



**PS-INSAR İLE YERKABUĞU HAREKETLERİNİN
BELİRLENMESİ: BOLVADİN ÖRNEĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sinan KUCUR

Danışman

Doç. Dr. Murat UYSAL

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2019

Bu tez çalışması 18.FEN.BİL.39 numaralı proje ile Afyon Kocatepe Üniversitesi
Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PS-INSAR İLE YERKABUĞU HAREKETLERİNİN
BELİRLENMESİ: BOLVADİN ÖRNEĞİ

Sinan KUCUR

DANIŞMAN
Doç. Dr. Murat UYSAL

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2019

TEZ ONAY SAYFASI

Sinan KUCUR tarafından hazırlanan “PS-InSAR ile Yerkabuğu Hareketlerinin Belirlenmesi: Bolvadin Örneği” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 21/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Harita Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Murat UYSAL

Başkan : Doç. Dr. Fatih POYRAZ
(Sivas Cumhuriyet Üniversitesi)

Üye : Doç. Dr. Murat UYSAL
(Afyon Kocatepe Üniversitesi)

Üye : Doç. Dr. İbrahim TİRYAKİOĞLU
(Afyon Kocatepe Üniversitesi)

İmza

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

**Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım
bu tez çalışmada;**

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

21/06 /2019

Sinan KUCUR



ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

PS-INSAR İLE YERKABUĞU HAREKETLERİNİN İNCELENMESİ: BOLVADİN ÖRNEĞİ

Sinan KUCUR
Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Murat UYSAL

Son yıllarda interferometrik yapay açıklı radar tekniği, yeryüzünde meydana gelen deformasyonların incelenmesinde yeni bir araç olarak kullanılmaktadır. Üretebildiği yüksek kaliteli topografya bilgisi ile deformasyon belirlenmesinde jeodezi bilimine yeni bir yön getiren bu teknik, geri dönen sinyallerin gecikmelerini kullanarak sinyal işleme tekniğiyle bunları yüksek çözünürlüklü görüntülere dönüştürmektedir. Aynı zamanda, diğer yöntemlerden farklı olarak geniş bir çalışma alanı sağlamakta ve çok hassas sonuçlar vermektedir. Bu nedenle de yerbilimi araştırmacıları, söz konusu bu tekniği basta yer kabuğu deformasyonu çalışmaları olmak üzere diğer alanlarda da uygulamaktadırlar.

Bu bilgiler ışığında bu hazırlanan tez çalışmasında Afyonkarahisar’a ait Bolvadin ilçesinin şehir merkezi için zeminde meydana gelen zamana bağlı yükseklik değişimlerinin InSAR yöntemiyle incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, interferometrik yapay açıklıklı radar tekniği meydana gelen yerkabuğu hareketlerinin incelenmesi için kullanılmış ve bunun için de TerraSAR-X uydusuna ait radar görüntülerinden Temmuz 2016’dan Temmuz 2018’a kadar olan dönemi kapsayan 17 görüntü kullanılmıştır. Oluşturulan interferogramlar iki yıllık süreçte gözlenen konum değişikliklerinin, radar bakış yönünde yaklaşık 12.5 milimetreye ulaşan yerkabuğu hareketlerini ortaya çıkardığı tespit edilmiştir.

2019, xi + 63 sayfa

Anahtar Kelimeler: Uzaktan algılama, Radar, Yapay açıklıklı radar, Yerkabuğu hareketleri



ABSTRACT
M.Sc. Thesis

THE DETERMINATION OF CRUST MOVEMENTS BY PS-InSAR: BOLVADİN CASE

Sinan KUCUR

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Geomatic Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Murat UYSAL

In recent years, interferometric synthetic aperture radar technique has been used as a new tool for investigating deformation that occurs in earth surface. This technique which brings an original direction for geodesy by producing high quality topography information uses delays of the return signals and transforms them into high resolution images by signal processing techniques. At the same time, unlike other methods, this technique provides a wide workspace and provides with a sensitivity of centimeters. Thus Earth science researchers use this technique in studies of surface skin and the other fields.

In life of foregoing, investigating of time bound height changes which happen in the ground for Bolvadin Konya with InSAR method was aimed in this study. To implement this aim we used interferometric synthetic aperture radar technique for investigation of crust movements and for this purpose we used 17 images which was selected in TerraSAR-X radar images that include the period from July 2016 to July 2018. Although this interferograms involve delays of signal that result from low coherence and atmosphere, we ascertained that the changes of position observed reveal crust movements, which reach approximately 12.5 millimeters, in direction of radar view in a two years period.

2019, xi + 63 pages

Keywords: Remote sensing, Radar, Synthetic aperture radar, Crust movements



TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmamda danışmanlığımı üstlenen ve çalışmamın her aşamasında bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren sayın hocam Doç. Dr. Murat UYSAL'a, yapmış olduğu katkılarından dolayı sayın Doç. Dr. İbrahim TİRYAKİOĞLU'na ve kendi çalışmalarından vakit ayırarak radar görüntüleri üzerinde çalışabilir hale gelmemi sağlayan Doç. Dr. Fatih POYRAZ'a teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı, başta ailem olmak üzere tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Sinan KUCUR

AFYONKARAHİSAR, 2019

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. MATERYAL ve METOT.....	5
2.1 Radar.....	5
2.2 Gerçek Açıklı Radar (RAR).....	6
2.3 Yapay Açıklı Radar (SAR).....	7
2.4 Radar Görüntü Hataları.....	9
2.4.1 Kısa Görüntüleme (Foreshortening).....	9
2.4.2 Ters Görüntüleme (Layover).....	10
2.4.3 Gölgeleme (Shadowing).....	11
2.5 SAR görüntüleme Yöntemleri.....	12
2.5.1 SpotLight Görüntüleme Yöntemi.....	12
2.5.2 StripMap Görüntüleme Yöntemi.....	13
2.5.3 ScanSAR Görüntüleme Yöntemi.....	13
2.6 İnterferometrik Yapay Açıklı Radar (InSAR).....	14
2.6.1 Giriş.....	14
2.6.2 Veri Değerlendirmede Çevresel Etkiler.....	15
2.6.2.1 Piksel çözünürlüğü.....	16
2.6.2.2 Yörünge hatası.....	17
2.6.2.3 Termal korelasyonsuzluk.....	18
2.6.2.4 Zamansal korelasyonsuzluk.....	19

2.6.2.5 Atmosferik etkiler.....	19
2.6.2.6 Küresellik etkisi.....	20
2.6.2.7 Bölge topoğrafyasının etkisi.....	20
2.6.3 InSAR Uygulama Alanları.....	21
2.6.4 İnterferometrik SAR teknikleri.....	22
2.6.4.1 Hareket doğrultusuna dik (across-track) interferometri tekniği..	23
2.6.4.2 Hareket doğrultusunda (along-track) interferometri.....	25
2.6.4.3 Tekrar-geçis (repeat pass) interferometri yöntemi.....	27
2.6.5 İnterferometrik Veri İşleme Adımları.....	28
2.7 PS-InSAR (Persistent Scatterer InSAR).....	30
2.7.1 Giriş.....	30
2.7.2 Matematiksel Esas Ve Ölçüm Duyarlılığı.....	31
2.7.3 PS-InSAR Tekniği ve Farklı Yaklaşımlar.....	33
2.8 Uydu Bilgileri.....	36
3. UYGULAMA ve BULGULAR	40
3.1 Giriş.....	40
3.2 Çalışma Bölgesinin Tanıtımı.....	40
3.3 Görüntü Seçimi.....	43
3.4 PS Uygulaması.....	43
3.5 SBAS Uygulaması.....	51
3.6 Birleştirilmiş Multi-Temporal InSAR Uygulaması.....	57
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	59
5. KAYNAKLAR.....	61
ÖZGEÇMİŞ.....	64

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

δR_R	Mesafe çözünürlüğü
B_{BW}	Radar darbesinin frekans bant genişliği
γ	Korelasyonsuzluk
P	Güç
y	Yatay uzaklık
r	Yan bakış uzaklığı
h	Yükseklik
θ	Bakış doğrultusu
ϕ	Faz farkı
B_x	Baz uzunluğu
U	Hız
λ	Dalga boyu
y	Hız
B	Baz büyüklüğü
Δ	Fark

Kısaltmalar

ALOS	Advanced Land Observing Satellite
DEOS	Delft Institute for Space-Oriented Space Research
DInSAR	Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar
DORIS	Delft Institute of Earth Observation and Space Systems
ENVISAT	Environmental Satellite
ESA	European Space Agency
GNNS	Global Navigation Satellite System
HH	Horizontal-Horizontal
HV	Horizontal-Vertical
InSAR	İnterferometrik SAR
JERS-1	Japanese Earth Resource Satellite-1
MTI	Multi-Temporal InSAR
PS-InSAR	Persistent Scatterers InSAR
RADAR	Radio Detection and Ranging
RAR	Real Aperture Radar
SAR	Synthetic Aperture Radar
SBAS	Small Baselines Interferometry
SLC	Single Look Complex
SNR	Signal Noise Ratio
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
STAMPS	Stanford Method for Persistent Scatterers
SYM	Sayısal Yükseklik Modeli
VH	Vertical-Horizontal
VV	Vertical-Vertical

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 IEEE ve NATO tarafından kullanılan radar bantlar.....	5
Şekil 2.2 Radar uydu prensibi.....	7
Şekil 2.3 Yapay Açıklı Radar.....	8
Şekil 2.4 RAR ve SAR görüntüleri arasındaki çözünürlük farkı.....	9
Şekil 2.5 Kısa görüntüleme (foreshortening).....	10
Şekil 2.6 Ters görüntüleme (Layover).....	11
Şekil 2.7 Gölgeleme (shadowing).....	11
Şekil 2.8 Spotlight görüntüleme yöntemi.....	12
Şekil 2.9 Stripmap görüntüleme yöntemi.....	13
Şekil 2.10 ScanSAR görüntüleme yöntemi.....	13
Şekil 2.11 Faz Farkı.....	14
Şekil 2.12 Afyonkarahisar Bolvadin radar görüntüsü.....	16
Şekil 2.13 İnterferogramda meydana gelen yörüngesel örgeler.....	18
Şekil 2.14 Topografik örgeler.....	20
Şekil 2.15 InSAR uygulama alanları.....	22
Şekil 2.16 Baz ile hareket doğrultusunun geometrik (dik) gösterimi.....	23
Şekil 2.17 Hareket doğrultusuna dik interferometri.....	24
Şekil 2.18 Baz ile hareket doğrultusunun geometrik (paralel) gösterimi.....	25
Şekil 2.19 Hareket doğrultusunda interferometri.....	26
Şekil 2.20 Tekrar-geçiş interferometri.....	27
Şekil 2.21 Tekrar geçiş interferometri geometrisi.....	27

Şekil 2.22 TerraSAR-X uydusu.....	36
Şekil 2.23 TerraSAR-X uydu çözünürlük karşılaştırması.....	39
Şekil 3.1 Afyonkarahisar'ın Türkiye'deki konumu.....	41
Şekil 3.2 Bolvadin ilçesinin Afyonkarahisar'daki konumu.....	42
Şekil 3.3 Değerlendirme işleminin şematik gösterimi.....	43
Şekil 3.4 PS analizi sonucu elde edilen interferogramlar.....	46
Şekil 3.5 PS noktalarının çalışma bölgesindeki görünümü.....	47
Şekil 3.6 İnterferogramlara ait piksellerdeki çözülmemiş faz.....	47
Şekil 3.7 İnterferogramlara ait faz çözümlemesi hataları fazı.....	48
Şekil 3.8 Atmosfer ve yörünge hatası fazı.....	48
Şekil 3.9 Konuma bağlı korelasyonlu bakış açısı hataları fazı.....	49
Şekil 3.10 Faz çözümlemesi hata fazlarını gösteren interferogramdan AOE ve SCLA hata fazlarının çıkarılması.....	49
Şekil 3.11 İnterferogramlara ait faz yükselmesi.....	50
Şekil 3.12 PS noktalarına ait uydu bakış yönündeki yer değiştirme hızı.....	50
Şekil 3.13 SBAS sonucu oluşturulan interferogramlar.....	52
Şekil 3.14 SBAS interferogramlarına ait faz çözümlemeleri.....	53
Şekil 3.15 SBAS faz çözümlemesi hata fazlarını gösteren interferogramdan SCLA hata fazlarının çıkarılması.....	54
Şekil 3.16 TERRASAR-X görüntülerinin SBAS'a göre zamansal ve mekansal dağılımı.....	55
Şekil 3.17 SBAS uygulaması sonucu uydu bakış yönündeki yer değiştirme hızı.....	56
Şekil 3.18 MTI uygulaması sonucu uydu bakış yönündeki yer değiştirme hızı	58

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 TerraSAR-X uydusunun görüntü ürün çeşitleri.....	36
Çizelge 2.2 TerraSAR-X uydu özellikleri.....	37
Çizelge 2.3 TerraSAR-X uydusu görüntüleme modları teknik özellikleri.....	38
Çizelge 3.1 StaMPS SBAS ve PS adımları farklılıkları.....	57



1. GİRİŞ

Afrika ve Arap tektonik plakalarının Avrasya tektonik plakası ile çarpışma bölgesinde yeralan Türkiye'de güncel jeodezik ölçü doğruluğunun çok üzerinde büyüklüğe ulaşan yatay ve düşey yer kabuğu hareketleri meydana gelmektedir. Ülkemizde bu hareketlerin belirlenmesi amacıyla birçok uygulama ve proje mevcuttur. Bu uygulama projeler nivalman uygulamaları, GNSS gözlemleri ve radar görüntüleri yardımı ile yapılabilmektedir.

Örneğin birçok proje kapsamında GNSS ağı tesis edilmiştir. Bunlardan bazıları sürekli istasyonlar olarak kurulmuş bazıları ise kampanya zamanında kullanılmak üzere tesis edilmişlerdir. Bu projeler, Marmara bölgesinin hareketini incelemek için MAGNET GNSS ağı, Harita Genel Komutanlığı (HGK) tarafından Türkiye genelinde kurulan Türkiye Ulusal Temel GNSS Ağı (TUTGA), Kuzey Anadolu Fay Sisteminin Batı kesimleri (KAFS), Doğu Anadolu Fay Sistemi (DAFS) ve Ege Açılma Sistemini (EAS) kapsayacak şekilde tasarlanan TURDEP projesi ve Türkiye genelinde tesis edilen ve Sürekli Gözlem Yapan GNSS İstasyonu (CORS-TR) veya TUSAGA-AKTİF GNSS ağını sayabiliriz (Poyraz 2009).

Radar interferometre yeryüzünün belli bir kesiminin radar yöntemiyle elde edilmiş iki görüntüsü arasındaki faz farklarını kullanarak haritasının çıkarılmasını sağlayan ölçme tekniğidir. Piksel bazlı faz farklarıyla oluşturulan interferogram, yer ve radar uydusu arasındaki uzaklığın eşyükselti eğrili bir haritasıdır. Söz konusu haritalar radarın bakış yönünde eşsiz bir piksel yoğunluğuna (~ 100 piksel/km²) ve ~ 1 cm'lik doğruluğa sahiptir (Massonnet ve Feigl, 1998). İnterferometrik radar uyduları yaklaşık bir aylık (35 gün) aralıklarla aynı bölgenin radar görüntülerini alır. Değişik zamanlarda ve farklı konumlardan alınan bu görüntüler, bölgenin topoğrafik, atmosferik, fiziksel ve kimyasal özellikleriyle birlikte, bu özelliklerde zamanla gerçekleşen değişimler de kaydedilmiş olur. Ancak radar yöntemiyle elde edilen bu verilerin, yöntemin uygulanış tekniği ile ilişkili parametrelere bağımlı (duyarlı) olduğu unutulmamalıdır.

Radar tekniğinin uydularda kullanılmasıyla ortaya çıkan SAR (Synthetic Aperture Radar) başka bir deyişle yapay açıklıklı radar tekniği mikrodalga frekanslarda çalışır. Bu özellik

sistemin her türlü hava koşulunda gece ve gündüz yüzeyin geometrik ve elektriksel özelliklerini görüntü olarak alabilecek şekilde çalışmasını sağlar (Rosen *et al.* 1998).

InSAR tekniğinde iki SAR görüntüsü radar interferogramı oluşturmak üzere karşılaştırılır. Interferogram hedef alanın yüksekliği (topoğrafyası) ile ilgili bilgi sağlayabileceği gibi iki görüntü alımı arasında meydana gelen yer menzili mesafesinde oluşacak küçük değişimler hakkında da bilgi verir. SAR görüntüsü bir radar kaynağından gönderilen sinyallerin hedef yüzeyden yansıdıktan sonra kaydedilen genlik ve faz değerlerini içerir. Genlik, hedefin yansıma özelliklerini ifade ederken; faz, hedefe olan uzaklığa bağlı bir değerdir. InSAR iki SAR görüntüsündeki birbirine karşılık gelen piksellerin faz farklarını belirler ve interferogram oluşturur (Bürgmann *et al.* 2000). InSAR tekniği topografya ve yeryüzü deformasyonunu ölçmek için kullanılabilir.

InSAR tekniğiyle haritanın elde edilmesi fotogrametrideki yaklaşıma benzerdir. Stereoskopide, arazinin bir çift görüntüsü iki farklı noktadan alınır. Farklı alım noktaları nedeniyle elde edilen paralaks, topoğrafyanın yeniden oluşturulmasını sağlar. InSAR tekniğinde, SAR görüntüleri arasındaki paralaks, iki SAR görüntüsünde kaydedilmiş faz bilgilerinin farkına karşılık gelir. Tekniğin sayısal arazi modeli elde etmek için kullanıldığı en güzel örnek mekik radar topoğrafya görevidir (SRTM: Shuttle Radar Topography Mission). SRTM yaklaşık 60° kuzey ve güney enlemleri arasındaki kuşakta yüksek çözünürlüklü topoğrafik veri elde etmek için planlanmış bir görevdir. Bu görev, Şubat 2000'de Endeavour uzay mekiğinin üzerine yerleştirilmiş iki radar yardımıyla 11 günde tamamlanmıştır (Farr *et al.* 2007).

InSAR yardımıyla gerçekleştirilen uygulamalar bilim ve toplumun ilgi alanına giren konulara farklı bir bakış açısı sağlar ve elde edilen bilgi yeryuvarının yapısının ve geçirdiği değişimin anlaşılması açısından çok anlamlıdır. Magmanın yüzey hareketlerinden, plaka hareketlerine ve buz katmanlarının izlenmesine kadar yeryuvarının geometrik görünümünde meydana gelen konumsal ve zamansal değişimin izlenmesinde InSAR büyük avantaj sağlar.

GNSS gibi noktasal yer değişikliğinin üç boyutlu bileşenlerini ölçemese de veya nivelman uygulamaları gibi çok hassas olmasa da InSAR ile elde edilen yüksek piksel çözünürlüğü, uygulamanın çok daha geniş ölçeklerde, daha detaylı olarak ve çok daha ucuz gerçekleştirilmesini sağlar. Veri toplama işinin ilgili bölgede bulunmayı ve yersel çalışmayı gerektirmemesi, bu tekniğin bir diğer önemli avantajıdır. Bu durum sadece ekonomik bir kazanç sağlamakla sınırlı kalmaz, aynı zamanda volkanik bölgeler gibi riskli yerlerde yaşanabilecek güvenlik sorunlarını da ortadan kaldırır.

Bu çalışmada InSAR yöntemi ile Afyonkarahisar Bolvadin bölgesinde zamana bağlı oluştugu varsayılan yüzey deformasyonları incelenmektedir. Bölgenin belirli bir deformasyon dağılımının ve niteliğinin (büyüklüğünün) incelenmesi hedeflenmektedir. Türkiye’de 2000’li yıllardan itibaren uygulama bulan bu tekniğin esaslarının iyi anlaşılabilmesi için genel olarak radar ve SAR tekniklerinin gelişimi, sonra da InSAR tekniğinin dayandığı teori sunulmuştur. Uygulamanın anlatıldığı kısımda ise görüntü seçiminde dikkat edilecek önemli noktalara değinilmiştir. TerraSAR-X görüntüleri uydu bakış yönündeki deformasyonların belirlenmesi amacıyla kullanılacaktır. Delft Üniversitesi’nde geliştirilen DORIS yazılımı ile radar görüntü çiftleri arasında interferogramlar oluşturulacak ve bu interferogramlar ve StaMPS/MTI yardımıyla zemin çökmeleri konumsal ve zamansal ölçekte belirlenmeye çalışılacaktır.

