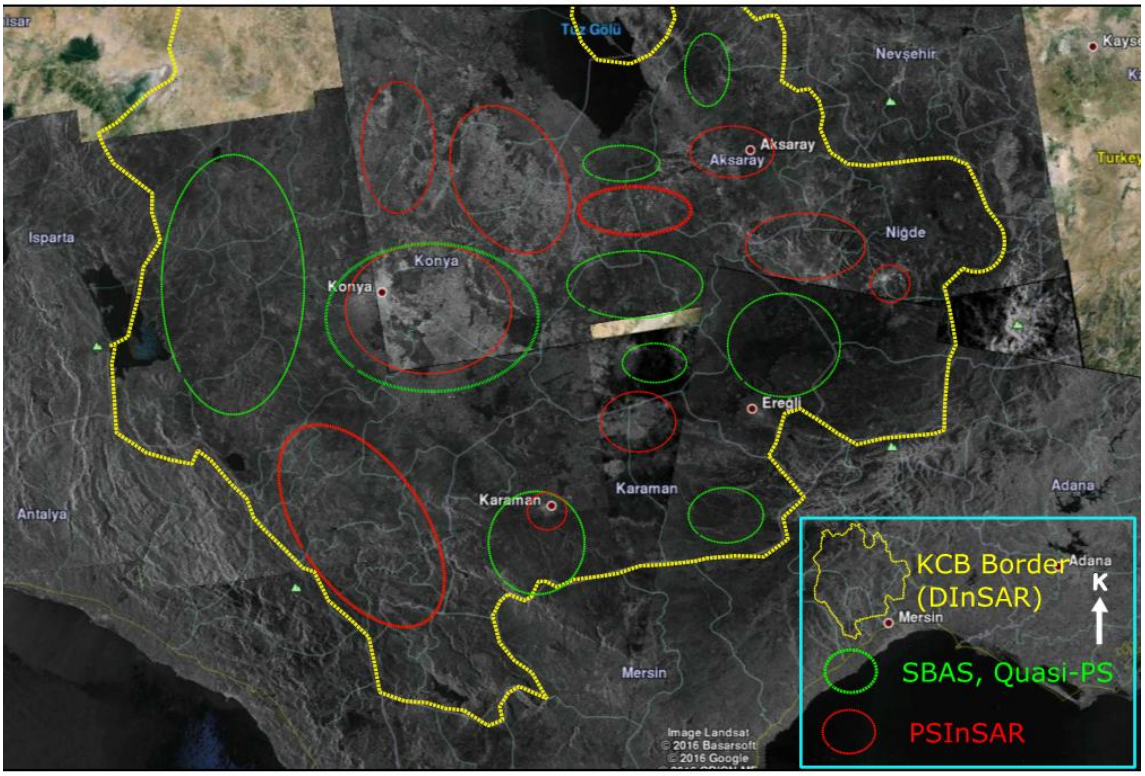


Şekil 4. 3. Konya Kapalı Havzası'nda gerçekleşen obruk oluşumlarına örnekler ve sosyal yaşama etkisi (Ozdemir, 2015)

Bu çalışmada obrukların yoğun olarak gözlemlendiği Karapanır ilçesi ve civarı için uygun SAR görüntüsünün olmaması nedeniyle bu alanlar InSAR tekniği ile henüz incelenememiştir. Ancak, bölgede varlığını hemen hemen her yıl hissettiren obrukların tespit edilebilirliği InSAR yönetmi ile mümkündür. Bununla birlikte, özellikle şehir merkezinde en az obruklar kadar büyük risk oluşturan çökmelerin de yıllar içerisinde can ve mal güvenliğini tehdit edebileceği unutulmamalıdır. Bu nedenle havzadaki önemli tarım alanları ve şehir merkezleri çalışmamız kapsamında uzaktan algılama yöntemi ile incelenmiş, yıllar bazındaki zaman serileri analizleri ile deformasyon bilgileri ortaya konulmaya çalışılmıştır.

4.3. Çalışma Alanının Sınıflandırılması ve Buna Uygun Olarak Seçilen Yöntemler

Konya Havzası'nın çok geniş bir alanı kapsaması nedeniyle, bu alan için yapılacak InSAR çalışmaları hem yöntem, hem temin edilen veriler, hem de arazi karakteristikleri açısından sınıflandırılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Şekil 4.4'te çalışma alanı ve uygulanan yöntemler hakkında bilgi içeren uyuşum haritası sunulmaktadır.



Şekil 4. 4. Havza'nın güney kesimini kaplayan uyuşum haritası üzerinde çalışma alanı sınıflandırması ve uygulanan yöntemler (Uyuşum haritası: üç çerçevede Sentinel-1 verisinden elde edilmiştir, arkaplan görüntüsü © Google Earth™, 2016)

SAR görüntülerine ait uyuşum haritası, çalışma alanın sınıflandırılmasında ve seçilecek yöntemin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Farklı çerçevelerde, artan ve azalan veri modlarından elde edilen uyuşum haritası, Google Earth görüntüsü üzerinde birleştirilmiştir. Şekil 4.4'te verilen harita üzerinde yüksek uyuşum değerine sahip kısımlar açık gri tonlarında, daha az uyuşum değerine sahip olan alanlar ise (örneğin su ile kaplı yüzeyler veya ekili alanlar) siyah ve siyaha çok yakın tonlarda gösterilmektedir. Uyuşum haritaları yüzeyin InSAR ile çalışılabilirlik durumunu iyi

yansıtması sebebiyle alan sınıflandırma işlemi SAR görüntü örnekleri ile oluşturulmuştur. Bu alanlar baz alınarak ileri InSAR tekniklerinin çalışma prensiplerine uygun olacak şekilde; şehir merkezlerinde ve dağlık bölgelerde yansıtıcı özelliği yüksek olan binaların ve kaya bloklarının çok olması nedeniyle PSInSAR tekniğinin, kırsal alanlarda ise SBAS ve Quasi-PS tekniklerinin tercih edilmesinin yerinde olacağı değerlendirilmiştir. Öte yandan dağlık bölgelerde PSInSAR tekniğinin yanı sıra, SBAS tekniğinden de yararlanılabileceği düşünülmüştür. Bunun nedeni, çalışma bölgemizdeki dağlık alanların bazı kısımlarının bitki örtüsü ile kaplı olmasıdır. Üstelik topoğrafik değişkenlik bozucu atmosferik etkiyi tetikleyici potansiyele sahiptir. Sonuç olarak tüm faktörler her iki yöntemin birarada (PS+SB) kullanılmasını gerektiren nedenler olarak görülmektedir.

Yukarıdaki bilgiler ışığında, havza için tercih edilen yöntemler, veri kaynakları, yüzey karakteristiği ve yazılım desteği Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4. 1. Çalışma kapsamında uygulanan yöntemler ve özellikleri

Kullanılan Yöntem	**Veri Cinsi**	**Veri Modu**	**Yüzey Karakteristiği**	**Kullanılan Yazılımlar**
DInSAR*	Envisat ASAR, ERS-2, ALOS PALSAR	Azalan - Artan	Kentsel-Kırsal*	DORIS, GMTSAR
PSInSAR	Sentinel-1, CosmoSkyMed, Envisat ASAR, ERS-2	Artan - Azalan	Kentsel	StaMPS-SarProz
SBAS	ERS, Envisat ASAR, Sentinel-1	Artan - Azalan	Kırsal	StaMPS-SarProz
Quasi-PS	CosmoSkyMed, Sentinel-1	Artan	Kırsal	SarProz

* DInSAR yöntemi, sadece iki SAR görüntüsünün işlenmesi ile gerçekleştirildiğinden, kısa zaman ve sayıca az görüntü avantajları sayesinde tüm havza için (kentsel ve kırsal alanların tamamı) uygulanmıştır.

4.4. Kullanılan Veriler

Konya Kapalı Havzası'ndaki genel çökmeyi belirlemek ve ayrıca özellikle Konya kent merkezinde çökmeye bağlı deformasyonu daha kapsamlı incelemek amacıyla; ulaşılabilir tüm SAR bant verilerin analiz edilmesine karar verilmiştir. Bu doğrultuda ESA tarafından uzaya fırlatılan, C bantta işlem gören ERS-2, Envisat ASAR ve son olarak Sentinel-1, kırsal alanlarda oldukça etkili sonuçlar veren ve L bantta çalışan ALOS PALSAR ve bina deformasyonlarını daha net ortaya koymamıza imkan sağlayan, İtalyan Uzay Ajansı (ASI) tarafından fırlatılan X bant CosmoSky-Med verileri kullanılmıştır. Söz konusu verilere ait bilgiler ve yıllara göre dağılımı Çizelge 4.2'de gösterilmektedir. Farklı bantlar üzerinden toplamda 167 SAR görüntüsünün Konya Kapalı Havzası'ndaki deformasyonları incelemek üzere kullanılması tasarlanmıştır.

Çizelge 4. 2. KKH zemin çökmeleri araştırmasında kullanılan SAR uyduları ve resim bilgileri

Uydu	İz - Çerçeve	Görüntü Sayısı	Veri periyodu
ERS-2	114 - 2853	22	
ENVISAT ASAR*	343,114- 2853+ 436,207-2853	40+47	
ALOS PALSAR	608, 604-740,730	10	
Sentinel-1	160 (yörüngesel)	28	
CosmoSky Med	-	20	
			1995 2000 2005 2010 2015

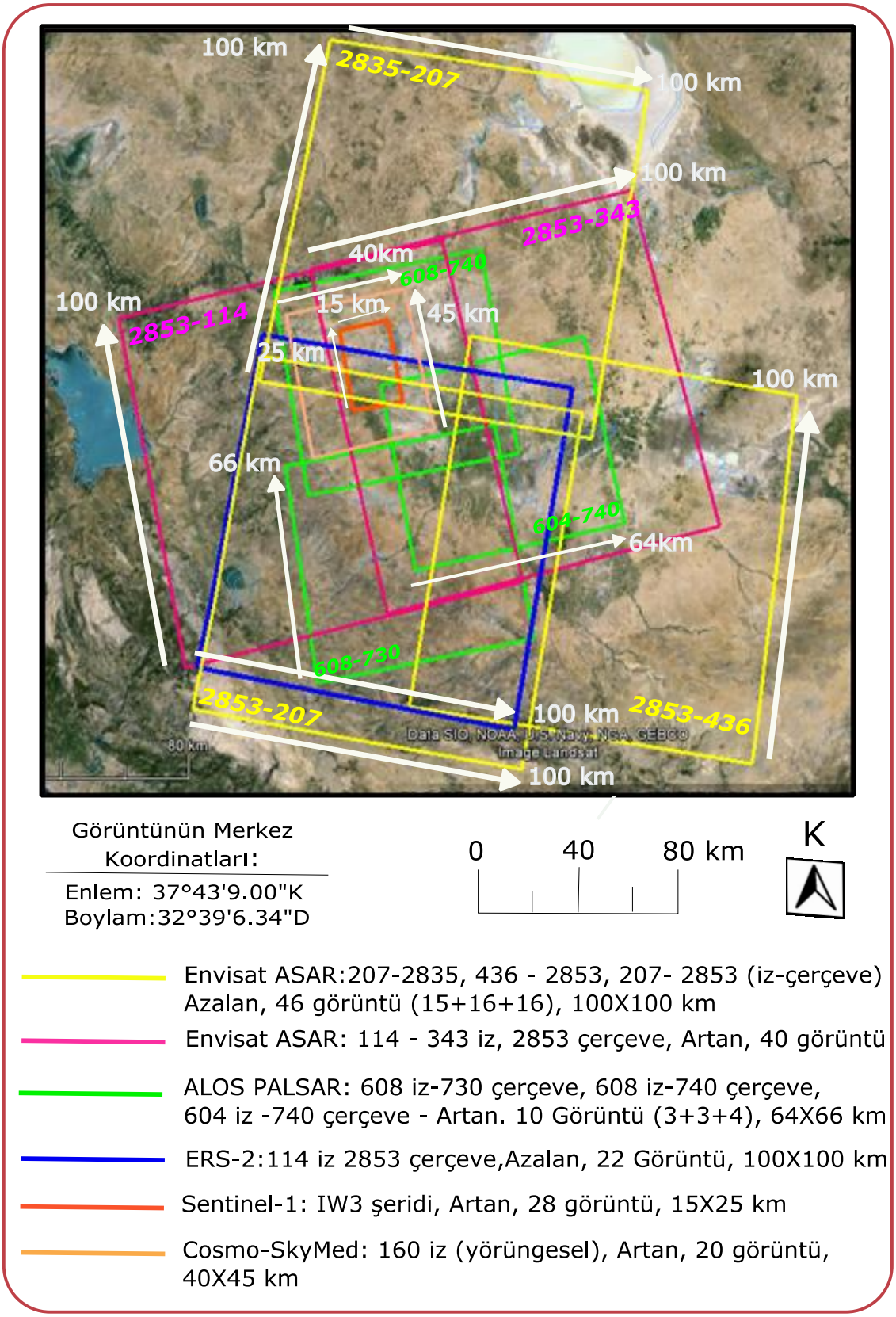
Çalışma alanı tezin konusuna uygun olarak, SAR görüntüleri kırsal, kentsel, dağlık ve tarımsal olmak üzere çeşitliliği içerecek genişlikte ve dağılımdadır. 2002-2010 yılları arasında, üç ayrı çerçeve/iz'e ait (2853/207, 2853/436, 2835/207) 46 SLC görüntüsü (azalan mod) ile klasik InSAR ve DInSAR yöntemleri kullanılarak 127 adet

interferogram oluşturulmuştur. Söz konusu çerçeveler Şekil 4.5'de sarı renk düz çizgilerle görülmektedir.

InSAR yöntemi ile deformasyonlar radarın bakış doğrultusunda belirlendiği için, aynı bölgeyi farklı açılardan görüntüleyerek PSInSAR ugulamalarını gerçekleştirmek amacıyla yine Envisat uydusuna ait artan modda 2002-2010 yılları arasında 40 veri daha temin edilmiştir (Şekil 4.5 Pembe renk).

Başka bir C band uydusu ERS-2'ye ait 2853/114 çerçeve/iz numaralaı, 1995 Mayıs - 2000 Aralık döneminde elde edilmiş 22 görüntü (SLC formatında) havzanın geçmiş yıllardaki deformasyon durumunu incelemek amacıyla temin edilmiştir. Envisat ve ERS görüntülerinin çözünürlüğü 30 m, tekrar periyodu 35 gündür. Görüntü sayısının fazla olması ve baz uzunluk analizlerine göre yüksek kalitede interferogram oluşturabilme avantajı açısından sadece azalan mod tercih edilmiştir (Şekil 4.5 Mavi renk).

20-350 km arasında tarama genişliğine, 10-100 m arasında çözünürlüğe sahip L band ALOS PALSAR uydusundan 2006-2011 yılları arasında görüntü seçimi yapılmıştır. 66x64 km'lik alanı kapsayan resimler FBS (Fine Mode Single Polarisation) mod (28MHz, 10 metre çözünürlük), HH polarizasyona sahiptir. Seçilen veriler, InSAR uygulamalarında en uygun çözüm veren Fine Mode/Dual Polarisation 1.1 (Envisat ASAR uydularında IMS (SLC) verilerine karşılık gelir; artan moddadır (Şekil 4.5'de yeşil çerçeveler). Envisat, ERS ve ALOS verilerinin tamamı Avrupa Uzay Ajansı Kategori-1 projesi kapsamında yapılan proje başvurusu ile temin edilmiştir.



Şekil 4. 5. Çok bandlı Envisat ASAR, ALOS PALSAR, ERS-2, Sentinel-1 ve CosmoSkyMed SAR görüntü çerçevelerinin Konya Kapalı Havzası'ndaki kapsama alanları

Yukarıda söz edildiği gibi C band ERS ve Envisat uydu görüntüleri 1995-2010, L band ALOS-PALSAR görüntüleri ise 2006-2011 dönemini kapsamaktadır. Havzanın genel deformasyon davranışını ortaya çıkarmak için söz konusu veriler tatmin edici ve birbirini destekler nitelikte olmakla birlikte, güncel olayları izlemeye yeterli değildir. Bu yüzden uzaya geçtiğimiz birkaç yıl içerisinde fırlatılan uydulardan da yararlanılması öngörülmüştür. Bunlardan ilki yine Avrupa Uzay Ajansı tarafından 3 Nisan 2014'de uzaya fırlatılan Sentinel uydusudur. Envisat uydusunun 2012 yılında devre dışı kalmasının ardından Sentinel uydu görevleri başlatılmıştır. C bant Sentinel uydusundan elde edilen veriler 2014 Kasım ayı itibariyle SAR amaçlı kullanıma açılmıştır. Doktora tez çalışması kapsamında 16/10/2014 - 04/11/2015 tarihleri arasında, IW3 şeridinde, 38.30^{o} bakış açısıyla 28 görüntü ücretsiz olarak ESA'dan temin edilmiştir. Görüntülerin çözünürlüğü menzil doğrultusunda yaklaşık 3.1 m ve azimut doğrultusunda 27.1 m'dir. Çerçeve boyutu oldukça büyük (250 km) olduğu için Sentinel verileri Konya kent merkezinde 15x25 km'lik alanı kapsayan kesimi (Şekil 4.5'de turuncu renk) değerlendirmeye alınmıştır.

X bantta çalışan CosmoSkyMed uydu görüntülerinin veri temini için İtalyan Uzay Ajansı (ASI)'ye proje başvurusunda bulunulmuş, 248 proje numarasıyla 2011 ve 2017 arasında kullanılmak üzere arşiv ve yeni üretilecek 100 görüntü için anlaşma imzalanmıştır. İlk 20 görüntü Konya Merkez için StripMap HImage veri modunda ve 40X45 km'lik alanı kapsamaktadır. Seçilen veri moduna göre 3-5 m arasında yüksek çözünürlük sunmaktadır.

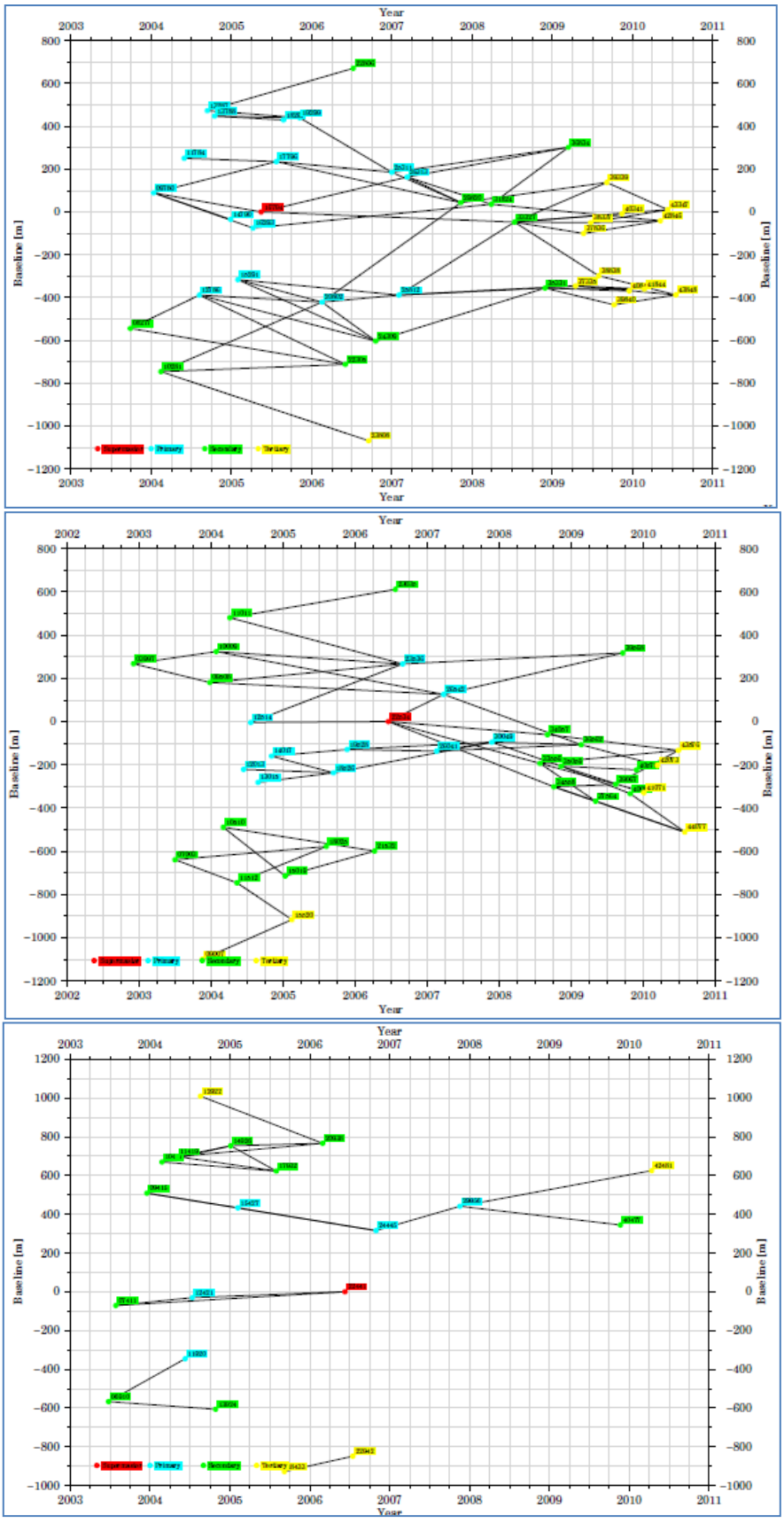
4.5. Havza Genelinde DInSAR Tekniği ile Yüzey Deformasyonu Araştırması

Konya Kapalı Havzası güneyde Konya-Çumra ve kuzeyde Tuz Gölü olmak üzere iki alt havzayı içine alır. Daha çok Konya-Çumra hazasında yoğunluk kazanan yüzey deformasyonu (çökme) araştırma çalışmaları, bu tez çalışmasının da desteklendiği 110Y121 numaralı proje kapsamında 2011-2015 yılları arasında gerçekleştirilmiştir (Üstün ve ark., 2015). Proje kapsamında tesis edilmiş 28 noktalı GPS ağına dayalı deformasyon araştırmasının, havzanın büyüklüğü ve nokta yoğunluğundaki yetersizlik göz önüne alınarak, InSAR teknikleriyle desteklenmesi öngörülmüştür. Esas hedef havza genelinde kesintisiz bir deformasyon haritasının oluşturulmasıdır. Bu iş için proje önerisinin yapıldığı dönemde aktif olarak çalışan Envisat uydusunun yeterli olacağı düşünülmüştür. Ancak, söz konusu uydu proje

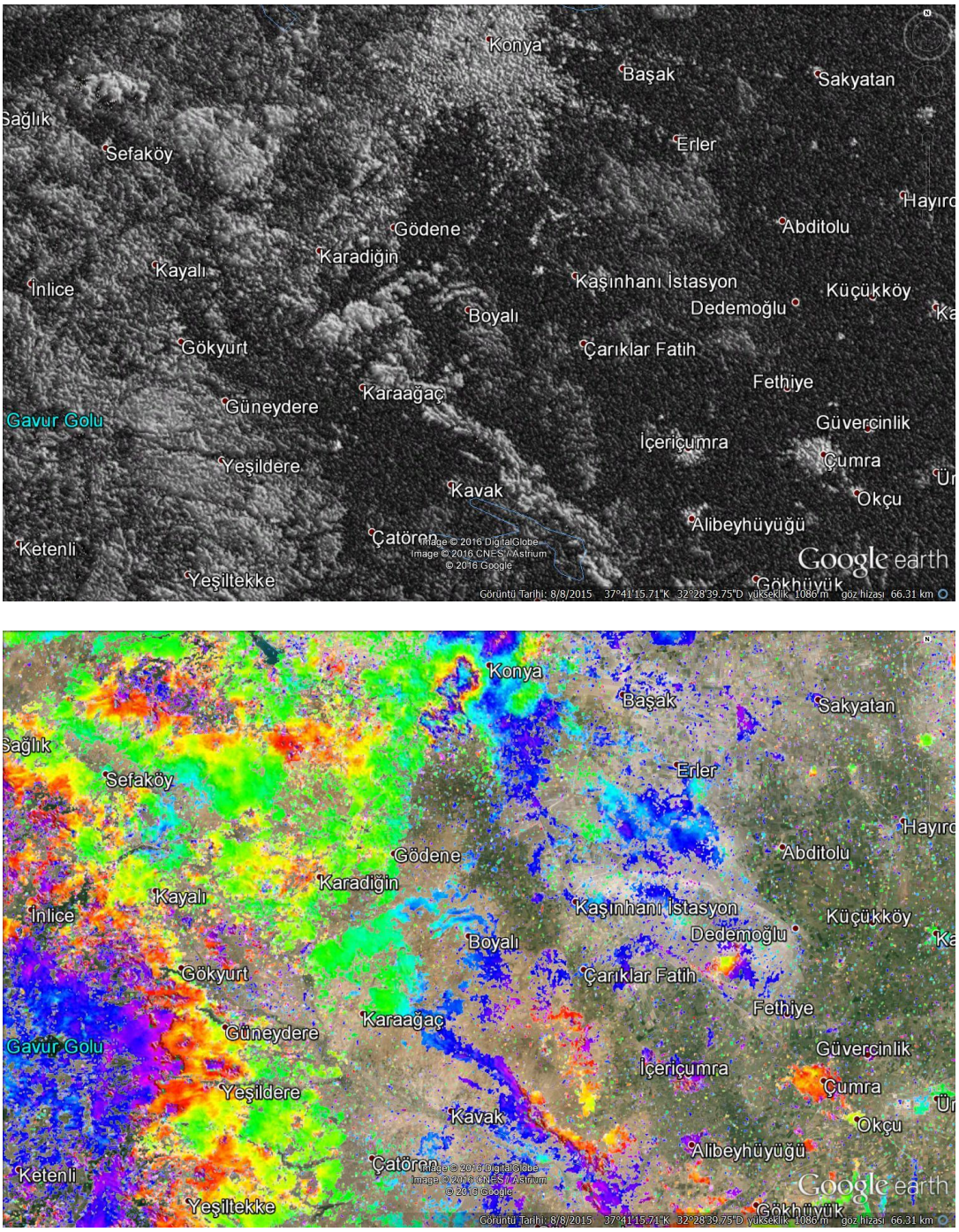
başladıktan sonra 2012'de hizmet dışı kalmıştır. Öte yandan, 2002'den 2010'a kadar havzayı kaplayan üç farklı çerçevede hem artan hem de azalan mod için görüntü temin edilebilmiştir.

Envisat SAR görüntülerinin havzada kapladığı görüntü alanı 13000 km^2'ye yaklaşmaktadır. Gerek resim sayısının çokluğu gerekse çalışma alanının büyüklüğü geleneksel InSAR analizi çalışmalarının süresini olumsuz etkileyen başlıca nedenlerdir. Değerlendirme süresinin uzun olacağından hareketle, bu iş için hazırlanmış geri planda çalışan betikler yardımıyla, 3 çerçevede toplam 87 resmin analizi yaklaşık bir aylık değerlendirme periyodunda tamamlanmıştır. Diferansiyel InSAR analizine dayalı kesintisiz deformasyon haritası GMT (Generic Mapping Tools) tabanlı GMTSAR (Sandwell ve ark., 2011) yazılımı kullanılarak sonuçlandırılmıştır. Üretilen havza geneli deformasyon haritası üç çerçevenin birleşimidir ve radarın bakış doğrultusundaki deformasyon oranlarını başka bir deyişle yıllık hızları gösterir.

2853/207 (azalan), 2853/436 (azalan) ve 2853/114 (artan) çerçelerinde sırasıyla 57, 50 ve 27 olmak üzere toplam 127 diferansiyel interferogram oluşturulmuştur. Şekil 4.6 her çerçevede seçilen birincil görüntü ve buna göre hizalanmış resimlerin zaman-baz uzunluğu grafiklerini göstermektedir. İnterferogamların seçiminde dik baz uzunluklarının 300 m'den kısa, zamansal baz uzunluklarının ise 6 ay ile 2.5 yıl arasında olmasına özen gösterilmiştir. Zamansal baz uzunluklarının bu aralıkta kalmasının nedeni deformasyonun havza içinde yavaş gelişmesinin bir sonucudur. Deformasyon hızının artışına göre; kısa zaman farklarının seçimi görüntü çiftleri arasında korelasyonun yüksek çıkma olasılığını arttırmaktadır. Benzer şekilde zaman-baz grafiğinde de yatay interferogram çizgileri, daha kısa baz uzunluğu ve daha yüksek kalitede görüntü eşleşmesi anlamına gelmektedir. Şekillerde kırmızı çerçeveli metin süperbirincil; cyan, süper birincile hizalanmış birincil; yeşil, birincile hizalanmış ikincil; ve sarı, ikincil görüntülere hizalanmış üçüncül görüntülerdir. Bu işlem birbirine uzak resimlerde azalan zamansal korelasyon etkisini azaltmak amacıyla GMTSAR'da tercih edilen bir yaklaşımdır.



Şekil 4. 6. 2853/207 (üst), 2853/436 (orta) ve 2853/114 (alt) çerçeve/iz numaralı resimler için zaman-baz grafiği ve oluşturulan interferogramlar (siyah düz çizgiler). Kırmızı (süper birincil), cyan, yeşil ve sarı yörünge numaraları resimlerin birbirlerine göre hizalama hiyerarşisini tanımlar.



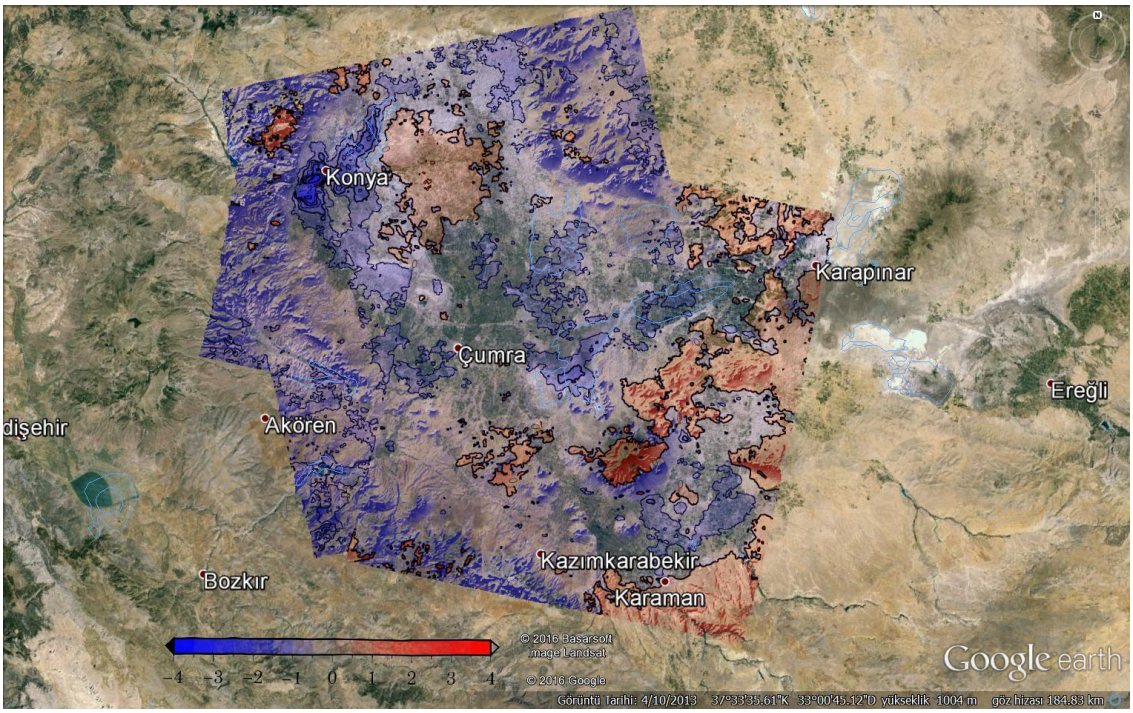
Şekil 4. 7. 25.05.2004 ve 17.09.2005 tarihleri arasında Konya ve yakın yerleşim birimleri 2853/114 (artan) çerçeve interferogramı. Üst panel uyuşum, alt panel faz cinsinden maskelenmiş faz değişimini (çözümlenmemiş) göstermektedir.

Tüm interferogramlara standart olarak aynı işlemler uygulanmıştır. Sonuç interferogram haritalarında, faz büyüklükleri uyuşumun düzeyine göre filtrelenmiş ve maskelenmiştir. Faz çözümleme işlemi, toplam değerlendirme süresini en aza indirmek için en sona bırakılmıştır. Deformasyonu araştırılacak bölge (genellikle havza tabanı) sınırları radar koordinat sisteminde belirlendikten sonra faz çözümüne (unwrapping)

başlanmıştır. Bu aşamada tüm ara sonuçlar gözden geçirilmiş ve uyuşumsuz interferogramlar analiz işleminden çıkarılmıştır. Çözümleme işleminde girdi verileri filtrelenmiş faz büyüklükleridir. 2853/114 çerçeve/iz numaralı interferogram örneği Şekil 4.7'de sunulmaktadır. Şekilde referans görüntü 25.04.2004, tekrar görüntüsü ise 27.09.2005 tarihlidir. Tarım arazilerinin içeren alanlar uyuşum haritasında (solda) korelasyon seviyesinin düşüklüğü nedeniyle neredeyse siyah piksellerle kaplıdır. Bu sonuç faz değişimi haritasında (sağda) tamamen maskeleme amaçlı kullanılmış, dolayısıyla interferogramın gürültü seviyesi azaltılmıştır. Sadece bu interferogram üzerinden, Konya kent merkezi ve çevresinin deformasyon karakteristiği hakkında kaba bir değerlendirme yapılabilir. Yaklaşık 420 günlük zaman farkında zemin deformasyonu (çökme) 3 cm civarındadır.

Üç çerçevedeki interferogram sayısının fazlalığı, görüntü alanında tespit edilen deformasyon belirsizliğini azaltacak etkiye sahiptir. Ortalama deformasyon hızlarının kestirimi için 2853/114 çerçevesinde 20 interferogram kullanılırken, diğer iki çerçevede bu sayı 50'nin üzerindedir. Ortalama değerler belirlendikten sonra, yer koordinat sisteminde interferogramlar birleştirilmiş ve mozaik deformasyon haritası tüm Konya-Çumra havzası için üretilmiştir. Görüntü alanı oldukça büyük olduğundan, deformasyon alanı içinde çökme alanları kadar görece küçük yükselme olaylarından da söz edilebilir. Ancak, bu durum gerçekte seçilen referans noktasına göre anlam kazanır. Bu çalışmada sonuçların GPS noktası ile doğrulanabilmesi için yer değiştirme büyüklükleri, GPS analizinde sabit görülen noktalardan birinin konumuna (DNEK) bağlı elde edilmiştir. Sonuç deformasyon haritası, Şekil 4.8'de verilmiştir. Deformasyon büyüklükleri -4 cm/yıl ile +1cm/yıl arasındadır. En büyük çökme oranları Konya kent merkezi içinde kalmakla birlikte, Konya-Çumra havzasının batısı kesiminde, yüksekliklere paralel biçimde kuzeyden güney doğru yay çizmektedir.

Üç çerçeve için bağımsız olarak elde edilen deformasyon oranlarının, çerçevelerin örtüştüğü alanlarda birbiriyle tutarlı olduğu anlaşılmıştır. Farklı çerçevelerde deformasyon eğrilerinin sürekliliğini koruması, bu tutarlılığın göstergesidir. Yerleşim yoğunluğu, zemin çökmelerini belirleyen başlıca etken olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, yeraltı su kaynaklarının yoğun olarak kullanıldığı alanlar da çökme eğilimi içerisindedir.



Şekil 4. 8. Konya-Çumra havasında 2002-2010 yılları arasındaki deformasyon hızları. Radarın bakış doğrultusundaki deformasyon hızları cm/yıl olarak verilmiştir. Soğuk renk (mavi) çökmeyi, sıcak renk (kırmızı) yükselmeyi göstermektedir.

Uygulamanın bundan sonraki bölümlerinde, çökmelerin daha ayrıntılı yorumlanmasına yönelik kentsel ve kırsal alanlar için ileri InSAR tekniklerinden yararlanılacaktır. Diğer yandan, gerçekleştirlen diferansiyel InSAR uygulaması 2002-2010 yılları arasındaki deformasyon büyüklüklerinin bulunmasını sağlamıştır. Sadece belirtilen döneme ilişkin deformasyon davranışını görmek yerine, tezin amacı doğrultusunda, kentsel ve kırsal alanlar için sonuçların daha kapsamlı irdelenmesi hedeflenmiştir. Ayrıca, ERS verilerine dayalı daha eski (1995-2000 dönemi) ve güncel uydu görevleriyle (Sentinel-1 ve CosmoSkymed ile 2014-2015 dönemi) yakın dönem deformasyon değerleri türetilecektir.

4.6. Yerleşim Alanlarında İleri InSAR Uygulamaları

Yerleşim alanlarında yapılacak çalışmalar, bir üst bölümde gerçekleştirilen DInSAR uygulaması ile elde edilen deformasyon yoğunluğuna uygun olacak şekilde alt bölümlere ayrılmıştır. Özellikle Konya Kent Merkezi için elde edilen çökme değerleri dikkate alındığında, şehir merkezi ve çevresinin ayrıntılı olarak incelenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Diğer yandan, yine çalışma bölgesi içerisinde yer alan ve geniş bir

alana sahip Karaman İlinin de yerleşim alanları deformasyon belirleme çalışmaları kapsamına alınmasına karar verilmiştir. Bu alana ait yer değiştirme haritasına dair elde edilen sonuçlar, Konya ve çevresi için gerçekleştirilen ayıntılı deformasyon araştırmasından sonra ele alınacaktır.

4.6.1. Konya Kent Merkezinde Yapılan Çalışmalar

DInSAR çalışmaları ile C bantta çalışan Envisat uydusu ile Konya İli ve çevresi için elde edilen çökme haritası 2002-2010 dönemi çalışmalarını kapsamaktadır. Bu bölümde Envisat verilerinin yanısıra ERS-2, Sentinel-1 ve CosmoSkymed verileri yardımıyla 1995-2015 dönemini kapsayan 20 yıllık döneme ait deformasyon durumu İleri InSAR çalışmaları kapsamında incelenecektir.

4.6.1.1. ERS-2 Yardımıyla 1995-2000 Dönemi Zemin Çökmesi Araştırması

Çalışma bölgesi için en eski görüntü arşivine ERS uyduları sahiptir. İstenilen özellikteki görüntüler 1995 Mayıs ayından başlamaktadır. 114 iz ve 2853 numaralı çerçeveye ait ERS-2 veri seti; 2000 Aralık ayına kadar 5.5 yıllık periyot için 22 görüntüden oluşmaktadır.

Başlangıçta SarProz yazılımı kullanılarak ERS-2 verilerinin Quasi-PS (QPS) ve PSInSAR (PSI) tekniğine dayalı analizi gerçekleştirilmiştir. SarProz ile yapılacak tüm işlem adımları daha önce Bölüm 3.4'de PSInSAR veri işleme adımlarında anlatıldığı şekliyle temel esaslara dayanmaktadır. Söz konusu işlem adımları özetle; birincil (master extraction) ve ikincil görüntünün oluşturulması (slave extraction), görüntülerin birbirine karşılık gelen piksellerinin çakıştırılması (co-registration), harici sayısal yükseklik modelinin entegrasyonu (external dem selection), yer kontrol noktasına (GCP) göre jeoreferanslama, düzleştirme (flattening), SYM hatasının giderilmesi, filitreleme (en uygun filirteleme yöntemi olan goldstein filitreleme seçilmiştir), çözümleme (unwrapping) aşamalarından oluşmaktadır.

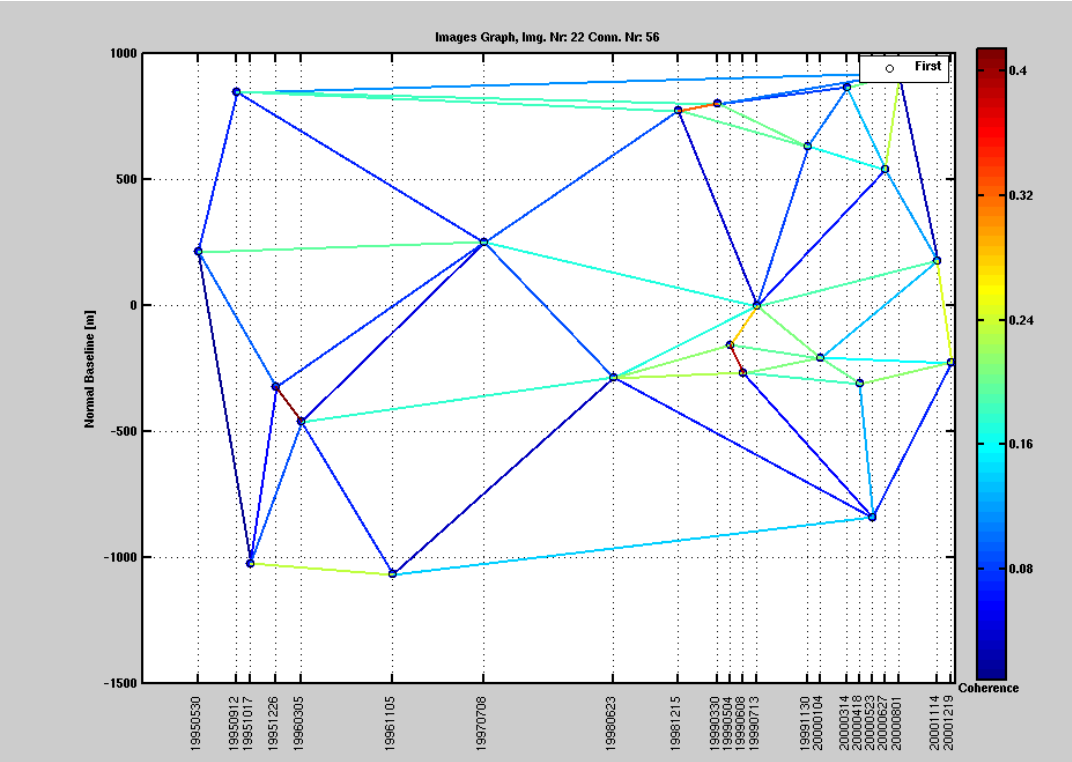
QPS ve PSI teknikleri için işlem akış ayrımı çözümleme aşamasından sonra başlamaktadır. QPS yöntemi; tüm PS noktalarını zaman serisinde kullanan PSI yönteminin aksine sadece uyuşumu yüksek mekânsal filtreleme yöntemine dayalı interferogramlar ürettir. Özel filitreleme seçeneği sayesinde her bir PS ile ilgili işlem yapma zorunluluğu olmadığı için genel ve kesin hareket bilgisine erişilebilir. Bu

özelliği sayesinde QPS'de çok daha geniş alanların seçilebilmesine olanak sağlanır. Bu nedenle ERS verileri kapsamında seçilen alanın tamamı için öncelikle QPS çalışması gerçekleştirilecektir. Elde edilen sonuca göre, istenilen lokasyonlar için PSI uygulaması tercih edilecektir. Her iki uygulama da SarProz yazılımı ile yapılır. Ancak sonuçların tutarlılığını test etmek amacıyla StaMPS çözümüne gidilerek, PSInSAR ve SBAS uygulamaları aynı veri seti ve alan için ilerleyen bölümlerde test edilecektir.

Özellikle SBAS yöntemine duyulabilecek ihtiyacı ifade etme açısından, QPS yöntemini SBAS yönteminden ayıran küçük özellikten bahsetmek gerekir.

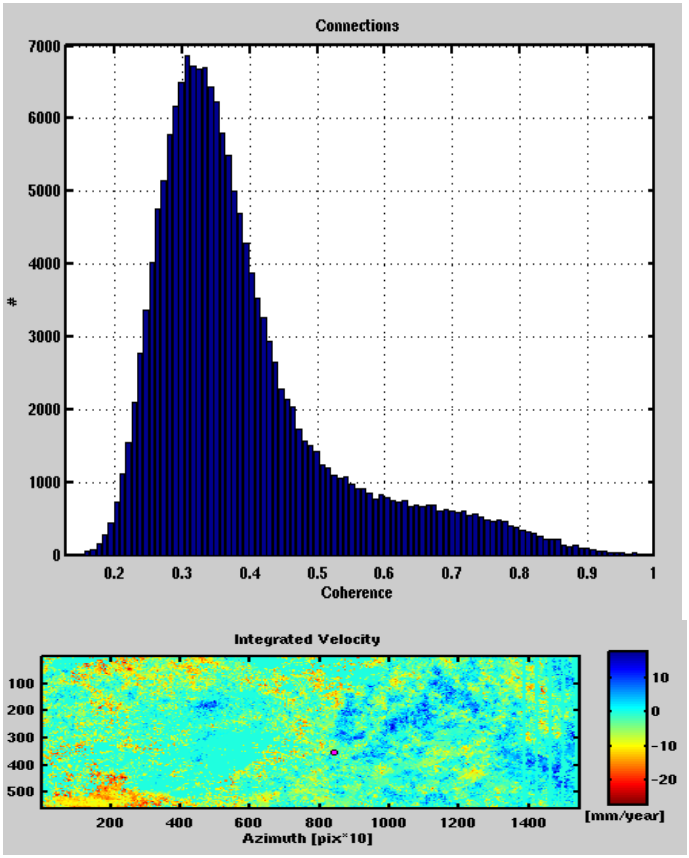
İki yöntemi birbirinden ayıran en önemli özellik, QPS'de görüntü çifti (interferogram) seçiminde zamansal baz uzunluğu değerinin dikkate alınmamasıdır (Perissin, 2009). QPS tekniği için esas önemli olan değer dik baz uzunluğu değeridir ve eşleştirme olası en kısa dik baz uzunluklu görüntüler üzerinden gerçekleştirilir. Sonuç ilişki ağı interferogramın uyuşum değerleri göz önüne alınarak, Delaunay üçgenlemesi yöntemiyle kurulmuş olur.

Buna göre; 22 SLC resmi için interferogram kombinasyonu Şekil 4.9'da gösterildiği gibidir.



Şekil 4. 9. ERS-2 2853/114 çerçeve/iz için baz uzunluk değerlerinin birbirlerine göre konumları ve uyuşum performansı (QPS çözümü)

Görüntülerin birbirine çakıştırılmasından sonra uyuşum değerlerinin incelenmesi gerekmektedir. Bu inceleme, istenirse uyuşum haritası üzerinden veya uyuşum histogramı üzerinden yapılabilir. Uyuşum haritası üzerinde genellikle açık gri renkli alanlar (parlak), görüntü çiftleri arasındaki uyuşumun iyi olduğu anlamına gelir ki; bu da sonuç interferogramın güvenilirliliği açısından oldukça iyidir. Eğer söz konusu inceleme histogram üzerinden yapılacaksa, pek tabi ki; histogramın normal dağılıma uyması beklenir. Bu iki inceleme, görüntüler yoğun işleme sokulmadan önce bize ciddi uyarı sinyalleri verir. Eğer yukarıda bahsedilen kritelere uygun durumlar söz konusu değilse, bu durumda sonuç interferogramın başarısı düşer. Bu çalışma için normal dağılama yaklaşan histograma göre (Şekil 4.10, üst panel); tepe noktası için uyuşum yaklaşık 0.3 değeri civarındadır. Ancak; 0 ile 1 arasında değişen uyuşum değerinin; yapılan tüm analizlerden edinilen tecrübeye dayanarak genellikle en az 0.65 ve üzeri bir değerde olması istenir ki bu örnek için her ne kadar histogram düzgün görünse de uyuşum değeri istenilen ölçüde değildir. Bu nedenle uyuşumu bozan görüntü çifti işlemden çıkarılarak işleme devam edilebilir. Aynı şekilde tüm veri kombinasyonları değerlendirilmeli ve işleme bu şekilde devam edilmelidir. Burada bilinmesi gereken önemli bir nokta ise ortalama uyuşum değerinin göreceli bir büyüklük olduğudur. Sadece deformasyon umulan alan gözlenecekse, yani işleme sokulan ilk alan geniş ancak QPS için gözlemlenecek alan küçük ise (örneğin en az $5km^2$'den küçük), korelasyonlu noktaların (yeterli görülen) sayısı az olacağından ortalama değer 0.10'lara kadar düşebilir. Burada sadece seçilen belli bir bölgenin korelasyonu için ortalamaya bakılırsa korelasyon yüksek çıkar ve hatta 1'lere dayanabilir.



