

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SBAS-InSAR YÖNTEMİYLE DÜŞEY YÖNLÜ YÜZEY
DEFORMASYONLARININ BELİRLENMESİ:
BURSA-ORHANELİ LİNYİT MADENİ ÖRNEĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serhat YILMAZTÜRK

Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı

Geomatik Mühendisliği Programı

OCAK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SBAS-InSAR YÖNTEMİYLE DÜŞEY YÖNLÜ YÜZEY
DEFORMASYONLARININ BELİRLENMESİ:
BURSA-ORHANELİ LİNYİT MADENİ ÖRNEĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Serhat YILMAZTÜRK
(501101605)**

Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı

Geomatik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Orhan AKYILMAZ

OCAK 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501101605 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Serhat YILMAZTÜRK**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**SBAS-InSAR YÖNTEMİYLE DÜŞEY YÖNLÜ YÜZEY DEFORMASYONLARININ BELİRLENMESİ: BURSA-ORHANELİ LİNYİT MADENİ ÖRNEĞİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Orhan AKYILMAZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Mustafa Tevfik ÖZLÜDEMİR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Cüneyt AYDIN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **28 Kasım 2014**
Savunma Tarihi : **19 Ocak 2015**

Aileme,

ÖNSÖZ

Türkiye Kömür İşletmeleri'ne bağlı Bursa Linyitleri İşletmesi'nde gelişen yüzey deformasyonlarının araştırılmasına yönelik gerçekleştirilen bu çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı bünyesinde Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır. Çalışmanın amacı, açık işletme yöntemiyle kömür üretilen madende gelişen olası yüzey deformasyonlarını ve yer değiştirme hızını SAR interferometri tekniğini kullanarak yüksek hassasiyetle belirlemek ve nedenlerini araştırmaktır.

Çalışma süresince bana yol gösteren ve desteklerini esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Orhan AKYILMAZ'a ve tez çalışması boyunca desteğini sürdüren Yrd. Doç. Dr. Özgün AKÇAY'a ve Doç. Dr. Hakan TUNÇDEMİR'e şükranlarımı sunarım. Analizlerde kullanılan SAR görüntülerini sağlayan GFZ-Potsdam çalışanlarından Dr. Mahdi Motagh'a teşekkürü borç bilirim. Ayrıca TKİ-BLİ çalışanlarından İşletme Müdürü Dursun Ali NAZİK'e ve harita mühendisi ERGÜL UZUNTAŞ'a çalışmalarında kolaylıklar diliyorum.

Bu tez çalışması İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi "Açık Ocak Maden İşletmelerindeki Şev Hareketlerinin InSAR ve GPS Teknikleriyle İzlenerek Aşırı Yer Değiştirmelerin Önceden Belirlenmesi" başlığı ile desteklenmiştir.

Ocak 2015

Serhat YILMAZTÜRK
Jeoloji Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY..	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. UZAKTAN ALGILAMA TEORİSİ VE RADAR.....	3
2.1 Giriş.....	3
2.2 Gerçek Açıklıklı Radar (RAR).....	6
2.3 Mesafe / Menzil (Range) Çözünürlüğü (Across-Track Resolution).....	8
2.4 Azimut Çözünürlüğü (Along-Track Resolution)	9
2.5 Radar Görüntü Hataları	10
2.5.1 Kısa görüntüleme (foreshortening)	11
2.5.2 Ters görüntüleme (layover).....	11
2.5.3 Gölgeleme (shadowing)	12
2.6 Yapay (Sentetik) Açıklı Radar (SAR).....	13
2.7 Yapay Açıklıklı Radar Görüntüleme Yöntemleri	14
2.7.1 SpotLight Görüntüleme Yöntemi.....	14
2.7.2 StripMap Görüntüleme Yöntemi.....	15
2.7.3 ScanSAR Görüntüleme Yöntemi	15
3. YAPAY AÇIKLIKLI RADAR İNTERFEROMETRİ (InSAR)	17
3.1 Giriş.....	17
3.2 Fazı Etkileyen Faktörler	22
3.2.1 Dik baz mesafesi	22
3.2.2 Termal korelasyonsuzluk	23
3.2.3 Zamansal korelasyonsuzluk	23
3.2.4 Yörünge hatası	24
3.2.5 Küresellik etkisi	24

3.2.6 Atmosferik etkiler	24
3.2.7 Bölge topografyasının etkisi ve bitki örtüsü	25
3.3 İnterferometrik Veri İşleme Adımları	26
3.3.1 Görüntü seçimi	27
3.3.2 Görüntülerin eşleştirilmesi (coregistration)	28
3.3.3 İnterferogram oluşturulması	28
3.3.4 Baz hesaplaması ve elipsoitten kaynaklanan fazın giderilmesi	29
3.3.5 Filtreleme	29
3.3.6 Faz açılması (phase unwrapping) ve mutlak faz belirlenmesi	30
3.3.7 Deformasyonun belirlenmesi	31
3.3.8 Topografyanın üretilmesi	31
3.3.9 Verilerin konumla ilişkilendirilmesi (geocoding)	32
3.4 InSAR Uygulama Alanları	32
3.4.1 Heyelan belirleme	32
3.4.2 Yer yükselmesi ve çökmesi (uplift / subsidence) belirleme.....	33
3.4.3 Depremle ilgili yer değiştirmenin belirlenmesi.....	34
3.4.4 Volkanik hareket izleme.....	35
3.4.5 Buzul hareketleri	36
3.4.6 Diğer uygulamalar.....	37
3.5 Literatür Özeti	38
4. ÇALIŞMA BÖLGESİ InSAR UYGULAMASI	43
4.1 Çalışma Bölgesi Tanıtımı.....	43
4.1.1 Gümüşpınar bölümü.....	43
4.1.2 Sağırlar bölümü	43
4.1.3 Çivili bölümü.....	44
4.2 TerraSAR-X Uydusu Tanıtımı	46
4.3 Çalışma Alanı Farksal İnterferometri (DInSAR) Uygulaması.....	49
4.4 SBAS Algoritması ile Yer Değiştirme Trendinin Belirlenmesi	55
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	69
KAYNAKLAR.....	71
EKLER.....	77
ÖZGEÇMİŞ.....	91

KISALTMALAR

ASTER	: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
ALOS	: Advanced Land Observing Satellite
BLİ	: Bursa Linyitleri İşletmesi
BMBF	: Bundesministerium für Bildung und Forschung
DLR	: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DInSAR	: Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar
ENVISAT	: Environmental Satellite
ERS	: European Remote-Sensing Satellite
ESA	: European Space Agency
GPS	: Global Positioning System
HH	: Horizontal-Horizontal
HV	: Horizontal-Vertical
InSAR	: Interferometric Synthetic Aperture Radar
JERS	: Japan Earth Resources Satellite
LOS	: Line-of-Sight
METI	: Ministry of Economy, Trade and Industry
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
PPP	: Public-Private Partnership
PSInSAR	: Persistent Scatterers InSAR
RADAR	: Radio Detection and Ranging
RAR	: Real Aperture Radar
SAM	: Sayısal Arazi Modeli
SAR	: Synthetic Aperture Radar
SBAS	: Small Baseline Subset
SLC	: Single Look Complex
SNR	: Signal Noise Ratio
SRTM	: Shuttle Radar Topography Mission
SVD	: Single Value Decomposition
SYM	: Sayısal Yükseklik Modeli
TKİ	: Türkiye Kömür İşletmeleri
VH	: Vertical-Horizontal
VV	: Vertical-Vertical

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Çoğunlukla kullanılan radar bantları ve özellikleri.....	4
Çizelge 4.1 : TerraSAR-X uydu özellikleri.	47
Çizelge 4.2 : TerraSAR-X uydusu görüntü ürün tipleri.	47
Çizelge 4.3 : TerraSAR-X uydusu görüntüleme modları teknik özellikleri.....	48
Çizelge 4.4 : ASTER global sayısal yükseklik modeli veri özellikleri.	51
Çizelge 4.5 : Analizlerde kullanılan SAR görüntüleri listesi.	52
Çizelge 4.6 : Görüntü Listesi (Tarihler YYYY-AA-GG biçiminde yazılmıştır).....	57
Çizelge 4.7 : Normal baz matrisi (metre).	58
Çizelge 4.8 : Zamansal baz matrisi (gün).	58
Çizelge 4.9 : Yükseklik belirsizliği matrisi (metre).....	58
Çizelge 4.10 : Doppler farkı matrisi (hertz).....	58

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Elektromanyetik Spektrum (URL-1).....	3
Şekil 2.2 : IEEE ve NATO tarafından kullanılan radar bantları (URL-2).....	4
Şekil 2.3 : Radar dalga boylarının nesne üzerine etkisi.....	5
Şekil 2.4 : Yatay (horizontal) ve düşey (vertical) polarizasyon.	6
Şekil 2.5 : Farklı polarizasyonlarda radar görüntüleri (URL-3).....	6
Şekil 2.6 : Radar uydusunun algılama geometrisi (Lillesand ve diğ, 2008).....	7
Şekil 2.7 : Radar görüntüleme geometrisi (Saygılı, 2008).	8
Şekil 2.8 : Mesafe çözünürlüğü (Çakır, 2003).....	9
Şekil 2.9 : Azimut çözünürlüğü (Çakır, 2003).	10
Şekil 2.10 : Kısa görüntüleme hatası (Franceschetti ve Lanari, 1999).....	11
Şekil 2.11 : Ters görüntüleme hatası (Franceschetti ve Lanari, 1999).	12
Şekil 2.12 : Gölgeleme hatası (Franceschetti ve Lanari, 1999).....	12
Şekil 2.13 :Yapay açıklıklı radar (Çakır, 2003).....	13
Şekil 2.14 : SpotLight, StripMap ve ScanSAR görüntüleme (URL-4).	14
Şekil 3.1 : Faz farkı (URL-5).....	17
Şekil 3.2 : İnterferometrik örgeler (URL-6).	18
Şekil 3.3 : Tek geçiş ve tekrarlı geçiş interferometri yöntemleri (URL-7).	19
Şekil 3.4 : SAR geometrisi (Bamler ve Hartl, 1998).....	20
Şekil 3.5 : Tekrarlı geçiş yöntemi geometrisi (Çakır, 2003).	21
Şekil 3.6 : Topografya kaynaklı örgeler (URL-8).	26
Şekil 3.7 : Dalganın kompleks sayı olarak gösterimi.	27
Şekil 3.8 : Heyelan belirleme çalışması (Fruneau ve diğ, 1996).	33
Şekil 3.9 : Yer değiştirme haritası ve çökme hız trendi (Amelung ve diğ, 1999).	34
Şekil 3.10 : Landers depremi interferogramı ve modeli (Massonnet ve diğ, 1993)..	35
Şekil 3.11 : İzmit depremi interferogramları (Çakır ve diğ, 2003).....	35
Şekil 3.12 : Lav akıntılarını gösterir interferogramlar (Briole ve diğ, 1997).	36
Şekil 3.13 : Buzul dinamiklerini gösterir interferogram (Mohr ve Madsen, 1996)...	36
Şekil 3.14 : Deniz-kara sınırı belirleme çalışması (Schwäbisch ve diğ, 1997).	37
Şekil 3.15 : Nivelman ölçmesi ve interferogram (Raucoules ve diğ, 2008).....	38
Şekil 3.16 : Kömür madenleri deformasyon trendi (Lesniak ve Porzycka, 2012). ...	39
Şekil 3.17 : Çökmelere ait hız vektörleri (Abdikan ve diğ, 2013).....	40
Şekil 3.18 : Maden ve tarım kaynaklı deformasyonlar (Gourmelen ve diğ, 2007). ..	41
Şekil 3.19 : Deformasyon hızı haritası (Castaneda, 2009).	42
Şekil 4.1 : Çalışma Alanı Lokasyon Haritası (Yerin, 2006).....	44
Şekil 4.2 : Çalışma alanı uydu görüntüsü.	45
Şekil 4.3 : Çalışma alanından görüntüler.....	46
Şekil 4.4 : TerraSAR-X uydusu.....	46
Şekil 4.5 : TerraSAR-X uydusu çözünürlük karşılaştırması.	48
Şekil 4.6 : Farksal interferometri blok diyagramı.....	50
Şekil 4.7 : Çalışma alanı ASTER sayısal yükseklik modeli.....	51
Şekil 4.8 : NEST 5.1 ekran görüntüsü.	52

Şekil 4.9 : ERDAS IMAGINE 2013 ekran görüntüsü.....	53
Şekil 4.10 : 20130215-20120116 farksal interferogram.....	54
Şekil 4.11 : 20130215-20120116 yer değiştirme haritası.....	54
Şekil 4.12 : SBAS Blok Diyagramı (Berardino ve diğ, 2002).....	55
Şekil 4.13 : ENVI 4.8 + SARscape 4.3 Ekran Görüntüsü.....	56
Şekil 4.14 : SAR görüntülerinin zaman-konum grafiği.....	57
Şekil 4.15 : SAR görüntülerinin zaman-baz uzunluğu grafiği.....	57
Şekil 4.16 : SBAS analizi sonucu elde edilen interferogramlar.....	62
Şekil 4.17 : SBAS uyuşum histogramı.....	62
Şekil 4.18 : SBAS sonucu üretilen uyuşum haritası.....	63
Şekil 4.19 : SBAS yer değiştirme hızı histogramı.....	63
Şekil 4.20 : SBAS sonucu üretilen yer değiştirme hızı haritası.....	64
Şekil 4.21 : SBAS sonucu üretilen yer değiştirme hızı vektörleri.....	64
Şekil 4.22 : Yer değiştirme bilgileri (1 numaralı nokta).....	65
Şekil 4.23 : Yer değiştirme-zaman grafiği (1 numaralı nokta).....	65
Şekil 4.24 : Yer değiştirme bilgileri (2 numaralı nokta).....	66
Şekil 4.25 : Yer değiştirme-zaman grafiği (2 numaralı nokta).....	66
Şekil 4.26 : Yer değiştirme bilgileri (3 numaralı nokta).....	67
Şekil 4.27 : Yer değiştirme-zaman grafiği (3 numaralı nokta).....	67
Şekil A.1 : 20130215-20120116 farksal interferogram.....	77
Şekil A.2 : 20130215-20120116 yer değiştirme haritası.....	77
Şekil A.3 : 20130215-20120127 farksal interferogram.....	78
Şekil A.4 : 20130215-20120127 yer değiştirme haritası.....	78
Şekil A.5 : 20130215-20120207 farksal interferogram.....	79
Şekil A.6 : 20130215-20120207 yer değiştirme haritası.....	79
Şekil A.7 : 20130215-20120218 farksal interferogram.....	80
Şekil A.8 : 20130215-20120218 yer değiştirme haritası.....	80
Şekil A.9 : 20130215-20120311 farksal interferogram.....	81
Şekil A.10 : 20130215-20120311 yer değiştirme haritası.....	81
Şekil A.11 : 20130215-20130124 farksal interferogram.....	82
Şekil A.12 : 20130215-20130124 yer değiştirme haritası.....	82
Şekil A.13 : 20130215-20130204 farksal interferogram.....	83
Şekil A.14 : 20130215-20130204 yer değiştirme haritası.....	83
Şekil A.15 : 20130215-20130226 farksal interferogram.....	84
Şekil A.16 : 20130215-20130226 yer değiştirme haritası.....	84
Şekil A.17 : 20130215-20130331 farksal interferogram.....	85
Şekil A.18 : 20130215-20130331 yer değiştirme haritası.....	85
Şekil A.19 : 20130215-20130525 farksal interferogram.....	86
Şekil A.20 : 20130215-20130525 yer değiştirme haritası.....	86
Şekil A.21 : 20130215-20130605 farksal interferogram.....	87
Şekil A.22 : 20130215-20130605 yer değiştirme haritası.....	87
Şekil A.23 : 20130215-20130616 farksal interferogram.....	88
Şekil A.24 : 20130215-20130616 yer değiştirme haritası.....	88
Şekil A.25 : 20130215-20130719 farksal interferogram.....	89
Şekil A.26 : 20130215-20130719 yer değiştirme haritası.....	89
Şekil A.27 : 20130215-20130730 farksal interferogram.....	90
Şekil A.28 : 20130215-20130730 yer değiştirme haritası.....	90

SBAS-InSAR YÖNTEMİYLE DÜŞEY YÖNLÜ YÜZEY DEFORMASYONLARININ BELİRLENMESİ: BURSA-ORHANELİ LİNYİT MADENİ ÖRNEĞİ

ÖZET

Son yıllarda interferometrik yapay açıklıklı radar tekniği, yeryüzünde meydana gelen deformasyonların incelenmesinde yeni bir araç olarak kullanılmaktadır. Araştırmacılar, interferometrik yapay açıklıklı radarın geniş bir uygulama alanı sağlamasından dolayı başta kabuk deformasyonu olmak üzere birçok farklı alanda kullanılmaktadırlar. Bu çalışmanın amacı SAR İnterferometri tekniği kullanılarak Bursa İli Orhaneli İlçesi'nde bulunan açık işletme yöntemiyle üretim yapılan bir linyit madeninde deformasyon etkilerini gözlemlemektir.

Farksal interferometrinin uygulandığı ve SBAS algoritması kullanılarak yer değiştirme hızının belirlendiği bu çalışmada TerraSAR-X uydusuna ait SAR görüntülerinden ve ASTER sayısal yükseklik modeli verisinden yararlanılmıştır. Maden alanına ait interferogramlar oluşturulmuş ve günümüzde aktif üretimin yapıldığı Gümüşpınar sektörü civarındaki düşey yönlü yer değiştirmeler vektörel formatta üretilmiştir.

TerraSAR-X uydusu görüntü arşivinden inceleme sahasını kapsayacak şekilde 2012 ve 2013 yıllarını kapsayan yaklaşık 1.5 yıllık bir dönemden seçilen 15 adet SAR görüntüsüyle toplam 14 adet farksal interferogram ERDAS IMAGINE yazılımıyla oluşturulmuştur. Daha sonra bu analizden bağımsız olarak aynı görüntülerin ikili kombinasyonu kadar (105 adet) farksal interferogram ENVI SARscape yazılımıyla üretilmiş ve yer değiştirme hızını belirleyebilmek adına bu interferogramlar SBAS algoritmasını kullanarak yine ENVI SARscape yazılımıyla değerlendirilmiştir. Her iki yazılımın çıktıları karşılaştırılmış ve sonuçların birbiriyle uyduğu belirlenmiştir.

Çalışma alanının kırsal bir bölge olması ve radar sinyali yansıtacak sabit saçıcıların azlığı sebebiyle SAR görüntüleri arasındaki uyum ne yazık ki düşüktür. Bir başka deyişle, görüntüler arası korelasyon zayıftır. Bundan dolayı çalışma alanının tamamını kapsayacak bir risk haritası üretilmemiştir. Üretim yapılan Gümüşpınar sektörü civarında radara bakış doğrultusunda yaklaşık 4 mm kadar yıllık çökme hızı hesaplanmıştır. Tüm maden alanı ve civarına bakıldığında ise deformasyon kaynaklı tehlikeli bir alana rastlanılmamıştır.

Yer bilimleri ile bağlantılı olan araştırmalarda jeodezik çalışmaların sonunda elde edilen verilerin; jeolojik, jeoteknik ve jeofizik yöntemlerle toplanan veriler ile zenginleştirilmesi ve yorumlanması daha doğru bir analiz adına gereklidir. Yüksek lisans düzeyinde yapılmış bu araştırma sonucunda elde edilen bilgi birikimi yukarıda bahsedilen disiplinlerde yeniden yorumlanarak ve yeni yöntemler ışığında değerlendirilerek riskli bölgelerin haritalanmasında önemli bir rol oynaması beklenmektedir.

DETECTING OF LAND SUBSIDENCE USING SBAS-InSAR: A CASE STUDY IN BURSA-ORHANELI LIGNITE COALFIELD

SUMMARY

Interferometric synthetic aperture radar is a new technique used in investigating the deformations occurring on the earth surface. By its capability of providing much broader domain coverage as compared to any other available techniques, researchers are using the interferometric synthetic aperture radar technique in many areas of their research and primarily crustal deformation.

Interferometric synthetic aperture radar, abbreviated InSAR (or deprecated IfSAR), is a radar technique used in geodesy and remote sensing. This geodetic method uses two or more synthetic aperture radar (SAR) images to generate maps of surface deformation or digital elevation, using differences in the phase of the waves returning to the satellite or aircraft. The technique can potentially measure centimetre-scale changes in deformation over spans of days to years. It has applications for geophysical monitoring of natural hazards, for example earthquakes, volcanoes and landslides, and in structural engineering, in particular monitoring of subsidence and structural stability.

Most SAR applications make use of the amplitude of the return signal, and ignore the phase data. However, interferometry uses the phase of the reflected radiation. Since the outgoing wave is produced by the satellite, the phase is known, and can be compared to the phase of the return signal. The phase of the return wave depends on the distance to the ground, since the path length to the ground and back will consist of a number of whole wavelengths plus some fraction of a wavelength. This is observable as a phase difference or phase shift in the returning wave. The total distance to the satellite (i.e., the number of whole wavelengths) is not known, but the extra fraction of a wavelength can be measured extremely accurately.

In practice, the phase is also affected by several other factors, which together make the raw phase return in any one SAR image essentially arbitrary, with no correlation from pixel to pixel. To get any useful information from the phase, some of these effects must be isolated and removed. Interferometry uses two images of the same area taken from the same position (or for topographic applications slightly different positions) and finds the difference in phase between them, producing an image known as an interferogram. This is measured in radians of phase difference and, due to the cyclic nature of phase, is recorded as repeating fringes which each represent a full 2π cycle.

One fringe of phase difference is generated by a ground motion of half the radar wavelength, since this corresponds to a whole wavelength increase in the two-way travel distance. Phase shifts are only resolvable relative to other points in the interferogram. Absolute deformation can be inferred by assuming one area in the interferogram (for example a point away from expected deformation sources)

experienced no deformation, or by using a ground control (GPS or similar) to establish the absolute movement of a point.

A fundamental requirement of the removal of the ground signal is that the sum of phase contributions from the individual targets within the pixel remains constant between the two images and is completely removed. However, there are several factors that can cause this criterion to fail. Firstly, the two images must be accurately co-registered to a sub-pixel level to ensure that the same ground targets are contributing to that pixel. There is also a geometric constraint on the maximum length of the baseline – the difference in viewing angles must not cause phase to change over the width of one pixel by more than a wavelength. The effects of topography also influence the condition, and baselines need to be shorter if terrain gradients are high. Where co-registration is poor or the maximum baseline is exceeded the pixel phase will become incoherent – the phase becomes essentially random from pixel to pixel rather than varying smoothly, and the area appears noisy. This is also true for anything else that changes the contributions to the phase within each pixel, for example changes to the ground targets in each pixel caused by vegetation growth, landslides, agriculture or snow cover.

The processing of SAR-imagery will usually include some combination of the following steps. Two SAR images are required to produce an interferogram; these may be obtained pre-processed, or produced from raw data by the user prior to InSAR processing. The two images must first be co-registered, using a correlation procedure to find the offset and difference in geometry between the two amplitude images. One SAR image is then re-sampled to match the geometry of the other, meaning each pixel represents the same ground area in both images. The interferogram is then formed by cross-multiplication of each pixel in the two images, and the interferometric phase due to the curvature of the Earth is removed, a process referred to as flattening. For deformation applications a DEM can be used in conjunction with the baseline data to simulate the contribution of the topography to the interferometric phase, this can then be removed from the interferogram.

Once the basic interferogram has been produced, it is commonly filtered using an adaptive power-spectrum filter to amplify the phase signal. For most quantitative applications the consecutive fringes present in the interferogram will then have to be unwrapped, which involves interpolating over the 0 to 2π phase jumps to produce a continuous deformation field. At some point, before or after unwrapping, incoherent areas of the image may be masked out. The final processing stage involves geocoding the image, which resamples the interferogram from the acquisition geometry (related to direction of satellite path) into the desired geographic projection.

By exploiting a large number of differential interferograms, several advanced InSAR techniques have been developed, allowing to follow the temporal evolution of the ground displacements. In this study, it has been particularly addressed the advanced InSAR technique referred to as Small Baseline Subset (SBAS) algorithm.

The small baseline differential SAR-interferometry technique is based on an appropriate combination of differential interferograms produced by data pairs characterized by a small orbital separation (baseline) in order to limit the spatial decorrelation phenomena. The application of the singular value decomposition (SVD) method allows us to easily “link” independent SAR acquisition datasets, separated by large baselines, thus increasing the observation temporal sampling rate.

The availability of both spatial and temporal information in the processed data is used to identify and filter out atmospheric phase artifacts.

The advantage of the system is that the temporal sampling rate can be increased by using SVD method on images that are separated with long time intervals. Instead of removing the error contribution of topographic phase component, the SBAS method employs an estimate of topography error in order to increase the accuracy. Furthermore, errors in the atmospheric phase component are eliminated by a filtering process that is applied on the lines of the resolution element, a technique developed for the permanent scatterer method, taking the advantage of the high spatial density of the imaged pixel.

The purpose of this study is to observe the deformation impacts on an open-pit mining field located in Bursa/Orhaneli using InSAR technique. 15 scenes acquired between January 2012 and July 2013 by TerraSAR-X satellite were processed in analyses. Coherence between SAR images are unfortunately low due to rural investigation area and absence of persistent scatterers that reflect radar signal. In other words, correlation between SAR images are weak. For this reason, a hazard map covering the whole study area could not be generated.

SAR images were processed by ERDAS IMAGINE and ENVI-SARscape software and an attempt was made to detect displacement velocity using SBAS algorithm. In addition, topographic phase was removed by using a 1 arc-second ASTER digital elevation model (DEM).

Annual subsidence velocity was calculated as about 4 mm/year in the direction of radar line-of-sight (LOS) in the vicinity of Gümüşpınar region that has lignite production activity. It was not encountered any vulnerable area affected by deformation over the entire mining field.

The time series analysis of the displacement can be constrained better when the number of images, subsequently the interferogram quantity, is increased. By applying both the persistent scatterer (PS) and SBAS methods with the increased number of images, the velocity estimates can be compared with our initial results. In addition to this, use of a different DEM might be employed to examine its effects on the analysis. Moreover, processing images from ascending orbits would be another interesting test to see whether the same phenomena could be observed.

In geoscience-related researches, geodetic observations need to be supported by data that are collected through geological, geotechnical and geophysical methods in order to perform better analyses. The results of this work can be re-interpreted within the scope of disciplines mentioned above and play a significant role to prepare detailed hazard maps.

1. GİRİŞ

Jeodezi ile ilgili olarak son 30-40 yıl içerisinde büyük değişimler meydana gelmiştir. İlk olarak ölçümlerin yapıldığı alanlar büyümüştür (Hanssen, 2001). Uyduların kullanılmaya başlanması, küresel referans sistemlerinin tanımlanmasını ve kullanılmasını sağlamıştır. Küresel Konumlama Sisteminin (GPS) ortaya çıkması ile birlikte jeodezi için yeni bir çağ açılmıştır.

Jeodezi bilimi, zamana bağlı olarak meydana gelen değişimleri yani deformasyonları farklı tekniklerle belirleyebilmektedir. Geleneksel jeodezik ölçme tekniklerinin birçoğu yeryüzü deformasyonunun belirlenmesi için tekrarlı yersel ölçmelere ihtiyaç duymaktadır (Wright, 2000). Bunların birçoğu nokta tabanlı ölçme sistemleri olup geniş alanların ölçülmesinde maliyeti çok fazladır. Yapay Açıklıklı Radar İnterferometrisi (InSAR), yeryüzü topografyasının ve deformasyonun belirlenmesi için yeni bir jeodezik tekniktir ve yersel ölçmelere ihtiyaç duymaz.

Yapay Açıklıklı Radar İnterferometrisi (InSAR) tekniği, yer kabuğu üzerinde meydana gelen yer değiştirmeleri (yüzey deformasyonları) ölçmeye dayalı ve elektromanyetik spektrumun mikrodalga bölgesinde çalışan aktif bir uzaktan algılama tekniğidir. Bir uçağa veya uyduya entegre edilmiş elektromanyetik dalga gönderen radar, yeryüzündeki nesnelerden geri yansıyan genlik ve faz bilgilerini toplar. Deprem, heyelan, madencilik faaliyetleri vb. gibi etkiler sonucunda oluşan yer değiştirmeler, deformasyon öncesi ve sonrası veriler arasındaki faz bilgilerinin karşılaştırılması sonucu belirlenebilir.

Massonet ve diğ. (1993) çalışmasında InSAR'ın yeryüzü deformasyonlarının ölçülmesinde kullanılabileceğini göstermişlerdir. Kaliforniya'da 1992'de meydana gelen Landers depremine ait Avrupa Uzay Ajansı'ndan elde edilen ERS görüntüleri kullanılarak oluşturulan interferogramlar InSAR'ın jeodezik araç olarak büyük potansiyele sahip olduğunu ortaya çıkaran ilk örneklerdendir. Bu tarihlerden itibaren tekniğin değişik uygulamalar için de geliştirildiği bir sürece girilmiştir.

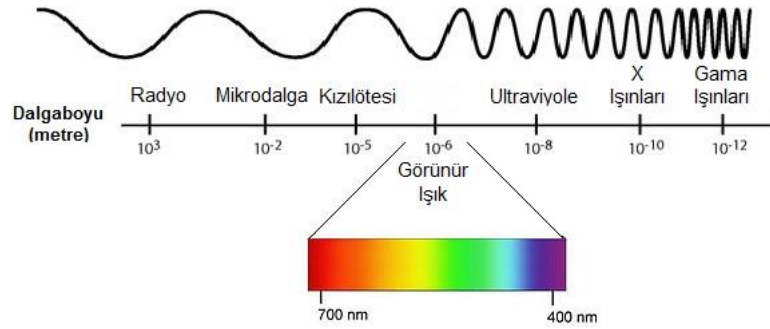
Bu alışmada Bursa İli, Orhaneli İlçesi, Gümüşpınar Köyü mevkiinde bulunan Türkiye Kömür İşletmeleri'ne (TKİ) bağlı Bursa Linyitleri İşletmesi'ndeki (BLİ) yüzey deformasyonlarının InSAR tekniği kullanılarak saptanması hedeflenmiştir. Günümüzde sıklıkla başvurulan bir zaman serileri analizi yöntemi olarak SBAS algoritması ile TerraSAR-X uydusu aracılığıyla elde edilmiş SAR görüntüleri işlenmiş ve yer değiştirme trendi belirlenmeye çalışılmıştır. Bölgedeki deformasyonun dağılımı, büyüklüğü ve hızı incelenmiştir.

Ülkemizde son yıllarda kömür madenlerinde meydana gelen kazalarda artış görülmektedir. Özellikle bugüne kadarki en büyük kaybın yaşandığı 13 Mayıs 2014 tarihli Manisa İli Soma İlçesi'nde meydana gelen faciada 301 kişi hayatını kaybetmiştir (Elitok, 2014). Bu tip kayıpların 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. UZAKTAN ALGILAMA TEORİSİ VE RADAR

2.1 Giriş

Uzaktan algılama tekniği, elektromanyetik spektrumun morötesi ile radyo dalga ışınları arasındaki bölümler kullanılarak, algılayıcılar aracılığı ile havadan veya uzaydan bir obje, alan ya da olay hakkında bilgi toplama, kaydetme ve inceleme bilimidir (Lillesand ve diğ, 2008).



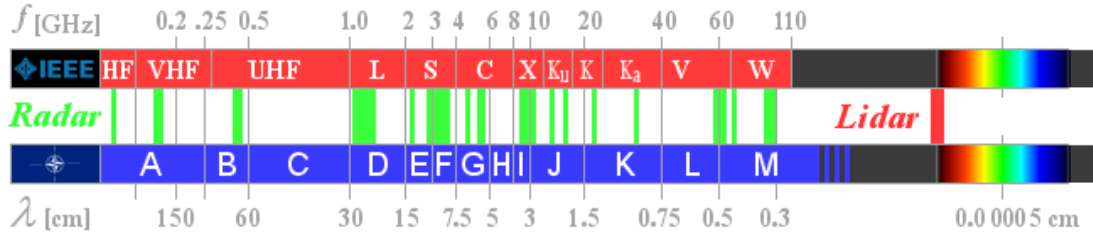
Şekil 2.1 : Elektromanyetik Spektrum (URL1).

Bu tekniğin uygulanmasında incelenen objeler ile doğrudan fiziksel temasa geçilmez. Ancak, yeryüzünden belirli uzaklıkta konumlandırılmış platformlara yerleştirilmiş algılayıcılar aracılığıyla, bu objelerin yansıttıkları elektromanyetik enerji kaydedilir. Canlı veya cansız nesneler, güneşten yeryüzüne ulaşan ya da yapay olarak üretilen enerjiyi yapılarına ve büyüklüklerine göre yutma ya da yansıtma özelliklerine sahiptirler. Objelerin elektromanyetik enerjiyi yansıtabilme karakteristikleri dikkate alınarak tanımlamaları yapılabilir ve yeryüzündeki coğrafi dağılımları belirlenebilir. Yansıyan enerji dijital görüntü şeklinde kaydedilir.

Uzaktan algılama tekniğinde elektromanyetik enerji kaynağı Güneş ya da elektromanyetik dalga üreten yapay bir cihaz olabilir. Uzaktan algılama tekniği, yeryüzüne ulaşıp yansıyan ve algılanan enerjinin kaynağına ve türüne göre aktif ve pasif olmak üzere iki temel başlık altında incelenir. Güneş eş zamanlı hareket eden pasif sistemler Güneş ışığı olmaksızın görüntü elde edemezler. Pasif uzaktan algılama tekniğinde enerji kaynağı Güneş'tir. Bu nedenle gündüz saatlerinde ve açık havada görüntü alınabilmesi koşulu olan bu teknikte enerji çeşidi ise görünür

bölgedeki mavi, yeşil, kırmızı dalga boyundaki elektromanyetik enerji ile insan gözü ile görülemeyen kızılötesi ve termal elektromanyetik enerjilerdir. Aktif sistemlerde ise enerji kaynağını algılayıcı kendisi üretir. Aktif uzaktan algılama tekniğinde enerji kaynağı uydu ya da uçak gibi taşıyıcı platformların sahip olduğu düzeneklerdir. Bu teknikte kullanılan enerji çeşidi mikrodalga boyutundaki enerjilerdir (Balık, 2004).

Aktif uzaktan algılama sistemleri gece ve gündüz, her türlü hava koşulunda çalışabilmektedirler. Bu sistemler görüntü kaydeden ve etmeyenler olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar. Görüntü kaydeden aktif mikrodalga algılayıcı olarak en iyi bilinen sistemler RADAR’lardır. RADAR kelimesi, RAdio Detection And Ranging kelimelerinin kısaltılmasından oluşmuştur. Uzaktan algılamada kullanılan en uzun dalga boyu mikrodalga bölgesinde yer almaktadır ve RADAR bu bölgede 1 cm ile 1 m dalga boyları arasında değerler alır.