Jeodezik yöntemlerle elde edilen yükseklik bilgilerinin doğruluğu daha yüksek olmasına karşın yapılan iş çok zaman alır, yorucudur ve masraflıdır. Doğruluk, çözünürlük, maliyet gibi etkenler dikkate alındığında, ülke ölçeğinde sayısal yükseklik modellerinin oluşturulmasında en kısa ve en ekonomik yol tercih edilmelidir. Bu amaçla, dünyanın yüksek çözünürlüklü topoğrafik veri tabanını elde etmek için günümüze kadar InSAR tekniğini kullanan SRTM, JERS-1, RADARSAT-1, ENVISAT ve ALOS gibi birçok uydu görev yapmıştır. Bu uydulardan en önde geleni SRTM uydusudur (Sefercik 2007).

Ayrıca volkan sistemlerinin izlenmesi, buzulların izlenmesi, heyelan ve yer çökmesi gibi çok geniş alanları kaplayan değişik doğa olaylarının incelenmesinde kullanılmaktadır.

Bu sebepten çalışmada yine DORIS yazılımı yardımı ile elde edilen Türkiye'ye ait SRTM3 sayısal yükseklik modeli verisinden yararlanılmıştır.

Yerkabuğu hareketleri incelenerek gelecekte olası tehlikelerin en aza indirgenebilmesi için modern jeodezik ölçmelere ve bunların değerlendirilmesine ihtiyaç vardır. InSAR tekniği ile yüzey deformasyonlarının konumsal ve zamansal ölçekte belirlendiği bu çalışma ile potansiyel tehlikeli bölgeler belirlenmeye çalışılmıştır. Risk farkındalığı oluşturulması ve risk yönetimi uygulamaları adına bakış açısını geliştirmek hedeflenmiştir.

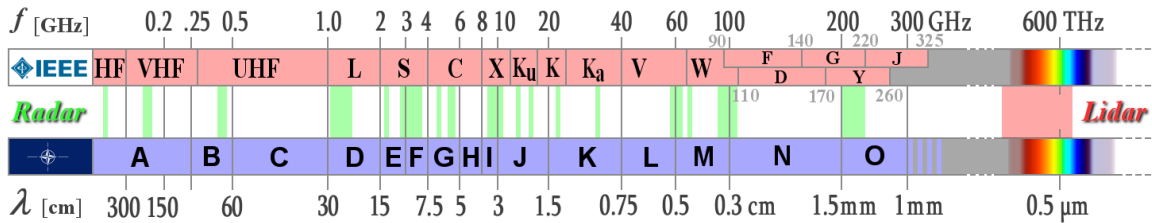


2. MATERYAL VE METOT

2.1 Radar

Görüntüleme amaçlı Radar sistemi, ilk olarak Amerika Birleşik Devletleri'nde Aralık 1934'te tanıtıldı (Page ve ark, 1962). Radio Detecting and Ranging kelimelerinin baş harflerinden oluşmuş bir ölçme ve algılama tekniği olan bu sistemi 1930'ların ortalarında birçok ülke bağımsız olarak geliştirmeye başladı. Radar kısaltması 1940'ta ABD Donanması tarafından icat edildi ve "radar" terimi yaygın olarak kullanıldı. II. Dünya Savaşı sırasında, özellikle gece bombardımanını desteklemek amacıyla, askeri keşif amaçlı hedef nesnelerin tespit edilmesi ve izlenmesi için geliştirilmiştir. Radyo (hedef) algılama ve mesafe tayini anlamına gelen bu sistem gece veya gündüz çalışabildiği gibi her türlü hava koşulunda da radyo sinyalleri ile uzaydaki cisimlerin mesafe, konum ve yükseklikleri hakkında bilgi verir (Şekil 2.1).

Çalışma prensibi, güçlü bir frekans üretici tarafından üretilmiş olan mikrodalga sinyalinin radar anteninden hedefe gönderilmesi ve hedefe çarpıp geri yansıyan sinyalin çok hassas bir alıcı tarafından toplanıp kayıt ünitesinde kaydedilmesi esasına dayanmaktadır (Hanssen, 2001). Bu yönüyle aktif bir algılama sistemi olan radar, geri yansıyan sinyallerin şiddetlerinden hedef nesnelerin özellikleri hakkında bilgi edinirken, yollanan ve geri dönen sinyalleri zaman farkından da mesafelerini ölçmektedir (Balık 2004).



Şekil 2.1 IEEE ve NATO tarafından kullanılan radar bantları.

Havada, uzayda veya yerde konumlandırılabilen radar sistemleri, elektromanyetik spektrumun mikrodalga bölgesinde çalıştıkları için gece veya gündüz, puslu veya sisli hava şartları fark etmeksizin hava veya yerdeki, sabit veya hareketli objelerin mesafe,

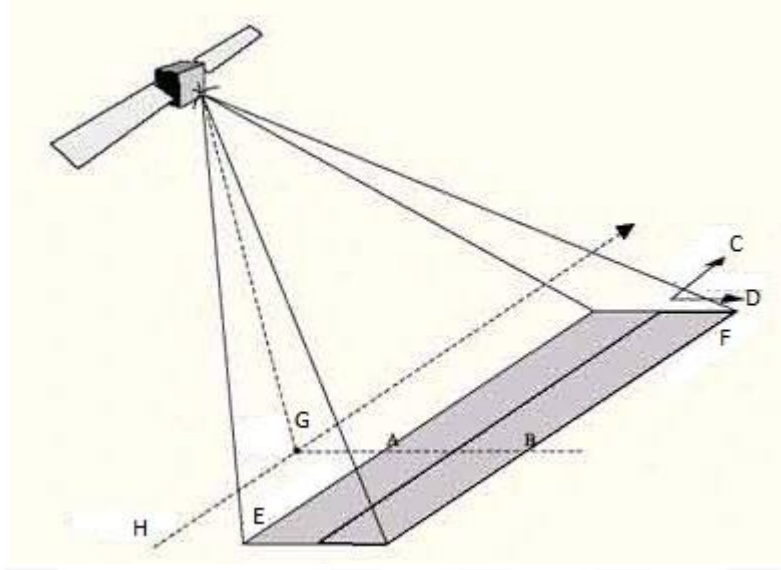
konum, hız ve yükseklikleri hakkında bilgi toplayabilirler. Radar sistemi yerden yansıyan radar sinyalinin gücüne bağlı olarak, piksel değeriyle tanımlanan bir görüntü üretir (Akabalı 2002).

Yeryüzündeki bir alan için radar sinyallerinin geri yansımaları, radar görüntüsünde pikseller şeklinde olmaktadır. Düşük enerjili geri yansımalar, görüntüde 'karanlık tonda bölge' olarak, yüksek enerjili geri yansımalar 'açık tonlu bölge' olarak gösterilir. Parlaklık, radar antenine yansıyan yüksek miktardaki enerjiyi, koyuluk ise yansıyan düşük miktardaki enerjiyi ifade etmektedir.

2.2 Gerçek Açıklı Radar

Enerji ışını, taşıyıcı platformun olan uçak veya uzay aracından uçuş yoluna dik olarak yönlendirilir. Radar anteninden bir enerji atımı iletilir ve yansımaların göreceli şiddeti, dar bir arazi şeridi görüntüsünü üretmek için kullanılır. Daha uzak mesafelerden gelen yansımalar, görüntünün menzil yönü ile orantılı olarak daha büyük bir sürenin ardından radara geri gelir. Bir sonraki sinyali iletildiğinde, radar küçük bir mesafe ileri doğru hareket edecek ve biraz farklı bir arazi şeridi görüntülenir. Bu sıralı arazi şeritleri daha sonra azimut yönünü oluşturmak için yan yana kaydedilir.

Şekil 2.2'de olduğu gibi görüntü iki boyutlu veri dizisinden oluşur. Bu şekilde, görüntülenecek olan arazi şeridi A noktasından B noktasına kadardır. A noktasının nadir noktaya en yakın olduğu ve en uzak nokta olan B noktasının uzak mesafeye uzanır. A ve B arasındaki mesafe şerit genişliğini tanımlar. Şerit içindeki herhangi bir nokta ile radar arasındaki mesafeye eğik menzil denir. Şerit içindeki herhangi bir nokta için mesafe, nadir noktadan olan uzaklığıdır (doğrudan radarın altındaki zemindeki nokta).



Şekil 2.2 Radar uydu prensibi.

C: Azimut doğrultusu

D: Bakış doğrultusu

E: Yakın menzil noktası

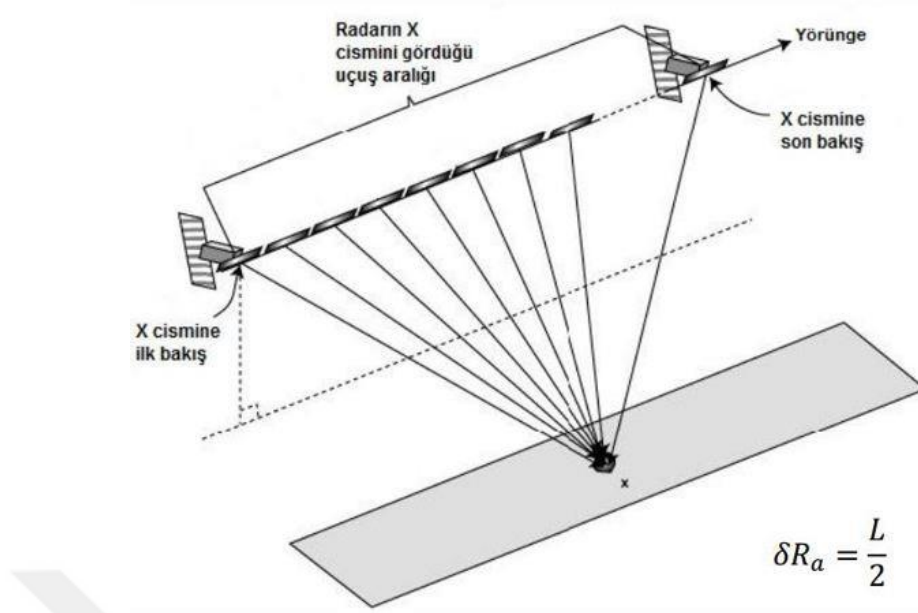
F: Uzak menzil noktası

G: Nadir noktası

H: Uydu güzergahının yeryüzündeki karşılığı

2.3 Yapay Açıklı Radar (SAR)

Yapay Açıklı Radar (Synthetic Aperture Radar - SAR) sistemlerinin geliştirme amacı olarak Gerçek Açıklı Radar (Real Aperture Radar - RAR) sistemlerinin neden olduğu çözünürlük problemi söylenebilir. SAR sistemleri bir hava aracı veya uyduya yerleştirilmiş sensörler yardımı ile, belirli frekanslarda çalışan mikrodalga sinyallerini yeryüzüne iletir ayrıca aynı sensörler yardımı ile anten görevi görerek yeryüzünden yansıyan sinyalleri toplamak için de kullanılırlar. SAR sistemlerinde RAR sistemlerinde kullanılan antenlerden farklı olarak küçük boyutlu antenler kullanılır. Ancak bu sistemlerde çözünürlüğü yapay olarak geliştirilmiş antenler kullanılır. Bu da SAR sistemlerinin temelini oluşturur (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Yapay Açıklı Radar (Çakır 2003).

Mesafe çözünürlüğü;

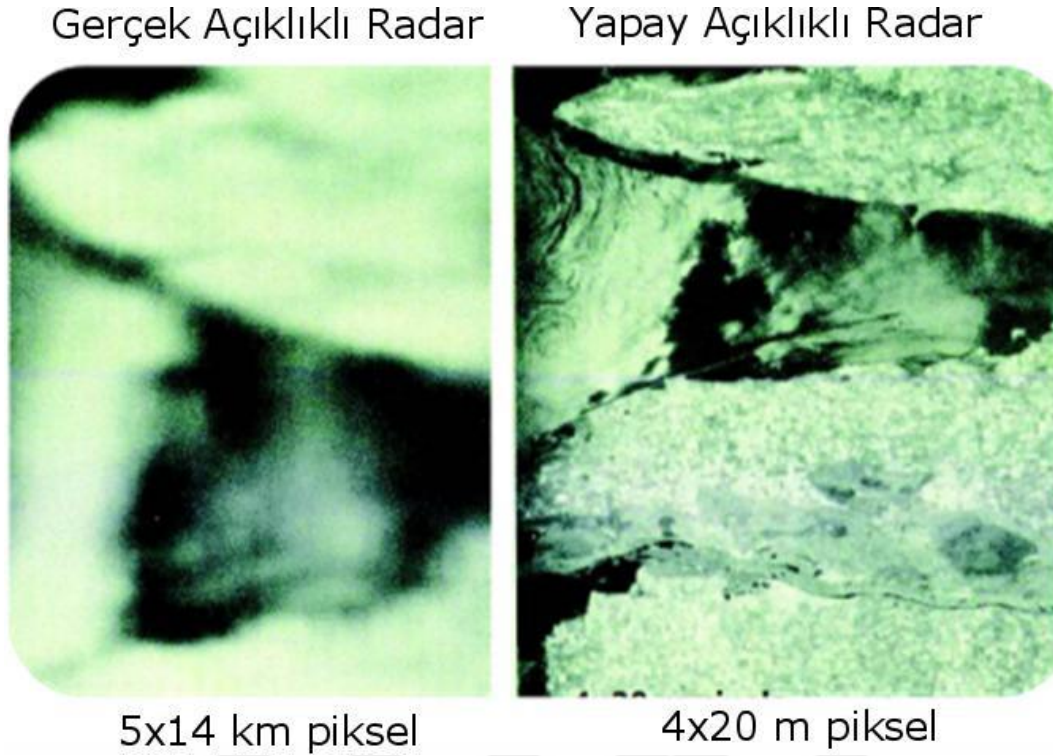
$$\delta R_R = \frac{c}{2B_{BW}} \quad (2.1)$$

Burada; B_{BW} gönderilen radar darbesinin frekans bant genişliğini ifade ederken c ile ışık hızını ifade etmektedir.

SAR uydusunun güzergahı kullanılarak belirli bir zaman dilimi içerisinde aralıklarla radar sinyalinin iletilmesi ve toplanması uydunun konum koordinatları ile birlikte elektronik ortama kaydedilir. Her kayıta ortaya çıkan değişik Doppler frekansları hedefin geometrisinin çiziminde hesaba katılır. SAR sistemlerinde gönderilen mikrodalga sinyalinin genişliği RAR sisteminde gönderilen mikrodalga sinyaline göre daha kısadır. Böylelikle gerçek bir antenin açıklık açısının mümkün olandan çok daha ötesinde yüksek açısal çözünürlüklü bir radar görüntüsü elde edilmiş olur.

Yapay ve gerçek açıklı radar sistemleri ile elde edilen görüntülerin çözünürlük farkı (Şekil 2.4) azimut ve uzaklık yönünde ortalama 1000 kat çözünürlük iyileştirmesi ile

önemli bir fark göstermektedir (Massonnet and Feigl 1998).



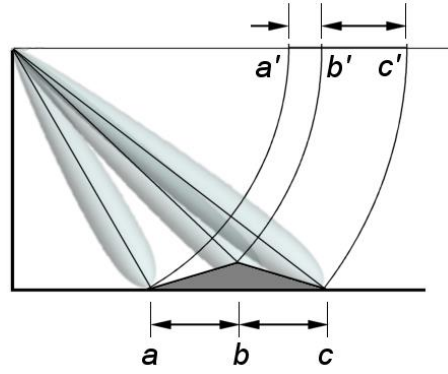
Şekil 2.4 RAR ve SAR görüntüleri arasındaki çözünürlük farkı.

2.4 Radar Görüntü Hataları

Aktif uzaktan algılama uydu sistemlerinin geometrileri pasif uzaktan algılama uydu sistemlerinden farklı olarak yan bakışlı geometriye sahiptirler, dolayısıyla radar uydusu nesneleri eğik doğrultuda algılar ve kaydeder. Bu nedenle bir radarın görüntüleme geometrisi ile elde edilen görüntüler üzerinde belirli geometrik bozulmalara-hatalara neden olur. Bu hatalar; gölgeleme, ters görüntüleme ve kısa görüntüleme geometrik hatalarıdır.

2.4.1 Kısa görüntüleme (foreshortening)

Kısa görüntüleme dağlık alanların SAR görüntülerinde baskın bir etkidir. Eğimli arazi yüzeyine gelen radar sinyalinin arazideki gerçek uzunluğun radar görüntüsünde olduğundan daha kısa algılanmasıdır. Örneğin, bir dağın dip noktalarının tepe noktasından eşit bir eğimle alçaldığını varsayalım.



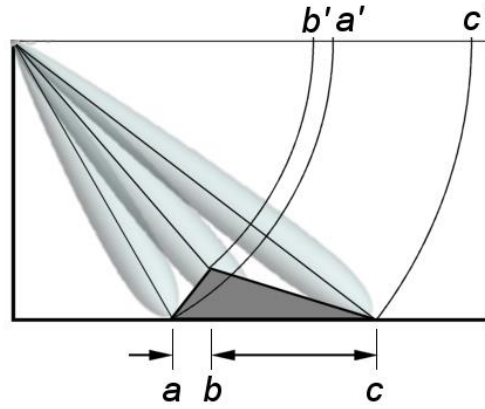
Şekil 2.5 Kısa görüntüleme (foreshortening).

Dağın a ve b noktaları arasında kalan a-b yatay mesafesi, eşit durumdaki b-c yatay mesafesine göre resimde daha kısa görünür (Şekil 2.5). Bunun nedeni a dip noktası radara en yakın konumda olduğundan ilk algılanan nokta olacaktır. b tepe noktası ise yüksekliğinden dolayı görüntüde a noktasına daha yakın olmasına karşın c dip noktası ise en uzun sinyal dönüş süresine sahip olacağından b noktasına a'nın olduğundan daha uzak görünecektir. Bu görüntüleme hatası kısa görüntüleme olarak tanımlanır.

2.4.2 Ters görüntüleme (Layover)

Çok dik bir eğim durumunda, sinyaller ilgili dağ tepelerine göre daha büyük bir eğik uzaklığa sahipse, bu varolan eğim görüntüde ters çevrilir. Dolayısıyla radar görüntüsündeki yüzey elemanlarının sırası, yerdeki sıranın tersidir. Hatta bu olay yeryüzünde var olan objelerin görüntüye kaydedilememesine sebep olur.

Genel olarak ters görüntüleme, radar aydınlatmasına bakar ve düşük yansımaya açısı nedeniyle görüntüde parlak bölgeler olarak görünür.

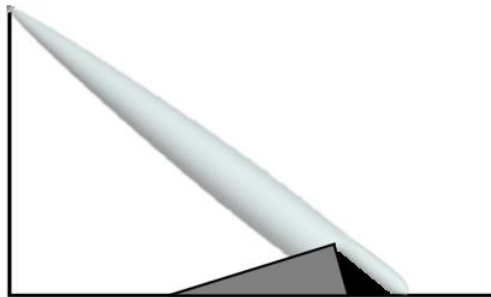


Şekil 2.6 Ters görüntüleme (Layover).

Örneğin tepeden yansıyan sinyalin dipten yansıyana göre daha erken döneceğinden a-b aralığı tersine çevrilerek b'-a' olarak algılanacaktır (Şekil 2.6). Bu olaya ters görüntüleme denir.

2.4.3 Gölgeleme (shadowing)

Dağlık bölgelerde görülen gölgeleme hatası gönderilen radar sinyalinin yeryüzüne bazı bölgelerine ulaşamayıp aydınlatamadığı yerlerde görülür. Nedeni ise yüzeyin eğiminin ışın demeti geniş açısına göre daha dik gelmesinden kaynaklanır. Bahsedilen yüzeylere ait yansıma bilgisi uydu tarafından görüntülenemediğinden siyah kaydedilir. Bu bölgenin boyu, güneşin batışında olduğu gibi, geniş açısı büyüdükçe daha da artar (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 Gölgeleme (shadowing).

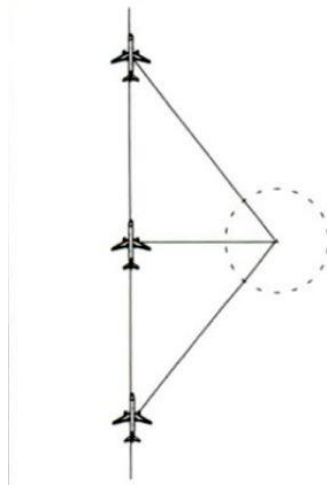
2.5 SAR Görüntüleme Yöntemleri

Hava veya uzay SAR uygulamalarında, veri toplama için genellikle üç ortak görüntüleme modu vardır. Bunlar; SpotLight, StripMap, ScanSAR olarak adlandırılırlar.