Şekil 4. 10. QPS çözümü için elde edilen uyuşum grafiği ve entegre hız haritası

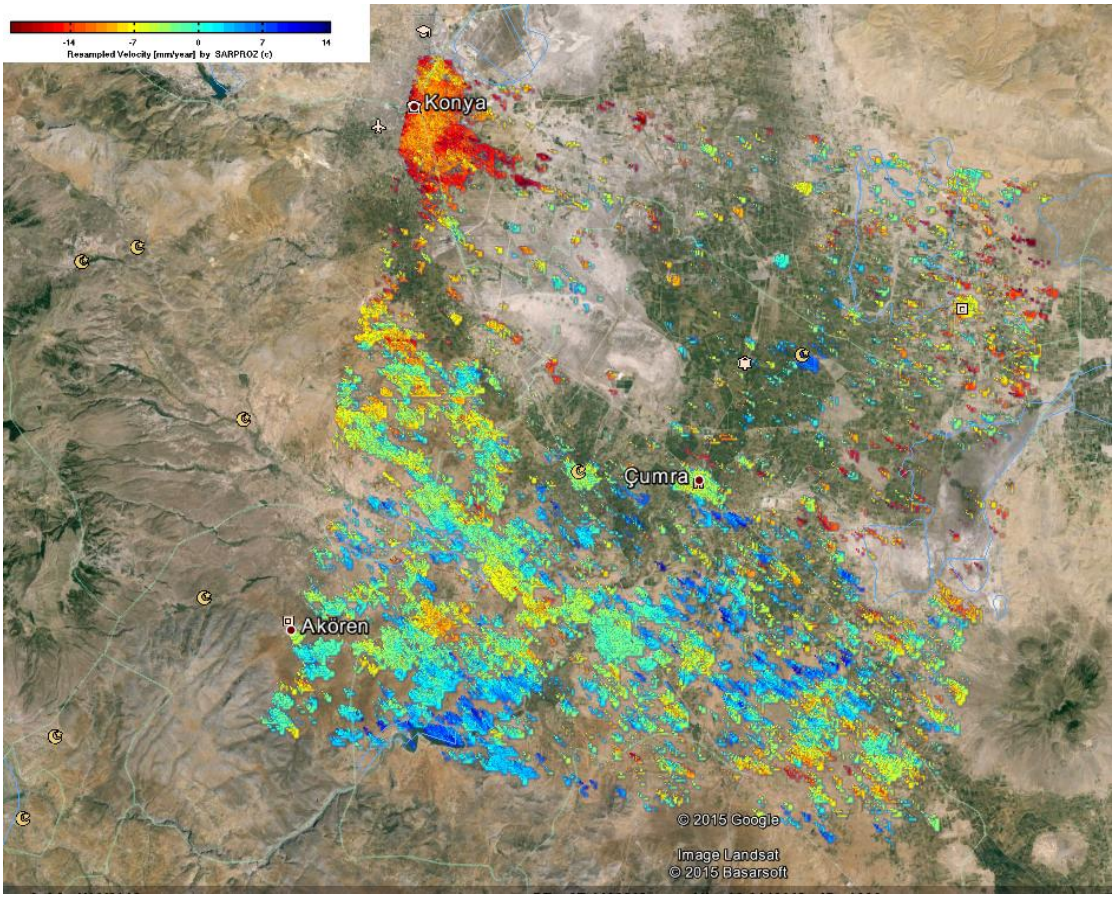
Bu işlemin ardından interferogramın SYM kullanılarak yer (coğrafi) koordinat sistemi ile ilişkilendirilmesi işlemine geçilir. Bunun için, çalışma alanında yansıtıcı özelliği yüksek yer kontrol noktası seçilmelidir. Seçilen noktanın diğer noktaların deformasyonunu belirlemedeki rolü önemlidir.

Deformasyon belirleme çalışmalarında, interferogram ve uyuşum haritası oluşturulurken, yer küreselleğinin düzleştirilmesi ve topoğrafik sinyallerin SYM yardımıyla gözlenen büyüklüklerden mutlaka çıkarılması gerekir. Bu aşamada faz çözümleme işleminin yapılması gerekmez.

Yukarıda bahsedildiği gibi uyuşum değerinin sonuç interferogramın netliği açısından yüksek olması beklenir. Ancak ne yazık ki bu uygulama için uyuşum grafiğinden de anlaşılacağı gibi (Şekil 4.10 üst panel) uyuşum değer oldukça düşüktür. Bu durum Şekil 4.10'da alt panelde yer alan entegre hız haritasına da yansımış ve uyuşum değerlerinin istenen trendte olmaması nedeniyle beklenen sonuç alınamamıştır.

Şekil 4.11'de verilen maskelenmiş sonuç interferogram incelendiğinde özellikle Konya Kent Merkezinde 1995 - 2000 yılları arasında 5.5 yıllık süre zarfında ortalama

yer değiştirme hızının–-10-20 mm/yıl arasında değiştiği görülmektedir. Tarım faaliyetinin gerçekleştirildiği alanlarda yansıtıcı yüzey bulunmadığından veya başka deyişle uyuşum yakalanmadığından deformasyon davranışı hakkında bilgi edinilememektedir.

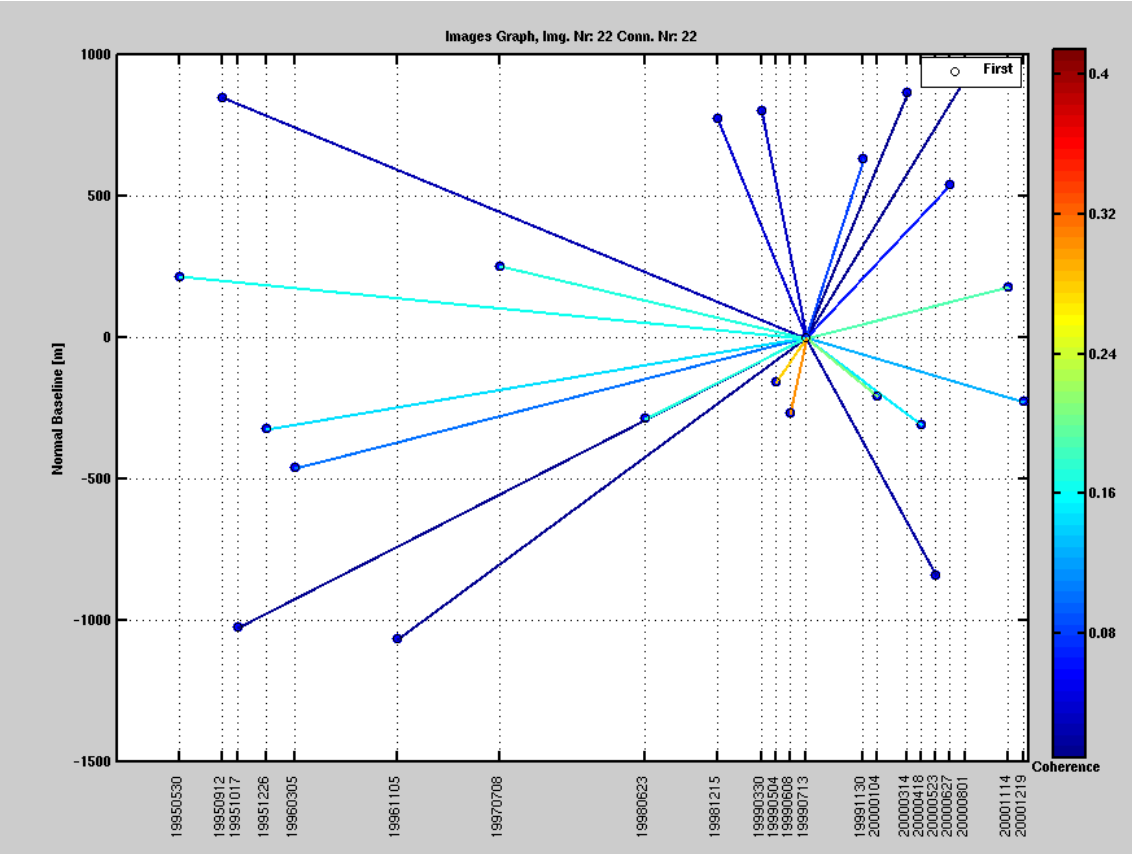


Şekil 4. 11. QPS sonucunda elde edilen maskelenmiş interferogram haritası

Şekil 4.11 renk cetveli ile değerlendirildiğinde çökmenin ağırlıkla Konya kent merkezine ve ova içindeki yerleşim birimlerinde yoğunlaştığı ortaya çıkmıştır. Ancak, uyuşumun istenen değerde olmaması nedeniyle, sonuçların ne denli doğru değeri yansıtıp yansıtmadığının test edilmesi gerekmektedir. Bu durumun netleşmesi için aynı verilerle daha sonra PSInSAR uygulaması gerçekleştirilmiştir. ERS-2 verileri ile yapılan PSInSAR sonuçlarının önemli işlem adımlarına ilişkin şekiller Şekil 4.12, 4.13 ve 4.14'deki gibidir.

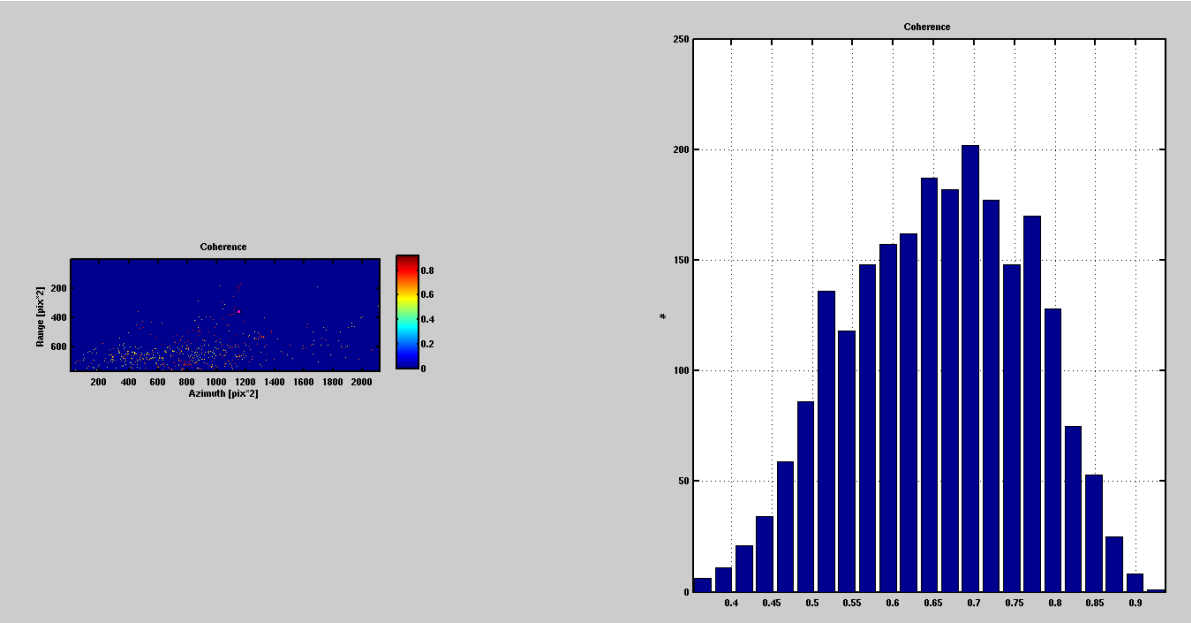
Şekil 4.12'de ERS-2 verileri için baz uzunluk değerlerini gösteren yıldız grafik gösterilmektedir. 22 adet ERS-2 görüntüsü ile yapılan çalışma için, baz uzunluk değerleri QPS eşleşmesine göre daha yüksek uyuşuma sahiptir.

QPS uygulaması veri kombinasyonlarının oluşturulduğu grafik tarzları açısından SBAS yöntemi ile aynıdır. Eşleşme grafiği söz konusu yöntemlerin isimlerinin belirlenmesinde ayırt edici özellik sunar. Örneğin; PSInSAR tekniği interferogram eşleşmesi açısından merkezsel (yıldız) görünümdedir.



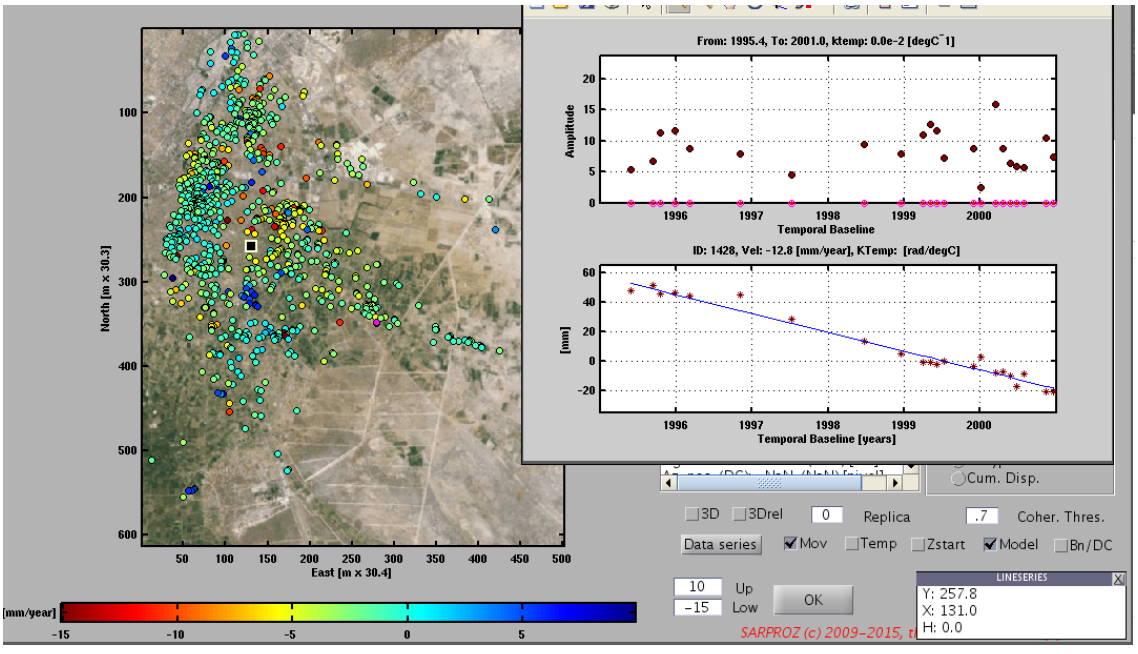
Şekil 4. 12. 114 izde bulunan ERS-2 verileri için baz uzunluk değerlerinin birbirlerine göre konumları (PSInSAR çözümü)

Yüksek uyuşum normal dağılıma uygun olup, uyuşum değeri 0.65 - 0.70 arasında istenilen oranlardadır (Şekil 4.13).



Şekil 4. 13. PSInSAR çözümü için elde edilen uyuşum grafiği ve sonuç haritası

Uyuşum değerlerinin yüksek olması sayesinde anlamlı sonuçlar görülmektedir. Şehir merkezinde seçilen PS noktasının (Şekil 4.14'de siyah kare) deformasyon trendi yıllık -12.8 mm'lik çökme hızına sahiptir. 1995 Mayıs – 2000 Aralık arasında 5.5 yıllık sürede 80 mm'lik düşey yer değiştirme gerçekleşmiştir.



Şekil 4. 14: Konya kent merkezinde ERS-2 verileri ile elde edilen deformasyon trendi

Yapılan tüm değerlendirmeler neticesinde elde edilen sonuçlardan anlaşılacağı üzere özellikle Konya kent merkezi ve yakın çevresinde, ayrıca bazı tarımsal alanlardaki zamana dayalı yer değiştirme davranışları gözlemlenmiştir. QPS ve PSInSAR tekniklerinden elde edilen çökme büyüklükleri bibiriyle tutarlıdır.

Aynı veri seti kullanılarak yapılan StaMPS çözümü Bölüm 4.7.1'de kırsal alanlar için yapılan çalışmalar çerçevesinde anlatılacattır. Sonuçların tutarlılığı ve yazılım karşılaştırılması yine bu bölümde ele alınacaktır.

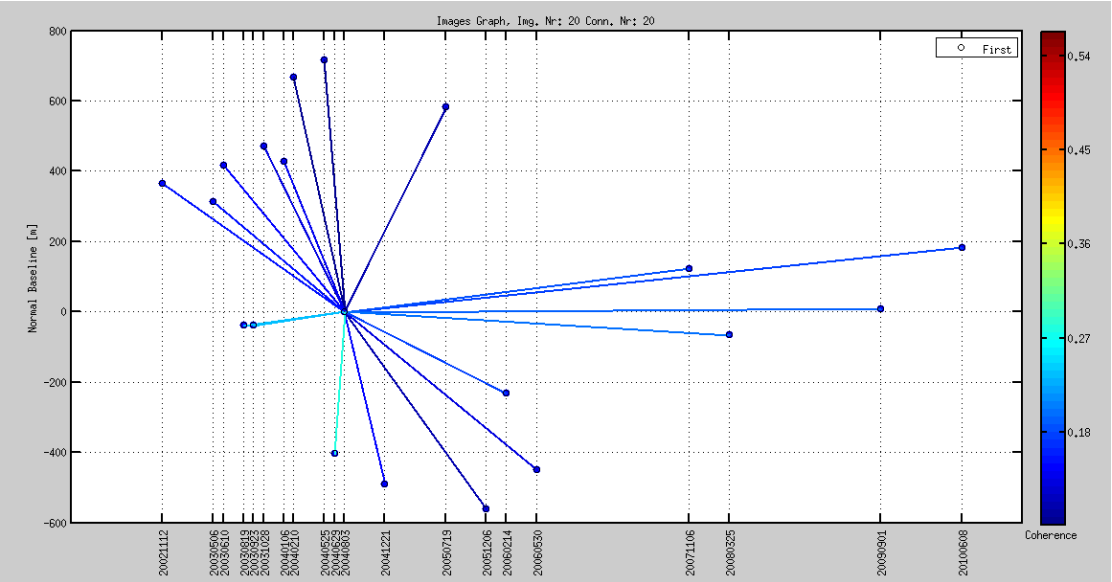
4.6.1.2. Envisat ASAR Yardımıyla 2002-2010 Dönemi Zemin Çökmesi Araştırması

Envisat ASAR artan moddaki veriler ile SarProz yazılımı kullanılarak yapılan özellikle Konya Kent Merkezindeki PSInSAR ve Quasi-PS çalışmaları iki aşamada yapılmış ve sonuçlar birleştirilmiştir. Konya Kent Merkezi için 114 iz ve 343 iz numaralı çerçeveler üst üste çakışmaktadır. Her iki çerçevede de yapılan çalışmalar aynı bölge için (Konya Kent Merkezi) çakıştırıldığında sonuçlar tutarlı görünmektedir.

114 İz ve 2853 Çerçeve için yapılan işleme dair özellikler aşağıda sıralandığı gibidir:

Uydu	:	Envisat
Sensör	:	ASAR
Çerçeve - İz	:	2853 - 114
Veri Modu	:	Artan
Teknik	:	PSInSAR ve Quasi-PS
Bölge	:	Konya Kent Merkezi
Yazılım	:	SarProz

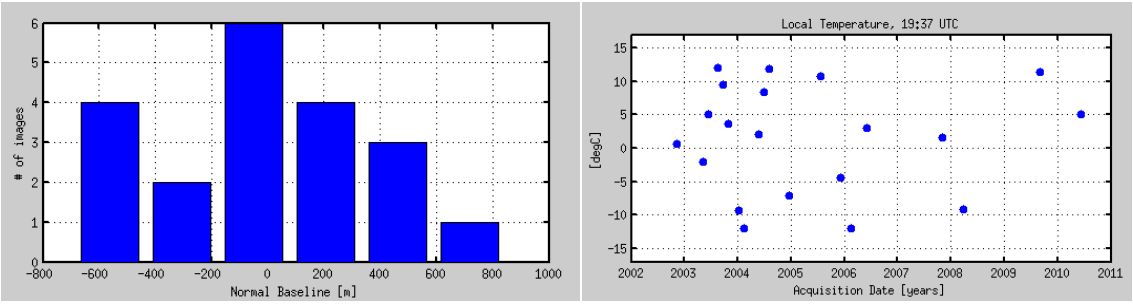
2002.11.12 ve 2010.06.08 tarihleri arasında seçilen 20 adet SLC formatındaki SAR görüntüsü arasında, birincil görüntü olarak dik ve paralel baz uzunluğu değerleri dikkate alındığında optimal olanı Şekil 4.15'de verilen noktasal tabloya göre 2004.08.03 tarihli görüntüdür. Söz konusu görüntü tarihine uygun olarak diğer görüntüler ikincil görüntü olarak işleme tabi tutulmuştur. Şekil 4.15 hem temin edilen görüntü tarihleri hakkında bilgi içermekte, hem de görüntülerin dik ve zamansal baz uzunluklarını göstermektedir.



Şekil 4. 15. 114 iz 2853 çerçeve için işlenecek verilerin baz uzunluk-zaman haritası ve korelasyon oluşumları

Şekil 4.15 için sağ tarafta yer alan lejantta görüntülere dair uyuşum değerleri gösterilmektedir. Uyuşum değeri (γ) 0.18 ile 0.54 arasında değişmekte ve değişim oranları noktasal tabloda çizgiler üzerindeki renk yelpazesi şeklinde gösterilmektedir.

En uygun birincil görüntü Şekil 4.15'e göre belirlendikten sonra, ikincil görüntülerin normal baz uzunluk değerlerini de ayrı bir histogramda değerlendirmek mümkündür (Şekil 4.16).

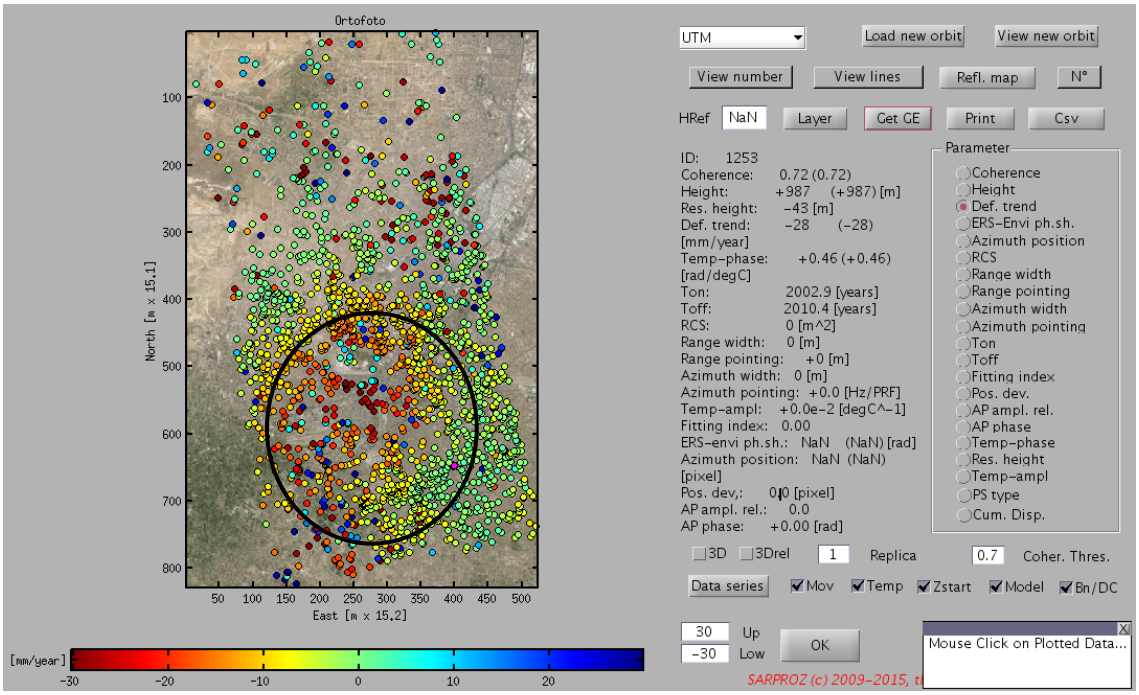


Şekil 4. 16. 114 iz için işlenecek verilerin baz uzunluk değerleri (sol) ve hava tahmin değerlerine (sağ) ait oluşturulan histogram ve noktasal grafikler

Bu histograma göre 0 değerine yakın küçük baz uzunluk değerine sahip olan görüntülerin sayısı daha fazladır. Örneğin 0 ile -200 arasında 6 görüntü +200 arasında 4 görüntü bulunmaktadır ki bu da Envisat verileri ile deformasyon belirleyebilmek için

oldukça uygun değerlerdir. Sağ panelde yer alan grafikte ise; hava tahmin değerleri göz önünde bulundurularak, yağışların özellikle çok olabileceği periyotlara göre bilinçli olarak seçilen görüntülerin mevsimsel baz uzunlukları gösterilmektedir. Başlangıç görüntü seçimi aşamasında her yılın özellikle sonbahar ve kış aylarına denk gelen verilerin temin edilmesine özen gösterilmiştir. Bu grafikler Konya Kent Merkezi için SarProz yazılımı ile gerçekleştirilen PSI ve QPS uygulama sonuçlarına altlık olacak şekilde her uygulama için hesaplanmaktadır.

Bu işlemlerin ardından bir üst bölümde anlatılan veri işleme adımları Envisat verileri ile de gerçekleştirilmiştir. Gerekli işlemlerin sonucunda Şekil 4.17'de verilen deformasyon haritası elde edilmiştir. Siyah çember ile çevrili alan deformasyonun (çökmenin) kent merkezine doğru giderek arttığını (sarıdan kırmızıya) göstermektedir.

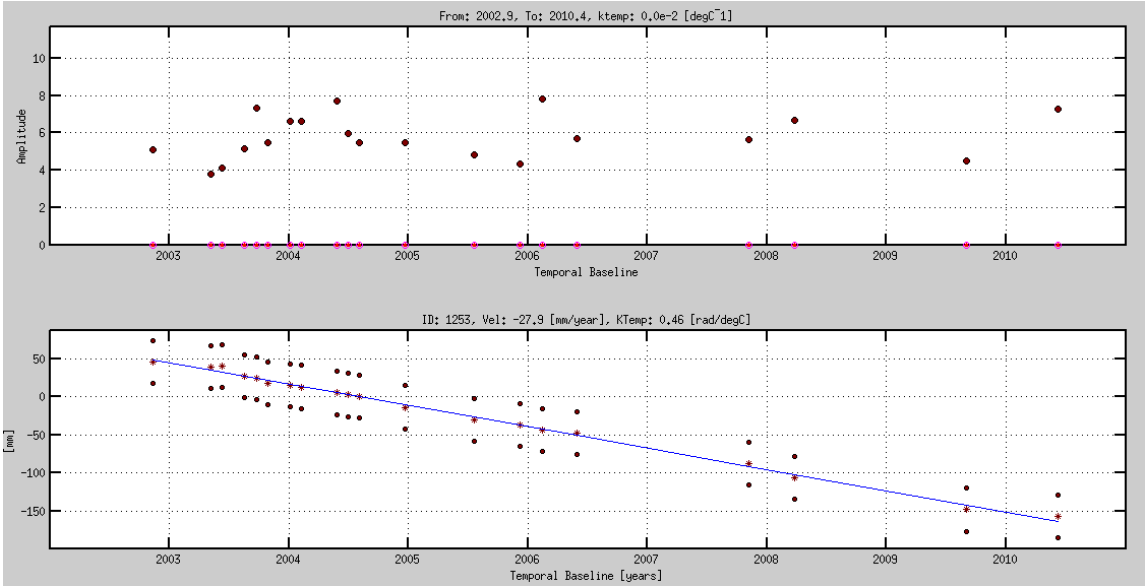


Şekil 4. 17. Konya Kent Merkezi için elde edilen PSInSAR sonucu: Deformasyon haritası (Google-Earth üzerindeki gösterimi)

Çalışma bölgesinin Kent Merkezi olması nedeniyle PS noktaları oldukça yoğundur (Şekil 4.17). Ancak sonuçların daha çok gerçeği yansıtabilmesi amacıyla PS noktalarının seçiminde alan ile orantılı olarak bir değerlendirme yapılmış ve toplamda 2507 nokta işleme alınmıştır. Deformasyon haritası üzerinde ise noktaların bir çoğu,

uyuşum değerinin isteğe bağlı olarak 0.7 seçilmesi nedeniyle elemine edilmiş ve yumuşatılmış deformasyon sonucu sunulmuştur. Şekil 4.17'deki renk çubuğundan da anlaşılacağı gibi deformasyon oranı kent merkezi için yılda -30 mm civarına yaklaşmaktadır.

Elde edilen harita için deformasyon trend grafiği, 20 adet görüntüyü içeren genlik değerleri ile birlikte incelenirse (Şekil 4.18), InSAR zaman serisi analizlerinin, deformasyon değerlerini net bir şekilde ortaya koyduğu görülmektedir. 2002 ve 2010 tarihleri arasındaki 8 yıllık zaman diliminde, çalışma alanının merkezine denk gelen en koyu kırmızı renke sahip noktalardan (PS Numarası: 1253) biri için yıllık deformasyon hızı (düşey yönlü yer değiştirme) -27.9 mm'dir.



Şekil 4. 18. Konya Kent Merkezi için elde edilen PSInSAR sonucu: Deformasyon trend grafiği

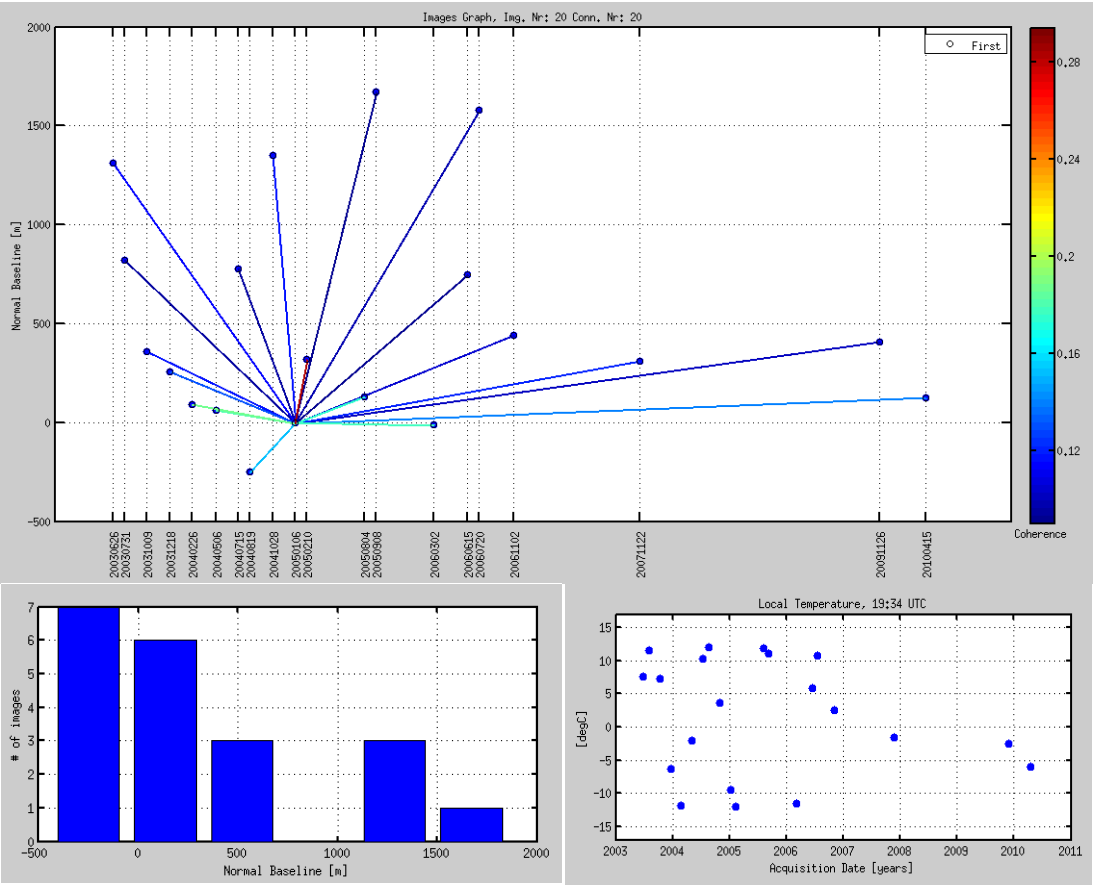
Sonuç olarak özellikle kent merkezine doğru deformasyon trendinin artış gösterdiği görülmektedir. Siyah daire ile belirtilen kısım deformasyonun dıştan içe doğru bir eğilimle gerçekleştiğini göstermektedir.

343 İz ve 2853 Çerçeve için yapılan işleme dair özellikler aşağıda sıralandığı gibidir:

Uydu	:	Envisat
Sensör	:	ASAR
Çerçeve - İz	:	2853 - 343
Veri Modu	:	Artan

Teknik	:	PSInSAR ve Quasi-PS
Bölge	:	Konya Kent Merkezi
Yazılım	:	SarProz

114 iz numaralı çerçeve için gerçekleştirilen işlem adımlarının aynısı 343 iz numaralı çerveye ait SAR görüntüleri için de gerçekleştirilmiştir. Yine toplamda 20 adet Envisat ASAR verisinden yararlanılan çalışmada veriler 2003.06.26 ile 2010.04.15 tarihleri arasında seçilmiştir (Şekil 4.19, üst panel).

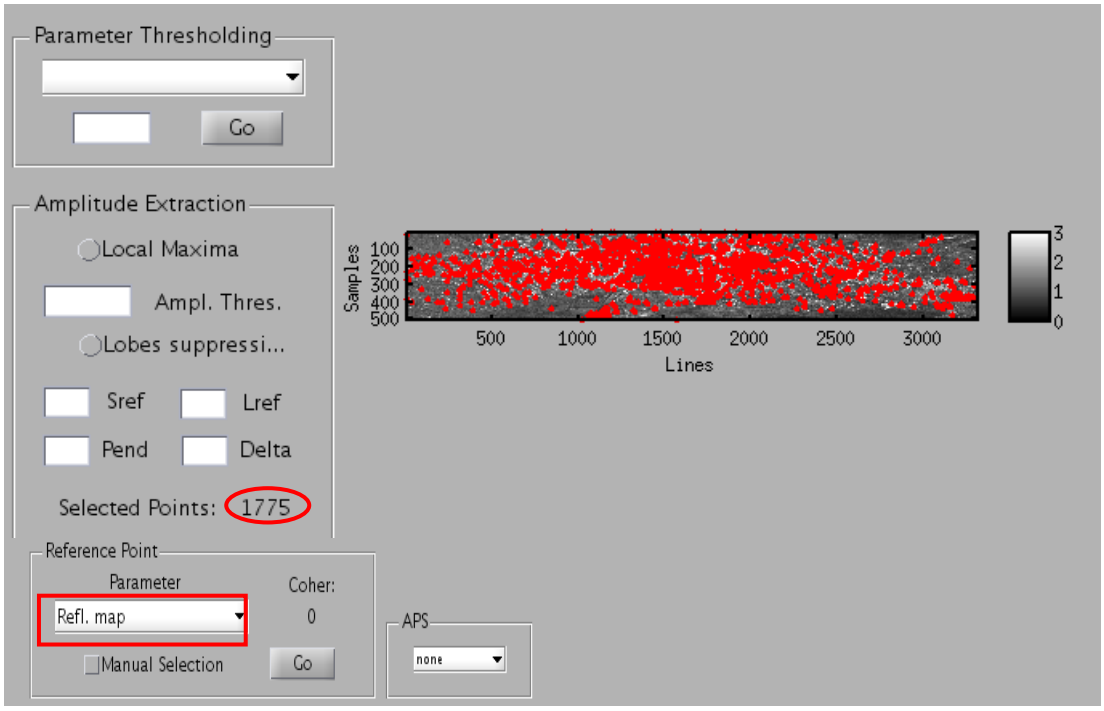


Şekil 4.19. 343 iz için işlenecek verilerin baz uzunluk değerleri için birbirlerine göre konumları (üst panel),seçilen görüntülerin baz uzunluk ve hava durumu tahminlerini gösteren grafikler (alt sol ve sağ paneller)

Burada birincil görüntü olarak 2005.01.06 tarihli görüntü diğer verilere göre optimal baz uzunluklarına sahip olduğu için tercih edilmiştir. Ancak ne yazık ki 2009 ve 2010 tarihinde edinilen verilerin baz uzunluk değerleri birincil görütüye göre oldukça fazla olduğu için, bu durum sonuç interferograma az da olsa olumsuz yönde yansımıştır. Buna rağmen görüntü adetinin PSInSAR veri işleme adet standartlarına göre (<15-20 görüntü) uygun olması ve sadece 2 görüntüye ait baz uzunluk değerlerinin yüksek olması nedeniyle sonuç interferogram umulan sonuçları yansıtmıştır. Görüntü seçiminde

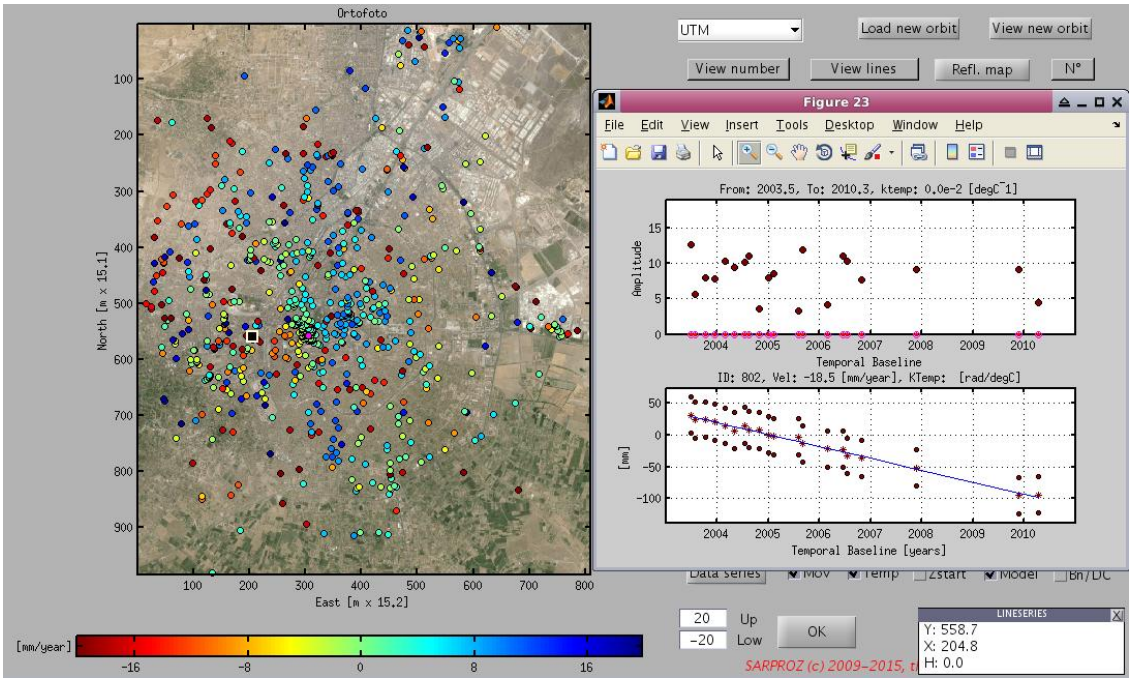
yine 4.19'da verilen alt paneldeki histogram ve noktasal grafiklerin umulduğu gibi çizilebilmesi için son derece hassas davranılmış, kısa baz uzunluk ve yağış değerleri konusundaki kriterlerimiz gözönünde bulundurulmuştur.

Şekil 4.20'de PS noktalarının seçimi aşamasında verilen parametreler yer almaktadır. 1775 adet PS noktası için, referans noktasının seçiminde, yansıma haritasının (reflectivity map) tam olarak çalışma alanı ile GCP sayesinde düzgün bir şekilde çakıştırılması nedeniyle, çeşitli parametreler arasından "Yansıma Haritası" parametresi seçilmiştir.



Şekil 4.20. PS noktalarının seçim işlemi aşamasında belirlenen parametre değerleri ve yansıma haritası üzerindeki PS noktaları

Diğer işlem adımlarına dair elde edilen veriler, bir üst bölümde örneklerinin bulunması nedeniyle burada gösterilmeyecektir. Doğrudan Şekil 4.21'de verilen deformasyon sonuç haritası yorumlanacaktır.

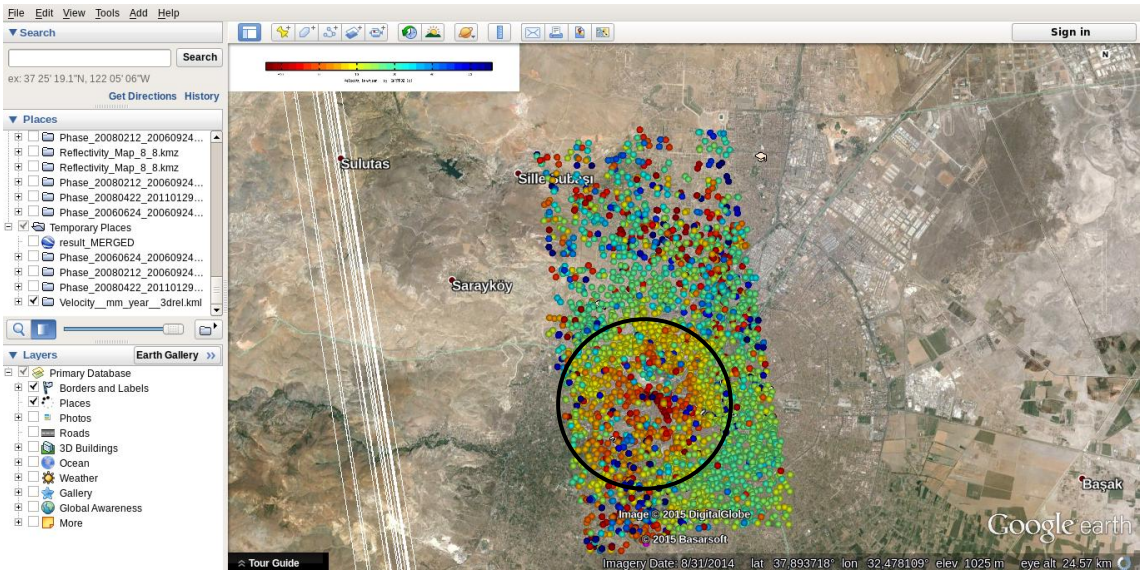


Şekil 4. 21. Deformasyon haritası ve grafiği (sağda)

Deformasyon haritası incelendiğinde (Şekil 4.21), PS noktalarının oldukça seyreltilmesi, Şekil 4.20'de verilen yansıma haritası üzerinde kısıtlı miktarda PS'in seçilebilmesi dolayısıyla gürültülü sonuç içermektedir. Bu nedenle haritada deformasyon bilgisi tam olarak elde edilemese de, Şekil 4.21'de sağ panelde verilen trendlerde 2003 ile 2010 yılları arasındaki 7 yıllık zaman dilimi içerisinde, çalışma alanının merkezine denk gelen en koyu kırmızı renke sahip noktalardan (Siyah Kare - PS Numarası: 802) biri için yıllık deformasyon hızı (düşey yönlü yer değiştirme) -18.5 mm'dir.

Sonuç olarak, her iki çerçeve için de özellikle aynı bölgeler işleme tabi tutulmuş ve sonuçların tutarlılığı böylece karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.22'de PS noktalarının seyreltilmeden doğrudan Google Earth üzerindeki gösterimi verilmektedir. Burada siyah daire ile çevrili alan içerisinde deformasyon (çökme) net bir şekilde dışarıdan içeriye doğru artarak varlığını göstermektedir. Şeklin kuzeyinde yer alan noktalar, daha çok ekili veya çıplak alanlara denk gelmekte, korelasyonu düşük olan PS noktalarını ifade etmektedir. Bu noktalar herhangi bir deformasyonun işaretcisi değil, dağınık olarak saçılmış alçak uyuşumlu PS noktalarıdır.



Şekil 4. 22. Deformasyon haritasının google earth üzerindeki konumu

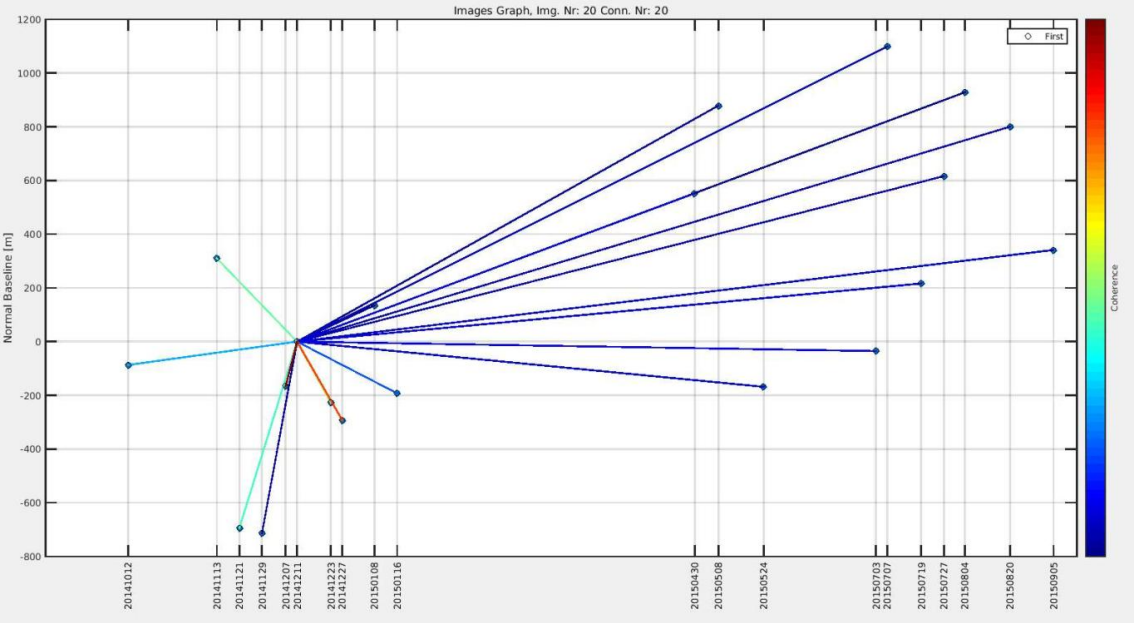
4.6.1.3. CosmoSkyMed Yardımıyla 2014-2015 Dönemi Zemin Çökmesi Araştırması

Uydu	:	CosmoSkyMed
Sensör	:	Stripmap
Veri Modu	:	Artan
Teknik	:	PSInSAR
Bölge	:	Konya Kent Merkezi
Yazılım	:	SarProz

248 Proje numarsıyla ASI'ye yapılan proje başvurusu kapsamında 100 adet CosmoSkyMed görüntü temini için 2 yıl süre ile anlaşma imzalanmıştır. Yapılan anlaşma ile 2011-2017 yılları arasında talep edilen 100 görüntüden 80 adeti Stripmap HIMAGE modunda arşiv verisi, 20 adeti ise havzadaki obrukların gözlemlenmesi amacıyla daha yüksek çözünürlük ve görüntü boyutuna sahip Spotlight görüntüsüdür.

80 görüntüden 2014/10/12 - 2015/09/05 tarihleri arasında olmak üzere 20 adet SCS_B - Level 1A özelliğinde görüntü havzadaki çökme oranlarını belirlemek amacıyla temin edilmiştir. Seçilen 20 adet SAR verisine ait veri işleme sürecine dahil edilmek üzere görüntü kombinasyonu grafiği oluşturulmuştur (Şekil 4.23). Grafik üzerinde yer alan uyuşum renk çubuğu dikkate alındığında, mavi renklere doğru uyuşumu düşük olan

noktalar normal baz uzunluk değerlerine göre gösterilmektedir. Ne yazık ki CosmoSkyMed görüntülerimizin ancak yarısı yüksek uyuşuma sahip noktalardır. Yine de sonuçlara olan etkisi gerekli düzeltmeler yapılarak ortadan kaldırılabilmiştir.



Şekil 4. 23. CosmoSkyMed verilerine ait PSInSAR veri işlemeye esas görüntü kombinasyon grafiği (Birincil Görüntü: 2014/12/11)

Bilindiği gibi X bandta çalışan SAR görüntüleri yüksek çözünürlük değerine sahip olmaları nedeniyle özellikle yapılaşmış alanlarda, düzgün bir yapı üzerinde neredeyse her metre için sağlıklı bir PS noktası seçebilmemize olanak sağlar (Ferretti ve ark., 2011b; Crosetto ve ark., 2013). Yapılarda ve çevresinde yer değiştirme miktarını belirlemedeki kabiliyeti yüksek olan CosmoSkyMed (CSK) verileri ile, çalışma alanımızın da en önemli odak noktası olan Konya Kent Merkezi'nin görüntülenmesi tüm uygulama sonuçlarına yeni bir yön getirmiştir. Özellikle diğer bantlar ile elde edilen genel anlamda deformasyon oranının, yapı bazındaki durumunun belirlenmesi bu anlamda çalışmamızın önemli bir kısmını oluşturmaktadır.

Her 4 günde bir görüntü elde edilebilen ve 3X1 m çözünürlük değerine sahip CSK verileri ile birlikte PSInSAR uygulaması SarProz yazılımında gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla SarProz'da yapılan başlangıç çalışmaları, diğer uygulamalarda bahsedilen işlem adımları ile benzer özelliktedir. Çalışmanın geneli için, ilgi alanımız üzerinden (40X40 km'lik alan için) genlik değeri 0.7' den büyük olan yaklaşık 470000 PS noktası seçilmiştir. Yani m^2'ye yaklaşık 3 adet PS noktası denk gelmektedir. Dolayısıyla

çözümleme işlemi oldukça zordur ve sonuç interferogramın doğruluğunu bozucu tüm etkenler ortadan kaldırılmalıdır. Bu nedenle CSK verileri ile gerçekleştirdiğimiz bu çalışma için, atmosferik hatanın daha hassas bir şekilde ortadan kaldırılması gereklidir. Bu doğrultuda yapılan atmosferik düzeltme işlemi için iki farklı yöntem denenmiş, sonuç interferogramlar karşılaştırılarak sağlıklı olan yöntemin seçilmesi ile diğer işlem adımlarına devam edilmiştir.

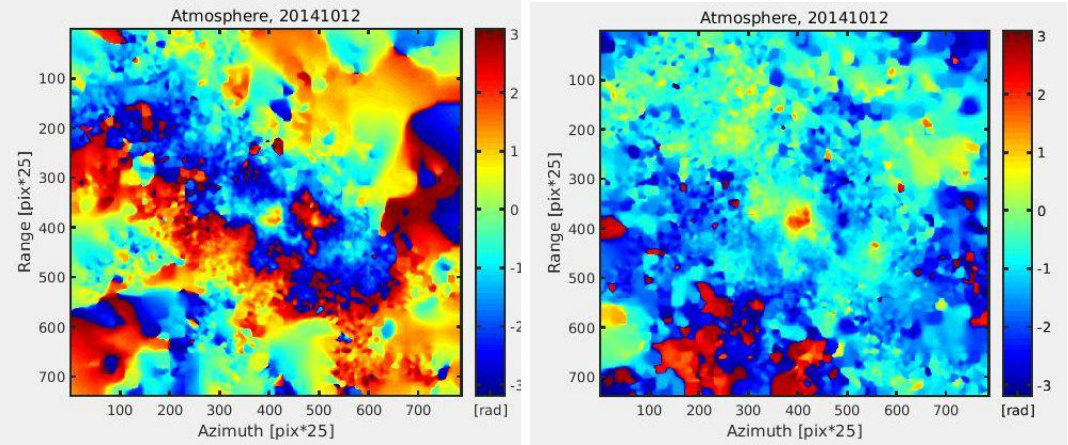
Bu çalışmanın yapılabilmesi için, oluşturulan interferogramlar ile genlik değeri 0.85'ten yüksek olan çok daha sabit noktalar kullanılarak atmosferik düzeltme işlemi için APS (Atmospheric Phase Screen) tahmin aşamsına geçilmiştir (Şekil 4.24).