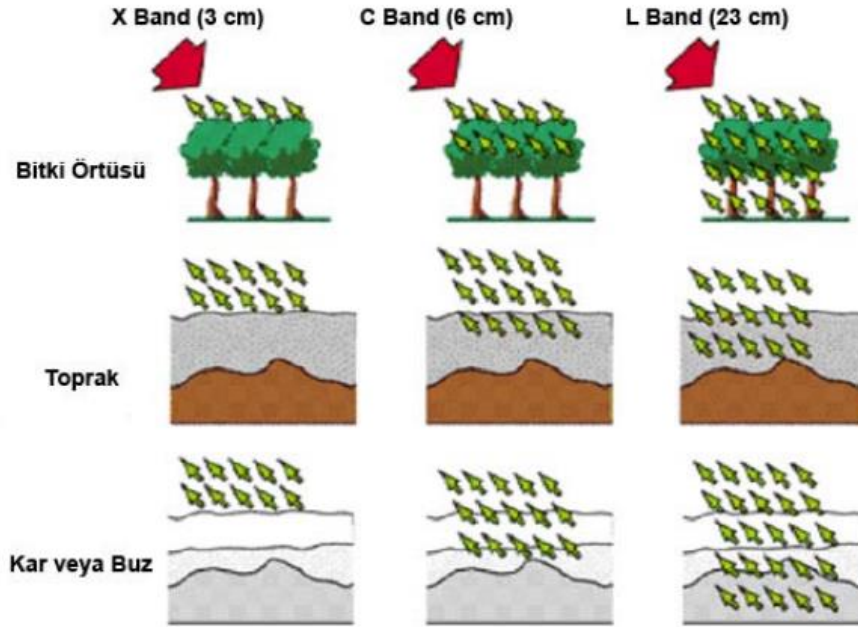
Şekil 2.2 : IEEE ve NATO tarafından kullanılan radar bantları. (URL2).

Aktif uzaktan algılama sistemlerinde algılayıcının bant çeşidine göre detay değişimi gözlenir. Radar algılayıcı bantları kullanılan dalga boyu ve frekansına göre çeşitli harflerle temsil edilirler. Bu harfler tamamen rastgele verilmiştir (Hussin, 2005). Aktif uzaktan algılama sistemlerinde çoğunlukla kullanılan bantlar, bunların frekans ve dalga boyu değerleri ile bu radar bantlarında algılayıcı barındıran uydular aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Çoğunlukla kullanılan radar bantları ve özellikleri.

Bant	Frekans	Dalga Boyu	Uydu
L	2-1 GHz	15-30 cm	ALOS, JERS-1
C	8-4 GHz	3.75-7.5 cm	RADARSAT-1/2, ERS-1/2, ENVISAT
X	12.5-8 GHz	2.4-3.75 cm	TerraSAR-X, TanDEM-X, COSMO-SkyMed

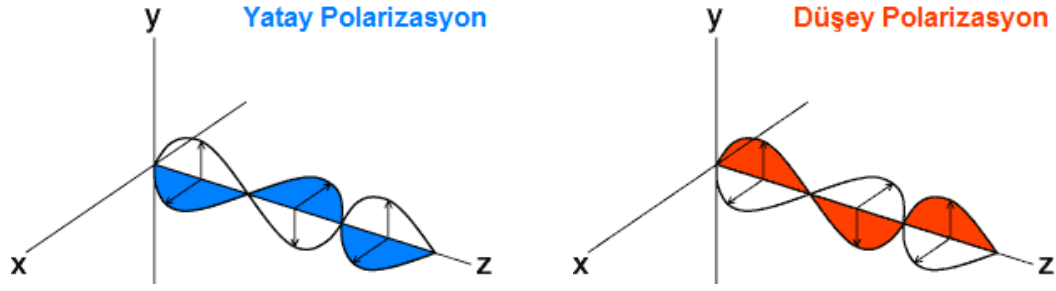
Radar bantlarının dalga boylarının farklı olması, dalga boylarının nesneyi geçme özelliğini (penetration) değiştirir. Böylece farklı dalga boyuna ait bantlar farklı nesnelere ait bilgilerin üretilmesinde kullanılır.



Şekil 2.3 : Radar dalga boylarının nesne üzerine etkisi.

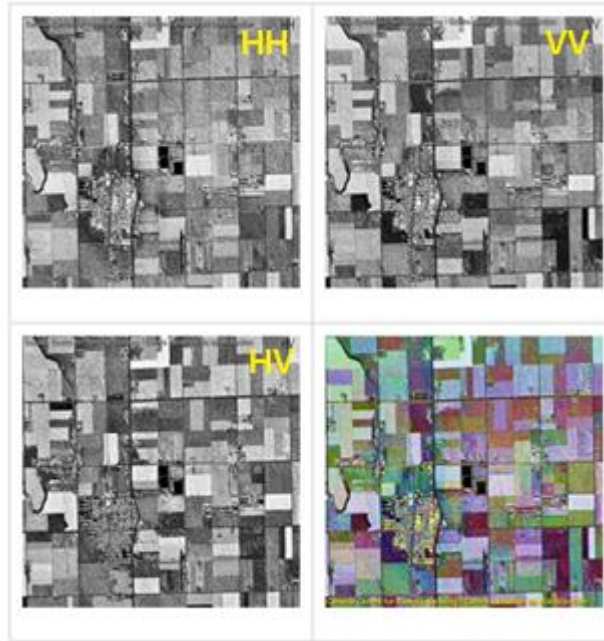
Dalga boyu büyüdükçe radar sinyali yüzeyin içine doğru ilerleyecek fakat küçük detaylardan meydana gelen farklar algılanmayacaktır. Burada dikkatle üzerinde durulması gereken diğer bir konu da su ve nem oranıdır. Çünkü mikrodalgalar su ve ıslak yüzeylerden birkaç milimetreden fazla derinliğe geçemezler. Özellikle su veya kar ve buzullarla kaplı bölgede radar sinyalleri yüzeyden tam yansıma yapacak ve yüzey hakkında bilgi elde edilemeyecektir (Akabalı, 2002).

Ayrıca farklı nesne türlerine ait bilgi üretilmesini sağlayan diğer bir kavram da polarizasyondur. Polarizasyon basit olarak, elektromanyetik dalganın bir bileşke parametresi olan elektrik alanının yöneltmesini ifade eder. Radar tekniği ile yatay ve düşey polarize olmuş sinyaller üretilir ve kayıt edilir. Sistem aynı veya farklı polarizasyondaki sinyalleri gönderip, geri almaya göre de ayarlanabilir. En çok kullanılan polarizasyon kombinasyonları HH, VV, HV ve VH'dir. Birinci harf gönderilen polarizasyon tipini, ikincisi ise geri alınanın tipini gösterir.



Şekil 2.4 : Yatay (horizontal) ve düşey (vertical) polarizasyon.

Ayrıca polarizasyon, yüzeyin farklı seviyelerinden bilgi edinilmesinde kullanılabilir (Örneğin; bitki formları ve dağılımlarının anlaşılması). Özellikle yeryüzündeki doğrusal cisimler polarizasyon doğrultusu ile uyumlu olması durumunda güçlü bir yansıma yaparlar. Örneğin bir elektrik direği ya da ağaç VV polarizasyon modunda daha parlak görünür.



Şekil 2.5 : Farklı polarizasyonlarda radar görüntüleri (URL3).

2.2 Gerçek Açıklıklı Radar (RAR)

Radar görüntüsü, yer yüzeyine yollanan enerji ile yeryüzünden uyduya geri dönen enerji arasındaki oran hesaplanarak oluşturulur. Algılayıcıya geri dönen enerjiye geri saçılma (backscatter) denir (Balık, 2004). Gerçek Açıklıklı Radar (Real Aperture Radar), bir uçak ya da uydu platformu üzerine yerleştirilen anten ile platformun

hareket ettiği yön doğrultusuna (azimuth direction) dik olarak alım yapar (Ristau, 1999).

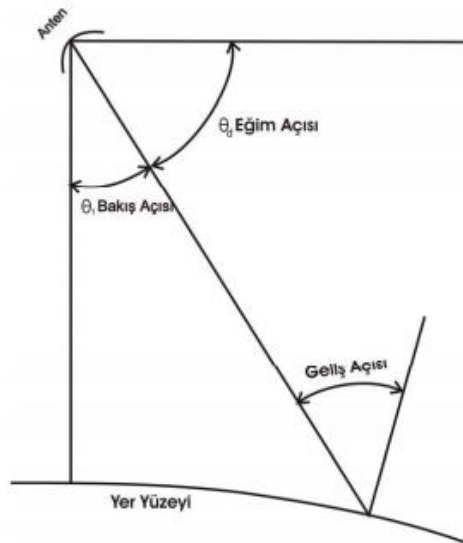
Radar uyduları yollanan ve geri dönen her bir radar darbesi (pulse) arasındaki zaman farkını ölçer, bu da nesnelerin yerlerinin hassas bir şekilde belirlenmesini sağlar. Gönderilen bu sinyalin (enerjinin) yayılım hızı bilindiğinden obje ile enerji gönderen anten arasındaki eğik uzaklık (slant range) hesaplanabilmektedir. Enerji havada yaklaşık $c = 300 \times 10^6$ m/sn ışık hızı ile yayılır.

Temel radar menzil formülü;

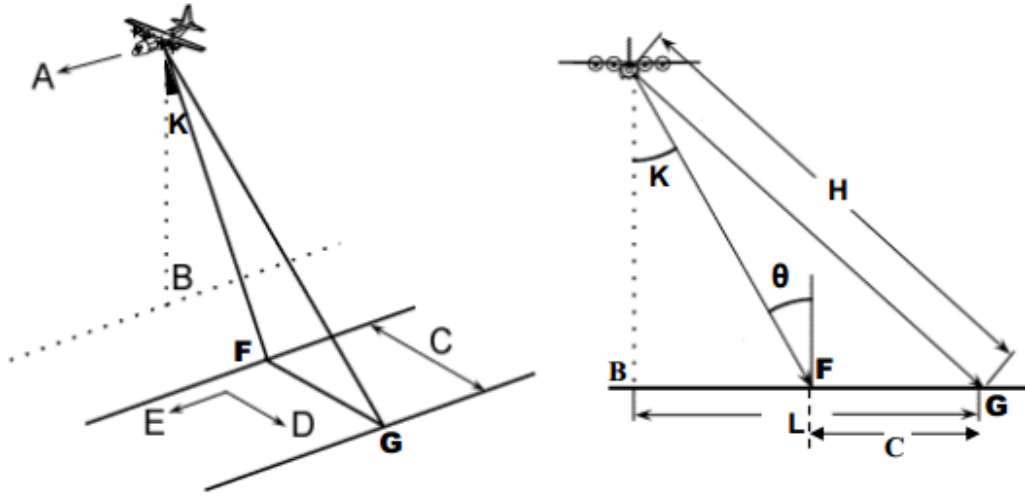
$$R = \frac{ct}{2} \quad (2.1)$$

olarak verilmektedir. Burada; R, sinyalin gönderildiğı radar anteninden nesneye olan eğik mesafe, c, ışık hızı ve t, gönderilen ve dönen sinyal darbesi arasında geçen süredir. Sinyal yolculuğı gidiş ve dönüş şeklinde çift yönlü olduğı için uzaklık hesaplarında sinyal yolculuk süresinin yarısı alınır.

Mikrodalga enerjisi yaklaşık 10^{-6} sn gibi çok kısa aralıklarla darbeler şeklinde yollanır ve antenden yollanan bu enerji darbelerinden geriye dönen sinyaller sırasıyla kaydedilir. Tipik bir radar uydusunun algılama geometrisi Şekil 2.6'da gösterilmektedir. Sistemin bakış açısı (look angle) nadir noktası ile hedef arasındaki açıdır. Eğim açısı (depression angle), bakış açısının bütünleyenidir ve geliş açısı bakış açısının yer yüzeyinin normali ile yaptığı açıdır.



Şekil 2.6 : Radar uydusunun algılama geometrisi (Lillesand ve diğ, 2008).



Şekil 2.7 : Radar görüntüleme geometrisi (Saygılı, 2008).

- | | |
|--|--|
| A: Uçuş yönü | G: Uzak menzil noktası |
| B:Nadir noktası | K: Bakış açısı |
| C:Tarama genişliği | θ:Geliş açısı |
| D: Radarın bakış doğrultusu | H:Yan bakış mesafesi/Eğik mesafesi |
| E:Uçuş doğrultusuna paralel olan azimut doğrultusu | L:Yeryüzündeki arazi uzunluğu/Yatay bakış mesafesi |
| F:Yakın menzil noktası | |

Arazi üzerinde bir kolon boyunca tarama yapan radar sistemi radar dalgalarını bakış doğrultusu (D) boyunca gönderir. Bakış doğrultusu, uçuş doğrultusu (A) veya azimut doğrultusuna (E) diktir. Uydunun izine en yakın olan nokta yakın menzil (F), uzak olan kenar ise uzak menzil noktası (G) olarak tanımlanır.

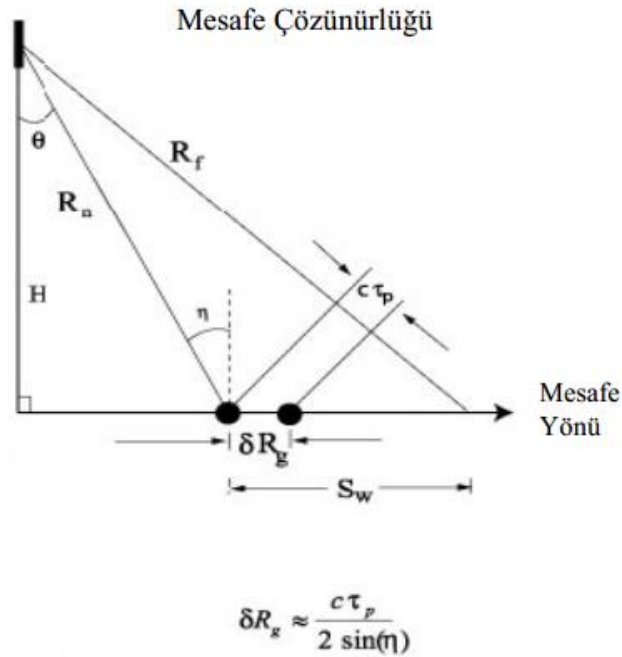
RAR sistemlerinde görüntü alımı anten boyuna bağlıdır. Anten boyu uzadıkça açıklık açısı küçülür ve görüntünün çözünürlüğü artar. Konumsal çözünürlüğü anten boyuna bağlıdır.

2.3 Mesafe/Menzil (Range) Çözünürlüğü (Across-Track Resolution)

Mesafe çözünürlüğü uçuş doğrultusuna diktir ve anten uzunluğundan bağımsızdır. Çözünürlük sadece görüntü açısına (ışın demetinin yeryüzü ile yaptığı açı) ve radar vuruş süresine bağlıdır. Sinyallerin geri dönüş zamanının belirlenmesiyle algılayıcı ve yansıtan nesne arasındaki uzaklık belirlenebilir.

Radar sistemlerinin bakış açısı doğrultusu üzerinde bulunan birbirine yakın iki detayın ayırt edilebilme özelliğidir. Radar sistemleri yeryüzüne sinyalleri belli aralıkta darbeler halinde gönderirler. Bunların her birine darbe (pulse) denir.

Uzunluk çözünürlüğü bakış açısı ve darbe uzunluğu ile belirlenir. Genel anlamda uzunluk çözünürlüğü yaklaşık olarak darbe uzunluğunun yarısı kadar denilebilir.



Şekil 2.8 : Mesafe çözünürlüğü (Çakır, 2003).

H: Uydu Yüksekliği

R_n: Yakın Mesafe

R_f: Uzak Mesafe

η: Yansıma Açısı

c: Işık Hızı

τ_p: Darbe (pulse) zaman aralığı

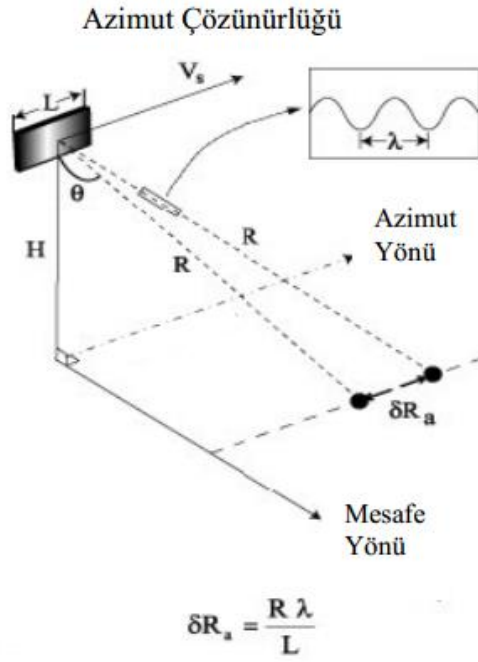
δR_g: Yeryüzündeki mesafe çöz. karşılığı

S_w: Sinyalin (beam) yeryüzündeki mesafe karşılığı.

Geri saçılan vuruşlar nesneden gelme zamanına göre düzenlenerek kaydedilirler. Eğer darbe genişliği çözünürlüğü artırmak için küçük gönderilirse, geri gelen vuruşun sinyal/gürültü oranı (signal/noise ratio) artacaktır, çünkü gönderilen enerji düşük bir değerde dönecektir.

2.4 Azimut Çözünürlüğü (Along-Track Resolution)

Azimut çözünürlüğü bir radar görüntüleme sisteminin radar algılayıcısının hareket yönüne paralel doğrultuda bulunan birbirine yakın iki detayın ayırt edilebilme özelliğidir.



Şekil 2.9 : Azimet çözünürlüğü (Çakır, 2003).

H: Uydu Yüksekliği

λ : Faz Dalga Boyu

V_s : Uydunun Hızı

R: Mesafe

θ : Bakış Açısı

δR_a : Azimet çöz. yeryüzündeki karşılığı

Azimet ve mesafe isimlendirmeleri aynı zamanda yönlendirme için de kullanılmaktadır. Azimet hava aracının uçuş yönünü ve mesafe de hava aracından yapılan kayıt için gözlem yönünü ifade etmektedir. Çözünürlük, iki objenin birbirinden fark edilebilecek şekilde kayıt edilebildiği yer yüzündeki en kısa mesafe olarak tanımlanabilir (Çakır, 2003).

Azimet çözünürlüğü, kısa dalga boylu enerji ve uzun anten boyuna bağlı olarak artar. Ancak fiziksel olarak yeterince uzun anten kullanılamaması istenilen çözünürlükte veri üretilmemesine neden olmaktadır. Örneğin; 100 m uzaklıktaki bir nesneyi L bandı ($\lambda=25$ cm) ile alınan görüntüde 25 m çözünürlük elde etmek için 1km'lik anten boyuna ihtiyaç vardır. Bu nedenle yapay açıklıklı radar sistemleri geliştirilmiştir.

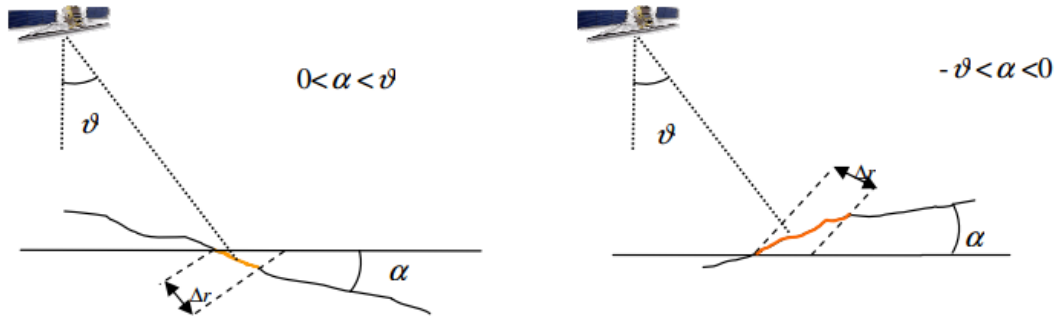
2.5 Radar Görüntü Hataları

Pasif uzaktan algılama sistemlerinden farklı olarak aktif uzaktan algılama sistemleri yan bakışlı bir geometriye sahiptir. Radar görüntülerinde nesneler radar uydusuna doğru eğilmiş bir şekilde algılanır. Nesnenin algılayıcıya olan uzaklığını ölçmede yer gerçek uzaklığı yerine aradaki eğik uzaklık ölçüldüğü için geometrik hatalar oluşur.

Bunlar; kısa görüntüleme (foreshortening), ters görüntüleme (layover) ve gölgeleme (shadowing) oluşumudur.

2.5.1 Kısa görüntüleme (foreshortening)

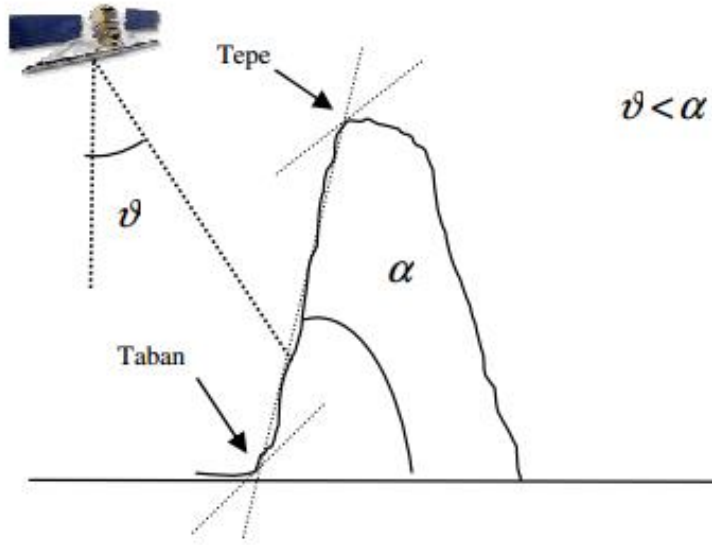
Eğimli arazi yüzeyine gelen radar sinyalinin, geri saçılması sonucu ölçülen uzunluğun gerçek değerinden kısa olması durumudur. Sinyalin geliş açısıyla birlikte arazinin eğim açısına da bağlıdır (Şekil 2.10). Radar sinyali eğimli araziye dik olduğunda yani eğimli arazide tabana, yüzeye ve yüzeyin tepesine aynı anda radar sinyali geldiğinde kısa görüntüleme hatası en büyük değerini alır. Algılayıcıya bakan eğimli arazi parlak beyaz kaydedilirken, algılayıcıyı görmeyen kısımlar siyah kaydedilir. Dağın tabanı tepesinden önce kaydedilir. Hata büyüklüğü geliş açısına bağlıdır.



Şekil 2.10 : Kısa görüntüleme hatası (Franceschetti ve Lanari, 1999).

2.5.2 Ters görüntüleme (layover)

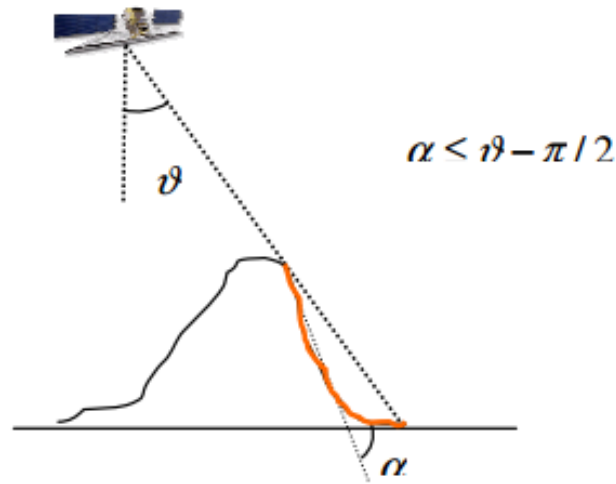
Eğimli arazide geri saçılan enerjinin, yüzeyin üst tarafının alt tarafından önce kaydedilmesinden oluşur. Ters görüntüleme daha çok enerjinin geliş açısının küçük olduğu zamanlarda gerçekleşir, bu da pek çok nesnenin görüntülenememesine neden olur. Dağlık bölgelerde görülen ters görüntüleme hatası daha çok küçük geliş açısı ile alınan görüntülerde görülür.



Şekil 2.11 : Ters görüntüleme hatası (Franceschetti ve Lanari, 1999).

2.5.3 Gölgeleme (shadowing)

Radar sinyalinin yeryüzünü aydınlatamadığı yerlerde görülür. Bu bölgelere ait geri saçılım bilgisi kayıt edilemediği için siyah kaydedilir. Geliş açısı yakın menzilden uzak menzile doğru arttıkça, radar ışınları daha eğimli gelecektir ve gölge etkisi artacaktır. Yüzey eğimi, ışın demetinin geliş açısından daha dik ise gölge oluşur. Dağlık bölgelerde görülen gölge hatası, o bölgeye ait geri saçılımın kaydedilememesine neden olurken sayısal yükseklik modeli de üretilemez.

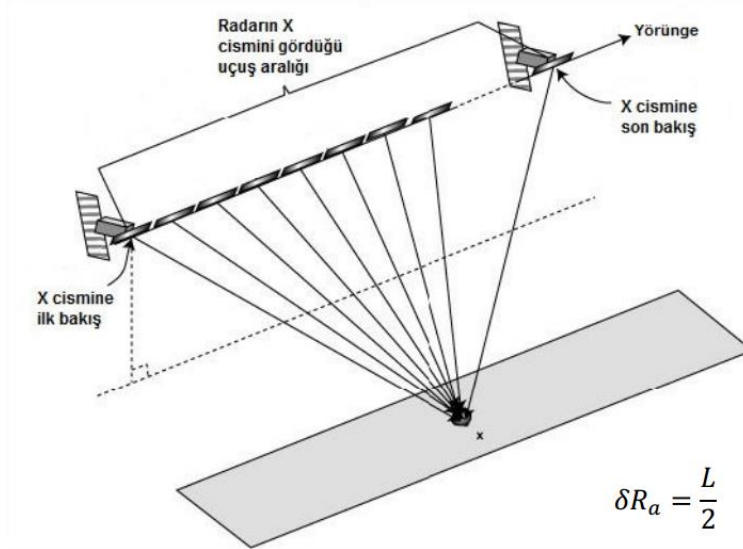


Şekil 2.12 : Gölgeleme hatası (Franceschetti ve Lanari, 1999).

2.6 Yapay (Sentetik) Açıklıklı Radar (SAR)

Gerçek açıklıklı radar sisteminin neden olduğu çözünürlük problemi, geliştirilen SAR sistemi ile çözülmüştür. Bu sistemde kısa bir anten, uzun bir antenin görevini görecek şekilde tasarlanarak yapay olarak uzatılmıştır. SAR sistemine göre gönderilen mikrodalga genişliği RAR sistemine göre daha dardır. Burada doppler prensibi temel alınmıştır.

Bu aşamada diğer önemli terim olarak Doppler prensibinden bahsedilmelidir. Kısaca, dalga özelliği gösteren herhangi bir fiziksel varlığın frekans ve dalga boyunun hareketli (yakınlaşan veya uzaklaşan) bir gözlemci tarafından farklı zaman ve/veya konumlarda farklı algılanmasıdır (Olmsted, 1993). Burada frekans sabit, dalga boyu değişiklik gösterse de bu iki büyüklük birbiri ile ilişkili olarak ifade edildiği için birindeki değişim diğerinin de değişmesi anlamına gelmektedir. Bu prensip kullanılarak yapay açıklık oluşturulur ve sanal anten boyunca görülen bölge için çözünürlük önemli ölçüde artırılır.



Şekil 2.13 : Yapay açıklı radar (Çakır, 2003).

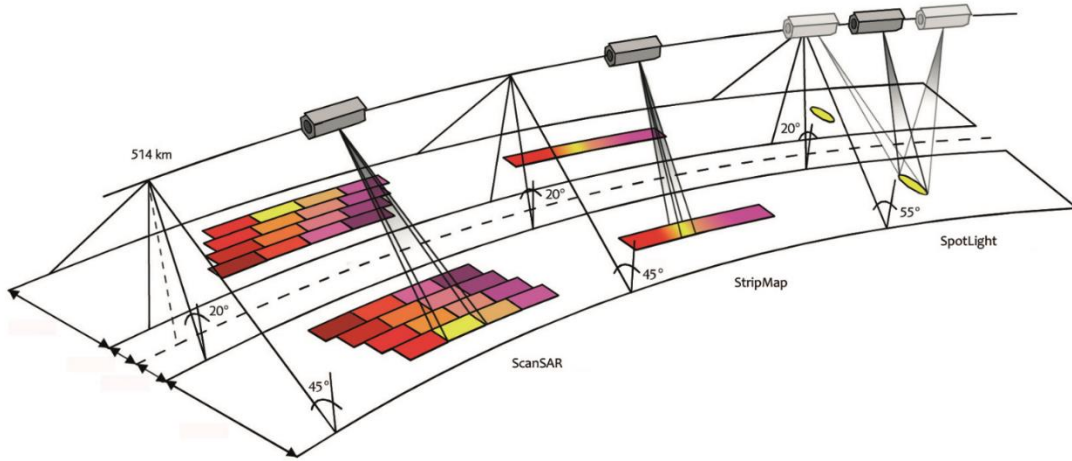
Mesafe çözünürlüğü için;

$$\delta R_R = \frac{c}{2B_{BW}} \quad (2.2)$$

ifadesi kullanılabilir. Burada; c , ışık hızını ve B_{BW} gönderilen radar darbesinin (pulse) frekans bant genişliğini ifade etmektedir. (Lyons, 2002) Eşitlikten görüldüğü gibi mesafe çözünürlüğü görüntü alımı yapılan platform yüksekliğinden bağımsızdır ve bant genişliğinin artırılması ile doğru orantılıdır. Gönderilen darbe, dalga boyunun şekli değiştirilerek modüle edilmiş frekansıdır.

2.7 Yapay Açıklıklı Radar Görüntüleme Yöntemleri

Yapay Açıklıklı Radar (SAR) sistemlerinde kullanılan SpotLight, StripMap ve ScanSAR görüntüleme yöntemleri aşağıda açıklanmıştır. Bu yöntemleri birbiriyle kıyaslayacak olursak; SpotLight görüntüleme yönteminde çözünürlük en yüksek değeri alırken görüntülenen alan en az değere ulaşır, ScanSAR görüntüleme yönteminde ise çözünürlük en düşük değeri alırken görüntülenen alan en fazladır.



Şekil 2.14 : SpotLight, StripMap ve ScanSAR görüntüleme (URL-4).

2.7.1 SpotLight Görüntüleme Yöntemi

SpotLight görüntüleme yöntemiyle antenin belirli bir hedef üzerinde daha uzun süreli kalmasıyla azimut çözünürlüğü daha da iyileştirilir; bu çözünürlük azimut açısında rotayı takip eder. Hedef üzerinde daha uzun bir aydınlatma süresi (illumination time) yapay açıklığın büyümesini doğrudan etkiler ve ulaşılabilen açısal çözünürlük iyileşir, bant genişliği ve zaman çarpımı değeri yükselir. Ancak çözünürlükteki bu iyileşme resimlendirilmesi mümkün olabilen alanda kayıplar karşılığında sağlanabilmektedir. Bir sonraki aydınlatılacak nokta ancak gözlemlene zamanı ve uçuş hızına bağlı olarak radarın görüş menziline girer.

2.7.2 StripMap Görüntüleme Yöntemi

Tipik StripMap temelli platformlar doğrusal bir hatta yeryüzüne paralel olacak şekilde uçarken SAR mikrodalga demetleri uçuş hattına göre belirli bir açıyla sabitlenmiş bir şekilde yeryüzünü aydınlatır. Yeryüzünde görüntülenmek istenen alanın genişliği, SAR anteninin mikrodalga demet genişliği ile platformun yerden yüksekliğine ve antenin bakış açısına bağlıdır. Görüntülenmek istenen alanın uzunluğu ise veri toplama süresiyle doğru orantılıdır.

2.7.3 ScanSAR Görüntüleme Yöntemi

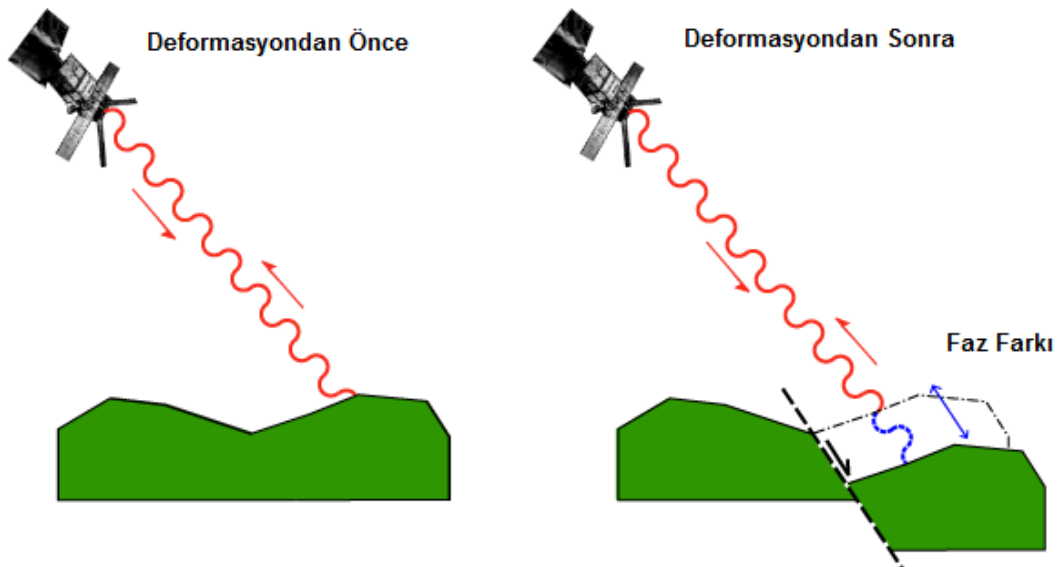
Geniş alan taramasına olanak sağlayan ScanSAR görüntüleme yönteminde görüntülenmek istenen alan üzerindeki birçok komşu şerit (adjacent swath), her biri farklı geliş açısına sahip eş zamanlı mikrodalga demetleriyle taranır. ScanSAR mikrodalga demetleri, kalibre edilmiş StripMap mikrodalga demetlerinden oluşmaktadır (Roth, 2003).

3. YAPAY AÇIKLIKLI RADAR İNTERFEROMETRİ (InSAR)

3.1 Giriş

InSAR ya da IfSAR şeklinde kısaltılan Interferometric Synthetic Aperture Radar, günümüzde çoğunlukla jeodezi ve uzaktan algılama çalışmalarında kullanılan bir radar görüntüleme tekniğidir. InSAR tekniği, radar görüntüsü toplayan uydu veya hava araçları vasıtasıyla elde edilmiş görüntülerin Sayısal Arazi Modeli (SAM), yeryüzünün değişiminin incelenmesi ve buzul veya volkanik hareketlerin gözlemlenmesi vb. için görüntülerin birleştirilmesi işlemi olarak tanımlanabilir (Hanssen, 2001; Çakır, 2003).

InSAR, iki SAR görüntüsünün her birinde, uygun resim noktalarına ait faz farkının alınması ile hesaplanan faz bilgisine dayalı bir tekniktir. Faz farkı, aynı konuma gönderilen aynı frekansa sahip sinyaller arasındaki zamansal farkın açı cinsinden değeri olarak düşünülebilir.