Bu yöntemler arasında genel olarak görüntülenen bölgenin alanı ile çözünürlük arasında ters ilişki vardır. Örneğin ScanSAR yöntemi ile alınan görüntülerin çözünürlükleri en küçük değere sahipken görüntülenen bölge alan olarak en büyük olur, SpotLight yönteminde ise alınan görüntülerin çözünürlükleri en büyük değere sahip olduğu gibi görüntülenen bölge en küçüktür. Kullanılan SpotLight, StripMap ve ScanSAR alım yöntemleri aşağıda açıklanmıştır.

2.5.1 SpotLight Görüntüleme Yöntemi

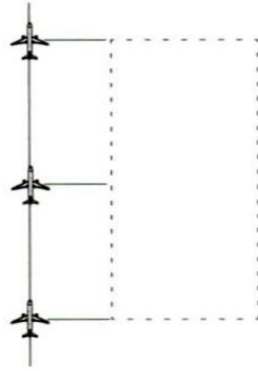
Sensörler, uydu düz bir çizgide ilerlerken görüntülenen belirli (önceden belirlenmiş) bir noktayı veya arazi bölgesini görüntülemek için anten sinyalini yönlendirir. SpotLight modu, istenen hedefin bir veya daha fazla sınırlandırılmış alandan yüksek çözünürlükte veri toplama olduğu zaman pratik bir seçenektir. SpotLight modu, aynı fiziksel anteni kullanarak Stripmap modunda elde edilebilenden daha yüksek azimut çözünürlüğü sunar ve SpotLight görüntüleri, tek bir geçiş sırasında bir bölgeyi birden fazla görüntüleme açısıyla görüntüleme imkanı sunar (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 Spotlight görüntüleme yöntemi (Kramer 2002).

2.5.2 Stripmap Görüntüleme Yöntemi

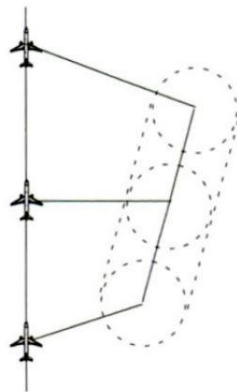
Stripmap görüntüleme yöntemi anten yönü, uçuş hattına göre sabittir (genellikle uçuş hattına normal). Sonuç olarak uydu güzergahına paralel bir arazi şeridi ölçümü anten sinyali izdüşüm boyunca hareket etmesidir. Stripmap modu normalde geniş alanların haritalanması için kullanılır, genellikle kaba çözünürlüklü görüntülerdir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9 Stripmap görüntüleme yöntemi (Kramer 2002).

2.5.3 ScanSAR Görüntüleme Yöntemi

Tarama(Scan)SAR yönteminde bir uçuş planına uygun olarak, değişik uzaklıklar ve yanabakış açılarla birden fazla sayıda şerit ya da noktanın görüntülenmesi için anten ışınını yönlendirir. Bu yöntemin mutlaka geniş kapsamlı olması gerekmez, daha ziyade bilgi ihtiyacına göredir (Şekil 2.10).



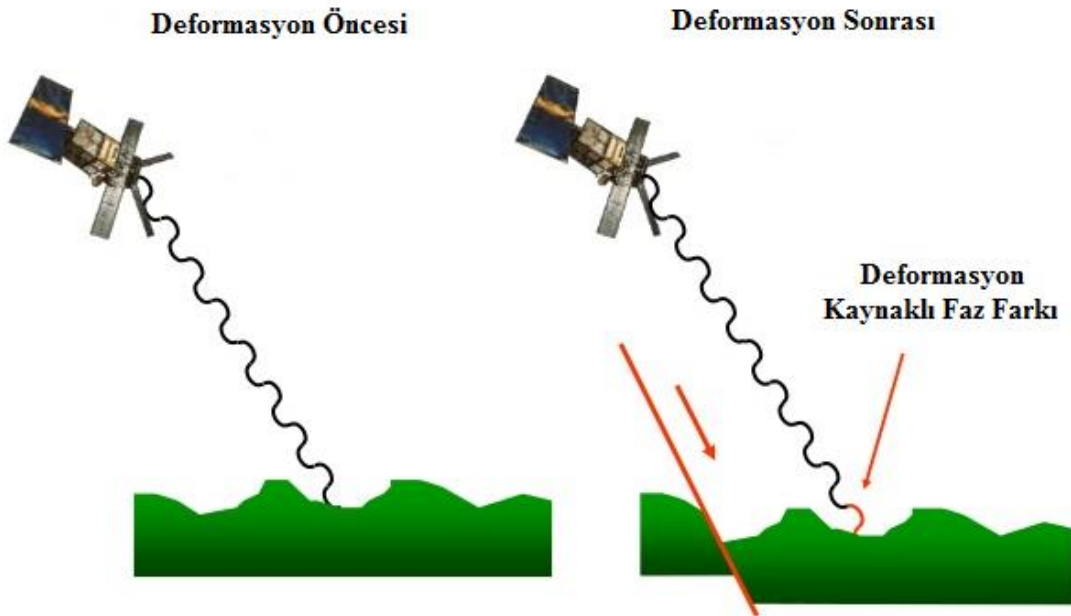
Şekil 2.10 ScanSAR görüntüleme yöntemi (Kramer, 2002).

2.6 İnterferometrik Yapay Açıklı Radar (InSAR)

2.6.1 Giriş

İnterferometrik SAR yöntemi jeodezi çalışmaları ile karşılaştırılabilecek ölçme doğruluğuna sahip olmasına rağmen yüzeydeki deformasyonun 3 boyuttaki tüm bileşenlerini ortaya çıkaramamaktadır. Deformasyonun sadece radarın bakış yönündeki bileşeni bilinebilmektedir.

SAR tekniği ile alınan radar görüntüsü, yansımaların genliklerini ve fazlarını içeren 2 boyutlu bir kayıt türüdür. Genlik bilgisi yüzeyin yansıtma yeteneğinin bir göstergesi, faz bilgisi ise hem o yüzeydeki nesnelerin radara uzaklığının bir göstergesi hem de yüzeydeki hareketlerin kayıtcısıdır. İnterferometrik SAR yönteminde en az iki SAR görüntüsünün faz farklarına bakılır ve böylelikle interferogram oluşturulur (Şekil 2.11).



Şekil 2.11 Faz Farkı.

Başarılı bir interferogram oluşturulması piksel genişliğinden daha hassas olacak şekilde iki görüntünün birbirine göre hizalanmasını gerektirir. Bu sayede her iki görüntüdeki noktaların birbirlerine göre bağıl faz farkları bulunabilir. Farklı bakış açılarından alınmış

iki görüntü arasındaki bağıl faz farkı bilgisi ile yüzeydeki nesnelerin bakış açısındaki uzaklıklarındaki değişiklikleri ve böylelikle de görüntüleme geometrisi biliniyorsa SAR görüntüsüne eş çözünürlükte yüzey topoğrafyası elde edilebilir.

Aynı bakış noktasından fakat değişik zamanlarda elde edilen iki görüntünün arasındaki faz farkı kullanılarak şayet yüzeyden yansıyan sinyallerdeki fazlarda gecikmeler varsa bunlar hassas bir şekilde ölçülebilir. Bu sayede eğer yeryüzündeki noktalar radardan, bu iki görüntünün alındığı tarihler arasında uzaklaştılar veya ona yakınlaştılsa faz değişimleri olacaktır ki bunlar santimetre altında bir hassasiyet seviyesi ile ölçülebilir.

İnterferometrik radar ilk zamanlarda topoğrafik çalışmalar için kullanılmıştır. Ancak ilk olarak Gabriel ve diğ.(1989) çalışması sonucu 1cm'lik yükseklik değişimi yeryüzü üzerindeki hareketin (deformasyonun) belirlenebileceği ortaya çıkmıştır.

2.6.2 Veri Değerlendirmede Çevresel Etkiler

İnterferometrinin temel ilkesi, radar görüntülerinin arasındaki farklılıkları kullanmaktır. Örneğin bir düzlemdeki iki antenin, görüntüleri eş zamanlı olarak elde ettiği konum farkı veya bir anten görüntüleri iki farklı zamanda elde ettiği zaman farkına sahip görüntü fazları, uygun bir eşleştirmeden sonra karşılaştırılabilir. Ortaya çıkan faz farkı 'interferogram' olarak adlandırılan yeni bir görüntü olur.

InSAR uygulamaları kolay, hızlı ve diğer ölçme uygulamalarına kıyasla daha maliyetsiz bir yöntem olmasına karşın var olan zorlayıcı ve sınırlayıcı limitlerinin olması sebebi ile veri işleme süreci kolay olmayan bir yöntem denebilir. Dolayısıyla faz ölçümlerini birçok fiziksel olay etkiler. Bu etkiler,

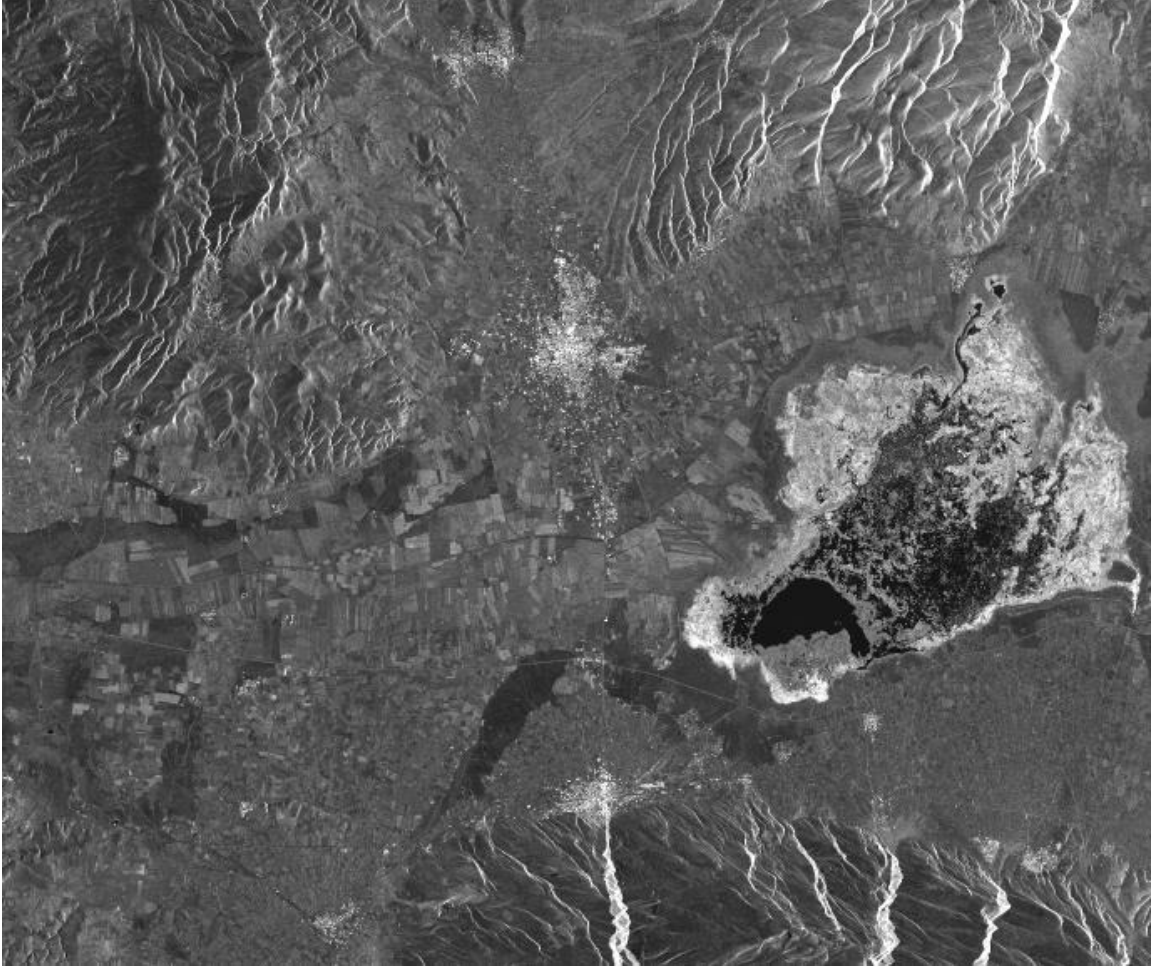
- Piksel çözünürlüğü
- Yörünge hatası
- Termal korelasyonsuzluk
- Zamansal korelasyonsuzluk
- Atmosferik etkiler
- Küresellik etkisi

- Bölge topografyası etkileri

olarak sayılabilir (Hanssen, 2001)

2.6.2.1 Piksel çözünürlüğü

Bir radar görüntüsü yüzeylerden görüntüye giren farklı gri tonlarına sahip piksellerin temsil ettiği bir görüntüdür. Bu genlik görüntüsü yeryüzünün farklı fiziksel özelliklerinden kaynaklı farklı tonlama farklılıkları gösterir. Örneğin yeryüzündeki bir beton yapı olarak zengin bir şehir merkezi ile bir su birikintisi veya gölün genlik görüntüsü arasında çok net bir şekilde gözle ayırt edilebilen gri ton farklılıkları gözlenebilir.



Şekil 2.12 Afyonkarahisar Bolvadin radar görüntüsü.

Şekil 2.12’de 03 Ekim 2016’da alınmış Afyonkarahisar’ın Bolvadin ilçesine bağlı bir kasaba olan Dişli kasabasından başlayıp Bolvadin ilçe merkezi ve diğer bir ilçesi olan Çay’a kadar uzanan TSX genlik görüntüsüdür. Görüntü alanı kuzeydoğu-güneybatı yönünde yaklaşık 40×40 km’lik bir çerçeveyi içine almaktadır. Bu görüntüde, karanlık (koyu) renkler düşük genlikli yüzey alanını gösterdiğinden Eber Gölü açık bir şekilde ayırt edebilmektedir. Görüntünün orta kısmında Bolvadin kent merkezi daha parlak görülmekte ve görüntünün kuzeydoğu-kuzeybatı ve güney-güneydoğu kısımlarındaki dağlar net olarak görülebilmektedir.

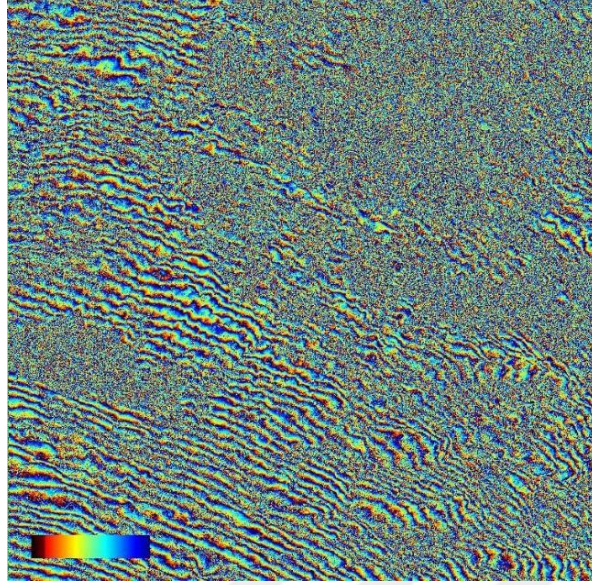
Burada önemli olan nokta, radarın bakış yönünün iki görüntü açısından aynı olmasıdır. Aksi takdirde temel hedefler (yerin gerçek görünümü) pikselin hareket doğrultusunda (along-track) farklı bir şekilde toplanacaktır. İnterferogram, iki gözlem yönü arasındaki açı ile doğrusal olarak indirgenir.

2.6.2.2 Yörünge hatası

Uydular hareketlerini önceden belirlenmiş yörünge parametreleri ile gerçekleştirirler. Ancak uydular, yerin basıklığı ve kütle dağılımındaki düzensizlikler ve bozucu diğer nedenlerden ötürü belirtilen yörüngeden az ya da çok uzaklaşırlar.

SAR geometrisi içinde ise bazın hesaplanması ve elde edilen verilerin referans elipsoidi ile ilişkilendirilmesinde yörünge bilgisi gereklidir. Yörünge bilgilerinde herhangi bir hata doğrudan SYM veya deformasyonların haritalanmasında hataya sebep olacaktır.

Yörüngede, Kepler parametrelerinin dışında gerçekleşen konum değişiklikleri hassas yörünge düzeltmesi yapılarak etkisi ortadan kaldırılmalıdır. Böyle bir yörüngesel hatanın sonucunda interferogram bozuk çıkar. Yani örgeler oluşmaz ve renkler birbirini takip eden ve kapanmayan eğrilerden oluşur (Şekil 2.13).



Şekil 2.13 İnterferogramda meydana gelen yörüngesel örgeler.

2.6.2.3 Termal korelasyonsuzluk

Termal korelasyonsuzluk, termal gürültünün interferometrik faza olan etkisi algılayıcı sisteminin sinyal-gürültü oranı (SNR) olarak tanımlanabilir. Buna göre termal korelasyonsuzluk;

$$\gamma_{\text{termal}} = \frac{1}{1+SNR^{-1}} \quad (2.2)$$

olarak formüle edilebilir.

Sinyal gürültü oranı (SNR) ise;

$$SNR = \frac{P_S}{P_N} \quad (2.3)$$

olarak verilmektedir. Burada,

P_S : Sinyalin gücü

P_N : Gürültünün gücü

SNR ise radar sistemine ait bir parametredir (Curlender ve McDonough, 1991).

2.6.2.4 Zamansal korelasyonsuzluk

Zamansal korelasyonsuzluk (χ_{zamansal}) farklı iki görüntü kayıt zamanları arasındaki kaydedilen piksellere ait geri yansıma değerlerinde oluşabilen anlamsız ve normal olmayan farkları ifade eder ve anlamsız faz ölçümlerine yol açar. Bu bölgeleri komşu pikseller yardımı ile belirlenebilir. Bunun nedeni interferogramlardaki bitişik pikseller birbirlerinden çok farklı faz değerleri alabilmektedirler, uyumsuzdurlar. Fakat bu değişimin analitik bir model olarak göstermek mümkün değildir.

Özellikle su birikintilerine sahip görüntüler birer gün aralıkla alınsa dahi su kitleleri her daim tutarsızdır bunun nedeni su yüzeyinin sürekli olarak değişmesidir. Su yüzeyinin tam anlamıyla stabil olması halinde bile, tüm enerjiyi radar antenine göre uzağa yansıtacak ve faz bilgileri alınamamasına neden olacaktır. Ayrıca tarım arazilerinde zaman farklılığından kaynaklanan tarım arazileri sürülmesi-ekilmesi veya inşaat alanlarında zamansal değişimleri interferogramlarda negatif bir durum yaratacaktır. Dolayısıyla görüntülerin seçimlerinde kurak, çıplak veya şehirler gibi değişimlerinin nadir olan bölgelerin tercih edilmesi ve tercih edilen yerlere ait bitki örtüsü vb. nesnel yapılara dikkat edilmesi elzemdir (Hanssen, 2001).

2.6.2.5 Atmosferik etkiler

Dünyamızın atmosferi homojen olmadığından interferogramlar üzerindeki etkisi de homojen değildir. SAR görüntüleri iki farklı zaman aralığında elde edilmişse, o zaman atmosferik bir etki söz konusudur diyebiliriz. Dolayısıyla özellikle tekrarlı geçiş yöntemi görüntü alımları arasında bir zaman farkı olmasından atmosferik etkinin interferogramlara etkisini arttırmaktadır. Çalışmalarda atmosferik etkilerin 6 cm'e kadar fark olduğunu yarattığını belirtmektedir (Delacourt ve diğ. 1998).