APS veri işleme modul seçenekleri aşağıda sıralandığı gibi üç seçenekten oluşur:

- I.P. - inverted parameters (ters parametreler)
- I.R. - inverted residuals (ters rezidüel (artık))
- Tri. I.R. - Triangular inverted residuals (üçgenlenmiş ters artık)

Genellikle APS için tercih edilen seçenek I.R.'dir. Eğer I.R. seçimi ile APS iyi görünüyorsa, analizi gerçekleştirilen alan homojen ve yüksek bir uyuşum değeri veriyorsa, diğer aşamalara geçilebilir ve sonuçlar beklenen değeri verir. Ancak, daha karışık durumlarda, uyuşum haritası çok da tatmin edici olmayabilir. Bu durumun nereden kaynaklandığının her adım için iyi bir şekilde analiz edilmesi gerekir. Bunun haricinde doğrudan I.P. yöntemi seçilerek, problemin çözümüne daha kısa yoldan gitmek de mümkündür. Örneğin, başlangıçtan itibaren her aşamada gerçekleştirilen tüm işlem adımları tam olarak sorunsuz bir şekilde gerçekleşmiş ve hiç bir sorun gözükmüyorsa, o zaman problemin çözümü I.P. seçeneğini kullanmak ile bulunabilir. I.P. APS her zaman yüksek bir uyuşum değeri verir. Fakat bu çözüm yolu I.R.'ye göre biraz daha verilerin işlenme sürecini zorlayan bir çözümdür. Dolayısıyla I.P. yöntemi kullanılırken sözü edilen konulara dikkat etmek gerekmektedir.

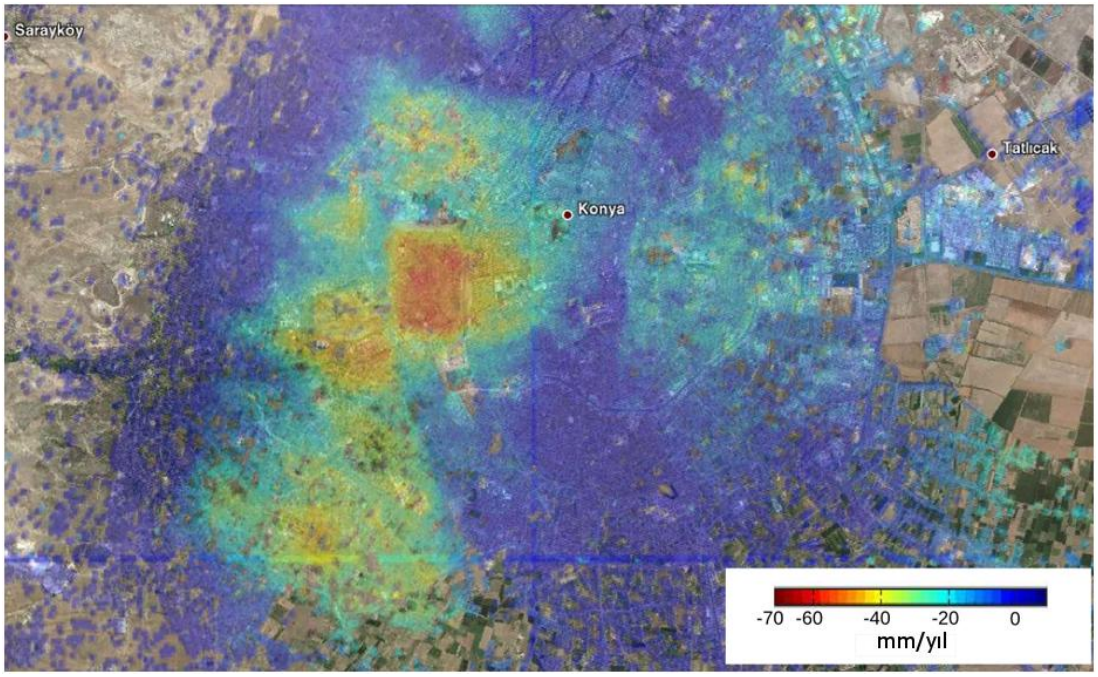
Tüm bu durumlar göz önünde bulundurularak çalışmamız için en uygun olan Atmosferik faz ekranı Şekil 4.24'de sol panelde gösterilen I.P. seçeneğidir. Burada uyuşum değeri daha homojen sonuç vermekte ve daha yüksek kalitede beklendiği için, Atmosferik faz ekranı I.P. olarak seçilmiştir.



Şekil 4. 24. Sol panel :IP (inverterted parametres), sağ panel: IR (inverted residuals) ile elde edilen APS sonuçları

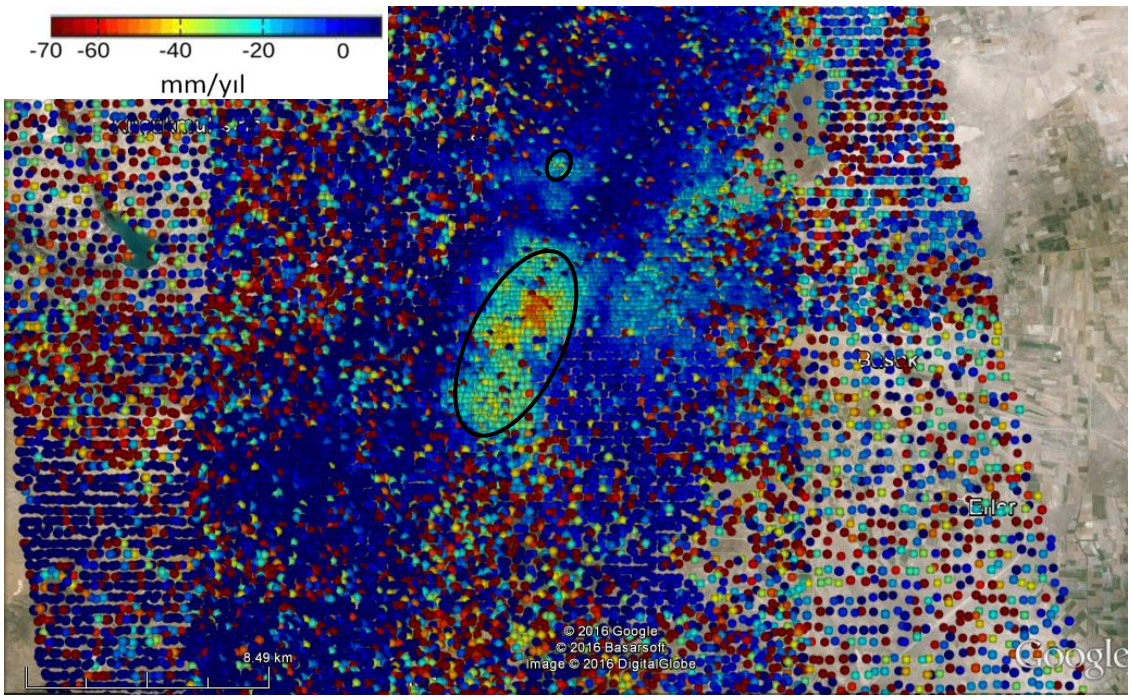
Böylelikle sağlıklı bir PSInSAR sonucu elde edebilmek için tüm aşamalar tamamlanmıştır. Şekil 4.25'de, CSK verileri ile gerçekleştirilen PSInSAR çalışmasının sonucunda elde edilen örneklenmiş hız haritası görülmektedir.

Burada Google earth haritası üzerinde yarıyarıya opaklaştırılmış PSInSAR sonuç haritası Konya Merkezi için yerdeğiştirmeyi göstermektedir. Deformasyon oranı özellikle şehir merkezinde yıllık - 70 mm'ye kadar ulaşmaktadır.



Şekil 4. 25. Sarproz yazılımında CSK verileri ile elde edilmiş PSInSAR - ©ASI - Agenzia Spaziale Italiana - 2015. Arka plan görüntüsü © Google Earth™, 2016

Yapılan bu çalışmanın neticesinde tüm PS noktaları kullanılarak zaman serisi haritası oluşturmak mümkündür (4.26).



Şekil 4. 26. CSK verileri ile elde edilmiş PS noktalarının (~470000 adet) Google Earth üzerindeki görünümü

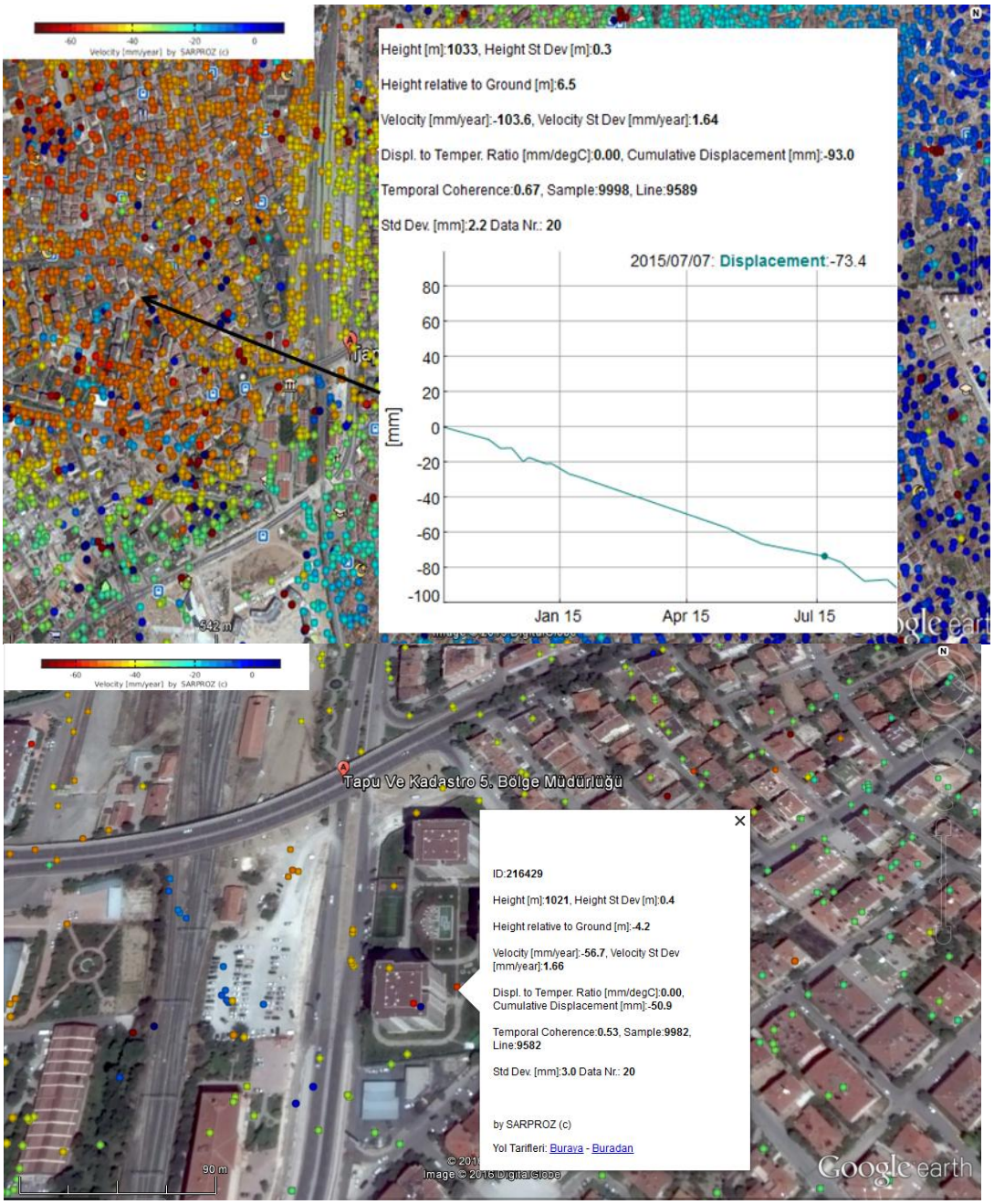
Toplam 470000 PS noktası yerdeğiştirme değerleri ile birlikte Google Earth üzerine aktarıldığında, özellikle görüntülenmek istenen alanlar (örneğin yapı deformasyonu için çöktüğü düşünülen binalar), o noktaya yakınlaşlarak, binanın üzerine denk gelen PS noktası için 20 görüntü tarihine ait deformasyon değeri görüntülenebilir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, her bir PS'in doğruluğudur. Genel anlamda Şekil 4.26'da verilen PS zaman serisi haritasında deformasyonlu bölge açık maviden, sarıya, sarıdan, turuncuya doğru gösterilmektedir. Çevresinde yer alan ve birbirini takip eden koyu mavi noktalar da deformasyonun gözlenmediği ancak uyuşumlu noktaları ifade eder. Fakat bu örnekte birbirini takip etmeyen, herhangi bir homojenlik göstermeyen kırmızı ve mavi (birbiriyle karışık) noktalar görünmektedir. Bu noktalar Şekil 4.23'de de verilen grafiğe bağlı olarak yüksek baz uzunluğuna sahip görüntüler nedeniyle (~ 10 adet), uyuşumsuz noktalardır. Deformasyon haritasının genel görünümünü bozmamak adına, görüntü işleme aşamasında uyuşum değeri aşağıda tutularak işlemden bilinçli olarak bu noktalar çıkartılmamıştır. Burada bilinmesi gereken en önemli nokta, gürültü içeren PS'lerin zaman serisi grafikleri görüntülenirken

dikkate alınmamasıdır. Şekil 4.26'da gerçek anlamda deformasyonu yansıtan bölümler siyah daireler içine alınmış lokasyonlardır.

Bu bilgiler ışığında, Şekil 4.27-üst panelde kent merkezindeki herhangi bir nokta için deformasyon haritası üzerindeki konumu (solda), zaman serisi garfiği (sağda) ile birlikte görsterilmektedir. Siyah ok ile işaret edilen nokta için, 20 görüntüye ait deformasyon oranı tek tek görülebildiği gibi, burada Şekil 4.27 örneğinde 12 Kasım 2014 tarihinde deformasyonun 0 olduğu düşünülürse, 7 Temmuz 2015 tarihindeki yer değiştirme değeri - 73.4 mm olarak görülebilmektedir. Toplam yer değiştirme ise (kümulativ deplasman) -103.6 mm/yıl değerinde hesaplanmıştır.

Şekil 4.27'de alt panel ise, yerdeğiştirmenin varlığı önceden bilinen Konya Tapu ve Kadastro binası üzerindeki PS noktalarını göstermektedir. Yukarıda da bahsedildiği gibi bina üzerine ve çevresine denk gelen mavi noktalar uyuşumu düşük yani korelasyonsuz noktalardır ve dikkatte alınmamalıdır. Ancak sağ tarafta deformasyon bilgisi verilen işaretli noktalar için deformasyon değeri gerçeği yansıtmaktadır. Ayrıca bu noktanın doğrulama işlemi, Sentinel-1 verisi ile oluşturulan PS ve bölgede bulunan GPS noktası ile ilerki bölümde karşılaştırılarak gerçekleştirilmiştir. Noktaya ait deformasyon değerlerini içeren zaman serisi grafiği ve değerleri yine söz konusu bölümde verilmektedir.

Benzer şekilde, bozucu etkilerden arındırılmış ve korelasyonlu her bir PS noktasından ve (diğer noktalardan), deformasyon oranları rahatça elde edilebilir.



Şekil 4. 27. Sarproz yazılımında CSK verileri ile elde edilmiş PS noktaları ve zaman serisi grafiği (üst panel), Konya Tapu ve Kadastro Müdürlüğü binası ve PS noktaları (alt panel).

4.6.1.4. Sentinel-1 Yardımıyla 2014-2015 Dönemi Zemin Çökmesi Araştırması

Uydu	:	Sentinel-1
Çerçeve	:	160 (yörüngesel)
Şerit	:	IW3
Veri Modu	:	Artan
Teknik	:	PSInSAR
Bölge	:	Konya Kent Merkezi
Yazılım	:	SarProz

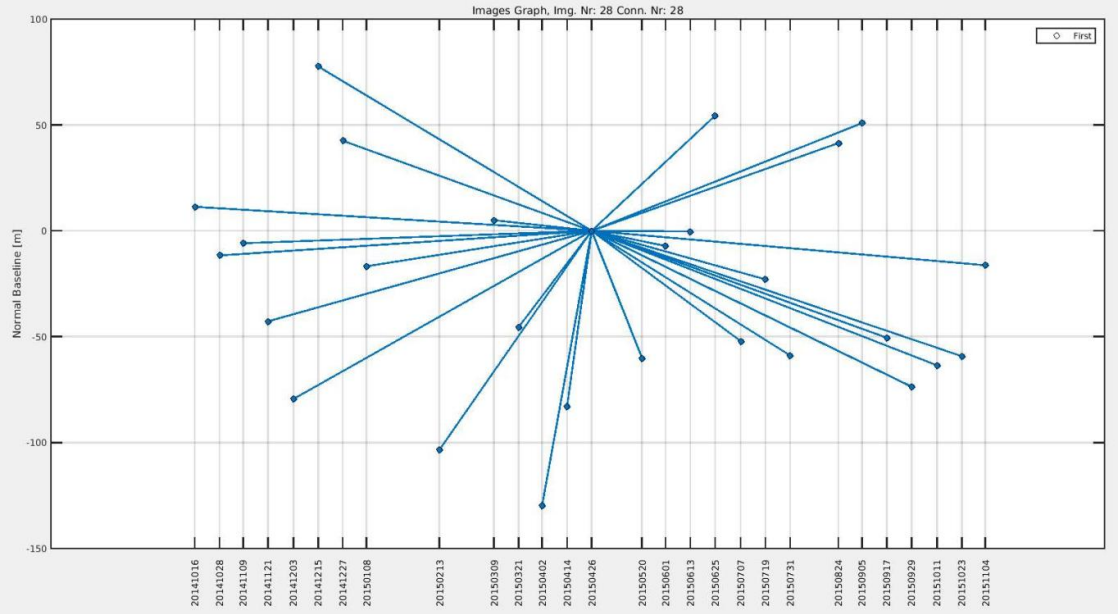
Bu bölüme kadar yapılan çalışmalar arasında, C bantta çalışılan uydu verilerinden (Envisat ve ERS) yararlanılarak Konya ili ve çevresinde gerçekleşen düşey yönlü yerdeğiştirme oranları belirlenmiştir. 1995-2000 yılları arasındaki değişim ERS verileri kullanılarak, 2002-2010 yılları arasındaki değişim ise yine C bantta işlem gören Envisat verileri yardımıyla tespit edilmiş ve sonuçları tartışılmıştır. Çalışma alanının geçtiğimiz son yıllardaki çökme potansiyeli ise X bantta çalışan CosmoSkymed uydu görüntüleri ile belirlenerek genel çökme değerleri yıllar bazında da değerlendirilmiş, çökmeye dair umulan çerçeve çıkarılmıştır.

Tüm bu çalışmalara ek olarak, tezde en güncel uydu görüntüsü olan Sentinel-1 uydu verileri de Avrupa Uzay Ajansı'ndan temin edilerek uygulama aşamasına yeni bir yön getirilmiştir. Avrupa Uzay Ajansı (ESA), dünyadaki tüm yüzeyleri tarayabilecek ve doğal felaketlerle iklim değişikliğinin etkilerinin takip edilmesinde çığır açacak Copernicus programı dahilindeki ilk uydusu olan Sentinel- 1'i 3 Nisan 2014 tarihinde uzaya göndermiştir. Sentinel 1 uydusunun ardından yörüngeye devam eden Sentinel uydu misyonları yerleştirilmeye devam edecektir. Sentinel'i diğerlerinden farklı kılan en önemli özellik dünyadaki tüm yüzeyleri izleyebilmesinin (kara, deniz, buz yüzeyleri) yanısıra, aynı zamanda doğal afet durumunda harekete geçip, dünyadaki arama ekiplerine görüntüler gönderebilecek kapasiteye sahip olabilmesidir. Sentinel-1 uydusunun devamı niteliğinde gönderilecek her uydunun dünyada taradığı yerler ve uzmanlık alanları farklı olacak şekilde tasarlanmıştır. Tüm program tamamlandığında, büyük çaplı orman yangınları, volkanik patlamalar, sel felaketleri, petrol sızıntıları, buzul erimeleri, hava kirliliği ve deprem hasarları gibi birçok olayın geniş çaplı etkilerini görmek bu sayede mümkün olacaktır.

Avrupa Komisyonu denetimindeki proje, ESA ve Avrupa Çevre Ajansı (EEA) ile ortak yürütülmektedir. Böylesi önemli ve özellikle InSAR dünyasında büyük ilgi uyandıran Sentinel-1 verilerine ait uydudan alınan ilk görüntülerin işlenmesi için SAR veri işleme kapasitesi olan tüm yazılımlar, bu verilere uygun modüller geliştirmeye başlamışlardır. Sentinel verilerini işleyebilme kapasitesine sahip olan yazılımlar ESA tarafından geliştirilen Sentinel Toolbox modülünün yanısıra artık StaMPS ve SarProz ile de sağlanabilmektedir.

SarProz yazılımı ile gerçekleştirilen çalışma kapsamında ücretsiz olarak ESA'dan 30 adet görüntü temin edilmiştir. Her biri 8 GB boyutunda olan görüntülerden 2 tanesi baz uzunluk değerleri bakımından, diğer verilerle uyuşumsuz olması sebebiyle

çıkartılmış ve 16/10/2014 - 04/11/2015 tarihleri arasında toplam 28 adet görüntü PSInSAR yöntemi ile zaman serisi oluşturma çalışmalarını gerçekleştirmek üzere işlenmiştir (Şekil 4.28).



Şekil 4. 28. Sentinel verilerine ait PSInSAR veri işlemeye esas görüntü kombinasyon grafiği (Birincil görüntü: 2015/04/26)

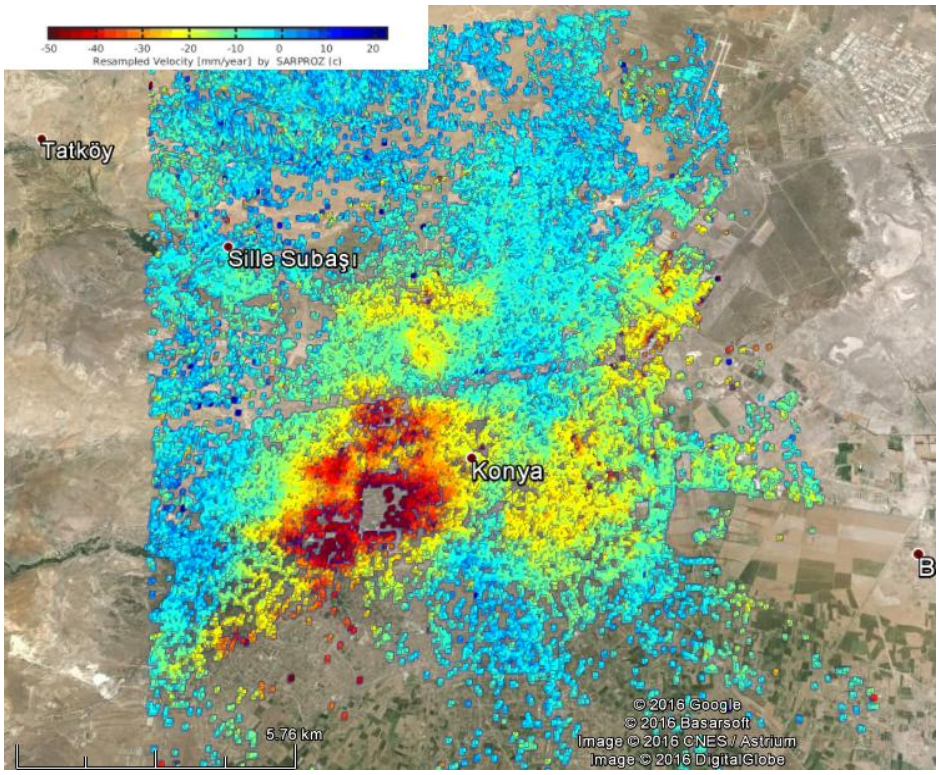
PSInSAR görüntü işlemede Yıldız Grafik şeklinde oluşturulan veri kombinasyonu, CSK görüntülerinin tersine birbiriyle oldukça yüksek uyuşuma sahiptir (Şekil 4.28). 28 görüntü arasından birincil görüntü olarak en uygunu 2015/04/26 tarihli görüntüdür.

Görüntülerin çözünürlüğü menzil doğrultusunda yaklaşık 3.1 m ve azimut doğrultusunda 27.1 m'dir. Böylesi yüksek çözünürlük sonuçlara da oldukça iyi yansımış, her bir PS için korelasyonu yüksek değerler elde edilmiştir.

Zaman serisi oluşturma işlemleri SarProz'da gerçekleştirilen önceki işlem adımlarıyla benzer niteliktedir. Bu nedenle genel anlamda, örneklenmiş hız haritası (Şekil 4.29) öncelikli olarak değerlendirilmiştir. Burada gösterilen çökme oranın yine CSK verileri ile elde edilen alan ile birebir aynı oranda olduğu görülmektedir (Karşılaştırma için; bknz. Şekil 4.25).

Deformasyonlu alanların tam olarak net bir şekilde görüntülenebilmesi için, haritanın uyuşumsuz verilerden arındırılması gerekmektedir. Bu amaçla, 5X5 oranında maskelenen haritada görüldüğü üzere Kent Merkezindeki korelasyonu düşük noktalar

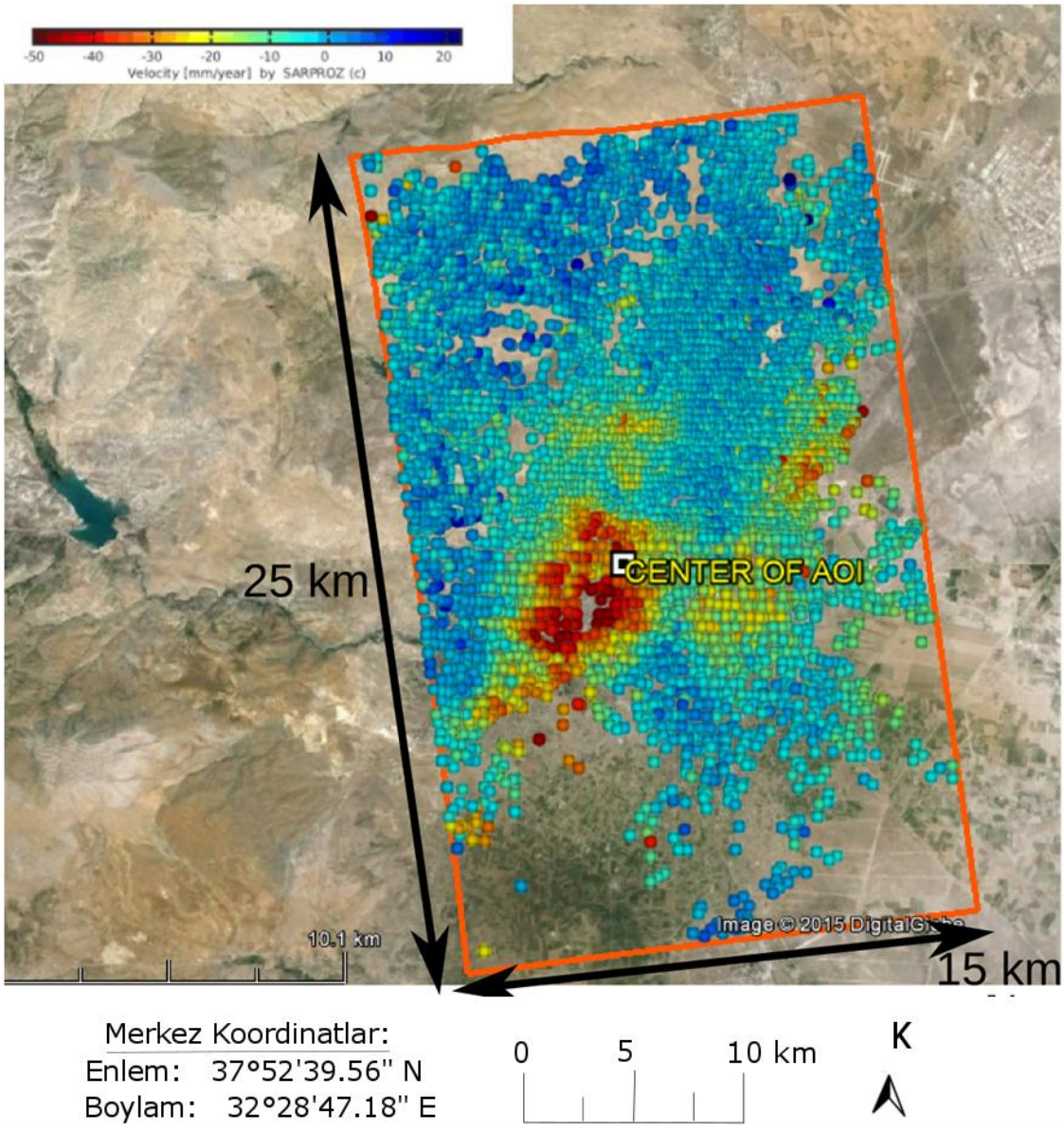
çıkarılmıştır. Bu kısımlar çıplak görünmektedir. Bunun nedeni harita üzerinde görüntülenemeyen kısımlarda C bant verisi ile görüntülenen alan için yeteri derecede düzgün yansıma değerine sahip objelerin bulunmasıdır. Görüntülenen kısımlar ise tamamen birbiriyle korelasyonludur. Bu durum X bantta çalışan CSK verileri için çok fazla PS noktası üretme kabiliyeti sebebiyle sorun olmamasına rağmen, yüksek çözünürlüğe sahip C bantta çalışan Sentinel verilerinde ancak Şekil 4.29'da gösterilen ölçüde deformasyonlu alanlar görüntülenebilir. Başka bir deyişle, C bantta çalışan uydulardan elde edilen verilerden X banttakilere göre daha az PS noktası elde edilebilmiştir.



Şekil 4. 29. Sarproz yazılımında Sentinel-1 verileri ile elde edilen örneklenmiş hız haritası

Yukarıda bahsedilen durum tüm PS noktalarının deformasyon değerleri ile birlikte Google earth haritası üzerine aktarılması halinde de benzerdir. Genel görünümü ile Şekil 4.30'da verilen haritada, CSK sonuçlarına göre tek fark, hemen hemen tüm PS'lerin birbiriyle korelasyonlu olmasıdır. Hatırlanacak olursa CSK ile yerdeğiştirmenin çok olduğu alan dışında kalan PS'ler için oldukça fazla oranda düşük korelasyona sahip PS'ler de üretilmiştir. Burada Sentinel için bozucu PS olmaması nedeniyle sonuçlar

direkt olarak yorumlanabilir. Sarı renkten kırmızı renkli alana doğru yaklaşık -30 ile -50 mm/yıl oranında çökme değeri görülmektedir (Şekil 4.30).



Şekil 4. 30. Sarproz yazılımında Sentinel-1 verileri ile elde edilmiş PS noktalarının (~130000 adet) Google Earth üzerindeki görünümü

Sentinel-1 verisi ile yukarıda verilen haritalarda da görüldüğü gibi özellikle Konya Kent merkezinde CSK'da olduğu kadar fazla sıklıkta PS noktası elde edilememesine rağmen yine de çalışma alanımız için yeteri miktarda yani km^2'ye 2-3 PS noktası gelecek şekilde yaklaşık 130000 adet iyi korelasyona sahip PS elde edilmiştir. Bu nedenle verdiği sonuçlar CSK ile neredeyse birebir örtüşmektedir. En güncel

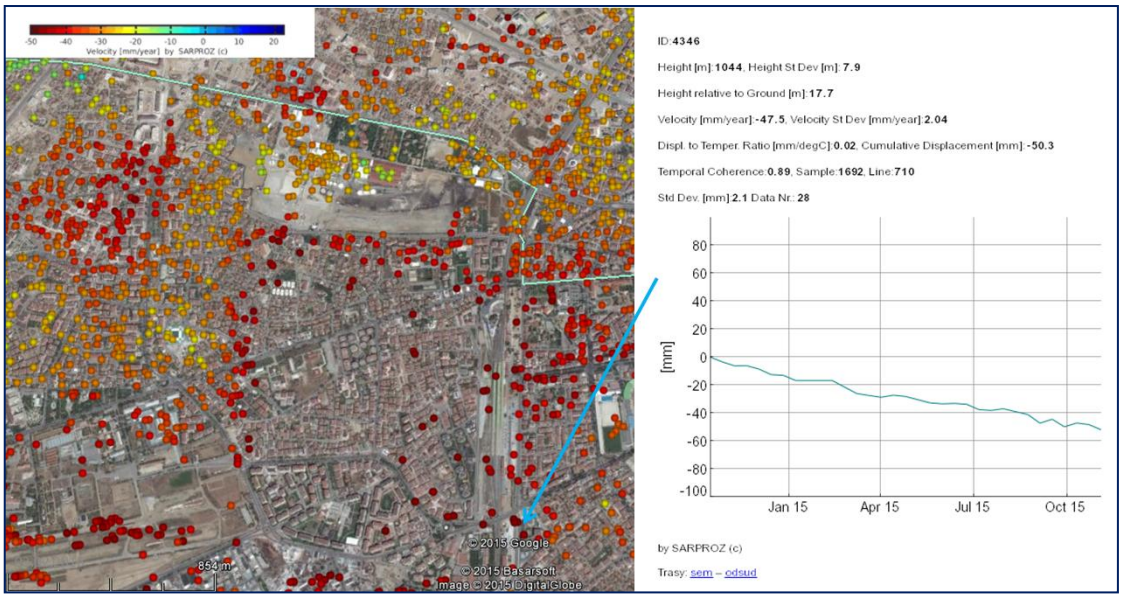
uydulardan biri olan Sentinel-1 uydu verileri ile elde edilen bu sonuç harita, özellikle bu uydu için yapılan çalışmalar arasında çok önemli bir sonucu göstermesi nedeniyle oldukça önemlidir.

Sentinel-1 sonuçlarından elde edilen çökme değerleri ile yer doğrulaması yapmak mümkündür. Bu amaçla 110Y121 sayılı proje kapsamında elde edilen GPS verileri ile örnek bir nokta için (Tapu ve Kadastro Binası civarında yer alan CSK örneğinde gösterilen nokta civarı - Bknz. Şekil 4. 27-alt panel) karşılaştırma yapılmıştır.

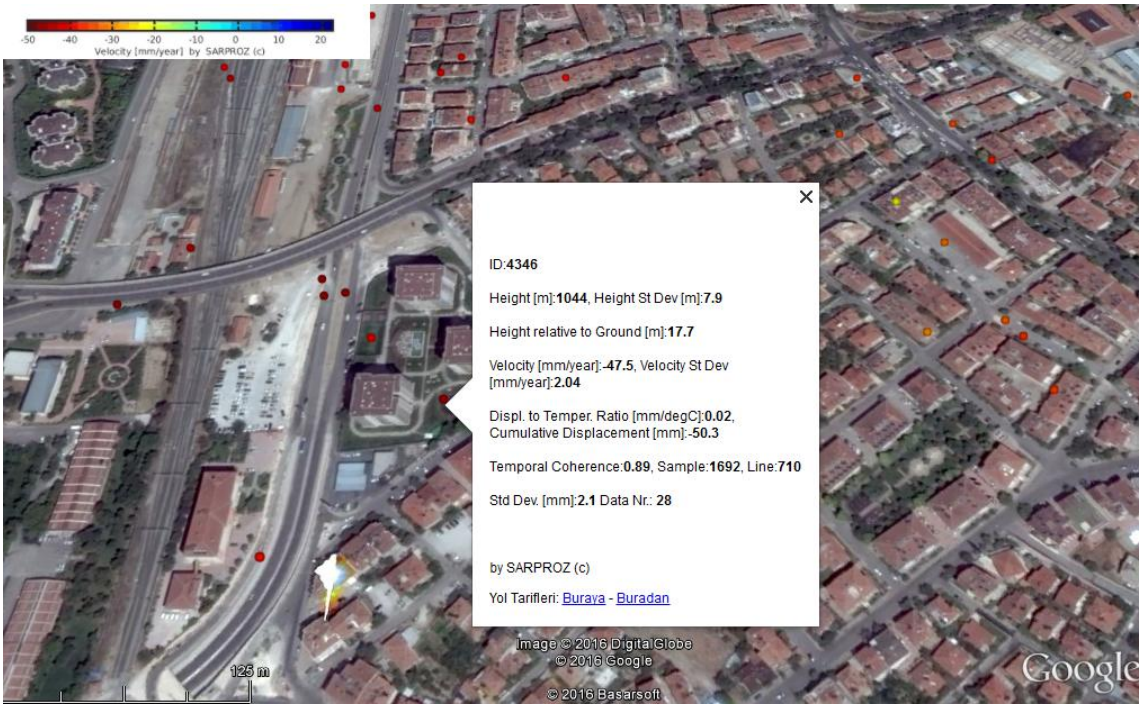
4.6.1.4. 1. Sentinel verileri ile elde edilen PSInSAR sonuçlarının GPS sonuçları ile karşılaştırılması: Konya Kadastro Müdürlüğü Binası Örneği

Bir üst bölümde CosmoSkyMed uydusuna ait yüksek çöznürlüklü X bant verileri kullanılarak istenilen bir bina üzerinde seçilen PS noktasının yıllık yerdeğiştirme oranı zaman serisi yardımı ile gösterilmiştir (Şekil 4.27, alt panel). Burada da aynı bina üzerine denk gelen Sentinel-1 verileri yardımı ile elde edilmiş PS noktası için zaman serisi grafiği oluşturulmuş (Şekil 4.31) ve GPS değerleri ile karşılaştırılmıştır. Ancak bilindiği gibi InSAR verileri radarın bakış yönünde (LOS-Line of sight) görüntüleme yaparak yerdeğiştirmeyi tespit eder. Eğer yatayda herhangi bir deformasyon beklenmiyor ise InSAR sonuçları dönüştürülerek GPS sonuçları ile karşılaştırılabilir. Böylece gerekli hesaplamalar neticesinde sonuçların tutarlığını ortaya koymak mümkündür.

Şekil 4.32, CSK verisinde seçilen Kadastro binası bahçesindeki nokta ile hemen hemen aynı yerde bulunan PS noktasına ait yıllık deformasyon değerini de gösteren bilgiler içermektedir. Genel görünüm ile birlikte verilen zaman serisi grafiğinde her görüntü tarihi için yerdeğiştirme grafiği sağ panelde yer alırken, söz konusu nokta için gerekli dönüşümün yapılmasında kullanılacak kümulativ yer değiştirme oranı da radarın bakış doğrultusunda -50.3 ± 2.04 mm'dir.



Şekil 4. 31. Sarproz yazılımında Sentinel verileri ile elde edilmiş PS noktaları ve zaman serisi grafiği (sol panel), Konya Tapu ve Kadastro Müdürlüğü binası ve PS noktası (sağ panel).



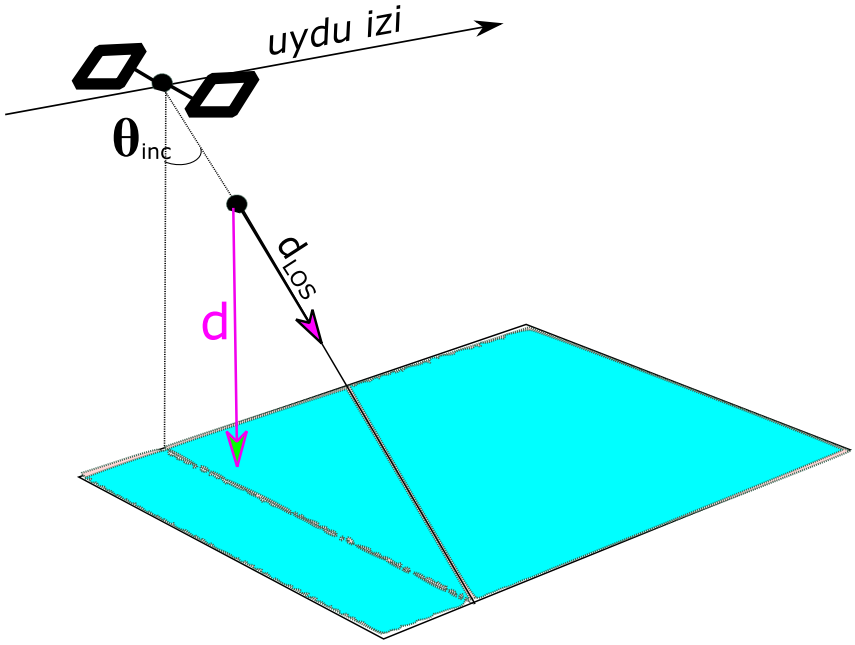
Şekil 4. 32. Sarproz yazılımında Sentinel-1 verileri ile elde edilmiş Konya Tapu ve Kadastro Müdürlüğü binası bahçesindeki PS noktası.

4.6.1.4. 2. Bakış açısı doğrultusundan (Line-of-Side Direction) gerçek yerdeğiştirmenin hesaplanması ve GPS sonuçları ile karşılaştırma:

Bilindiği gibi faz değişimine etkiyen çeşitli kaynaklar uydunun bakış açısı (LOS) ile ilişkili yönelimine bağlı olarak değişim gösterir. Söz konusu faz değişiminin tüm hata kaynaklarından arındırılmış olması, yeryüzünde gözlemlenen değişimin sonuçlardaki doğruluğunu yansıtır. Gürültüden arındırılmış faz bilgisi radarın bakış doğrultusundaki yerdeğiştirme miktarını vermektedir, bir başka deyişle InSAR ilk etapta üç boyutlu yerdeğiştirme sonuçlarını vermez ve sadece LOS doğrultusunda sonuçlar verir. Ancak 3 boyutlu gerçek yerdeğiştirmenin hesaplanması özellikle hareketin yönü önceden biliniyorsa oldukça basit InSAR görüntülüme geometrisine dayalı olarak hesaplanabilir. Bu bölümde incelenen uygulama alanı için çökme olayı neticesinde gerçekleşen deformasyon araştırıldığı ve çökmelerin de düşey yönlü olduğu daha önce belirtilmiştir. Dolayısıyla bu çalışma için radarın bakış açısındaki yerdeğiştirme gerçek yerdeğiştirmeye, yataydaki yerdeğiştirmenin 0 olduğu varsayılarak dönüştürülebilir. Şekil 4.33 incelendiğinde, daha önceki bölümlerde verilen SAR görüntüleme geometrisine göre çizilmiş LOS yansıma geometrisi ile 4.1 eşitliği oluşturulabilir.

$$d = \frac{d_{LOS}}{\cos\theta_{inc}} \tag{4.1}$$

Burada 3 eksenden oluşan bir geometri bulunmaktadır. Bu geometri SAR görüntü edinimi sırasındaki bakış açısının projeksiyonudur.



Şekil 4. 33. SAR bakış açısı doğrultusunda (d_{LOS}) belirlenen yerdeiştirmenin, gerçek yerdeğiştirme (d) ile ilişkisi. Gerçek yerdeğiştirmenin hesaplanması için örnek teşkil edecek basitleştirilmiş SAR veri edinim geometrisi.

InSAR verilerinin GPS sonuçları ile karşılaştırılabilmesi için; kullanılan uydu görüntüsünün, veri edinimi sırasındaki geliş açısını kullanmak ve bu yolla dönüşüm yapmak gerekmektedir. 4.1 eşitliğine göre bilinmesi gereken parametlerden θ_{inc} (incidence angle), IW3 şerid genişliğinde veri edindiğimiz Sentinel-1 uydusu için 38.3°'dir.

Düşey doğrultu (vertical direction - *(d)*'nin hesaplanması için bilinmesi gereken değerler, LOS doğrultusu (d_{Los}) ve geliş açısı olduğu için 4.1 eşitliği yardımıyla düşey doğrultu hesaplanabilir:

$$d = \frac{50.3}{\cos 38.3^{o}} = 64.09mm$$

16/10 2014 - 04/11 2015 tarihleri arasında geçen 384 günlük zaman diliminde bu noktadaki yerdeğiştirme 64.09 mm'dir. Bu değer GPS sonucu ile karşılaştırılacağı için 365 günde (1 yıl için) deformasyon oranı 60.92 mm yani yaklaşık 61 mm'dir.

Bu noktaya yakın 2014 Nisan'dan 2015 Ağustos'taki GPS noktasının koordinat/çökme oranı ise -82 (mm), 1.92 (SD)'dir (Üstün ve ark., 2015). Yaklaşık 487

günde 82 mm olan değer, 365 gün için 61.46 mm'dir. Yapılan bu işlemin sonucu Çizelge 4.3'de ayrıntılı olarak gösterilmektedir.

Çizelge 4. 3. InSAR ve GPS sonuclarının tek bir nokta üzerinden karşılaştırılması

		LOS	Düşey yer değiştirme		inc. Angle:
INSAR:	16/10 2014 - 04/11 2015				
	384 gün	50.3±2.04	64.09	mm	38 °
	365 gün		**60.92**	**mm/yıl**	
GPS:	15/04 2014 - 17/08 2015				
	487 gün		82±1.92	mm	
	365 gün		**61.46**	**mm/yıl**	

Çizelge 4.3'deki gibi bir dönüşüm yapılmak istenmez ise; Şekil 4.35'de verilen sadece yıllık hız miktarı (-47.5 mm/yıl±2.04 mm/yıl, (4.1) formülünde yerine konularak yapılan hesaplama ile de 60.5 mm/yıl ± 2.5 mm/yıl sonucu doğrudan yıllık deformasyon değerini verir.

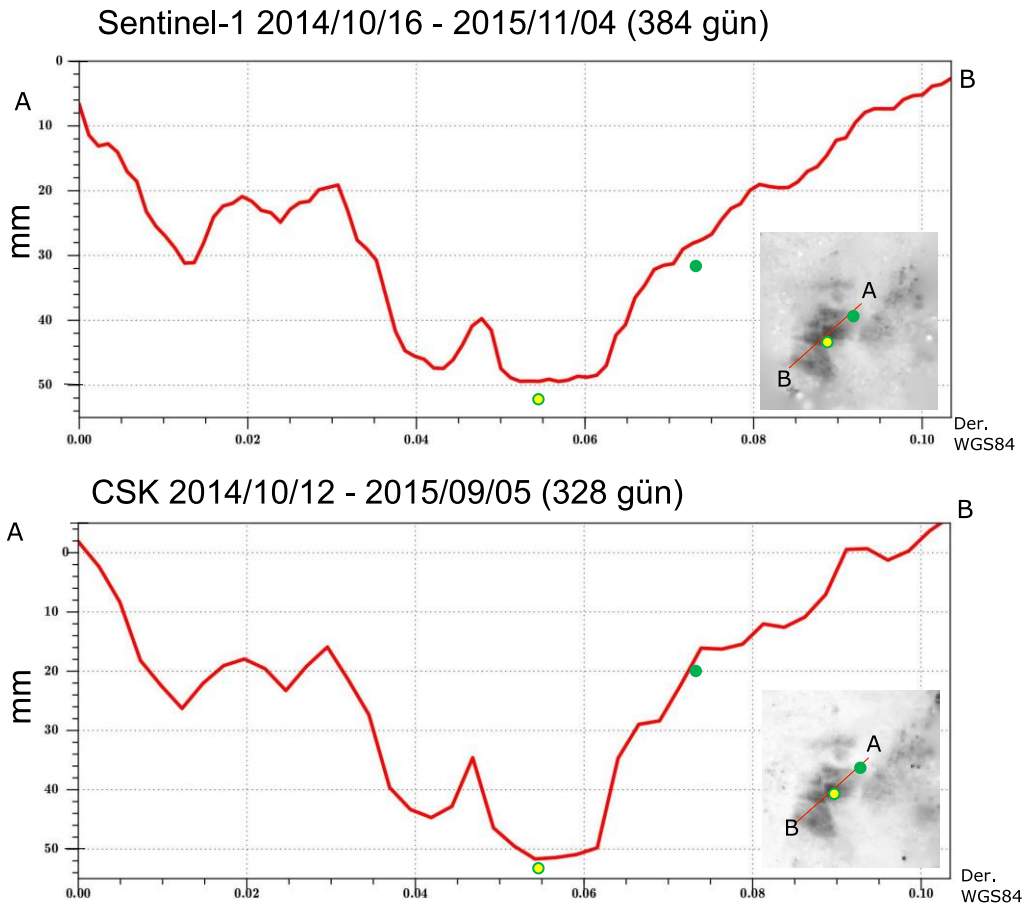
4.6.1.5. Sentinel-1 ve CosmoSkyMed Verilerinin Karşılaştırılması

Konya Kapalı Havzası için Bölüm 4.6'dan bu bölüme kadar gerçekleştirilen bütün uygulamalar; kentsel ve direkt yapılaşmanın olduğu lokal alanlarda, çeşitli yazılımlar ve farklı bantlardaki uydu görüntüleri ile incelenmek üzere değerlendirmeye alınmıştır. Her bir uygulama için sayısal sonuçlar tek tek ortaya konarak, kendi içinde veya aralarında doğrulama işlemleri gerçekleştirilmiş ve genel anlamda deformasyon trendi yorumlanmıştır. Tüm bu yer değiştirme belirleme çalışmaları için birarada karşılaştırmanın yapılabilmesi, sonuçların farklı tarihleri içermesi sebebiyle biraz güçtür. Ancak yapılan son iki uygulama, hem güncel ve oldukça yüksek kalitede veri üretmeleri, hem de hemen hemen aynı tarih aralığını içermeleri açısından bir arada değerlendirilebilir. Kastedilen değerlendirme, deformasyon trendinin aynı bölge için tek bir grafik üzerinde CSK ve Sentinel-1 verileriyle bir profil üzerinde gösterilebilmesidir (Şekil 4.34).