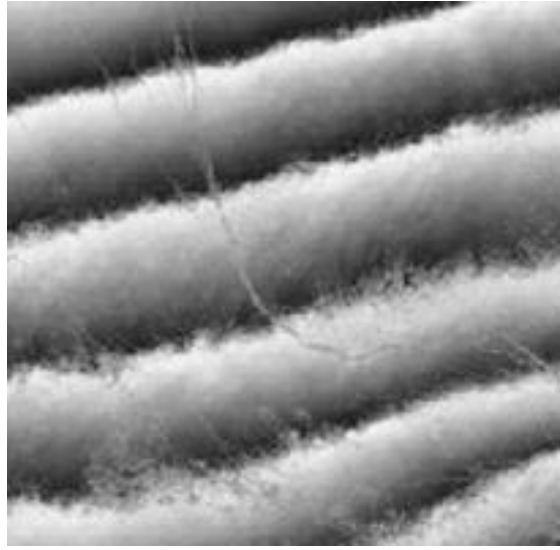


Şekil 3.1 : Faz farkı (URL-5).

Faz farkı alınarak oluşturulan görüntü interferogram olarak adlandırılır (Zebker ve Goldstein, 1986). Elde edilen faz farkı görüntü üzerinde halkalar halinde girişim

paterni oluşturur. Bu renk halkalarından her birine örge (fringe) adı verilir. İnterferometrik örgeler Şekil 3.2’de görülmektedir.

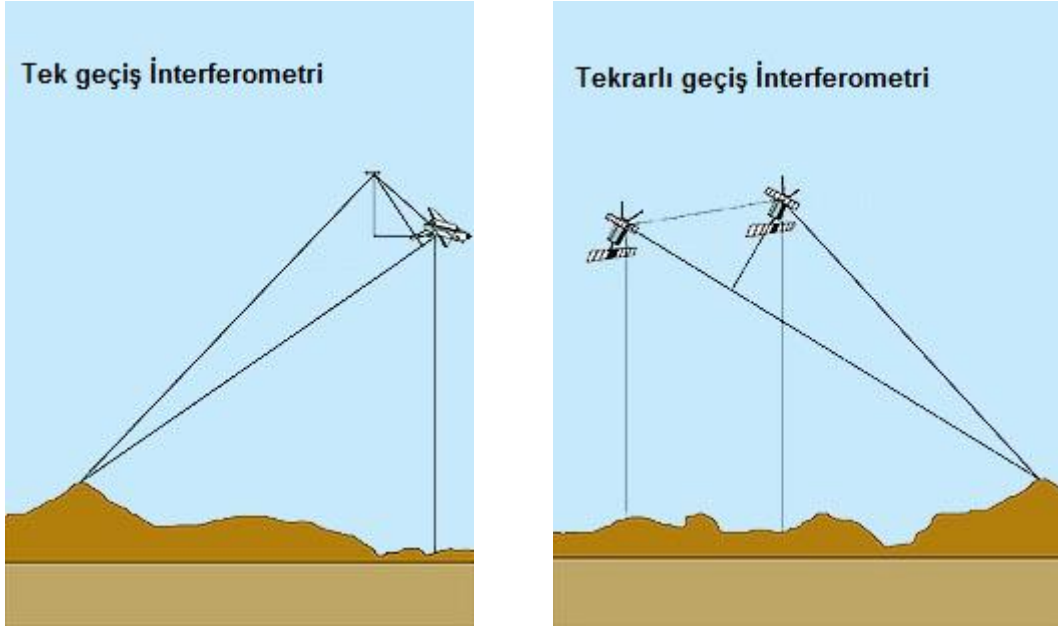
Rölatif faz farkına bağlı olarak iki görüntüden oluşan örgelerin girişim (enterferans) yaparak oluşturdukları yeni görüntüye interferogram adı verilir. İnterferogramdaki faz değişimi, yeryüzündeki nokta ile görüntü alan platform arasındaki mesafenin değiştiğini göstermektedir. Bir tam faz halkası (2π radyan), dalga boyunun yarısı ile orantılı olarak (dalga boyunun yarısının katları olarak) mesafedeki değişimi gösterir (Curlender ve McDonough, 1991; Çakır, 2003; Akoğlu, 2008; Şengün, 2008).



Şekil 3.2 : İnterferometrik örgeler (URL-6).

Radar interferometrisi ilk yıllarda genel olarak topografik çalışmalarda kullanılmıştır. İlk olarak Gabriel ve diğ. (1989) çalışması ile yeryüzü üzerindeki değişimin (deformasyonun) belirlenebileceği ortaya çıkmış ve bu çalışmada 1cm’lik yükseklik değişimi belirlenmiştir.

SAR verisi elde etmek için kullanılan yöntemler iki ana başlıkta incelenebilir, tek geçiş (Single-pass) ve tekrarlı geçiş (Repeat-pass). Tek geçiş yönteminde, iki antenin belirli bir baz mesafesi aralıklarla yerleştirildiği platform bir bölgeyi tarar ve tek kaynaktan yayımlanan sinyal iki anten tarafından kaydedilir. Bu yöntem genellikle uçaklarda kullanılmaktadır. Tekrarlı geçiş yönteminde ise tek kaynaktan yayımlanan sinyal bir anten ile kayıt edilir. Bu yöntemde aynı bölgeye ait iki görüntü almak için o bölgeden aynı yörünge üzerinde en az iki defa geçmek gereklidir. Bu yöntem ise genellikle uydularda kullanılmaktadır.



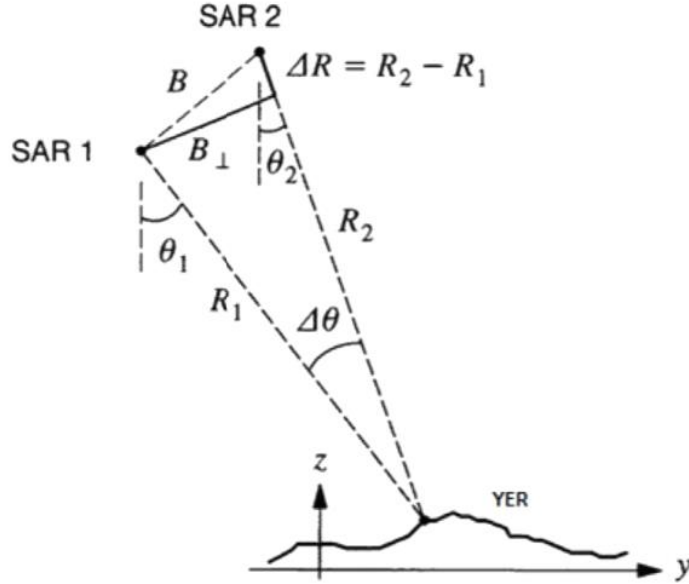
Şekil 3.3 : Tek geçiş ve tekrarlı geçiş interferometri yöntemleri (URL-7).

Kayıt edilen görüntüler, kompleks formatta geri yansıyan sinyal değerlerini içermektedir. Kompleks format ile sinyalin kompleks sayı içerdiği anlamı çıkarılmalıdır. Daha sonra elde edilen görüntüler sonraki değerlendirme adımları için yer istasyonlarına gönderilmektedir.

Yukarıda da bahsedildiği gibi InSAR görüntüleri iki yolla elde edilmektedir, tekrarlı geçiş ve tekli geçiş. Genel olarak tekrarlı geçiş yöntemi uydu sistemleri için uygun bir yöntem olmasına karşın bu yöntemi etkileyen birçok olumsuz sınırlama vardır. Bu sınırlamalardan başlıcaları; baz uzunluğu, geçici uyumsuzluklar (tarımsal faaliyetler, hafriyat vb.), topografik etkiler (çok hızlı yüksekliğin değiştiği dağlık topografya) olarak sayılabilir. Bahsedilen sınırlamalardan en önemlisi baz uzunluğu olarak bilinmektedir. Baz uzunluğu tanım olarak uydunun iki geçiş yörüngesi arasındaki mesafeyi ifade eder (Klees ve Massonet, 1999). Baz uzunluğu değerinin, iyi bir çözüm için mümkün olduğunca küçük olması gereklidir. Bu değer literatürde kısaca şu şekilde ifade edilmektedir;

Görüntü çifti oluşacak herhangi bir çalışmada	$B_{\perp} < 600 \text{ m}$
Sayısal arazi modeli oluşturulacak çalışmalarda	$B_{\perp} < 300 \text{ m}$
Deformasyon belirleme çalışmalarında	$B_{\perp} < 100 \text{ m}$

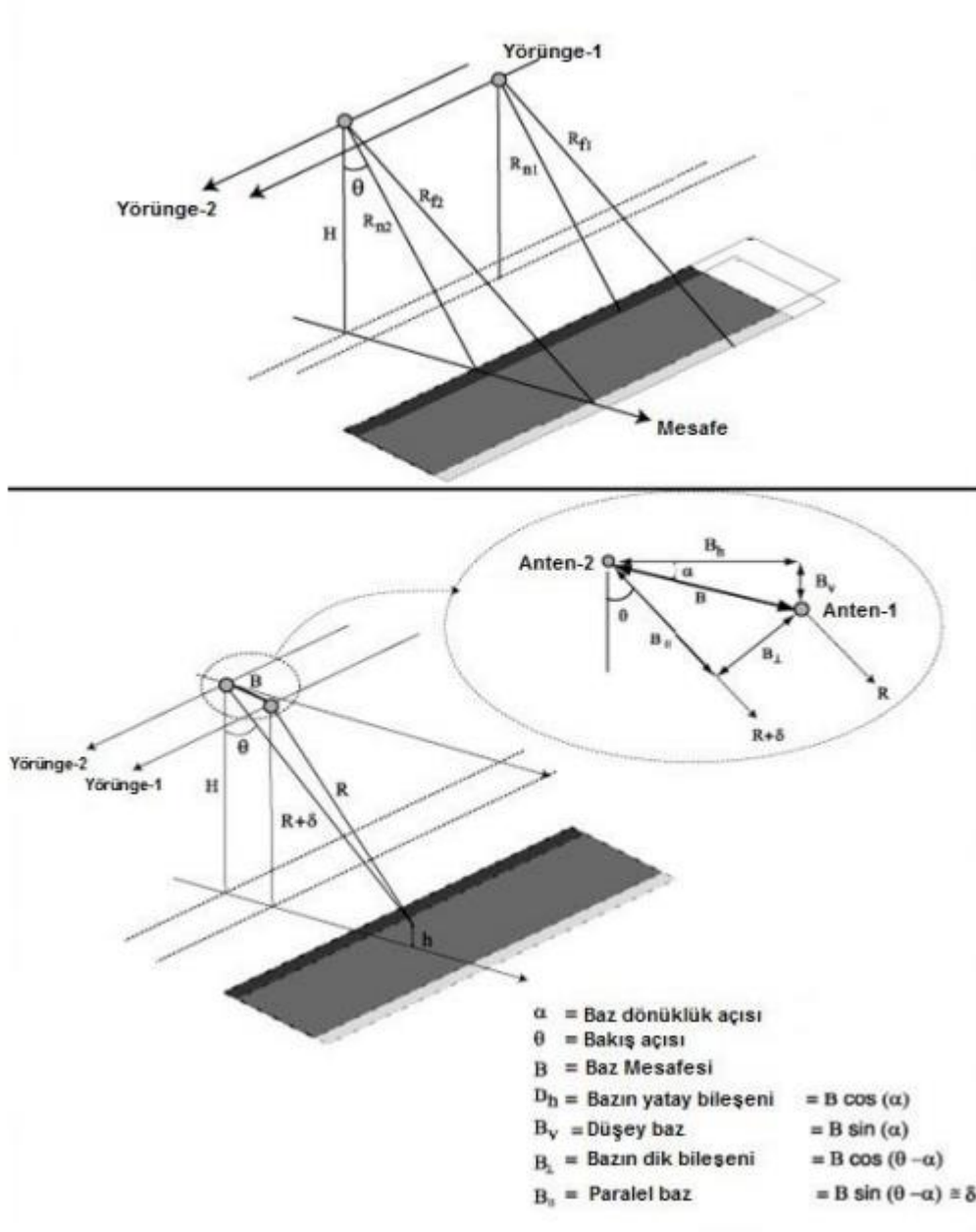
$B_{\perp}$ baz büyüklüğünün dik bileşenini göstermektedir. Dik baz bileşeni, baz uzunluğunun ikinci uydu geçişinde aynı yer cisminin uzanan doğrultuya dik olmayı ifade etmektedir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 : SAR geometrisi (Bamler ve Hartl, 1998).

Dik baz uzunluğu ile yapılacak çalışmanın hassasiyeti arasındaki korelasyon Solaas (1994) ve Gupta (2003) yayınlarında tartışılmıştır.

Uydu, birbirini izleyen iki geçişinde aynı yörüngeyi takip edemediği için yeryüzündeki noktanın iki farklı noktadan görüntüsü alınmaktadır. Bu durum noktaya ait stereo görüntü çiftini oluşturur ve ayrıca yeryüzündeki aynı nokta ile uydu arasında iki farklı yörünge nedeniyle faz farkı oluşmasına sebep olur (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 : Tekrarlı geçiş yöntemi geometrisi (Çakır, 2003).

Mesafeye bağlı faz değişimi Gabriel ve diğ. (1989) ve Hanssen (2001)'de

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} \delta R \quad (3.1)$$

olarak verilmektedir. λ radar sisteminde kullanılan sinyalin dalga boyu, δR ise mesafe değişimidir.

3.2 Fazı Etkileyen Faktörler

InSAR yöntemi hızlı, kolay ve diğer jeodezik yöntemlere göre maliyeti düşük bir yöntem olsa bile var olan sınırlayıcı ve zorlayıcı limitler nedeniyle değerlendirme aşaması zor bir yöntemdir. Daha önce yapılan çalışmalarda bu konuya oldukça yoğun bir şekilde değinilmiştir (Massonnet ve Feigl, 1995; Hanssen, 2001; Çakır ve diğ., 2003; Çakır, 2003; Sun ve diğ., 2008; Şengün, 2008).

Fazı etkileyen faktörler;

- Dik baz mesafesi
- Termal ve zamansal korelasyonsuzluk
- Yörünge hatası
- Küresellik etkisi
- Atmosferik etkiler
- Bölge topografyasının etkileri ve bitki örtüsü

olarak sayılabilir (Şengün, 2008; Hanssen, 2001).

3.2.1 Dik baz mesafesi

InSAR geometrisi içinde iki görüntünün alım zamanına ve konumuna bağlı parametreler vardır. Bu parametreler “spatial and temporal separation” olarak ifade edilen konum ve zamana bağlı farklardır. Zamana bağlı fark; aynı uydu ile aynı bölgenin iki görüntüsünün alım zamanı arasındaki farkı ifade eder. Konuma bağlı fark ise aynı uydunun aynı bölgede alım yaptığı anlarda yörüngeleri arasındaki mesafeyi ifade etmektedir (Şekil 3.4). Konuma bağlı fark kısaca baz olarak bilinmektedir.

Baz parametresi de kendi içinde bakış yönüne dik ve paralel olmak üzere iki bileşene sahiptir. Bu bileşenlerden bakış yönüne dik olan bileşen normal veya dik baz olarak ifade edilmektedir. Dik baz bileşeni InSAR değerlendirmelerinde önemli bir sınır olup maksimum değeri 1100 m’dir. Bu değer üzerinde baza sahip görüntüler uyumsuz olup değerlendirilememektedir.

Ayrıca bazın dik bileşeni, yükseklik belirsizliğinin (height ambiguity) hesaplanmasında kullanılmaktadır. Bu değer topografik hassasiyet olarak bilinmektedir (Çakır, 2003). Yükseklik belirsizliği interferogram içinde hatalı örgelerin oluşmasına neden olabilir. Bu negatif etkinin giderilmesi için sayısal arazi

modelinden veya ikinci bir interferogramdan yararlanılmalıdır (Solass, 1994; Zebker ve Villasenor, 1992; Mann, 2002).

3.2.2 Termal korelasyonsuzluk

Termal korelasyonsuzluk, interferogramda sinyal gürültü oranı ile ifade edilen SNR değerinin bir oranıdır. Termal korelasyonsuzluk;

$$\frac{1}{1 + SNR^{-1}} \quad (3.2)$$

olarak formüle edilebilir. SNR ise;

$$SNR = \frac{P_S}{P_N} \quad (3.3)$$

eşitliği ile verilmektedir. Burada P_S sinyal gücünü ve P_N gürültünün gücünü göstermektedir. SNR ise radar sistemine ait bir parametredir (Şengün, 2008; Curlender ve McDonough, 1991).

Termal korelasyonsuzluk iki görüntüdeki gürültünün görüntü eşleştirmesine olan etkisi olarak ifade edilebilir. Bu hatanın giderilmesi için SNR analizi yapılmalıdır (Oveisgharan, 2007).

3.2.3 Zamansal korelasyonsuzluk

Zamansal korelasyonsuzluk, iki görüntünün alım zamanı arasında piksellerin geri yansıtım değerlerinde oluşan anlamlı olmayan anormal farkları ifade etmektedir. Tekrarlı geçiş sisteminde önemli bir etkiye sahiptir. İki görüntü arasında geçen zamanda oluşabilecek değişimler özellikle su kütlelerinde, tarım alanlarında, görüntülenen objelerin su ihtivasında vb. hızlı değişim gösteren objelerde ve bölgelerde interferogram üzerinde hatalı örge oluşumuna yol açacaktır.

Değişim gösteren piksellerin komşu pikseller yardımıyla belirlenmesi olasıdır. Bu değişimin analitik olarak modellenmesi mümkün değildir. Özellikle yukarıda da bahsedildiği üzere su kütleleri, orman ve tarım arazileri ve hafriyat bölgelerinde zamana bağlı değişimler interferograma bozucu etki yapacaktır. Bu nedenle görüntü seçiminde kurak, çıplak ve değişimin az olduğu yerlerin seçilmesi ve seçilen bölgenin bitki indeksi vb. veri yapısına bakılması önemlidir (Şengün, 2008; Hanssen, 2001).

3.2.4 Yörünge hatası

SAR geometrisi içerisinde bazın hesaplanması ve elde edilen verilerin referans elipsoidi ile ilişkilendirilmesinde yörünge bilgisi gereklidir. Yörünge bilgisinde oluşacak hata interferogram üzerinde hatalı örgelerin oluşmasına neden olacaktır.

Yörünge hatasının uçuş yörüngesine paralel (along-track), uçuş yörüngesine dik (across-track) ve açısallık olmak üzere üç bileşeni vardır. Uçuş yörüngesine paralel olan bileşen görüntü eşlemesi sırasında (coregistration) giderilmekte ve hata iki boyutlu hale dönüşmektedir (Hanssen, 2001).

İki boyutlu hatanın uzunluk bileşeni istatistik olarak belirlenebilir. Buna karşın açısallık yani yönelimsel hata bilinmemektedir. Bu sebeple uydu yörüngesinin interferogram üzerinde hata üretmesi olasıdır. Bu etkinin kaldırılması için uydu yörüngelerinin hassas olarak belirlenerek ek bir bilgi olarak değerlendirmeye katılması anlamlı olacaktır.

3.2.5 Küresellik etkisi

Topografyanın olmadığı durumda, yani yeryüzünde dağ, tepe, dere gibi hiçbir topografik detayın olmaması durumunda bile, interferogramın fazında, dünyanın küreselliğinden dolayı faz oluşacaktır (Zebker ve diğ. 1994).

3.2.6 Atmosferik etkiler

Atmosferik etkiyi iki başlıkta incelemek mümkündür. Birincisi iyonosferik etki ve ikincisi de troposferik etkidir. Atmosfer durağan ve homojen bir yapıda olsaydı interferogram üzerindeki etkisi de homojen ve sabit olacaktı. Gerçekte böyle bir durum doğada bulunmamaktadır. Özellikle tekrarlı geçiş yönteminde, görüntü alım zamanının farklı olması atmosferik gecikme etkisinin interferograma yansımaları arttırmaktadır. Yapılan çalışmalar bu etkinin 6 cm'ye kadar ulaştığını göstermektedir (Delacourt ve diğ. 1998).

Atmosferik gecikmenin tespit edilerek ölçülerden temizlenmesi mümkün değildir. Bu nedenle ek parametrelerle veya model kullanılarak elimine edilmesi gereklidir. SAR sistemi nedeniyle temizlenmesi en zor sınırlama atmosferik gecikmelerdir.

GPS sisteminde olduğu gibi çift frekanslı sistemler olmadığından faz ölçmelerinden iyonosferik gecikmeler temizlenememektedir. Halihazırda var olan sistemler tek frekanslı olup çift frekanslı sisteme sahip değildir.

Troposferik etki ise yersel yöntemler, GPS verileri ve hava balonları gibi yöntemler ile toplanan veriler ile oluşturulan modeller yardımıyla kaldırılmaya çalışılmaktadır. Troposferik etkinin en önemli nedeni su buharındaki değişimdir. Bu değişim 2 alt başlıkta incelenebilir. Birincisi statik ve ikincisi ise dinamik (Holley ve diğ., 2005). Statik etki; bölgenin topografik yükseklik farkına bağlı olarak değişen su buharının hidrostatik etkisini göstermektedir. Dinamik etki ise atmosfer içindeki su buharı kütesinin yanal (yeryüzüne yatay) olarak değişimini ifade etmektedir. Her iki etki de interferograma faz değişimi olarak yansımaktadır. Troposferik etkinin topografyanın, yüksek dağlar ve derin vadilerden oluşan bölgelerde interferogramı bozucu etkisi olacağı kaçınılmazdır. Çalışmalardan bu etkinin giderilmesinde modellenenin de yetersiz olduğu durumlar oluşmaktadır.

3.2.7 Bölge topografyasının etkisi ve bitki örtüsü

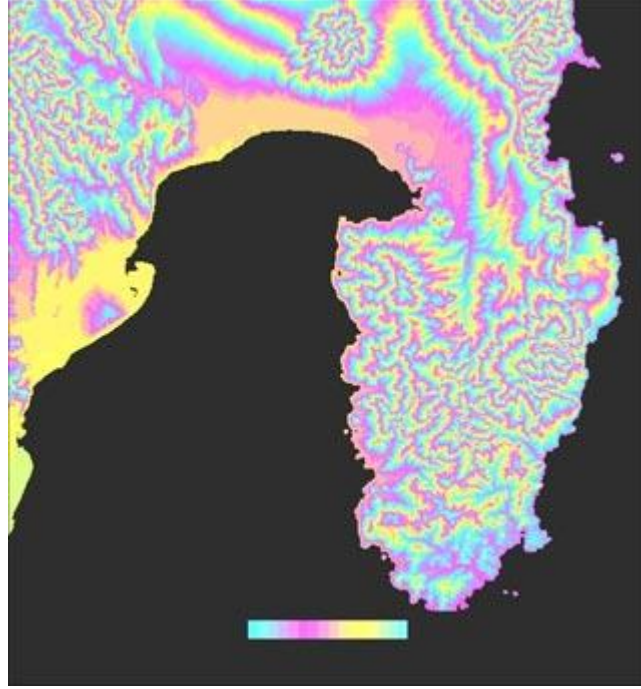
InSAR sisteminde topografyanın varlığı bozucu bir etkidir. Yükseklik değeri değişen bir bölgede topografyanın etkisi Bamler ve Hartl (1998)'de şöyle verilmektedir;

$$h_a = \frac{R\lambda}{2B_{\perp}} \sin \theta \quad (3.3)$$

Burada; R mesafeyi, λ dalga boyunu, $B_{\perp}$ dik (normal) baz bileşenini ve θ bakış açısını ifade etmektedir. Oluşan topografik fazın belirlenerek interferogramdan çıkarılması gereklidir. Bunun için ek bir büyüklüğe ihtiyaç vardır. SYM (Sayısal Yükseklik Modeli) kullanılarak topografyanın etkisi interferogramdan giderilir. Tersini düşünüldüğünde, bu özellik kullanılarak deformasyonun olmadığı zamanlarda alınan görüntüler ile belirli bir bölgeye ait SYM oluşturmak mümkündür.

Topografik etkiyi kaldırmak için temel prensipleri aynı iki ayrı yöntem kullanılmaktadır. İlk yöntemde bir interferogram ve SYM kullanılır ve bu nedenle bu yöntemde iki geçiş interferogramı (two-pass interferogram) denir. Bu yöntemde, topografik etki SYM kullanılarak simüle edilir ve elde edilen simülasyon interferogramdan çıkarılır. İlk olarak Massonnet ve diğ. (1993) tarafından Landers Depremi çalışmasında kullanılmıştır.

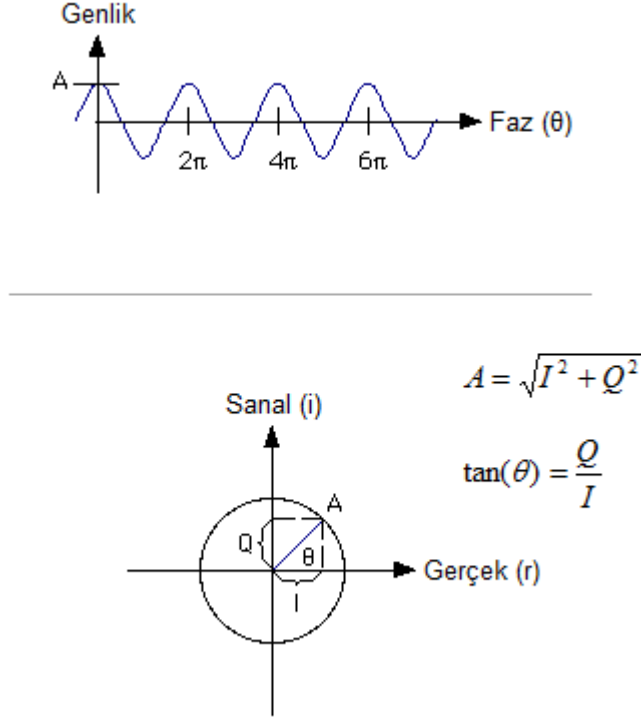
İkinci yöntem ise iki interferogram kullanılması ile gerçekleştirilir ve üç geçiş interferogramı (three-pass interferogram) adını alır. Üç geçiş yönteminde, yüzey değişimi içermeyen ikinci interferogram deformasyon içerdiği düşünülen ilk interferogramdan çıkarılır. Elde edilen interferogramların birbirinden çıkarılmadan önce bazın paralel bileşeni oranı ile ölçeklenmesi gereklidir. İlk olarak Güney California'da tarım alanlarında 1cm'lik yükseklik farkı tespit edilen çalışmayla Gabriel ve diğ. (1989) tarafından kullanılmıştır.



Şekil 3.6 : Topografya kaynaklı örgeler (URL-8).

3.3 İnterferometrik Veri İşleme Adımları

SAR verisinden koordinatlandırılmış interferogram ve deformasyon haritası ürünleri elde etmek için yapılacak işlem adımlarından aşağıda bahsedilmiştir. İnterferometrik veri işlemeye girdi teşkil edecek görüntüler genellikle 2 formattadır; ham veri (raw data – level 0) ve tek bakışlı kompleks görüntüdür (single look complex / SLC – level 1). Ham veriler daha ucuzdurlar, işlenmedikleri için görüntü alımından kısa bir süre sonra temin edilebilirler. Ancak ekstra veri analizine ihtiyaç duyduklarından çalışmada tek bakışlı kompleks görüntü formatından yararlanılmıştır. Bu görüntüler gerçek ve sanal kısımlardan oluşan vektörlerin bir araya gelmiş hali olarak ifade edilebilir. Bir vektörün uzunluğu genlik (amplitude) ve yönü ise faz (phase) bilgisini içermektedir.



Şekil 3.7 : Dalganın kompleks sayı olarak gösterimi.

3.3.1 Görüntü seçimi

Birçok uygun SAR görüntüsünün olduğu varsayılırsa görüntü seçimi radar interferometrisinin uygulamasında muhtemelen en önemli kararlardan birisidir (Hanssen, 2001). İşimize yarayan bir interferogram oluşturabilmek için radar görüntülerinin seçimi, istediğimiz görüntülerin olup olmaması, tarihleri ve yörünge bilgilerini içeren birçok kriteri içerir (Massonet ve Feigl, 1998).

Sensör tipi, veri uygunluğu, zamansal ve mekansal baz dağılımı, arazinin ve atmosferin görüntü alımı sırasındaki karakteristiği dikkate alınarak görüntü seçimi gerçekleştirilir (Hanssen, 2001). Sensör ve platform karakteristikleri; dalga boyu, SNR (sinyal gürültü oranı), yörünge eğimi ve tekrar periyodu gibi önemli parametreleri içerir. Buna bağlı olarak sinyallerin hava şartlarına duyarlılığı, elde edilecek interferogramın topografya ve deformasyon kaynaklı girişim çizgi yoğunluğunu etkileyecektir.

Veri seçimindeki son dikkate alınacak husus, beklenen atmosferik etkilerdir. Atmosferin durumu hakkındaki bilgi uydu görüntülerinden veya yer bazlı meteorolojik veriden elde edilebilir (Hanssen, 2001).

3.3.2 Görüntülerin eşleştirilmesi (coregistration)

Görüntüler seçildikten sonra, birincil ve ikincil görüntüler birbirine henüz eşlenmemiştir. Görüntü eşleme; her bir yer noktasının iki görüntüde de aynı konumda olacak şekilde geometrik görüntü dönüşüm fonksiyonunun oluşturulması ve eşlenik görüntünün buna göre yeniden örneklenmesi olarak ifade edilebilir (Franceschetti ve Lanari, 1999). İki görüntü birbirine pikselden daha küçük oranlarda uyumlu hale getirilir yani eşlenirler. Bu aşama interferometrik veri işleme için çok gerekli olan bir işlemdir. Bu işlem genelde kaba ve hassas olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmektedir.

Kaba eşlemede, ana ve eşlenik görüntü arasında azimut ve menzil doğrultularındaki kayıklık birkaç piksel doğruluğunda hesaplanır. Bu ya gözle ya da hassas uydu yörünge ve zaman bilgileri kullanılarak gerçekleştirilir. Bunun için, her bir görüntüdeki pikselin konumu, uydu yörünge bilgisi, uydunun hızı kullanılarak yaklaşık 25-50 m doğruluğunda belirlenir. İki görüntüdeki aynı piksellerin koordinatları kullanılarak azimut ve menzil doğrultusundaki kayıklıklar kabaca hesaplanabilir.

Hassas eşlemede, ise kaba eşlemeden çıkan kayıklıklar da kullanılarak pikselin alt seviyelerine kadar eşleme gerçekleştirilebilir. İki görüntünün genliklerinin karelerinin çapraz korelasyonu genelde kullanılan yöntemdir. Korelasyonun tepe yaptığı yer görüntülerin azimut ve menzil doğrultusunda kayıklık vektörünü bulmaya yardımcı olur (Gabriel ve Goldstein, 1988). Yeterli derecede korelasyona sahip görüntüler için, kayıklık miktarı piksel büyüklüğünün 1/20'si kadar hesaplanabilir. Bu azimut doğrultusunda 20 cm ve menzil doğrultusunda 1 m'ye karşılık gelmektedir (Hanssen, 2001). Elde edilen kayıklıklar yardımıyla, iki boyutlu bir polinom oluşturulur ve bu polinom yardımıyla eşlenik görüntüdeki her bir piksel için referans görüntüdeki karşılığı bulunur. Eşlenik görüntüdeki piksel değerleri yeniden örneklenir. Yani eşlenik görüntüdeki pikseller ana görüntüde hangi piksele karşılık geliyorsa onun konum değerini alırlar.

3.3.3 İnterferogram oluşturulması

İnterferogram bir önceki başlıkta ifade edilen işlemlerden geçmiş iki kompleks görüntüye ait piksellerin eşlenik çarpımı sonucu elde edilen ve faz farkını gösterir bir görüntüdür. Görüntüyü oluşturan piksellerin değerleri $-\pi$ ile π arasında

değişmektedir. Bu görüntü örge (fringe) denilen desenlerden oluşmaktadır. Her bir örge, SAR sistemi dalga boyunun yarısı kadar değişimi göstermektedir.

İnterferometrik faz görüntüsü ile birlikte, interferometrik uyuşum (coherence) görüntüsü de elde edilir. Uyuşum görüntüsü iki görüntünün birbiri ile ne kadar uyuşum gösterdiğini ifade eder ve sonuç interferogramın kalitesiyle doğrudan ilgilidir.

3.3.4 Baz hesaplaması ve elipsoitten kaynaklanan fazın giderilmesi

Oluşturulan interferogram topografik ve deformasyon sinyalini taşımasına rağmen, interferogramdaki baskın sinyal yeryüzü elipsoidinden kaynaklanmaktadır. Bu sinyalin giderilmesinden önce interferometrik bazın hassas hesaplanmasına ihtiyaç vardır. Topografyanın interferometrik faza ne kadar etki yaptığı, interferometrik baza bağlıdır. Yani interferometrik bazda yapılacak hata, interferogramda gereğinden fazla topografik girişim (interference) çizgilerine sebep olacaktır.

İnterferometrik baz hesabı için ilk olarak her bir görüntü için lokal bir koordinat sisteminde hedefe olan birim bakış vektörleri hesaplanır. Tanımlanan birim vektörler, görüntü alım parametreleri yardımıyla birbiri cinsinden ifade edilirler ve hedefe bağlı olarak bir baz mesafesi modeli hesaplanır. Elipsoit veya referans yüzeyinin interferometrik faza katkısı vardır. Bu nedenle, interferometrik baz modeli oluşturulduktan sonra referans yüzey nedeniyle oluşan faz interferogramdan çıkarılır. Baz modeli kullanılarak her bir piksel için iki görüntünün çekim noktaları belirlenir ve bunlar için referans yüzeyinin oluşturması beklenen faz değerleri, uydunun yüksekliği ve yeryüzü yarıçapı (küresel dünya için) parametreleri de dikkate alınarak hesaplanır. Bu faz bilgisinden yararlanılarak, karmaşık sayılardan oluşan bir interferogram oluşturulur ve mevcut interferogramdan çıkarılır ve düzleştirilmiş interferogram elde edilmiş olur.

3.3.5 Filtreleme

İnterferogramın kalitesinin yani sinyal gürültü oranının artırılabilmesi için uygulanan işlemdir. Farklı yazılımlar farklı filtreler uygulamasına rağmen, bu çalışmada Goldstein ve Werner (1998) tarafından geliştirilmiş olan “adaptif filtresi” kullanılmıştır. Bu filtre spektrumun genlik değerlerini kullanarak interferogramın spektrumunu küçük parçalar halinde yumuşatmaktadır. Bu filtrelemenin temelinde,

görüntü içerisinde gürültünün diğer sinyallere göre görelî olarak düşük genliğe sahip olduğu kabul edilip düşük genlikli sinyaller bastırılmakta, spektrumdaki asıl sinyalin ise görelî olarak büyük bir genliği sahip olduğu düşünölüp büyük genlikler zenginleştirilmektedir. Bu filtreleme için filtrelemenin derecesi bir parametre olup, bastırılacak sinyal seviyesini ifade etmektedir. Düşük filtreleme derecesi daha az filtreleme uygularken, filtreleme seviyesi arttıkça bastırılan sinyal genliği de artmaktadır.

3.3.6 Faz açılması (phase unwrapping) ve mutlak faz belirlenmesi

İnterferometride, topografik yükseklik ve deformasyon miktarı ile doğrudan ilişkilendirilebilecek şey mutlak interferometrik fazdır. Bununla birlikte, ölçülen interferometrik faz, mutlak interferometrik fazın 2π 'ye göre modudur. Ölçülen fazdan mutlak faza varabilmek için, faz açılmasına ve mutlak faz belirlenmesine ihtiyaç vardır.