Atmosferik etkiyi iki başlıkta incelenebilir. Bunlar, troposferik etki ve iyonosferik etkidir. Atmosferik etkinin tespit edilerek ölçülerden arındırılması mümkün değildir. Dolayısıyla model veya ek parametreler kullanılması ile üstesinden gelinmesi gerekir. Atmosferik gecikmeler SAR sisteminin sebebiyle üstesinden gelinmesi çok zor olan atmosfer

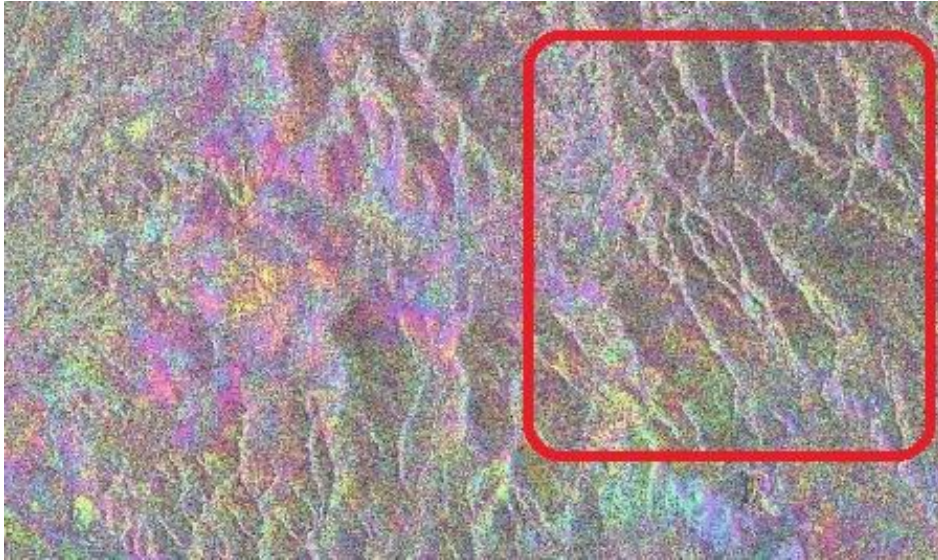
gecikmeleridir. Fakat basit bir şekilde elde edilen görüntüler aynı gün ve ayda fakat birbirini takip eden farklı yıllarda seçilirse bu durumda görüntüye etkileyen yılın o zamanındaki atmosferik etki her iki görüntüde de aynı olacağından interferogram oluşurken bunlar birbirini üstesinden gelerek görüntü üzerindeki saçılımlar ortadan kalkacaktır. Ancak her şeye rağmen yine de aynı gün içinde bile atmosfer koşulları değişebilir. Atmosferik etki fazla ise interferogram saçılımlardan oluşur.

2.6.2.6 Küresellik etkisi

İnterferogramların fazında yeryüzünde dere, göl, dağ, tepe gibi hiçbir topolojik ayrıntının bulunmaması durumunda bile dünyaya ait küresellikten kaynaklanan faz oluşumu olacaktır (Zebker ve diğ. 1994).

2.6.2.7 Bölge topoğrafyasının etkileri

Topoğrafyanın etkisi yükseltinin değişim gösterdiği yani tüm SAR uygulamalarında bozucu bir etkiye sahiptir. Bu topoğrafik etki, eşyükselti eğrileri gibi topoğrafyanın şeklini alan ve ışık dalgalarının karışması ile üretilen örgeler (fringe) oluşturur (Şekil 2.14).



Şekil 2.14 Topoğrafik örgeler.

İnterferogramdaki örgeler tıpkı topoğrafik bir haritadaki eş yükseklik eğrileri gibidir. Bunlar “topoğrafik örge” olarak adlandırılır. Arazinin nereye doğru yükseldiğini belirlemek için bir başlangıç seçmek veya topoğrafik örgeler üretmek için ihtiyaç duyulan yükseklik değişimini kullanmak uygundur. Topoğrafyanın etkisinin kaldırılabilmesi için ya farklı bir kaynaktan oluşturulmuş olan bir sayısal yükseklik modeli ya da deformasyon içermeyen bir radar görüntüsü kullanılmalıdır.

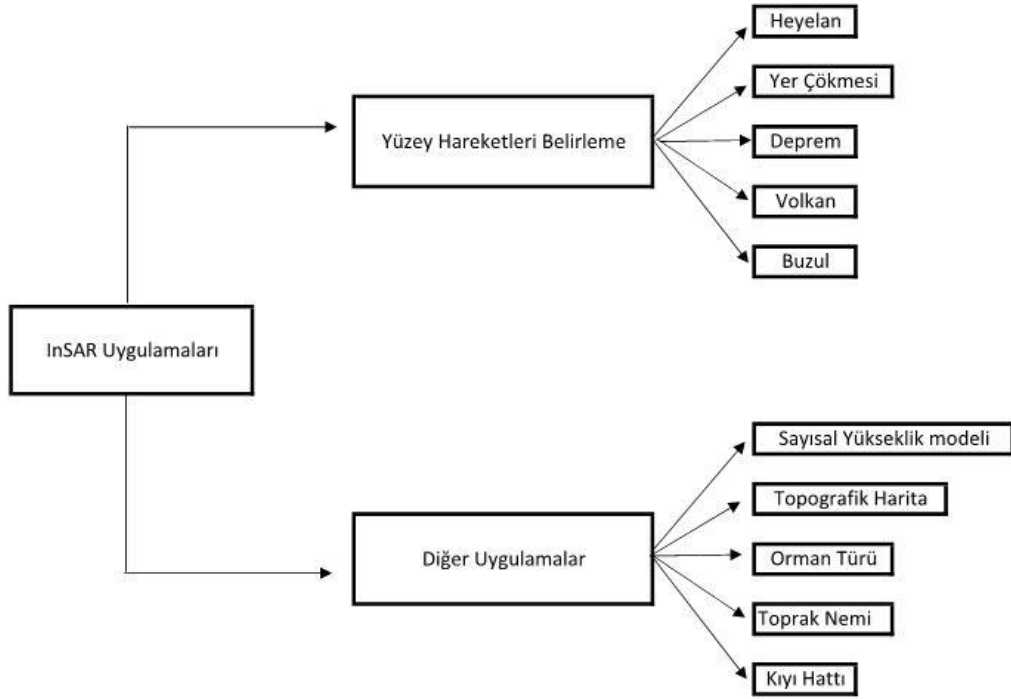
Bu çalışmada sayısal yükseklik modeli olarak SRTM3 verisi kullanılmış ve beklenen sonuçlar elde edildiği için de SYM olarak başka bir görüntü çifti kullanılmaya ihtiyaç duyulmamıştır.

Bu etmenin üstesinden gelinmesi için prensipleri temelde aynı fakat yöntem olarak iki farklı uygulama bulunmaktadır. Birinci uygulamada sayısal yükseklik modeli (SYM) ve interferogram kullanılır. Belirtilen uygulamada, istenmeyen etkiyi SYM yardımı ile simüle edilir ve elde edilen bu simülasyon interferogramlardan çıkartılır (Massonnet ve diğ. 1993). İkinci yöntem ise iki interferogram kullanılarak gerçekleştirilir.

Bu iki yöntem sırasıyla iki geçişli interferogram (two-pass interferogram) ve üç geçişli interferogram (three-pass interferogram) adlarını almıştır. İkinci yöntemde, yüzey değişimi içerdiği tahmin edilen ilk interferogramdan deformasyon bulunmayan ikinci interferogram çıkarılır.

2.6.3 InSAR Uygulama Alanları

InSAR yönteminin başlıca uygulamaları; yeryüzeyi hareketleri belirlenmesi ve diğer uygulama alanları şeklinde iki bölüme ayrılabilir.



Şekil 2.15 InSAR uygulama alanları.

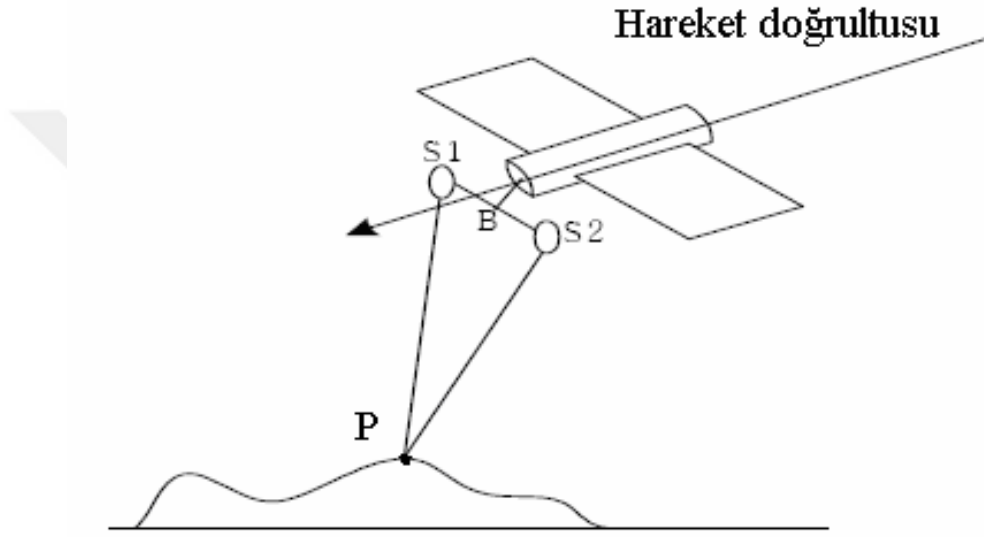
Yeryüzeyi hareketleri incelemeleri için buzul hareketleri, volkan hareketleri, deprem sel yer değıştirme, yer çökmesi ve heyelan belirlemeleri sayılabilir. Diğer uygulamalar ise içerisinde kıyı hattı, toprak nemi, orman türü, topoğrafik haritalama ve SYM oluşturma çalışmaları sayılabilmektedir (Şekil 2.15)

2.6.4 Interferometrik SAR teknikleri

SAR verilerinin elde edilme aşamasında üç ana teknik kullanılmaktadır. Bu teknikleri ayıran en önemli parametre baz hattının yönüdür. Ayrıca teknikler isimlerini antenin platforma yerleştirilme durumuna göre aldıkları için veri toplamada ikinci önemli nokta antenin platformdaki konumudur. Bu üç teknik, across-track (hareket doğrultusuna dik), along-track (hareket doğrultusunda) ve repeat pass (tekrar- geçiş) interferometre tekniğı olarak adlandırılmaktadır. Üç yöntemle de elde edilen verilerin karşılaştırılmasında çok önemli bir fark bulunmamaktadır.

2.6.4.1 Hareket doğrultusuna dik (across-track) interferometri tekniği

Bu teknikte iki SAR anteni aynı platforma monte edilmiştir. SAR verileri; aynı anda iki antenden (S_1 , S_2) ve aynı bazdan (B) hedef alana (P) ait veri alabilirler. Burada baz hattı uçuş yönüne diktir (Şekil 2.16). Teknik, genellikle uçaklarla yapılan çalışmalarda kullanılır. Bu yüzden elde edilen master ve slave görüntüler farklı konumlardan elde edilseler de aynı tarihlerde kaydedilmiş olurlar (Zou *et al.* 2009).



Şekil 2.16 Baz ile hareket doğrultusunun geometrik (dik) gösterimi.

Buradaki temel problem; yöntemin uçaklar ile gerçekleştirilmesi ile ortaya çıkan, uçağın rotadan sapma ihtimalinin uydulara göre daha olası olmasıdır. Uçak rotadan çıktığı anda kaydedilen görüntü topoğrafyadaki eğimin etkisinden ayırt edilemez.

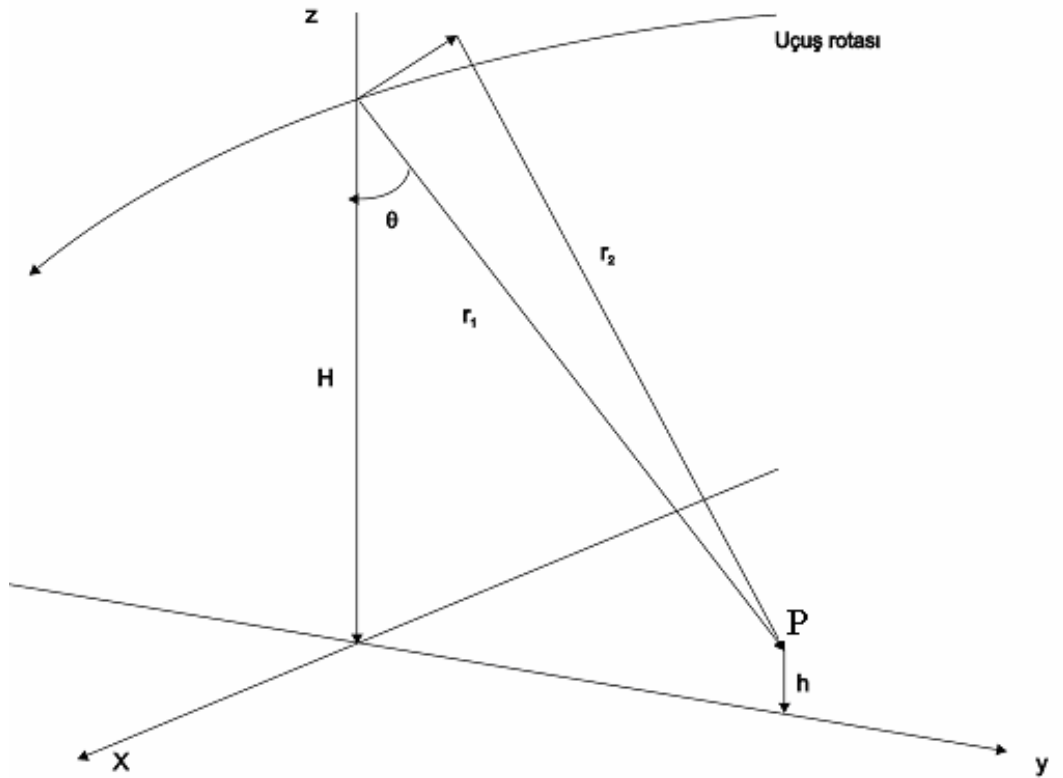
Şekil 2.17’de görüldüğü gibi antenler uçuş doğrultusuna dik gelecek şekilde platforma yerleştirilir. θ bakış doğrultusu altında hedef noktasının yatay uzaklığı (uçuş doğrultusuna dik);

$$y = r_1 \sin \theta \quad (2.4)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Diğer yandan h yüksekliği için,

$$h = H - r_1 \cos \theta \quad (2.5)$$

eşitliği geçerli olur. Bu teknik Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) oluşturmak için de elverişlidir. Aynı zamanda hareket doğrultusunda interferometri tekniği ile elde edilen verilerle birlikte kullanımında okyanus dalgaları da ölçülebilir (Zou *et al.* 2009).



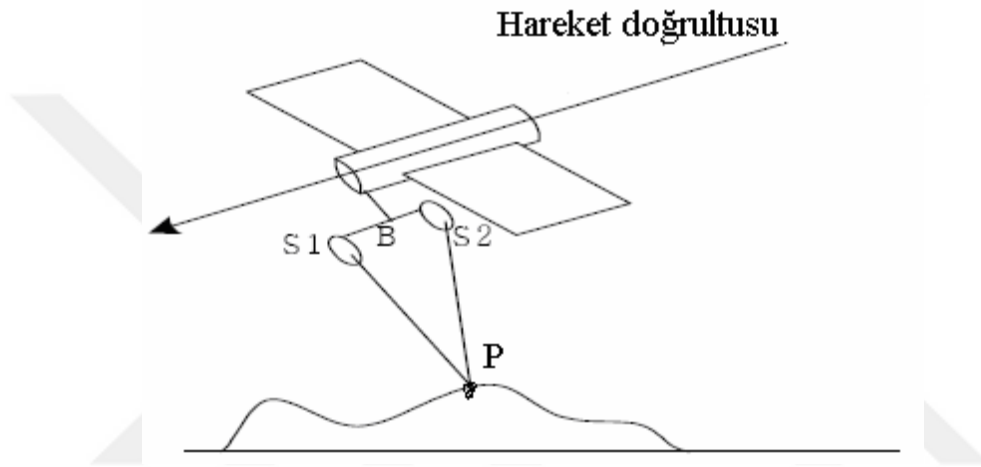
Şekil 2.17 Hareket doğrultusuna dik interferometri (Gens 1998).

Yüzeydeki aynı nesneye bir antenden r_1 ve diğer antenden r_2 olarak tanımlanan yan bakış uzaklıkları ölçülmektedir. Bakış açısı θ ve uçuş yüksekliği H 'dır. h ise hedef noktanın yüksekliğidir (Şekil 2.17).

Yöntemin matematik esasları ve daha fazla bilgi Moccia ve Vetrella'nın (1992) çalışmalarında bulunabilir.

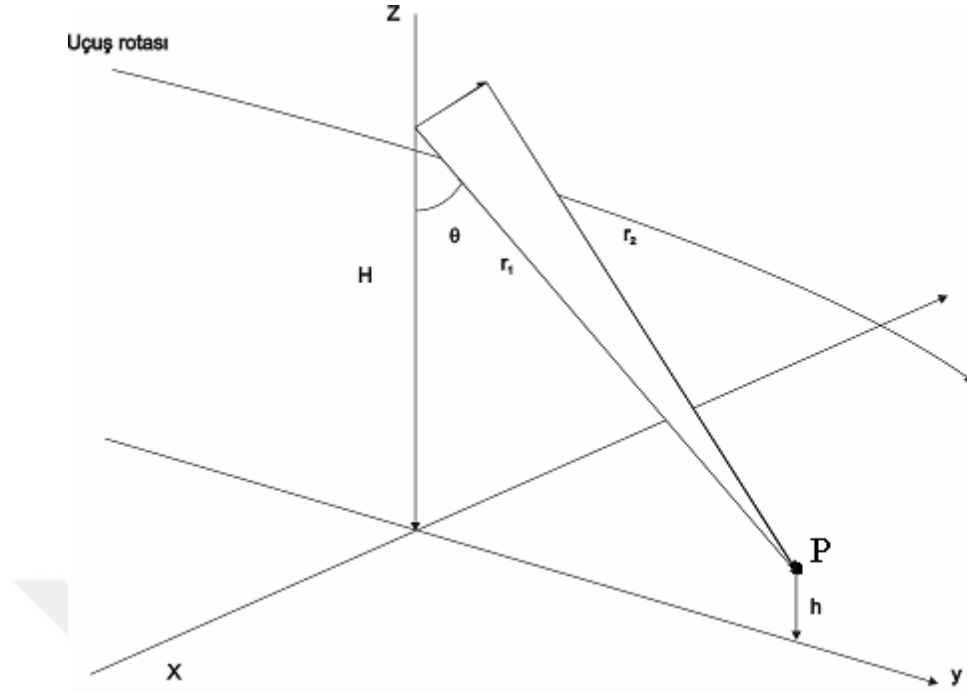
2.6.4.2 Hareket Doğrultusunda (along-track) İnterferometri

Aynı platformda iki SAR antenin (S₁, S₂) kullanıldığı, aynı bazdan (B) hedef alana (P) ait veri alınabildiği bir diğer yöntemdir. Kısıtlı bir kullanıma sahip olmakla birlikte genellikle uçaklar ile yapılan SAR uçuşlarında uygulanmaktadır. Okyanuslardaki akıntıların incelenmesi, hareket eden cisimlerin takip edilmesi gibi amaçlar için kullanılmaktadır. Diğer yönleme göre en önemli farkı baz hattının uçuş yönüne paralel olmasıdır (Şekil 2.18).



Şekil 2.18 Baz ile hareket doğrultusunun geometrik (paralel) gösterimi.

Tekniğe ait geometri ise özellikler Şekil 2.19’da görüldüğü gibidir. Yüzeydeki aynı nesneye bir antenden r_1 ve diğer antenden r_2 olarak tanımlanan yan bakış uzaklıkları ölçülmektedir. Bakış açısı θ ve uçuş yüksekliği H ’dır. h ise hedef noktanın yüksekliğidir



Şekil 2.19 Hareket doğrultusunda interferometri (Gens 1998).