Bu profilin oluşturulması için; öncelikle zamansal uyuşumu 0.8'den yüksek olan noktalar seçilmiş ve Sarproz'dan toplam (kümülativ) yer değiştime verileri csv formatına dönüştürülerek kaydedilmiştir. Bu işlmeden sonra csv verileri bir CBS yazılımı olan QGIS'e aktarılmış ve WGS-84 sistemindeki noktalar shapefile olarak kaydedilmiştir. Raster verilerin enterpolasyonu için "raster to interpolate" komutu

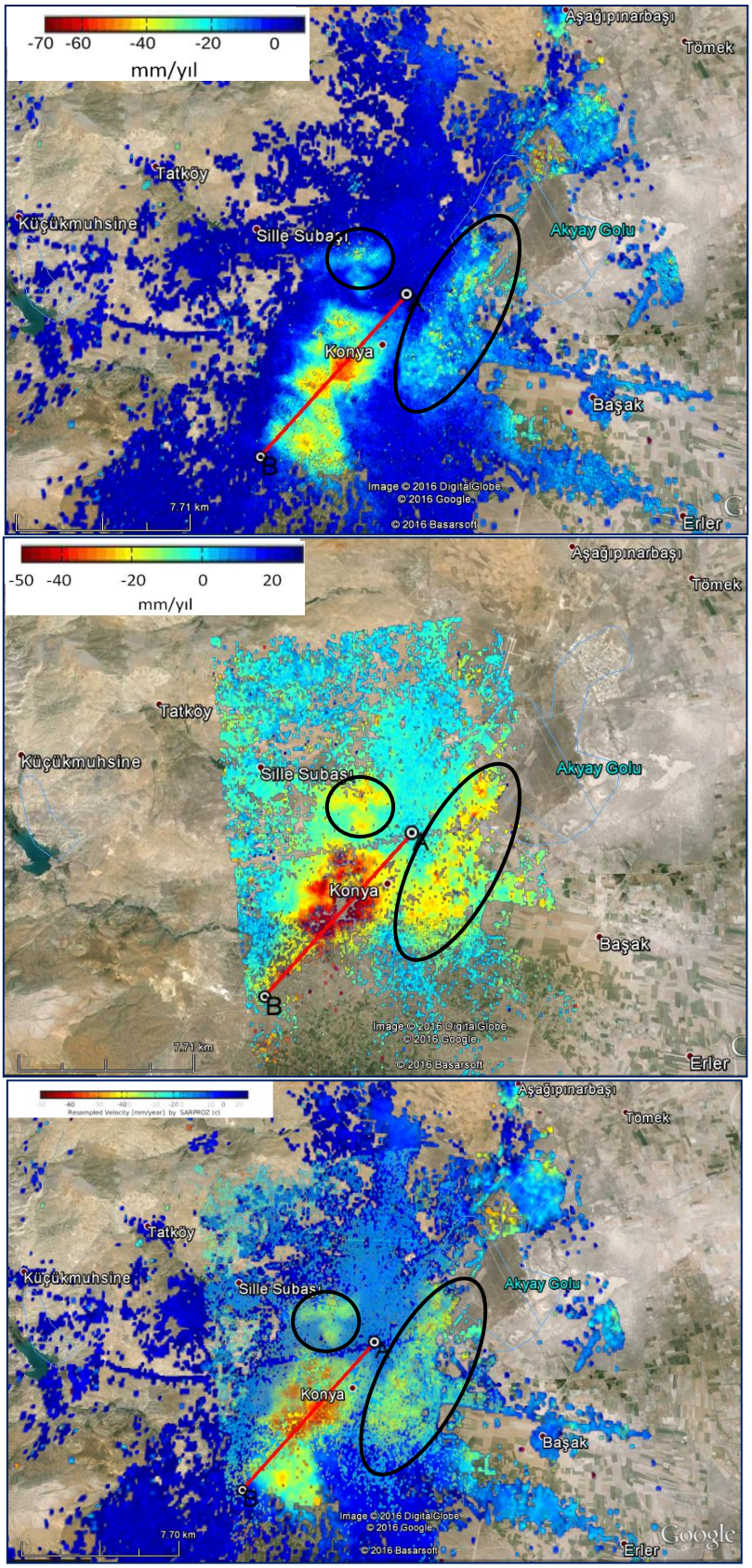
kullanılarak enterpole işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem IDW algoritması (inverted distance weighting algorithm) yardımıyla elde edilir. Enterpole edilmiş raster verilerden QGIS'deki Profile Tool menüsü kullanılarak rahatlıkla bir profil oluşturulabilir. Burada istenilen çizgi oluşturulup, Profil aracına Cosmo ve Sentinel'den elde edilen enterpolasyon sonuçları için uygulanmıştır.

Şekil 4.34'de sütun değeri 0'dan -50 mm'ye olan deformasyon değerini verirken, satır değeri de profil çizgisinin WGS84 sistemindeki değerini derece cinsinden vermektedir. Başka bir deyişle, 0.10 derecelik profil çizgisi, metre birimi cinsinden 10 km'ye karşılık gelmektedir. Burada 10 km'lik hat üzerinden yapılan değerlendirme neticesinde hemen hemen aynı tarih aralığında elde edilen CSK ve Sentinel-1 verileri kullanılarak ortaya çıkan deformasyon grafiği birbiri ile neredeyse aynı çökme trendini göstermektedir. Sağda yer alan küçük gri resim enterpolasyon işlemini gerçekleştirmede kullanılmıştır.



Şekil 4. 34. Sentinel-1 ve CSK verileri ile oluşturulmuş paralel grafik kombinasyonu.(Sarı nokta ile işaret edilen lokasyon Tapu Kadastro Binası, yeşil nokta BELD GPS noktası, sağ alt resimler profili oluşturmak için yapılan enterpolasyon)

Oluşturulan bu profil gerçekte tamamen deformasyonlu alanı temsil etmektedir. A ve B noktaları arasındaki 10 km'lik alan için belirlenen düzlem hem CSK hem de Sentinel-1 verileri için haritalar üzerinde ayrı ayrı ama aynı ölçekte gösterilmektedir (Şekil 4.35). Her iki örneklenmiş hız haritası birbiri üzerine çakıştırılıdığında, çok ve az deformasyonlu alanların her ikisinin de üst üste çakıştığı gözlemlenebilmektedir. AB hattının Kuzey doğusu ve batısındaki siyah elips ve daire ile gösterilen lokasyonlar az, tam üzerinden geçtiği hat ise çok deformasyonlu alan olarak yorumlanabilir. Bu durumda Konya'nın Selçuklu ve Karatay ilçelerine dair işaret edilen lokasyonlar az deformasyonlu, Meram ilçesi ise çok deformayonlu alanlar olarak adlandırılabilir.



Şekil 4. 35. Sentinel-1 ve CosmoSkyMed verilerinden elde edilen örneklenmiş hız haritaları. (Üst panel CosmoSkyMed, , orta panel Sentinel-1, alt panel çakıştırılmış- üstte Sentinel %50 opaklş.)

Hatırlanacak olursa, Şekil 4.36, Sentinel ve CSK için belirlediğimiz test noktamızı yani Tapu Kadastro Bölge Müdürlüğü bahçesi üzerinde yer alan noktayı göstermektedir. Bu PS noktası Sentinel-1 için -50.3 mm'lik yerdeğiştirme değerini verirken, CosmoSkyMed için ise -50.9 mm değerini vermektedir. Söz konusu iki nokta için hazırlanan zaman serisi çizelgeleri (Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5) görüntü tarihlerine göre deformasyon değerlerini göstermektedir.



Şekil 4. 36. Kadastro binası bahçesindeki PS noktası (üst Senitel, alt CSK)

Çizelge 4. 4. Sentinel-1 verilerinden elde edilen Kadastro Binası bahçesindeki PS noktasın ait deformasyon bilgileri

Görüntü No	Görüntü Tarihi	Deformasyon (mm)	Görüntü No	Görüntü Tarihi	Deformasyon (mm)
1	16.10.2014	0.0	**15**	20.05.2015	-23.9
2	28.10.2014	-0.9	**16**	01.06.2015	-27.6
3	09.11.2014	-4.7	**17**	13.06.2015	-29.3
4	21.11.2014	-4.5	**18**	25.06.2015	-29.0
5	03.12.2014	-6.1	**19**	07.07.2015	-31.9
6	15.12.2014	-8.4	**20**	19.07.2015	-32.1
7	27.12.2014	-9.8	**21**	31.07.2015	-31.4
8	08.01.2015	-16.7	**22**	24.08.2015	-32.5
9	13.02.2015	-14.4	**23**	05.09.2015	-38.0
10	09.03.2015	-21.2	**24**	17.09.2015	-37.3
11	21.03.2015	-20.2	**25**	29.09.2015	-42.2
12	02.04.2015	-23.0	**26**	11.10.2015	-38.2
13	14.04.2015	-22.3	**27**	23.10.2015	-40.4
14*	26.04.2015	-23.2	**28**	04.11.2015	-43.0

* **Birincil Görüntü**

Çizelge 4. 5. CosmoSkyMed verilerinden elde edilen Kadastro Binası bahçesindeki PS noktasın ait deformasyon bilgileri

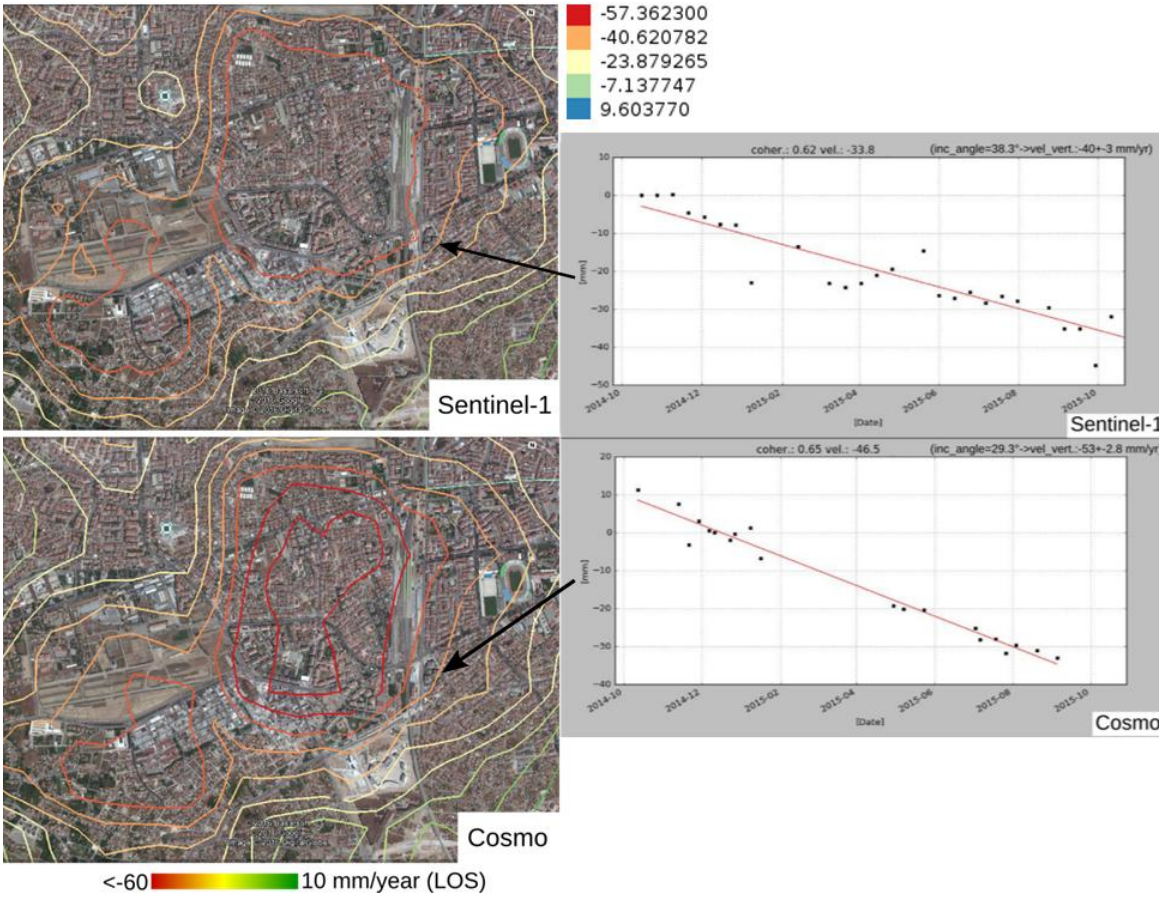
Görüntü No	Görüntü Tarihi	Deformasyon (mm)	Görüntü No	Görüntü Tarihi	Deformasyon (mm)
1	12.10.2014	0.0	**11**	30.04.2015	-34.3
2	13.11.2014	-6.9	**12**	08.05.2015	-34.7
3	21.11.2014	-5.1	**13**	24.05.2015	-33.1
4	29.11.2014	-10.5	**14**	03.07.2015	-43.6
5	07.12.2014	-15.9	**15**	07.07.2015	-37.5
6*	11.12.2014	-10.8	**16**	19.07.2015	-42.4
7	23.12.2014	-15.2	**17**	27.07.2015	-47.4
8	27.12.2014	-11.8	**18**	04.08.2015	-47.7
9	08.01.2015	-13.1	**19**	20.08.2015	-42.8
10	16.01.2015	-19.0	**20**	05.09.2015	-54.0

* **Birincil Görüntü**

Her PS noktası için söz konusu çizlgeler oluşturulabilir. Söz konusu çizelgelerin içerdiği bilgiler (her bir PS için veri edinim tarihlerine göre deformasyon değerleri) dahilinde çalışma alanında gerçekleşen yerdeğiştirme kontur haritaları şeklinde gösterilebilir. Genel anlamda Konya şehir merkezindeki düşey yönlü yüzey deformasyonu her iki veri seti ile yapılan çalışmalar neticesinde oluşturulan kontur haritasından da açık bir şekilde anlaşılabilmektedir (Şekil 4.37 - sol panel). Şekil üzerine çizdirilen konturlar, radarın bakış doğrultusundaki deformasyon hız değerlerinin QGIS yazılımında enterpole edilmesi ile oluşturulmuştur.

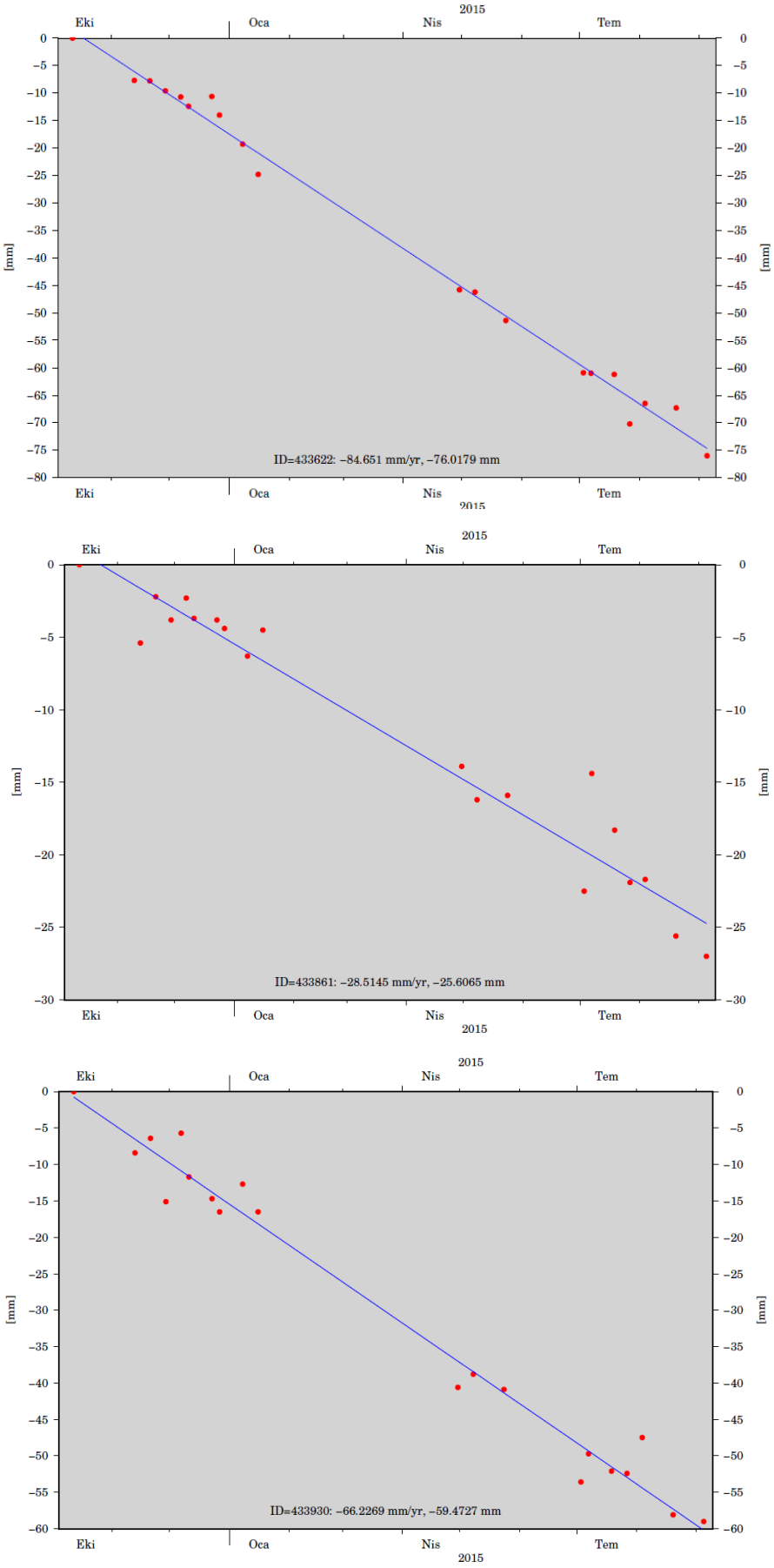
Şekil 4.37'de sağ panelde gösterilen zaman serisi grafikleri Kadastro Binasının hemen arkasına denk gelen PS noktasına aittir. Bu nokta için Sentinel-1 uydusunun

bakış açısı 38.3° ve Cosmo Skymed uydusunun ise 29.4°'dir. Tahmin edilen hız trendinin (sigma hız değeri) standart sapma değeri Sentinel-1 ve CosmoSkyMed için radarın bakış doğrultusunda ~2.4 mm/yıl'dır. Bu da Sentinel-1 için düşeyde 3 mm/yıl'a, CosmoSkyMed için ise 2.8 mm/yıl'a denk gelmektedir (Şekil 4.37 sol panel). Uyuşum değeri Sentinel-1 için 0.62 olan noktada hesaplanan çökme değeri -40 mm/yıl±3 mm/yıl iken, CosmoSkyMed için 0.65 olan uyuşum ile çökme değeri -53 mm/yıl±2.8 mm/yıl'dır.



Şekil 4. 37. PSInSAR sonuçlarıdan elde edilen Sentinel-1 (sol üst)ve Cosmo (sol alt)'a ait kontur çizgileri ve, kadastro binası üzerindeki PS noktasına ait zaman serisi grafikleri

Sentinel ve CSK için gerçekleştirilen ortak çalışmanın her bir uydu verisi ile verilen sonuçlar üzerinde de uygulanması mümkündür. Bununla birlikte diğer veri edinim tarihlerinde oluşan deformasyon gelişimi de her edinim tarihi için rahatlıkla okunabilir. Örnek olarak sadece CSK verileri için seçilen 3 rastgele noktada; kesit çıkarma, hız büyüklükleri ve ilişkili hata hesaplarına ilişkin grafikler Şekil 4.38'de verilmektedir.

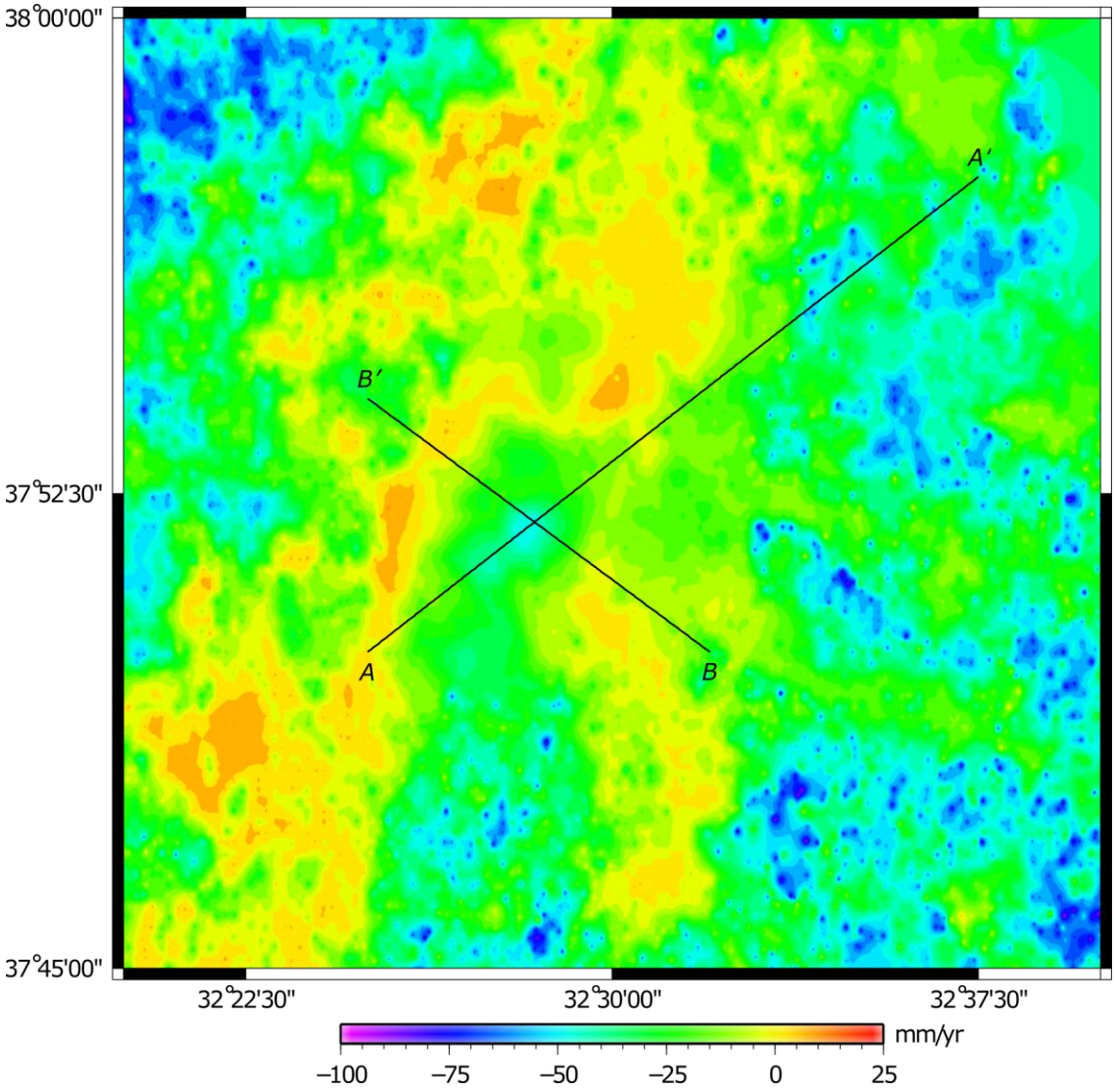


Şekil 4. 38. 20 adet CSK verisinin zaman serisi analizleri için hazırlanan hız büyüklükleri

Şekil 4.38'de örnek olması amacıyla 3 farklı PS noktasından hız büyüklük ve yerdeğiştirme trendini gösterir grafikler oluşturulmuştur. Grafikler incelendiğinde Ekim 2014 ve Ağustos 2015 tarihleri arasında elde edilen 20 adet CSK verisi, görüntü tarihlerine uygun olarak kırmızı noktalar ile gösterilmekte ve bu noktalara uygun mavi çizgi ile belirtilmiş trend geçirilmektedir. Yine burada da ilk görüntü ediniminde deformasyon 0 olarak düşünülürse son görüntü için deformasyon oranı her nokta için farklı değerlerde karşımıza çıkmaktadır.

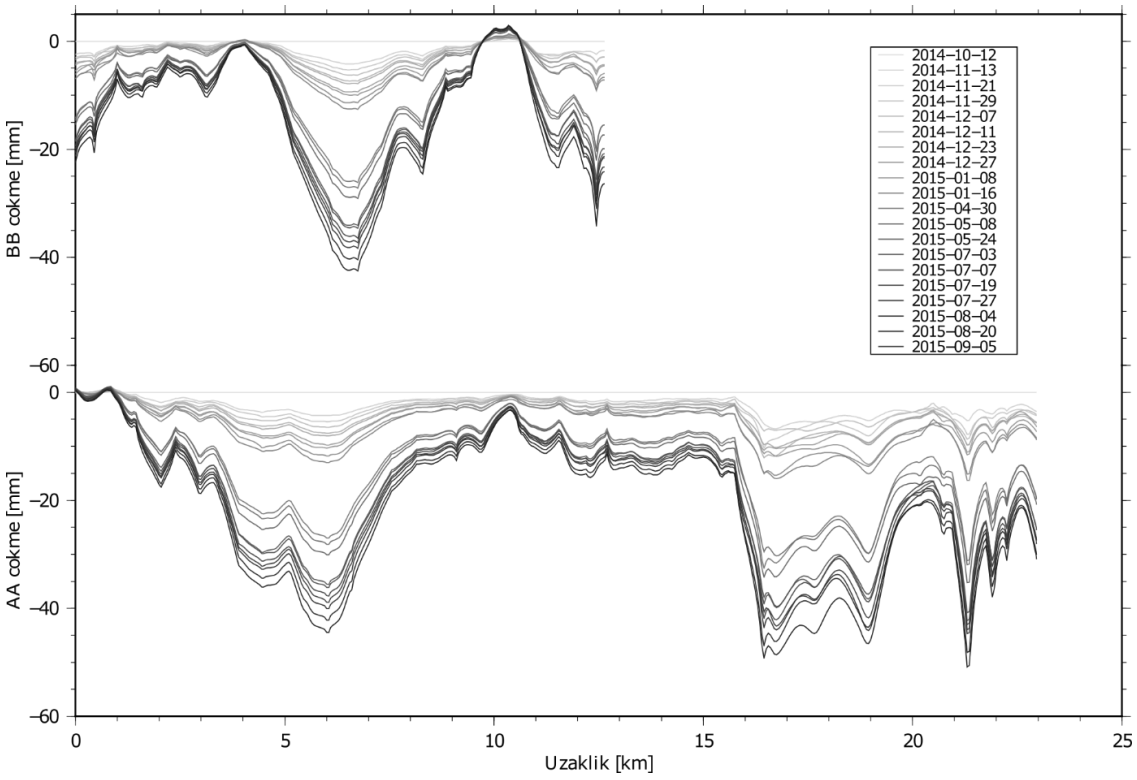
CSK sonuçları için özel olarak tıpkı Şekil 4.35'de olduğu gibi sonuç deformasyon haritası üzerinde belirlenen A ve B noktaları ile oluşturulan AA' ve BB' doğruları yardımıyla yerdeğiştirmeyi tarih ve konum olarak grafik üzerinde değerlendirmek mümkündür (Şekil 4.39, 4.40).

Şekil 4.39'da 2015.09.05 tarihli görüntüye ait oluşturulan ve 170 m normal, 328 gün zamansal baz uzunluğuna sahip interferogram (B_{dik}=170 m, B_t=328 gün) üzerinde deformasyon bilgisine dair bir profil oluşturabilmek için yerdeğiştirmenin fazla olduğu bölge üzerinde birbiri ile kesişen iki doğru çizilmiştir. AA' doğrusu 23 km, BB' ise 13 km uzunluklarındadır (Şekil 4.40). Profil oluşturmak amacıyla yararlanılan harita ve ilişkili profil incelendiğinde sonuçlar oldukça başarılı görünmektedir. Biraz yumuşatıldığı için daha küçük deformasyon sonuçları elde edilse de, göreli deformasyonu ve son bir yıldaki gelişimi açık bir şekilde ortaya koymaktadır.



Şekil 4.39. 20 adet CSK verisinin zaman serisi analizleri için kesit çıkarma işleminde yararlanılan deformasyon haritası (2015.09.05 tarihli görüntü, B_{dik}=170 m, B_t=328 gün)

İlk görüntü tarihinden son görüntü tarihine kadar elde edilen profil çizgileri açık griden koyu gri renge göre ifade edilmektedir. Şekil 4.40 sağ üst panelde görüntü tarih bilgileri ve görüntülere atanan renk çigileri yer almaktadır. Bu grafik yourmlandığında, AA' ve BB' yollarının kesiştiği 6. ve 7. km aralıkları yerdeğiştirmenin en fazla göründüğü alan (istasyon civarı) olarak ifade edilebilir ve deformasyon oranı yaklaşık -50 mm civarındadır.



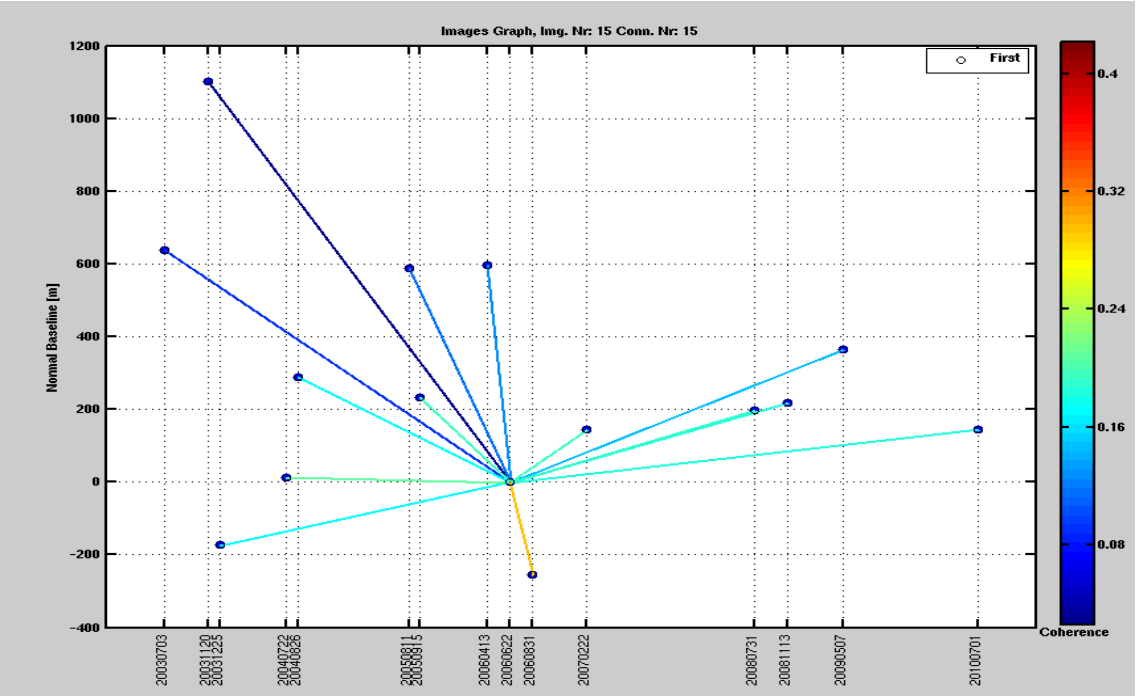
Şekil 4.40. 20 adet CSK verisinin interferogramlara ilişkin hata hesapları profili

Sonuç olarak; deformasyon haritalarımızda bulunan her bir PS için aynı değerlendirme yapılabilir. Bu değerlerin en sonda yer alan iki uydu verisi ile yapılması sadece örnek amaçlı olup, istenirse benzer analizler diğer uydu verileri ile elde edilen sonuçlar kullanılarak da yapılabilir.

4.6.2. Karaman Kent Merkezinde Yapılan Çalışmalar

Uydu	:	Envisat
Sensör	:	ASAR
Çerçeve - İz	:	2853 - 436
Veri Modu	:	Azalan
Teknik	:	PSInSAR
Bölge	:	Karaman Kent Merkezi
Yazılım	:	SarProz

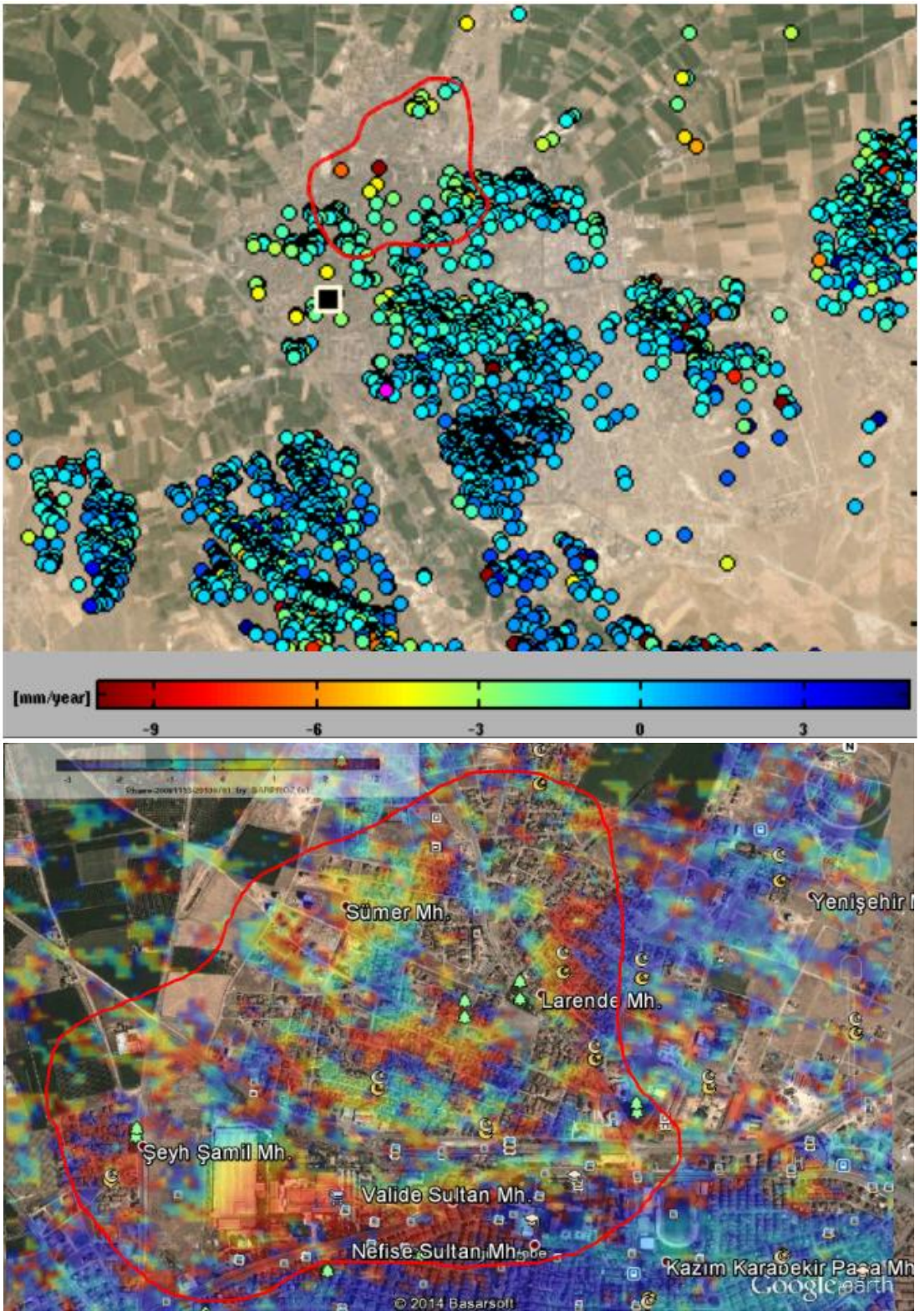
Bu çalışma için Envisat uydusunun azalan modundaki 436 numaralı çerçevesi için elde edilen 15 görüntü çifti ile SarProz yazılımı kullanılarak PSInSAR uygulaması gerçekleştirilmiştir. Görüntü eşleştirmesi yapılırken 15 görüntünün sahip olduğu baz uzunluk değerleri Şekil 4.41'deki grafikten açıkça anlaşılmaktadır.



Şekil 4. 41. Envisat Asar veri setlerinin kullanıldığı PSInSAR veri işleme grafiği

15 adet inetrefrogram için yapılan baz uzunluk değerleri analizi neticesinde 2006/06/22 tarihine ait görüntü, birincil veri olarak seçilmiştir. Birincil veri baz alınarak diğer görüntüler ikincil görüntü olarak kullanılmış ve toplamda 14 adet interferogram oluşturulmuştur. Görüntü çiftlerinin birbirlerine göre uyuşum (coherence) değerleri Şekil 4.41'de verilen renk çubuğundan anlaşılacağı gibi 0.08 - 0.4 arasında yeralmaktadır. Bu değerlerden en düşüğüne sahip 2003/11/20 tarihli görüntü interferogram oluşturma işleminden sonra tekrar çözümleme işlemine tabi tutulmuş ve zaman serisi sonuçlarına dahil edilmiştir.

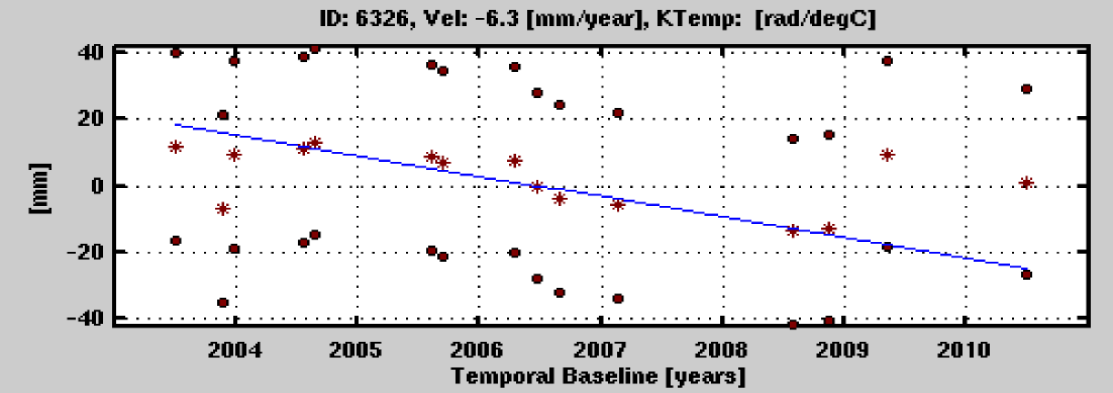
15 adet interferogram kullanılarak oluşturulan PSInSAR sonuç haritası Şekil 4.42 (üst panel)'de görüldüğü gibidir. Bazı noktalarda deformasyon oranın 9 mm/yıl'a kadar ulaşabileceği ancak genel trendin diğer kalıcı noktalara bakıldığı zaman normal dağılımından saptığı dikkate alınırsa, bu noktalar için korelasyonu düşük noktalar olarak yorum getirmek uygun olacaktır. Yine de sonuç harita için genel çerçeveye bakıldığında bu durum şu şekilde yorumlanabilir: Karaman Şehir merkezi ve merkezin güneyindeki bir çok nokta, ayrıca batı ve doğu kısımları stabil, ancak Karaman'ın özellikle güney kısmında hızlı bir deformasyon gözlenmiştir. Bu yorumlama 20081113-20100701 tarihleri arasında gerçekleştirilen DInSAR uygulaması (Şekil 4.42-alt panel) ile de desteklenmektedir. Burada zamansal baz uzunluğu B_t=595 gün (20081113-20100701) olan interferogramda deformasyondan kaynaklanan örüntüler görülebilmektedir.



Şekil 4. 42. Karaman Bölgesindeki PSI sonuçları (15x Envisat ASAR 2003-2010) - Üst Panel İnterferogram: 20081113-20100701 (B_{dik}=75 m) - Alt Panel. Kare nokta referans olarak seçilmiştir.

Ayrıca her bir PS noktası için zaman serisi grafikleri oluşturulabilir. Bu çalışma için, zaman serisi grafiği, Karaman şehir merkezinde seçilen ve Şekil 4.42'de siyah

nokta ile gösterilen referans noktası (PS) için oluşturulmuştur (Şekil 4.43). Problemi daha net ortaya koymak için, bir çeşit faz çözümleme tekniği olan veri serilerinin "replika değişiminden" yararlanılmıştır (değişim yarım dalga boyu değerindeki deformasyona karşılık gelmektedir (Envisat için 2.8 cm). Şekil 4.43'de replika noktaları siyah küçük noktalar ile gösterilmekte, yıldız noktalar ise görüntüleri temsil etmektedir. Zaman serisi grafiğinden de anlaşılabileceği gibi, deformasyon noktası için doğrusal trend belirlenmiş ve gözlem periodu için (yaklaşık 6 yıl) deformasyon oranı 4 cm'ye ulaşmıştır.



Şekil 4. 43. Şekil 4.45'de seçilen PS noktası için zaman serisi. Grafikte yer alan Replikalar her yarım SAR dalga boyu içindir (λ/2=2,8 cm)

.

Sonuç olarak; çalışma alanı için yapılan önceki DInSAR uygulamalarına göre, PSInSAR çalışması ile anlamlı deformasyon sonuçları ortaya çıkmıştır. 15 adet görüntü çifti ile gerçekleştirilen PSInSAR sonuçları yıllık ortalama deformasyon miktarının 4-9 mm arasında olduğu tespit edilmiştir.

4.7. Kırsal Alanlarda İleri InSAR Uygulamaları

Şimdiye kadar gerçekleştiridiğimiz tüm çalışmalar genellikle yapılaşmanın yoğun olduğu kent merkezlerini kapsayacak şekilde haritalanarak yorumlanmıştır. Ancak hem kent merkezlerine yakın hem de yapılaşmanın daha seyrek olduğu kırsal alanlarda da tüm bu analizleri özel olarak haritalayıp yorumlamak mümkündür. Burada daha önce SarProz ile yapılan yerleşim alanlarındaki deformasyon belirleme çalışmalarını destekleyecek şekilde, farklı bir yazılım olan StaMPS, kırsal alanlardaki değişimi ortaya koymak amacıyla kullanılacaktır. Daha önceki bölümlerde bahsedildiği

gibi StaMPS yazılımı ile hem PSInSAR hem de SBAS çalışmalarını birarada yapmak mümkündür. Bu bölüm altında devam eden uygulamalarda her iki tekniğin de sonuçları tartışılacaktır.

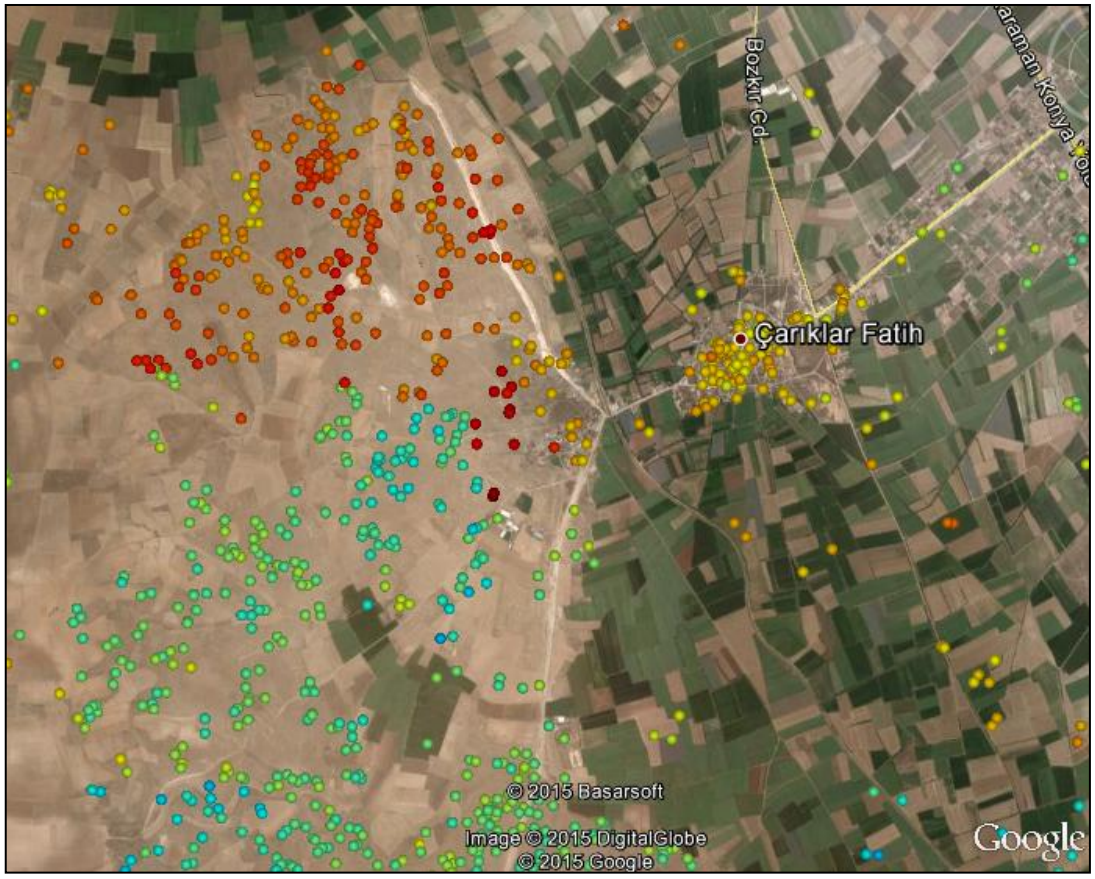
4.7.1. StaMPS ile gerçekleştirilen ERS çalışmaları

Daha önce Bölüm 4.6.1.1'de SarProz yazılımı ile 22 ERS görüntüsü kullanılarak yapılan deformasyon belirleme çalışmaları, aynı zamanda StaMPS yazılımı ile de gerçekleştirilmiştir. StaMPS ile veri işleme aşamalarının detaylarına girmeden (daha önce Bölüm 3.4'de açıklanmış olması sebebiyle), direkt olarak sonuçlar verilerek yorumlanmıştır. Burada amaç SarProz ile elde edilen sonuçların başka bir yazılım kullanılarak doğrulanması ve kırsal alanlardaki düşey yönlü yüzey deformasyonunun özellikle SBAS yöntemi ile ortaya konulmasıdır.

SarProz ve StaMPS, hemen hemen aynı işlevi gören, fakat farklı görüntü işleme algoritma yapılarına sahip yazılımlardır. StaMPS ile yapılan görüntü işleme neticesinde, Konya geneli için SarProz ile elde edilen sonuçlara çok yakın değerlerde deformasyon oranları elde edilmiştir. Ancak Şekil 4.44'de verilen deformasyonun net bir şekilde görülebildiği Çarıklar Fatih Mahallesi örneği SarProz ile elde edemediğimiz bir ayrıntıyı yakalamamızı sağlamıştır. Burada hem yapılaşmanın bulunduğu alan hem de çevresinde yer alan ekili alanlarda yerdeğiştirme tespit edilebilmiştir (Benzer sonuç bir sonraki bölümde anlatılan ve kırsal alanlarda etkili sonuçlar veren ALOS verileri ile de elde edilmiştir). Buradaki örnek bize StaMPS'in aynı zamanda yapılaşma olmayan alanlarda da istenilen sonuçları verebileceğini göstermektedir.

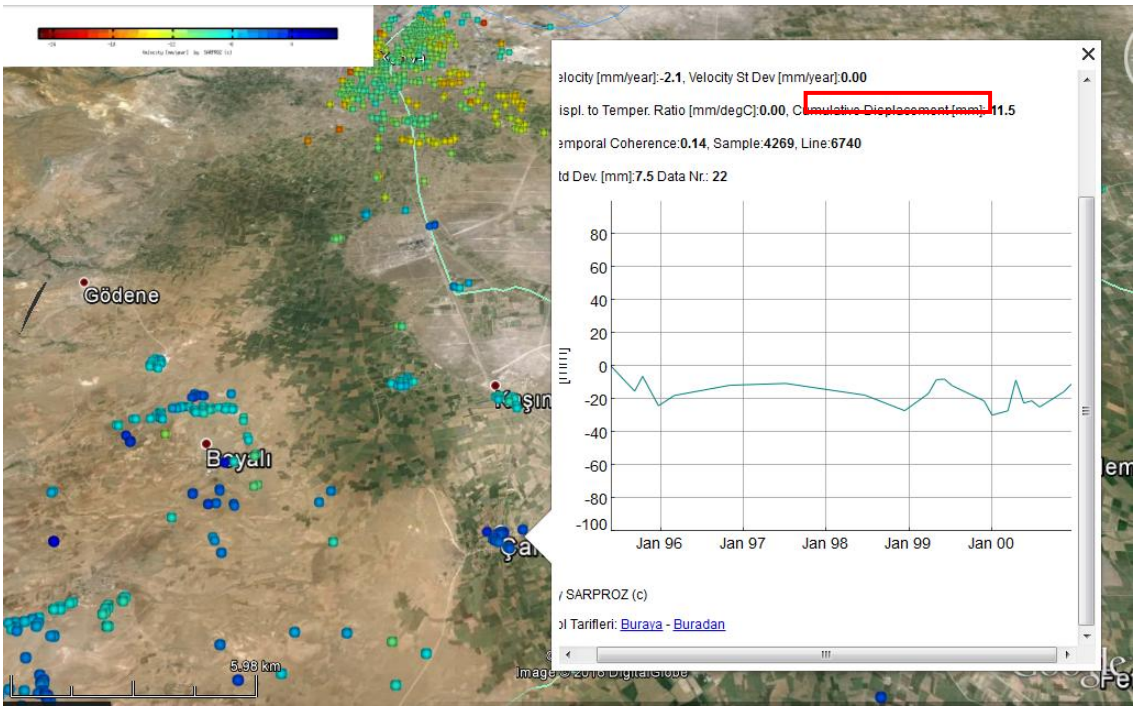
Ancak StaMPS algoritması, sonuçları düzeltmek için kullanılan mekansal faz çözümleme işlemini tam anlamıyla gerçekleştiremediği durumlarda, yer değiştirmelerin olmadığı yerde yanlış sonuçlar da verebilir. Bu örnek için StaMPS'in sonuç doğrulaması havza genelinde gerçekleştirilen TÜBİTAK projesi kapsamında (Üstün ve ark., 2015) elde edilen GPS sonuçları ile de yapılmış ve StaMPS'in verdiği sonucun doğruluğu kanıtlanmıştır. Öte yandan Şekil 4.44, zamansal korelasyonsuzluktan etkilenmeyen sabit yapılaşma bölgesindeki InSAR zaman serileri deformasyonunu göstermekte ve bu nedenle bilgiler doğrudan yakın çevredeki GPS istasyonlarından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılabilmektedir. Bu uygulamada deformasyonun büyüklüğü Çarıklar Fatih bölgesi için yıllık -12 mm'ye kadar ulaşabilmektedir. Ancak burada önemsenen nokta deformasyon oranından çok StaMPS'in ekili alanlardaki kabiliyetidir. StaMPS ile ekili

alanlarda bile korelasyonu yüksek PS noktaları seçilebilmekte ve elde edilen sonuçların doğruluğuna (diğer yöntemler ve veriler ile elde edilen sonuçlarla kıyaslandığında) güvenilebilinmektedir.