Faz çözölmesi için birçok değışik metod mevcuttur. Bunlar; residue-tabanlı algoritmalar (Goldstein ve Werner, 1998), en küçük kareleri kullanan algoritmalar (Ghiglia ve Romero, 1994), (Ghiglia ve Romero, 1996) ve minimal maliyet akışı algoritmaları (Chen ve Zebker, 2000) olarak sıralanabilir. Bütün algoritmalar, ilk önce ölçülen fazı ayrıştırmakta daha sonra çözölmiş faza erişebilmek için ayrışmadan sonra kalan faz gradyanını (komşu fazlar arasındaki faz farkını) kullanmaktadır. Algoritmalar, ölçülen fazda meydana gelen kesikliklerle nasıl başa çıktıkları konusunda birbirinden ayrılmaktadırlar. Residue-tabanlı algoritmalar, residue denilen fazın kesildiğı alanları belirleyip faz çözölme bölgesini sınırlayarak işlemi gerçekleştirmekte, en küçük kareler algoritmaları ise çeşitli faz devamlılık ve yumuşatma parametreleri kullanarak faz gradyanını kullanmaktadır.

Faz çözölmesinden sonra, çözölmiş fazı mutlak fazla ilişkilendirebilmek için faz kayıklığı hesaplanmalıdır. Bununla ilgili birçok yöntem olmakla birlikte en fazla kullanılanı, yer kontrol noktası yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda bilinen konumlardaki yükseklik ölçölüleri, çözölmiş fazlarla birlikte değıerlendirilerek faz kayıklığı hesaplanır.

3.3.7 Deformasyonun belirlenmesi

SAR interferometride; deformasyon, topografik etkinin interferogramdan giderilmesi ile elde edilir. Bu işlem faz çözülmeden önce gerçekleştirilir.

İki geçişli interferometride yani ilk geçişte referans görüntünün ikinci geçişte ise deformasyon içeren eşlenik görüntünün alındığı durumda, topografya interferometri yardımıyla oluşturulamayacağı için Sayısal Yükseklik Modeline (SYM) ihtiyaç vardır.

Kullanılacak olan SYM, üzerinde çalışan interferograma göre örnekleme aralığı ve yöneltmesi daha farklı olabilir. Bu nedenle SYM'nin interferograma göre eşlenmesi ve örneklenmesi gerekmektedir.

İlk olarak SYM'nin uygun radar geometrisine örneklenmesi gerçekleştirilir. Aynı zamanda çıktı piksellere SYM yüksekliği radar görüntü datumu ile SYM datumu arasındaki fark giderilerek atanır.

SYM'nin radar koordinatlarına simüle edilmesinden sonra, bu simülasyon interferogram ile eşlenir.

SYM'nin interferogram ile eşlemesi gerçekleştirildikten sonra, interferogramdan topografya çıkarılır. Topografyanın çıkarılması, referans yüzeyinin etkisinin çıkarılması ile benzerdir. Buradaki hesaplar referans yüzeyine göre değil topografik yüzeye göre gerçekleştirilir.

Topografyanın katkısı giderildikten sonra interferogramın fazı çözülebilir ve mutlak anlamda uydu bakış doğrultusundaki deformasyon miktarı hesaplanabilir.

3.3.8 Topografyanın üretilmesi

Eğer amaç deformasyon belirlemek değil de topografyanın üretimi ise, interferometrik faz kendisiyle ilgili olan topografik yüksekliğe dönüştürülür. Bu interferometrik faz dönüşümü için farklı yöntemler mevcuttur (Rodriguez ve Martin, 1992). Temelde faz çözümü gerçekleştirildikten sonra, baz modeli hassas olarak tekrar hesaplanır. Bu aşamadan sonra yükseklik belirsizliği denklemleri kullanılarak topografik yüksekliklerin elde edilmesi mümkündür. Bu üretim için deformasyon içermeyen görüntülere ihtiyaç vardır.

3.3.9 Verilerin konumla ilişkilendirilmesi (geocoding)

Burada amaç, radar koordinatlarından (menzil, azimut, yükseklik) jeodezik referans sistemine (Φ , Λ , h) dönüşümdür (Hanssen, 2001). Bunun için üç boyutlu Helmert dönüşümü kullanılır. Gölgeleme gibi hatalar nedeniyle verisi olmayan yerleri ait yapılan dönüşümde h değeri elde edilemeyecektir. Bu sebepten düzgün bir grid veri elde etmek için dönüşümden sonra Delaunay üçgenlemesi ve lineer enterpolasyon ile tekrar örnekleme gerçekleştirilir.

3.4 InSAR Uygulama Alanları

InSAR tekniğinin uygulama alanları yüzey hareketlerinin belirlenmesi ve diğer uygulamalar olarak ikiye ayrılabilir.

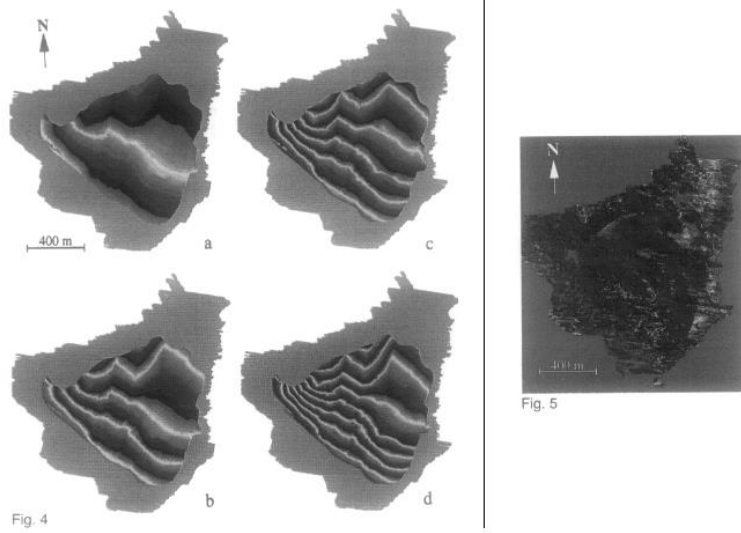
Yüzey hareketlerinin içerisinde heyelan, yer çökmeleri, depremle ilgili olarak meydana gelen yer değiştirmeler, volkanik hareketler ve buzul hareketlerini belirlemeyi sayabiliriz. Diğer uygulama alanları içerisinde sayısal yükseklik modeli oluşturma, topografik haritalama, orman türü belirleme, toprak nemi belirleme ve kıyı hattı belirleme çalışmaları yer almaktadır.

3.4.1 Heyelan belirleme

Yüksek hızlı heyelanların belirlenmesi görüntü korelasyonunun düşük olması nedeniyle zordur. Fakat düşük hızlı kaymalarda korelasyon göreceli olarak korunabileceğinden, heyelan nedenli deformasyonların belirlenebilmesi mümkündür. Fruneau, Güney Fransa'da Nice yakınındaki "La Clapieri" heyelanını InSAR yöntemiyle belirlemeye çalışmıştır (Fruneau ve diğ., 1996). 1991 yılında çekilmiş ERS-1 görüntüleri kullanılmış ve heyelan belirlenmiştir.

Singhroy ve diğ. (1998) Kanada'da Fraser vadisinde benzer bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışma sonucunda RADARSAT SAR görüntülerinden elde edilen interferogramların heyelanların önemli bileşenlerini belirlemek için kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Rott ve Siegel (1999) InSAR yöntemini Alplerdeki kütle hareketlerini ve tehlikeli bölgeleri belirlemek için kullanmıştır. Refice ve diğ. (2000), InSAR tekniğinin çok küçük bir bölgedeki heyelan çalışmalarına uygulanabilirliği hava şartlarıyla sınırlı olduğu öne sürmüştür.



Şekil 3.8 : Heyelan belirleme çalışması (Fruneau ve diğ, 1996).

3.4.2 Yer yükselmesi ve çökmesi (uplift / subsidence) belirleme

Yer çökmesi doğal veya insan kaynaklı olarak yerin çökmesi veya batması olarak ikiye ayrılır. Yer altı sularında çözülebilen maddelerin çözülmesiyle yer altında oluşan boşluklara yeryüzünün çökmesine doğal çökme olarak ifade edilebilir. Halihazırda, çoğu çökme insan kaynaklıdır ve yer altı madenciliği sonucunda oluşur. Yer çökmesinin takibi tehlikeleri öngörmek ve önleyebilmek için önemlidir.

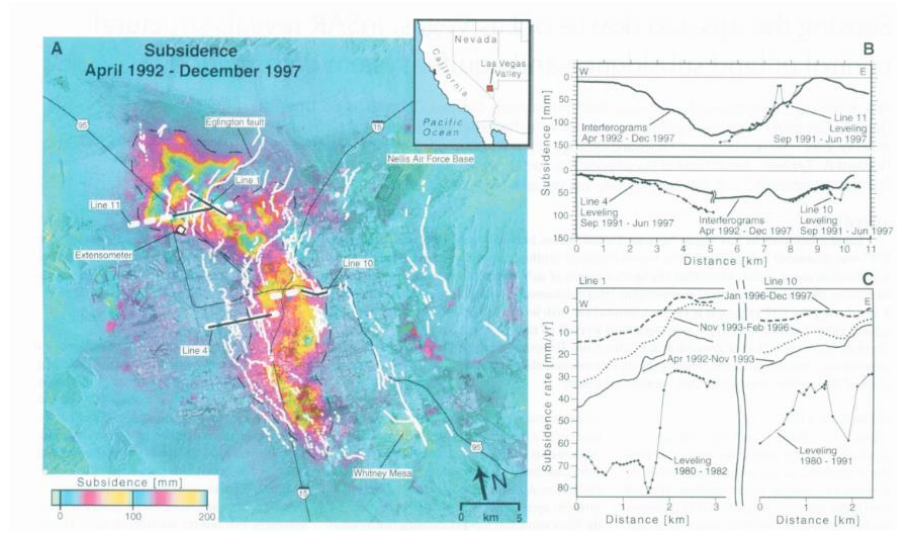
Wright ve Stow (1999), İngiltere’de Selby ve Çek Cumhuriyeti’nde Silesian kömür alanlarında kömür çıkarılması nedeniyle oluşan çökmeleri InSAR yöntemiyle ölçmüştür. Amelung ve diğ. (1999) Las Vegas’ta devamlı olarak çekilen yer altı suyu nedeniyle oluşan yer çökmesini belirlemiştir.

Wegmüller ve diğ. (2000) yüzey madenciliği nedeniyle oluşan deformasyonun belirlenmesi için önemli bir metod olduğunu göstermiştir. Wegmüller ve diğ. (2000) InSAR’ın en kısıtlayıcı tarafının zamansal korelasyonsuzluk olduğunu ifade etmiştir.

Popiolek ve diğ. (2002), InSAR ile yüzey madenciliğiyle ilgili olarak heyelanların, maden çıkarılması nedeniyle oluşan çökmelerin ve deformasyonların, maden kazılan sahadaki ilerlemenin belirlenebileceğini ifade etmiştir.

Tao ve diğ. (2004), Çin’de Tianjin şehrinde yer altı su kaynaklarının aşırı şekilde çekilmesi nedeniyle oluşan çökmeyi InSAR yöntemiyle belirlemeye çalışmış, sonuçlarını bölgedeki nivelman ağında yapılan ölçülerle karşılaştırmış ve iyi sonuçlar

bulunmuştur. Fakat sonuçların zamansal korelasyonsuzluk ve atmosferik düzensizliklere çok fazla bağlı olduğunu ifade etmiştir.



Şekil 3.9 : Yer değiştirme haritası ve çökme hız trendi (Amelung ve diğ, 1999).

3.4.3 Depremle ilgili yer değiştirmenin belirlenmesi

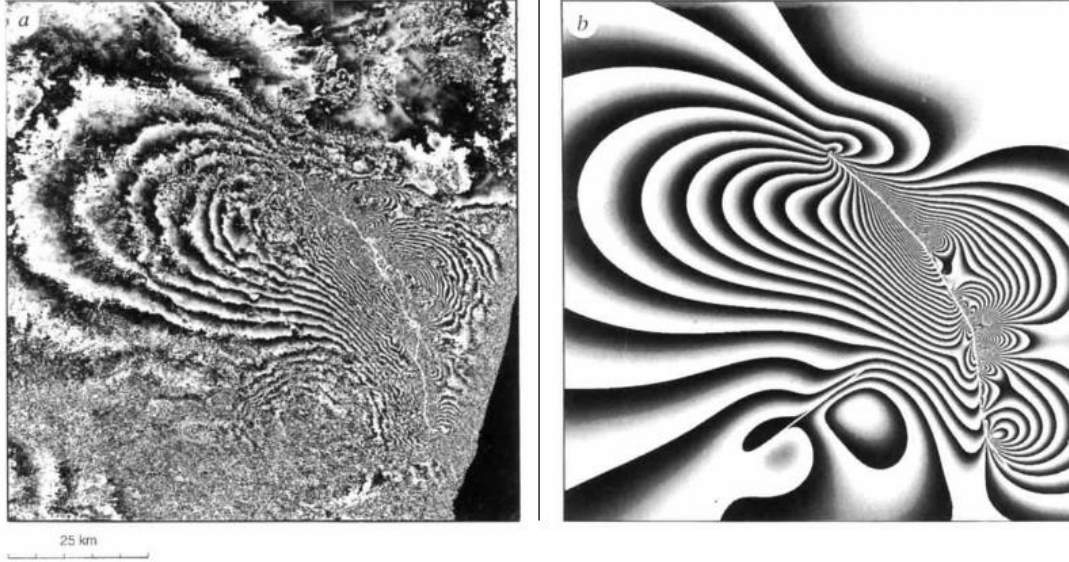
Geniş kapsama alanı ve maliyeti ucuz bir yöntem olması nedeniyle birçok deprem InSAR yardımıyla çalışılmaktadır. InSAR sonuçları fayların modellenmesi için kullanılmaktadır.

Deprem öncesi bir görüntü mevcutsa, deprem sonrası bir görüntü yardımıyla tutarlı bir interferogram elde edilebilir. 1992 Landers depremi interferometri yardımıyla detaylı bir şekilde çalışılan ilk depremdir (Massonnet ve diğ, 1993). Bu çalışma 7.3 büyüklüğünde merkezi Landers kasabası olan depremin yarattığı deformasyonla ilgilidir. Bu çalışmada InSAR yöntemiyle depremle ilgili olarak oluşturulan interferogramdan topografyanın etkisi mevcut SYM ile çıkarılmıştır. Klasik jeodezik yöntemlerle yapılan çalışmanın doğruluğu karşılaştırılmış karesel ortalama hatası 34 mm bulunmuştur.

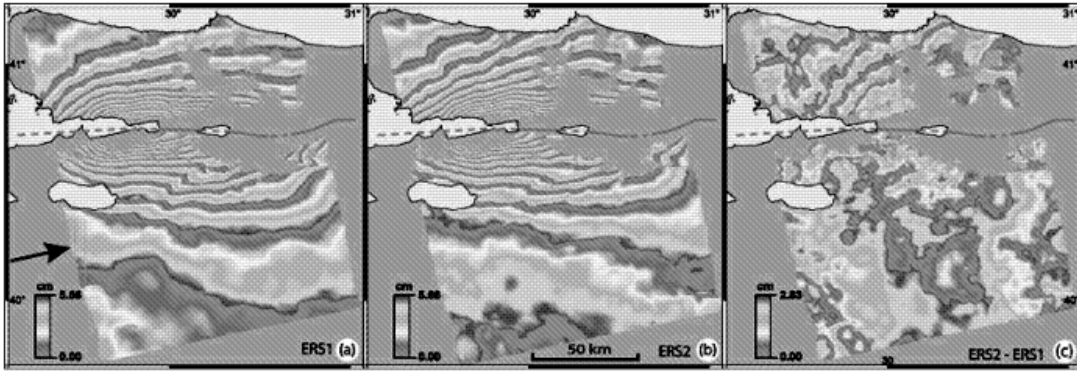
Deprem anı yer değiştirmeleriyle ilgili olarak İzmit depreminde birçok çalışma gerçekleştirilmiştir (Reilinger ve diğ, 2000; Feigl ve diğ, 2002; Çakır ve diğ, 2003; Bos ve diğ, 2004).

Ryder ve diğ. (2007) Tibet depreminden sonraki 4 sene içerisinde deprem sonrası deformasyonun devam ettiğini göstermiştir. InSAR ölçüleri yardımıyla ± 5 cm lik deformasyon tespit edilebilmiştir.

İnterferometrik koşulların iyi olduğu durumlarda depremler arası deformasyonun belirlenebileceğini Wright ve diğ. (2001) Kuzey Anadolu Fay hattı için göstermiştir. Bunun için birçok interferogramı birbiri üstüne yığarak (stacking) daha uzun bir zamana ait daha doğru bir deformasyon elde edebilmeyi başarmıştır.



Şekil 3.10 : Landers depremi interferogramı ve modeli (Massonnet ve diğ, 1993).



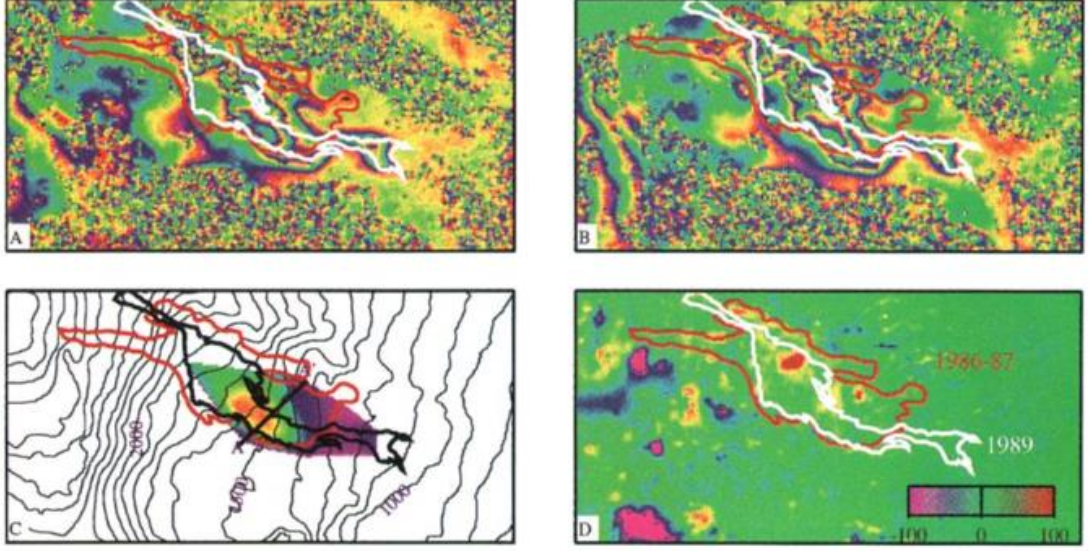
Şekil 3.11 : İzmit depremi interferogramları (Çakır ve diğ, 2003).

3.4.4 Volkanik hareket izleme

InSAR yardımıyla tespit edilen yüzey deformasyonunun konumsal dağılımı magmatik ve tektonik süreç çalışmalarının zenginleştirilmesini sağlayan detaylı mekanik modellerin oluşturulabilmesini sağlar. Bu çalışmalar volkanların nasıl faaliyet gösterdiğiyle ilgili bilgi sağlamasının yanısıra gelecekteki patlamaların tahminiyle ilgili veri sağlar.

İlk olarak Massonnet ve diğ. (1995) InSAR'ı volkanik çalışmalar için Etna Yanardağı için denemiştir. ERS-1 uyduları tarafından alınan görüntüler yardımıyla volkanik

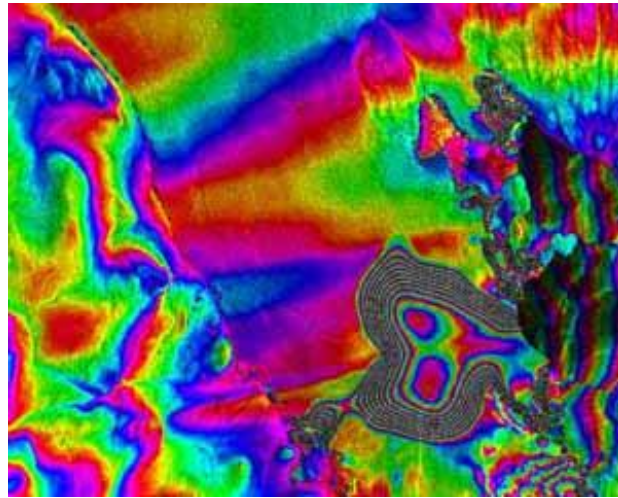
deformasyon belirlenmiştir. Etna Dağı volkanik patlaması sonrasında meydana gelen deformasyon Briole ve diğ. (1997) tarafından da çalışılmıştır. Alaska'daki New Trident volkanı deformasyonu Lu ve diğ. (1997), Etiyopya'da Gada 'Ale volkanının yakınındaki çökme Amelung ve diğ. (2000), Alaska'daki Okmok volkanının 1997 patlama öncesi ve sonrası deformasyonu Lu ve diğ. (2000) araştırılmıştır.



Şekil 3.12 : Lav akıntılarını gösterir interferogramlar (Briole ve diğ, 1997).

3.4.5 Buzul hareketleri

Buzulların hareketi ile küresel iklim durumu arasında doğrudan bağlantı mevcuttur (Zebker, 2000). Kutup bölgeleri uzak, büyük ve insan yaşamadığı için, buzul hareket hızı InSAR için ideal bir uygulama alanıdır. Buradaki kısıt plaka hareketlerine göre buzul hareket hızının daha fazla olmasıdır. Bu kısıt daha sık gözlem yapılarak giderilmektedir.



Şekil 3.13 : Buzul dinamiklerini gösterir interferogram (Mohr ve Madsen, 1996).

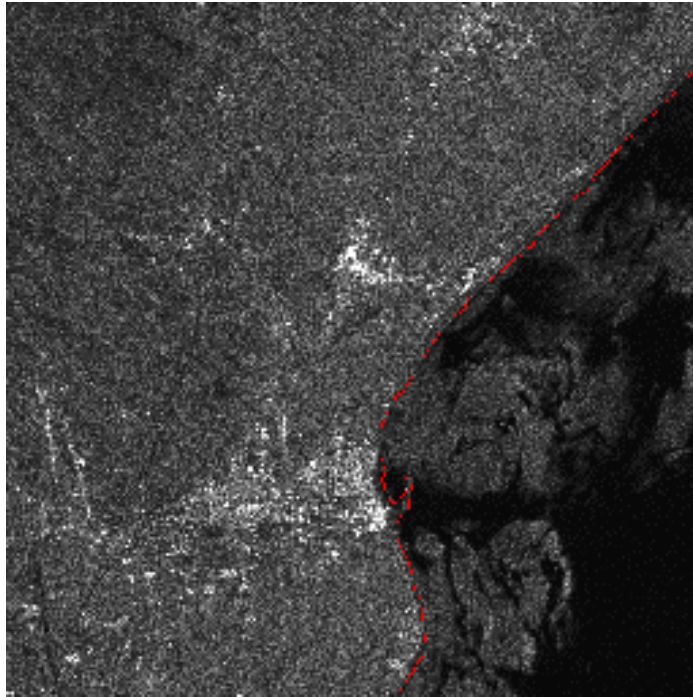
Buzul hareketleriyle ilgili ilk çalışmayı Goldstein ve diğ. (1993) yapmıştır. Daha sonra bu çalışmalar devam ettirilmiştir (Haarpainter ve diğ, 2000; Mohr ve Madsen, 1996).

3.4.6 Diğer uygulamalar

Interferometri tekniğinin radar görüntülerine uygulanmasının ana sebeplerinden biri de topografik haritalamadır. Stereo hava fotoğrafları veya uydu görüntülerinin dezavantajları InSAR tekniğini etkilememektedir. Zebker ve diğ. (1994) ERS-1 görüntülerinden oluşturulan topografik haritaların doğruluğunu ortaya koymuştur.

Gerek tekrar geçişli SAR interferometrisi gerekse tek geçişli SAR interferometrisi tekniğiyle Sayısal Yükseklik Modeli üretilmektedir. InSAR yönteminin optik stereo görüntü tekniğine olan üstünlüğü; yer kontrol noktasına ihtiyaç duymaması veya çok az ihtiyaç duyması, detaysız alanların yüksekliklerini ölçebilmesi ile bulutlardan ve karanlıktan etkilenmemesi olarak değerlendirilebilir. Sayısal Yükseklik çalışmasına en önemli örnek SRTM çalışmasıdır.

Ormanlık alanlarda InSAR yoluyla elde edilen uyşum (coherence) haritaları orman ve orman olmayan bölgelerin ayırt edilmesi için kullanılmaktadır. Askne ve diğ. (1997), interferometrik ölçüler ile temel orman özellikleri arasındaki ilişkiyi gösteren bir model geliştirmiştir. Ayrıca mevcut SYM'ni interferometri yoluyla elde edilen yükseklik modeliyle karşılaştırarak ağaç yüksekliklerini belirlemiştir.



Şekil 3.14 : Deniz-kara sınırı belirleme çalışması (Schwäbisch ve diğ, 1997).

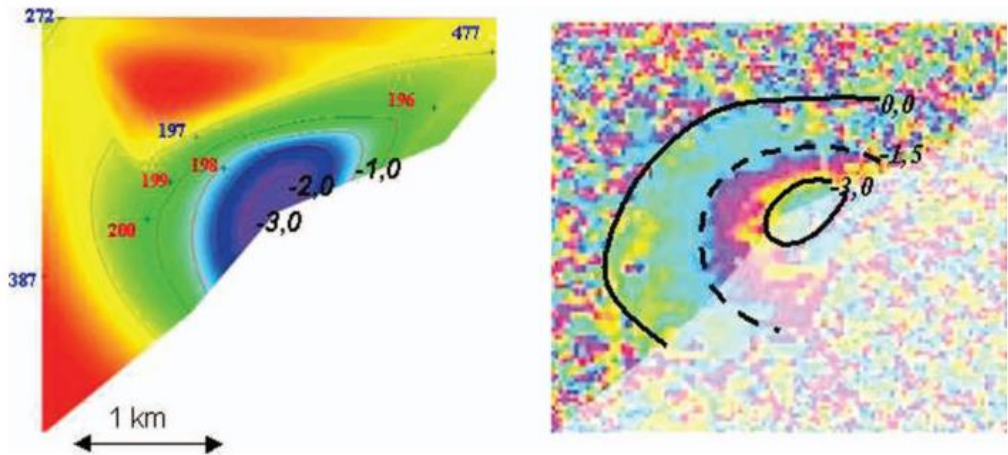
Wegmüller (1997), InSAR'ı toprak nemini belirlemek için kullanmıştır. Bu çalışmada Zeeland'da (Hollanda) toprak nemi uzaktan algılanmaya çalışılmıştır. ERS interferometrik uyuşum haritasında korelasyonun 0.7'den büyük olduğu yerlerde başarıyla toprak nemi belirlenmiştir.

Kıyı hattı belirleme Schwäbisch ve diğ. (1997) tarafından gerçekleştirilmiştir. Uyuşum haritaları yardımıyla deniz-kara sınırı belirlenmeye çalışılmıştır.

3.5 Literatür Özeti

SAR İnterferometri yöntemiyle maden sahalarındaki deformasyonların belirlenmesine yönelik bugüne dek birçok çalışma yapılmasına rağmen literatür taramalarında doğrudan sadece Bursa/Orhaneli civarını esas alan bir çalışmaya rastlanamamıştır. Özellikle maden sahalarında kullanılan metodolojinin gelişimi ve uygulamaları üzerine gerçekleştirilen araştırmalar kısaca aşağıda özetlenmiştir.

Selby (İngiltere) ve Silesian (Çek Cumhuriyeti) kömür madenlerindeki yer değiştirmelerin saptanmasına yönelik yapılmış çalışmada ERS uydusuna ait SAR görüntüleri kullanılmış olup optimum interferogram üretimi adına bazı kriterlere sadık kalınmıştır (Wright ve Stow, 1997). Bunlar; interferogram oluşturacak görüntü çiftleri arasındaki baz uzunluğunun 200 m'nin altında olması ve zamansal farkın 35 gün ya da daha az olması, görüntü tarihlerinin Eylül ve Mart ayları arasında olması ve görüntü alımı sırasında veya hemen öncesinde yağış olmaması gibi kriterlerdir. Selby kömür madeni üzerinde yoğunlaşan bu çalışmada 35 günlük zaman aralıklarında 8 cm kadar yer değiştirme gözlemlenmiştir.



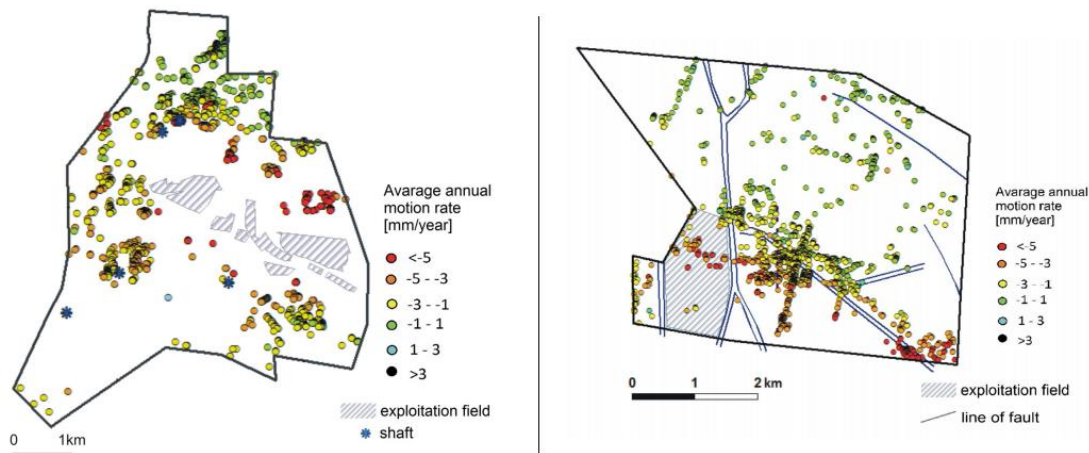
Şekil 3.15 : Nivelman ölçmesi ve interferogram (Raucoules ve diğ., 2008).

Gardanne ve Nord-Pas-de-Calais (Fransa) kömür havzalarındaki yeraltı üretiminden kaynaklı çökmeler sırasıyla Carnec ve Delacourt (2000) ile Raucoules ve diğ. (2008) çalışmalarında incelenmiştir. Gardanne havzası için 1992-1995 yılları arası ve Nord-Pas-de-Calais havzası için 1992-2000 yılları arası SAR görüntüleri kullanılmıştır. Her iki çalışmada da ERS-1 ve ERS-2 uydularına ait SAR görüntülerinden yararlanılmış olup elde edilen interferogramların nivelman verilerini doğrular nitelikte olduğu ortaya konulmuştur.

New South Wales (Avustralya) yeraltı kömür madenciliğinden kaynaklı çökmelerin araştırıldığı çalışmada birçok algılayıcı (TerraSAR-X, ERS-1/2, ENVISAT, JERS-1 ve ALOS) kullanılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır (Ng ve diğ, 2009). Diğerlerine göre daha yeni olan algılayıcıların (ALOS ve TerraSAR-X) daha iyi sonuçlar verdiğinden bahsedilmiştir. Özellikle yer ölçmeleriyle birlikte değerlendirildiğinde, bitki örtüsünün yoğun olduğu yerlerde uzun dalga boyundan dolayı ALOS uydu verilerinin en iyi sonucu verdiğine değinilmiştir.

SAR İnterferometri yöntemiyle maden sahalarındaki yer değiştirme trendini, zaman serileri analizi ile belirlemek adına kullanılan PSInSAR ve SBAS yöntemlerini içeren çalışmalar kısaca aşağıda özetlenmiştir.

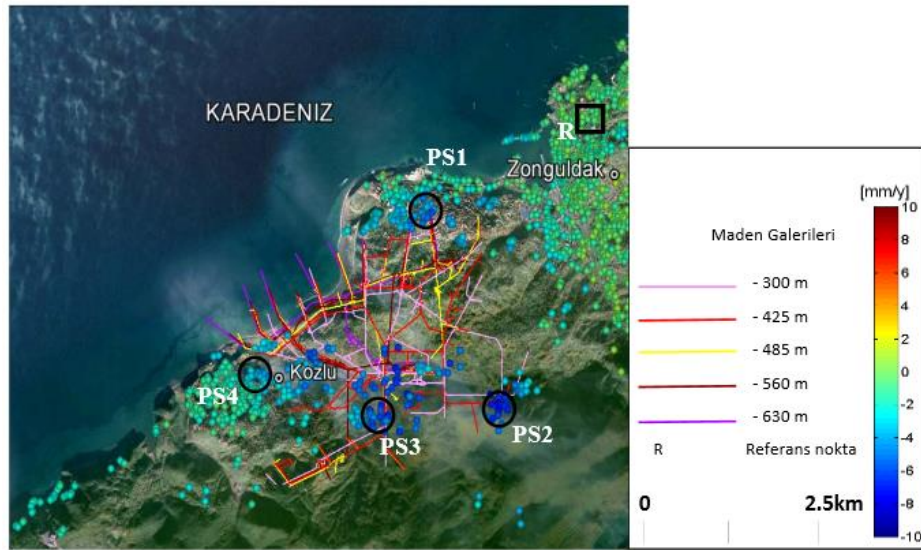
Yüzey deformasyonlarının zamansal değerlendirilmesinde kullanılan bir algoritma olarak PSInSAR, ilk olarak Ferretti ve diğ. (2000) çalışmasında tanıtılmıştır. Sabit yansıtıcıların şehir alanlarındaki yoğunluğundan dolayı uygulama alanı olarak Pomona, Kaliforniya seçilmiştir. 1992-1999 yılları arasında alınmış ERS-1/2 uydularına ait 41 adet görüntü işlenmiştir. En fazla çökme yaklaşık 20 cm, en fazla yükselme ise yaklaşık 6 cm olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.16 : Kömür madenleri deformasyon trendi (Lesniak ve Porzycka, 2012).

Güney Polonya'daki Kazimierz-Juliusz ve Grodziec kömür madenlerindeki yer değiştirmeler Lesniak ve Porzycka (2012) çalışmasında incelenmiştir. ERS-2 ve ENVISAT uydularına ait toplam 79 adet SAR görüntüsü 1993-2000 yılları arası periyot için PSInSAR yöntemiyle değerlendirilmiştir. Günümüzde üretimi devam eden Kazimierz-Juliusz ve üretimi 1998 yılında durdurulmuş Grodziec madenleri için deformasyon trendi belirlenmiştir.

Maden sahalarındaki yer değiştirmelerin zaman serileri analizi ile belirlenmesine yönelik Türkiye'de yapılmış tek çalışma, Zonguldak kömür madenlerindeki yer yüzeyi hareketlerinin incelendiği Abdikan ve diğ. (2013) çalışmasıdır. Bu çalışmada 1993-2001 yılları arasında alınmış Avrupa Uzay Ajansı'na (ESA) ait 21 ERS 1/2 uydu görüntüsü kullanılmıştır. PSInSAR tekniği kullanılarak ortalama yer değiştirme hızı ve toplam zemin hareketi miktarı ölçülmüştür. Kozlu bölgesi şehir alanında ortalama yer değiştirme hızı 7-8 mm/yıl olarak belirlenmiştir. 7,5 yıl sonucunda ortaya çıkan zemin hareketi değeri ise 50-65 mm olarak belirlenmiştir.