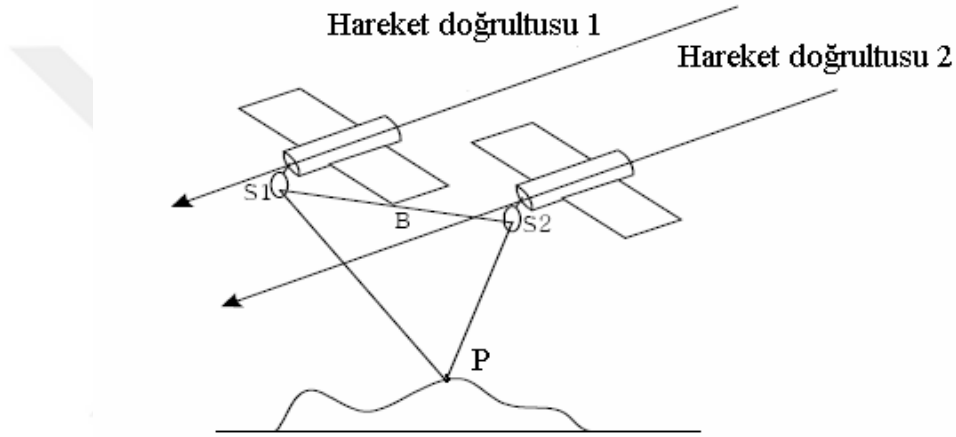
Yöntemin matematiksel esasları bir öncekinden farklı değildir. Sadece eksen yönleri değişmiştir. Denizlerdeki akıntıların incelendiğini düşünürsek sinyaller arasındaki faz farkı ϕ akıntının hareketi ile meydana gelecektir. Hareket eden yüzey sudaki dalgaların faz hızına göre bir Doppler atımına sebep olacaktır. Yöntem ile sadece hareket eden kısımlar radar görüntüsünde görünecektir. Bir noktanın veya nesnenin hızı u ile faz farkı arasındaki ilişki,

$$\phi = \frac{4\pi u}{\lambda v} B_x \quad (2.6)$$

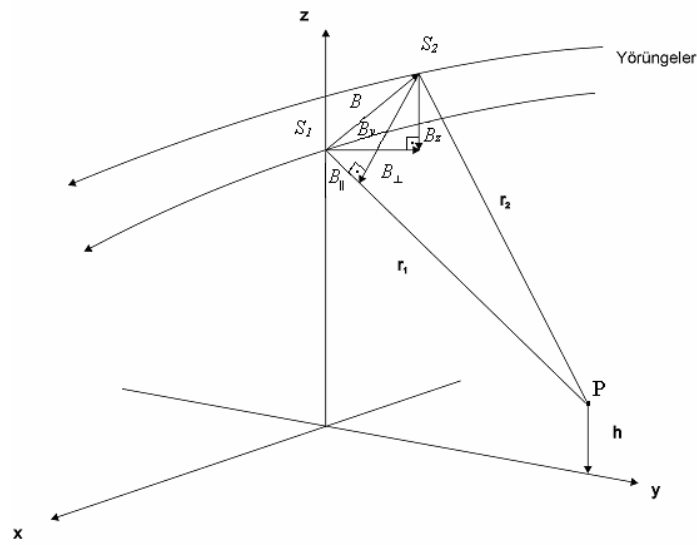
eşitliğiyle tanımlanır. Burada v uçağın hızını, λ dalga boyunu ve B_x 'de baz uzunluğu bileşenidir. İnterferometrik ölçümlerin duyarlılığı uygun baz seçimine bağlıdır. Yukarıda bahsedilen iki yöntemde de 2 SAR anteni aynı platformda olduğu için uygun baz uzunluğunu seçmek mümkün olmayacaktır.

2.6.4.3 Tekrar-geçiş (repeat pass) interferometri yöntemi

Bu yöntemde tek bir hava aracı ve bu araca yerleştirilmiş tek SAR algılayıcısı söz konusudur. Hedef bölge üzerinden uydunun biraz farklı bir bakış açısı ile tekrar geçmesi ikinci bir anten işlevi görür. Bu yöntem için uçuş yörüngelerinin çok hassas olarak bilinmesinin önemi büyüktür. Uyduların bu yöntemde tercih edilmesinin nedeni bundandır. Şekil 2.20 tekrar-geçiş interferometrisinin genel yapısını, Şekil 2.21 ise yönteme ait geometrik özellikleri ortaya koymaktadır.



Şekil 2.20 Tekrar-geçiş interferometri.



Şekil 2.21 Tekrar geçiş interferometri geometrisi (Gens, 1998).

Uyduların yörünge konum bilgilerinden hesaplanan B baz büyüklüğünden veya radar algılayıcılarla ölçülen hedef eğik uzunlukları r_1 ve r_2 arasındaki farktan yararlanılarak antenler arası mesafe bulunabilir. Faz farkı bilgisine ise, φ

$$\Delta\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda} B_{ll} \quad (2.7)$$

formülü ile ulaşılabilir.

Tekrar geçiş geometrisini kullanarak bir bölgenin bir sayısal yükseklik modeli çıkartılmak istenirse, ilk aşama iki SAR görüntüsündeki her resim elemanına karşılık gelen yer noktasının yüksekliği h' hesaplayabilmek olacaktır. Radarın dalga boyu zaten bilinmektedir. Hassas uydu yörünge verilerinden de uydunun uçuş yüksekliği H ve anten açıklığı B de hesaplanabilmektedir. Şekil 2.21'den faz farkı $\Delta\varphi$ interferogramı oluşturmaktadır. İki radar görüntüsünün alındığı tarihler arasında hedef yüksekliklerin ve diğer özelliklerinin aynı kaldığı atmosferik etkilerden dolayı gecikme kabul edilir ve anten konfigürasyonu hassas olarak bilindiği varsayılırsa hesaplanan faz farkları incelenen bölgenin yüksekliklerinin bulunmasını sağlar.

Eğik uzunluklar (r_1 , r_2) arasındaki farklar, ilgili faz farklarının radar sinyalinin dalga boyu ile çarpılması ile hesaplanabilirler.

2.6.5 İnterferometrik Veri İşleme Adımları

InSAR uygulamalarında kullanılacak görüntüler islenmiş (SLC-single look complex) olabileceği gibi islenmemiş ham (raw) halde de temin edilebilir. Ham veri temin etmenin kullanıcıya faydası faz verilerine ilişkin daha fazla kontrol ve esneklik sağlamasıdır. Ham veriyi işlemek için gerekli süre bu yöntemin olumsuz yönüdür ancak günümüzde bilgi işlem teknolojilerindeki gelişmeler bu durumu sorun olmaktan çıkarmıştır. Ayrıca ham veriler işlenmiş verilere göre daha ucuzdurlar.

Bu tez çalışmasında söz konusu işlem Delft Üniversitesi'nde geliştirilen DORIS yazılımı kullanılarak uygulanmıştır. İki görüntü arasında geometri veya başka nedenlerle meydana gelebilecek kayıklıkları gidermek için resimlerin birbirine göre hizalanması gerekmektedir. Doris, kompleks görüntülerin genlik değerlerini kullanarak kayma veya gerilme gibi hata miktarlarını hesaplamaktadır.

Görüntüler birbirlerine göre hizalandıktan sonra referans görüntüdeki her bir karmaşık değerli pikselin faz bileşeni, diğer görüntüdeki eşlenik faz bileşeninden çıkartılır. Ortaya çıkan sonuç yine bir karmaşık görüntü olup interferogram adını alır. Interferogramın faz değerleri 2π 'nin katları biçimindedir.

Interferogramdaki gürültü miktarını azaltıp ve benzeşimi (coherence) arttırabilmek için piksellerin boyutuna radarın gidiş ve bakış yönünde müdahale edilebilir. Buna çoklu bakış (multilook) tekniği adı verilir.

Interferogram oluşturulmasını izleyen diğer asama filtreleme aşamasıdır. Filtre olarak bu çalışmada için Goldstein ve Werner (1998) tarafından geliştirilmiş ağırlıklandırılmış güç spektrumu filtresi kullanılmıştır.

Yeryuvarının geometrik referans yüzeyi elipsoit interferometrik faza etki etmektedir. Etki faz değerlerinden çıkarıldığında uygulanan işlem adımına interferometrik düzleştirme (flattening) denmektedir.

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

Çözümleme işleminin de tamamlanmasıyla geriye kalan son işlem adımı sonuç ürünün yer koordinat sistemiyle ilişkilendirilmesidir. Tüm proses boyunca radar anteninin bakış yönünde olan interferogram bu işlem ile gerçek (örneğin coğrafi) koordinatlarla ilişkilendirilmiş olur.

2.7 PS-InSAR (Persistent Scatterer InSAR)

2.7.1 Giriş

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

Diferansiyel SAR İnterferometri (DInSAR), yerkabuğu hareketlerinin ölçülmesinde oldukça etkili bir yöntemdir. Ancak bu yöntemde interferogramların hemen hemen hepsi çok büyük alanları kapsarlar bu durumda sinyallerin ilintisizleşmesine (decorrelate) ve ölçüm yapılamamasına sebep olmaktadır. Son yıllara geliştirilen PS-InSAR (Persistent scatterer interferometry) yöntemi sayesinde bu sorun ortadan kaldırılmıştır (Hooper v.d. 2004).

Sayılan güçlükleri aşmak için yine son yıllarda “Permenant Scatterers InSAR” (PSInSARtm) yöntemi kullanılmaktadır (Feretti *et al.* 2001, Meisina *et al.* 2006, Colesanti *et al.* 2003a). Hep aynı (permanent) yansıtma özelliği gösteren hedeflerden (scatters) gelen sinyaller kullanılarak bölgede meydana gelen milimetre büyüklüğündeki değişimler alansal ve zamansal olarak tespit edilebilmektedir.

Genel olarak literatür çalışmalarında PS-InSAR sonuçlarının anlamlı olabilmesi için en bir bölgede aynı çerçevede mevcut az 12 görüntünün değerlendirilmesi gerekmektedir (Hooper *et al.* 2007). Ölçümlerdeki ve hata payı istatistiksel olarak görüntü miktarı ve zamansal dağılımına bağlıdır. Hooper vd. PS interferometri tekniğini farklı bir yaklaşımla ele alarak 2007 yılında yaptıkları kabuk hareketlerinin deformasyon analizinde StaMPS/MTI (Stanford Method for Persistent Scatterers/Multi-Temporal InSAR) yöntemini geliştirmişlerdir. Bu yöntem, bina gibi belirgin nesneler olsun olmasın, her arazi türünde analiz yapmak için düşük faz değişimi gösteren pikselleri bulmada interferometrik fazın mekansal korelasyonunu kullanmaktadır.

PS (Kalıcı 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 GNSS istasyonlarından oluşan GNSS ağı 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 gözlemlenebilir (Ferretti *et al.* 2000).

2.7.2 Matematiksel Esas ve Ölçüm Duyarlılığı

InSAR ölçümleri topografya, 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 *et al.* 2001, Colesanti *et al.* 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 topoğrafik faz bileşeni gözlemlerden çıkarılmak durumundadır.

Buna göre; InSAR gözlem denklemi faza etki eden bağımsız ve genellikle birbiriyle korelasyonsuz görülen büyüklüklerin toplamı biçiminde yazılır,

$$\Delta\phi = \phi_{\text{flat}} + \phi_{\text{topo}} + \phi_{\text{orbit}} + \phi_{\text{defo}} + \phi_{\text{tropo}} + \phi_{\text{iono}} + \phi_{\text{scat}} + \phi_{\text{noise}} \quad (2.8)$$

Burada,

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

ϕ_{flat} : Düzleştirilmiş yeryuvarı fazı

ϕ_{topo} : Topoğrafik faz etkisi

ϕ_{orbit} : Yörüngeyel faz etkisi

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

ϕ_{tropo} : Troposferik faz etkisi

ϕ_{iono} : İyonosferik faz etkisi

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

ϕ_{noise} : Bileşke gürültü

PS-InSAR 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 çözünürlüklü 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 *et al.* 2011).

ERS verilerinde kilometrekarede yaklaşık 100-500 PS elde edilirken, TerraSAR-X verilerinde yaklaşık <10.000 PS/km² elde edilebilir (Adam *et al.* 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 mekansal ve mantıksal yakınlık beraberinde daha fazla ilişkiyi getirir. Aynı yapı üzerinde bulunan PS'lerin yer değişimi birbirleri ile ilişkilidir ve bu bilgi PS-InSAR analizlerini geliştirmede kullanılabilir.

Bu tez çalışmasında PS noktalarının seçimi, deformasyon türüne ve alan karakteristiğine uygun olarak optimal düzeyde seçilmiştir. Bu oran uygulanacak ileri InSAR Teknik çeşidi (StaMPS, SBAS veya MTI, gibi) ve alan büyüklüğüne göre belirlenebilir. Örneğin, sadece Bolvadin ilçe merkezini çevreleyen bir alanda ortalama 1000-5000 nokta arasında PS noktası seçilmesi uygun olacaktır. PS noktalarının seçim yoğunluğu istenilen duyarlılığa göre manüel olarak ayarlanabilir. Kent merkezlerinde özellikle TerraSAR-X gibi X bantta çalışan uydular için yansıtıcı özelliği yüksek olan objelerin (binalar, yüksek yapılar, vs.) 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. Bu tez çalışması için X bantta çalışan TSX verileri kullanılmıştır.

2.7.3 PS-InSAR Tekniği ve farklı yaklaşımlar

Çoklu interferometre uygulamalarında, görüntü çiftlerinden elde edilen interferogramların bir zaman serisi olacak şekilde eşleştirilmesi için geliştirilmiş birçok farklı algorithmadan 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 (PSINSARTM)) (Ferretti *et al.* 2000, 2001)
- Delft InSAR (Delft PS-InSAR processing package (DePSI)) (Ferretti *et al.* 2001, Kampes, 2005)
- Kısa Baz Uzunluğu İnterferometri (Small Baselines Interferometry (SBAS)) (Berardino *et al.* 2002)
- Kalıcı Yansıtıcı İnterferometri (Persistent Scatterer Interferometry (PS-InSAR - PSI)) (Hooper *et al.* 2004, Kampes, 2005, Kampes, 2006)
- Kalıcı Yansıtıcılar için Standford Yöntemi (Standford Method for Persistent Scatterers (StaMPS) - Çoklu Zamansal InSAR (Multi-Temporal InSAR - MT-InSAR) (Hooper *et al.* 2004))

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, PS-InSAR(PSI) ve PSInSARTM ile çok basit teori farklılıkları dışında benzer çalışma prensibine sahiptirler.

PS-InSAR tekniği diğer interferometrik tekniklere göre birçok avantaja sahip olsa da uygulamada bazı zorluklar ile karşılaşılır. Bu zorluklar DInSAR tekniği için de geçerlidir

- 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 korelasyonsuzluk 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 uyumsuzluğa 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).
- PS-InSAR tekniği ile tespit edilebilmesi en güç alanlardan biride, erozyonlu alanlardır. Erozyon, yeryüzünün yüzey karakterini değiştirdiği için potansiyel bir uyuşumsuz görüntünün var olmasına neden olmaktadır. Fakat PS-InSAR 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.

PS-InSAR tekniğinin DInSAR tekniğinden olan başlıca farklılıkları ise:

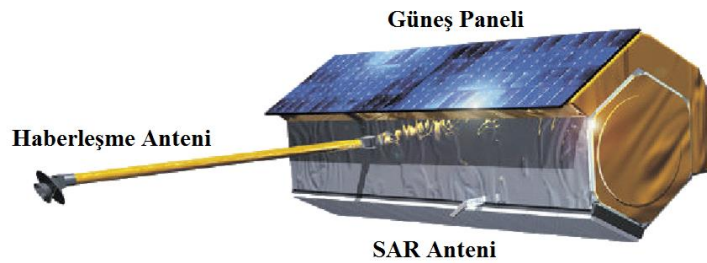
- PS-InSAR yüzey deformasyonlarını DInSAR'dan daha doğru bir şekilde ölçme yeteneğine sahiptir.
- Geometrik ve zamansal uyuşumsuzluk etkilerinin giderilmesi DInSAR yöntemiyle daha sınırlı iken PSInSAR tekniği bu konuda oldukça başarılıdır.
- PS-InSAR tekniği SAR görüntülerinde uzun zaman serileri kullandığı için sinyal fazındaki atmosferik etkinin giderilmesinde daha etkin iken DInSAR tekniği bu denli başarılı değildir.
- PS-InSAR çeşitli geometrik edinimlerin kullanılmasında daha büyük bir esneklik sağlar. DInSAR ise normal baz kullanımda 200 metrenin üzerindeki uygulamalar için birtakım sınırlamalara maruz kalır. PS-InSAR için normal baz kullanımında herhangi bir sınırlama yoktur, 200 metrenin üzerinde seçilmiş baz uzunluklarında bile problemsiz çalışma olanağı sağlar.

- Ancak PS-InSAR’da görüntü işlemek için en az 12 görüntüye ihtiyaç duyulur. DInSAR da ise böyle bir görüntü sınırlaması yoktur, uygun koşulları içeren iki görüntüyle deformasyon analizi çok daha hızlı bir şekilde yapılabilir.

şeklinde sıralanabilir.

2.8 Uydu Bilgileri

TerraSAR-X, bu çalışma için verilerin temin edildiği Almanya’ya ait radar yer gözlem uydusudur. Tarihler 15.06.2007’i gösterdiğinde Rusya’nın Kazakistan’daki Baykonur Uzay Üssü’nden gönderilmiştir. Çalışma ömrü <5 yıl öngörülmüştür (Şekil 2.22).



Şekil 2.22 TerraSAR-X uydusu.

Proje, Alman Bilim ve Eğitim Bakanlığı’na (BMBF) bağlı Alman Havacılık ve Uzay Merkezi (DLR) ve Astrium GmbH arasında gerçekleşen bir kamu özel ortaklığıdır (PPP). DLR; uydu kontrol sistemini, yer bölümünün alım, işlem ve arşiv süreçlerini ve X-band SAR verisinin dağıtımını üstlenmektedir. Dağıtım ve ücretlendirme Infoterra GmbH’a aittir.

Çizelge 2.1 TerraSAR-X uydusunun görüntü ürün çeşitleri.

Ürün Tipleri	Açıklama
SSC (Single Look Slant Range Complex)	Genlik ve faz bilgisi içeren kompleks veri.
MGD (Multi Look Ground Range Detected)	Çoklu bakış işleminden geçirilmiş yer menzil verisi.
GEC (Geocoded Ellipsoid Corrected)	MGD ürününün UTM/UPS projeksiyonu
EEC (Enhanced Ellipsoid Corrected)	GEC ürününün topografik olarak düzeltilmiş versiyonu.

Çizelge 2.2 TerraSAR-X uydu özellikleri.

Yörünge	Güneş Senkronize
Fırlatılma Üssü	Baykonur, Kazakistan
Fırlatılma Zamanı	15 Haziran 2007
Taşıyıcının adı	Dnepr-1
Uydunun Ağırlığı	1230
Uydunun Ebatı	4.88
Uçuş İrtifası	4.88m x 2.4m
Zamansal Çözünürlüğü	1m , 3 m, 16 m
Radar Frekans ve Dalga Boyu	11gün
Polarizasyon	9.65 Ghz (X bandı)
Yörünge Eğikliği	97.45°
Mekansal Çözünürlük	514000 m

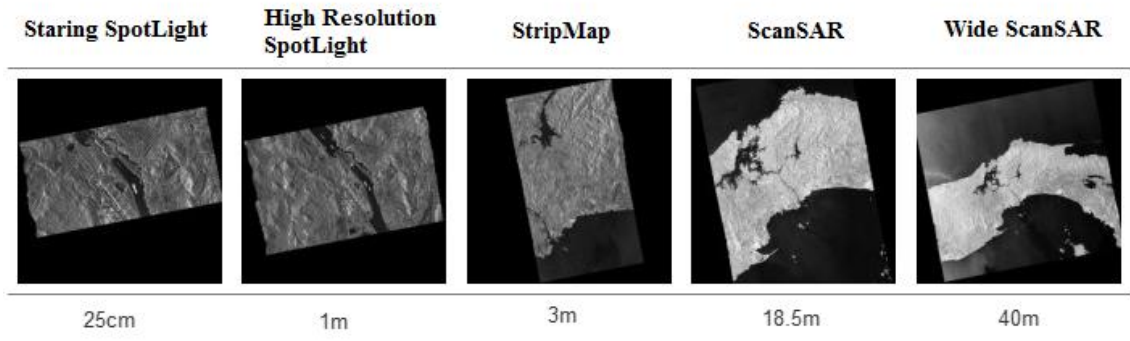
ERS ve Envisat uydu için farklı iki adet yörünge bilgisi verisi mevcuttur. Bunlar ERS ve Envisat için yörünge bilgilerini derleyip sunan “Delft Institute for Space-Oriented Space Research” (DEOS), diğer bir kaynak ise Avrupa Uzay Ajansı (ESA)’dır. DEOS’a ait yörünge bilgisi internet üzerinden herhangi kısıtlamaya dahil olmadan indirilebilir, fakat ESA’ya ait yörüngelerin bilgisini sahip olmak için ESA’dan bu istekle ilgili izin almak gerekmektedir. Bu çalışmada TSX uydu görüntüleri kullanıldığından, ESA veya DEOS tarafından üretilen herhangi bir yörünge bilgileri kullanılamamıştır.

Bu çalışmada TSX uydu görüntüleri kullanıldığından, ESA veya DEOS tarafından üretilen herhangi bir yörünge bilgileri kullanılamamıştır.

Çizelge 2.3 TerraSAR-X uydusu görüntüleme modları teknik özellikleri.