Şekil 4. 44. Çakırlar Fatih'de 1995-2000 yılları arasında ERS uydu verileri ile belirlenen StaMPS sonuçları. Kırmızıdan maviye olan renk ölçeği -12 mm/yıl (kırmızı) ve 5 (mavi) mm/yıl arasındadır.

Hemen hemen aynı sonuç Bölüm 4.6.1.1'de SarProz ile yapılan işlemler arasından Çarıklar Fatih Mahallesi'ne yoğunlaşıldığında da zaman serisi grafiği üzerinde görüntülenebilmektedir (Şekil 4.45).



Şekil 4. 45. Çakırlar Fatih'de 1995-2000 yılları arasında ERS uydu verileri ile belirlenen SarProz çözümü. İşaetlenen nokta için kümülatif yerdeğiştirme -11.5 mm

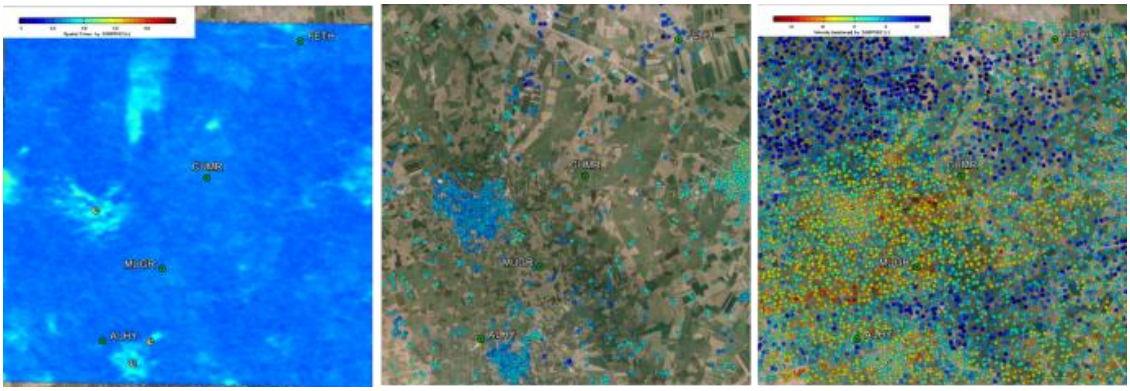
4.7.1.1. StaMPS ve SarProz sonuçlarının karşılaştırılması

InSAR veri işleme yazılımlarından, tezimiz için kullanılan StaMPS ve SarProz yazılımlarının sonuç ürünlerini karşılaştırmak amacıyla, aynı verilerle örnek bir çoklu interferometre uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu doğrulama işleminin anlaşılması için metodolojik olarak izlenen yöntem şu şekilde ifade edilebilir: aynı birincil görüntü ile aynı interferogram eşleşmesi yapılmış, aynı referans noktası tanımlamış ve aynı PS noktaları karşılaştırmada kullanılmıştır. Karşılaştırma eşit koşullar altında toplanmış verilere uygulandığı için sonuçlardaki tutarlılıklar ve tutarsızlıklar net olarak açıklanabilmiştir.

Aşağıdaki şekiller (Şekil 4.46), kentsel alanlar üzerinde StaMPS ve SarProz yazılımları ile gerçekleştirilmiş ERS InSAR işleme örneklerini göstermektedir.

Veri setleri üzerinde yüksek uyuşum kentsel alanlarda ve ekili alanlarda birbirinden farklılık gösterebilir. Şekil 4.49'da aynı pikseller üzerinde farklı yazılımların ne denli farklı sonuçlar verebileceği görülmektedir. Bunun en büyük nedeni faz çözümleme işlemlerinin kırsal alanlarda yazılımlara bağlı olarak farklılık gösterebileceğidir. Sol resim ERS interferogramlarındaki ortalama mekansal uyuşum değerini göstermektedir. Burada parlak renkler (genellikle yapılaşma alanları)

uyuşumun en yüksek olduğu yerlerdir. Ortadaki resim StaMPS ile yapılan PSInSAR sonucudur. Burada sabit noktaları içeren pikseller ve yüksek yansıtıcı değeri olan noktalar (uyuşum haritası ile de tutarlı olarak) net bir şekilde görülebilmektedir. Sağ tarafta ise ağırlıklandırılmış-uyuşum değerlerinden elde edilen Quasi-PS sonucu yer almaktadır.



Şekil 4. 46. Ortalama mekansal uyuşum haritası (sol panel) ve veri işleme yaklaşımları arasındaki farklar: ERS verileri ile Çumra alanı üzerinde elde edilen PSInSAR (orta) ve Quasi - PS (sağ) sonuçları.

Çalışma bölgesi daha önceden bilindiği için sağ paneldeki görüntüde yer alan piksellerin gürültüye maruz kaldıkları ve doğru sonuçları yansıtmadığı düşünülmektedir. Ancak orta panelde StaMPS ile elde edilen PS'ler genellikle yansıtıcı özelliği yüksek olan yapılaşma bölgesine denk geldiği için tutarlı görülmektedir. Sonuç olarak bu şekil bize görüntü işlemede seçilecek piksellerin uygun sabitlikte olmaları gerektiğini anlatmaktadır. Maalesef ekili alanlar ERS interferogramlarında yüksek derecede korelasyonsuz çıkmışlardır (sağ panel) ve bu alanlar için sabit GNSS noktaları ile sonuç doğrulama yapabilecek bir sonuç elde edilememiştir.

SarProz ve StaMPS yazılımları ile aynı bölge üzerinde aynı verilerle gerçekleştirilen çalışma için çıkarılacak en iyi sonuç, tüm İleri InSAR teknikleri için görüntü işleme sırasında seçilecek uygun PS'lerin öneminin sonuçlara etkisinin ne derece büyük olduğudur. Başka bir deyişle, seçilen her PS veya görüntülenen alan için gereğinden fazla seçilen PS'lerin her zaman umulan sonuçlar vereceği anlamına gelmediği unutulmamalıdır. Yani, fazla ama birbiriyle korelasyonsuz pikseller (Şekil 4.46, sağ panelde olduğu gibi) tutarsız bir nokta ağı oluşturacak, deformasyon sinyalleri vererek yanılgıya düşmeye neden olacaktır. Burada ekili alanlardaki pikseller tamamen birbiryle korelasyonsuzdur. Ancak bu örnekte olduğu gibi, orta paneldeki StaMPS ile

elde edilen sabit noktalar sadece yapılaşmanın olduğu yerde ve bölgedeki GPS değerleri ile de tutarlı görülmektedir.

4.7.2. StaMPS ile Gerçekleştirilen Envisat Çalışmaları

Envisat ASAR uydusuna ait artan mod verileri ile StaMPS yazılımı kullanılarak yapılan özellikle Konya Kent Merkezindeki PSI ve SB (Small Baseline) çalışmaları iki aşamada yapılmış ve sonuçlar birleştirilmiştir. Daha önce Kentsel alanlarda yapılan uygulamada da belirtildiği gibi, 114 iz ve 343 iz numaralı çerçevelerin özellikle Konya Kent Merkezi'ne denk gelen kısımları üst üste çakışmaktadır. Böylelikle her iki çerçevede de yapılan çalışmalar için, birbiri üzerine denk gelen alanların kıyaslanması yoluyla sonuçların tutarlılığı test edilebilir.

343 İz ve 2853 Çerçeve için yapılan işleme dair özellikler aşağıda sıralandığı gibidir:

Uydu	:	Envisat
Sensör	:	ASAR
Çerçeve - İz	:	2853 - 343
Veri Modu	:	Artan
Teknik	:	PSI ve SBAS
Bölge	:	Konya ve çevresinde bulunan kırsal alanlar
Yazılım	:	StaMPS

Sarproz yazılımı ile 114 ve 343 çerçeveler için gerçekleştirilen çalışmalar, sonuçların farklı yazılımlarla da desteklenmesi açısından StaMPS ile de gerçekleştirilmiştir. 343 numaralı çerçeve çalışma ilgi alanımızın sağ kısmını oluşturmaktadır. Bu çerçevede yapılan işlemlerin sonucunda Konya Kent Merkezi'nin küçük bir kısmına dair yerdeğiştirme sonucu elde edilebilmiştir. Ancak burada odak noktamız kırsal alanlar olduğu için daha çok değerlendirmeye kent merkezinin doğusu (ekili alanlar) alınmış ve genel anlamda yorumlanmıştır.

Söz konusu çerçeve için, Sarproz uygulamasında da belirtildiği gibi dik ve paralel baz uzunluğu değeri çok yüksek olan görüntüler yer almaktadır. Hatırlanacak olursa SarProz ile gerçekleştirilen işlemde iki adet SLC, özellikle interferogram oluşturulduktan sonra uyuşum harita değerlerine bakılarak işleme tabi tutulmamıştır. Aynı şekilde StaMPS'le de veri işleme çalışmalarına başlanmadan önce uyuşumu düşük olan görüntüler çıkarılmıştır. Toplam 20 adet Envisat SAR görüntüsünden, dik ve paralel baz uzunluk değerleri oldukça yüksek olan; 2003.06.26, 2004.10.28, 2005.01.06

ve 2006.07.20 tarihli görüntüler işleme alınmamış ve Çizelge 4.6'da liste halinde verilen görüntüler Şekil 4.48'deki interferogramları oluşturmak için kullanılmıştır.

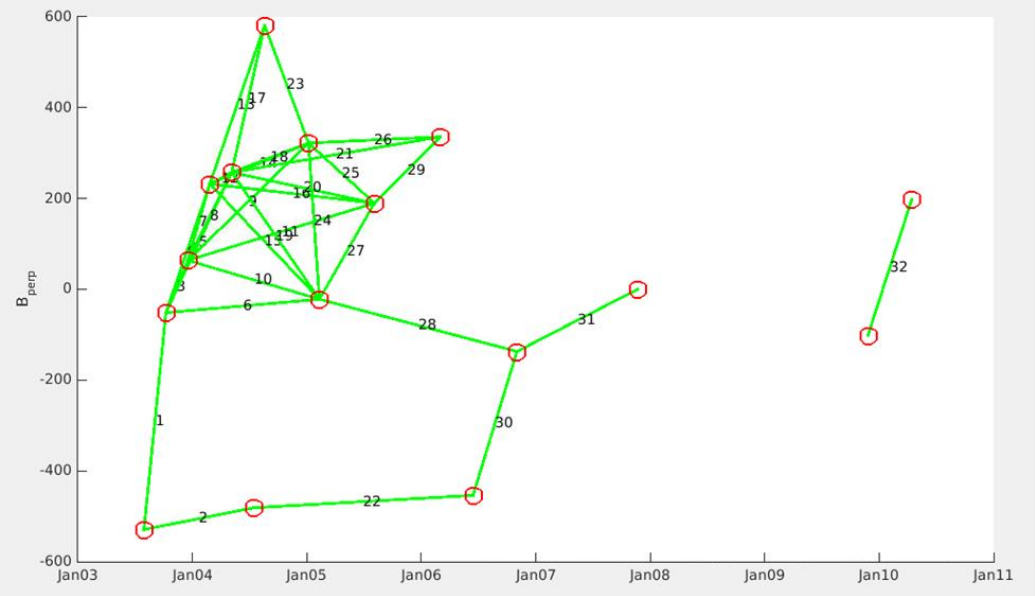
Çizelge 4. 6: İnterferogram oluşturmak için uygun olan görüntüler ve değerleri

Gör. No	Veri Edinim Tarihleri	Dik Baz Uzunluğu (m)	Görüntüleme Açısı
1	31 Tem. 2003	- 529 m	54.938
2	09 Ekim 2003	-52 m	55.224
3	18 Aralık 2003	64 m	59.106
4	26 Şubat 2004	232 m	54.785
5	06 Mayıs 2004	257 m	54.658
6	15 Tem. 2004	-481 m	53.891
7	19 Ağus. 2004	581 m	58.657
8	06 Ocak 2005	322 m	56.094
9	10 Şubat 2005	- 22 m	60.041
10	04 Ağus. 2005	190 m	56.659
11	02 Mart 2006	336 m	57.397
12	15 Haz. 2006	-454 m	55.975
13	02 Kas. 2006	- 137 m	57.181
14	22 Kas. 2007	0	66.912
15	26 Kas. 2009	-132 m	60.432
16	15 Nis. 2010	198 m	63.425
Sabit-Faz Pikselleri Sayısı: 31219			

İşleme tabi tutulan görüntü bilgisi StaMPS yazılımında ps_info komutu ile görüntülenebilirmektedir. Çizelge 4.6'da verilen görüntü bilgilerinin yanısıra aynı komutla, çalışma alanında PSInSAR uygulamalarına esas olmak üzere kaç PS seçildiği bilgisene de ulaşılabilir. Bu çalışmada PS noktaları manuel olarak azaltılmış ve toplamda 31219 adet kalıcı yansıtıcı nokta ile deformasyon belirleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. PS noktalarının bilinçli olarak azaltılması, bu çalışmada özellikle

kırsal alanlara odaklanma kararından kaynaklanmaktadır. Bu amaçla kırsal alanlar için sadece uyuşumu yüksek PS'lerin seçilmesine özen gösterilmiştir.

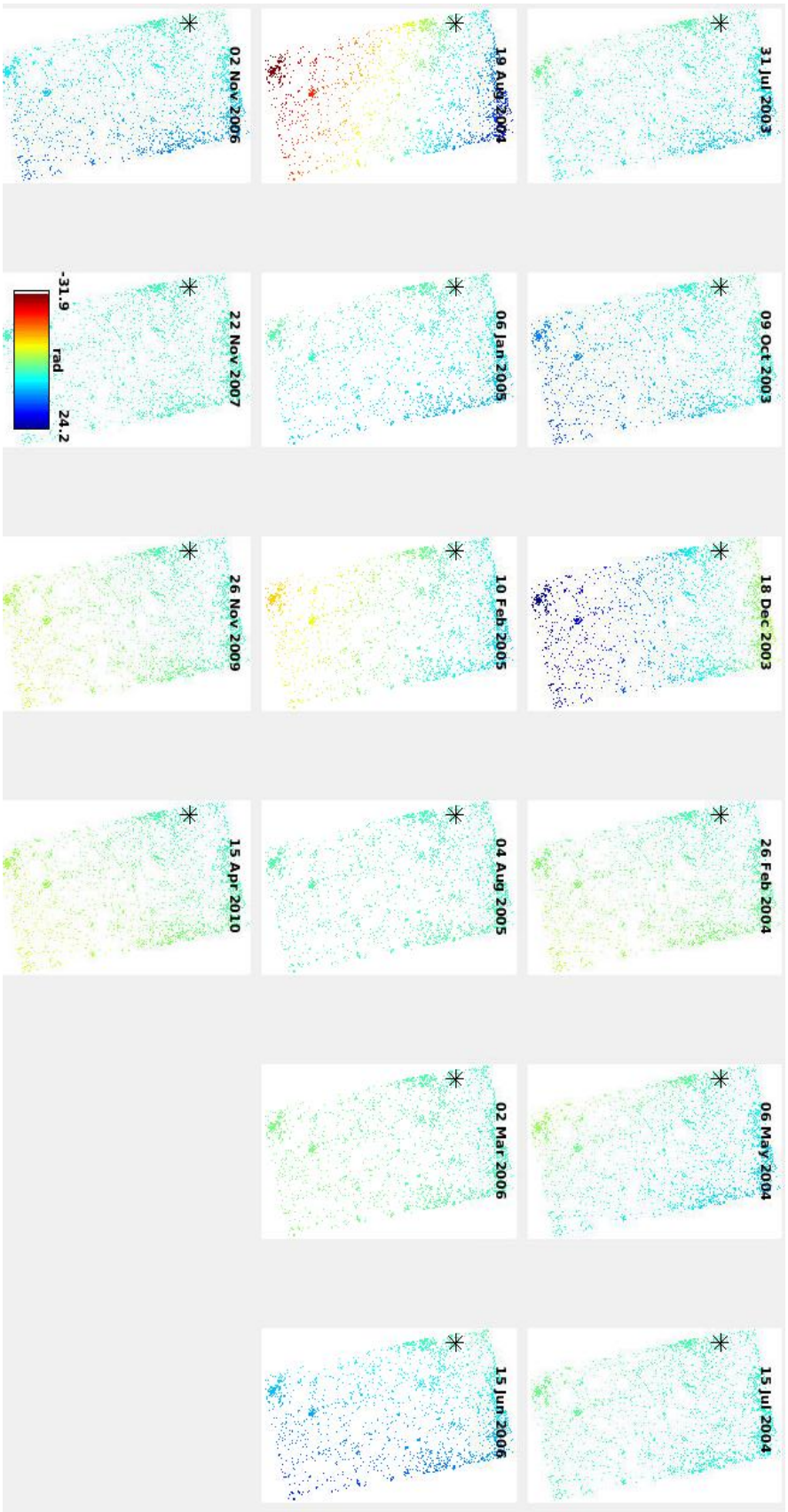
Seçilen noktalara ait dik ve paralel baz uzunluğu değerlerini bir grafik halinde göstermek ve aynı zamanda SBAS yöntemine esas olacak şekilde görüntülerin birbiriyle eşleşme durumunu incelemek mümkündür (Şekil 4.47). Bu işlem plot_sb_baselines komutu ile gerçekleştirilebilir.



Şekil 4. 47. SBAS yöntemine esas olacak şekilde görüntülerin birbiriyle eşleşmesi

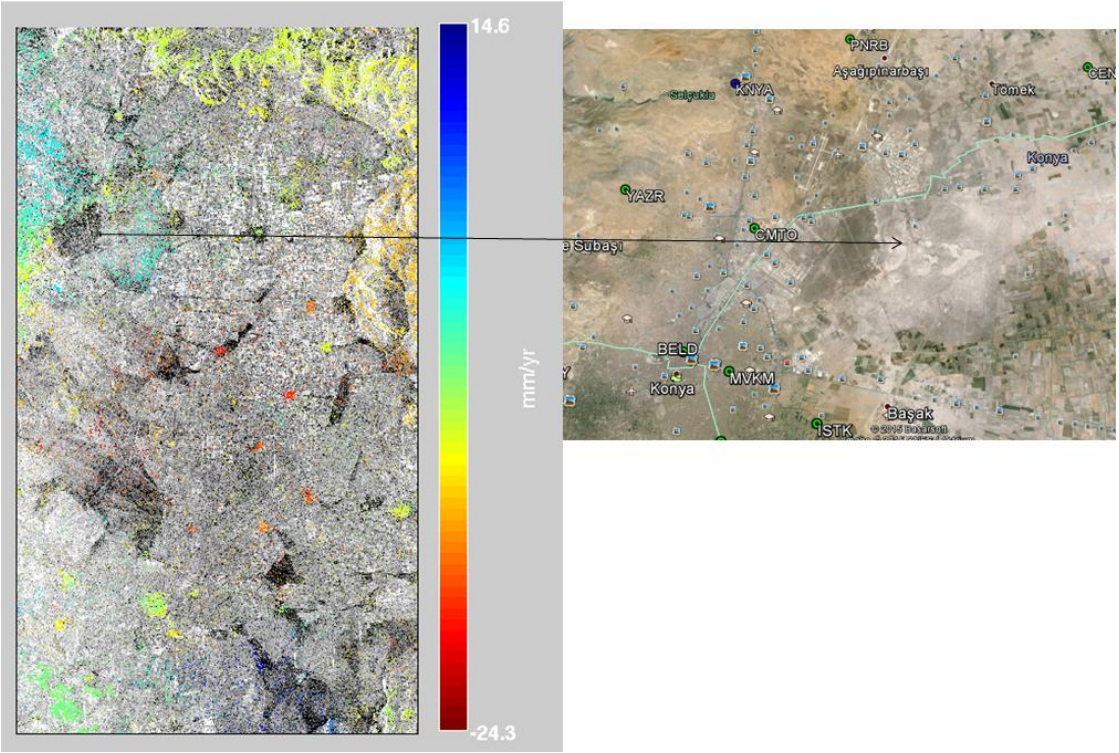
16 adet görüntü ile toplam 32 çift interferogram ilişkisi oluşturulmuştur (Şekil 4.47, yeşil çizgiler). Bu eşleşme SBAS yöntemi için önem arz etmektedir. Ancak bilindiği gibi PSInSAR uygulaması için sadece birincil görüntülerin ikincil görüntüler ile eşleştirilmesi yeterlidir. Zaman serisi oluşturmak amacıyla tüm interferogramlar İleri InSAR teknikleri mantığına uygun olarak birleştirilirler.

Bu çerçeve için toplamda 20 adet görüntümüz olmasına karşın, 4 adet görüntünün çıkarılmasıyla, 16 görüntü için StaMPS yazılımında ps plot('o') komutu ile interferogramlar oluşturulmuştur (Şekil 4.48). PSInSAR işlemlerine 16 adet interferogram ile devam edilmesi kararına çözümleme işleminde gerçekleştirilen iterasyon hesaplamalarından sonra varılmıştır. Burada 22 Kasım 2007 yılına ait olan görüntü baz uzunluk değerlerine uygun olarak birincil görüntü olarak belirlenmiş, referans PS noktası ise SarProz çalışmalarında oluğu gibi yine Konya Kent Merkezi'nde bulunan havalaanı sahasında yer alan nokta seçilmiştir.



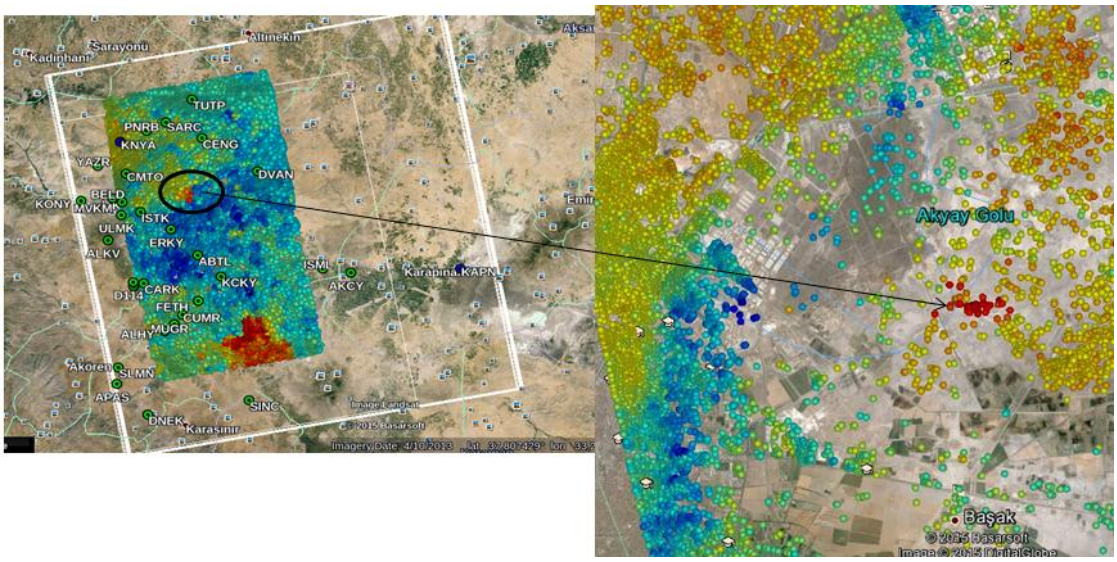
Şekil 4. 48: Baz uzunluk değerleri uygun olan 16 görüntünün StaMPS çözümleri (Yıldız nokta: referans PS noktasını göstermektedir).

Oluşturulan interferogramlar incelendiğinde, Konya Kent Merkez'inin hemen sağ tarafında yer alan çıplak alana dair herhangi bir yansıtıcı elde edilemediği için (düşük korelasyon olması sebeiyle PS seçilmemiştir), bu kısmın uyuşum değeri düşüktür ve defromasyon bilgisi de elde edilememiştir. Bu durum Şekil 4.49'da verilen PSI sonuc haritası ve 4.51'de verilen PSI+SB birleştirilmiş haritasında da daha net bir şekilde anlaşılmaktadır (karanlık renkler).



Şekil 4. 49. 343 iz numaralı çerçevede 10.02.2005-22.11.2007 tarihli görüntüler kullanılarak gerçekleştirilen maskelenmiş interferogram. (Sol panelde yeşil noktalar 110Y121 projesi kapsamında kurulan GPS istasyonları)

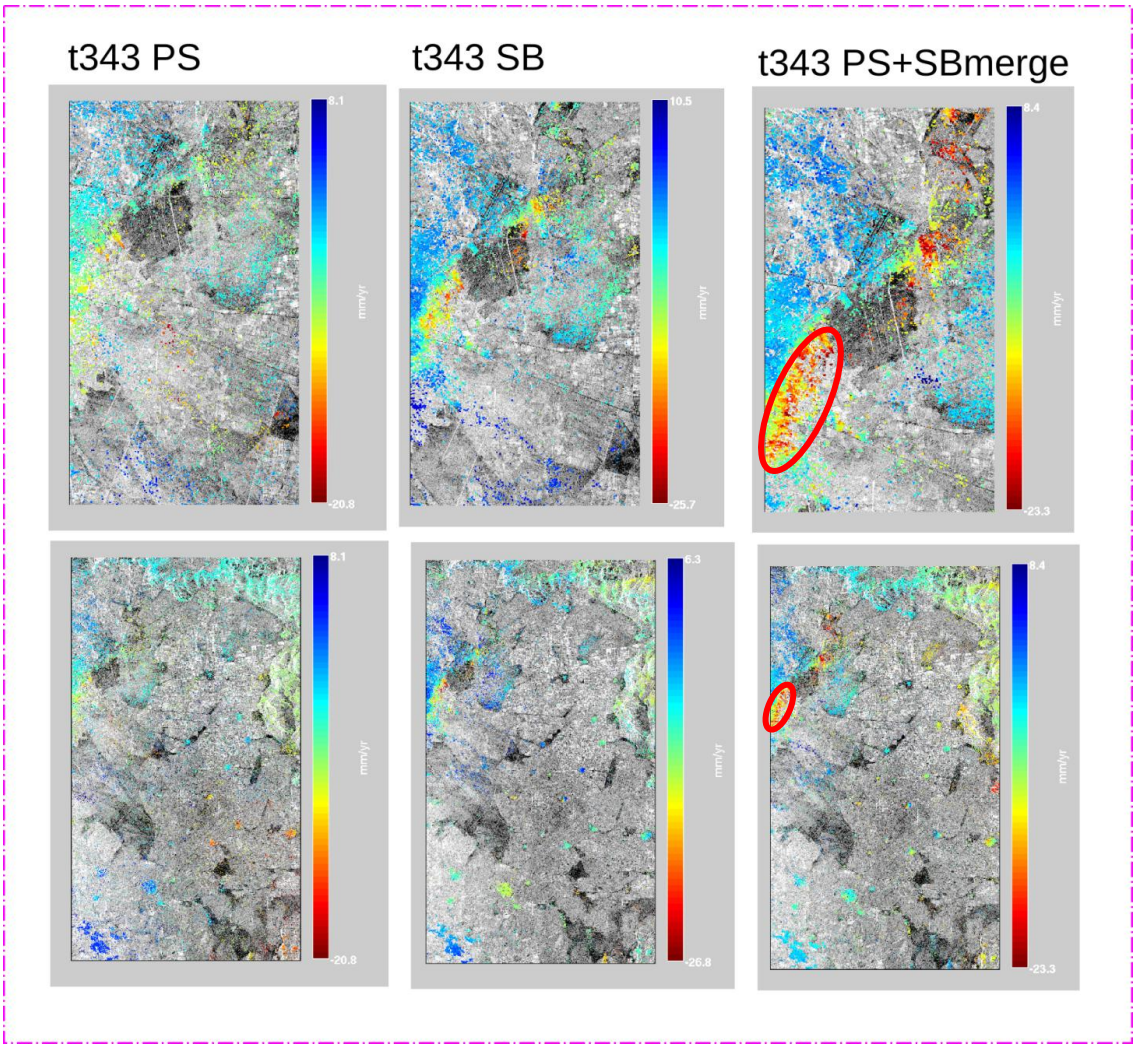
Envisat uydusuna ait 343 numaralı çerçeve ile yapılan uygulama, PS noktalarının daha net görülebilmesi için her bir PS noktası deformasyon değerleri ile birlikte Google Earth'e aktarılmıştır. Şekil 4.50 filtrelenmiş PSInSAR haritasını göstermekte ve Karatay ilçesinde yer alan Başak mevkiindeki deformasyon oranı yaklaşık -24.3 mm/yıl civarındadır.



Şekil 4. 50. 343 iz numaralı çerçevede gerçekleştirilen StaMPS sonuçlarına göre deformasyon haritasının google earth üzerindeki görünümü

PSInSAR çalışmalarının ardından SBAS yöntemleri ile deformasyon analizi işlemlerine devam edilmiş ve elde edilen haritalar karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak PSInSAR ve SBAS deformasyon haritalarını bir arada görmek ve karşılaştırma yapmak mümkündür.

Şekil 4.51'de görüldüğü üzere, PS'e göre SB kırsal alanlarda daha iyi sonuç vermektedir. Özellikle kırmızı daire içerisinde gösterilen Konya-Ankara yolu üzerinde bir kesit şeklinde karşımıza çıkan deformasyonun varlığı 2003-2010 tarihleri arasındaki 7 yıllık zaman dilimi içerisinde yılda -23.3 mm'ye karşılık gelen defromasyon değeri elde edilmiştir.



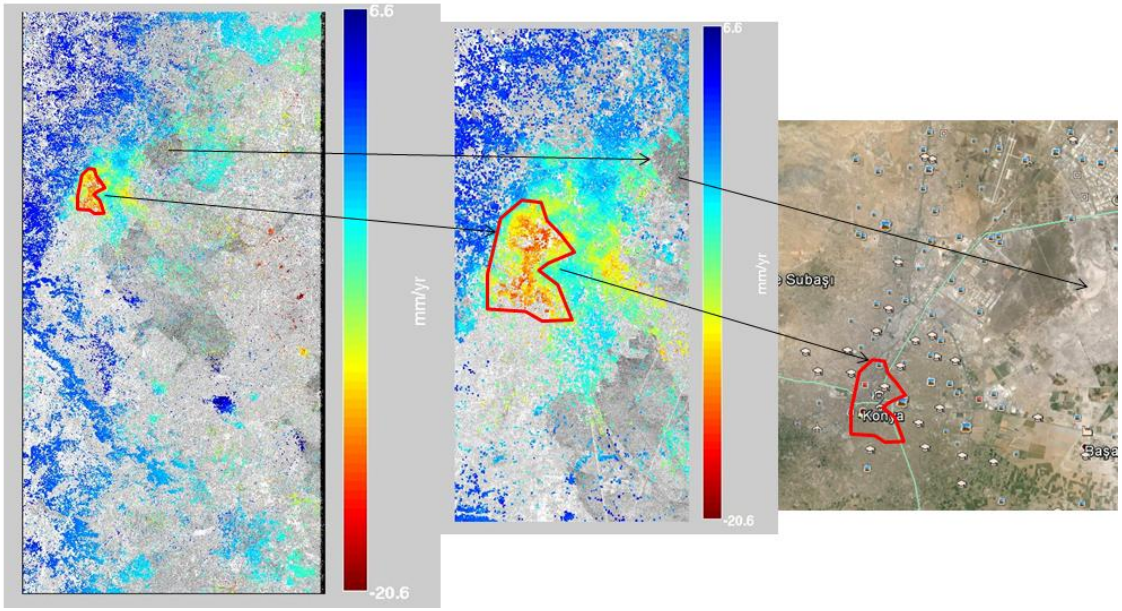
Şekil 4. 51. 343 iz numaralı çerçeve için PSInSAR ve SB deformasyon haritalarının bir arada gösterimi (üst panel alt panelin büyültülmüş halidir)

114 İz ve 2853 Çerçeve için yapılan işleme dair özellikler aşağıda sıralandığı gibidir:

Uydu	:	Envisat
Sensör	:	ASAR
Çerçeve - İz	:	2853 - 114
Veri Modu	:	Artan
Teknik	:	PSI ve SBAS
Bölge	:	Konya ve çevresinde bulunan kırsal alanlar
Yazılım	:	StaMPS

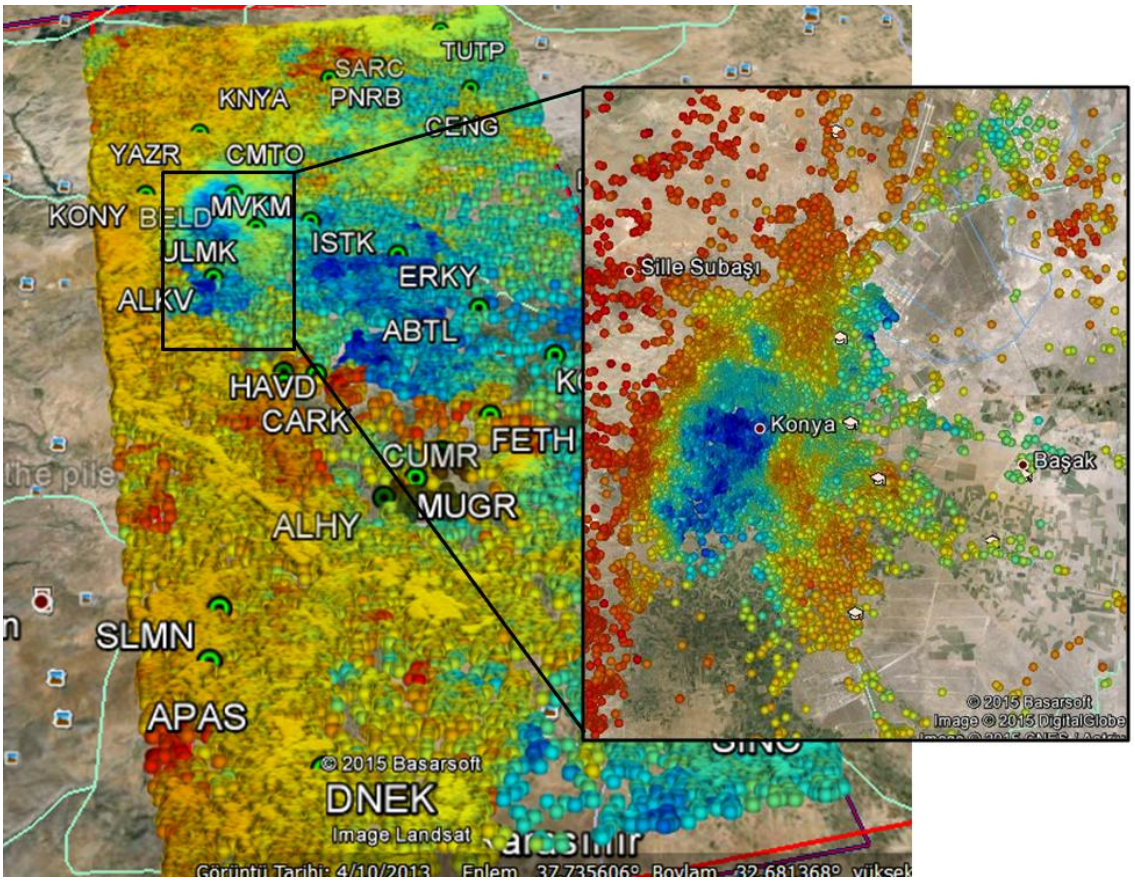
StaMPS yazılımı kullanılarak oluşturulan defromasyon haritalarına dair işlem adımları 343 çerçeve için yapılan uygulama kısmında açıklandığı için burada ayrıntılı bilgiye yer verilmeyecek olup, sadece sonuç haritaları yorumlanmıştır.

Mevcut verilerle oluşturulan deformasyon haritasına göre (Şekil 4.52), yer değiştirme oranları StaMPS yazılımında veri işleme aşamasında uygun parametre değerleri atanarak -20.6 - 6.6 mm arasında elde edilmiştir. Sol paneldeki haritanın büyütülmüş hali orta kısımda yer alan haritada verilmektedir. Kırmızı ile çevrelenen alan, deformasyon oranın yoğun olduğu kısım olup, sağ panelde gösterilen google earth uydu haritasında bu bölgenin hemen hemen nereye karşılık geldiği gösterilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi deformasyon yoğunluğu Sarproz sonuçlarında olduğu gibi Konya Kent Merkezini çevreleyen alanı kapsamaktadır.



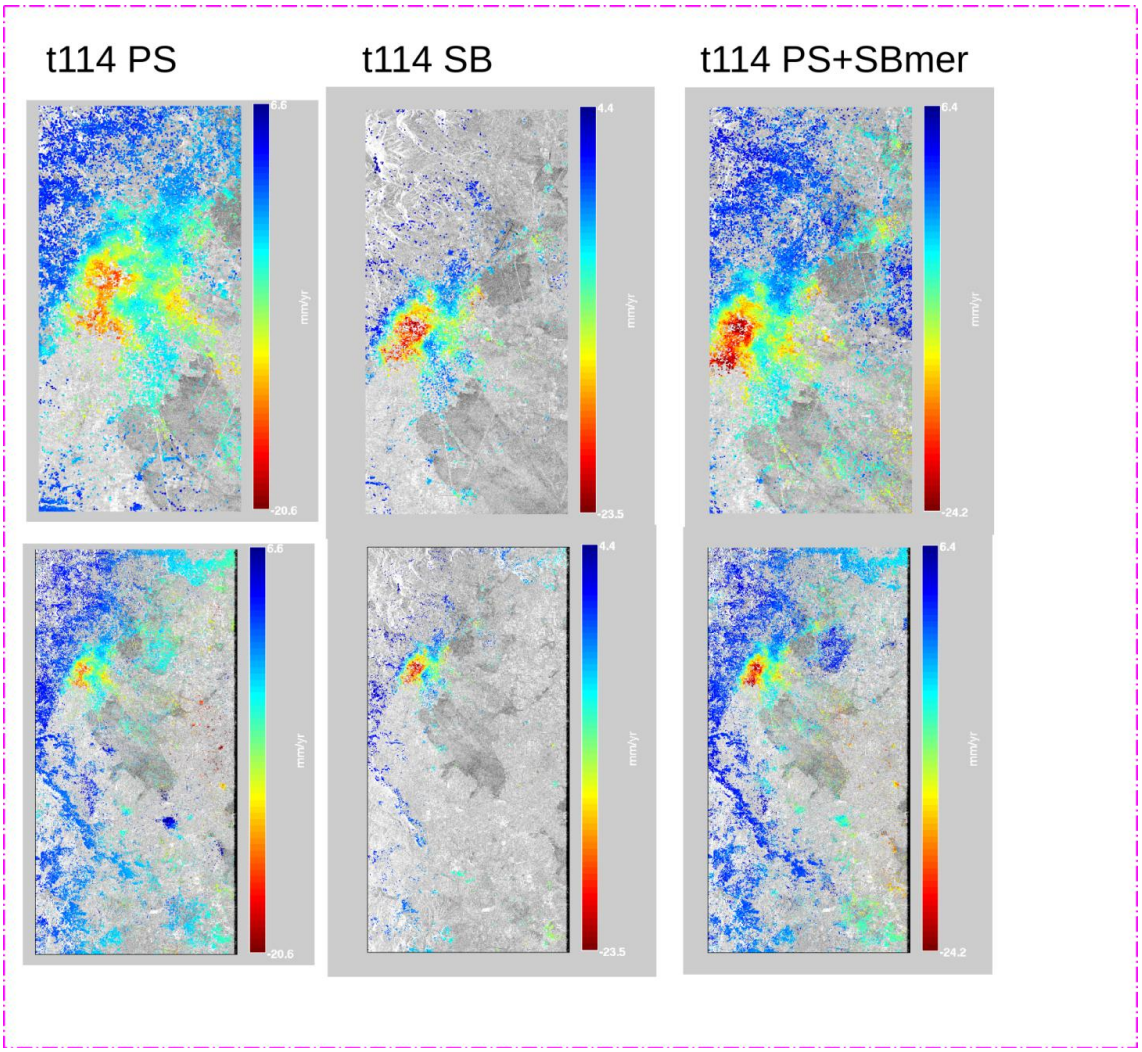
Şekil 4. 52. 114 iz numaralı çerçevede gerçekleştirilen StaMPS sonuçlarına göre deformasyon haritası

Bölgeye düşen her bir PS noktası deformasyon değerleri ile birlikte Google Earth üzerine aktarılırsa Şekil 4.53'de görüldüğü gibi çok sık PS noktalarından oluşan deformasyon haritası özellikle ilgi alanımız olan Kent Merkezinin olduğu bölge büyütüldüğünde oldukça net bir şekilde deformasyonun varlığını göstermektedir.



Şekil 4. 53. 343 iz numaralı çerçevede gerçekleştirilen StaMPS sonuçlarına göre deformasyon haritasının google earth üzerindeki görünümü

StaMPS ile PSInSAR analizlerinin ardından SBAS uygulamaları gerçekleştirildiği için, Şekil 4.54'de hem PSInSAR hem de SB sonuçları yanyana göstermek 343 çerçevede yapıldığı gibi mümkündür. Böylelikle deformasyon bölgeleri karşılaştırılabilir. Her ikisinde de yer değiştirmenin fazla olduğu alan hemen hemen aynı olup, sonuçlar birleştirildiğinde deformasyon çok net bir şekilde görünmektedir (-24.2 mm/yıl).

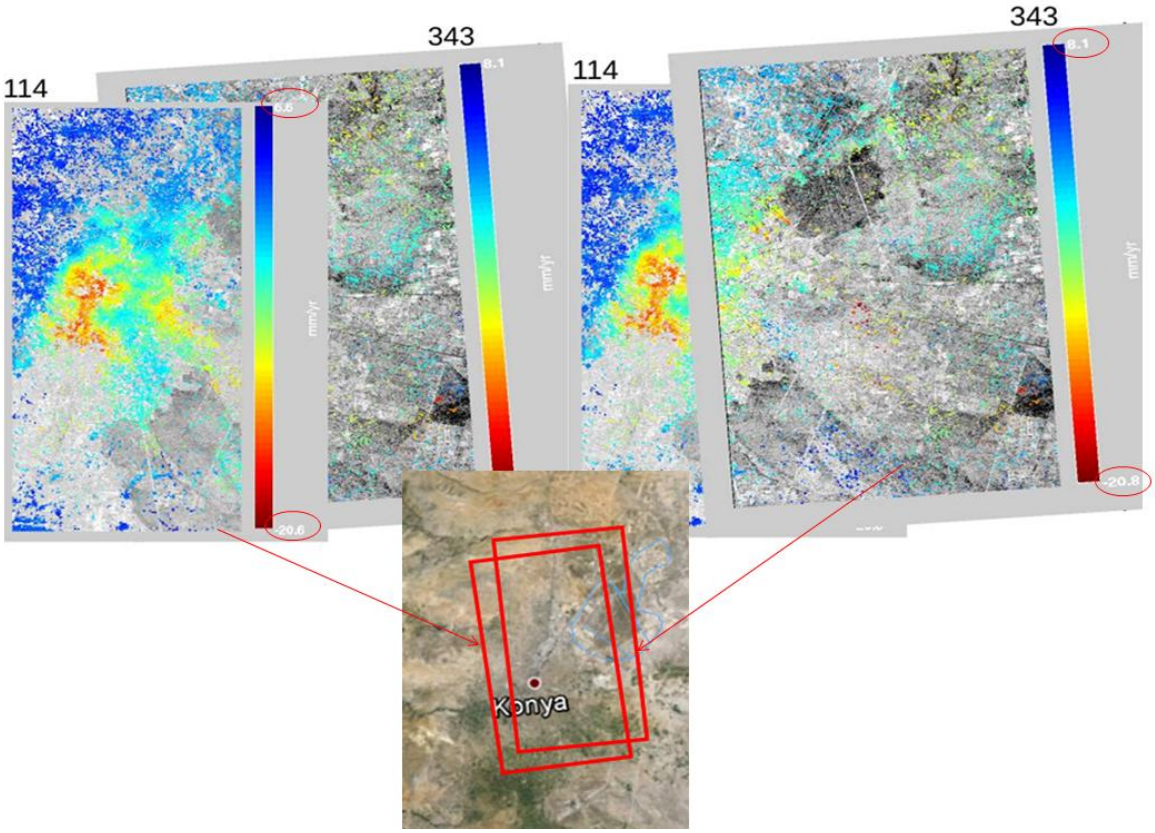


Şekil 4. 54. 114 çerçeve için PSInSAR ve SB deformasyon haritalarının bir arada gösterimi (üst panel alt panelin büyültülmüş halidir)

Her iki çerçeve için gerçekleştirilen StaMPS sonuçlarını üstüste çakıştırarak incelediğimizde ortaya Şekil 4.55'deki sonuç çıkmaktadır. Burada çöken alan kırmızı renk tonlarındaki alandan sarıya doğru giden alandır. 114 ve 343 çerçeveler için sol ve sağ panellerde verilen renk çubuğu aralığı -20.6 (kırmızı) ile 8.1 (mavi) mm/yıl'dır. Deformasyonun çok olduğu alan özellikle Konya Kent Merkezinde yoğunlaşmaktadır.

Envisat verileri ile elde edilen ayrıntılı sayısal veriler bir alt bölümde örnek bir lokasyon için GPS sonuçları ile karşılaştırma yapılarak verilmiştir.

.



Şekil 4. 55. 343 ve 114 iz numaralı çerçeveler için, PSI ve SB sonuçlarının bir arada gösterimi

4.7.3. StaMPS Sonuçlarının GPS Sonuçları ile Karşılaştırılması: Küçükköy Örneği

Yapılan tüm bu uygulamalar ile birlikte elde edilen deformasyon değerleri, çalışma bölgesinde ayrıca (Üstün ve ark., 2015) tarafından gerçekleştirilen Tübitak projesi kapsamında elde edilen GPS sonuçları ile de karşılaştırılmıştır. Havza genelinde deformasyonun çok olduğu umulan Konya Kent Merkezi ve Çevresi için kurulan ve 2011 yılının ilk ayından itibaren belli aralıklarla 10 kampanya şeklinde düzenlenen 28 noktalı GNSS gözlem ağından elde edilen verilerle, InSAR sonuçları lokal bir bölge için karşılaştırılmıştır.

Bilindiği gibi StaMPS yazılımı PSInSAR çalışmalarının yanısıra, kırsal alanlardaki yer değiştirmenin belirlenmesinde etkin rol üstlenen SBAS uygulamasının da gerçekleştirilmesine imkan sağlayan bir yazılımdır. StaMPS ile yapılan çalışmalarda kırsal alandaki deformasyonun belirlenmesine yönelik olarak, çalışma alanı sadece Konya kent merkezi için değil, çevrede bulunan kırsal alanlarda da yapılmak üzere genişletilmiştir. Aynı alan GPS istasyonlarının da yoğun olarak tesis edildiği lokasyonları içermektedir. StaMPS sonuçlarının GPS sonuçları ile karşılaştırılmasında

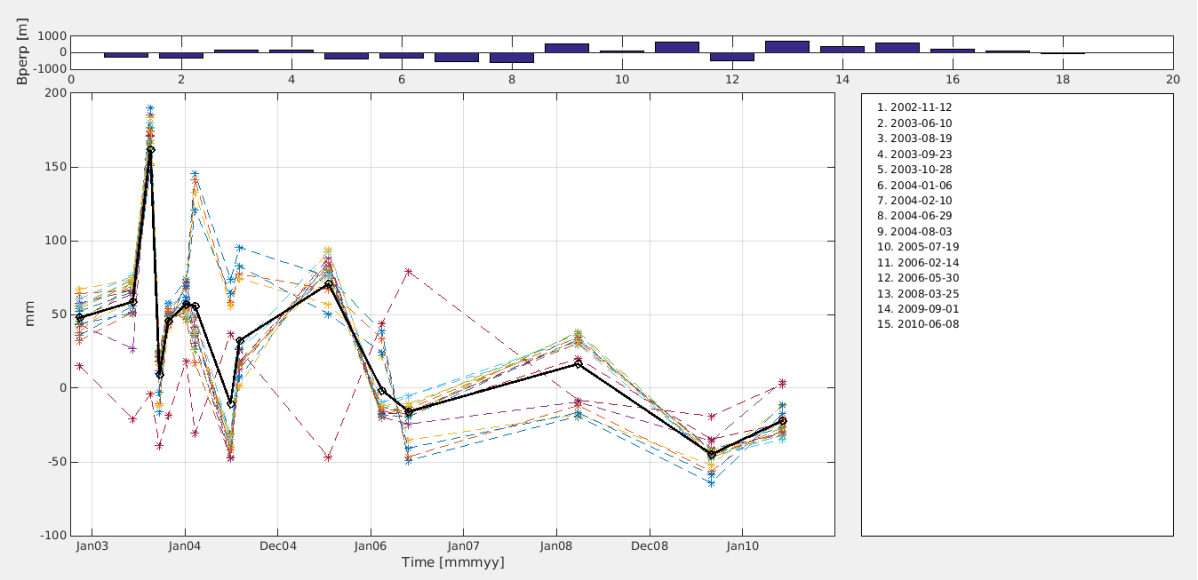
örnek olarak seçilecek lokasyon Küçükköy merkezinin batısında bulunan KCKY GPS istasyonu ve çevresidir (Şekil 4.56).