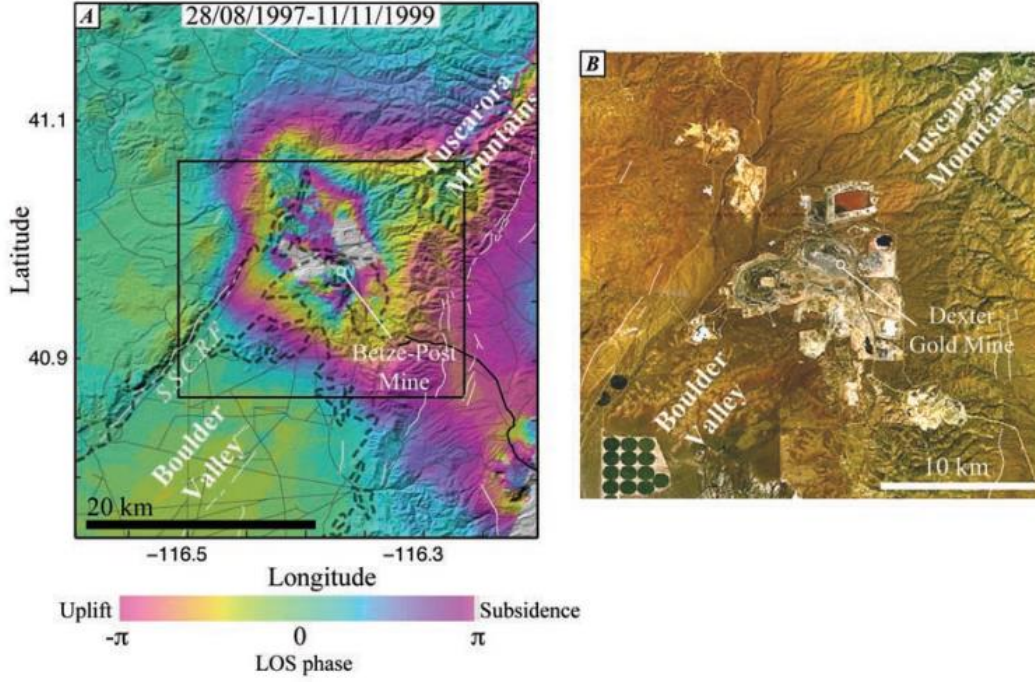


Şekil 3.17 : Çökmelere ait hız vektörleri (Abdikan ve diğ, 2013).

Yüzey deformasyonlarının zamansal değerlendirilmesinde kullanılan bir InSAR algoritması olarak SBAS, ilk olarak Berardino ve diğ. (2002) çalışmasında tanıtılmıştır. Bu çalışmada SBAS algoritması ERS-1/2 uydularına ait 1992-2000 yılları arasında alınmış 44 adet SAR görüntüsüne uygulanmıştır. Napoli, İtalya'da yapılmış olan çalışmada SAR görüntüleriyle elde edilen sonuçlar GPS verileriyle desteklenmiştir.

SBAS algoritmasının kullanıldığı diğer bir çalışma olan Gourmelen ve diğ. (2007)'de Crescent Vadisi'nde (Nevada, A.B.D.) madencilik ve tarım kaynaklı yıllık 40 mm

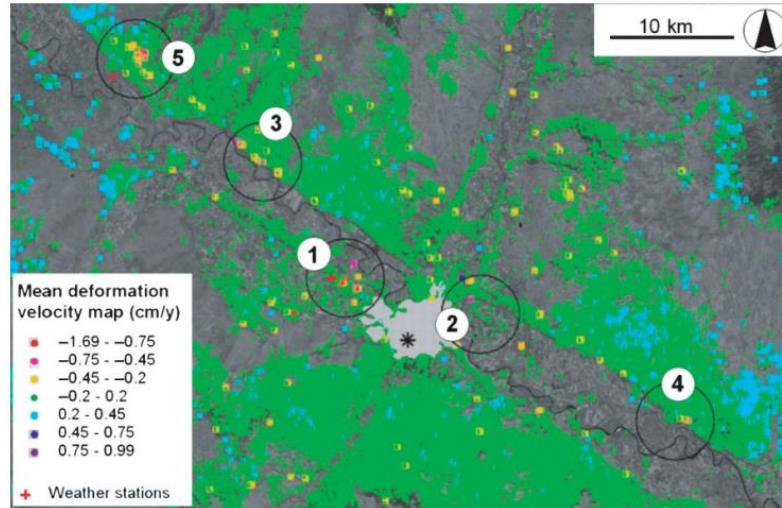
deformasyon hızı uyduya bakış doğrultusunda (LOS) ölçülmüştür. Ayrıca GPS verilerinden de yararlanılan bu çalışmada yıllık 8 mm yatay yer değiştirme hızı saptanmıştır.



Şekil 3.18 : Maden ve tarım kaynaklı deformasyonlar (Gourmelen ve diğ, 2007).

Gangwon-do, Güney Kore'deki kömür madenciliği kaynaklı yer çökme hızının analiz edildiği Baek ve diğ. (2008) çalışmasında 1992-1998 yılları arasında alınmış JERS-1 uydusuna ait 23 adet SAR görüntüsü SBAS algoritmasıyla değerlendirilmiştir. 6 yıllık süreçte 22 cm'ye kadar yer değiştirme saptanmış olup analiz sonuçları jeolojik verilerle desteklenmiştir.

Castaneda ve diğ. (2009) çalışmasında ERS-1 ve ERS-2 uydularına ait 1995-2000 yılları arasında alınmış 27 adet SAR görüntüsünden SBAS algoritmasıyla yer değiştirme hızı belirlenmiştir. Ebro Nehri (İspanya) evaporit havzalarındaki obruklardan, heyelanlardan ve tuz madenciliğinden kaynaklı yer değiştirmeler ayrı ayrı incelenmiştir. Obruk kaynaklı deformasyon hızı yıllık 1-68 cm arası, heyelan kaynaklı deformasyon hızı yıllık 0-80 cm arası ve madencilik kaynaklı deformasyon hızı ise yıllık 1-45 cm arası hesaplanmıştır.



Şekil 3.19 : Deformasyon hızı haritası (Castaneda, 2009).

Choi ve diğ. (2011) çalışmasında JERS-1 ve ALOS uydularından elde edilmiş SAR görüntüleri SBAS algoritmasıyla işlenmiş ve Taebaek (Güney Kore) kömür madeni için risk haritası hazırlanmıştır. 1990'ların başlarında alınmış JERS-1 uydusu SAR görüntüleriyle, 2007-2008 yılları arasında alınmış ALOS uydusu SAR görüntülerinden üretilen zaman serisi analizleri %73 doğruluk ve 0.35 cm karesel ortalama hata (RMS) ile karşılaştırılmıştır.

4. ÇALIŞMA BÖLGESİ InSAR UYGULAMASI

4.1 Çalışma Bölgesi Tanıtımı

Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu (T.K.İ.) Genel Müdürlüğü'ne bağlı üretim birimlerinden biri olan Bursa Linyitleri İşletme Müdürlüğü (B.L.İ.); Bursa İli, Orhaneli İlçesi, Gümüşpınar Köyü'nde kurulmuştur (Şekil 4.1). İşletmeye, Bursa-Orhaneli asfaltının Yürücekler Köyü kavşağından ayrılan, yaklaşık 6 km asfalt yol ile ulaşılır. Nüfusu 8.100 olan Orhaneli ilçesi ile işletme arası mesafe yaklaşık 25 km'dir.

B.L.İ.'nin sorumluluğundaki ruhsat sahası Gümüşpınar, Sağırlar ve Çivili olmak üzere üç ayrı sektörden oluşmaktadır. Bu sektörlerin genel tanıtımı www.bli.gov.tr'den (Erişim: 26.09.2014) alınarak aşağıda özetlenmiştir.

4.1.1 Gümüşpınar bölümü

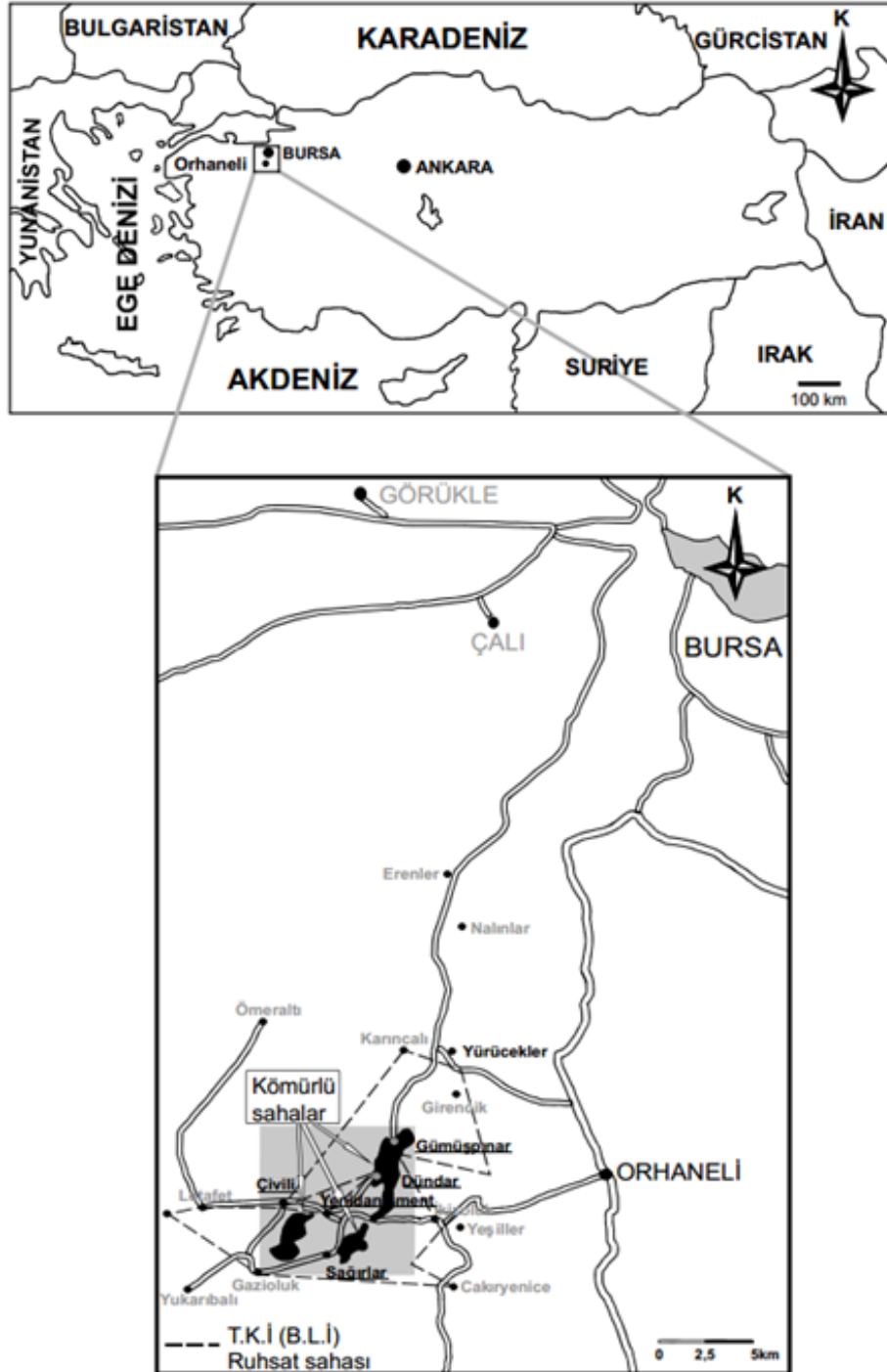
Bursa-Orhaneli asfaltındaki Yürücekler köyü yol ayrımından yaklaşık 6 km uzaklıkta bulunmaktadır. Bu yol soğuk asfalt olup, her mevsimde ulaşım açıktır. İşletmenin rakımı 500 m dolayındadır. Bu sektörde halen 23.000.000 ton civarında kömür bulunmakta olup mevcut üretimin tamamı bu sektörde yapılmaktadır.

4.1.2 Sağırlar bölümü

Yürücekler yol ayrımından Gümüşpınar-Dündar istikametinde yaklaşık olarak 12 km uzaklıkta bulunmaktadır. Bu yol Gümüşpınar Köyü'nden itibaren asfalt olup, her mevsim ulaşım açıktır. Havzanın rakımı 550 m dolayındadır. Bu sektörde halen 1.500.000 tonu açık işletme, 4.500.000 tonu yer altı işletmesine uygun 6.000.000 ton civarında kömür bulunmaktadır. 1990 yılına kadar müteahhit vasıtası ile çalışılmış olup halen faaliyet yoktur.

4.1.3 Çivili bölümü

Yürücekler yol ayrımından Gümüşpınar-Yenidanişment istikametinde 10 km, Yenidanişment'ten itibaren 2 km olmak üzere toplam 12 km uzaklıktadır. Bu yol asfalt olup, her mevsim ulaşımına açıktır. Havzanın rakımı 600 m dolayındadır. Bu sektörde halen 2.500.000 tonu açık işletme, 8.000.000 tonu yer altı işletmesine uygun 10.500.000 ton civarında kömür bulunmaktadır. Bugüne kadar hiçbir faaliyette bulunulmamıştır.



Şekil 4.1 : Çalışma alanı lokasyon haritası (Yerin, 2006).



Şekil 4.2 : Çalışma alanı uydu görüntüsü.

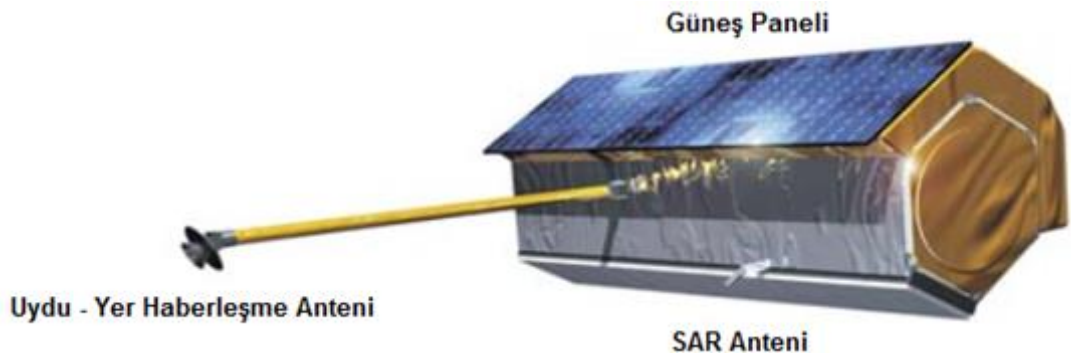
Çalışma alanı uydu görüntüsü Landsat-8 uydusu 4-3-2 bant kombinasyonu kullanılarak üretilmiştir. Pansharpening işlemi uygulanmıştır.



Şekil 4.3 : Çalışma alanından görüntüler.

4.2 TerraSAR-X Uydusu Tanıtımı

TerraSAR-X, bu çalışmada verileri kullanılan bir Alman radar yer gözlem uydusudur. 15 Haziran 2007 tarihinde Ruslara ait Kazakistan'daki Baykonur Uzay Üssü'nden fırlatılmıştır. Operasyon süresi olarak en az 5 yıl öngörülmüştür.



Şekil 4.4 : 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. DLR aynı zamanda teknik bakım, kalibrasyon ve TerraSAR-X verisinin operasyon süresi boyunca bilimsel amaçlı kullanımından da sorumludur.

DLR kontratı altında Astrium uyduyu geliştirmiş ve üretmiştir. Ayrıca Astrium TerraSAR-X veri ve ürünlerinin ticari amaçlar için kullanımı için bir dağıtıcı sistem geliştirmiştir. Dağıtım ve ücretlendirme Infoterra GmbH'a aittir.

Çizelge 4.1 : TerraSAR-X uydu özellikleri.

Fırlatma Tarihi	15 Haziran 2007
Fırlatma Tesisi	Baykonur Uzay Üssü (109/95), Kazakistan
Taşıyıcı Roket	Dnepr-1
Uydu Ağırlığı	1230
Uydu Boyutu	4.88 m (uzunluk) X 2.4 m (çap)
Uçuş İrtifası	514 km
Mekansal Çözünürlük	1 m (SL), 3 m (SM), 16 m (SS)
Zamansal Çözünürlük	11 gün
Radar Frekansı ve Dalga boyu	9.65 GHz / 31 mm
Polarizasyon	HH, VH, HV, VV
Yörünge Eğikliği	97.45°

Çizelge 4.2 : TerraSAR-X uydusu görüntü ürün tipleri.

Ürün Tipi	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, WGS84 datumu ile rektifiyeli versiyonu.
EEC (Enhanced Ellipsoid Corrected)	GEC ürününün topografik olarak düzeltilmiş versiyonu.

TerraSAR-X uydusu SpotLight, StripMap ve ScanSAR modlarında görüntüleme yapabilmektedir. “2.7 Yapay Açıklıklı Radar Görüntüleme Yöntemleri” bölümünde bu görüntüleme yöntemleri ayrıntılı şekilde açıklanmıştır. TerraSAR-X uydusu görüntüleme modu ve ürün tipleriyle ilgili ayrıntılı bilgiye çizelge 4.3'ten ulaşılabilir.

Çizelge 4.3 : TerraSAR-X uydusu görüntüleme modları teknik özellikleri.

Görüntüleme Modu	Polarizasyon	Görüntü Boyutu (yer menzil x azimut)	Mekansal Çözünürlük	
			SSC (yatık menzil x azimut)	MGD, GEC, EEC
Staring SpotLight (ST)	HH ya da VV (Single)	4 km x 3.7 km	0.6 x 0.24 m	0.9 – 1.8 m
High Resolution SpotLight (HS) 300 MHz	HH ya da VV (Single)	5-10 km x 5 km	0.6 x 1.1 m	1.1 – 1.8 m
High Resolution SpotLight (HS)	HH ya da VV (Single)	10 km x 5 km	1.2 x 1.1 m	1.4 – 3.5 m
	HH/VV (Dual)	10 km x 5 km	1.2 x 2.2 m	2.2 – 3.3 m
SpotLight (SL)	HH ya da VV (Single)	10 km x 10 km	1.2 x 1.7 m	1.7 – 3.5 m
	HH/VV (Dual)	10 km x 10 km	1.2 x 3.4 m	3.4 – 3.5 m
StripMap (SM)	HH ya da VV (Single)	30 km x 50 km	1.2 x 3.3 m	3.3 – 3.5 m
	HH/VV ya da HH/HV ya da VV/VH (Dual)	15 km x 50 km	1.2 x 6.6 m	6.6 m
ScanSAR (SC)	HH ya da VV (Single)	100 km x 150 km	-	18.5 – 19.2 m
Wide ScanSAR (WS)	HH ya da VV (Single)	270 km x 200 km	-	40 m



Şekil 4.5 : TerraSAR-X uydusu çözünürlük karşılaştırması.

4.3 Çalışma Alanı Farksal İnterferometri (DInSAR) Uygulaması

Modern bir jeodezi ölçme tekniği olan InSAR, yer yüzeyindeki günlük ya da yıllar süren değişimleri mm hassasiyetinde bir doğrulukla güvenilir şekilde ölçebilmektedir (Gens ve van Genderen, 1996). Çeşitli etkenler sonucu oluşan yer kabuğu hareketlerinin saptanmasında diferansiyel interferometri adı verilen DInSAR tekniğinden yararlanıldığından bahsetmiştik. Uydu görüntüleri ile tekrarlı geçiş interferometri yöntemi kullanılarak iki görüntü alımı arasında oluşan zemin hareketi, iki görüntünün faz farkı hesaplanarak üretilen interferogram görüntüsü ile elde edilir (Gens ve van Genderen, 1996). "3.3 İnterferometrik Veri İşleme Adımları" bölümünde faz farkının hesaplanması ve deformasyon belirlenmesi ayrıntılı şekilde açıklanmıştır.

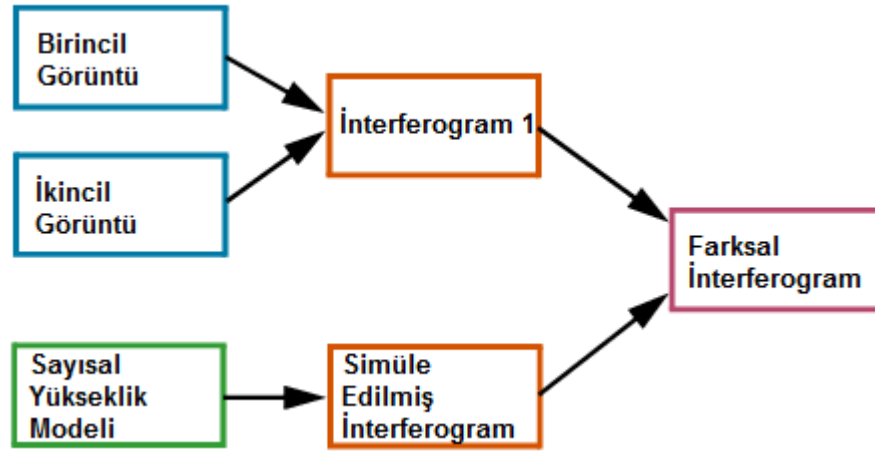
İnterferometrik veri işlenmesinde görüntüleri seçerken dikkat edilecek en önemli nokta, görüntülerin alındığı yörüngedeki iki geçişte uydular arasındaki mesafe farkıdır. Bu mesafe farkına baz (baseline) değeri denir. Baz değerine "3.2 Fazı Etkileyen Faktörler" bölümünde detaylıca değinilmiştir. İki farklı noktadan aynı topografyaya bakıldığında yüksekliğe bağlı olarak stereoskopik bir etki oluşacaktır. İnterferogramdaki topografya hassasiyetini dikey baz değeri belirler. Height ambiguity (h_a) olarak bilinen yükseklik belirsizliği değeri, bir örgeye sebep olacak yükseklik değeridir. Bu değer her h_a kadar yükseklikte interferogramda bir örge oluşacağını gösterir.

Bu örgelere topografik örgeler denir. Örnek vermek gerekirse; bir bölgede interferogramı içine alan düzlük bir alandan 500 m yüksekliğe ulaşan bir dağ var ise ve yükseklik belirsizliği 250 m ise inteferogramda 2 tane topografik örge oluşacaktır. Eğer dikey baz sıfır ise yani uydu tamamen aynı noktadan geçmişse interferogramda topografyadan kaynaklanan hiç bir örge olmayacaktır. "3.2.7 Bölge topografyasının etkileri ve bitki örtüsü" bölümünde bahsedilen Bamler ve Hartl (1998)'deki formüle göre yükseklik belirsizliği (h_a) değeri şu şekilde hesaplanabilir:

$$h_a = \frac{R\lambda}{2B_{\perp}} \sin \theta \quad (4.1)$$

TerraSAR-X uydusu için uçuş irtifası 514 km, 3.1 cm X-Band radar dalga boyu ve yaklaşık 20° bakış açısı olduğu varsayılırsa $h_a \approx 2725 / B_{\perp}$, yani 100 metre dikey baz için 2π kadar interferometrik faz değişiminde yaklaşık 27.25 metrede bir topografik

örge oluşacaktır. Sayısal yükseklik modeli oluşturmakta kullanılan bu etken deformasyon analizi çalışmalarında interferogramdan çıkarılmalıdır. Topografik faz etkisini gidermek için sayısal yükseklik modeli kullanma yöntemi seçildiyse kullanılacak uygun h_a değeri bu sayısal yükseklik modelinin çözünürlüğüne göre belirlenmelidir (Akoğlu, 2001). Dikey baz ne kadar düşük olursa topografik örge miktarı o kadar az olacaktır ve dolayısıyla sayısal arazi modelinden kaynaklanacak hatalarda o kadar düşük olacaktır.



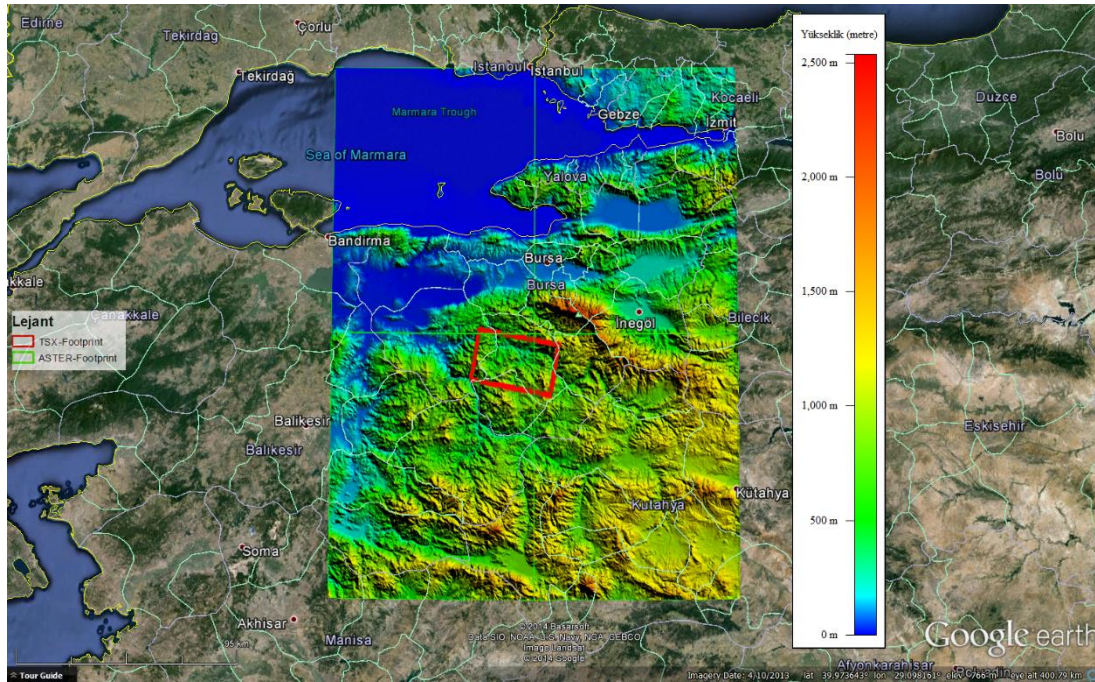
Şekil 4.6 : Farksal interferometri blok diyagramı.

Çalışmada topografik fazı gidermek amacıyla ASTER Global Sayısal Yükseklik Modeli Versiyon-2 kullanılmıştır. Bu veri 17 Ekim 2011 tarihinde Japonya Ekonomi, Ticaret ve Sanayi Bakanlığı (METI) ile Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi'nin (NASA) ortak girişimi olarak dağıtılmaya başlanmıştır. 29 Haziran 2009 tarihinde dağıtılmaya başlanmış olan Versiyon-1'e göre çözünürlüğü geliştirilmiş, yatay ve düşey doğruluğu artırılmış ve su kütlelerindeki piksel değerleri iyileştirilmiştir. Tüm Dünya yüzeyinin yaklaşık %99'unu kapsamaktadır. Optik yolla üretilmiş ASTER Global Sayısal Yükseklik Modeli verisi internet üzerinden ücretsiz indirilebilmektedir.

Çizelge 4.4 : ASTER global sayısal yükseklik modeli veri özellikleri.

Çerçeve Büyüklüğü	3601 piksel x 3601 piksel (1 derece x 1 derece)
Çözünürlük	1 yay-saniye (~30 m)
Projeksiyon	Coğrafi
Geoid Referans	WGS84 / EGM96
Veri Formatı	GeoTIFF, 16-bit signed integer
Özel Piksel Değerleri	Geçersiz pikseller için -9999, denizler için 0
Veri Büyüklüğü	Bir çerçeve için 25 MB (sıkıştırılmamış), 4-5 MB (sıkıştırılmış)
Veri Kapsamı	Kuzey 83 derece – Güney 83 derece enlemleri arası, toplam 22,702 çerçeve

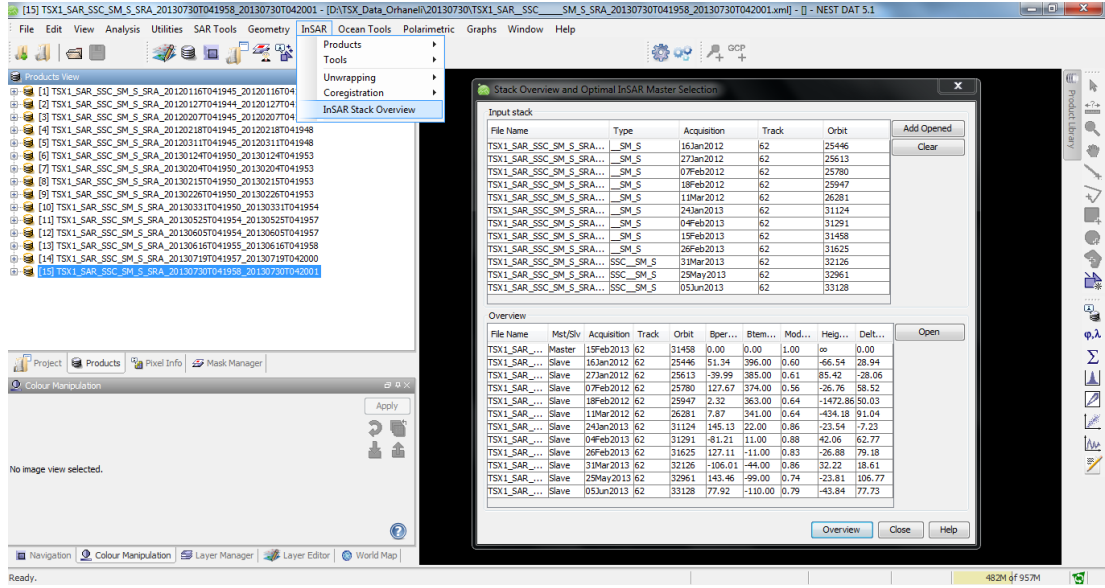
Çalışmada kullanılan ASTER global sayısal yükseklik modeli verisi aşağıda görülmektedir. Kırmızı çerçeve, analizlerde kullanılan 62 track numaralı TerraSAR-X verilerinin yeryüzünde kapsadığı alanı göstermektedir.



Şekil 4.7 : Çalışma alanı ASTER sayısal yükseklik modeli.

Çalışmada TerraSAR-X uydusuna ait toplam 15 adet SAR görüntüsü kullanılmıştır ve kullanılan tüm SAR görüntüleri 15 Şubat 2013 tarihli görüntü birincil (master) görüntü olacak şekilde eşleştirilmiştir (coregistration). Birincil görüntü, diğer SAR görüntüleri ile arasındaki dik baz uzunluğu en kısa olacak ve tüm görüntülerin çekim tarih aralığının orta veya ortaya yakın tarihe sahip olacak şekilde seçilmelidir. Birincil görüntüyü belirlemek için Avrupa Uzay Ajansı (ESA), Array Systems

Computing Inc., Brockmann Consult ve PPO.Labs tarafından ortak geliştirilmiş NEST 5.1 yazılımı “InSAR Stack Overview” aracı kullanılmıştır.



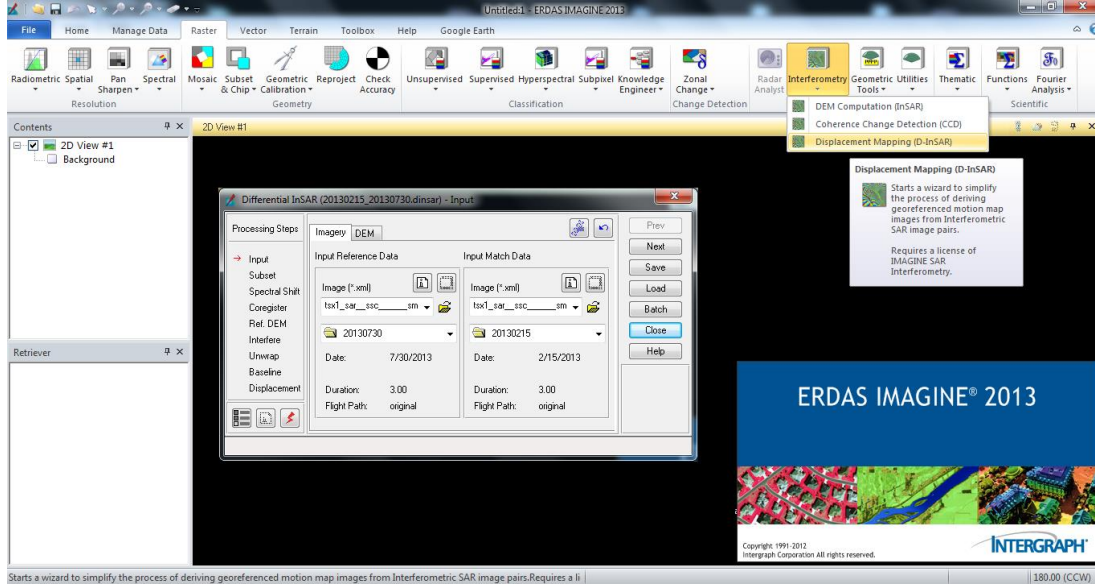
Şekil 4.8 : NEST 5.1 ekran görüntüsü.

Çalışmada kullanılan SAR görüntüleri Single-Look Slant Range Complex (SSC) ürünü, StripMap (SM) modunda alınmıştır, polarizasyonu yatay-yatay (horizontal-horizontal) [HH] olup tamamı 62 track numaralı alçalan (descending) yörünge geçişlidir. Analizlerde kullanılan SAR görüntülerinin listesi aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 4.5 : Analizlerde kullanılan SAR görüntüleri listesi.