Görüntüleme Modu	Görüntü Boyutu (km)	Eğik Mesafe Çözünürlüğü(m)	Azimut Çözünürlüğü (m)	Polarizasyon
Staring SpotLight (ST)	4 x 3.7	0.6	0.24	Single (VV veya HH)
HighRes SpotLight 300MHz	10 x 5	0.6	1.1	Single (VV veya HH)
HighRes SpotLight (HS)	10 x 5	1.2	1.1	Single (VV veya HH)
		1.2	2.2	Dual (HH / VV)
SpotLight (SL)	10 x 10	1.2	1.7	Single (VV veya HH)
		1.2	3.4	Dual (HH / VV)
StripMap (SM)	30 x 50 single pol	1.2	1.7	Single (VV or HH)
	15 x 50 dual pol	1.2	3.4	Dual (HH / VV, HH / HV, veya VV ve VH)
ScanSAR (SC)	100 x 150	1.2	18.5	Single (VV veya HH)
Wide ScanSAR (WS)	100 x 150	1.7 - 3.3	40	Single (VV, HH, HV veya VH)

TerraSAR-X uydusuna ait SpotLight, StripMap ve ScanSAR modlarının görüntüleme yöntemlerinin açıklanması “2.5 SAR Görüntüleme Yöntemleri” kısmında ayrıca değinilmiştir (Şekil 2.23).



Şekil 2.23 TerraSAR-X uydu çözünürlük karşılaştırması.



3. UYGULAMA VE BULGULAR

3.1 Giriş

Bu tez çalışmasında kullanılan veriler TerraSAR-X uydusuna ait işlenmiş tek bakışlı kompleks görüntülerdir (single look complex / SLC – level 1).

2016 ve 2018 yıllarını kapsayan yaklaşık 2 yıllık bir dönemden seçilen 17 adet SAR görüntüsü kullanılmıştır.

İnterferogramların elde edilmesi için ise Delft Üniversitesi'nde geliştirilen DORIS (Delft Object-Oriented Radar Interferometric Software) yazılımı kullanılmıştır.

Ayrıca bu tez çalışmasında Leeds Üniversitesi'nde geliştirilen, StaMPS/MTI (Stanford Method for Persistent Scatterers (StaMPS) - Çoklu Zamansal InSAR (Multi-Temporal InSAR - MT-InSAR) yazılımının son sürümü olan 4.1b1 sürümü kullanılmıştır.

StaMPS/MTI uygulaması, eş fazlı pikselleri tanımlamak ve bu pikseller için deformasyon sinyalinin çıkarmak için C ++ programlarını ve matlab komut dosyalarını içerir.

Farksal interferogramlar ve yer değiştirme görüntülerini üretmek için verilerin işlendiği bilgisayar Ubuntu 16.04 işletim sistemi, Intel Core i7 2720QM 2.20-3.30 GHz işlemci ve 12 GB RAM konfigürasyona sahiptir.

3.2 Çalışma Bölgesinin Tanıtımı

Yüzölçümü 14570 Km² olan Afyonkarahisar ülkemiz topraklarının %1,8'i kadardır. Afyonkarahisar ilinin büyük bir bölümü Ege Bölgesinin iç batı olarak adlandırılan kesiminde bulunur. İlin doğusunda kalan topraklar İç Anadolu Bölgesinin özelliklerini gösterir. Güneybatıda kalan çok küçük bir parçada Akdeniz karakteristiğini görmek mümkündür. Afyonkarahisar ili, kuzeyden güneye doğru uzanarak, Batı Anadolu ile İç Anadolu Bölgelerini birleştiren yüksek alanın güney parçasını oluşturmaktadır. Bu konumu ile Kuzeybatı Anadolu'ya bağlayan önemli bir merkezdir.

Denizden yüksekliği 1,034 m. olup, 37°45' ve 39°17' kuzey enlemi, 29°40' ve 31°43' doğu boylamı üzerinde yer almaktadır. Afyonkarahisar ili arazisinin %47,5'nı dağlar, %32,6'sını platolar ve %19,9'unu ovalar oluşturur.

Afyonkarahisar iline, kuzeyinde Eskişehir (144 km), kuzeybatısında Kütahya (100 km), doğusunda Konya (223 km), güneyinde Isparta (169 km), güneybatısında Denizli (225 km) ve batısında Uşak (116 km) illeri komşu olur. Ayrıca Afyonkarahisar ili, güneybatısındaki küçük bir sınırla Burdur (170 km) iline de komşudur (Şekil 3.1).



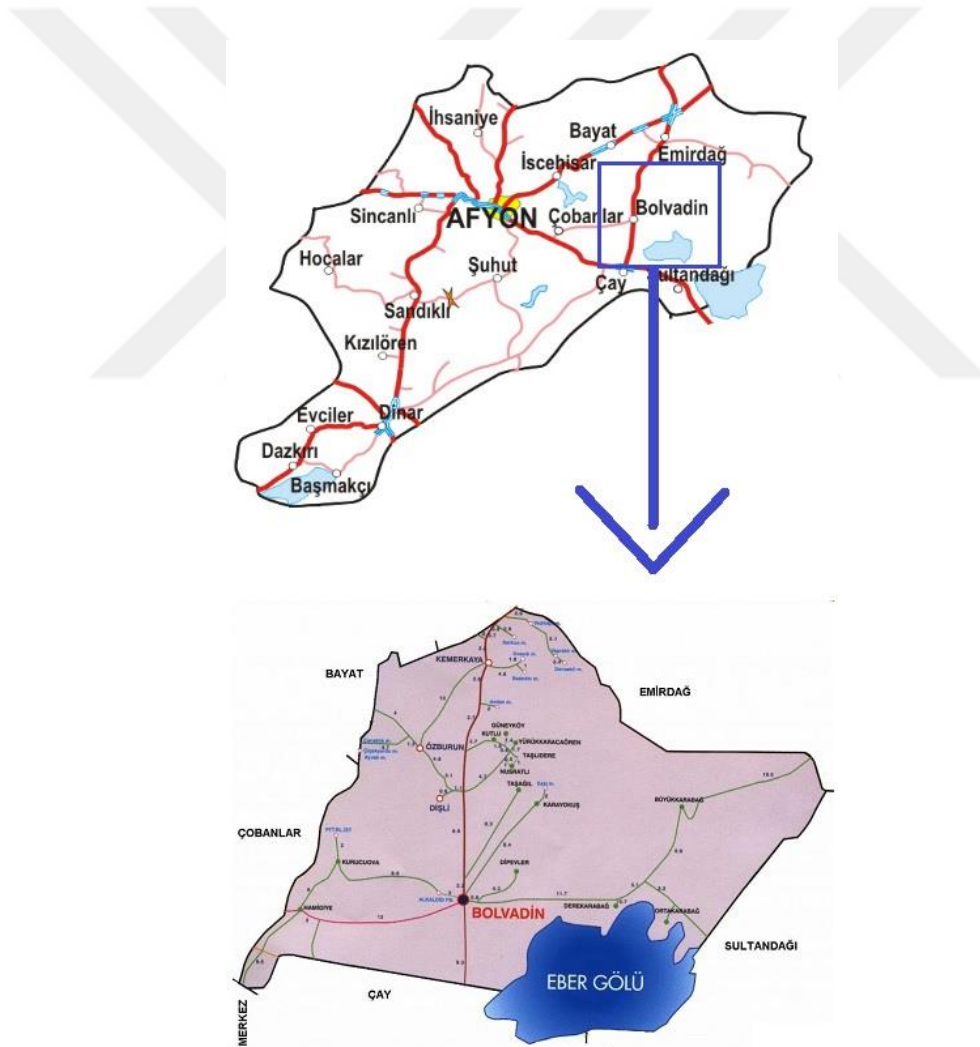
Şekil 3.1 Afyonkarahisar'ın Türkiye'deki konumu.

Bolvadin 3.ve 4. jeolojik devirlerde oluşmuş bir ovadır. Güneyden Sultandağları (2 519 m), kuzeydoğudan Emirdağları (2 307m) ve kuzeybatıdan Paşadağları (2 000m) ile

çevrilidir. Bolvadin, 31°2' dakika doğu meridyeni ile 38°43' kuzey paralelinin kesiştiği noktada, derin ve uzun bir alüvyon ova üzerine kurulmuştur (Şekil 3.2).

Ege bölgesinin İç Batı Anadolu kesiminde yer alan Bolvadin güneyden Sultandağları, kuzeydoğudan Emirdağları ile çevrilidir. Deniz seviyesinden ortalama yüksekliği 1 016 metre ve yüzölçümü %12.84'ünü oluşturur.

Bolvadin'in arazileri genellikle ovadır. İlçenin yüzölçümünün ortalama %40'ı tarımsal sahadır. Bolvadin yeraltı suları bakımından zengin bir kuşakta yer almasına rağmen akarsular bakımından fakirdir.



Şekil 3.2 Bolvadin ilçesinin Afyonkarahisar'daki konumu.

3.3 Görüntü Seçimi

Değerlendirme aşamasının önemli bir aşması olan master görüntü seçimi öncelikle görüntüler arasındaki zamana bağlı olarak orta tarihli görüntü seçilir. Bu master görüntüsü programın en iyi master görüntüsü olabilecek görüntülerin seçimi için STAMPS’de mevcut olan master_select kodunun çalıştırılması ile en uygun master görüntü bulunabilir. Master_select betimlemesi veya kodu radar görüntülerinin kendi aralarındaki baz mesafesi, görüntülerin zamanı ve bunların kombinasyonu oluşturacak şekilde en iyi uyumluluk (coherence) gösterebilecek görüntüyü birincil (master) görüntü olarak seçmektedir. 2016 Temmuz ayından 2018 Temmuz ayına kadar olan 17 adet görüntü arasından 10 Ocak 2017 tarihli görüntü master (birincil) görüntü seçilmiştir. Bu görüntünün diğer 16 görüntü ile oluşturduğu interferogramlar Şekil 3.6 da gösterilmiştir.

Değerlendirme sonuçlarını etkileyecekleri veya uygun interferogram elde edilmesine neden olacak görüntüler bulunmadığından görüntü işlemeye dahil edilmeyen görüntüler bulunmamaktadır.

3.4 PS uygulaması

Bu aşamada “2.6.5 İnterferometrik Veri İşleme Adımları” ile oluşturulan interferogramlar StaMPS yazılımı yardımıyla işlenir ve PS noktaları oluşturulur (Şekil 3.5).

Interferogram Oluşturma



PS Noktaları Oluşturma

Şekil 3.3 Değerlendirme işleminin şematik gösterimi.

StaMPS işlem adımları ise aşağıda özetlenenmiştir, 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 mekansal korelasyon özellikleri sayesinde gerçekleştirilir. Bununla birlikte yerel deformasyon davranışı hakkında bilgi sahibi olunmalı ve gözlem ilişkileri uydunun bant 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. Çözümlememiş fazdaki seçilmiş pikseller, uyumsuz 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 güvenilirliği 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 sonuçların daha fazla yumuşatılması başka bir deyişle aykırı değerlerin filtrelenmesi istendiği durumlarda uygulanabilir. Bu son aşama isteğe bağlıdır.

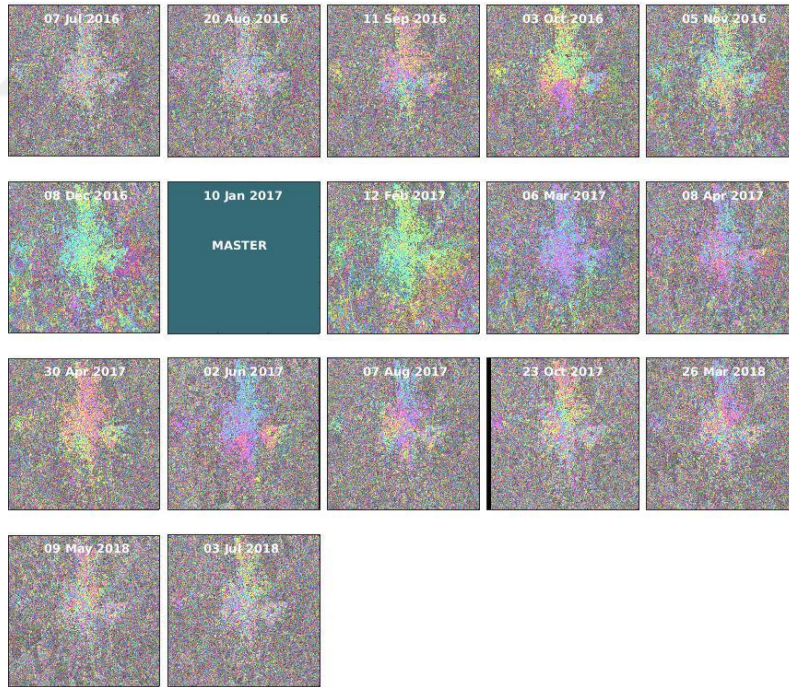
17 adet SAR görüntüsüyle toplam 16 adet farksal interferogram elde edilmiştir. Matlab programıyla 16 interferogram işleme sokulmuş ve değerlendirme sonucunda 22774 PS noktası elde edilmiştir. Değerlendirilme sonucu elde edilen uydu bakış yönündeki hızlarda, kırmızı alanlar çöküntü bölgelerini, mavi yerler ise yükselen bölgeleri göstermektedir.

Üretilen bu PS noktaları Matlab ortamında değerlendirildiği gibi sonuç verilerinin görselleştirilmesi de sağlanmıştır. Bu işlemler “ps_plot” komutu ile gerçekleştirilmektedir. Örneğin, “ps_plot('u')” komutu ile faz çözümlemesi hataları fazı görselleştirilebilir. Ayrıca, “ps_plot('u')” komutu ile faz çözümlemesi hataları fazı görselleştirilebildiği gibi fark (-) işlemi kullanarak faz çözümlemesi hataları fazından atmosfer ve yörünge hatası fazı ve/veya konuma bağlı korelasyonlu bakış açısı hataları fazı çıkartılarak da ayrı ayrı da görselleştirilebilir: “ps_plot('u-d')”, “ps_plot('u-dm')” İşlemler sonucu üretilen,

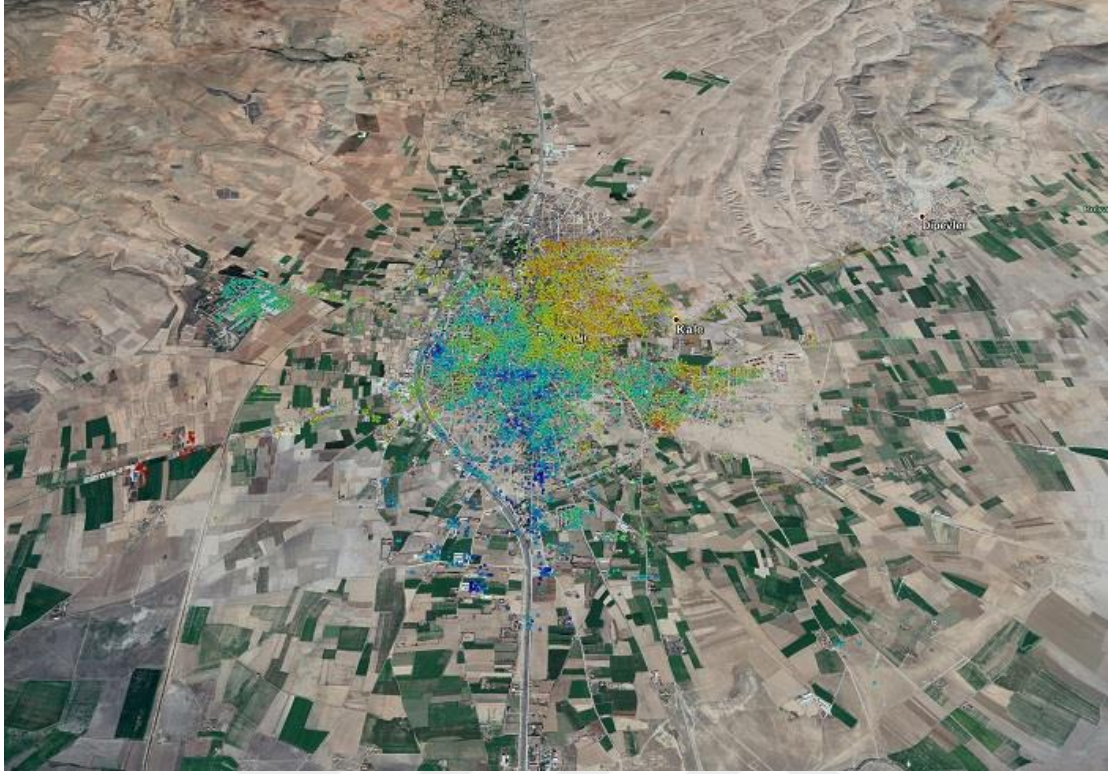
- TERRASAR-X görüntülerinin 20170110 tarihli master görüntü ile oluşturdukları interferogramlar (Şekil 3.6).

- Oluşturulan PS noktalarının çalışma bölgesindeki görünümü (Şekil 3.7).
- Seçilmiş piksellerdeki çözülmemiş faz (wrapped phase of the selected pixels) (Şekil 3.8).
- Her bir interferograma ait faz çözümü hataları fazı (unwrapping errors) (Şekil 3.9).
- Atmosfer ve yörünge hatası fazı (AOE) (Şekil 3.10).
- Konuma bağlı korelasyonlu bakış açısı hataları fazı (spatially-correlated look angle (SCLA) error) (Şekil 3.11).
- Her bir faz çözümü hata fazlarını gösteren interferogramdan AOE ve SCLA hata fazlarının çıkarılması (Şekil 3.12).
- İnterferogramlara ait faz yükselmesi (Şekil 3.13).
- PS noktalarına ait uydu bakış yönündeki yer değiştirme hızı (Şekil 3.14).

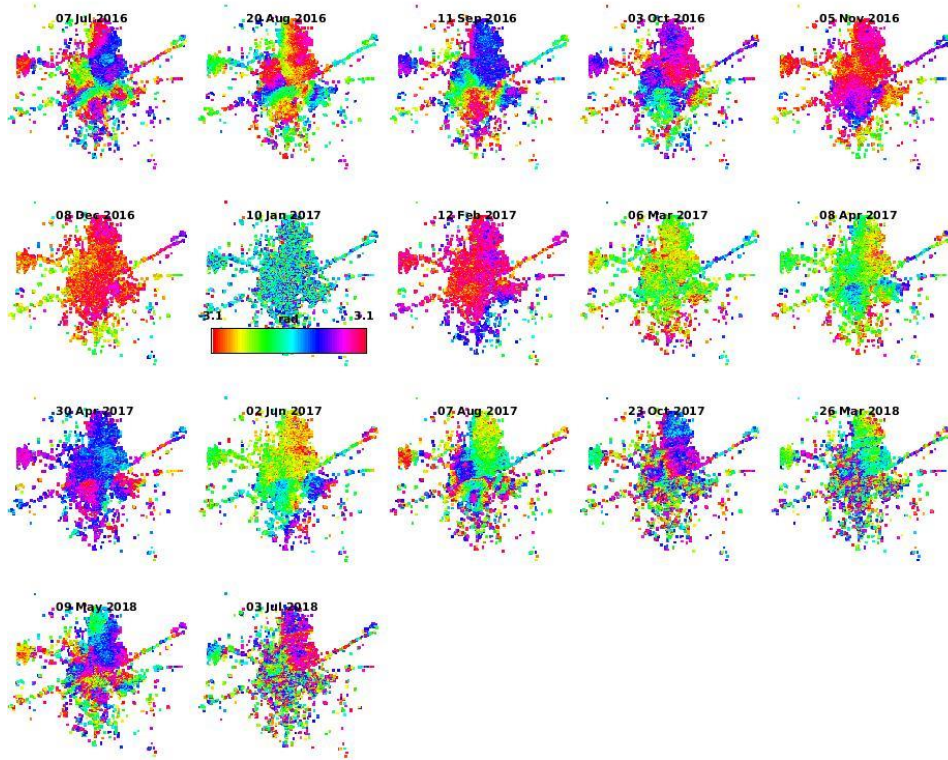
aşağıda gösterilmiştir.