Şekil 4. 56. Çalışma alanı Küçükköy ve PS noktaları

Çalışma bölgesi üzerinde yer alan KCKY GPS istasyonu ve çevresinde ekili alanların çok olması nedeniyle PS noktası elde edilememiştir. Ancak 500 m yarıçapa sahip bir dairenin kapladığı alan içerisinde 17 adet PS noktası elde edilmiş, bu noktalardan yararlanılarak ortaya konulan sonuçlar neticesinde bölgede yaklaşık -13 ile - 17 mm/yıl oranında deformasyon tespit edilmiştir. Çumra İlçesine bağlı Küçükköy mevkisinin hem 114 hem de 343 numaralı çerçevelerin ortak kapsadığı alan içerinde bulunması nedeniyle, bu sonuç her iki çerçeveden alınan sayısal deformasyon değerleri arasındaki yaklaşık değerlerdir.

Şekil 4.57'de 114 numaralı çerçeveye ait 15 adet SAR görünütüsü için, KCKY GPS istasyonun yakın çevresinde (daha çok Küçükköy yerleşim alanı) bulunan 17 adet PS noktasına dair zaman serisi grafiği gösterilmektedir. Burada her bir PS'in görüntü yıllarına göre ve dik baz uzunluğu değeri ile de (üst panel) uyuşumlu olarak zaman serisi grafiği verilmektedir. Bu sonuç grafik StaMPS yazılımı ile seçilen her PS için özel olarak üretilebilir.



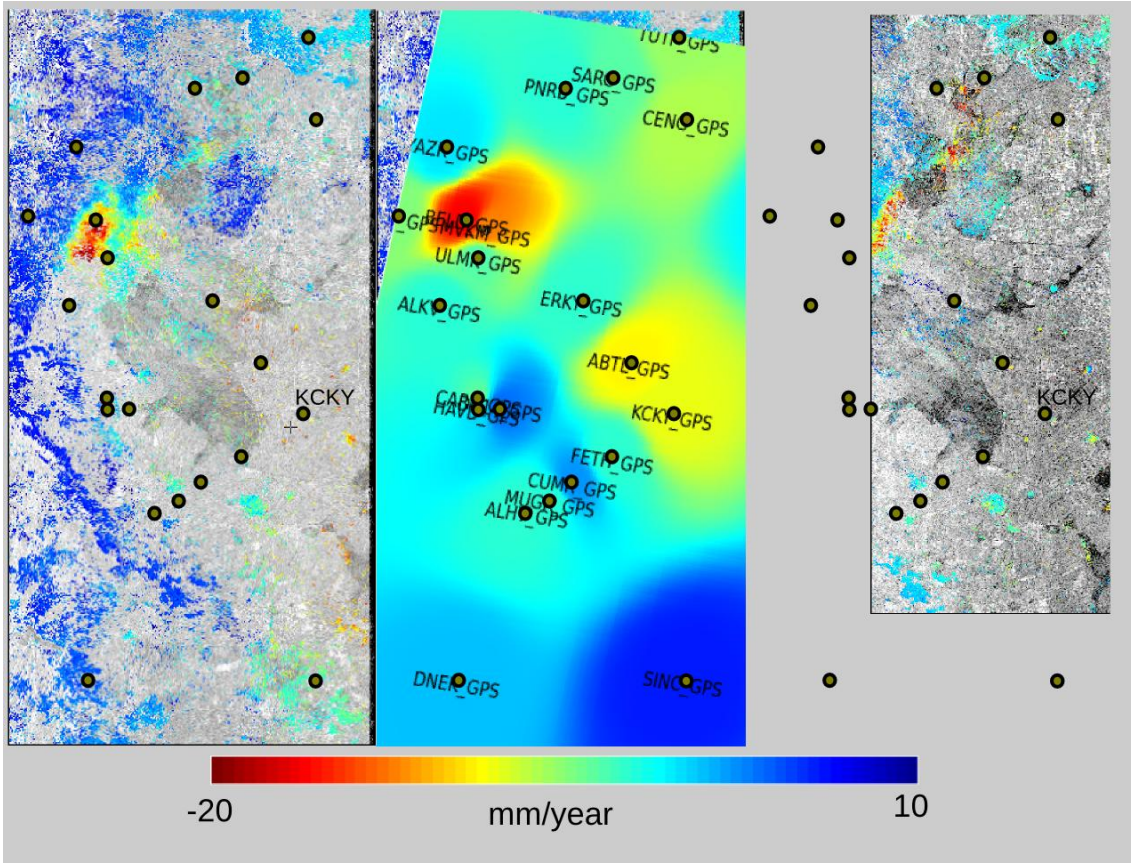
Şekil 4. 57. 114 numaralı çerçeveye ait 17 adet nokta için PSInSAR + SB zaman serisi grafiği

Çizelge 4. 7. GPS istasyonlarındaki düşey yönlü yerdeğiştirme oranları (Üstün ve ark., 2015)

GPS Noktaları	Boylam	Enlem	Çökme (cm/yr)	SD
ABTL_GPS	32.74541	37.73688	-10.73	4.20
AKCY_GPS	33.20190	37.70016	-4.88	2.96
ALHY_GPS	32.65269	37.54085	-0.45	3.54
ALKV_GPS	32.47702	37.76996	-0.19	3.13
BELD_GPS	32.48647	37.87735	-22.45	1.74
CARK_GPS	32.55574	37.66420	-3.25	3.80
CENG_GPS	32.74926	38.03669	-6.74	3.54
CUMR_GPS	32.70461	37.58412	6.57	3.19
D114_GPS	32.58672	37.66195	8.38	3.05
DNEK_GPS	32.60985	37.32610	4.53	3.09
DVAN_GPS	32.91753	37.95494	1.99	3.17
ERKY_GPS	32.66404	37.80160	-0.59	3.60
FETH_GPS	32.75047	37.62015	-0.47	3.20
HAVD_GPS	32.55700	37.65262	3.55	2.70
ISML_GPS	33.11834	37.70911	13.65	2.91
KAMN_GPS	33.22027	37.19323	-11.87	1.88
KCKY_GPS	32.81633	37.68364	-9.52	3.52
KONY_GPS	32.39391	37.86887	-4.59	2.95
MUGR_GPS	32.68077	37.55918	-0.23	3.22
MVKM_GPS	32.51593	37.86817	-16.38	3.57
PNRB_GPS	32.58236	38.05205	-0.27	3.64
SARC_GPS	32.63991	38.07485	-2.50	3.30
SINC_GPS	32.90846	37.36879	12.45	3.36
TUTP_GPS	32.71625	38.13498	-5.73	3.47
ULMK_GPS	32.51452	37.83521	-2.28	4.38
YAZR_GPS	32.44054	37.95946	2.72	3.17

InSAR verilerini GPS sonuçları ile doğrulayabilmek için aynı şekilde GPS için de elde edilen çökme sonuçlarını bilmemiz gerekmektedir. Çizelge 4.7 GPS noktalarının konumlarını ve çökme değerlerini her bir nokta için göstermektedir. 28 GPS noktası Google Earth haritası üzerinde de işaretlenmiş ve gerekli hesaplamalar ve dönüşümler yapılarak GPS+InSAR karşılaştırması harita üzerinde gerçekleştirilebilmiştir (Şekil 4.58).

Şekil 4.58; Çizelge 4.7'de verilen GPS istasyonlarına ait çökme oranları ve bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen 114 ve 343 izlerdeki SAR görüntüleri kullanılarak elde edilen StaMPS zaman serisi verileri (Şekil 4.57) sonuçlarına göre oluşturulmuştur.



Şekil 4. 58. 114, 343 çerçeveye ait PSInSAR sonuçları ve GPS arasındaki enterpolasyon farklılıkları (sol panel114 iz, orta panel çözümlenmiş deformasyon (çoklu interferometre) haritası, sağ taraf 343 iz)

Şekil 4.58'de çözümlenmiş deformasyon haritası üzerinde gösterilen çökme değerleri GPS noktalarının çökme değerleri ile örtüşmektedir. Burada kırsal alanların çok net bilgi vermemesi kullanılan uydunun C bandta çalışan Envisat ASAR uydusu

olmasıdır. Bu problemin üstesinden gelebilmek için L bantta çalışan ALOS PALSAR verileri ile bölgede analiz yapılmaya ihtiyaç duyulmuştur.

Ancak herşeye rağmen, Envisat ASAR verileri ile gerçekleştirilen PSInSAR+SB sonuçları çalışma alanındaki çökme değerlerini belirlemede, GPS ile elde edilen çökme değerleri kadar önemli sonuçlar vermektedir. Özellikle, fazla bitki örtüsü ile kaplı alanlarda yavaş yer değiştirmelerin başka bir deyişle çökmelerin belirlenmesi açısından çok etkili bir yöntem olduğu sonuçlardan anlaşılmaktadır.

Yapılan bu çalışma ile, Kasım 2002 ile Haziran 2010 tarihleri arasında elde edilen verilerle gerçekleştirilen StaMPS sonuçları ile GPS hız sonuçlarının karşılaştırılması amaçlamış hız değerleri enterpole edilmiş ve enterpole edilen alan InSAR sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma neticesinde sonuçlar birbiri ile tutarlıdır. InSAR'ın yatay yönlü hareketleri ölçmedeki düşük duyarlılığı nedeniyle, bu çalışmada sadece düşey değişimler karşılaştırılmıştır.

4.7.4. ALOS PALSAR Verileri ile Gerçekleştirilen Çalışmalar

Uydu	:	ALOS
Sensör	:	PALSAR
Çerçeve - İz	:	730 - 608, 740-604, 740-608
Veri Modu	:	Artan
Teknik	:	DInSAR
Bölge	:	Kırsal Alanlar (genel)
Yazılım	:	SarProz

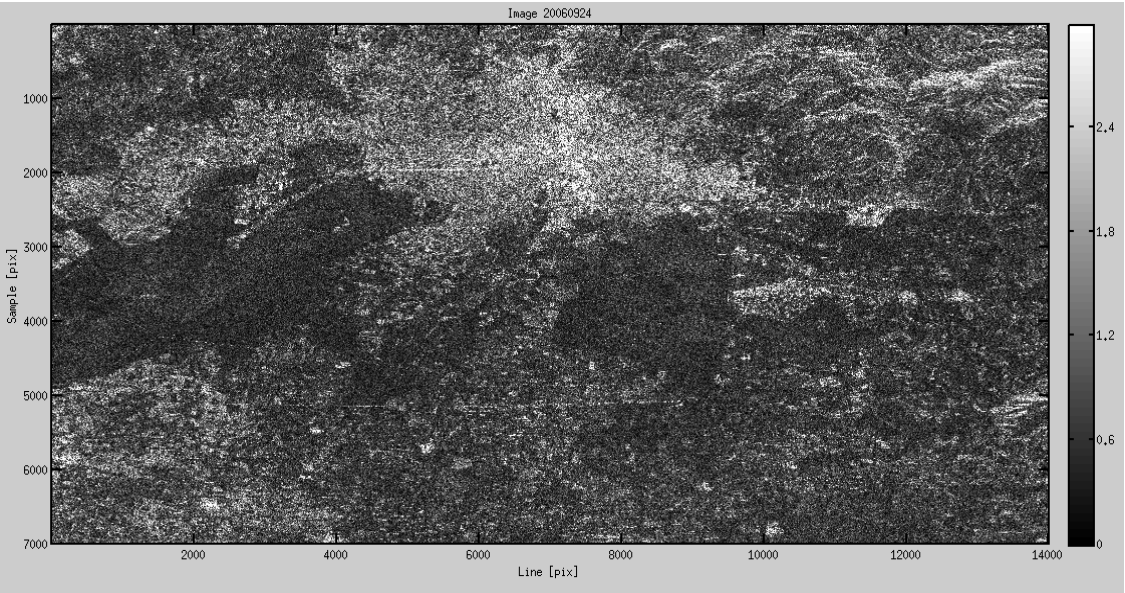
Konya Kapalı Havzası için gerçekleştirilen InSAR çalışmaları kapsamında havzanın genel anlamda kırsal alanlardaki deformasyon durumunun belirlenmesi amacıyla, özellikle bitki örtüsü ile ekili alanlarda oldukça iyi sonuçlar veren L bant ALOS PALSAR verilerinin (Clewley ve ark., 2015) kullanılması gerekmektedir. ALOS PALSAR SAR görüntü özellikleri ile ilgili üst bölümlerde yeteri bilgi verildiği için bu bölümde tekrar değinilmeyecektir. Söz konusu uygulamada görüntü sayısının çalışma bölgemiz üzerinde kısıtlı olması nedeniyle DInSAR çalışması yapılmış, yazılım olarak SarProz kullanılmıştır.

Burada diğer uygulamalarda da olduğu gibi önemli noktalardan biri görüntü seçimidir. Görüntülerin tarihleri (zamansal baz uzunlukları) ve edinim anındaki uyduların birbirlerine göre konumları dikkat gerektiren bir işlemdir. Bu çalışma için, çökme miktarlarının en çok olması beklenen ve mevsim değerlerine göre yağışın en

yoğun olduğu Şubat, sıcaklıkların artış gösterdiği Haziran ve Eylül ayları 2006 ve 2008 yılları için seçilmiştir. ALOS PALSAR görüntülerinin birbirlerine göre konumları Bölüm 4.5, Şekil 4.5'den incelenebilir. Bu çalışma kapsamında elde edilen üç farklı çerçevedeki ALOS PALSAR görüntüleri için öncelikle Envisat ve ERS-2 verilerininde odak noktasını oluşturan Merkez Nokta Koordinatına en yakın olan çerçeve seçilmiştir (Şekil 4.5: ALOS üst çerçeve).

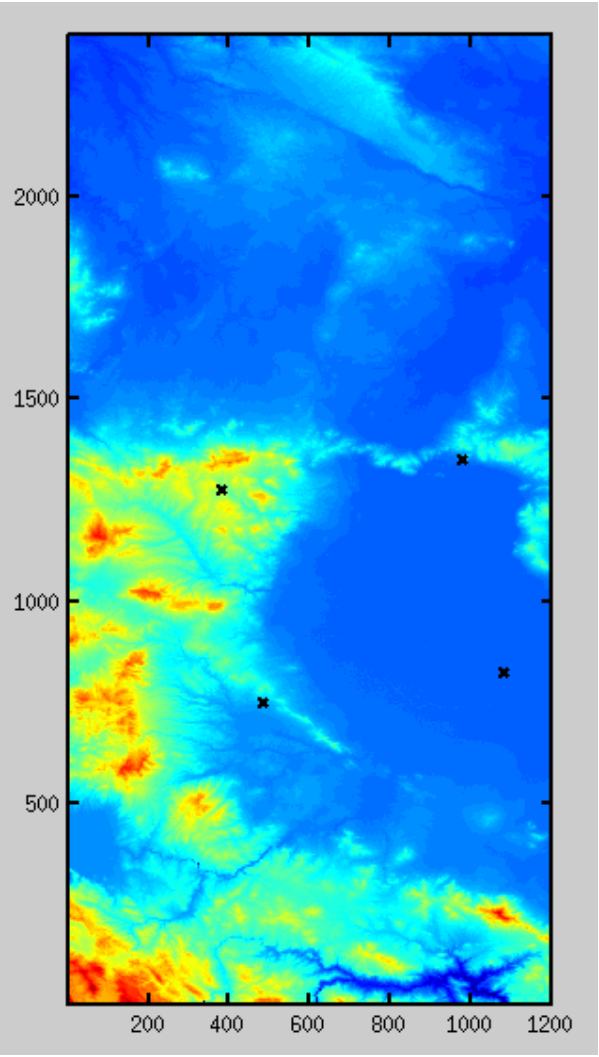
SAR verilerinin işlenmesi bilindiği gibi temelde, kompleks halindeki birincil verinin oluşturulması ve bunun ardından oluşturulan ikincil veri ile çakıştırılması (eşlenik piksellerin) esasına dayanmaktadır. Çoklu interferometre bir başka deyişle İleri InSAR tekniklerine göre veri işlemede ise daha önce de bahsedildiği gibi; N+1 sayıda (N: görüntü sayısı) interferogram oluşturulacağından, her bir ikincil görüntü oluşturularak birincil görüntü ile aynı anda (üstüste) çakıştırılır.

Bu çalışmada HH polarizasyonda olan 3 adet ALOS PALSAR SAR verisi 608 iz, 740 çerçeve için tek tek okunarak, içlerinden baz uzunluğu değerlerine göre optimal olan görüntü (20060924) birincil görüntü seçilmiştir. Şekil 4.59'da birincil SAR verisine ait oluşturulmuş yansıma haritası (reflectivity map) verilmektedir. Yansıma haritasının incelenmesi, oluşturulacak interferogramların sağlığı açısından önemlidir. Şekil 4.59 özellikle merkez ve çevresinde bulunan bazı ekili alanlarda yüksek yansıma değeri vermektedir (açık gri tonlu alanlar).



Şekil 4. 59. 20060924 tarihli birincil görüntüye ait yansıma haitası (açık gri tonlarında gösterilen alanlar yansıma değeri yüksek olan kent merkezileri ve dağlık alanları işaret ederken, siyaha yakın koyu alanlar yansıma değeri düşük kırsal alanları işaret etmektedir.)

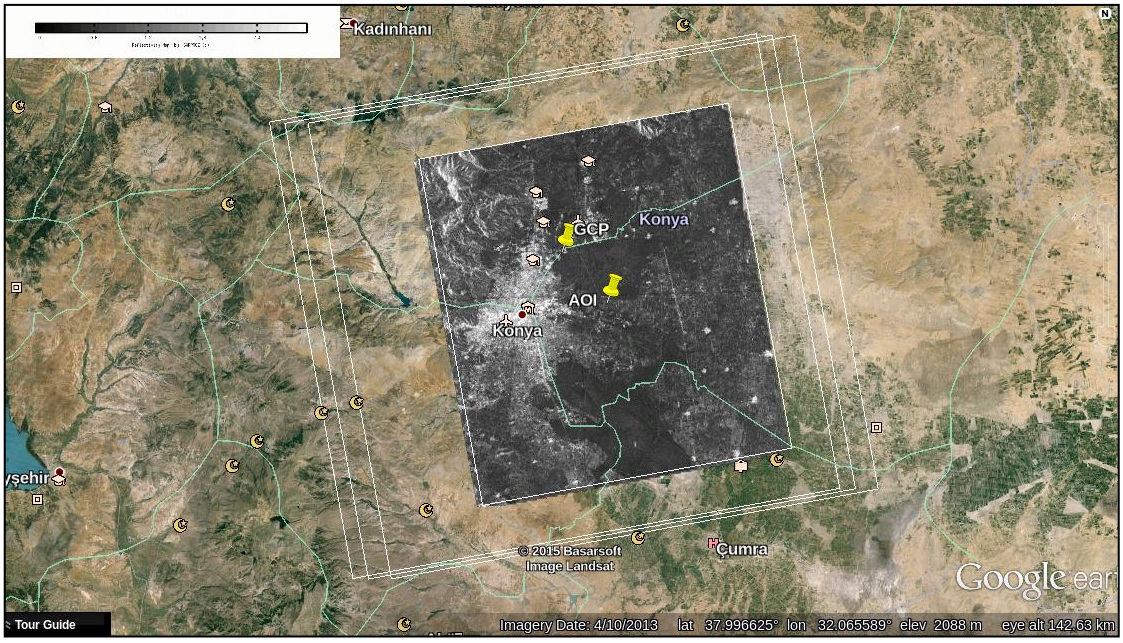
Görüntülerin düzgün bir şekilde çakışması bundan sonraki aşamalar için (jeoreferanslama ve interferogram oluşturma) son derece önem arzetmektedir. Bu işlemin en hassas şekilde gerçekleşmesini sağlayan faktör, çalışma alanı için uygun Sayısal Yükseklik Modelinin çalışmaya dahil edilmesidir. İnterferogramların oluşturulmasında topoğrafik faz düzeltmesi (faz katkısının çıkarılması) için kullanılan SRTM verisi bu çalışma için tercih edilmiş ve Şekil 4.60'da Sayısal Yükseklik Modeli oluşturulmuştur.



Şekil 4. 60. Çalışma Alanını kapsayan Sayısal Yükseklik Modeli.

Burada kırmızı-mavi aralığında verilen harita için, kırmızı renkler en yüksek noktayı, mavi renkler ise görece en düşük yüksekliği ifade etmektedir. Şekilde çarpı ile işaretlenmiş yerler çalışma alanımızı (özel olarak seçtiğimiz ve interferogram oluşturmak amacıyla belirlediğimiz) göstermektedir.

Çalışma alanında odaklandığımız bölge seçilen çerçevenin tamamı değil, özellikle ilgi alanı (Area of Interest - AOI) olarak seçtiğimiz Konya Kent Merkezi ve çevresini kapsayan küçük çerçevedir (Şekil 4.61). Bu çerçeve için belirlenen AOI Merkez Noktası 37.8779 enlem, 32.6197 coğrafi koordinatları üzerinde yer almaktadır (Şekil 4.61).



Şekil 4. 61.Çalışma alanında interferogram oluşturmak için odaklanacağımız bölge (Konya Merkez ve çevresi)

Şekil 4.61'de seçilen çalışma alanı çerçevesi oldukça büyüktür. Çözümleme işlemi çok büyük alanlar için uygun değildir. Iterasyon işlemi her piksel için yapıldığından, büyük alanlarda istenilen sonucu elde etmek güçleşir. Eğer çözümleme yapılacaksa baz uzunluğu açısından uygun tarihli görüntüler ile oluşturulan interferogramlar seçilmelidir. Ayrıca çok küçük alanlarda çözümleme işleminin daha uygun olması sebebiyle, bu bölge için çözüleme işlemi yapılmamıştır. Çünkü büyük alanlarda yapılan çözümleme işleminde, alanın tamamı uyuşumsuz (dekorelasyonlu) noktalarla kaplı olacaktır. Bu nedenle çözümleme işlemi tercih edilmemiştir.

Bilindiği gibi, bir çift interferogram oluşturmak için (DInSAR çalışmalarında) uyuşum değerinin hesaplanması son derece önemlidir. Ancak PSInSAR uygulamaları için bazı durumlarda çok da gerekli değildir. Sadece bir çift interferogram için uyuşum

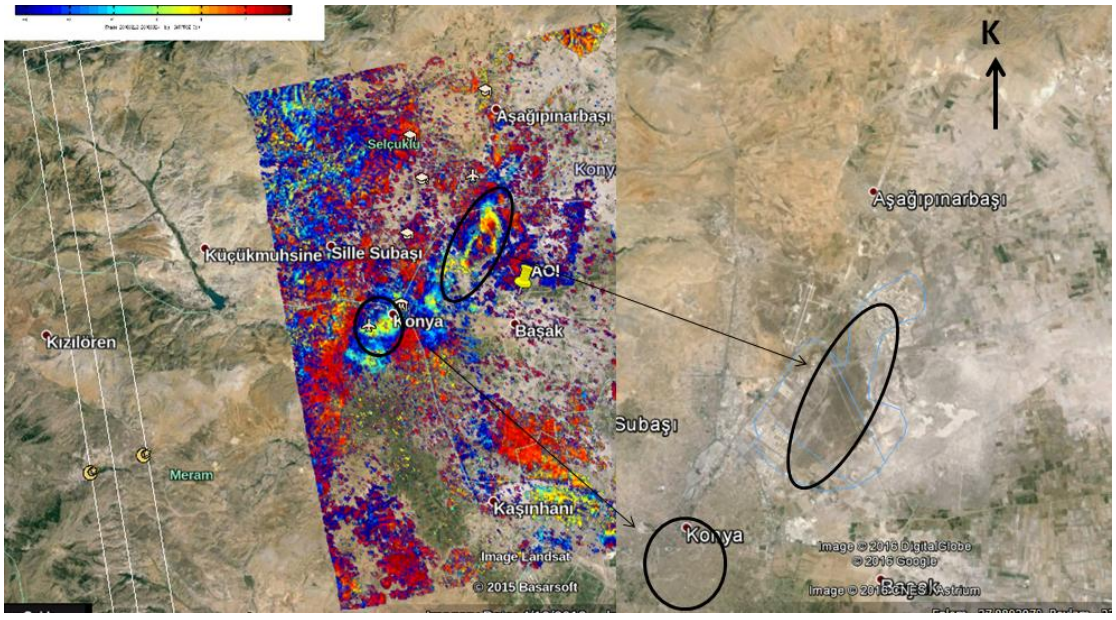
haritası dekorelasyonlu pikselleri filitreler. Böylelikle maskelenmiş interferogramları google earthe atmak mümkün olur.

Söz konusu DInSAR çalışmasında iki adet anlamlı interferogram elde edilmiş, 5X5 pencere oranında maskelenerek sonuçlar yorumlanmıştır. İki görüntü sonucundan da kırsal alanlar için kesinlikle çökme olduğu sonucu, interferogramlar üzerindeki örüntüler incelendiğinde net bir şekilde görülmektedir.

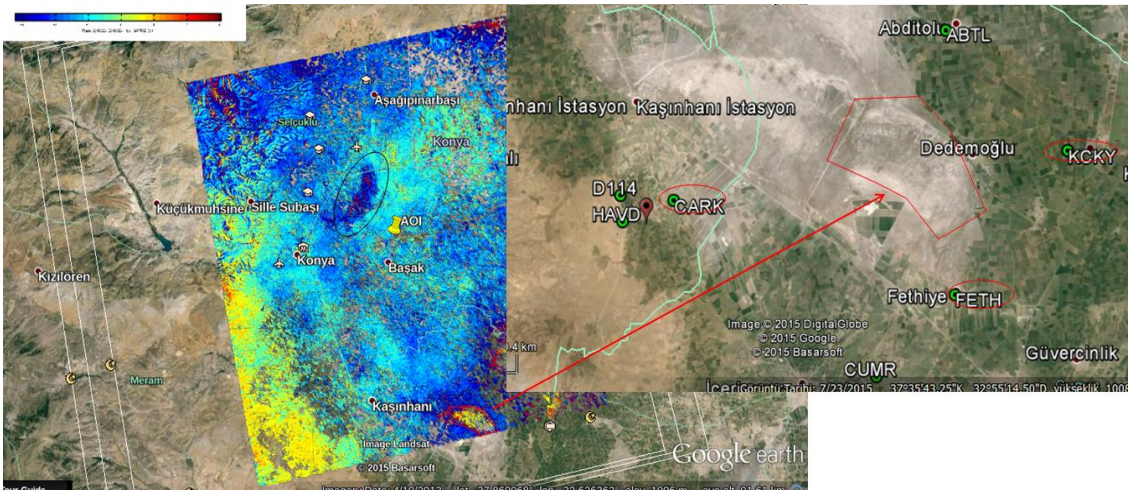
Limitli sayıda ALOS PALSAR görüntümüz olmasına rağmen, L-band radar sinyalleri ekili alanlarda DInSAR çalışmasıyla bile iyi sonuçlar vermektedir (Şekil 4.62, 63).

Neredeyse benzer sonuçlar Şekil 4.63'de de yakalanmış, burada sadece Konya'nın doğusu değil aynı zamanda Kaşınhanı İlçesinin doğusunda da (ERS verileri ile elde edilen sonuç bölgesi - Çarıklar Fatih mevkii) görülmektedir. Burada üst Bölüm 4.7.1'de verilen Şekil 4.44, Şekil 4.62 ile doğrulanmaktadır. Bu bölge aynı zamanda FETH GPS noktasının da yakın civarındadır. Çökme değerleri neredeyse StaMPS'den elde edilen ve ERS verileri ile oluşturulan PSInSAR sonuçları ile aynıdır (Bknz. Şekil 4.47).

Şekil 4.62 ve 4.63'deki renk çubuğunda renkler birbrinin tersini göstermektedir. Bunun nedeni DInSAR çalışmalarına esas olmak üzere birincil ve ikincil görüntü eşleştirmesinin çakıştırma işlemi sırasının farklı (zıt) olmasıdır. Şekil 4.62'de birincil görüntü ikincil görüntüden sonra, Şekil 4.63 de ise öncedir.



Şekil 4. 62. 608 iz - 740 çerçevede ALOS PALSAR DInSAR sonuçları (2008/02/12-2006/0924 ifg - 480 gün)



Şekil 4. 63. 608 iz - 740 çerçevede ALOS PALSAR DInSAR sonuçları (2006/06/24-2006/09/24 ifg - 93 gün), FETH, KCKY ve CARK GPS noktaları

İnterferogramlar için deformasyonlu bölge tamamen kırsal alanı kaplamaktadır. Bu alanda mevcut alan ekili bir alan olup, yansıtıcı özelliği olan yapılar veya büyük taş blokları hemen hemen hiç yoktur. Buradan da anlaşılmalıdır ki L bantta çalışan ALOS PALSAR verilerinin, C bantta çalışan Envisat ASAR veya ERS verilerine oranlara kırsal alan deformasyon belirlemede oldukça etkin oldukları görülmektedir.

İki interferogram sonucunda birinin yavaş deformasyon oranını verdiği (2008/02/12-2006/0924 ifg), diğerinin ise daha hızlı gelişen deformasyon oranını (2006/06/24-2006/09/24 ifg) verdiği görülmektedir. Bunlar uygun uyuşum değerleri kullanılarak maskelenmiş haritalardır.

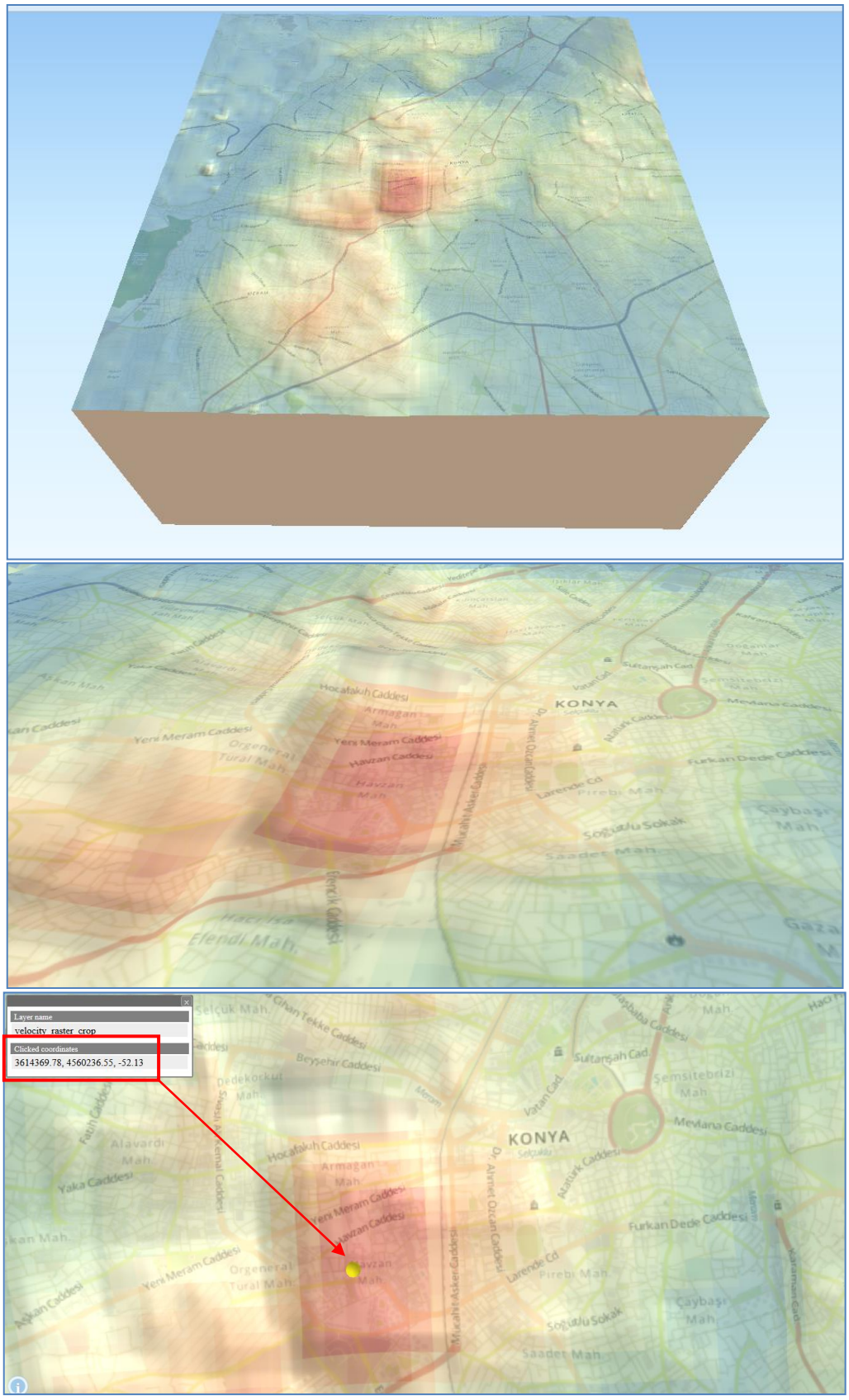
İnterferogramları yorumlamak gerekirse; Konya Kent Merkezi'ndeki "yeşil alanlar" deformasyonu, Kaşınhanı'nın batısında gözlemlenen 2 adet örüntü de yine ciddi oranda deformasyonu işaret etmektedir.

Az önce de bahsedildiği gibi, SarProz bu verileri aynı anda işlediği için, ilk görüntüde (Şekil 4.62) birincil SLC ikincil SLC'den sonra, ikinci görüntüde ise (Şekil 4.63) birincil SLC ikincil SLC'den önce çakıştırılmıştır. Dolayısıyla renklerle gösterilen deformasyon lejantındaki renkler birbirinin tam tersidir. Ama lejanttan bakıldığında, ikinci ifg (93 günlük), sadece açık maviden koyu maviye yaklaşık 3 radyan, birinci ifg (~2 yıl) koyu maviden sarıya ve kırmızıya sonra tekrar maviye yani 1 örüntü, yaklaşık 8 radyan oranında deformasyon söz konusudur.

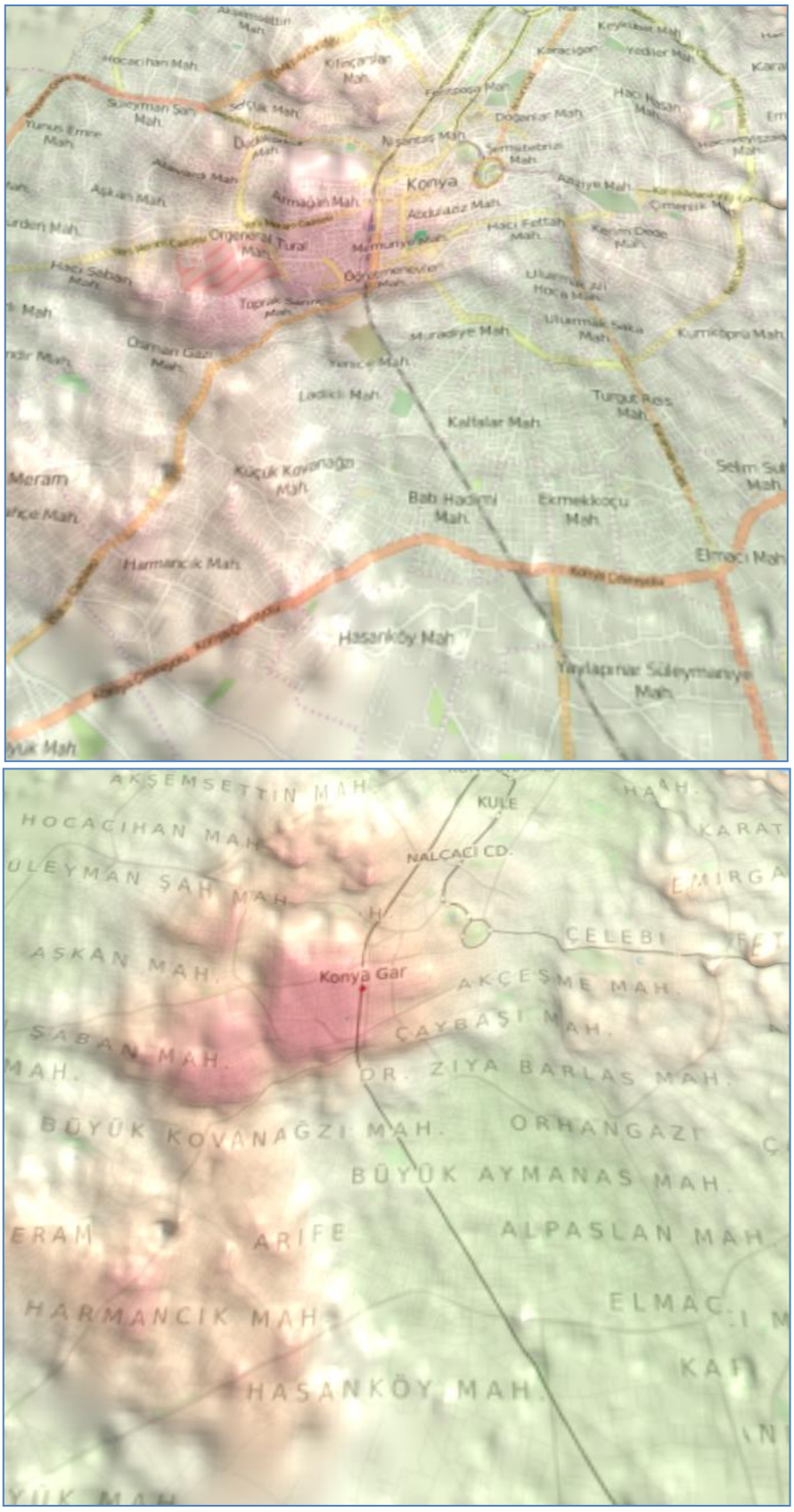
Sonuç olarak hem Envisat ASAR ve ERS verileri hem de ALOS PALSAR verileri ile yapılan StaMPS ve SarProz sonuçları kırsal alanlar için de birbiriyle tutarlı görülmektedir.

4.8. KKH için Genel Değerlendirme

KKH için tüm InSAR teknikleri yardımıyla elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında, havza için genel deformasyon durumu belirlenmiştir. Deformasyonların lokasyonları, büyüklükleri, tarihsel evrimleri (1995-2000 dönemi, 2002-2010 dönemi, 2014-2015 dönemi) sayısal olarak değerlendirilmiş, gerekli karşılaştırmalarla desteklenmiştir. Aynı zamanda farklı tekniklerden elde edilen kentesel ve kırsal alanlardaki yerdeğiştirme sonuçlarının tutarlılığı farklı uydu verileri denenerek tartışılmış, çalışmamızın amacıyla ilgili bir sonuç çıkarılmıştır. Tüm sonuçlar hem sayısal hem de grafiksel olarak üst bölümlerde verilmektedir. Son olarak, Şekil 4.64 ve 4.65 Konya Kent Merkezi ve çevresindeki çökmenin 3 boyutlu haritasını hem kentsel hem de kırsal nitelikte göstermesi amacıyla sunulmaktadır. 3 boyutlu haritalar CosmoSkyMed verilerine dair PSInSAR zaman serisi sonuçları ile GIS ortamında hazırlanmıştır. Şekil 4.64'de en alt panelde yer alan harita üzerinde sarı nokta ile işaretlenmiş lokasyon çökmenin en fazla (-52.13 mm) görüldüğü alana denk gelmektedir. Bu alan haritadan da anlaşılacağı üzere, Konya İlinin en yoğun yerleşime sahip mahallelerinden Havzan Mahallesi ve civarında yer almaktadır. Aynı çevrede Konya Tren Garı ve üst bölümlerde örnek lokasyon olarak seçilen Konya Tapu Kadastro Bölge Müdürlüğü Binası da yer almaktadır.



Şekil 4. 64. Konya Kent merkezi (alt panel) ve çevresine (üst panel) ait üç boyutlu deformasyon haritası (2014/10/12 - 2015/09/05 tarihleri arasında edinilen 20 adet CosmoSkymed PSInSAR zaman serisi ile oluşturulmuştur.)



Şekil 4. 65. Konya Kent merkezi (Meram İlçesi) ve Konya Tren Garı

(2014/10/12 - 2015/09/05 tarihleri arasında edinilen 20 adet CosmoSkymed PSInSAR zaman serisi ile oluşturulmuştur.)

Şekil 4.67 ve 4.68'de oluşturulan merkez üç boyutlu harita sadece CSK verilerinden elde edilmesi dolayısıyla geçtiğimiz son bir yıla dair deformasyon durumunu içermektedir. Ancak benzer haritalar, çökmenin son 20 yıllık tarihsel gelişimini yansıtması adına 1995 yılından itibaren elde edilen sonuçlar ile de oluşturulabilir. Böylece, KKH çalışması ile düşey yönlü yüzey deformasyonlarının veya başka bir deyişle çökmelerin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilmiş uygulamalardan oluşan tez çalışmamızın ana amaçlarından bir tanesi gerçekleştirilmiştir. InSAR tekniğinin farklı yüzey karakteristiklerindeki deformasyon belirleme kabiliyeti ortaya konmuştur.

Ancak giriş bölümünde de bahsedildiği gibi özellikle İleri InSAR tekniklerinin pek çok alanda deformasyon belirlemede etkin olduğu bilinmektedir. Bu kapsamda yöntem, daha önceden varlığı bilinen ve üzerinde çeşitli teknik gözlemler gerçekleştirilen Denizli - Babadağ heyelanları üzerinde de uygulanmış, uygulama aşamaları ve sonuçları Bölüm 5'de tartışılmıştır.

5. DENİZLİ BABADAĞ İLÇESİ HEYELAN AFETİNİN İLERİ INSAR TEKNİKLERİ YARDIMIYLA BELİRLENMESİ

Heyelanlar Türkiye'de ve dünyada yüksek oranda can ve mal kaybına sebep olan önemli doğal afetlerden biridir. Oluşumları bakımından incelendiğinde karmaşık bir mekanizmaya sahiptir. Jeolojik özellikleri başta olmak üzere birçok farklı çalışmaya konu olmaktadır. Bu çalışmalardan biri heyelanların InSAR yöntemi kullanılarak izlenmesidir. İleri InSAR teknikleri, deformasyonun niteliği ve olası deformasyonların nasıl ortaya çıkarılacağı konularına bağlı olarak belirlenmektedir.

Bu çalışma kapsamında, heyelan alanı için öncelikle artan modda ALOS PALSAR verileri kullanılmış, seçilen 4 verinin incelenmesi ve heyelan kayma hızının yıllık değişimlerinin tespiti planlanmıştır. Ayrıca Envisat ASAR uydusuna ait 2003 ve 2008 yılları arasında 19 adet SLC yardımıyla da bölgedeki heyelan durumu incelenmiştir. Son olarak 10 Eylül 2015 – 20 Mart 2016 tarihleri arasında, 12 adet Sentinel-1 uydu verisi ile de güncel kütle hareketi tespit edilmiştir. Bu çalışma ile öncelikle hedeflenen, Babadağ ve çevresini kuşatan belirli bir alanda, jeodezik yöntemlerle zemin çökme ve yükselmelerinin konumsal ve zamansal haritasını çıkarmaktır. Uygulanan yöntem sayesinde görüntüde bulunan her bir pixel ayrı ayrı analiz edildiği için nokta bazında yer değiştirme tespiti mümkün olmaktadır. Bu sayede sadece boşaltılan Gündoğdu Mahallesi değil daha geniş ölçekte bir bölgenin incelenmesi mümkün olmuş ve buna benzer veya daha küçük ölçekte benzer bir kaymanın olup olmadığının tespiti yapılmıştır.

Sonuç olarak, daha önce farklı gözlemsel yöntemlerle araştırılan heyelan alanı ve çevresi daha önce uygulanmamış bir yöntemle test edilmiş ve ortaya koyduğu sonuçlar mevcut çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

5.1. Çalışma Alanındaki Geçmiş Çalışmalar

Bu çalışma ile Denizli iline bağlı ve literatürde Babadağ-Gündoğdu heyelanı olarak adlanan heyelan bölgesinin İleri InSAR yöntemleri (DInSAR, PSInSAR ve Quasi-PS) kullanılarak araştırılması gerçekleştirilmiştir.

Ancak InSAR çalışmalarını uygulamadan önce, Babadağ için daha önceden gerçekleştirilen heyelan tespit uygulama ve sonuçları incelenmiş ve özellikle alanın jeolojik yapısı dikkate alınarak bu tez çalışması için gerekli InSAR veri işleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Geçmiş çalışmalar incelendiğinde, Babadağ-Gündoğdu heyelanının ilk etüdünün 1940 yılında Mülga Afet İşleri Genel Müdürlüğü tarafından yapıldığı belirlenmiştir. Daha sonra 1966 ve 1967 yıllarında iki farklı etüt daha yapılmış ve bazı önlemlerin alınması gerekliliği belirtilmiştir. Bu alan ilk kez Önay (1946) tarafından bir heyelan alanı olarak tespit edilmiştir. Zaman içinde farklı zamanlarda mahallenin taşınması gündeme gelse de özellikle dokumacılıkla uğraşan bu beldenin taşınmasının maddi zararları sebebiyle taşınma göz ardı edilmiştir. 2000 yılında hem yerel yönetim, hem Pamukkale-Hacettepe-Nihon-Tokai (Japonya) Üniversitesiteleri tarafından başlatılan çalışma ile bölgenin heyelan açısından ne kadar tehlikeli bir konumda bulunduğu tespit edilerek ortak bir bilimsel proje hazırlanmıştır. Bu proje kapsamında meteorolojik veriler, yer değiştirme, akustik emisyon sayıları, yeraltı suyu seviye değişimleri, kuyu içi deformasyon ölçümü, yerinde geçirgenlik ve sızma, dokuma tezgahlarının dinamik etkisini incelemek için yerinde ivme ölçümleri yapılmış, araziden alınan numuneler üzerinde laboratuvar deneyleriyle de kumtaşı ve marn birimlerinin jeomekanik özellikleri incelenmiştir. Tüm bu çalışmalar sonucunda da Gündoğdu mahallesinde çatlak ve oturma yerleri belirlenerek heyelanın krip+düzlemsel türü kayma şeklinde seyrettiği tespit edilmiş ve sınırları da yaklaşık olarak çizilmiştir. Krip türü heyelanın gözlem istasyonlarında yapılan lazerli yer değiştirme ölçümlerine göre yıllık kayma hızı yılda 4-14 cm arasında değişerek yaklaşık 1.417.500 m^3 lük heyelan kütlesinin Gökdereye doğru kaydığı tespit edilmiştir (Altaylı ve ark., 2006). 2000 yılında başlayan bu çalışmanın ardından, bölgeye ait detaylı çalışmalar farklı araştırmacılar tarafında yürütülmüştür.

Kumsar ve ark. (2004) tarafından yapılan çalışma bölgenin kaya mekaniği açısından incelenmesini ve özelliklerinin ortaya konmasını sağlamıştır. Kumsar ve ark. (2012) tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise bu proje kapsamında kurulan istasyonlardaki bir kaç yıllık deformasyon gözle görülecek şekilde tespit edilmiştir (Şekil 5.1). Altaylı ve ark. (2006) tarafından yapılan çalışma Gündoğdu mahallesinin jeolojik etüt çalışmasını içermektedir. Bu rapor sonucunda heyelanın önlenemeyeceği belirtilerek, afete maruz alan sınırları tespit edilmiştir. Afetzede ailelerin nakledilmesi

gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu çalışmaların her biri Taner (1974), Şimşek (1985) ve Özpınar ve ark. (1999) tarafından yapılan bölgenin paleontolojik-stratigrafik, jeotermal ve petrografik özelliklerinin ortaya konduğu çalışmaları kullanarak yeni ölçümler ve gözlemler yapmışlardır. Bu çalışmalara göre, Babadağ ilçesinin önemli bir bölümü, genellikle marn, marn-kumtaşı ve çakıltaşı ardalanmasından oluşan Erken Pliyosen yaşlı (Taner, 1974), Kolonkaya formasyonu (Şimşek, 1985) üzerinde kurulmuştur. Bu formasyon ile temeli oluşturan metamorfik kayalar arasında KB-GD gidişli Babadağ fayı tarafından birbiri ile dokanak oluşturmuştur (Özpınar ve ark., 1999). Tabakalanma Gökderenin akışına dik olup, 14°-25° arasında ve GD'ya eğimlidir. Marn tabakalarına dikey iki düşey eklem takımları görülürken zayıf az pekişmiş su geçirgenliği yüksek kumtaşında eklem takımlarına pek rastlanmamaktadır (Kumsar ve ark., 2004).



Şekil 5. 1. AE4 istasyonunda heyelan hareketinden kaynaklanan hasarlar: (a) Ocak 2005'de AE4 istasyon yerinin görünümü, (b) istasyonun 31.8.2007'deki ilk kurulum sonrası kurulum ekibi ile görünümü, (c-d) 27 Haziran 2009 tarihine kadar meydana gelen hasarlar, (e-f-g-h) 22 Mart 2012 tarihinde gözlenen hasarlar (Kumsar ve ark., 2012).

Babadağ-Gündoğdu heyelanının nedenleri ve mekanizmasını ortaya koyan bir diğer çalışma ise Hacettepe Üniversitesi'nde yapılan bir yüksek lisans çalışmasına konu olmuş, burada da bölgeye ait jeolojik özellikler ve heyelana ait benzer parametrelerin varlığı sunulmuştur (Çevik, 2003).