Çekim Tarihi	Yörünge (Orbit)	Dik Baz [m]	Zamansal Baz [gün]	Uyuşum (Coherence)	Yükseklik Belirsizliği (Height Ambiguity) [m]	Delta fDC [Hz]
15.02.2013	31458	0	0	1	∞	0
16.01.2012	25446	51.34	396	0.6	-66.54	28.94
27.01.2012	25613	-39.99	385	0.61	85.42	-28.06
07.02.2012	25780	127.67	374	0.56	-26.76	58.52
18.02.2012	25947	2.32	363	0.64	-1472.86	50.03
11.03.2012	26281	7.87	341	0.64	-434.18	91.04
24.01.2013	31124	145.13	22	0.86	-23.54	-7.23
04.02.2013	31291	-81.21	11	0.88	42.06	62.77
26.02.2013	31625	127.11	-11	0.83	-26.88	79.18
31.03.2013	32126	-106.01	-44	0.86	32.22	18.61
25.05.2013	32961	143.46	-99	0.74	-23.81	106.77
05.06.2013	33128	77.92	-110	0.79	-43.84	77.13
16.06.2013	33295	133.53	-121	0.77	-25.58	37.12
19.07.2013	33796	120.91	-154	0.74	-28.25	58.14
30.07.2013	33963	-54.6	-165	0.78	62.57	53.82

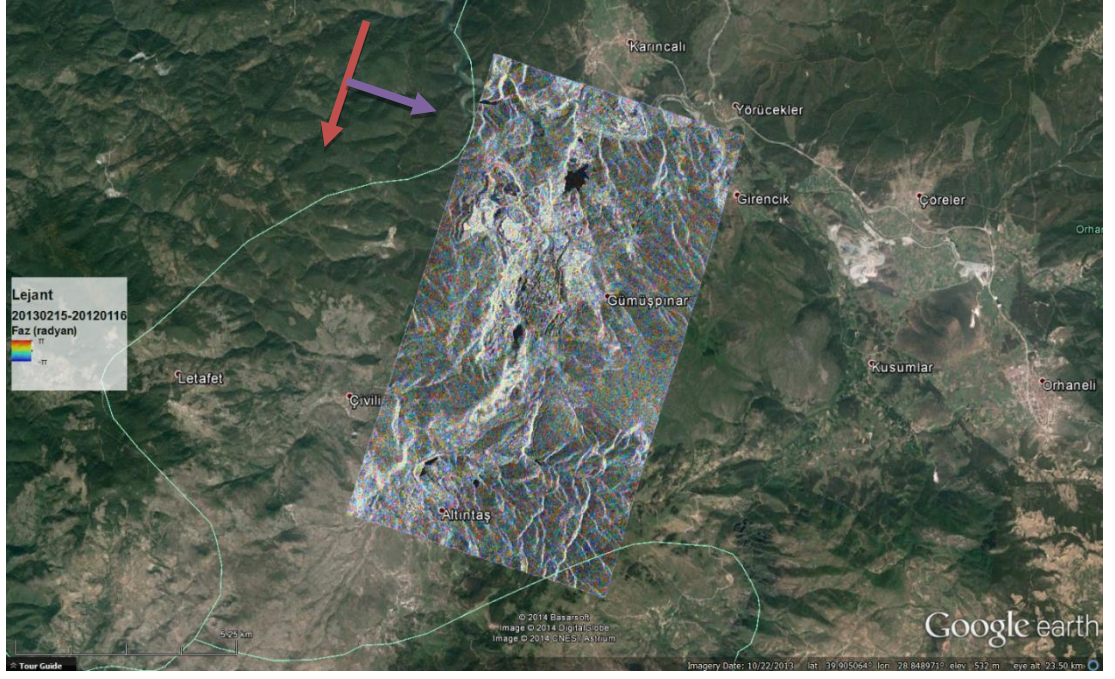
Farksal interferogramlar ve yer değiştirme görüntülerini üretmek için INTERGRAPH firmasının ERDAS IMAGINE yazılımı Displacement Mapping (D-InSAR) aracı kullanılmıştır. Verilerin işlendiği bilgisayar Windows 7 64-bit Service Pack 1 işletim sistemi, Intel Core 2 Duo P8700 2.53 GHz işlemci ve 4 GB RAM konfigürasyona sahiptir. Bir görüntü çiftinin işlenmesi yaklaşık 1 saat 15 dakika kadar sürmüştür.



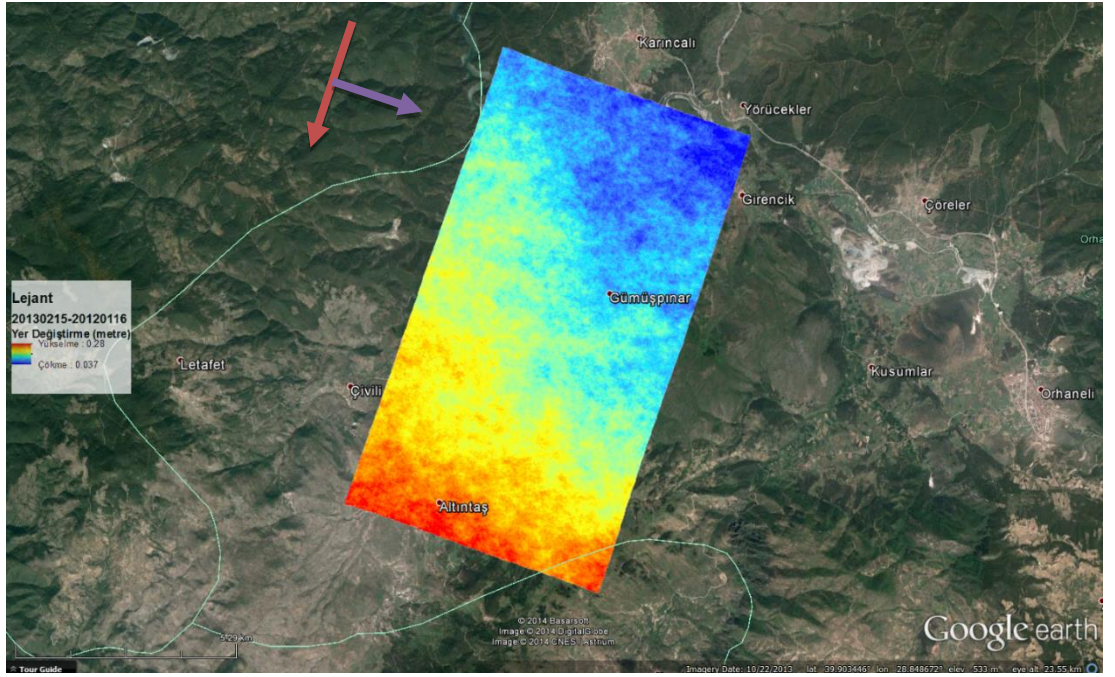
şekil 4.9 : ERDAS IMAGINE 2013 ekran görüntüsü.

Farksal interferogramlarda interferometrik faz değişimini gösterir bir  rge radar ile yer yüzü arasında uyduya bakış doğrultusunda (LOS) yaklaşık 1.5~1.6 cm'lik (yarım dalga boyu) bir mesafe değişimini göstermektedir.

15 şubat 2013 tarihli görüntüyü birincil belirleyerek oluşturulmuş 14 adet farksal interferogram ve yer değiştirme haritaları Ek A'da sunulmuştur. Görüntüler  zerindeki kırmızı ok uydunun gidiş yönünü, mor ok ise radar bakış doğrultusunu göstermektedir. Özellikle 20130215-20130124, 20130215-20130204, 20130215-20130226 ve 20130215-20130331 tarihli görüntü çiftlerinden üretilmiş farksal interferogram ve yer değiştirme haritalarında zamansal korelasyonun ve uyuşumun yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 4.10 : 20130215-20120116 farksal interferogram.

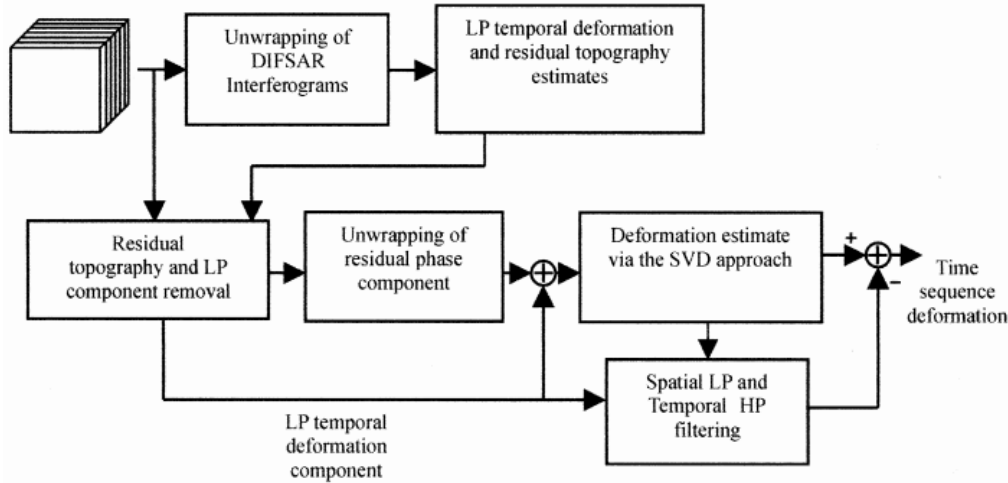


Şekil 4.11 : 20130215-20120116 yer değiştirme haritası.

4.4 SBAS Algoritması ile Yer Değiştirme Trendinin Belirlenmesi

Çalışmada kullanılan SAR veri tarihlerinde gözlemlenen alanda faz korelasyonunun az olduğu durumlarda uygun görüntü çiftleri oluşturulamamakta ve uzun sürede yavaş hızda meydana gelen yüzey deformasyonlarının sağlıklı bir şekilde izlenmesi zorlaşmaktadır. Görüntü çiftlerinin analizini etkileyen başlıca parametreler yörünge, geometrik dik baz uzunlukları, zamansal değişim, topografya ve hava koşullarıdır. Bu güçlüklerin azaltılması amacıyla çok zamanlı alınan görüntüler kullanılarak SBAS algoritması geliştirilmiştir (Berardino vd., 2002).

Bu yöntem, deformasyon trendinin belirlenmesinde bir diğer yöntem olarak kullanılan PSInSAR yönteminin aksine, faz bilgisinin mekanda yüksek korelasyona sahip olduğu tüm pikselleri değerlendirmez, görüntünün tamamına bakarak yüksek korelasyona sahip dağılmış hedefleri bir arada inceler. Dolayısıyla daha kısa sürede, daha düşük bilgisayar gücüyle ve hassas bir şekilde sonuca varılabilen bir yöntemdir. Zamansal örnekleme oranını (temporal sampling rate) artırmak ve dolayısıyla görüntüler arasındaki mekansal korelasyonsuzluğu (spatial decorrelation) sınırlandırmak amacıyla düşük baz uzunluğuna sahip görüntü çiftlerinden elde edilen interferogramlar değerlendirilir.

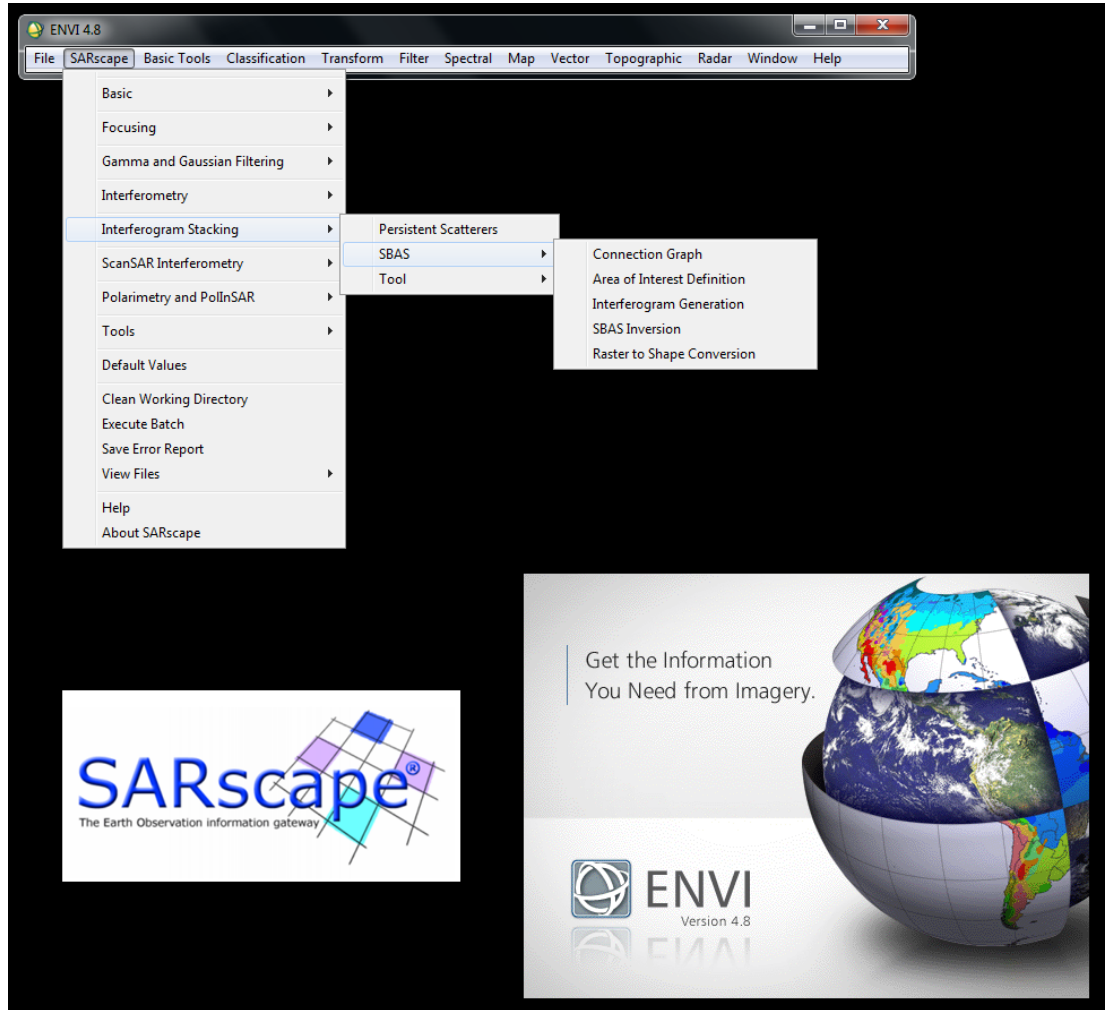


Şekil 4.12 : SBAS Blok Diyagramı (Berardino ve diğ, 2002).

SBAS algoritmasında tüm görüntülerin pikselleri, seçilen bir referans görüntüye göre (super master) eşleştirilir (coregistration). Toplam görüntü sayısının (n) ikili kombinasyonu kadar farksal interferogram oluşturulur ($C(n,2)$). Bu interferogramların faz farkı hesaplanır. Yüksek korelasyon sağlanabilmesi amacıyla, baz uzunluğu diğerlerine göre daha küçük olan görüntü çiftleriyle oluşturulmuş

veriler seçilir. Daha sonra bu verilerdeki yüksek uyuma (high coherence) sahip hedeflere, lineer cebirde (linear algebra) kullanılan tekil değer ayrışımı (SVD) yöntemi tabanlı bir yaklaşım uygulanarak deformasyon trendi belirlenmiş olur.

SBAS analizi için EXELIS firmasının ENVI yazılımı üzerinde SARMAP firmasının geliştirdiği SARscape aracı kullanılmıştır. Verilerin işlendiği bilgisayar Windows 7 64-bit Service Pack 1 işletim sistemi, Intel Core 2 Duo P8700 2.53 GHz işlemci ve 4 GB RAM konfigürasyona sahiptir. Tüm görüntülerin işlenerek yer değiştirme hız trendinin belirlendiği çalışma yaklaşık 8 saat kadar sürmüştür.



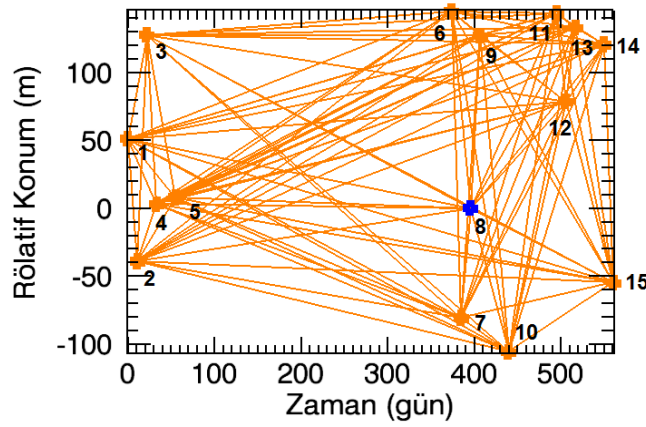
Şekil 4.13 : ENVI 4.8 + SARscape 4.3 Ekran Görüntüsü.

Çalışmada 15 adet görüntü kullanıldığından toplamda $C(15,2) = 105$ adet görüntü çifti analiz edilmiştir. Tüm görüntüler 15 Şubat 2013 tarihli referans görüntüye göre (super master) eşleştirilmiştir.

Çizelge 4.6 : Görüntü Listesi (Tarihler YYYY-AA-GG biçiminde yazılmıştır).

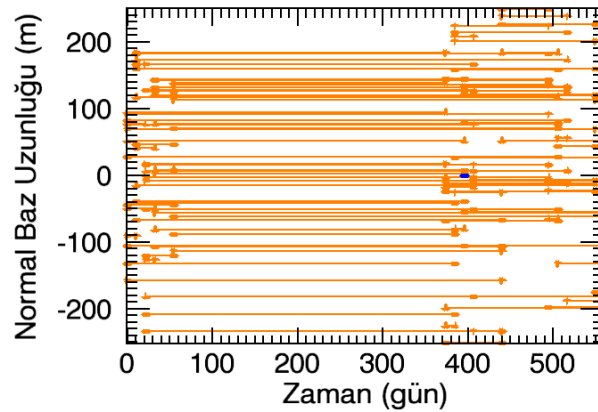
Görüntü No	Çekim Tarihi
1	20120116
2	20120127
3	20120207
4	20120218
5	20120311
6	20130124
7	20130204
8	20130215
9	20130226
10	20130331
11	20130525
12	20130605
13	20130616
14	20130719
15	20130730

Kullanılan radar görüntülerinin zamana göre konumları ve interferogram oluşturulan görüntü çiftleri Şekil 4.40’da gösterilmiştir. Mavi nokta referans görüntüyü temsil etmektedir.



Şekil 4.14 : SAR görüntülerinin zaman-konum grafiği.

İnterferogram oluşturulan görüntü çiftleri arası baz uzunlukları Şekil 4.41’de gösterilmiştir. Mavi nokta referans görüntüyü temsil etmektedir.



Şekil 4.15 : SAR görüntülerinin zaman-baz uzunluğu grafiği.

Görüntüler arasındaki normal baz uzunluğu, zamansal baz süresi, yükseklik belirsizliği ve doppler farkını gösterir matrisler aşağıdadır. Minimum mutlak normal baz 2.61 metre, maksimum mutlak normal baz 250.68 metre ve ortalama mutlak baz uzunluğu değeri 102.94 metre hesaplanmıştır.

Çizelge 4.7 : Normal baz matrisi (metre).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	-90.28	76.44	-49.92	-43.93	93.85	-131.96	-51.21	76.02	-156.9	92.23	27.96	82.14	69.65	-105.49
2	90.28	0	166.67	40.44	46.35	184.08	-41.82	39.14	166.25	-66.62	182.31	116.55	172.34	159.94	-15.32
3	-76.44	-166.67	0	-126.29	-120.34	17.67	-208.4	-127.65	-2.61	-233.25	15.79	-50.63	5.79	-7.8	-181.88
4	49.92	-40.44	126.29	0	7.26	143.75	-82.18	-3	125.88	-106.97	142.08	76.41	131.97	119.46	-55.59
5	43.93	46.35	120.34	-7.26	0	137.79	-88.05	-7.95	119.96	-112.97	136.01	70.45	126.02	113.52	-61.52
6	-93.85	-184.08	-17.67	-143.75	-137.79	0	-225.82	-145.06	-18.13	-250.68	-3.23	-68.24	-11.88	-24.43	-199.31
7	131.96	41.82	208.4	82.18	88.05	225.82	0	80.78	208	-25.2	224.07	158.36	214.08	201.57	26.54
8	51.21	-39.14	127.65	3	7.95	145.06	-80.78	0	127.29	-105.76	143.57	78.59	133.34	120.82	-54.66
9	-76.02	-166.25	2.61	-125.88	-119.96	18.13	-208	-127.29	0	-232.87	16.38	-50.7	6.5	-6.93	-181.49
10	156.9	66.62	233.25	106.97	112.97	250.68	25.2	105.76	232.87	0	248.83	183.09	238.89	226.42	51.31
11	-92.23	-182.31	-15.79	-142.08	-136.01	3.23	-224.07	-143.57	-16.38	-248.83	0	-66.02	-10.34	-22.58	-197.54
12	-27.96	-116.55	50.63	-76.41	-70.45	68.24	-158.36	-78.59	50.7	-183.09	66.02	0	56.36	43.89	-131.7
13	-82.14	-172.34	-5.79	-131.97	-126.02	11.88	-214.08	-133.34	-6.5	-238.89	10.34	-56.36	0	-12.56	-187.6
14	69.65	-159.94	7.8	-119.46	-113.52	24.43	-201.57	-120.82	6.93	-226.42	22.58	-43.89	12.56	0	-175.1
15	105.49	15.32	181.88	55.59	61.52	199.31	-26.54	54.66	181.49	-51.31	197.54	131.7	187.61	175.1	0

Çizelge 4.8 : Zamansal baz matrisi (gün).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	11	22	33	55	374	385	396	407	440	495	506	517	550	561
2	-11	0	11	22	44	363	374	385	396	429	484	495	506	539	550
3	-22	-11	0	11	33	352	363	374	385	418	473	484	495	528	539
4	-33	-22	-11	0	22	341	352	363	374	407	462	473	484	517	528
5	-55	-44	-33	-22	0	319	330	341	352	385	440	451	462	495	506
6	-374	-363	-352	-341	-319	0	11	22	33	66	121	132	143	176	187
7	-385	-374	-363	-352	-330	-11	0	11	22	55	110	121	132	165	176
8	-396	-385	-374	-363	-341	22	11	0	11	44	99	110	121	154	165
9	-407	-396	-385	-374	-352	-33	-22	-11	0	33	88	99	110	143	154
10	-440	-429	-418	-407	-385	-66	-55	-44	-33	0	55	66	77	110	121
11	-495	-484	-473	-462	-440	-121	-110	-99	-88	-55	0	11	22	55	66
12	-506	-495	-484	-473	-451	-132	-121	-110	-99	-66	-11	0	11	44	55
13	-517	-506	-495	-484	-462	-143	-132	-121	-110	-77	-22	-11	0	33	44
14	-550	-539	-528	-517	-495	-176	-165	-154	-143	-110	-55	-44	-33	0	11
15	-561	-550	-539	-528	-506	-187	-176	-165	-154	-121	-66	-55	-44	-11	0

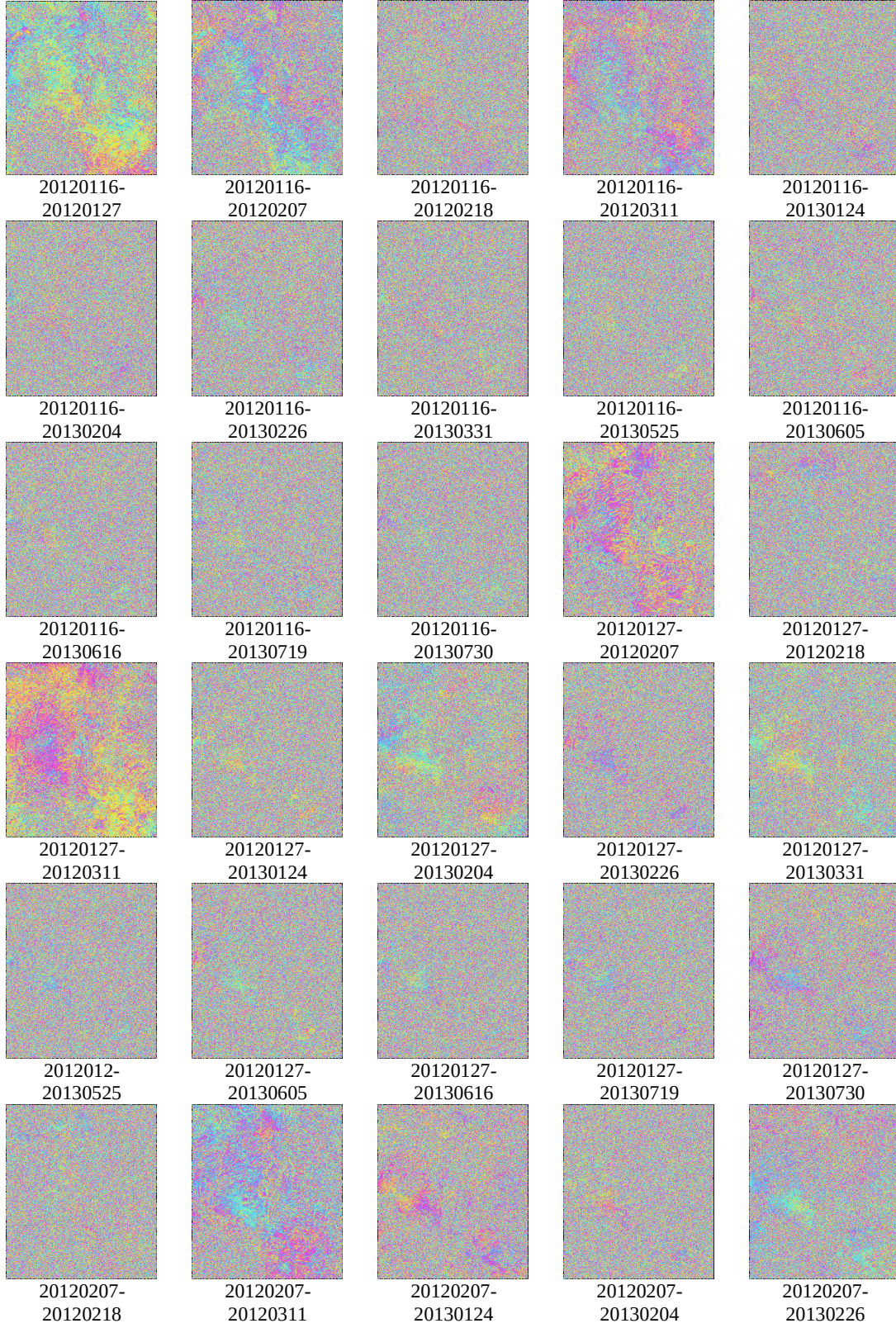
Çizelge 4.9 : Yükseklik belirsizliği matrisi (metre).

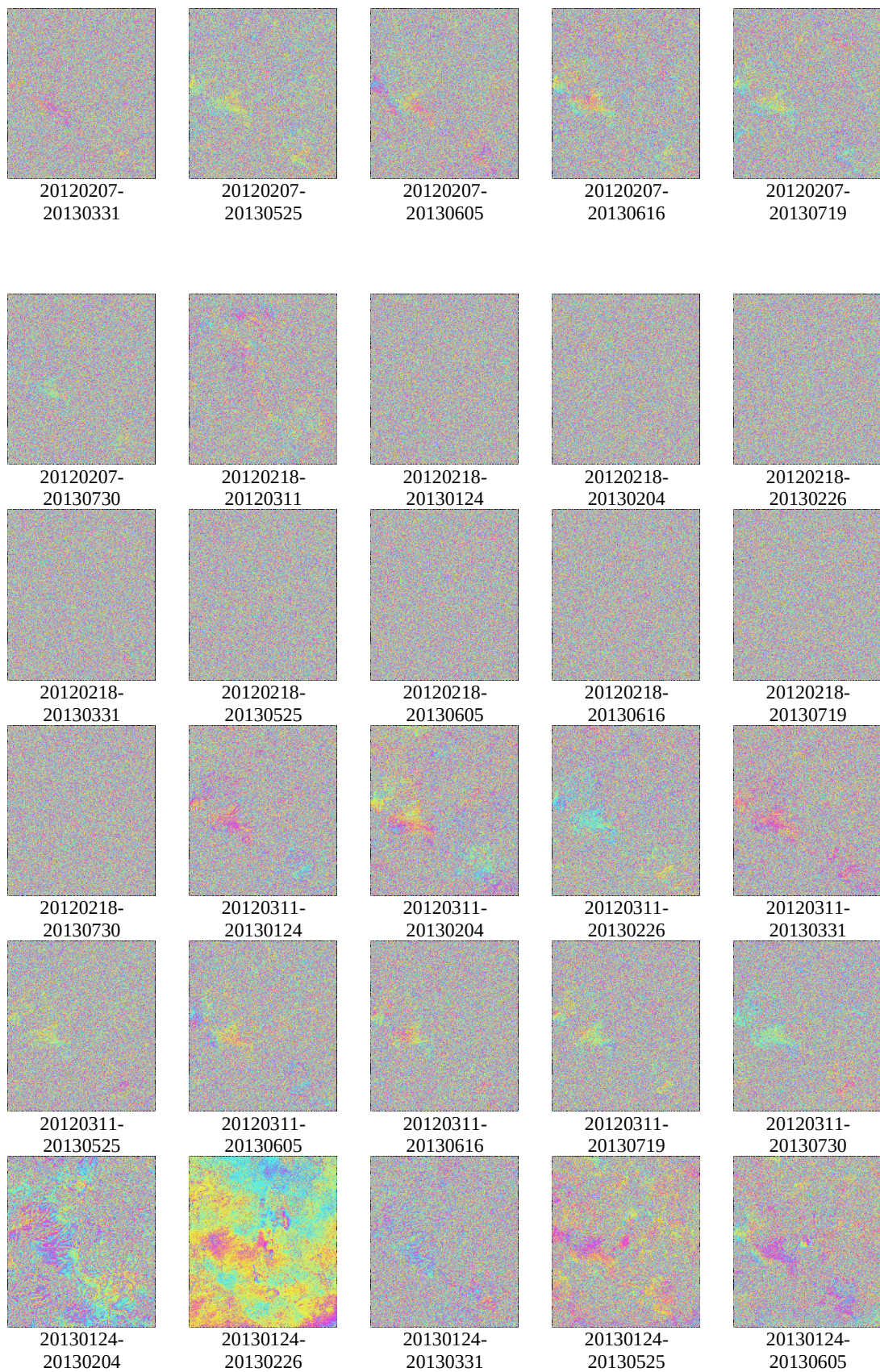
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	-38.56	45.54	-69.73	-79.24	37.09	-26.38	-67.97	45.79	-22.19	37.75	124.5	42.38	49.98	-33
2	-38.56	0	20.88	86.07	75.08	18.91	-83.22	88.91	20.94	-52.24	19.09	29.86	20.19	21.76	-227.25
3	45.54	20.88	0	-27.56	-28.92	196.92	-16.7	-27.26	-1333.86	-14.92	220.41	-68.73	600.8	-446.18	-19.13
4	-69.73	86.07	-27.56	0	479.21	24.21	-42.35	-1158.9	27.65	-32.53	24.49	45.54	26.37	29.13	-62.61
5	-79.24	75.08	-28.92	479.21	0	25.27	-39.54	-437.99	29.02	-30.82	25.6	49.42	27.63	30.67	-56.59
6	37.09	18.91	196.92	24.21	25.27	0	-15.41	-23.99	-191.94	-13.88	-1075.6	-50	-292.98	-142.42	-17.46
7	-26.38	-83.22	-16.7	-42.35	-39.54	-15.41	0	43.09	16.73	-138.1	15.53	21.98	16.26	17.27	131.15
8	-67.97	88.91	-27.26	-1158.9	-437.99	-23.99	43.09	0	27.35	-32.92	24.25	44.3	26.11	28.82	-63.69
9	45.79	20.94	-1333.86	27.65	29.02	-191.94	16.73	27.35	0	-14.94	212.39	-68.62	534.79	-501.91	-19.17
10	-22.19	-52.24	-14.92	-32.53	-30.82	-13.88	-138.1	-32.92	-14.94	0	13.99	19.02	14.58	15.38	67.86
11	37.75	19.09	220.41	24.49	25.6	-1075.6	15.53	24.25	212.39	13.99	0	-52.72	-336.44	-154.15	-17.62
12	124.5	29.86	-68.73	45.54	49.42	-50	21.98	44.3	-68.62	19.02	-52.72	0	61.76	79.31	-26.43
13	42.38	20.19	600.8	26.37	27.63	-292.98	16.26	26.11	534.79	14.58	-336.44	61.76	0	-277.1	-18.55
14	49.98	21.76	-446.18	29.13	30.67	-142.42	17.27	28.82	-501.91	15.38	-154.15	79.31	-277.1	0	-19.87
15	-33	-227.25	-19.13	-62.61	-56.59	-17.46	131.15	-63.69	-19.17	67.86	-17.62	-26.43	-18.55	-19.87	0

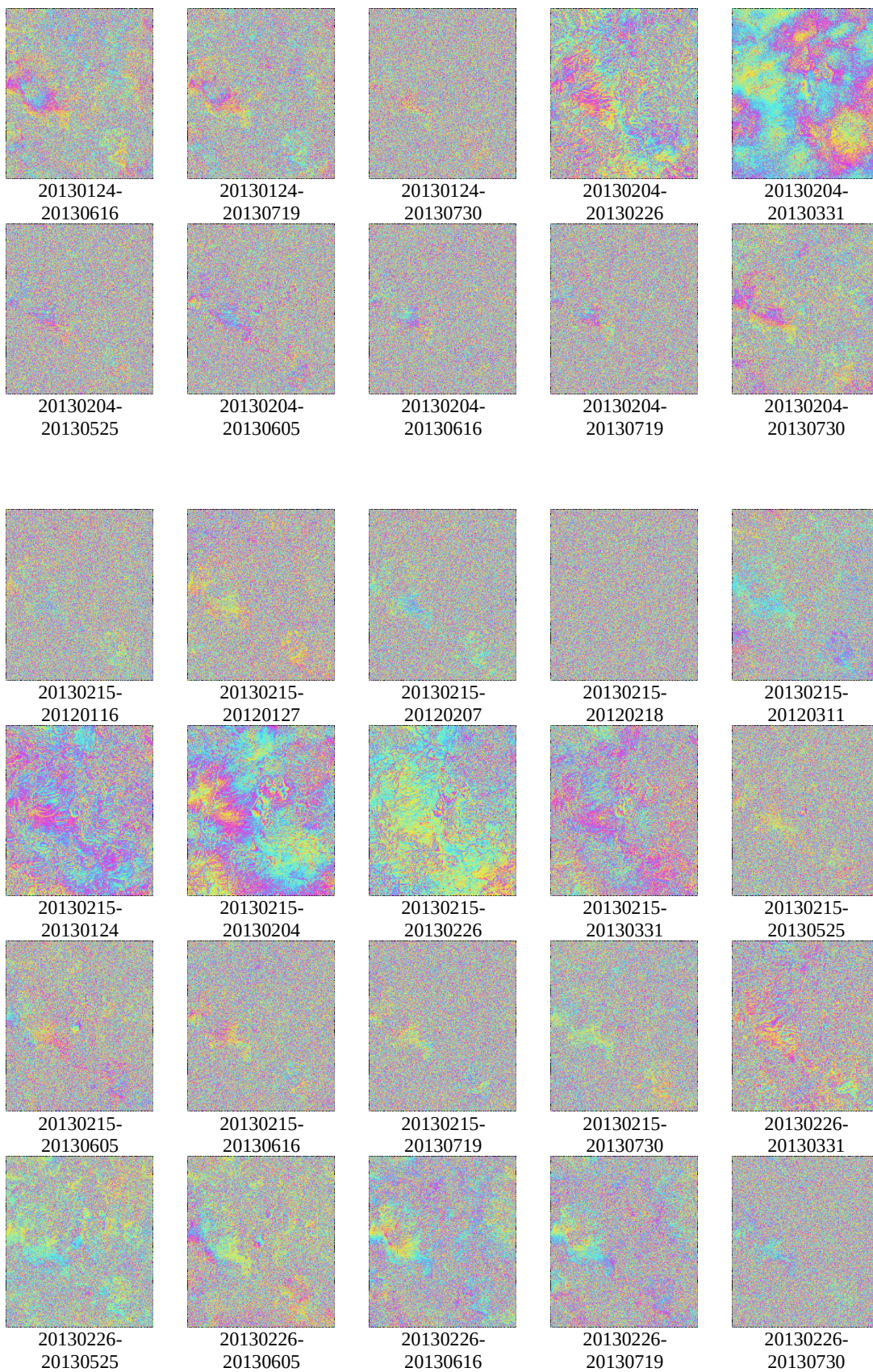
Çizelge 4.10 : Doppler farkı matrisi (hertz).