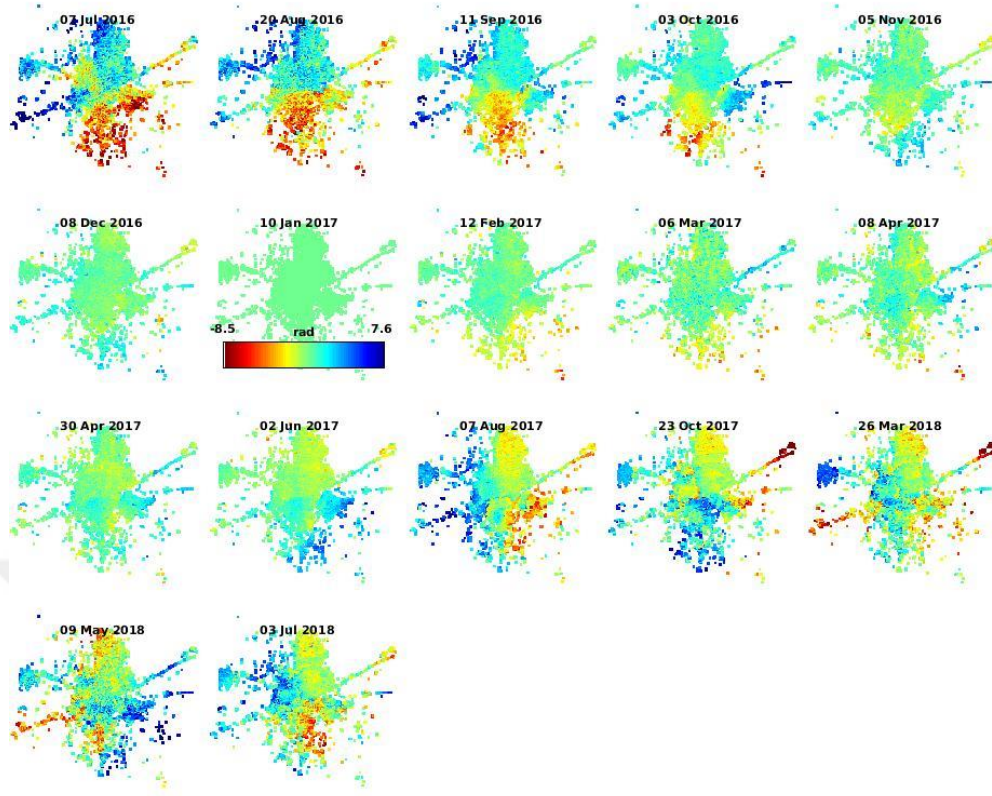
Şekil 3.4 PS analizi sonucu elde edilen interferogramlar.



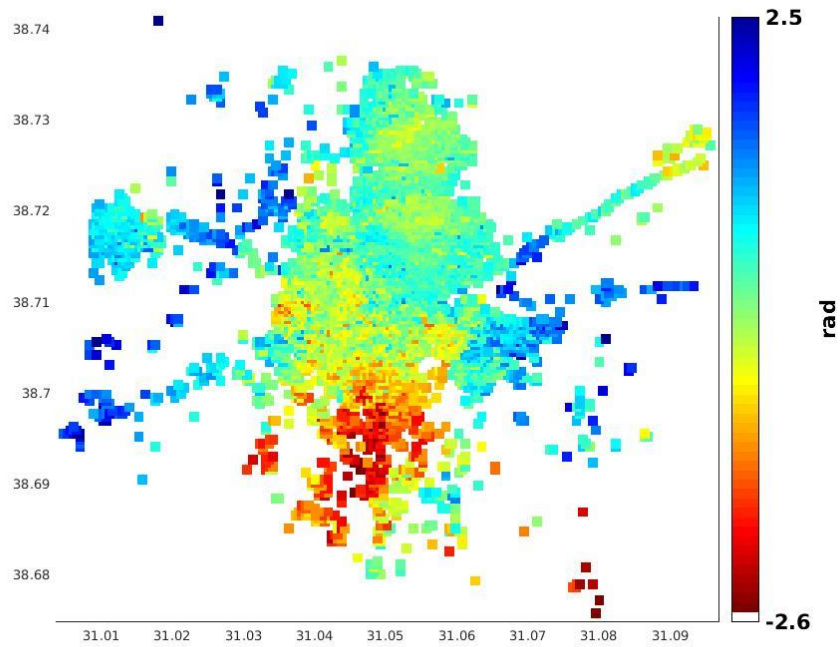
Şekil 3.5 PS noktalarının çalışma bölgesindeki görünümü.



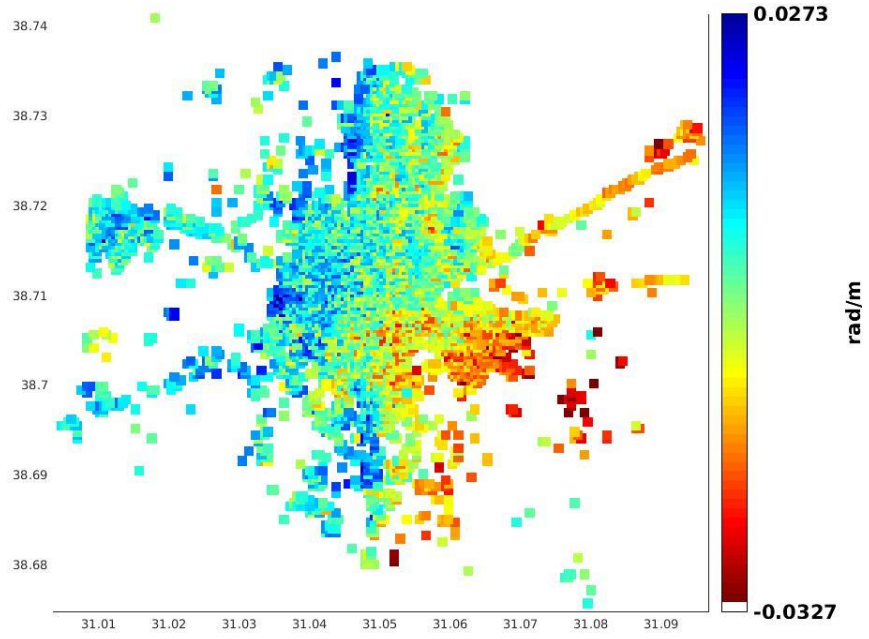
Şekil 3.6: İnterferogramlara ait piksellerdeki çözülmemiş faz.



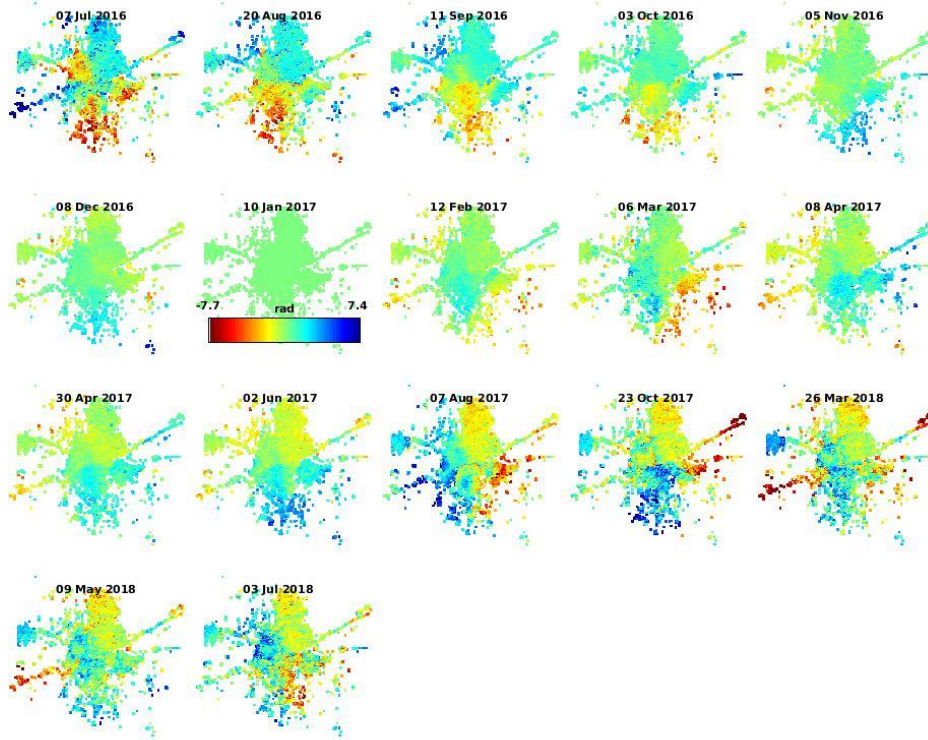
Şekil 3.7 Interferogramlara ait faz çözümlemesi hataları fazı.



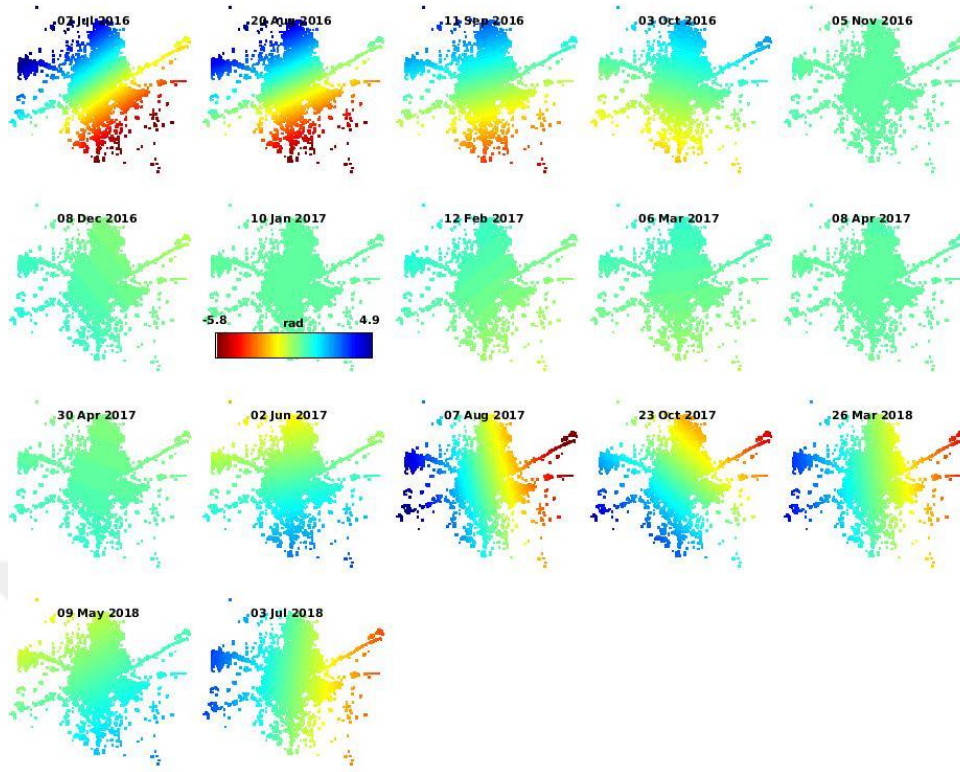
Şekil 3.8 Atmosfer ve yörünge hatası fazı.



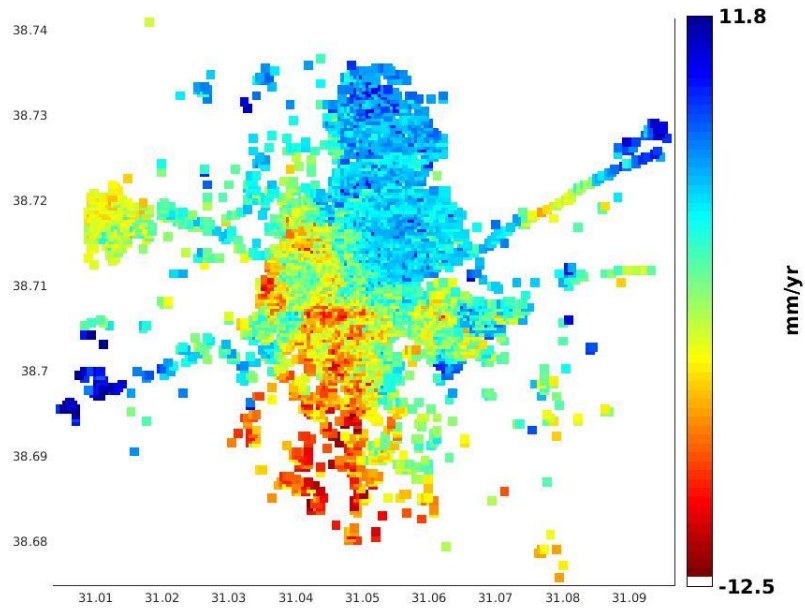
Şekil 3.9 Konuma bağlı korelasyonlu bakış açısı hataları fazı.



Şekil 3.10 Faz çözümlemesi hata fazlarını gösteren interferogramdan AOE ve SCLA hata fazlarının çıkarılması.



Şekil 3.11 İnterferogramlara ait faz yükselmesi.



Şekil 3.12 PS noktalarına ait uydu bakış yönündeki yer değıştirme hızı.

3.5 SBAS Uygulaması

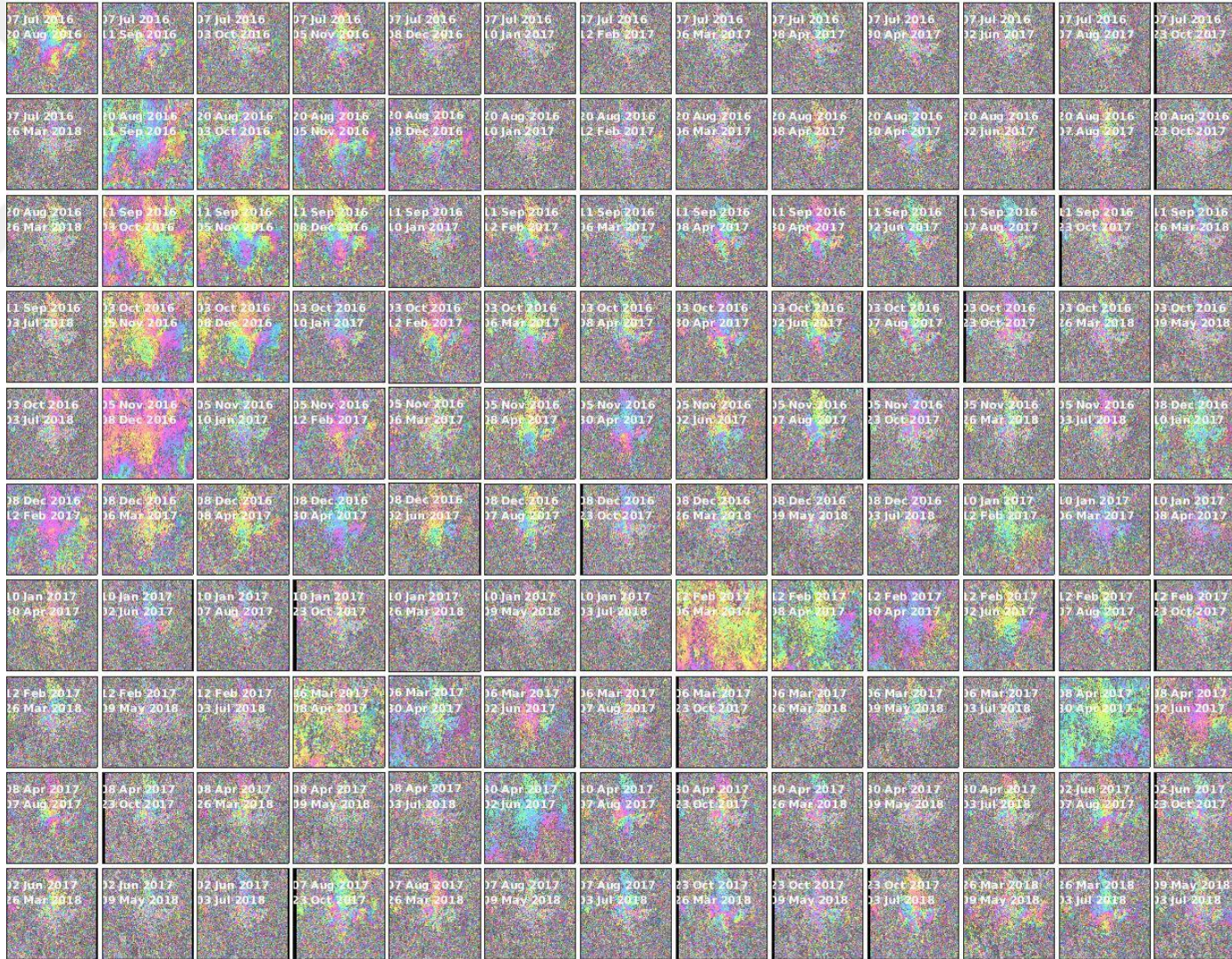
Ayrıca çalışma bölgesi SBAS (Small Baselines Interferometry) algoritması ile de yer değiştirme trendi belirlenmiştir.

Çalışmada kullanılmış SAR verilerin tarihleri için gözlemlenmiş bölgede fazın korelasyonu az olduğu durumlar için uygun görüntü çiftleri oluşturulamamaktadır ayrıca uzun bir zaman diliminde yavaş bir hızda meydana gelen yeryüzü hareketlerinin yüksek doğruluklu olarak izlenmesini zorlaşmaktadır. Görüntü çiftlerinin analizini etkileyen başlıca parametreler hava koşulları, geometrik dik baz uzunlukları, topoğrafya, yörünge ve zamansal değişimdir. Bu zorlukların minimize etmek amacı ile çok zamanlı edinilen görüntüler kullanılması ile SBAS algoritması geliştirilmiştir (Berardino *et al.* 2002).

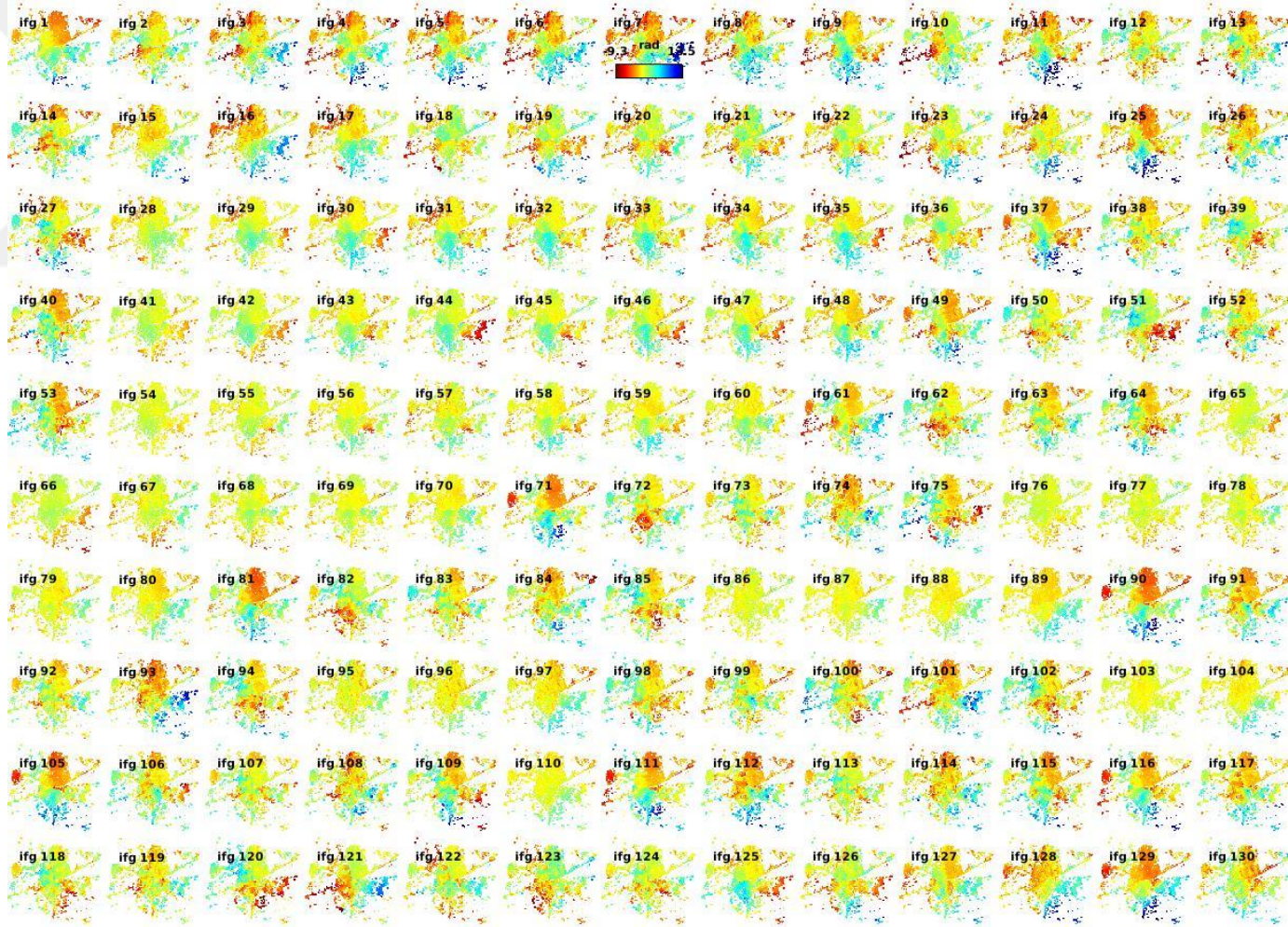
PS-InSAR yönteminin aksine SBAS yöntemi, deformasyon trendinin belirlenmesinde görüntünün tümüne bakılarak yüksek korelasyona sahip dağılmış hedefleri bir arada inceler, faz bilgisinin mekanda yüksek korelasyona sahip olduğu tüm pikselleri değerlendirmez. Dolayısıyla daha düşük bilgisayar gücüyle daha hassas bir şekilde ve kısa sürede sonuca varılabilen bir yöntemdir. Zamansal örnekleme oranını (temporal sampling rate) yükseltmek ve dolayısı ile görüntüler arasındaki mekansal korelasyonsuzluğu (spatial decorrelation) düşürmek amacı ile düşük baz uzunluğuna sahip görüntü çiftlerinden elde edilen interferogramlar değerlendirilir.