Uzun yıllar boyunca yamaç hareketine maruz kalmış bu alan için en kritik koşul; deprem yüklerinin, yüksek gözenek suyu basınçlarının, dokuma tezgahlarından

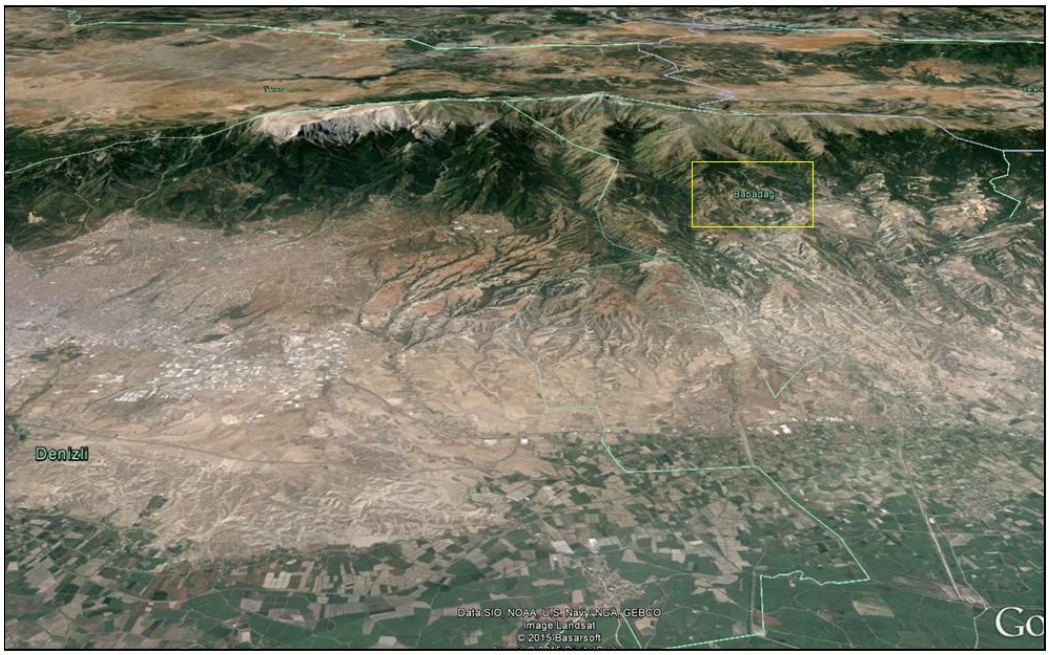
kaynaklanan titreşimler ile tabakalanma düzlemlerinin dayanımındaki azalmanın birlikte etkiyecekleri durumdur. Bu koşulun, aşırı yağışlı bir dönem sonrasında ilçenin çevresinde 20 km çaplı bir alanda büyüklüğü 6'dan yüksek bir depremin meydana gelmesi halinde olası olabileceği tahmin edilmektedir (Tano H. ve ark., 2006).

Tüm bu veriler ışığında yapılan değerlendirme sonucunda 2007 yılında alınan "Afete Maruz Bölge" kararıyla bu alan üzerindeki konutlar kaldırılmış, yapılaşmaya kapatılmıştır. Böylece, Babadağ-Gündoğdu heyelanına ait gözlemsel tüm çalışmalar tamamlanmış ve karşı karşıya kalınan riskin büyüklüğü tespit edilerek karar vericiler tarafından gerekli önlemler alınarak yerleşim alanı taşınmış ve yerleşime kapatılmıştır.

Halihazırda hakkında tüm gözlemsel çalışmaların yapıldığı bir alan olması sebebiyle, Babadağ-Gündoğdu heyelanı hakkında birçok bilgi elde edilmiş durumdadır. Bu sebeple PSInSAR yönteminin uygulanıp, var olan verilerle karşılaştırılması yöntemin geçerliliğini ve uygulanabilirliğinin de test edilmesi imkânı sağlayacaktır.

5.2. Çalışma Alanı ve Görüntü Seçimi

Babadağ, Denizli'nin güney batısında yaklaşık 4500 kişilik nüfusa sahip bir ilçedir (Şekil 5.2). Gündoğdu mahallesi ise Babadağ ilçesinin güneyinde bulunan yaklaşık 2000 kişilik nüfusa sahip, heyelan neticesinde birçok yapının zarar gördüğü ve sonuç olarak büyük bir kısmının taşınması kararı verilen aktif bir heyelan kütlesinin üzerinde oturmaktadır.

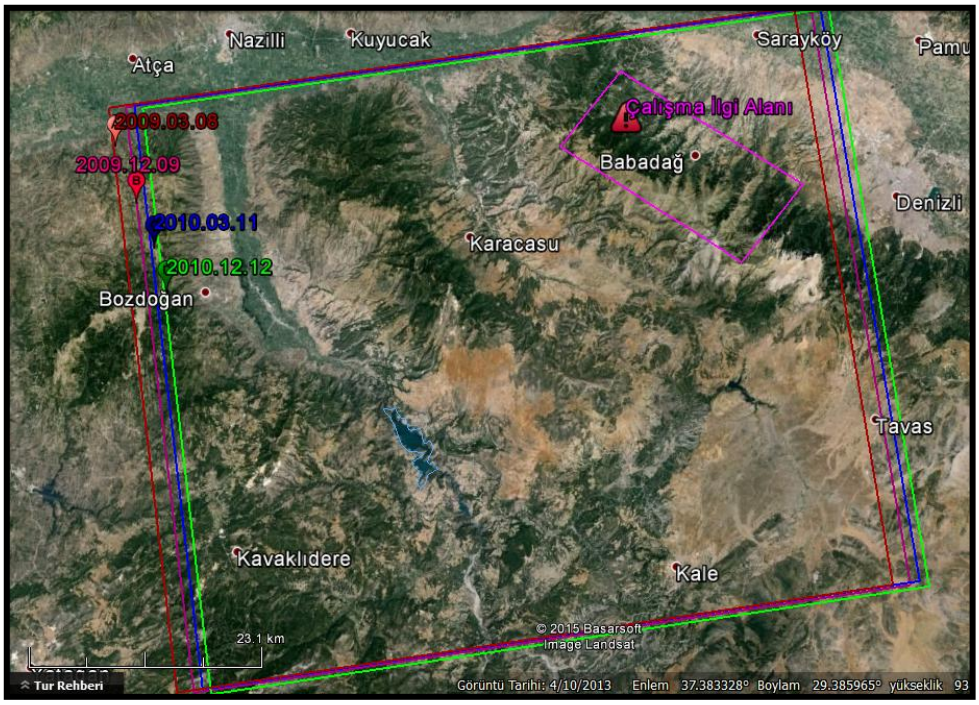


Şekil 5. 2. Denizli ili Babadağ ilçesinin lokasyonunu gösteren şekil (güneye bakış).

InSAR çalışmaları kapsamında, Babadağ heyelanlarının gözlemlenmesi amacıyla ALOS PALSAR, Envisat ASAR ve Sentinel-1 verilerinden yararlanılmıştır. Özellikle yüksek eğime sahip heyelan alanlarının belirlenmesinde uydunun bakış modu oldukça büyük önem taşır. Eğim yönüne uygun olarak her üç veri için de artan veri edinim modunda uydu görüntülerinin seçimine dikkat edilmiştir.

ALOS PALSAR ve Envisat ASAR uydu verileri temini için Avrupa Uzay Ajansı'na proje başvurusunda bulunulmuştur. Kategori-1 projesi kapsamında 14218 proje numarasıyla, Babadağ ve çevresi için gerekli veriler kırsal ve kentsel alanlarda kullanılmak üzere temin edilmiştir. Sentinel-1 verileri, Konya örneğinde olduğu gibi Copernicus projesi kapsamında Avrupa Uzay Ajansı'ndan ücretsiz olarak temin edilmiştir. Başlangıç çalışması olarak heyelanların tespitinde son derece etkili olan ALOS PALSAR uydu verilerinin temini ve işlenmesi uygun görülmüştür.

InSAR uygulamaları kapsamında, çalışmaların gerçekleştirilebilmesi için öncelikle seçilen 4 adet ALOS PALSAR uydu görüntüsüne ait, çalışma alanını kapsayan iz ve çerçeve (Çerçeve No: 740) görünümleri Şekil 5.3'de gösterildiği gibidir. Aynı zamanda Envisat ASAR ve Sentinel-1 veri seçimi de bu bölge üzerinde yapılmış ve görüntü ALOS çalışmalarında yapılan pencere oranında küçültülmüştür.



Şekil 5. 3. ALOS PALSAR verilerinin çalışma alanı üzerindeki konumu (Çerçeve No:740),(Mor çerçeve: çaışma alanı için küçültülmüş bölge (AOI))

ALOS PALSAR verilerine ait koordinat bilgileri ve baz uzunluk özelliklerinin yer aldığı Çizelge 5.1'de birincil görüntü olarak seçilen veri, diğer görüntülere göre zamansal ve paralel baz uzunluk değerlerinin diğer görüntülere göre optimal olması nedeniyle 2009.12.09 tarihli SAR görüntüsü olarak seçilmiştir. Bu görüntü baz alınarak diğer görüntülere ait zamansal ve paralel baz uzunluğu değerleri hesaplanmıştır.

Çizelge 5. 1. Seçilen görüntülere ait özellikler (Birincil Görüntü: 2009.12.09)

Görüntü No	**Görüntü Tarihi**	**Paralel Baz Uzunluğu (m)**	**Zamansal Baz Uzunluğu (gün)**	**Görüntü Merkez Koordinatları (Enlem/Boylam)**
PSRP166260740	20090308	1231.544091	-276.000948	37.632/28.609
PSRP206520740	20091209	0.000000	0.000000	37.613/28.628
PSRP219940740	20100311	-1098.257866	91.999752	37.635/28.638
PSRP260200740	20101212	-2074.955938	367.997435	37.628/28.652

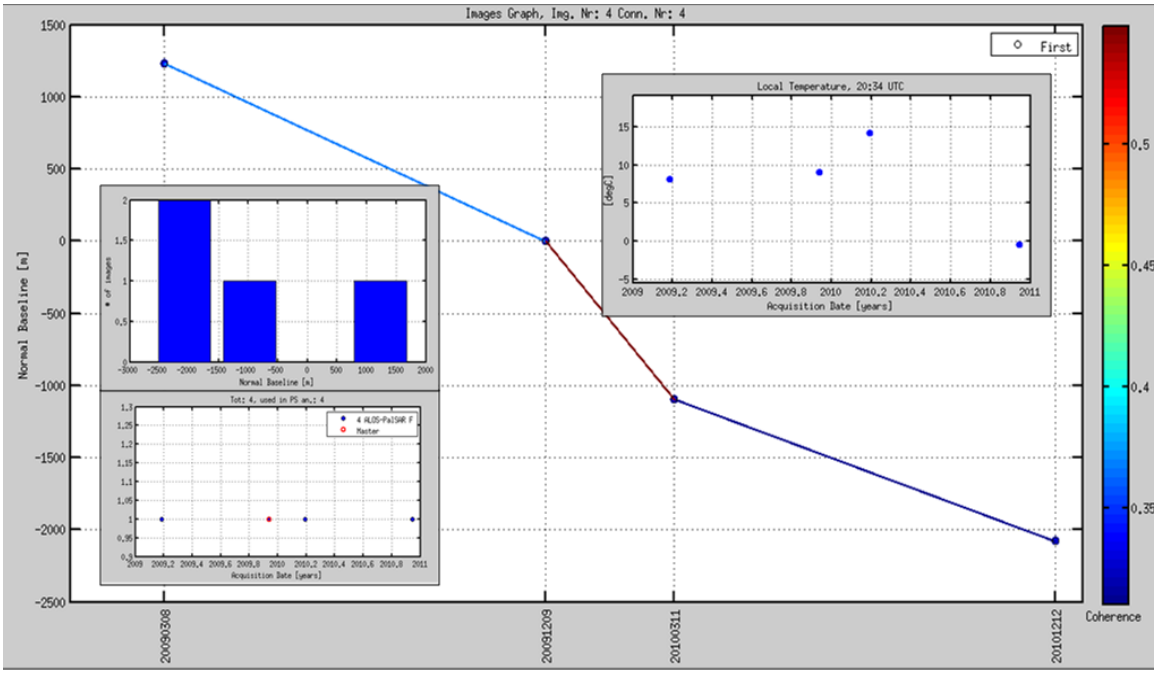
Zamansal baz uzunluğu değerlerinin çalışma amacımıza uygun olarak son derece tutarlı değerler olmasına karşın, paralel baz uzunluğu değerleri oldukça fazladır. Ancak, heyelanlı ve kırsal bölgelerin InSAR yönetimi ile tespitinde oldukça başarılı olan ALOS PALSAR verilerinin ne yazık ki bölge için veri alternatifi çok bulunmamaktadır. Bu nedenle hem sınırlı sayıda görüntü temini gerçekleştirilmiş hem de kısa paralel baz uzunluğu değerleri için başka alternatifler değerlendirilememiştir. Özet olarak, bölge için seçilebilecek mevcut ve optimal ALOS PALSAR görüntüleri seçilmiştir.

5.3. ALOS PALSAR Uygulaması

ALOS PALSAR verileri için seviye 1 olarak tercih edilen görüntü seçiminde dikkat edilen en önemli nokta, verilerin tarihleri (zamansal baz uzunlukları) ve edinim anındaki uyduların birbirlerine göre konumlarıdır. Görüntü tarihi olarak heyelanların en aktif olması beklenen, yağışın en yoğun olduğu mart ve aralık ayları 2009 ve 2010 yılları için seçilmiştir. Ayrıca görüntü tarihleri arasında seçilen örneğin yaklaşık 9 aylık süre farkı, çalışma alanındaki değişimin, radarın dalga boyundan daha fazla olacağı

düşünülerek seçilmiş, böylelikle deformasyon değerinin daha net ortaya konulması mümkün kılınmıştır.

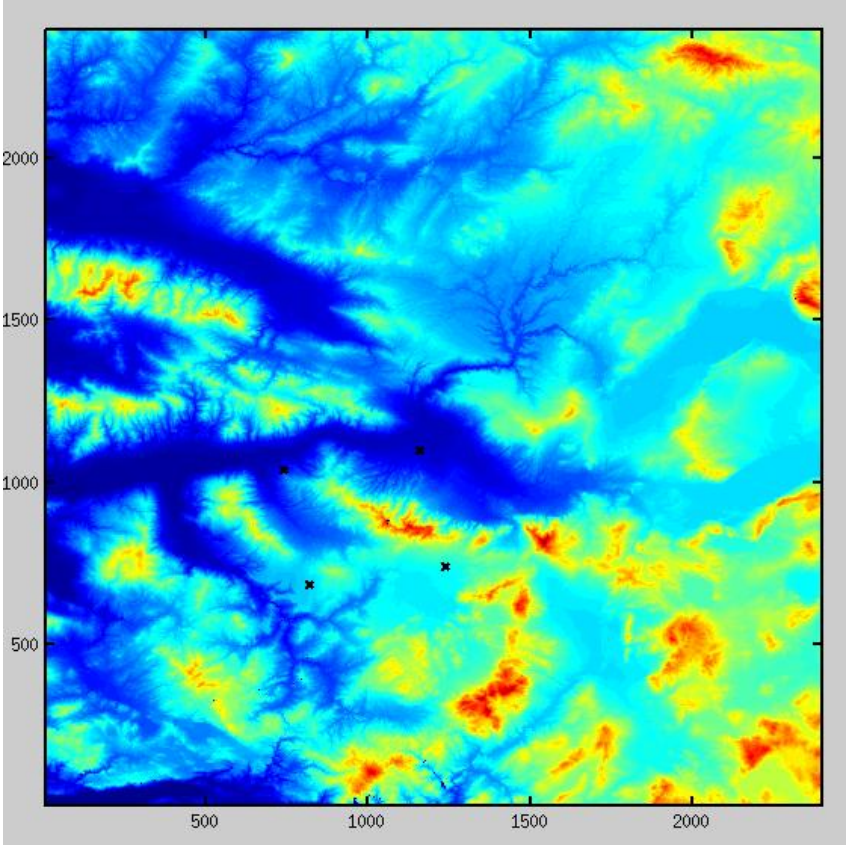
Şekil 5. 4'de, çalışmamız için seçtiğimiz görüntü tarihleri ve baz uzunluklarının birbirlerine göre olan konumlarının yer aldığı grafikler yer almaktadır.



Şekil 5. 4. Seçilen uydu görüntülerinin zamansal ve dik baz uzunluklarını gösterir grafikler

Şekil 5. 4'de verilen genel grafikte, sağ kısımda gösterilen lejant, görüntüler arasındaki uyuşum (coherence) değerlerini göstermektedir. İçerik kısımlarında yer alan diğer grafiklerde ise görüntülerin birbirlerine göre normal baz uzunluğu, zamansal baz uzunluğu ve mevsimsel özelliklerine göre konumları gösterilmektedir. Görüntülerin edinim anlarındaki mevsimsel durum, sonuç ürün açısından oldukça önemlidir. Örneğin, özellikle heyelanlı bölgeler için tetikleyici olan yağışların yoğun olduğu mevsimlerde (kış ayları) edinilen bir görüntü ile özellikle diferansiyel InSAR uygulaması için bir sonraki yılda seçilen görüntü de hemen hemen aynı özellikte olan bir ayda seçilmesi gerekmektedir. Ayrıca, her görüntü için mevsim değerlerinin de görüntü işleme sürecine mutlaka dahil edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla görüntü edinim tarihlerindeki mevsim durumları ile ilgili grafiği de içeren grafikler Şekil 5.4'de bir arada gösterilmektedir. Tüm bu grafiklerden yararlanılarak deformasyon ve mevsim değerlerinin birbirlerine göre ne oranda korelasyonlu oldukları da anlaşılabilir.

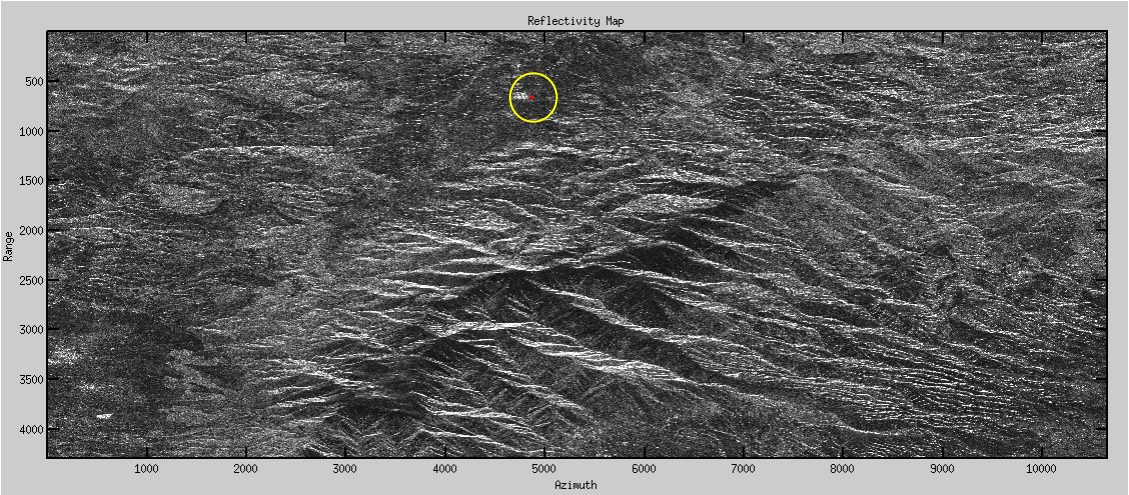
Görüntülerin düzgün bir şekilde çakışması çalışmamızın diğer aşamaları için (jeoreferanslama ve interferogram oluşturma) son derece önem arz etmektedir. Bu işlemin en hassas şekilde gerçekleşmesini sağlayan faktör, çalışma alanı için uygun Sayısal Yükseklik Modelinin çalışmaya dahil edilmesidir. Bu çalışma için SRTM verisi kullanılmış ve Şekil 5.5'de gösterilen Sayısal Yükseklik Modeli oluşturulmuştur.



Şekil 5. 5. Çalışma Alanını kapsayan Saısaıl Yükseklik Modeli.

Burada kırmızı-mavi aralığında verilen harita için, kırmızı renkler en yüksek noktayı, mavi renkler ise görece en düşük yüksekliği ifade etmektedir. Şekilde çarpı ile işaretlenmiş yerler çalışma alanımızı (özel olarak seçtiğimiz ve interferogram oluşturmak amacıyla belirlediğimiz) göstermektedir.

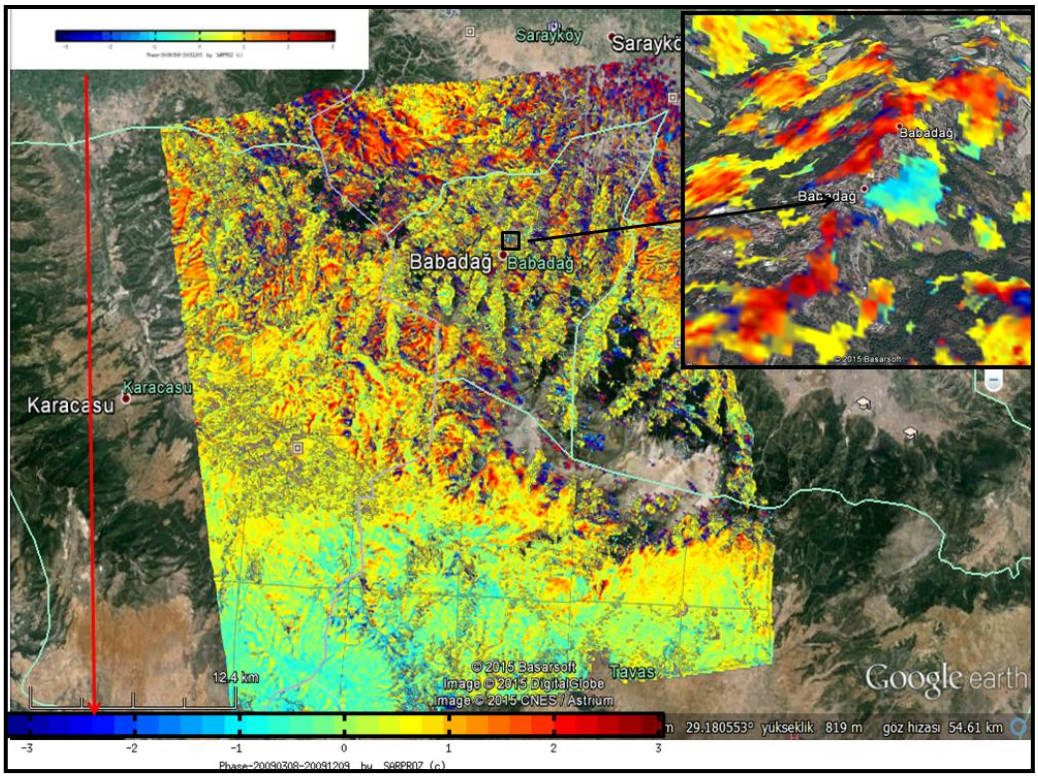
Jeoreferanslama işlemi için yer kontrol noktasının belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için yörünge düzeltmelerinden elde edilen doğrulama verileri ya da harici sayısal yükseklik modelinden yararlanılabilir. Şekil 5.6'da ileriki veri işleme adımlarına esas oluşturacak yansıma haritası üzerindeki yer kontrol noktası verilmektedir.



Şekil 5. 6. Yüksek Yansıma özelliği parametresi dikkate alınarak seçilen Yer kontrol noktasının yansıma haritası üzerindeki konumu (sarı çerçeve içerisinde yer alan kırmızı nokta ile gösterilmektedir).

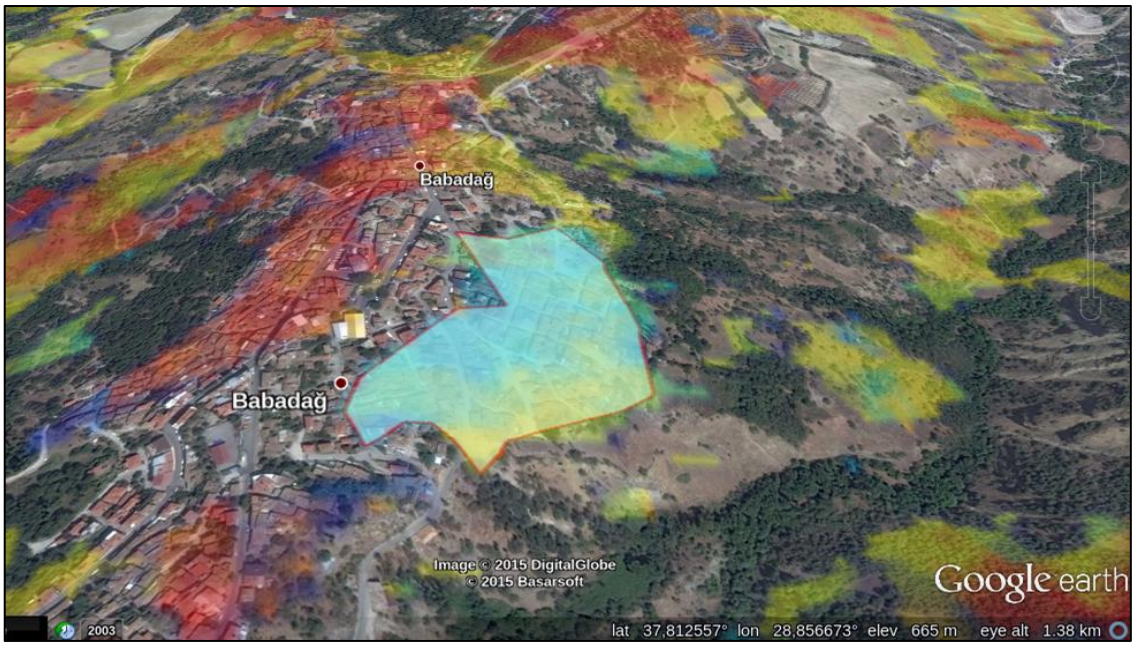
Çalışma alanımızı kapsayan çerçevede en iyi yansıma özelliği gösteren nokta Geyre İlçe merkez sınırlarında, 37.713253° enlem ve 28.710206° boylam coğrafi koordinatları üzerinde ve 4870 range (sample=y), 656 azimut (line=x) resim koordinatları üzerinde bulunmaktadır.

Bu işlemlerin ardından Babadağ İlçesi ve çevresi için SRTM verisinden elde edilen Sayısal Yükseklik Modelinin de veri işleme adımlarına dahil edilmesiyle birlikte, Diferansiyel InSAR (DInSAR) işlemleri için seçilen 4 görüntüden 3 adet interferogram oluşturulmuştur. Bu interferogramlardan kendi arasında uyuşumu en yüksek olan 2009.03.08_2009.12.09 tarihleri arasındaki sonuç interferogram Şekil 5.7'de verilmektedir.



Şekil 5. 7. 2009.03.08_2009.12.09 tarihleri arasında geçen 276 gün süresince heyelanlı bölgenin konumsal değişim oranı (açık mavi kısım)

Filtreleme işlemi sırasında 5'e 5 oranında maskelenmiş olan 2009.03.08 - 2009.12.09 tarihli interferogram için, açık mavi ile gösterilen alan daha önce afete maruz bölge olarak ilan edilen alan ile örtüşmektedir (Şekil 5.7). Bölgede daha önce gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde, Babadağ için heyelan kayma miktarının özellikle son 10 yılda çok daha az gerçekleştiği belirtilmektedir. Ancak DInSAR sonuçlarına göre çok yavaş da olsa yer değiştirmenin varlığı, özellikle 2009 yılı için 276 günlük süre içerisinde yaklaşık 1.2 cm civarında olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 5. 8. Mavi Bölge ve Afete Maruz Bölgenin üst üste çakışmış görütüsü (Her iki görüntü de %50 opaklaştırılmıştır)

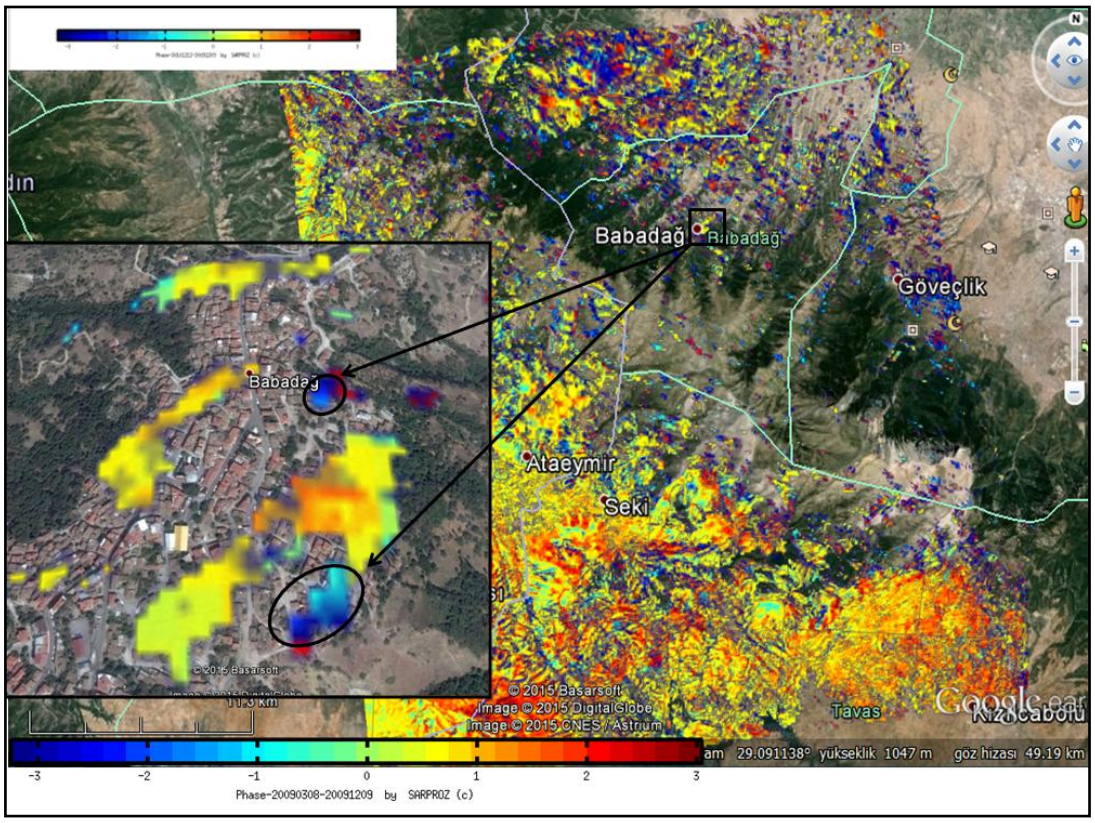
Şekil 5.8'de işaretlenen bölgedeki konut ve işyerlerinin tamamı boşaltılmış ve eski konut ve iş yerlerinin yıkım işlemleri gerçekleştirilmektedir. Çalışma alanımızda heyelan etkisi altında kalan mahalle (a) ve kayan konutlardan (b ve c) bazı fotoğraflar Şekil 5.9'da verilmektedir.



Şekil 5. 9. Çalışma alanımızda heyelan etkisi altında kalan mahalle (a) ve kayan konutlara (b ve c) ait fotoğraflar (Şubat,) 2011, (Kumsar ve ark., 2012).

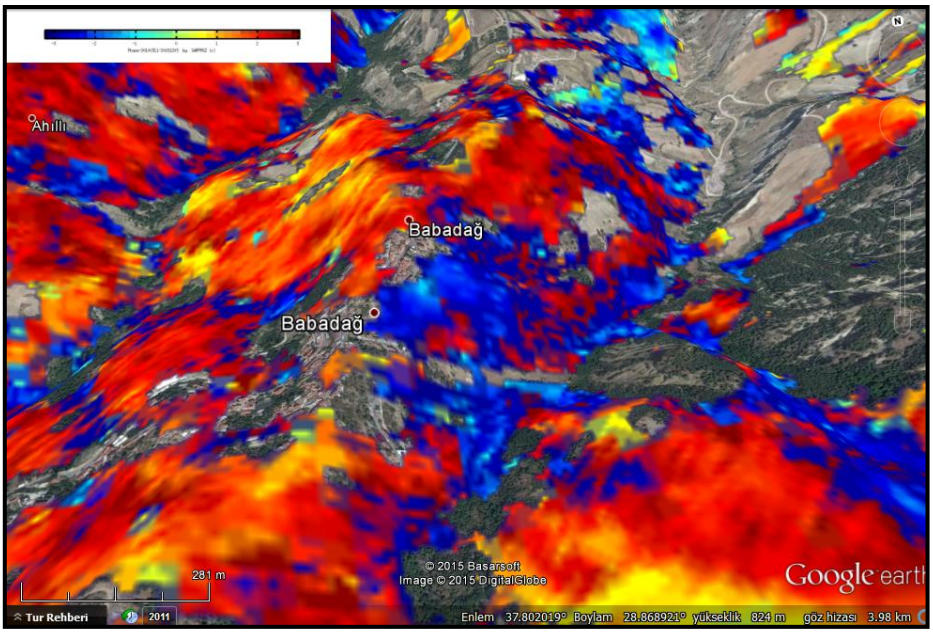
Filtreleme işlemi sırasında yine 5'e 5 oranında maskelenmiş olan 2010.12.12_2009.12.09 tarihli interferogram için, koyu mavi ile gösterilen alanlar daha önce afete maruz bölge olarak ilan edilen alan ile örtüşmektedir (Şekil 5.10). 2010 yılı

için 367 günlük süre içerisinde yaklaşık 2 - 3 cm civarında bir yer değiştirmenin varlığı Şekil 5.10'da verilen interferogram üzerinde iki ayrı yer için (daire içerisinde belirtilen) gösterilmektedir. Burada kütle hareketinin sadece Afete Maruz Bölge Alanında olmadığı, aynı zamanda küçük siyah daire ile gösterilen alanda da varlığını gösterdiği anlaşılmaktadır.



Şekil 5. 10. 2010.12.12_2009.12.09 tarihleri arasında geçen 367 gün süresince heyelanlı bölgenin konumsal değişim oranı (koyu mavi kısımlar)

Son olarak 2010.03.11_2009.12.09 tarihleri arasında elde edilmiş interferogram yorumlanmıştır. Çizelge 5.1'de verilen değerlere göre uydu geçişleri arasındaki, baz uzunluk değerleri (paralel baz uzunluğu : -1098.257866 m, Zamansal baz uzunluğu değeri : 91.999752 gün) göz önünde bulundurularak Şekil 5.11'de verilen sonuç interferogram elde edilmiştir.

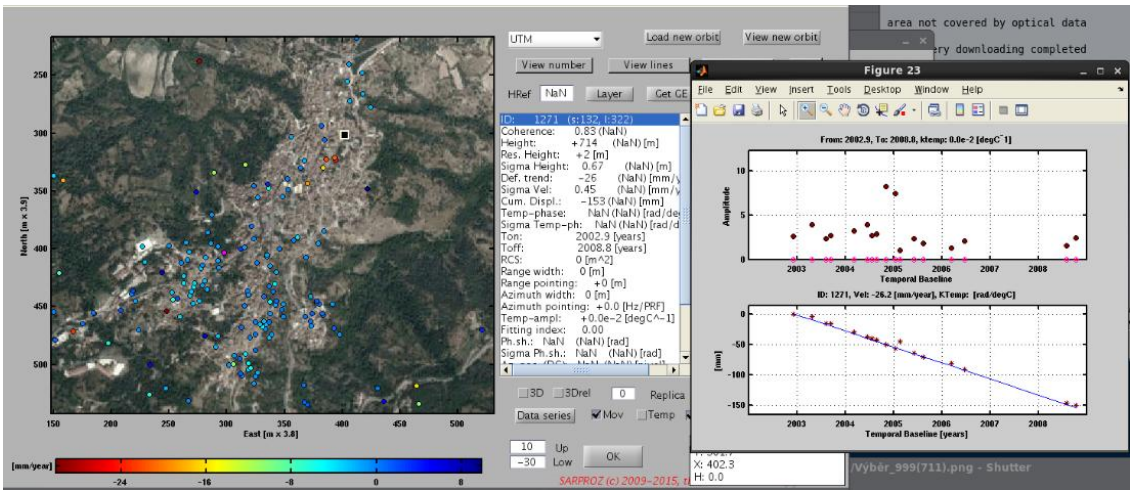


Şekil 5. 11. 2010.03.11_2009.12.09 tarihleri arasında geçen 91 gün süresince heyelanlı bölgeye ait interferogram sonucu (bozucu etkenler altında üretilen ve net bir şekilde yorumlanamayan intereferogram örneği)

InSAR ölçümleri özellikle topoğrafya, zemin hareketi, atmosferik koşullar ve uydular arasındaki zamansal ve mekânsal ayrımlar gibi etkenlere karşı duyarlıdırlar (Agram, 2010). InSAR faz sinyalleri tüm bu etkenlerdeki ortalama değişimlerdir ve uygulamaya bağlı olarak bazı etkenler gürültü olarak nitelendirilebilir. Son interferogram (5.11) için genel anlamda atmosferik etki veya interferometrik fazı etkileyen diğer bozucu etkenler ortadan kaldırılamadığı için, deformasyon veya yer değiştirme oranları net bir şekilde yorumlanamamaktadır.

5.4. Envisat ASAR Uygulaması

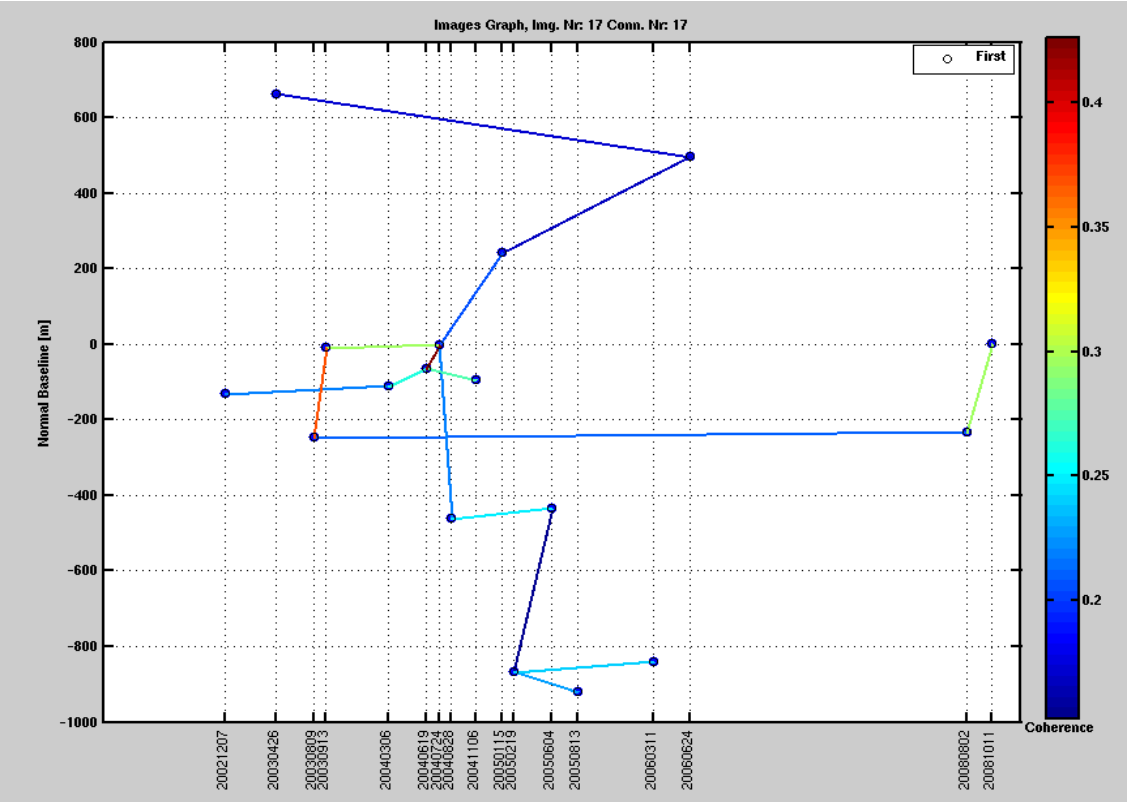
InSAR uygulaması için (07/12/2002-11/10/2008) yılları arasında artan modda elde edilen 17 adet 472 iz numaralı Envisat ASAR uydusundan elde edilen SAR görüntüsü yardımıyla çalışma alanı üzerindeki hareketin Bakış Açısı Doğrultusunda (Line-of-Side - LOS) ölçülmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen verilerle öncelikle PSInSAR uygulaması yapılmıştır. Ancak Şekil 5.12'de görüldüğü gibi yeterli oranda PS noktası elde edilemediği için, deformasyon oranlarını her noktada daha ayrıntılı görebilmek amacıyla Quasi-PS uygulaması gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. 12. Babadağ için Envisat ASAR verileri kullanılarak elde edilen PSInSAR sonuçları ve deformasyon trend grafiği - (yetersiz PS sayısı)

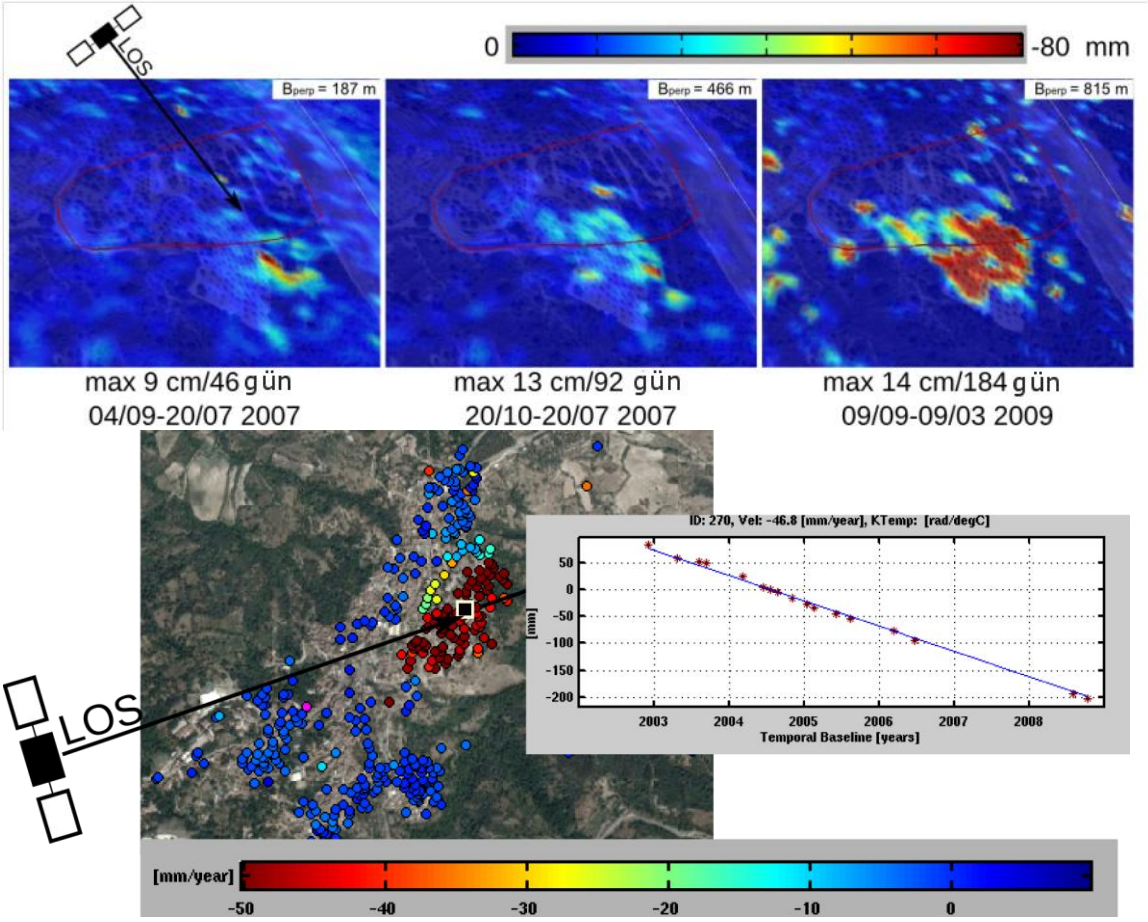
PSInSAR yöntemi ile elde edilen sabit yansıtıcı noktaların (PS) az olması sebebiyle tercih edilen Quasi-PS tekniği ile gerçekleştirilen uygulama için veri kombinasyon grafiği Şekil 5.13'de gösterilmektedir. 17 adet görüntüye ait baz uzunluk değerleri birbiri ile dengeli görünmektedir. Neredeyse 14 adet görüntü eşleşmesi oldukça küçük baz uzunluğu değerine sahiptir ki bu da sonuçları olumlu etkiler. Görüntü sayısı (minimum 15 adet), baz uzunluk değerlerinin dengeli olması ve gözlem alanında yansıtıcı değeri yüksek olan objelerin bulunması sonuçların doğru bir şekilde yorumlanmasında en önemli etkenler arasındadır.

Konya Kapalı Havzası için gerçekleştirilen Quasi-PS uygulamasında olduğu gibi bu çalışmada da uygulama bölgesi için daha ayrıntılı deformasyon bilgisi elde edebilmek amacıyla İleri InSAR Tekniklerinden biri olan Quasi-PS tekniği kullanıldığından, Şekil 5.14'te bu teknik ile oluşturulan heyelan hız tahmin haritası yer verilmektedir. Elde edilen değerler daha önce bölgede yapılan jeolojik çalışmalar ve bu tez çalışması kapsamında yapılan ALOS PALSAR çalışması ile hemen hemen birebir uyumluluk göstermektedir.



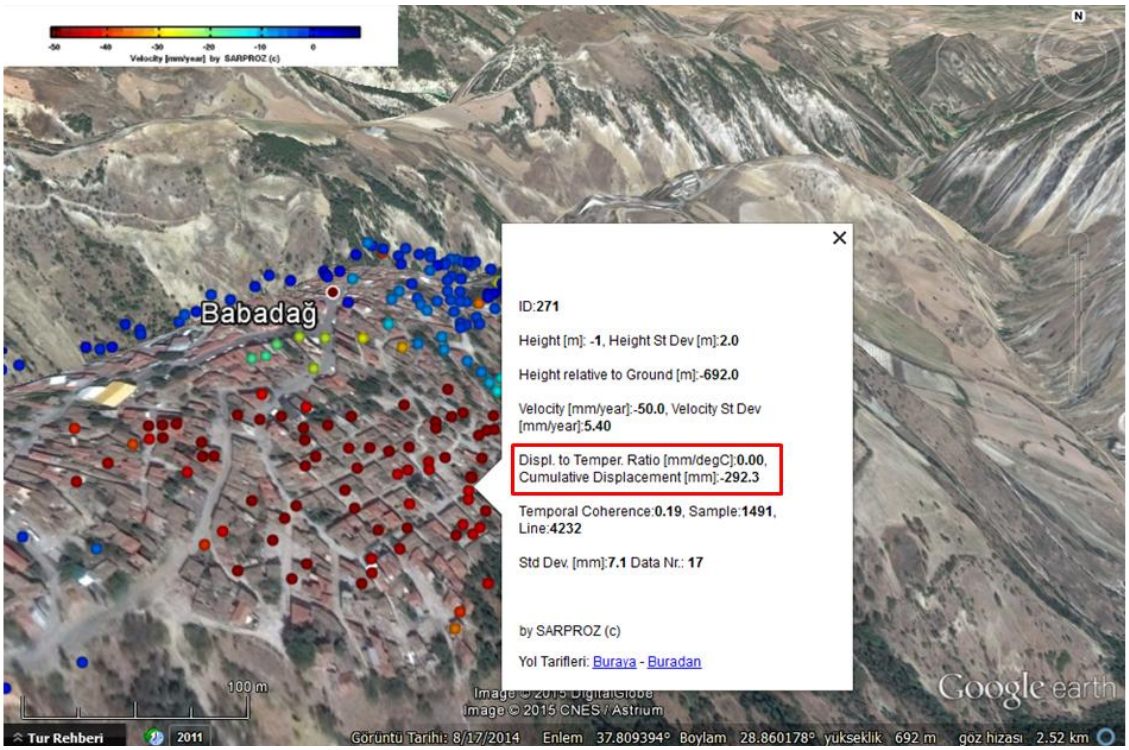
Şekil 5. 13. Quasi-PS için SLC veri kombinasyon grafiği

Şekil 5.15'de verilen InSAR zaman serisi haritası yorumlanmadan önce, Şekil 5.14'deki özellikle üst panelde verilen ve uyuşum haritası üzerinde verilen interferogramlar yorumlanmalıdır. Burada sol panelde verilen ve Temmuz-Eylül ayları zaman aralığını kapsayan toplam 46 günlük deformasyon oranı en çok 9 cm civarındadır. Bu değer LOS doğrultusunda olup, 187 gün gibi kısa ve interferogram oluşturmak için uygun bir dik baz uzunluğu değeri ile oldukça iyi bir sonuç vermektedir. Yine Temmuz ve Ekim ayları arasında 92 günlük bir zaman diliminde gerçekleşen yerdeğiştirme orta panlede görülen 466 m'lik dik baz uzunluğu değerine sahip interferogram ile en çok 13 cm civarındadır ve yaklaşık bir buçuk aylık (46 gün) sürede sol ve orta panellerdeki interferogramlar karşılaştırıldığında 4 cm'lik bir yerdeğiştirme 2007 yılı için gerçekleşmiştir.



Şekil 5. 14. Envisat görüntüleri yardımıyla Quasi-PS yöntemi ile Babadağ ve Çevresinde elde edilen heyelana dayalı deformasyon trendi (Radarın bakış doğrultusundaki düşey mesafe)

Sonuçların daha net anlaşılabilmesi için çalışma kapsamında elde edilen ve yerdeğiştirme oranlarını gösteren tüm PS noktaları Google-Earth üzerine aktarılmıştır. Böylelikle her nokta için Kümulatif yerdeğiştirme oranını görmek mümkündür. Şekil 5.14'de yer değiştirme oranı yüksek olan bir noktada 2002 ve 2008 yılları arasında gerçekleşen deformasyon oranın her konut için görülebileceği bilgilerin yer aldığı sonuç haritası verilmektedir. Bu nokta ve civar noktalar için 6 yıllık sürede (B_t= 2135 gün) toplam yerdeğiştirme -292.3 mm, yıllık yer değiştirme ise -50 mm/yıl ± 5.40 mm/yıl değerindedir. Yine aynı şekil üzerinde kaymanın hangi bölgeden başladığı açıkça anlaşılmaktadır. Tepe noktalarından başlayan kayma, eğim arttıkça doğru orantılı olarak artmaktadır.