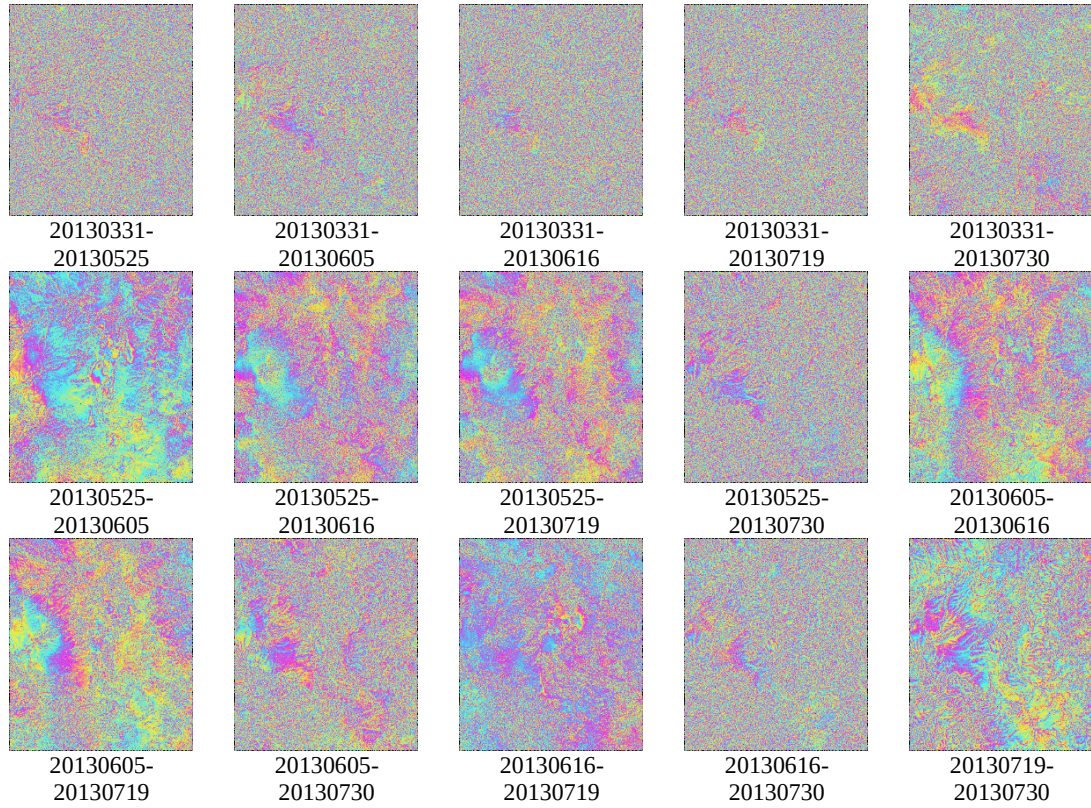
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	-68.86	56.59	13.26	23.29	-46.88	21.64	-50.78	44.04	-29.38	49.89	26.98	9.18	-13.38	-15.47
2	68.86	0	125.45	82.12	92.15	21.98	90.5	18.08	112.9	39.48	118.75	95.84	78.04	55.47	53.39
3	-56.59	-125.45	0	-43.33	-33.3	-103.47	-34.95	-107.37	-12.55	-85.97	-6.7	-29.61	-47.41	-69.97	-72.06
4	-13.26	-82.12	43.33	0	10.03	-60.14	8.38	-64.04	30.78	-42.64	36.63	13.72	-4.08	-26.64	-28.73
5	-23.29	-92.15	33.3	-10.03	0	-70.17	-1.65	-74.07	20.75	-52.67	26.6	3.69	-14.11	-36.67	-38.76
6	46.88	-21.98	103.47	60.14	70.17	0	68.52	-3.9	90.92	17.5	96.77	73.86	56.06	33.49	31.4
7	-21.64	-90.5	34.95	-8.38	1.65	-68.52	0	-72.42	22.4	-51.02	28.25	5.34	-12.46	-35.02	-37.11
8	50.78	-18.08	107.37	64.04	74.07	3.9	72.42	0	94.82	21.4	100.67	77.76	59.96	37.39	35.3
9	-44.04	-112.9	12.55	-30.78	-20.75	-90.92	-22.4	-94.82	0	-73.42	5.85	-17.06	-34.86	-57.42	-59.51
10	29.38	-39.48	85.97	42.64	52.67	-17.5	51.02	-21.4	73.42	0	79.27	56.36	38.56	16	13.91
11	-49.89	-118.75	6.7	-36.63	-26.6	-96.77	-28.25	-100.67	-5.85	-79.27	0	-22.91	-40.71	-63.27	-65.37
12	-26.98	-95.84	29.61	-13.72	-3.69	-73.86	-5.34	-77.76	17.06	-56.36	22.91	0	-17.8	-40.36	-42.45
13	-9.18	-78.04	47.41	4.08	14.11	-56.06	12.46	-59.96	34.86	-38.56	40.71	17.8	0	-22.56	-24.65
14	13.38	-55.47	69.97	26.64	36.67	-33.49	35.02	-37.39	57.42	-16	63.28	40.36	22.56	0	-2.09
15	15.47	-53.39	72.06	28.73	38.76	-31.4	37.11	-35.3	59.51	-13.91	65.37	42.45	24.65	2.09	0

Analiz sonucunda elde edilmiş toplam 105 adet farksal interferogram aşağıda gösterilmiştir. Radar koordinatlarında bırakılmıştır, geocoding uygulanmamıştır.



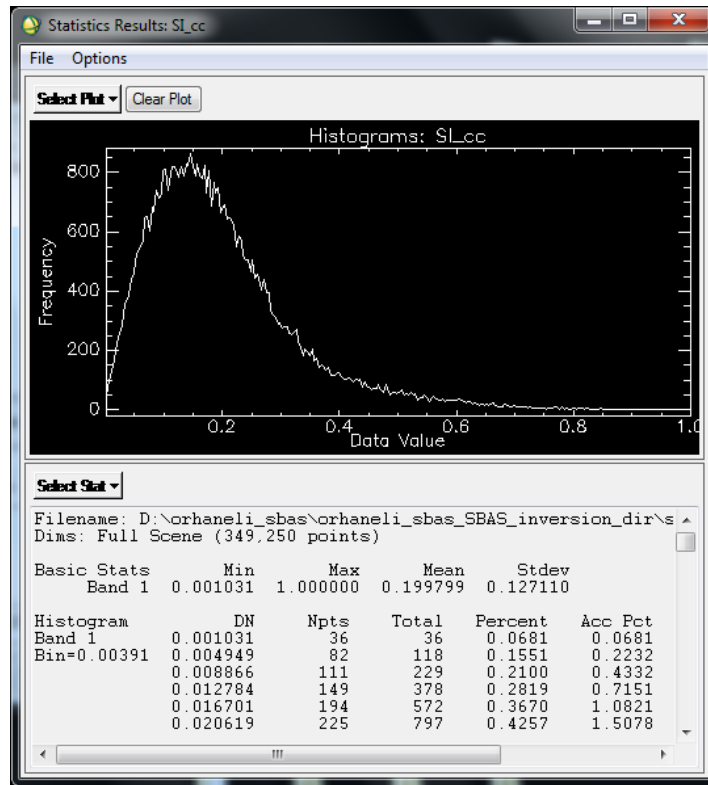




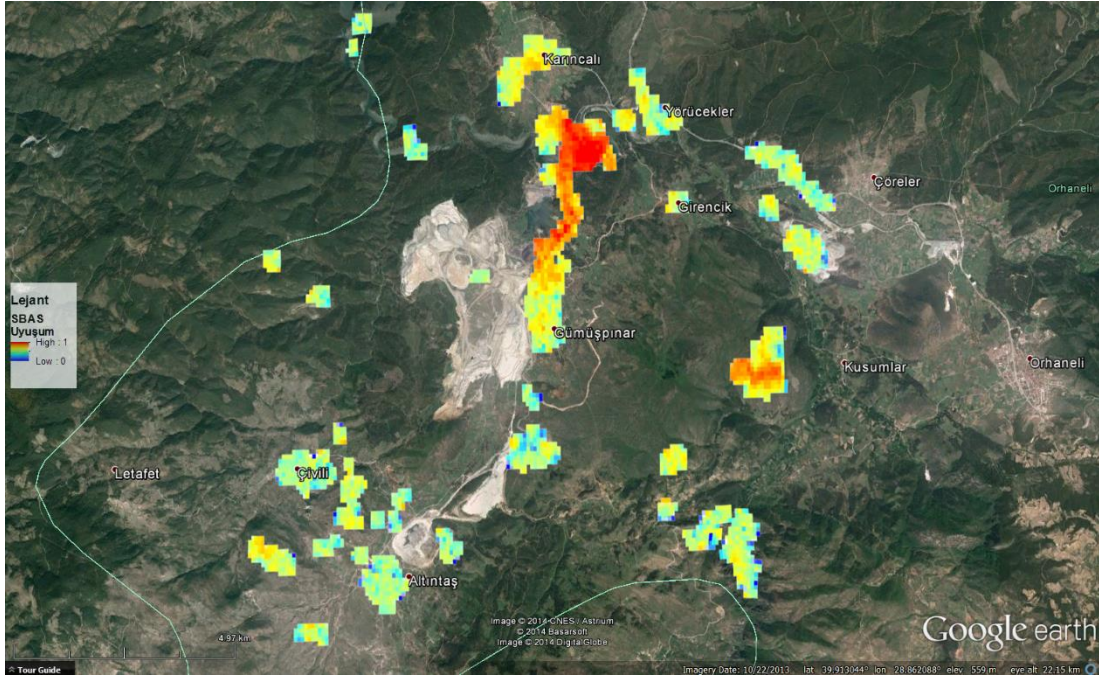


Şekil 4.16 : SBAS analizi sonucu elde edilen interferogramlar.

SBAS analizi sonucu işlenmiş görüntülerin çoklu-zamansal (multi-temporal) uyuşum (coherence) görüntüsüne ait histogram Şekil 4.43’te gösterilmiştir.

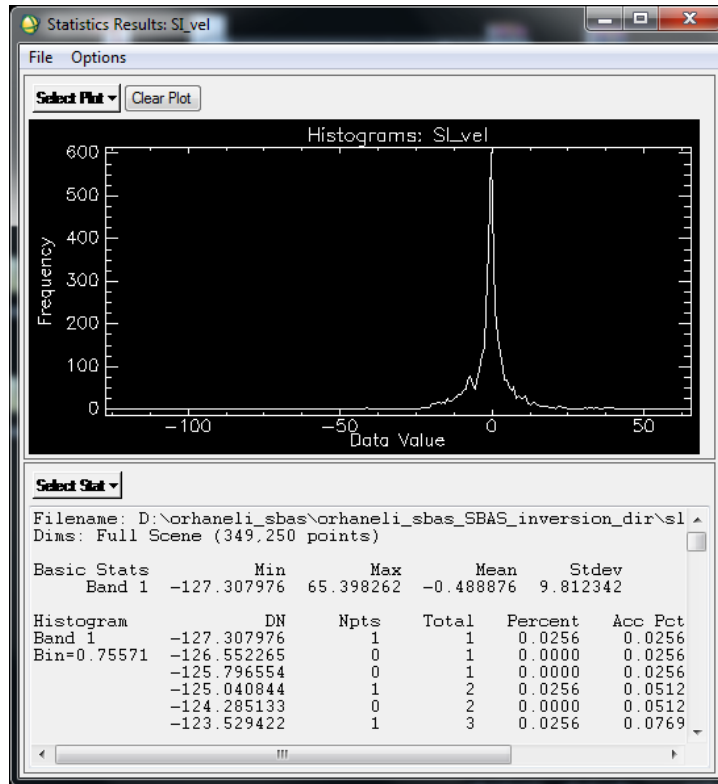


Şekil 4.17 : SBAS uyuşum histogramı.

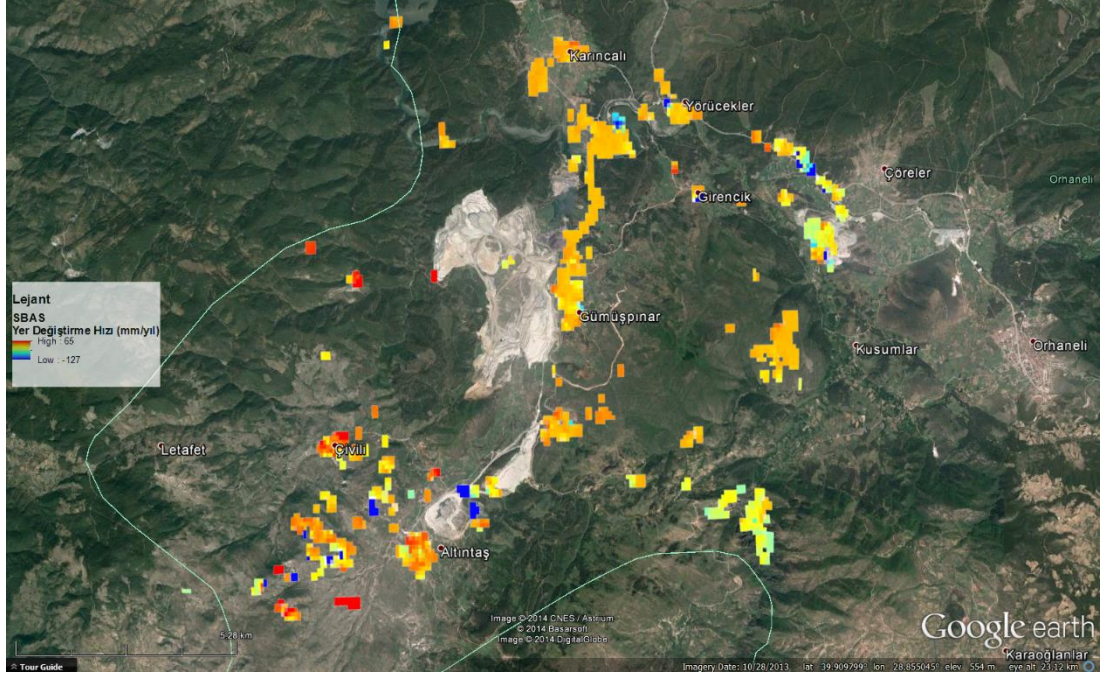


Şekil 4.18 : SBAS sonucu üretilen uyuşum haritası.

SBAS analizi sonucu elde edilen yıllık yer değiştirme hızı görüntüsüne ait histogram Şekil 4.44’te gösterilmiştir.

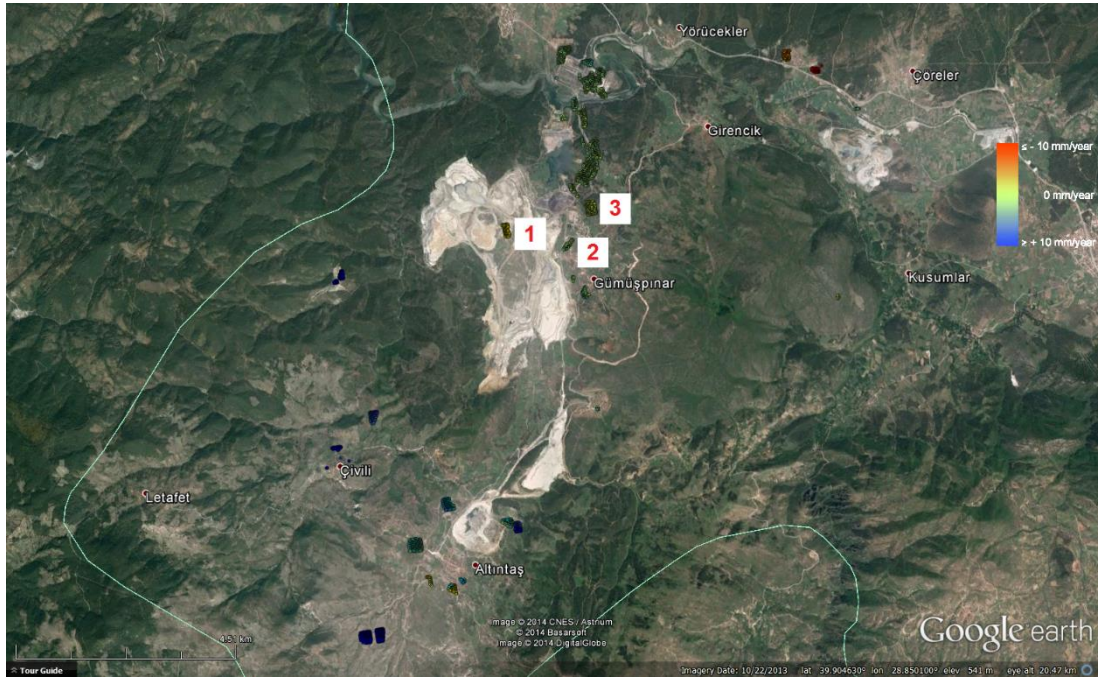


Şekil 4.19 : SBAS yer değiştirme hızı histogramı.



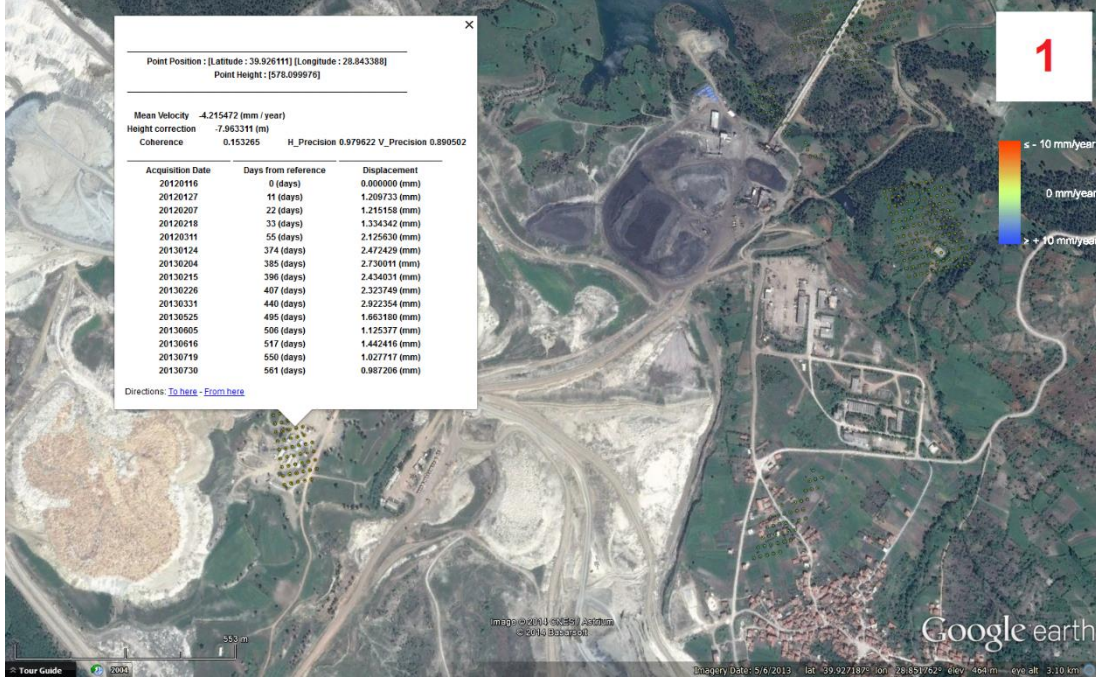
Şekil 4.20 : SBAS sonucu üretilen yer değiştirme hızı haritası.

SBAS analizi ile oluşturulan yer değiştirme hızı raster görüntüsü, uyuşum eşik değeri (coherence threshold) 0.1 olacak şekilde vektörel formata dönüştürülmüştür. Bir başka deyişle 0.1 uyuşum değerinden daha küçük uyuşum değerine sahip pikseller vektöre dönüştürülmemiştir. Uyuşum değerinin yüksek olduğu ve mevcut üretimin tamamının yapıldığı Gümüşpınar sektörü için yer değiştirme trendi belirlenmiş ve bu civarda seçilmiş üç nokta için sonuçlar gösterilmiştir.

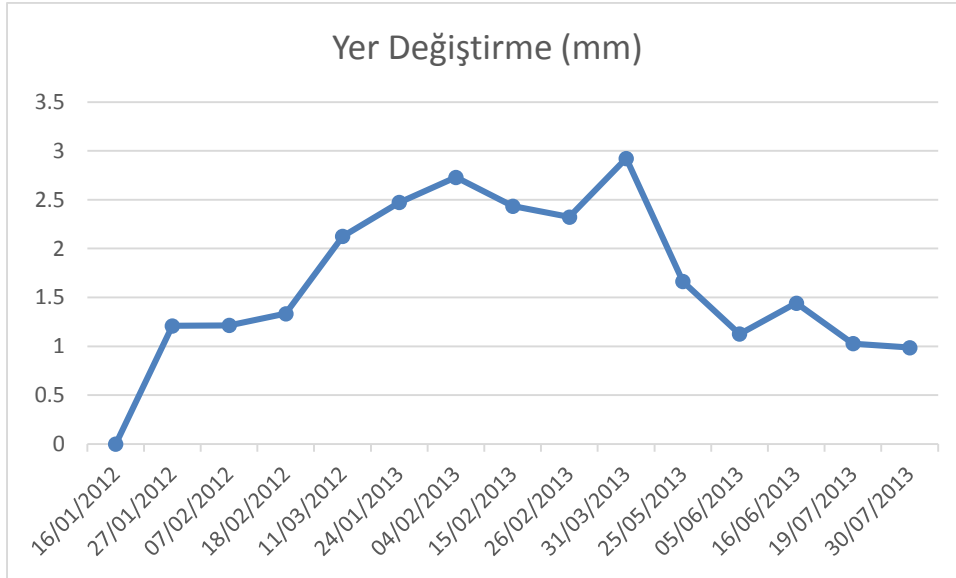


Şekil 4.21 : SBAS sonucu üretilen yer değiştirme hızı vektörleri.

Yer değıştirme hızı 1 numaralı nokta için (Boylam: 28.843388°, Enlem: 39.926111°, Yükseklik: 578.099976 m) ortalama yıllık -4.21 mm (uyduya bakış doğrultusunda, çökme yönlü) olarak hesaplanmıştır. Bu nokta için uyuşum değeri 0.153265'tir.

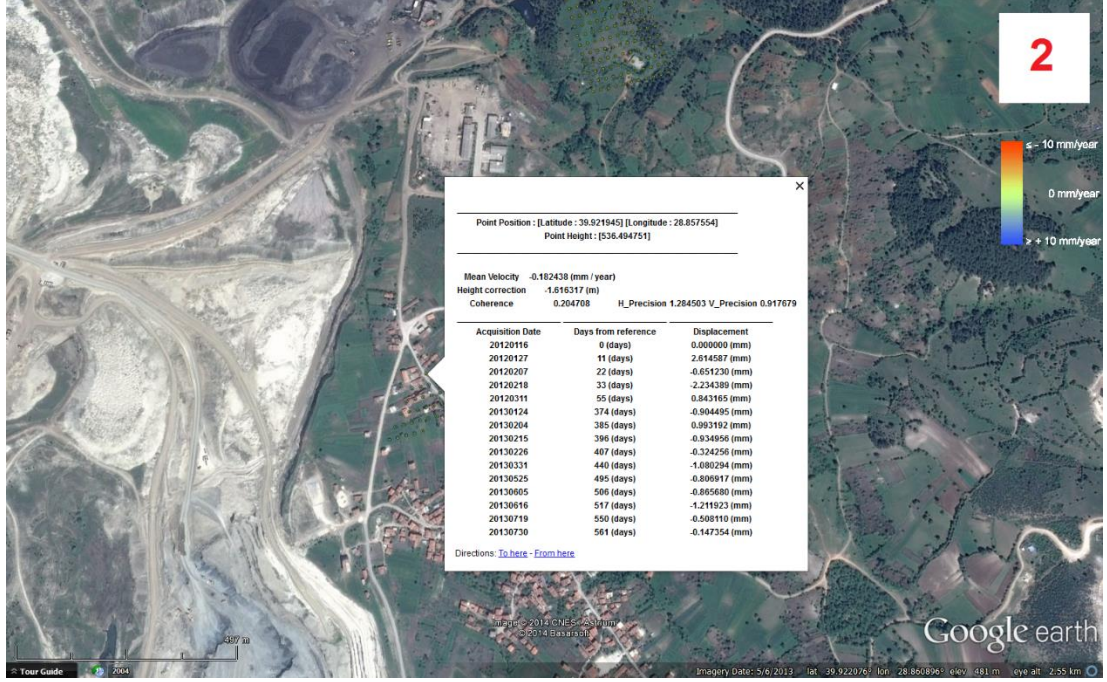


Şekil 4.22 : Yer değıştirme bilgileri (1 numaralı nokta).

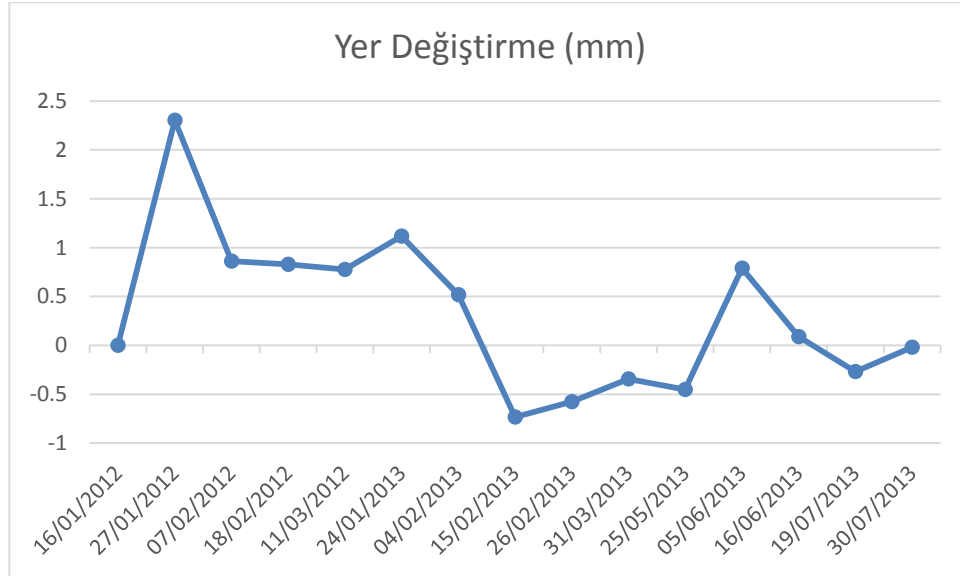


Şekil 4.23 : Yer değıştirme-zaman grafiğı (1 numaralı nokta).

Yer değıştirme hızı 2 numaralı nokta için (Boylam: 28.857554°, Enlem: 39.921945°, Yükseklik: 536.494751 m) ortalama yıllık -0.18 mm (uyduya bakış doğrultusunda, çökme yönlü) olarak hesaplanmıştır. Bu nokta için uyuşum değeri 0.204708'dir.

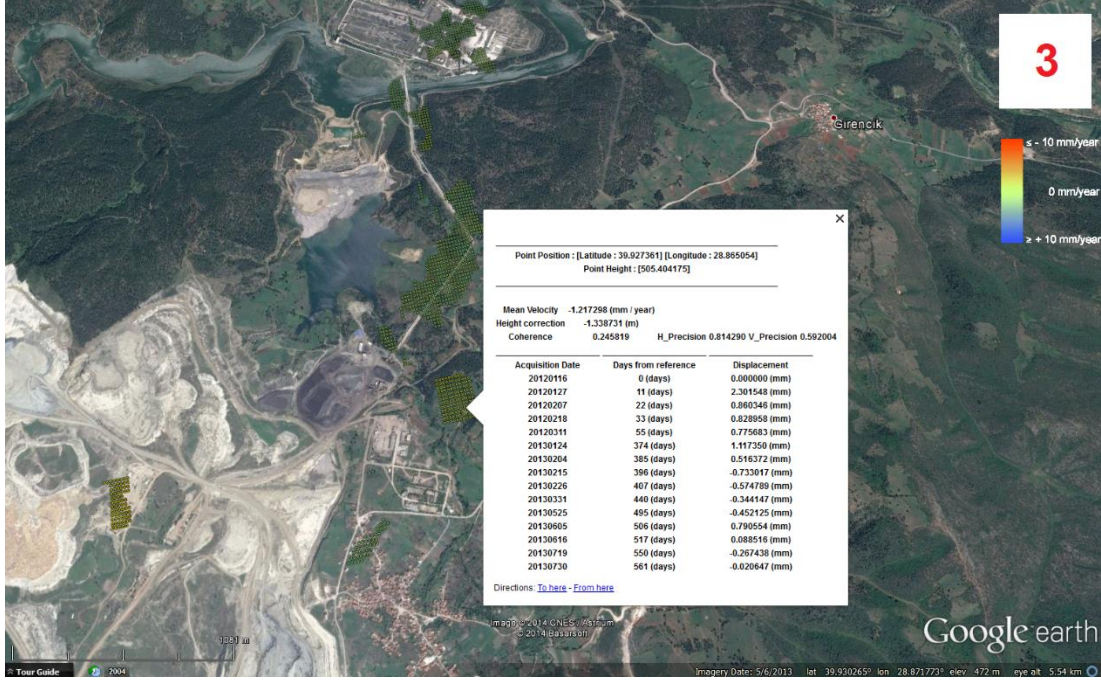


Şekil 4.24 : Yer değıştirme bilgileri (2 numaralı nokta).

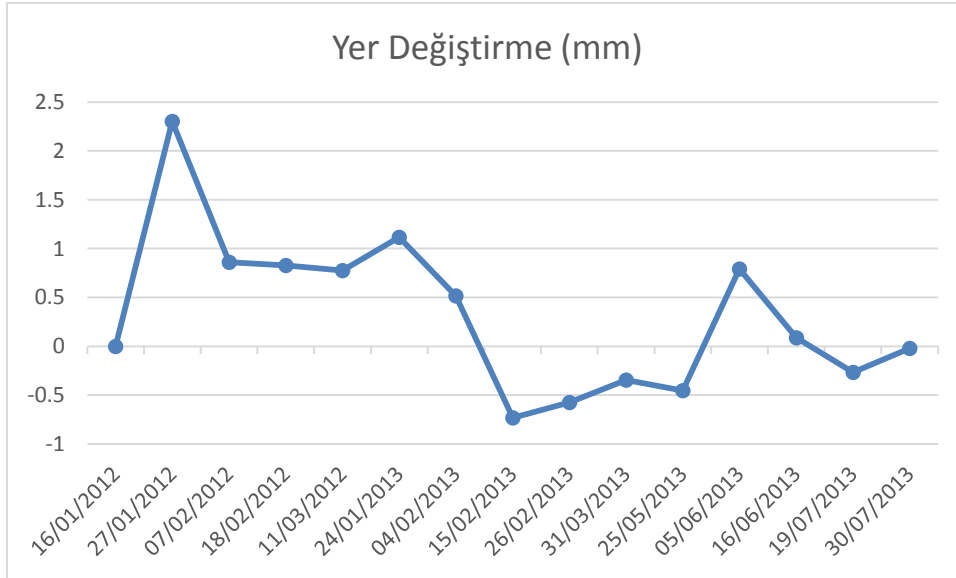


Şekil 4.25 : Yer değıştirme-zaman grafiğı (2 numaralı nokta).

Yer değıştirme hızı 3 numaralı nokta için (Boylam: 28.865064°, Enlem: 39.927361°, Yükseklik: 505.404175 m) ortalama yıllık -1.22 mm (uyduya bakış doğrultusunda, çökme yönlü) olarak hesaplanmıştır. Bu nokta için uyuşum değeri 0.245819'dur.



Şekil 4.26 : Yer değıştirme bilgileri (3 numaralı nokta).



Şekil 4.27 : Yer değıştirme-zaman grafiğı (3 numaralı nokta).

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Farksal interferometrinin uygulandığı ve SBAS algoritması kullanılarak yer değiştirme hızının belirlendiği bu çalışmada TerraSAR-X uydusuna ait SAR görüntülerinden ve ASTER sayısal yükseklik modeli verisinden yararlanılmıştır. Maden alanına ait interferogramlar oluşturulmuş ve günümüzde aktif üretimin yapıldığı Gümüşpınar sektörü civarındaki düşey yönlü yer değiştirmeler vektörel formatta üretilmiştir.

TerraSAR-X uydusu görüntü arşivinden inceleme sahasını kapsayacak şekilde 2012 ve 2013 yıllarını kapsayan yaklaşık 1.5 yıllık bir dönemden seçilen 15 adet SAR görüntüsüyle toplam 14 adet farksal interferogram ERDAS IMAGINE yazılımıyla oluşturulmuştur. Daha sonra bu analizden bağımsız olarak aynı görüntülerin ikili kombinasyonu kadar (105 adet) farksal interferogram ENVI SARscape yazılımıyla üretilmiş ve yer değiştirme hızını belirleyebilmek adına bu interferogramlar SBAS algoritmasını (Berardino ve diğ, 2002) kullanarak yine ENVI SARscape yazılımıyla değerlendirilmiştir. Her iki yazılımın çıktıları karşılaştırılmış ve sonuçların birbiriyle uyduğu belirlenmiştir.

Birincil seçilen SAR görüntüsüne zamansal olarak yaklaştıkça interferogram kalitesinin yükseldiği, uzaklaştıkça ise zamansal korelasyonsuzluktan dolayı interferogram kalitesinin düştüğü üretilen interferogramlarda görülmektedir. Özellikle 2013 tarihli görüntüler arasında uyuşumun daha yüksek olduğu; 20130215-20130124, 20130215-20130204, 20130215-20130226, 20130215-20130331 tarihli görüntü çiftleriyle oluşturulmuş interferogramlarda açıkça gözlemlenebilmektedir. Deformasyon gözlemlenememesinde yörüngesel, topografik ve atmosferik etkilere de değinmek gereklidir.

Yapılan çalışma sonucunda uygun SAR görüntüleri, uygun sayısal yükseklik modeli verisi ve uygun atmosferik koşullarda oluşturulacak interferogramların deformasyon çalışmalarında kullanılabileceği görülmüştür. Çalışmada kullanılan 15 adet SAR görüntüsü yaklaşık 1.5 yıllık zamansal dağılım göstermektedir. Bu süre zarfında uyuşumun en yüksek olduğu noktalarda en fazla 4-5 mm/yıl kadar çökme

hesaplanmıştır. Açık işletme tipi üretim yarıldığı madende yerinde yapılan gözlemler ve analiz sonuçları karşılaştırıldığında yüksek tehlike riski taşıyan bir bölgeye rastlanılamamıştır.

InSAR ile yapılacak çalışmalarda; görüntü eşleme, koordinatlandırma ve diğer aşamaların doğruluğunu arttırmak için, koordinatı bilinen noktalarda SAR görüntülerinde fark edilebilecek sabit yansıtıcıların yerleştirilmesi faydalı olacaktır.