Bu çalışmada 17 adet görüntüden 130 adet görüntü çifti analiz edilmiştir. Bu interferogramlardan faz farkı hesaplanmıştır. İşlemde Doppler merkezi frekanslarındaki fark çok yüksek olduğundan, azimut filtreleme Doris'te hata vermektedir. Bu yüzden azimut filtreleme atlanmıştır. PS uygulamasından farklı olarak sadece şehir merkezi işleme alınmıştır. 1 757 adet referans noktası elde edilmiştir.

Ayrıca 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 3.16). Yeşil çizgiler interferogram çiftlerini göstermektedir.



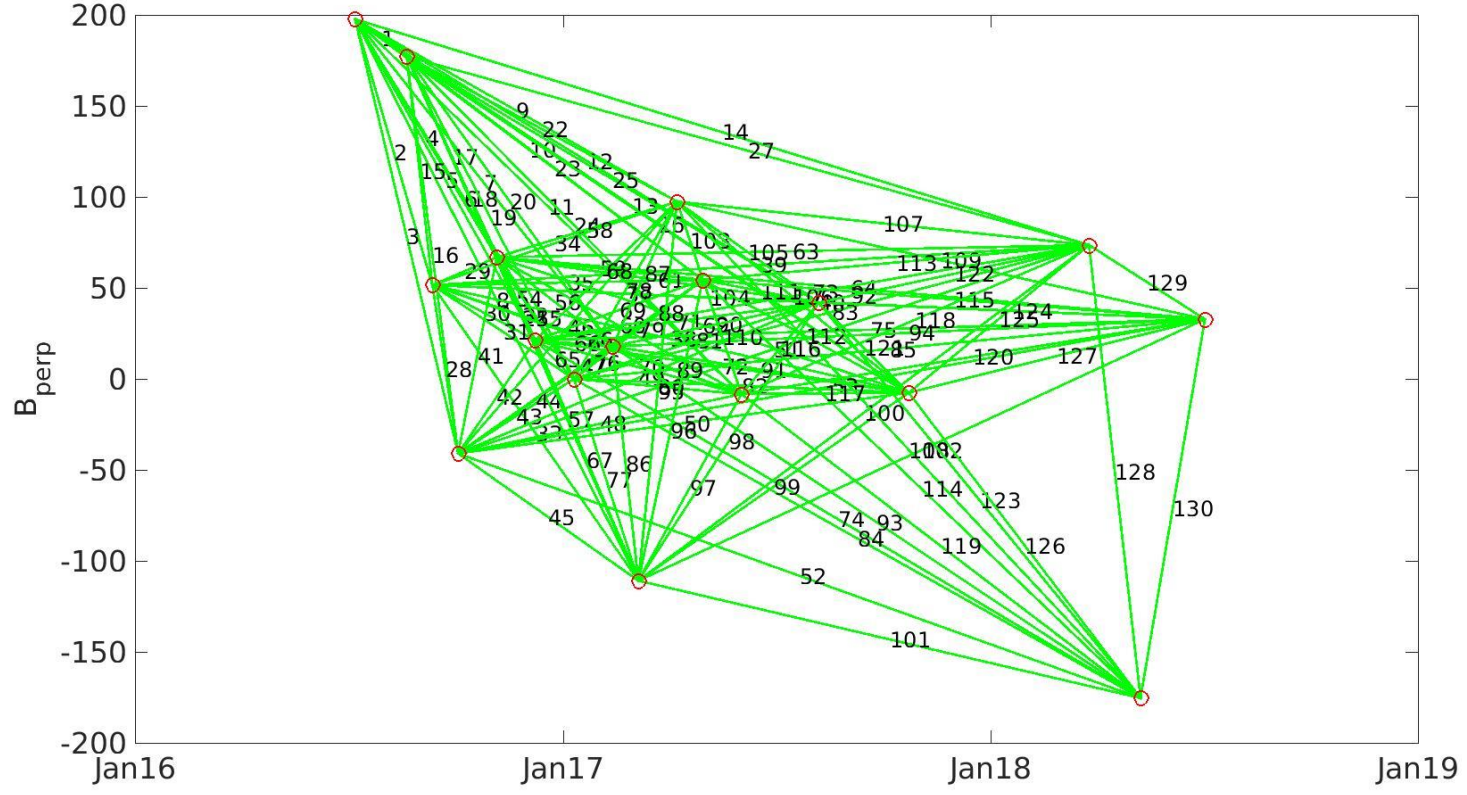
Şekil 3.13 SBAS sonucu oluşturulan interferogramlar.



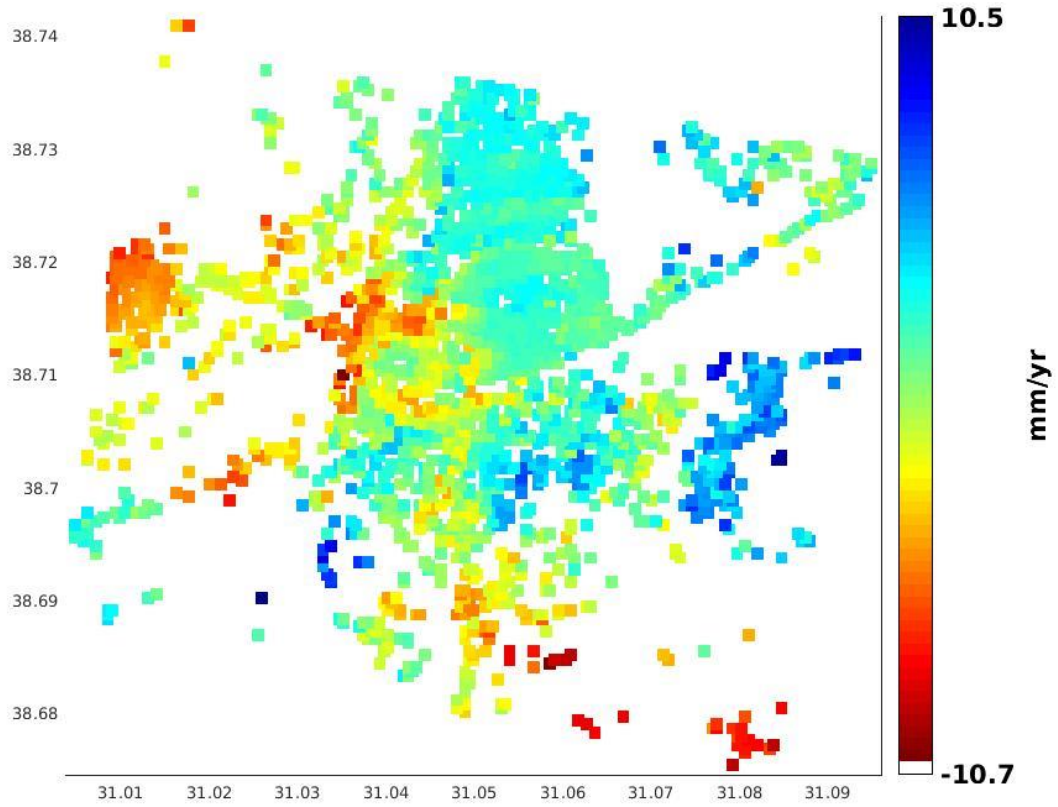
Şekil 3.14 SBAS interferogramlarına ait faz çözümlemeleri.



Şekil 3.15 SBAS faz çözümlemesi hata fazlarını gösteren interferogramdan SCLA hata fazlarının çıkarılması.



Şekil 3.16 TERRASAR-X görüntülerinin SBAS'a göre zamansal ve mekansal dağılımı.



Şekil 3.17 SBAS uygulaması sonucu uydu bakış yönündeki yer değiştirme hızı.

SBAS işlemi için, bazı parametrelerin PS işlemleriyle karşılaştırıldığında farklı varsayılan değerleri vardır. Bu varsayılan değerler 1-5 adımlarında parametrelerdeki değişikliklerdir, 6-8 arasındaki parametrelerde bir değişiklik yoktur.

Değerlendirilme sonucu elde edilen uydu bakış yönündeki hızlarda, kırmızı alanlar çöküntü bölgelerini, mavi yerler ise yükselen bölgeleri göstermektedir.

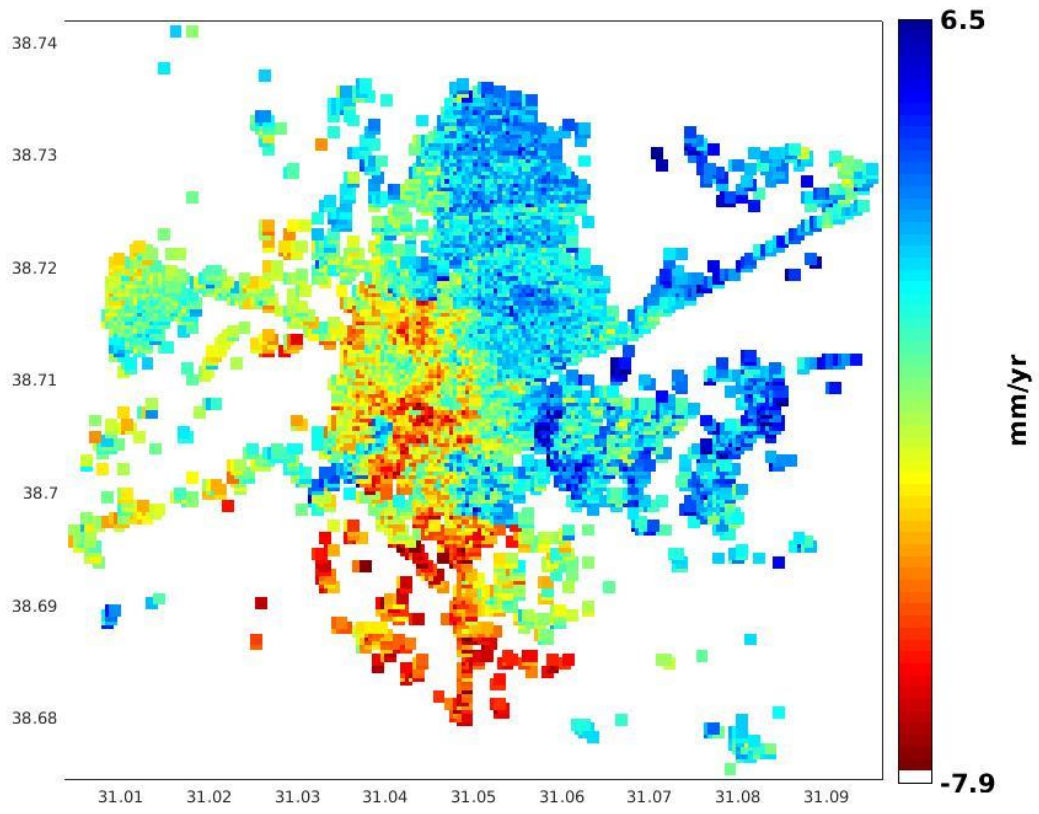
Çizelge 3.1 StaMPS SBAS ve PS adımları farklılıkları.

Parametre	SBAS	PS	Açıklama
density_rand	2	20	Rastgele faz ile seçilen piksellerin maksimum kabul edilebilir uzaysal yoğunluğu (km ² başına).
percent_rand	1	20	Rastgele faz ile seçilen piksellerin maksimum kabul edilebilir yüzdesi.
weed_standard_dev	inf	1	Standart sapma eşiği.
merge_resample_size	100	0	Örnekleme için kaba kayıt.

3.6 Birleştirilmiş Multi-Temporal InSAR (MTI) Uygulaması

Bu yöntem için hem PS hem de SBAS yöntemleri tarafından seçilen pikseller, her iki yöntem için de StaMPS işlem adımları tamamlandıktan sonra veya her bir yöntemin 5. veri işleme adımları tamamlandıktan sonra Matlab ortamında birleştirilebilir. Sonrasında 6. adımdan veri işleme adımlarına devam edilir. İşlem adımları SBAS'da olduğu gibidir. 98 947 referans PS noktası elde edilmiştir.

Değerlendirilme sonucu elde edilen uydu bakış yönündeki hızlarda, kırmızı alanlar çöküntü bölgelerini, mavi yerler ise yükselen bölgeleri göstermektedir (Şekil 3.18).



Şekil 3.18 MTI uygulaması sonucu uydu bakış yönündeki yer değiştirme hızı.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Afyonkarahisar'a bağlı Bolvadin ilçesinde yapay açıklı radar tekniği ile farksal interferometrinin uygulandığı ve PSI, SBAS, Combined MTI algoritmaları kullanılarak uydu bakış yönündeki deformasyonlar belirlenmiştir. Ayrıca bu çalışmanın TerraSAR-X uydusunun SAR görüntülerinden yararlanılmıştır (SLC formatında) ve DORIS yazılımı yardımıyla Türkiye'ye ait SRTM3 sayısal yükseklik modeli verisi kullanılmıştır.

TerraSAR-X uydusunun görüntü arşivi içinden çalışılan bölgeyi kaplayacak biçimde 2016 ve 2018 yılları içinde yaklaşık 2 senelik bir aralıktan seçilen, 20160707, 20160820, 20160911, 20161003, 20161105, 20161208, 20170110, 20170212, 20170306, 20170408, 20170430, 20170602, 20170807, 20171023, 20180326, 20180509, 20180703 tarihli 17 adet SAR görüntüsüyle toplamda 16 farksal interferogram DORIS yazılımı ile oluşturuldu. Ardından bu analizden bağımsız bir şekilde aynı görüntüler yardımıyla StaMPS yazılımı yardımı ile uydu bakış yönündeki deformasyonları belirleyebilmek adına PS, SBAS ve MTI(PS+SBAS) algoritmaları kullanarak değerlendirilmiştir.

PS uygulamasında 22 774 PS noktası elde edilirken SBAS uygulamasında PS uygulamasından farklı olarak sadece şehir merkezi işleme alınmıştır, dolayısıyla PS uygulamasına farkla 1 757 adet referans noktası elde edilmiştir. Ayrıca MTI uygulamasıyla PS ve SBAS verilerinin özel bir algoritma ile birleştirilmesi sonucu 98 947 PS noktası elde edilmiştir. Her üç değerlendirme çıktıları karşılaştırılmış ve sonuçların (uydu bakış yönündeki hızların) birbirleriyle uyduğu belirlenmiştir.

Bolvadin şehir merkezi ve çevresindeki tektonik kökenli hareketlerin yanı sıra asismik hareketlerin varlığı birçok çalışmada ortaya konulmuştur (Özkaymak vd. 2017). 2016-2018 yılları arasındaki uydu bakış yönündeki hızlarının -12.5 mm/yıl ile +11.8 mm/yıl arasında olduğu tespit edilmiştir. Uydu bakış yönündeki hızların güneye ve kuzeye doğru gidildikçe arttığı görülmektedir. Bu ise proje kapsamında bölgede yapılan jeolojik çalışmalar ile benzer sonuçları ortaya koymaktadır.

5.KAYNAKLAR

- Adam, N., Zhu, X. and Bamler, R. (2009). Coherent stacking with TerraSAR-X imagery in urban areas. *2009 Urban Remote Sensing Joint Event*, 20: 1-6.
- Akabalı, A. (2002). Stereo Yapay Açıklıklı Radar Görüntülerinden Otomatik Sayısal Yükseklik Modeli Üretilmesi ve Doğruluğunun Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Balık Şanlı, F. (2004). Elektro-optik ve SAR Uydu Görüntüleri ile Arazi Bitki Örtüsünün Belirlenmesi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Balza, T., Wegnerb, J.D., Schunertb, A., Liua, K., Soergelb, U. and Liaoa, M. (2011). Persistent scatterer localization and prediction technique. *Spatial Information Technologies for Monitoring of Large-Scale Man-made Linear Features*.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. and Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing*, **40**: 2375-2383.
- Bürgmann, R., Rosen P.A. and Fielding E. J. (2000) Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation. *Annual Review of Earth Planetary Science*, **13**: 169-209.
- Çakır, Z. (2003). Analysis of the Crustal Deformation Caused by the 1999 İzmit and Düzce Earthquakes Using Synthetic Aperture Radar Interferometry. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Delacourt, C., Briole, P., and Acheche J. (1998). Tropospheric correction of SAR interferograms with strong topography: Application to Etna. *Geophysical Research Letters*, **25**: 2849-2852.

- Farr, T.G. (2007). The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, **45**: 1-33
- Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F. (2000). Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **38**: 2202-2212.
- Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **39**: 8-20.
- Gabriel, A.K., Goldstein, R.M. and Zebker, H. (1989). Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research*, **94**: 9183-9191.
- Goldstein, R.M. and Werner, C.L. (1998). Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters*, **25**: 4035-4038.
- Hanssen, R.F. (2001). Radar Interferometry Data Interpretation and Error Analysis. Kluwer Academic Publishers, 1. edition, Dordrecht, Netherlands.
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P. and Kampes, B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, **31**: 1-5.
- Hooper, A., Segall P and Zebker H. (2007). Persistent scatterer InSar for crustal deformation analysis with application to Volcán Alcedo, Galápagos. *Journal of Geophysical Research*, **112**: 1-19.
- Kramer, H.J. (2002). Observation of the Earth and Its Environment: Survey of Missions and Sensors. Springer Berlin Heidelberg, 4. edition, Berlin, Germany.
- Massonnet, D. and Thierry, R. (1993). Radar interferometry: limits and potential. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **31**: 455-464.

- Moccia, A. and Vetrella, S. (1992). A tethered interferometric synthetic aperture radar (SAR) for a topographic mission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **30**: 103-109.
- Özkaymak, Ç., Sözbilir, H., Tiryakioğlu, İ., Baybura, T. (2017). Bolvadin’de (afyon-akşehir grabeni, afyon) gözlenen yüzey deformasyonlarının jeolojik, jeomorfolojik ve jeodezik analizi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, **60**: 169-188
- Perissin, D., Prati, C., Rocca, F. and Wang, T. (2009). PSInSAR analysis over the Three Gorges Dam and urban areas in China. 2009 Urban Remote Sensing Joint Event, 1-5.
- Poyraz, F. (2009). Kuzey Anadolu Fay Zonu Doğu Kesiminde Yatay Yerkabuğu Hareketleri ve Gerilme Birikiminin Araştırılması. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Rosen, P.A., Werner, C., Fielding, E.J., Hensley, S., Buckley, S. and Vincent, P. (1998) Aseismic creep along the San Andreas fault northwest of Parkfield, CA measured by radar interferometry. *Geophysical Research Letters*, **25**: 825–828.
- Sefercik, U.G. (2007). Radar İnterferometri Tekniği ile SYM Üretimi ve Doğruluk Değerlendirmeleri. 11. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 2-6 Nisan.
- Zebker, H.A., Rosen, P.A., Goldstein, R.M., Gabriel, A. and Werner, C.L. (1994). On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: the landers earthquake. *Journal of Geophysical Research*, **99**: 19617-19643.
- Zou, W., Li, Y., Li, Z. and Ding, X. (2009). Improvement of the accuracy of InSAR image co-registration based on tie points – a review, *Sensors*. **9**: 1259-1281.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Sinan KUCUR
Doğum Yeri ve Tarihi : Konya 04/11/1990
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : 05547689768 / sinankucur@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Erzincan Anadolu Lisesi, (2004-2008)
Lisans : Bülent Ecevit Üniversitesi, Geomatik Mühendisliği,
(2010-2014)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, (2016-2019)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : MAKS Projesi (2017-2018)
Şeker Fabrikası (2018- devam ediyor)