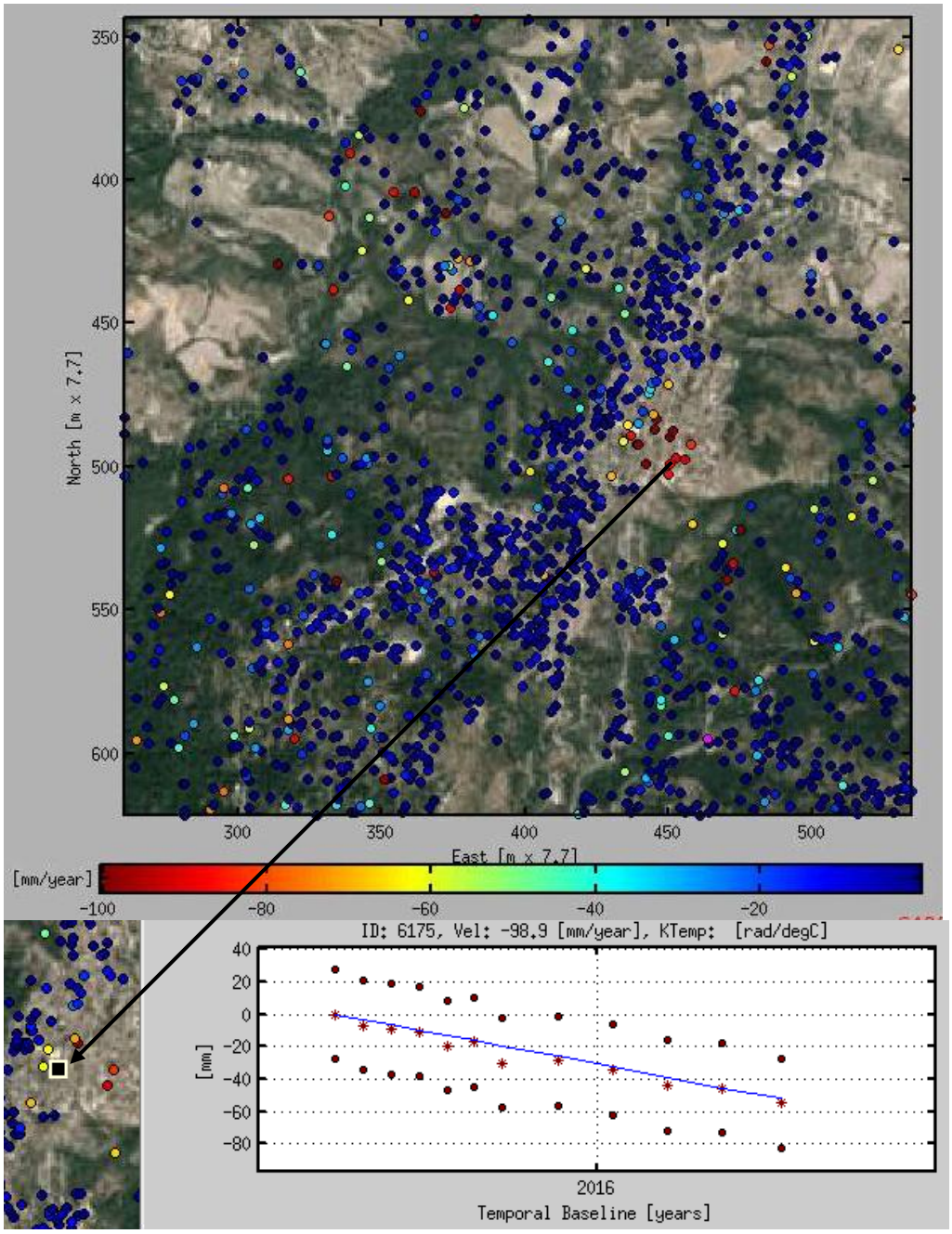
Şekil 5. 15. Babadağ için Envisat ASAR görüntüleri ile elde edilen sonuçların Google-Earth üzerindeki gösterimi ve Cumulative Yerdeğiştirme Oranı (İşaret edilen noktaya ait)

5.5. Sentinel-1 Uygulaması

ALOS PALSAR ve Envisat ASAR uydu görüntüleri yardımıyla Babadağ ve çevresi için 2002-2010 yılları arasındaki toplam kütle hareketi gözlemlenmiştir. Ancak bölgenin şu anki durumunun incelenmesi amacıyla, Konya çökmelerinin izlenme mantığıyla aynı olacak şekilde burada da Sentinel verilerinden yararlanarak, heyelanın güncel durumu belirlenmiştir. Bu amaçla elde edilen Sentinel verileri ile yapılacak olan İleri InSAR çalışması için belirlenecek yöntem, önceki tecrübelere dayanılarak Quasi-PS olarak kararlaştırılmıştır. Bu kararın verilmesinde etkili olan faktör, Babadağ bölgesi çalışmalarında korelasyonun genel anlamda çevredeki ekili alanlar ve hızlı kayma dolayısıyla düşük olmasıdır. Quasi-PS yöntemi, tüm PS noktalarını zaman serisinde kullanan PSInSAR yönteminin aksine sadece uyuşumu yüksek mekânsal filtreleme yöntemine dayalı interferogramlar ürettiği için sonuçlar bu uygulama için daha kesin değerleri içermektedir. Sentinel-1 verisinin sık uydu geçiş aralığına sahip olması yüksek oranlı deformasyonları yakalamak için oldukça güvenilir ve uygundur.

Bu çalışma için 10 Eylül 2015 – 20 Mart 2016 tarihleri arasında sadece 12 görüntü kullanılarak yapılan görüntü işleme çalışmalarının neticesinde, radarın bakış

yönünde (LOS) 100 mm/yıl'a varan hareket tespit edilebilmiştir. Şekil 5.16'da gösterilmekte olan sonuçlar, Sentinel gibi son teknolojik donanımlara sahip uydu verilerinin, eğimli bölgelerde gelişen sürekli hareketin rahatlıkla tespit edilebildiğini göstermektedir.



Şekil 5. 16. Babadağ için Sentinel-1 görüntüleri ile elde edilen PS noktalarının Google-Earth üzerindeki gösterimi (üst panel) ve deformasyon trendi (alt panel-işaret edilen noktaya ait)

Sonuç olarak, Babadağ'da gerçekleşen heyelanların nedenleri ve oluşum şekilleri ile ilgili olarak çıkartılabilecek genel çerçeve ve buna bağlı sonuçlar şu şekilde ifade edilebilir:

2000 yılında hem yerel yönetim, hem Pamukkale-Hacettepe-Nihon-Tokai (Japonya) Üniversitesiteleri tarafından başlatılan çalışma ile, Gündoğdu Mahallesi'ndeki heyelanın oluşumunda yağış, topografik eğim, yamaç topuklarının oyulması, litolojik özellikler, dokuma tezgahlarının oluşturduğu titreşimler, yeraltına sızan suların oluşturduğu yer altı erozyonunun önemli rol oynadığı belirtilmiştir. Ayrıca, kanalizasyon ve su şebekelerinden sızıntıların hareketin devam etmesine neden olduğu, yapılardaki hasarların gün geçtikçe arttığı ve mevcut veriler değerlendirildiğinde heyelanın hızının 20mm/yıl olduğunun anlaşıldığı ifade edilmiştir.

Asıl kaymanın gerçekleştiği ana bölgenin temel olarak jeolojisini Paleozoik yaşlı kuvars-muskovit şistler oluşturmaktadır. Bunlar, Babadağ Metamorfikleri olarak adlandırılmaktadır. Bu birim üzerinde açısal uyumsuz olarak Üst Miyosen-Alt Pliyosen yaşlı Sazak Formasyonuna ait Hisar Kireçtaşı Üyesi ve geçişli olarak Alt Pliyosen yaşlı Kolonkaya Formasyonu yer almaktadır. Kolonkaya Formasyonu birbiriyle geçişli ve uyumlu olarak kiltaşı, killi marn ve marnlar ile temsil edilen Ahıllı Marn Üyesi, kumtaşı ve marn ardalanması ile temsil edilen Babadağ Kumtaşı-Marn Üyesi ile çakıltaşı ve kumtaşları ile temsil edilen Manastır Çakıltaşı üyesi ile temsil edilmektedir. Kumtaşları, mikalı kumtaşları olup, dayanımları çok zayıftır. Söz konusu formasyon heyelanın en büyük nedenleri arasındadır.

Tüm bu bilgiler ışığında gerçekleştirilen çalışmamız kapsamında ALOS, Envisat ve Sentinel verileri ile elde edilen sonuçlar heyelanın büyüklüğünün tespiti amacıyla incelenmiştir. Söz konusu InSAR heyelan büyüklükleri sonuçları, daha önceden yapılan çalışmaları büyük oranda desteklemektedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Doktora tez çalışmasının esas hedefleri doğrultusunda, farklı yeryüzü karakteristikleri üzerinde İleri InSAR teknikleri kullanılarak çalışma bölgeleri üzerinde ayrıntılı deformasyon belirleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Uygulama bölümünün her bir alt bölümünde sayısal değerler ile birlikte yerdeğiştirme oranları ortaya konmuştur. Yerdeğiştirme oranlarının belirlenmesinin yanı sıra Çoklu Band (L-Band, C-Band, X-Band) çalışması gerçekleştirilerek, özellikle ilk çalışma bölgesi olan Konya Kapalı Havzasındaki tüm farklı karakteristiğe sahip (kentsel, kırsal, yapılaşmış, çıplak, vb.) alanlar taranmıştır. Bu işlem gerçekleştirilirken her bir sonuç birbiri ile desteklenmiş ve ayrıca havzanın düşey yönlü yüzey deformasyon oranları zamansal periyotlar (1995 - 2000, 2002 - 2010, 2014 - 2015) ile belirlenmiştir. Bu kapsamda ilk olarak havzada gerçekleştirilen tüm çalışmalar aşağıda özetlenmektedir.

InSAR çalışmalarına, Envisat uydusunun ASAR sensörüne ait, azalan modda, 3 ayrı çerçeve için toplam 46 SLC formatındaki görüntünün DORIS ve GMTSAR yazılımları kullanılarak DInSAR çalışmasının gerçekleştirilmesi (ilk çalışmalar) aşaması ile başlanmıştır. Bu çalışma havzanın tamamında gerçekleştirilmiş, 2002-2010 yılları arasını içeren dönem için toplam 127 adet interferogram oluşturulmuştur. Çalışma sonucunda havzanın genelinde, özellikle Konya Kent Merkezi'nde zamana bağlı ve tutarlı yerdeğiştirme bilgileri elde edilmiştir. 2002-2010 yılları arasındaki deformasyon hızlarının -4 cm/yıl ile +1cm/yıl arasında olduğu tespit edilmiştir. Ancak söz konusu sonuçlar genel anlamda deformasyon bilgisini yansıtsa da, özel olarak belirlenen lokasyonlar için İleri InSAR tekniklerinden yararlanılmıştır.

Konya Kapalı Havzası için çalışma alanı Kentsel ve Kırsal alanlar olmak üzere iki ayrı kategoride incelenmiştir.

Kentsel alanlardaki deformasyonun belirlenmesinde özellikle Konya Kent Merkezi için öncelikle ERS uydu verileri değerlendirmeye alınmıştır. ERS-2 uydusundan elde edilen 22 adet SLC verisi ile havzanın 1990'lı yıllardaki yer değiştirme durumunun incelenmesi amacıyla, 1995 – 2000 yılları arasında yaklaşık 5.5 yıllık InSAR zaman serisi analizi gerçekleştirilmiş, PSInSAR ve Quasi-PS yöntemleri ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu çalışma için SarProz ve StamPS yazılımlarından yararlanılmıştır. Konya Kent Merkezi için 5.5 yıl süresince toplamda 80 mm'lik yerdeğiştirme tespit edilmiştir. PSInSAR sonuçlarına göre Konya Kent Merkezi

için 1995-2000 yılları arasında yıllık yerdeğiştirme yaklaşık 13 mm/yıl şeklinde hesaplanmıştır.

2002-2010 yılları arasındaki durum tespiti Envisat verileri ile gerçekleştirilmiştir. Toplamda 2 ayrı çerçeve için temin edilen Envisat ASAR artan Mod'taki 40 (20+20) adet veri (114 ve 343 iz numaralı görüntü çerçeveleri) için SarProz yazılımı ile PSInSAR ve Quasi-PS (MST) uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Deformasyon oranları nokta bazında elde edilmiştir (~30 mm/yıl).

Envisat uydusundan elde edilen azalan moddaki 436 iz numaralı çerçevede, özellikle deformasyon umulan bölge için daraltılmış çerçevede (Karaman Bölgesi için) Sarproz yazılımı ile PSInSAR uygulaması yapılmıştır. 2003 - 2010 yılları arası için elde edilen sonuçlar bölgedeki zamana bağlı yer değişim oranını net bir şekilde yansıtmakta ve bu süreçteki değişim oranı 4 cm'ye kadar ulaşmaktadır. Karaman kent merkezi için hem PSInSAR hem de DInSAR çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Kentsel alanlar için yapılan deformasyon belirleme çalışmaları kapsamında, 2014/10/12 - 2015/09/05 tarihleri arasında temin edilen 20 adet CosmoSkymed verisi işlenerek, Konya Kent Merkezindeki bina deformasyonları X bant çözünürlüğü sayesinde mm duyarlılığında belirlenmiştir. 470000 adet PS noktası kullanılarak geçekleştirilen çalışmanın neticesinde deformasyon oranı ortalama 70 mm/yıl civarındadır.

Bu çalışmanın ardından, hemen hemen yakın tarihlerde (2014/10/16 - 2015/11/04 tarihleri arasında) temin edilen 28 adet Sentinel-1 verisi işlenerek, yaklaşık 130000 PS noktası kullanılmıştır. Böylelikle C bantta çalışan Sentinel verisi yardımıyla Konya Kent Merkezi ve çevresindeki çökme oranları tespit edilmiş (-50 mm/yıl), hem GPS sonuçları ile hem de CosmoSkyMed verileri ile karşılaştırılarak yer doğrulaması, nokta bazında ve mm duyarlığında yapılmıştır.

Kırsal alanlardaki deformasyonun tespiti için yine aynı çerçevelerde özellikle StaMPS yazılımı ile PSInSAR ve SBAS uygulamaları gerçekleştirilmiştir.

ERS verileri ile gerçekleştirilen çalışmanın neticesinde 1995-2000 yılları arasında Çarıklar Fatih mevkiinde -12 mm/yıl oranında deformasyon varlığını göstermektedir.

Ayrıca Envisat uydu verilerinden Kentsel alanda sözü geçen her iki çerçevenin birbirine komşu kenarları bir miktar birbiriyle çakıştığı için, özellikle bu bölgede saptanan deformasyon büyüklükleri hemen hemen biriyle aynıdır. 2003-2010 yılları arasında 16 görüntü ile gerçekleştirilen PSI+SB çalışması ile 31219 PS noktası

kullanılmıştır. Burada Karatay İlçesi Başak Mevkiinde -24.3 mm/yıl deformasyon tespit edilebilmiştir. Ayrıca Konya-Ankara yolu üzerinde kesit halinde gözlemlenen deformasyon büyüklüğü ise -23.3 mm/yıl oranındadır. Diğer yandan yine GPS sonuçları ile de yer doğrulaması yapılan Küçükköy ve çevresi için -17 mm/yıl oranında deformasyon belirlenmiş, elde edilen tüm sonuçlar bir bütün halinde incelenmiştir.

Kırsal alanlar için son olarak ALOS PALSAR uydusundan 2006-2008 yılları için elde edilen görüntüler ile DInSAR uygulaması gerçekleştirilmiştir. DInSAR uygulaması için SarProz yazılımından yararlanılmıştır. DInSAR uygulamalarıdan elde edilen sonuçlar özellikle ERS sonuçları ile kırsal alanlarda birebir örtüşür niteliktedir.

Havzanın özellikle Konya Kent Merkezi ve çevresinin yıllık ortalama 50 mm düşey yönde hareketinin nedenleri arasında, yeraltı su seviyelerindeki değişim, mevsim sıcaklık değerleri ve kuraklık olarak görülmektedir. Ayrıca havzanın tarihsel jeolojik gelişimi de gözönünde bulundurulmaktadır. Deformasyon hattının fay hatlarına çok yakın olması da dikkat çekicidir ve ileriki çalışmalarda bu durum da dahil edilerek incelemeler yapılmalıdır.

Çalışmanın en önemli sonuçlarından biri ise; Konya Kent Merkezi'nin, tam ortadan 10 km uzunluğunda bir hat ile ayrıldığı farz edilirse, hattın doğusunda ve batısında kalan kısım (Karatay ve Selçuklu İlçeleri ve civarı) az deformasyonlu (~30 mm/yıl) alan, hattın ortasında ve yakın çevresinde kalan alan (Meram İlçesi ve civarı) çok deformasyonlu (~50 mm/yıl) alan olarak adlandırılabilir.

Doktora tez çalışması kapsamında İleri InSAR teknikleri ile çökmelerin belirlenmesine yönelik yapılan çalışmaların yanı sıra, heyelanların izlenmesi amacıyla da Babadağ uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Yapılan bu çalışma için Envisat ASAR, ALOS PALSAR ve Sentinel-1 verileri kullanılmış DInSAR, Quasi-PS ve PSInSAR işlemleri yapılarak, sonuçlar son bölümde tartışılmıştır. DInSAR sonuçlarına göre 2006-2009 yılları arasında yaklaşık 2 - 3 cm, Quasi-PS sonuçları ile de 2002-2008 yılları arasındaki 6 yıllık süre içinde yaklaşık 30 cm kayma, son olarak 2015-2016 yılları arasındaki yaklaşık 6 aylık süre diliminde 10 cm'ye varan kayma tespit edilmiştir.

Babadağ için heyelanın nedeni hemen hemen bölgede önceden yapılan çalışmalar neticesinde belirlenmiş, ancak bölgedeki heyelanın uzaktan algılama yöntemi ile ilk olarak belirlendiği çalışma olması açısından bu çalışma önem arz etmektedir.

Ayrıca Babadağ uygulamasında önceki çalışmalarda Afete Maruz Bölge olarak belirlenen alan sınırları ALOS PALSAR verileri ile gerçekleştirilen DInSAR sonuçları

ile örtüşse de, DInSAR tekniğinin gelişmiş versiyonu olan çoklu InSAR tekniklerinden Quasi-PS yardımıyla yaptığımız çalışma neticesinde aslında söz konusu heyelanın kesinlikle akma yönüne doğru genişlemekte olduğu sonucuna varılmıştır. Bu nedenle bölgede yaşayan halkın sağlığı açısından 7269 Sayılı Afet Kanunu uyarınca Afete Maruz Bölge sınırlarının genişletilmesi gerektiği düşünülmektedir.

6.1. Genel Değerlendirme

Tez çalışmasını değerli kılan en önemli sonuçlar özetlenirse; farklı yeryüzü karakteristiklerinde İleri InSAR tekniklerinin uygulanması amacıyla, çoklu bant InSAR analizleri gerçekleştirilmiştir. InSAR uygulamalarında kullanılabilecek tüm bantlara (X, L ve C bant) ait uydu görüntüleri çalışma bölgesi için kullanılmıştır. Tüm verilerle İleri InSAR tekniklerinin tamamı (DInSAR, PSInSAR, SBAS, Quasi-PS) kullanılarak sonuçların birbiriyle tutarlılığı karşılaştırılmıştır.

Sonuçların bozucu etkenlerden arındırılması için yararlanılan InSAR zaman serisi algoritmaları içerisinde özellikle atmosferik hatanın giderilebilmesi için çeşitli yazılımların ilgili algoritmaları bozucu etkenler açısından sorunlu sonuçlara uygulanarak bu hatalar giderilmiş, bu işlemi gerçekleştirebilmek için algoritma detayları incelenmiş ve uygulama verilerimize uygun olarak düzenlenmiştir.

Söz konusu işlemleri gerçekleştirebilmek için birden fazla yazılımdan yararlanılmıştır. InSAR verilerinin işlenmesindeki kabiliyeti literatür çalışmaları dikkate alındığında oldukça yüksek kaliteyle kanıtlanan StaMPS yazılımı dahilinde hem PSInSAR uygulamaları hem de SBAS uygulamaları gerçekleştirilmiş, ve ayrıca her iki teknik birleştirilerek (PSI+SBAS) sonuçları tekrar değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra son yıllarda veri işlemedeki pratikliği ve hızı açısından çok büyük avantajlara sahip SarProz yazılımı ile aynı şekilde PSInSAR uygulamaları yapılmış, kısa baz uzunlukları için ise Quasi-PS tekniğinden yararlanılmıştır. Sonuçların atmosferik hatadan arındırılması için geliştirilen APS modülü ile uyşumsuz PS noktaları ayıklanmıştır. Her iki yazılım ile gerçekleştirilen InSAR veri işleme çalışmaları son derece başarılı sonuçlar vermiştir.

Yapılan tüm çalışmalar neticesinde StaMPS ve SarProz yazılımlarının birbirlerine göre üstün yönleri karşılaştırılmıştır. Çözümleme (unwrapping) işleminde başarılı olan StaMPS ile çözümlemeye imkan sağlayan verilerde çok net sonuçlar elde edilmiştir. Tam olarak çözümleme işlemi şeklinde adlandırılmayan ancak farklı bir

çözümleme yaklaşımı (replika) geliştirilen SarProz yazılımı bu açığını küçük alanlar ($\sim \leq 5\ km^2$) için zaman serisi oluşturabilme yeteneği ile kapatmış, böylelikle çözümleme işlemine (özellikle küçük alanlarda) gerek duyulmamıştır. Ancak buna karşın yazılımlara ait sonuçlar küçük bir örnek uygulama ile karşılaştırılmış, tez için her iki yönteminde farklı durumlarda kesinlikle uygun olduğu, umulan sonuçları verdiği sonucuna varılmıştır.

Tez çalışması kapsamında havzanın (özellikle Konya Kent Merkezi'nin) ve Babadağ bölgesinin (özellikle Gündoğdu Mahallesi'nin) çökme ve heyelana bağlı genel yerdeğiştirme durumu incelenirken, sonuçların doğruluğu; farklı InSAR teknikleri, farklı bant ve zamanda edinilen uydu görüntüleri, farklı yazılımlar ve çalışma bölgelerinde daha önce gerçekleştirilmiş çalışmalarla karşılaştırılmak suretiyle kanıtlanmıştır.

Gelecek çalışmalar kapsamında, L bantta çalışan ALOS-2 uydu verisi ile Konya Kapalı Havzası'nda bulunan obrukların da gözlemlenmesi hedeflenmektedir. Ayrıca yine ALOS-2 uydusu ile ekili alan bakımından geniş bir çerçeveye sahip olan Babadağ ve çevresi için heyelan kütle hareketlerinin daha ayrıntılı tespiti gerçekleştirilebilir. X bantta çalışan Kompsat-5 uydu verileri ile her iki çalışma alanı için yapılaşmış bölgelerde ayrıntılı deformasyon belirleme çalışmaları yapılabilir. Ayrıca Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığınca (AFAD) başlatılan ve risk yönetimi ve azaltma çalışmalarına altlık olarak üretilecek "Bütünleşik Afet Tehlike Haritalarına", bu tez çalışması için kullandığımız InSAR yöntemi sonucu elde edilen haritalar ile destek verilebilir. Üretilecek Heyelan Tehlike Haritaları için ülke genelinde İleri InSAR tekniklerinin de uygulanabileceği ve bu suretle söz konusu haritaların son derece hassas bir şekilde üretilmesi yönünde destek olunabileceği düşünülmektedir. Babadağ uygulaması pilot uygulama olarak değerlendirilirse, burada gerçekleştirilen sonuçlar Türkiye genelinde özellikle geniş çerçeve boyutu ve ücretsiz olma avantajları sayesinde Sentinel uydu verileri kullanılarak rahatlıkla uygulanabilir.

KAYNAKLAR

Adam, N., Eineder, M., Yague-Martinez, N. ve Bamler, R., 2008, High resolution interferometric stacking with TerraSAR-X, *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. IEEE International*, II-117-II-120.

Adam, N., Zhu, X. ve Bamler, R., 2009, Coherent stacking with TerraSAR-X imagery in urban areas, *Urban Remote Sensing Event, 2009 Joint*, 1-6.

Agram, P. S., 2010, Persistent scatterer interferometry in natural terrain, Doktora Tezi, *Stanford university*, 163.

Altaylı, K., Şeren, İ., İleri, N. ve Yılmaz, S., 2006, Babadağ ilçesi Gündoğdu mahallesi Jeolojik Etüt Raporu, *Afet İşleri Genel Müd., Ankara*.

Attema, E. ve Alpers, W., 1998, Envisat ASAR science and applications, *ESA Publ. SP*, 1225, 59.

Balza, T., Wegnerb, J. D., Schunertb, A., Liua, K., Soergelb, U. ve Liaoa, M., 2011, Persistent Scatterer localization and prediction.

Bamler, R., Eineder, M., Adam, N., Zhu, X. ve Gernhardt, S., 2009, Interferometric potential of high resolution spaceborne SAR, *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*, 2009 (5), 407-419.

Baran, I., Stewart, M. P., Kampes, B. M., Perski, Z. ve Lilly, P., 2003, A modification to the Goldstein radar interferogram filter, *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41 (9), 2114-2118.

Bekaert, D., 2015, Toolbox for Reducing Atmospheric InSAR Noise, http://homepages.see.leeds.ac.uk/~eedpsb/TRAIN/version_1beta/TRAIN_manual.pdf, University of Leeds, [29.05.2016].

Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. ve Sansosti, E., 2002, A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 40 (11), 2375-2383.

Berke, M. Ö., Dıvrak, B. B. ve Sarısoy, H. D., 2014, Konya'da Suyun Bugünü Raporu, WWF-Türkiye ve Pegasys Strategy and Development, Ankara, [29.05.2016].

Bozyiğit, R. ve Güngör, Ş., 2011, Konya Ovasının toprakları ve sorunları, *Marmara Coğrafya Dergisi*, ISSN 1303-2429, s.169-200, İstanbul.

Bürgmann, R., Rosen, P. A. ve Fielding, E. J., 2000, Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28 (1), 169-209.

Canaslan, F., 2010, InSAR yöntemiyle düşey yönlü yüzey deformasyonlarının belirlenmesi: Konya Örneği, Yüksek Lisans, *Selçuk Üniversitesi*, Konya, 60.

Canik, B., 1997, Mühendislik Jeolojisi, *Ankara Üniversitesi*, Fen Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, p. Kitap 119 s., .

Casu, F., 2009, The Small BAseline Subset technique: performance assessment and new developments for surface deformation analysis of very extended areas, *Doktora Tezi*, İtalya.

Chen, C. W. ve Zebker, H. A., 2001, Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization, *JOSA A*, 18 (2), 338-351.

Clewley, D., Whitcomb, J., Moghaddam, M., McDonald, K., Chapman, B. ve Bunting, P., 2015, Evaluation of ALOS PALSAR data for high-resolution mapping of vegetated wetlands in Alaska, *Remote Sensing*, 7 (6), 7272-7297.

Colesanti, C., Ferretti, A., Novali, F., Prati, C. ve Rocca, F., 2003, SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 41 (7), 1685-1701.

Costantini, M., 1998, A novel phase unwrapping method based on network programming, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 36 (3), 813-821.

Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthéry, N. ve Crippa, B., 2013, Analysis of X-band very high resolution Persistent Scatterer Interferometry data over urban area, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Hannover, Germany*, 21-24.

Cumming, I. G. ve Wong, F. H., 2004, Digital signal processing of synthetic aperture Radar data: Algorithms and implementation, Norwood: ArtechHouse.

Curlander, J. C. ve McDonough, R. N., 1991, Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing, Wiley Series in Remote Sensing. John Wiley & Sons Inc., New York, NY**:** 396.

Çevik, S., 2003, Babadağ (Denizli) ilçesindeki kütle hareketinin nedenleri, mekanizması ve modellenmesi üzerine bir araştırma, *Yüksek Lisans Tezi*.

Davidson, G. W. ve Bamler, R., 1999, Multiresolution phase unwrapping for SAR interferometry, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 37 (1), 163-174.

Demirel, M., 2015, Koyulhisar (Sivas) heyelanlarının jeolojik özellikleri, *Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sivas, 127.

Erol, O., 1980, Anadolu'da Kuaterner Pluvial ve İnterpluvial Koşullar ve Özellikle Güney-İç Anadolu'da son Buzul Çağından Bugüne Kadar Olan Çevresel Değişmeler, *Ankara Üniv. DTCF Coğrafya Araştırmaları Derg* (9), 5-16.

Erol, O., 1983, Türkiye'nin genç tektonik ve jeomorfolojik gelişimi, *Jeomorfoloji Dergisi*, 11, 1-22.

Ertunç, A., 2003, Mühendislik Jeolojisi Ders Notları, *Isparta*, Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, p. 179 s.

ESA, 2010, Synthetic Aperture Radar Land Applications Tutorial Part I Background and Theory, http://earth.eo.esa.int/download/eoedu/Earthnet-website-material/to-access-from-Earthnet/2008_Bilko-SAR-Land-Applications-Tutorial/sar_land_apps_1_theory.pdf, [29.05.2016].

ESA, 2014, Special Features of ASAR, Handbooks ASAR, https://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/ENVISAT/ASAR/asar.ProductHandbook.2_2.pdf, [29.05.2016].

Falorni, G., Morgan, J. ve Eneva, M., 2011, Advanced InSAR Techniques for Geothermal Exploration and Production, *GRC Transactions*, 35, 1661-1666.

Ferretti, A., Prati, C. ve Rocca, F. L., 1999, Permanent scatterers in SAR interferometry, *Remote Sensing*, 139-145.

Ferretti, A., Prati, C. ve 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. ve Rocca, F., 2001, Permanent scatterers in SAR interferometry, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 39 (1), 8-20.

Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F. ve Rucci, A., 2009a, The second generation PSInSAR approach: SqueeSAR, *Fringe Conf*.

Ferretti, A., Novali, F., Fumagalli, A., Prati, C., Rocca, F. ve Rucci, A., 2009b, Beyond PSInSAR: the SQUEESAR Approach, *AGU Fall Meeting Abstracts*, 02.

Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F. ve Rucci, A., 2011a, A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 49 (9), 3460-3470.

Ferretti, A., Tamburini, A., Novali, F., Fumagalli, A., Falorni, G. ve Rucci, A., 2011b, Impact of high resolution radar imagery on reservoir monitoring, *Energy Procedia*, 4, 3465-3471.

Fornaro, G., Franceschetti, G. ve Lanari, R., 1996, Interferometric SAR phase unwrapping using Green's formulation, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 34 (3), 720-727.

Gabriel, A. K., Goldstein, R. M. ve Zebker, H. A., 1989, Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94 (B7), 9183-9191.

Gatelli, F., Monti Guamieri, A., Parizzi, F., Pasquali, P., Prati, C. ve Rocca, F., 1994, The wavenumber shift in SAR interferometry, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 32 (4), 855-865.

Ghiglia, D. C. ve Romero, L. A., 1994, Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods, *JOSA A*, 11 (1), 107-117.

Ghiglia, D. C. ve Pritt, M. D., 1998, Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms, and software, Wiley New York.

Goldstein, R. M., Zebker, H. A. ve Werner, C. L., 1988, Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping, *Radio science*, 23 (4), 713-720.

Göçmez, G. ve İşçioğlu, A., 2004, Konya Kapalı Havzasında Yeraltı Suyu Seviye Değişimleri. 1, *Yeraltı Suları Ulusal Sempozyumu*, 23-24.

Guth, P., 2010, Geomorphometric comparison of ASTER GDEM and SRTM, *A special joint symposium of ISPRS Technical Commission IV & AutoCarto in conjunction with ASPRS/CaGIS*.

Hanssen, R. ve Feijt, A., 1997, A first quantitative evaluation of atmospheric effects on SAR interferometry, *ERS SAR Interferometry*, 277.

Hanssen, R. F., 2001, Radar interferometry: data interpretation and error analysis, Springer Science & Business Media.

Hastaoglu, K. O., 2016, Comparing the results of PSInSAR and GNSS on slow motion landslides, Koyulhisar, Turkey, *Geomatics Natural Hazards & Risk*, 7 (2), 786-803.

Hastaoğlu, K. Ö., Poyraz, F., Tarık, T., Koçbulut, F., Şanlı, U., Yılmaz, I., Şanlı, F. B., Kuçak, R. A., Demirel, M. ve Gürsoy, Ö., 2014, GPS ve Ps-Insar Yöntemleri Kullanılarak Koyulhisar (Sivas) Heyelanlarının İzlenmesi: İlk Sonuçlar, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 4 (2), 161-175.

Hilley, G. E., Bürgmann, R., Ferretti, A., Novali, F. ve Rocca, F., 2004, Dynamics of slow-moving landslides from permanent scatterer analysis, *Science*, 304 (5679), 1952-1955.

Hong, S.-H., Wdowinski, S., Kim, S.-W. ve Won, J.-S., 2010, Multi-temporal monitoring of wetland water levels in the Florida Everglades using interferometric synthetic aperture radar (InSAR), *Remote Sensing of Environment*, 114 (11), 2436-2447.

Hooper, A., Zebker, H., Segall, P. ve Kampes, B., 2004, A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers, *Geophysical Research Letters*, 31 (23).

Hooper, A., 2008, A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches, *Geophysical Research Letters*, 35 (16).

Hooper, A., Pedersen, R. ve Sigmundsson, F., 2009, Constraints on magma intrusion at Eyjafjallajökull and Katla volcanoes in Iceland, from time series SAR interferometry, *The VOLUME Project–Volcanoes: Understanding Subsurface Mass Movement. Dublin: University College,* 13-24.

Hooper, A. J., 2006, Persistent scatter radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation, AAI3219289; ISBN: 9780542706905, *Stanford University*, p. 124 p.

Hürriyet, G., 2014, url: http://www.hurriyet.com.tr/obruk-olustu-otomobil-ve-ev-icinde-kaldi-26868704, [29.05.2016].

Jackson, C. R. ve Apel, J. R., 2004, Synthetic aperture radar marine user's manual, US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Environmental Satellite, Data, and Information Serve, Office of Research and Applications.

JPL, 2000, The Shuttle Radar Topography Mission, http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/dataprod.htm, [29.05.2016].

JPL, 2009, ASTER Global Digital Elevation Model (Aster GDEM), https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp, [29.05.2016].

Kampes, B., Hanssen, R. ve Perski, Z., 1999, Doris user's manual and technical documentation, *Delft University of Technology*, 127-128.

Kampes, B. M., Hanssen, R. F. ve Perski, Z., 2003, Radar interferometry with public domain tools, *Proceedings of FRINGE*, 1-5.

Kampes, B. M., 2005, Displacement parameter estimation using permanent scatterer interferometry, *TU Delft, Delft University of Technology*.

Kampes, B. M., 2006, Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique, Springer, p 89.

Kaya, A. G. ve Kılcı, H., 2011, Konya İl Çevre Durum Raporu, http://www.csb.gov.tr/db/ced/editordosya/konya_icdr2011.pdf, *Konya Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, ÇED Hizmetleri Şubesi,*, *Konya*.

Kumsar, H., Aydan, Ö., Tano, H. ve Atak, O., 2004, Uzun süreli Babadağ (Denizli) heyelanının kaya mekaniği açısından incelenmesi, *Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 277-287.

Kumsar, H., Çelik, S., Aydan, Ö., Tano, H. ve Ulusay, R., 2012, Babadağ Gündoğdu Heyelanının Çok Parametreli İzleme Teknikleri İle İncelenmesi ve Doğal Afet Kapsamında Değerlendirilmesi.

Lagios, E., Sakkas, V., Novali, F., Bellotti, F., Ferretti, A., Vlachou, K. ve Dietrich, V., 2013, SqueeSAR™ and GPS ground deformation monitoring of Santorini Volcano (1992–2012): Tectonic implications, *Tectonophysics*, 594, 38-59.

Lanari, R., Casu, F., Manzo, M., Zeni, G., Berardino, P., Manunta, M. ve Pepe, A., 2007, An overview of the small baseline subset algorithm: A DInSAR technique for surface deformation analysis, *Pure and Applied Geophysics*, 164 (4), 637-661.

Lauknes, T. R., 2004, Long-term surface deformation mapping using small-baseline differential SAR interferograms, *Unpublished Master Thesis, Department of Physics and Technology, University of Tromso, Norway*.

Lazecky, M., 2011, Monitoring of Terrain Relief Changes using InSAR, Doktora Tezi, VSB Technical University, Ostrava.

MAM, T., 2012, Havza Koruma Eylem Planlarının Hazırlanması – Konya Kapalı Havzası, *TÜBİTAK Çevre Enstitüsü (ÇE), Ankara*, 91 / 473.

Massonnet, D. ve Feigl, K. L., 1998, Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface, *Reviews of geophysics*, 36 (4), 441-500.

Meisina, C., Notti, D., Zucca, F., Ceriani, M., Colombo, A., Poggi, F., Roccati, A. ve Zaccone, A., 2013, The use of PSInSAR™ and SqueeSAR™ techniques for updating landslide inventories, In: Landslide Science and Practice, Eds: Springer, p. 81-87.

NG, A. H.-M., 2010, Advanced satellite radar interferometry for ground surface displacement detection, *The University of New South Wales Sydney*.

OSİB, 2012, Orman ve Su İşleri Bakanlığı Strateji Taslağı - Ulusal Havza Yönetim Stratejisi Taslağı (2012-2023), Ankara, [29.05.2016].

Osmanoglu, B., 2011, Applications and development of new algorithms for displacement analysis using InSAR time series, Doktora Tezi, *Miami Üniversitesi*, 164.

Ozdemir, A., 2015, Sinkhole Susceptibility Mapping Using a Frequency Ratio Method and GIS Technology Near Karapınar, Konya-Turkey, *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, 502-506.

Ozdemir, A., 2016, Sinkhole susceptibility mapping using logistic regression in Karapınar (Konya, Turkey), *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75 (2), 681-707.

Önay, T. Ş., 1946, Babadağ civarı göçüntüleri, *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 36 (36).

Özpınar, Y., Koralay, T., Çobanoğlu, İ., Köseoğlu, M. ve Sabaz, Ü., 1999, Babadağ ve yakın çevresinin jeolojik-petrografik ve uygulamalı jeoloji açısından incelenmesi, I, *Babadağ Sempozyumu*, 1-23.

Pepe, A. ve Lanari, R., 2006, On the extension of the minimum cost flow algorithm for phase unwrapping of multitemporal differential SAR interferograms, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 44 (9), 2374-2383.

Perissin, 2009, The Multi-Temporal InSAR Software, http://www.sarproz.com/, Purdue University, [29.05.2016].

Perissin, D., Prati, C., Rocca, F. ve Wang, T., 2009, PSInSAR Analysis over the Three Gorges Dam and urban areas in China, *2009 Joint Urban Remote Sensing Event, Vols 1-3*, 1659-1663.

Perissin, D., Wang, Z. ve Wang, T., 2011, The SARPROZ InSAR tool for urban subsidence/manmade structure stability monitoring in China, *Proceedings of the ISRSE, Sidney, Australia*, 1015.

Rodriguez, E., Morris, C. S. ve Belz, J. E., 2006, A global assessment of the SRTM performance, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72 (3), 249-260.

Roberts, N., Erol, O., de Meester, T. ve Uerpmann, H.-P., 1979, Radiocarbon chronology of late Pleistocene Konya lake, Turkey, *Nature*, 281, 662 - 664, doi:10.1038/281662a0.

Roberts, N., 1983, Age, palaeoenvironments, and climatic significance of late Pleistocene Konya Lake, Turkey, *Quaternary Research*, 19 (2), 154-171.

Sandwell, D., Mellors, R., Tong, X., Wei, M. ve Wessel, P., 2011, Open radar interferometry software for mapping surface deformation, *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 92 (28), 234-234.

Součková, J. ve Slačíková, J., 2011, Porovnání referenčních digitálních modelů terénu ASTER GDEM a X-band SRTM DEM. private seminar, CTU Prague.

Sousa, J., 2009, Potential of Integrating PSI Methodologies in the Detection of Surface Deformation, *PhD Thesis, University of Porto, Portugal*.

Şengün, Y. S., 2009, GPS ve Insar ölçülerini birlikte kullanarak İzmit depreminde oluşan deformasyonların belirlenmesi: Nokta seyrekleştirmede yeni bir algoritma, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.

Şimşek, Ş., 1985, Geothermal model of Denizli, Sarayköy-Buldan area, *Geothermics*, 14 (2), 393-417.

Taner, G., 1974, Denizli bölgesi Neojeninin paleontolojik ve stratigrafik etüdü, *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 83 (83).

Tano H., Aydan Ö., Ulusay R. ve Kumsar H., 2006, Şev Hareketleri Üzerinde Etkili Olan Jeo-çevresel Faktörlerle ilgili Ortak Araştırma: Babadağ (Türkiye)'daki Krip Türü Şev Duraysızlığının İncelenmes, *Ara Rapor. Japon Eğitim, Kültür, Spor, Bilim ve Teknoloji Bakanlığı Destekli Çok Disiplinli Ortak Araştırma Projesi*.

Tapur, T. ve Bozyiğit, R., 2015, Konya ilinde güncel obruk oluşumları, *Marmara Coğrafya Dergisi*, ISSN 1303-2429 E-ISSN 2147-7825 s.415-446, İstanbul.

Ustun, A., Tusat, E. ve Yalvac, S., 2010, Preliminary results of land subsidence monitoring project in Konya Closed Basin between 2006–2009 by means of GNSS observations, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10 (6), 1151-1157.

Ustun, A., Özkan, İ., Bildirici, İ. Ö., Tuşat, E., Üstüntaş, T. Eren Y. ve Özdemir, A., 2014, Konya Havzasında zemin çökmelerinin jeodezik yöntemlerle izlenmesi ve nedenlerinin araştırılması, *Selcuk Universitesi, 110Y121 Proje Numaralı Tübitak Projesi Sonuç Raporu, Seçuk Üniveristesi, Konya.*

Üstün, A., Tuşat, E., Yalvaç, S., Özkan, İ., Eren, Y., Özdemir, A., Bildirici, İ. Ö., Üstüntaş, T., Kırtıloğlu, O. S. ve Mesutoğlu, M., 2015, Land subsidence in Konya Closed Basin and its spatio-temporal detection by GPS and DInSAR, *Environmental Earth Sciences*, 73 (10), 6691-6703.

Van Zyl, J. J., 2001, The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography, *Acta Astronautica*, 48 (5), 559-565.

Warren, M. A., 2007, The development of a 3-Pass Persistent Scatterer algorithm using the Integer Ambiguity Search method, *University of Nottingham*.

Yıldırım, M. ve Gökaşan, E., 2013, Mühendisler için Jeoloji Bilgileri, http://www.ek.yildiz.edu.tr/images/images/yayinlar/muhendislericinjeo.pdf, *İstanbul*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geoteknik Anabilim Dalı - Doğa Bilimleri Araştırma Merkezi,, p. 619 s.

Zebker, H. A. ve Goldstein, R. M., 1986, Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91 (B5), 4993-4999.

Zebker, H. A. ve Rosen, P., 1994, On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake, *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1994. IGARSS'94. Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis and Interpretation., International*, 286-288.

Zebker, H. A., Rosen, P. A. ve Hensley, S., 1997, Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102 (B4), 7547-7563.

Zibret, G., Komac, M. ve Jemec, M., 2012, PSInSAR displacements related to soil creep and rainfall intensities in the Alpine foreland of western Slovenia, *Geomorphology*, 175, 107-114.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**:**	Fatma CANASLAN ÇOMUT
Uyruğu	**:**	T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi	**:**	Beyşehir - 27/05/1985
Telefon	**:**	0 544 559 46 12
Faks	**:**	0 258 265 61 20
e-mail	**:**	fatma.c.comut@afad.gov.tr

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	:	**A.A. Anadolu Lisesi, Beyşehir, Konya**	**2003 (Birincilik)**
Üniversite	:	**Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, Konya**	**2007(Birincilik)**
Yüksek Lisans	:	**Selçuk Üniv. Fen Bilim. Ens. Harita Müh. ABD**	**2010**
Doktora	:	**Selçuk Üniv. Fen Bilim. Ens. Harita Müh. ABD**	**2016**

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
2009-2012	**Selçuk Üniversitesi**	**Öğretim Görevlisi**
2012-	**Denizli İl Afet ve Acil Durum Müd.**	**Harita Y. Mühendisi-Şube Müdürü**

UZMANLIK ALANI

Radar İnterferometre, Uzaktan Algılama, Görüntü İşleme, Jeodezi, Coğrafi Bilgi Sistemleri, Afet ve Risk Analizi, Afet Planları ve Risk Azaltma Çalışmaları

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

Canaslan, F., Üstün A., 2011, Konya Kapalı Havzası'nda Düşey Yönlü Yüzey Deformasyonlarının İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar Yöntemi ile İzlenmesi.Türkiye Ulusal Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Birliği (TUFUAB), Topkapı Palace, ANTALYA.(Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır)

Canaslan, F., Ustun, A., 2012, Impact of Perpendicular and Temporal Baseline Characteristics on InSAR Coherence Maps, FIG Working Week 2012 - Knowing to manage the territory, protect the environment, evaluate the cultural heritage, Rome, ITALY. (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır)

Ustun, A., Tusat, E., Yalvac, S., Ozkan, I., Eren, Y., Ozdemir, A., Bildirici, I.O., Ustuntas, T., Kırtıloglu, O., Mesutoglu, M., Doganalp, S., Canaslan, F., Abbak, R., Avsar, N., and Simsek, F. F., 2014, Land subsidence in Konya Closed Basin and its spatio-temporal detection by GPS and DInSAR. *Environmental Earth Sciences*, pages 1–13. (Doktora tezinden yapılmıştır)

Çomut F. C., Lazecký, M., Perissin, D., Ustun, A., 2014, Monitoring of Land Subsidence in Konya Closed Basin between 2003-2010 by means of PS InSAR processing: first results in Karaman District. In: CENTERIS 2014, 15-17 Oct 2014, Troia, Portugal. (Doktora tezinden yapılmıştır)

Çomut F. C., 2015, Afetlerde Risk Yönetimi İçin Uzaktan Algılama Tekniklerinin Kullanılması: İleri InSAR (Interferometrik Yapay Açıklıklı Radar) Yöntemleri, Türkiye'nin Afet Risk Yönetimi 17. Yuvarlak Masa Toplantısı, 9 Ocak 2015, ODTÜ Kongre ve Kültür Merkezi, Ankara. url: https://dmc.metu.edu.tr/node/69 (Bildiri Özeti)

Çomut F. C., Gürboğa Ş., Üstün A., 2015, Denizli Babadağ İlçesinde Heyelanların İnterferometrik Yapay Açiklikli Radar (InSAR) Tekniği ile Gözlemlenmesi, Uluslararası Burdur Deprem ve Çevre Sempozyumu, 6-8 Mayıs, Burdur. (Doktora tezinden yapılmıştır)

Çomut F. C., Gurboga, S., Ustun, A., 2015, Initial results of a surface deformation by using InSAR techniques: Case study of Babadağ (Denizli), Turkey, Surface Models for Geosciences, 05/2015, chapter 7, pp. 73-86; Springer Int., 2015, ISBN: 978-3-319-18406-7, DOI: 10.1007/978-3-319-18407-4_7. (Doktora tezinden yapılmıştır)

Çomut F. C., Lazecky M., Ustun A. , Yalvac, S., 2015, Land Subsıdence Detectıon in Agrıcultural Areas of Konya Closed Basın By Ps-InSAR And GNSS Observatıons: In Proceedings of FRINGE'15: Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry and Sentinel-1 InSAR Workshop, Frascati, Italy, 23-27 March 2015, Ouwehand L., Ed., ESA Publication SP-731. DOI:10.5270/Fringe2015.277 (Doktora tezinden yapılmıştır)

Lazecky, M., Çomut F. C., Hlaváčová I., Gürboğa Ş., 2015, Practical Applicability of Satellite-Based SAR Interferometry for Detection of Landslide Activity. In: WMESS 2015, 7 -11 Sep. 2015, Prague, 10 p. Procedia Earth and Planetary Science, DOI: 10.1016/j.proeps.2015.08.113 (Doktora tezinden yapılmıştır)

Çomut, F. C., Üstün, A., Lazecky, M., Aref , M., M., 2015, Multi Band InSAR Analysis of Subsidence Development Based on The Long Period Time Series, In: ISPRS/SMPR 2015 - The 3rd International Conference Geoinformation Modeling&Environmental Monitoring 11/2015; XL-1-W5. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-1-W5-115-2015 (Doktora tezinden yapılmıştır)

Lazecky, M., Çomut, F. C., Qin, Y., Perissin, D., 2016, Sentinel-1 Interferometry System in the HPC Environment of IT4Innovations, In: GIS Ostrava 2016, 16-18 March 2016.

Çomut F. C., 2016, Çoklu Band InSAR Zaman Serisi Analizleri Yardımıyla Afet Risk Haritalarının Oluşturulması, Türkiye'nin Afet Risk Yönetimi 18. Yuvarlak Masa Toplantısı, 26 Mart 2016, ODTÜ Kongre ve Kültür Merkezi, Ankara. url: https://dmc.metu.edu.tr/node/69 (Bildiri Özeti)

Çomut, F. C., Üstün, A., Lazecky, M., Perissin, D., 2016, Capability of Detecting Rapid Subsidence with CosmoSkymed and Sentinel-1 Dataset Over Konya City, ESA Living Planet Symposium 2016, 10-12 May 2016, ESA Special Publication Proceedings (SP-740), Czech Republic (Doktora tezinden yapılmıştır)

Lazecky, M., Çomut, F.C., Nikolaeva, E., Bakon, M., Armenteroos A.M.R., Qin, Y., Sousa, J.J., Potential of Sentinel-1A for nation-wide routine updates of active landslide maps, XXIII ISPRS Congress 2016, 12-19 July 2016, Czech Republic. (Doktora tezinden yapılmıştır)