Yer bilimleri ile bağlantılı olan araştırmalarda jeodezik çalışmaların sonunda elde edilen verilerin; jeolojik, jeoteknik ve jeofizik yöntemlerle toplanan veriler ile zenginleştirilmesi ve yorumlanması daha doğru bir analiz adına gereklidir. Yüksek lisans düzeyinde yapılmış bu araştırma sonucunda elde edilen bilgi birikimi yukarıda bahsedilen disiplinlerde yeniden yorumlanarak ve yeni yöntemler ışığında değerlendirilerek riskli bölgelerin haritalanmasında önemli bir rol oynaması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdikan, S., Arıkan, M., Balık Şanlı, F., Çakır, Z., Kemaldere, H.** (2013). Zonguldak Maden Alanlarında Meydana Gelen Yer Yüzeyi Hareketlerinin InSAR Zaman Serileri ile Belirlenmesi. *Harita Dergisi*, (149):1-6.
- Akabalı, A.** (2002). Stereo Yapay Açıklıklı Radar Görüntülerinden Otomatik Sayısal Yükseklik Modeli Üretilmesi ve Doğruluğunun Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Akoğlu, A. M.** (2008). Analysis and Modelling of the Earthquake Surface Deformation with SAR Interferometry: Case Studies from Turkey and the World, İ.T.Ü. Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Amelung, F., Galloway, D. L., Bell, J. W., Zebker, H. A., Lacznia, R. J.** (1999). Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation, *Geology*, v. 27, no. 6, p. 483–486.
- Amelung, F., Oppenheimer, C., Segall, P., Zebker, H.** (2000). Ground deformation near Gada ‘Ale volcano, Afar, observed by radar interferometry, *Geophysical Research Letters*, 27(19):3093-3097.
- Askne, J., Dammert, P., Ulander, L. M. H., Smith, G.** (1997). C-band repeat-pass interferometric SAR observations of forest, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 35, 25–35.
- Baek, J., Kim, S. W., Park, H. J., Jung, H. S., Kim, K. D., Kim, J. W.** (2008). Analysis of ground subsidence in coal mining area using SAR interferometry, *Geosciences Journal*, 12 (3):277-284.
- Balık Şanlı, F.** (2004). Elektro-optik ve SAR Uydu Görüntüleri ile Arazi Bitki Örtüsünün Belirlenmesi, *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Bamler, R. and Hartl, P.** (1998). Synthetic Aperture Radar Interferometry, *Inverse Problems*, 14, R1-54.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari R., Sansosti, E.** (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on Small Baseline differential SAR Interferometry, *IEEE Aerospace and Electronic*, Vol. 40, No. 11.
- Bos, A. G., Usai, S., Spakman, W.** (2004). A joint analysis of GPS motions and InSAR to infer the coseismic surface deformation of the Izmit, Turkey earthquake, *Geophys. J. Int.*, 158 (3), 849-863.
- Briole, P., Massonnet, D., Delacourt, C.** (1997). Postruptive deformation associated with the 1986-87 and 1989 lava flows of Etna detected by radar interferometry, *Geophysical Research Letters*, 24, 37-40.

- Cakir, Z., Chabalier, J. B., Armijo, R., Meyer, B., Barka, A., Peltzer, G.** (2003). Coseismic and early postseismic slip associated with the 1999 Izmit earthquake (Turkey), from SAR interferometry and tectonic field observations, *Geophys. J. Int.*, 155, 93-110.
- Carnec, C., Delacourt, C.** (2000). Three years of mining subsidence monitored by SAR interferometry, near Gardanne, France. *Journal Of Applied Geophysics*, 43 (1) :43-54.
- Castaneda, C., Gutierrez, F., Manunta, M., Galve, J. P.** (2009). DInSAR measurements of ground deformation by sinkholes, mining subsidence, and landslides, Ebro River, Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34 (11) :1562-1574.
- Chen, C. W., Zebker, H. A.** (2000). Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms, *Journal of the Optical Society of America*, 17, 401-414.
- Choi, J. K., Won J. S., Lee S., Kim S. W., Kim, K. D., Jung, H. S.** (2011). Integration of a subsidence model and SAR interferometry for a coalmine subsidence hazard map in Taebaek, Korea. *International Journal of Remote Sensing*, 32:23,8161-8181.
- Curlender, J. C., McDonough, R. N.** (1991). Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing, *John Wiley & Sons, Inc., Press*, New York, USA.
- 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, İstanbul.
- Çakır Z., Barka A. A., Chabalier, J., Armijo, R. Meyer, B.** (2003). Kinematics of the November 12, 1999 (Mw=7.2) Düzce Earthquake Deduced from SAR Interferometry, *Turkish J. Earth Sci.*, 12, 105-118.
- Delacourt, C., Briole, P., Acheche J.** (1998). Tropospheric Correction of SAR Interferograms with Strong Topography. Application to Etna, *Geophysical Research Letters*, 25, 2849-2852.
- Elitok, A.** (2014). Maden ocağındaki ölü sayısı 299'a yükseldi, *Cihan Haber Ajansı*, İstanbul, Türkiye.
- Feigl, K. L., Sarti, F., Vadon, H., Durand, P., Mclusky, S., Ergintav, S., Burgmann, R., Rigo, A., Massonnet, D. Reilinger, R.** (2002). Estimating slip distribution for the Izmit mainshock from coseismic GPS, ERS-1, RADARSAT and SPOT measurements, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, n.1, 138-160.
- Franceschetti, G., Lanari, R.** (1999). Synthetic Aperture Radar Processing, *CRC Press*, New York, USA.
- Fruneau, F., Achache, J., Delacourt, C.** (1996). Observation and modelling of the Saint-Etienne-de-Tinée landslide using SAR interferometry, *Tectonophysics*, 265 (3), 181-190.

- Gabriel, A. K., Goldstein, R. M.** (1988). Crossed Orbit Interferometry: theory and experimental results from SIR-B, *Int.J.Remote Sensing*, 9(5), 857-872.
- Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., Zebker, H.** (1989). Mapping Small Elevation Changes over Large Areas: Differential Radar Interferometry, *Journal of Geophysical Research*, 94, 9183-9191.
- Gens, R., van Genderen, J. L.** (1996). SAR interferometry: Issues, Techniques, Applications, *International Journal of Remote Sensing*, 17, 1803–1835.
- Ghiglia, D. C., Romero, L. A.** (1994). Robust Two-Dimensional Weighted and Unweighted Phase Unwrapping Using Fast Transforms and Iterative Methods, *Journal of the Optical Society of America A*, 11, 107-117.
- Goldstein, R. M., Enelhardt, H., Kamp, B., Frolisch, R. M.** (1993). Satellite Radar Interferometry for Monitoring Ice Sheet Motion: Application to an Antarctic Ice Stream, *Science*, 141, 1171-1172.
- Goldstein, R. M., Werner C. L.** (1998). Radar Interferogram Filtering for Geophysical Applications, *Geophysical Research Letters*, 25 (21), 4035-4038.
- Gourmelen, N., Amelung, F., Casu, F., Manzo, M. and Lanari, R.** (2007). Mining-related ground deformation in Crescent Valley, Nevada: Implications for sparse GPS networks, *Geophysical Research Letters*, 34 (9).
- Gupta, R. P.** (2003). Remote Sensing Geology, *Springer-Verlag*, Berlin, Germany.
- Haarpainter, J., Kergomard, C., Gascard, J. C., Haugan, P. M.** (2000). Sea Ice Dynamics Observed by ERS-2 SAR Imagery and ARGOS Buoys in Storfjorden, Svalbard, *Proceedings of IGARS'00*, Hawaii, USA, 467-469.
- Hanssen, R. F.** (2001). Radar Interferometry Data Interpretation and Error Analysis, ISBN: 9780792369455, *Kluwer Academic Publishers*, Dordrecht, Netherlands.
- Holley, R., Wadge, G., Zhu, M.** (2005). InSAR Measurement of Volcanic Deformation at Etna - Interferogram Atmospheric Correction Methods and The Role of Forward Atmospheric Modelling, *RSPSoc poster presentation*, September 7-9.
- Hussin, Y.** (2005). Advanced RS, Image Processing and GIS for NRM, *Lecture at ITC*, Enschede, Holland.
- Klees, R., Massonet, D.** (1999). Deformation Measurements Using SAR Interferometry: Potential and Limitations, *Geologie en Mijnbouw*, 77, 161-176.
- Lesniak, A.L., Porzycka, S.** (2012). Temporal Analysis of Small, Long-period Ground Deformations within Selected Mining Areas in South Poland, *Remote Sensing Workshop*, 3-5 September 2012, Paris, France.
- Lillesand, Thomas M., Kiefer, Ralph W., Chipman, Jonathan W.** (2008). Remote Sensing and Image Interpretation, 6th Edition, ISBN: 9780470052457, *John Wiley & Sons, Inc.*, USA.

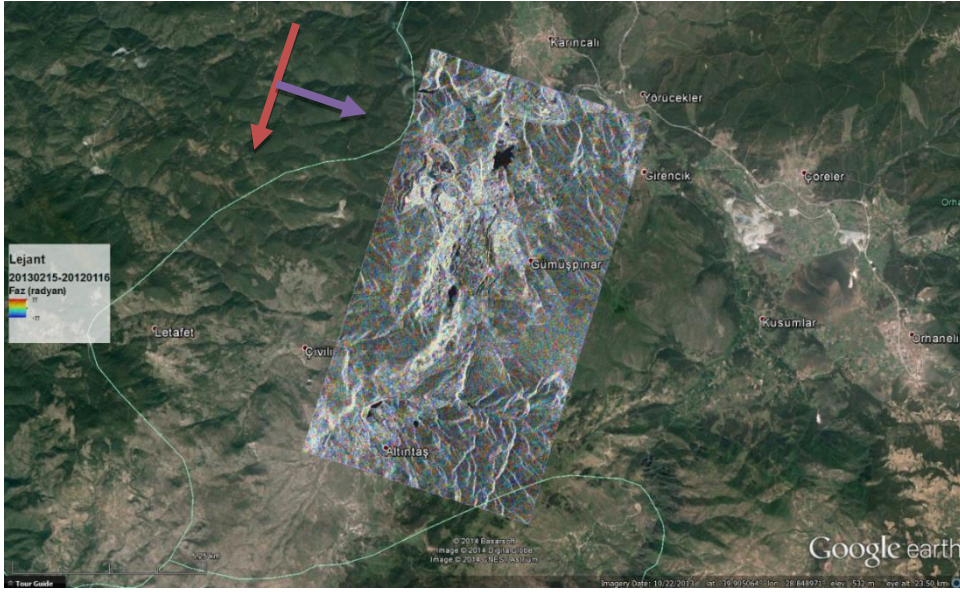
- Lu, Z., Fatland, R., Wyss, M., Li, S., Eichelberger, J., Freymueller, J.** (1997). Deformation of New Trident volcano measured by ERS-1 SAR interferometry, Katmai National Park, Alaska, *Geophysical Research Letters*, 24, no. 6, 695-698.
- Lu, Z., Mann, D., Freymueller, J., Meyer, D.** (2000). Synthetic aperture radar interferometry of Okmok volcano, Alaska: Radar observations, *Journal of Geophysical Research*, 105(B5), 10791-10806.
- Lyons, S. N.** (2002). Investigations of Fault Creep in Southern California Using Interferometric Synthetic Aperture Radar and GPS, *PhD Thesis*, University of California, San Diego, USA.
- Mann, D.** (2002). Deformation of Alaskan Volcanoes Measured Using SAR Interferometry and GPS, University of Alaska Fairbanks, *PhD Thesis*, Fairbanks, Alaska, USA.
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., Rabaute, T.** (1993). The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry, *Nature*, 364, 567-570.
- Massonnet, D., Briole, P., Arnaud, A.** (1995). Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry, *Nature*, 375, 567-570.
- Massonnet, D., Feigl, K.** (1995). Discrimination of Geophysical Phenomena in Satellite Radar Interferograms, *Geophysical Research Letters*, 22, 1537-1540.
- Massonnet, D., Feigl, K. L.** (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface, *Reviews of Geophysics*, 36, 441-500.
- Mohr, J. J., Madsen, S. N.** (1996). Multi-pass interferometry for studies of glacier dynamics, *Proceedings of the 'Fringe 96' Workshop on ERS SAR Interferometry*, Zurich, Switzerland, Vol.1, 345-352.
- Ng, A. H., Chang H. C., Ge, L., Rizos, C., Omura, M.** (2009). Assessment of radar interferometry performance for ground subsidence monitoring due to underground mining. *Earth Planets Space*, 61:733-745.
- Olmsted, C.** (1993). Alaska SAR Facility Scientific SAR User's Guide, Fairbanks, Alaska, USA. Alındığı tarih: 17.09.2014, adres: <http://nsidc.org/data/radarsat/pdfs/SciSARUserGuide.pdf>
- Oveisgharan, S.** (2007). Estimating Snow Accumulation from InSAR Correlation Observations, Stanford Universitesi, *PhD Thesis*, Stanford, California, USA.
- Popiolek, E., Hejmanowski, R., Krawczyk, A., Perski, Z.** (2002). Application of Satellite Radar Interferometry to the Examination of the Areas of Mining Exploitation, *Surface Mining*, 54, No.1, 74-82.
- Raucoules, D., Le Mouelic, S., Carnec, C., Guise, Y.** (2008). Monitoring post-mining subsidence in the Nord-Pas-de-Calais coal basin (France): comparison between interferometric SAR results and levelling, *Geocarto International*, 23:4, 287-295.

- Refice A., Bovenga, F., Wasowski, J. ve Guerriero, L.** (2000). Use of InSAR Data for Landslide Monitoring: A Case Study from Southern Italy, *IGARSS 2000*, Hawaii. 3p.
- Reilinger, R., Ergintav, S., Burgmann, R., McClusky, S., Lenk, O., Barka, A., Gürkan, O., Hearn, E., Feigl K. L., Çakmak, R., Aktug, B., Ozener, H., Toksoz, M. N.** (2000). Coseismic and Postseismic Fault Slip for the 17 August 1999, M=7.5, Izmit, Turkey Earthquake, *Science*, 289, 1519-1524.
- Ristau, J. P.** (1999). Applications of Synthetic Aperture Radar Interferometry in the Study of the Nahanni Earthquake Region, *Master of Science (M. Sc.) in Geophysics*, Department of Geological Sciences University of Manitoba, Winnipeg – Manitoba, Canada.
- Rodriguez, E. ve Martin, J. M.** (1992). Theory and design of interferometric synthetic aperture radars, *IEEE Proc. of Radar and Signal Processing*, 139, no. 2, 147-159.
- Roth, A., Eineder, M., Schättler, B.** (2003). TerraSAR-X: A New Perspective for Applications Requiring High Resolution Spaceborne SAR Data, *2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop*, Berlin, Germany.
- Rott, H., Siegel, A.** (1999). Analysis of Mass Movements in Alpine Terrain by Means of SAR Interferometry, *Proc. of IGARSS'99*, IEEE Cat.Nr. 99CH36293, 1933 - 1936.
- Ryder I., Parsons, B. E., Funning, G.** (2007). Postseismic motion following the 1997 Manyi (Tibet) earthquake: InSAR observations and modeling, *Geophys. J. Int.*, 169, 1009-1027.
- Saygılı, A.** (2008). SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) Verilerinden Elde Edilen Sayısal Yükseklik Modellerinin Doğruluğunun İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Schwäbisch, M., Lehner, S., Winkel, N.** (1997). Coastline extraction using ERS SAR interferometry, *Proceedings of the third ERS Symposium*, 1049-1060.
- Singhroy V., Mattar, K. ve Gray, L.** (1998). Landslide characterization in Canada using interferometric SAR and combined SAR and TM images. *Advances in Space Research*, 2(3), 465-476.
- Solaas, G.A.** (1994). ERS-1 Interferometric Baseline Algorithm Verification, *ESA Technical Report*, ES-TN-DPE-OM-GS02 version 1.0, ESA.
- Sun, J., Shen, Z., Xu, X., Bürgmann, R.** (2008). Synthetic Normal Faulting of the 9 January 2008 Nima (Tibet) Earthquake from Conventional and Along-Track SAR Interferometry, *Geophysical Research Letters*, 35, L22308.
- Şengün, Y. S.** (2008). GPS ve InSAR Ölçülerini Birlikte Kullanarak İzmit Depreminde Oluşan Deformasyonun Modellenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, *Doktora Tezi*, İTÜ, İstanbul.
- Tao, L., Jingnan, L., Mingsheng, L., Shaojun, K., Xu, L.** (2004). Monitoring city subsidence by D-InSAR in Tianjin area, *IEEE International*, 5, 3333-3336.

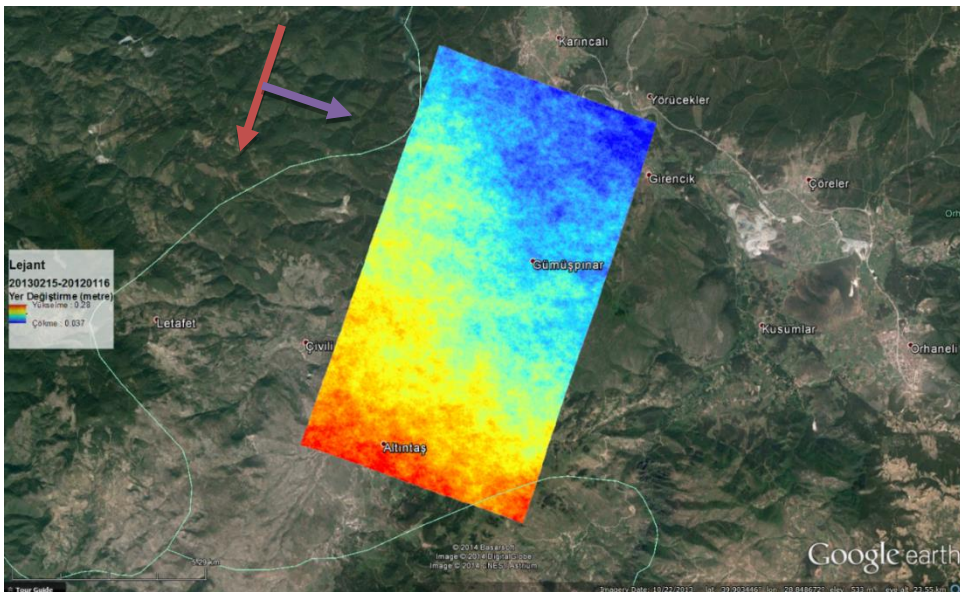
- Wegmüller, U.** (1997). Soil moisture monitoring with ERS SAR interferometry, ESA special publication-414, *Proceedings of 3rd ERS symposium*, 47-52.
- Wegmüller, U., Strozzi, T., Werner, C., Wiesmann, A., Benecke, N., Spreckels, V.** (2000). Monitoring of mining-induced surface deformation in the Ruhregebeit (Germany), *Proceedings of IGARSS'00*, Hawaii, USA, 2771-2773.
- Wright, P. A., Stow, R. J.** (1997). Detection and measurement of mining subsidence by SAR interferometry, *IEEE Colloquium on Radar Interferometry* (Ref. No.1997/153), 30 (6):1-6.
- Wright, P., Stow, R.** (1999). Detecting mining subsidence from space, *International Journal of Remote Sensing*, 20(6), 1183-1188.
- Wright, T.** (2000). Crustal Deformation in Turkey from Synthetic Aperture Radar Interferometry, *PhD. Thesis*, University of Oxford, United Kingdom.
- Wright, T., Parsons, B., Fielding, E.** (2001). Measurement of interseismic strain accumulation across the North Anatolian Fault by satellite radar interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, 28(10), 2117-2120.
- Yerin, Ü. O.** (2006). Orhaneli Kömürlerinin Mineralojisi, Petrografisi ve Element İçeriği, Bursa-Türkiye, *Yüksek Lisans Tezi*, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- Zebker, H. A., Goldstein, R. M.** (1986). Topographic Mapping from Interferometric Synthetic Aperture Radar Observation, *Journal of Geophysical Research*, 91, 4993-4999.
- Zebker, H. A., Villasenor, J.** (1992). Decorrelation in Interferometric Radar Echoes, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30, 950-959.
- Zebker, H. A., Rosen, P. A., Goldstein, R. M., Gabriel, A., Werner, C. L.** (1994). On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake, *J. Geophys. Res.*, 99, 19,617-19,643.
- Zebker, H.** (2000). Studying the Earth with Interferometric Radar, *Computing in Science and Engineering*, 02, no. 3, pp. 52-60.
- URL-1** < <http://www.acikbilim.com>>, alındığı tarih: 27.08.2014.
- URL-2** < <http://www.radartutorial.eu>>, alındığı tarih: 28.08.2014.
- URL-3** < <http://www.nrcan.gc.ca>>, alındığı tarih: 05.09.2014.
- URL-4** < <http://www.astrium-geo.com>>, alındığı tarih: 09.09.2014.
- URL-5** < <http://comet.nerc.ac.uk>>, alındığı tarih: 14.09.2014.
- URL-6** < <http://www.cgg.com>>, alındığı tarih: 14.09.2014.
- URL-7** < <http://www.inf.ufsc.br>>, alındığı tarih: 14.09.2014.
- URL-8** < <https://vldb.gsi.go.jp>>, alındığı tarih: 16.09.2014.

EKLER

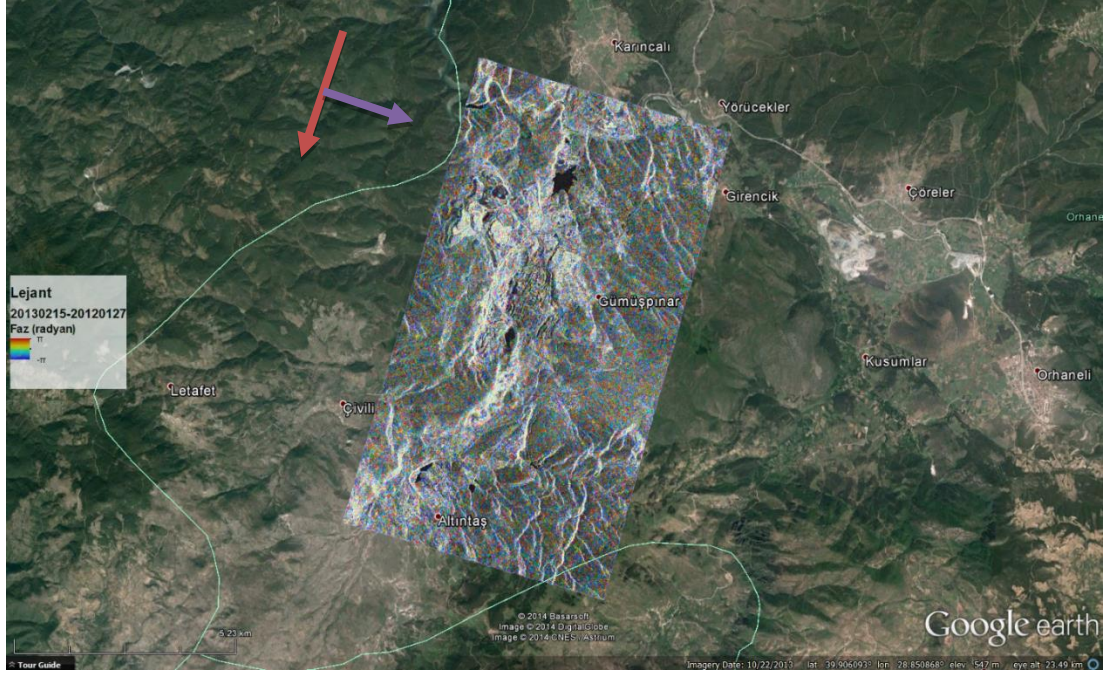
Ek A: Farksal İnterferometri Sonuçları



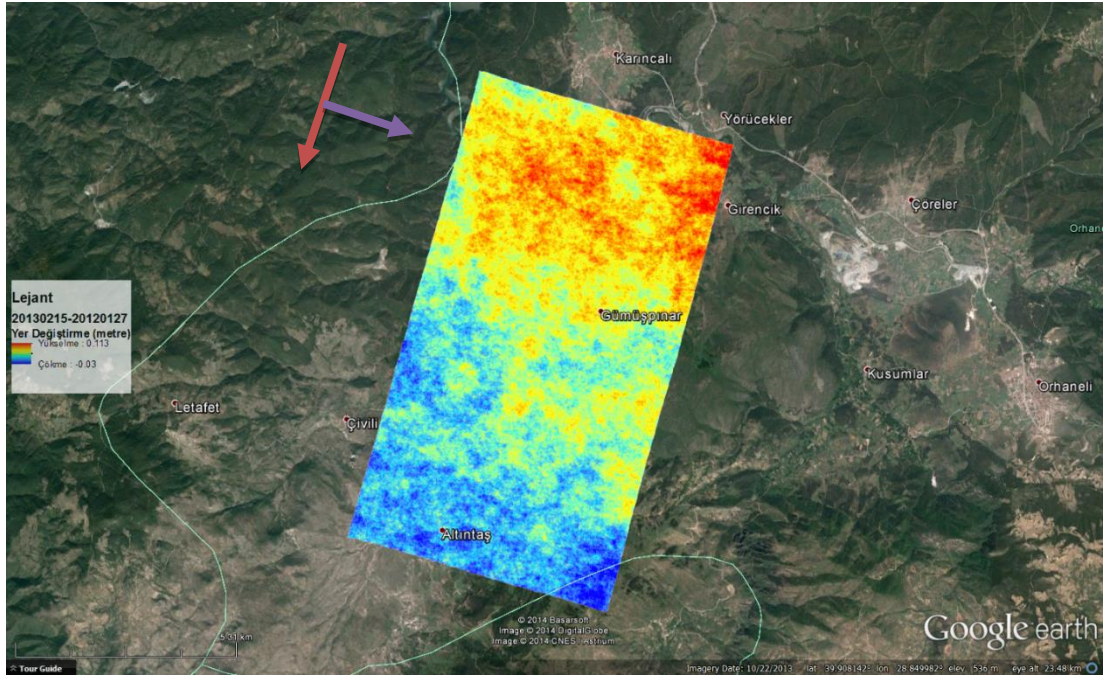
Şekil A.1: 20130215-20120116 farksal interferogram.



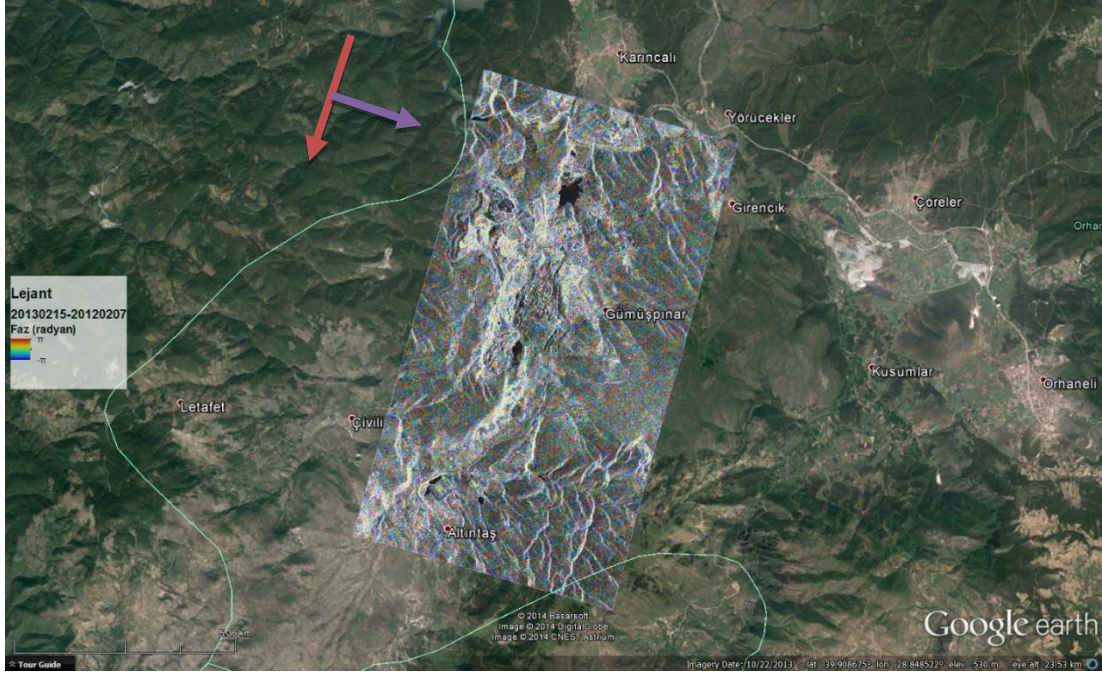
Şekil A.2: 20130215-20120116 yer değiştirme haritası.



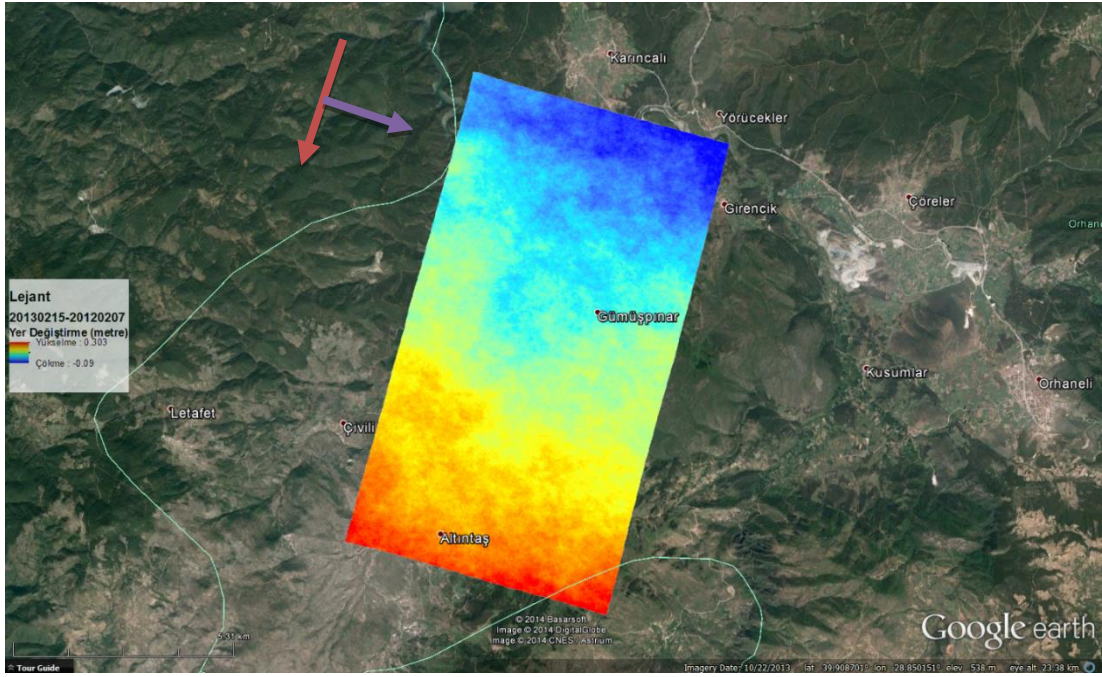
Şekil A.3: 20130215-20120127 farksal interferogram.



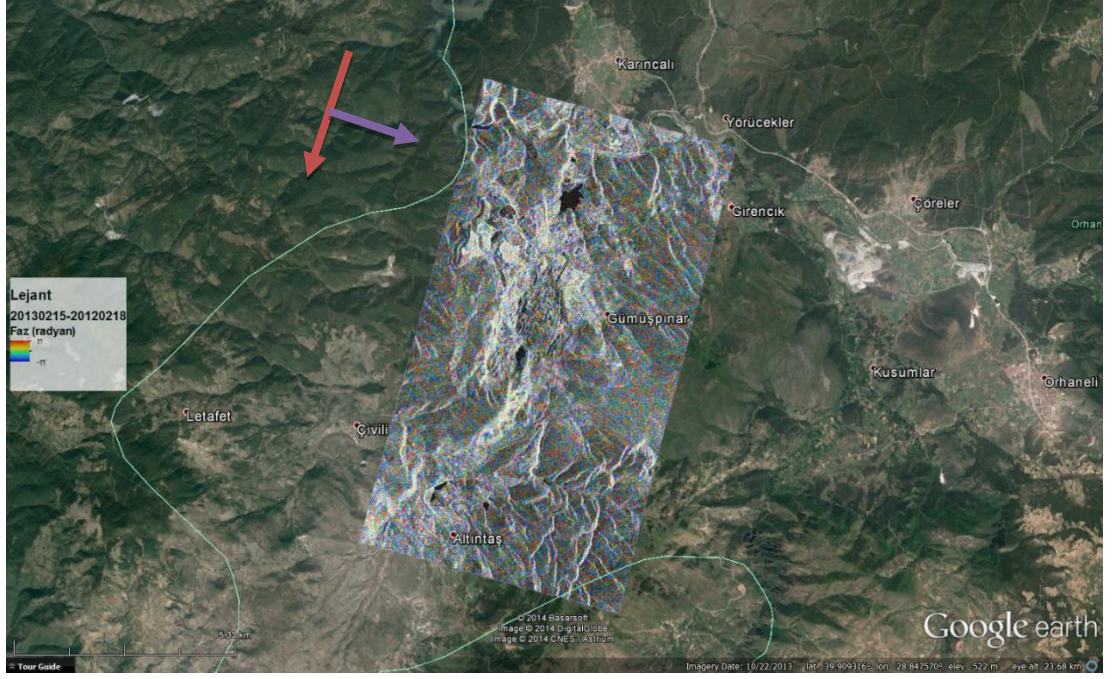
Şekil A.4: 20130215-20120127 yer değiştirme haritası.



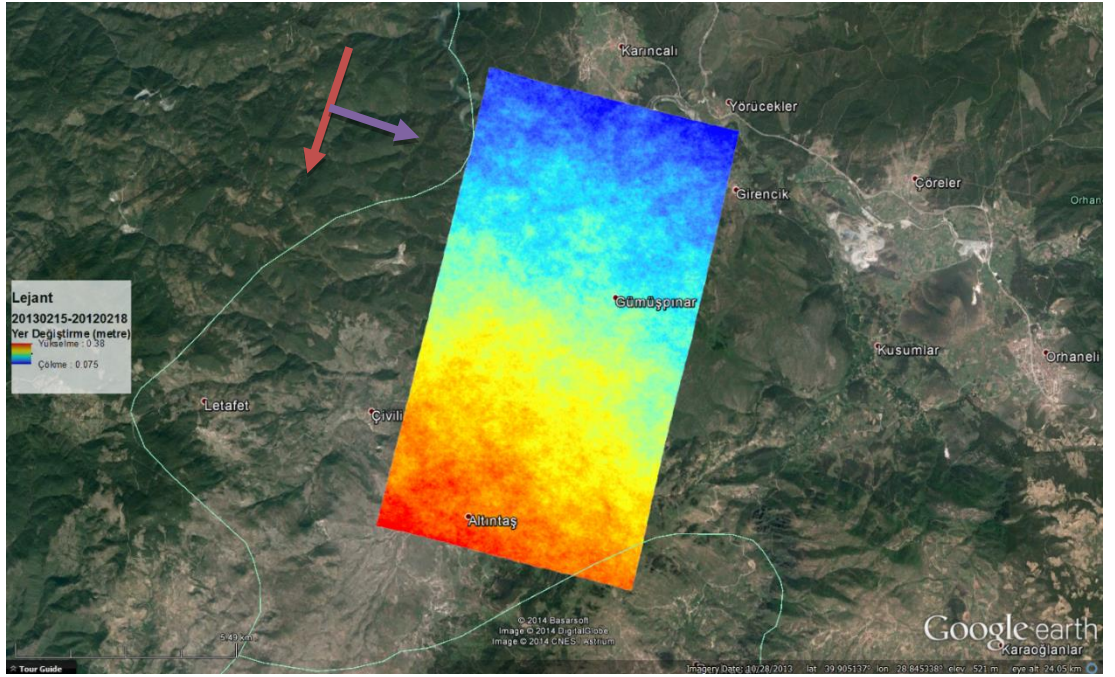
Şekil A.5: 20130215-20120207 farksal interferogram.



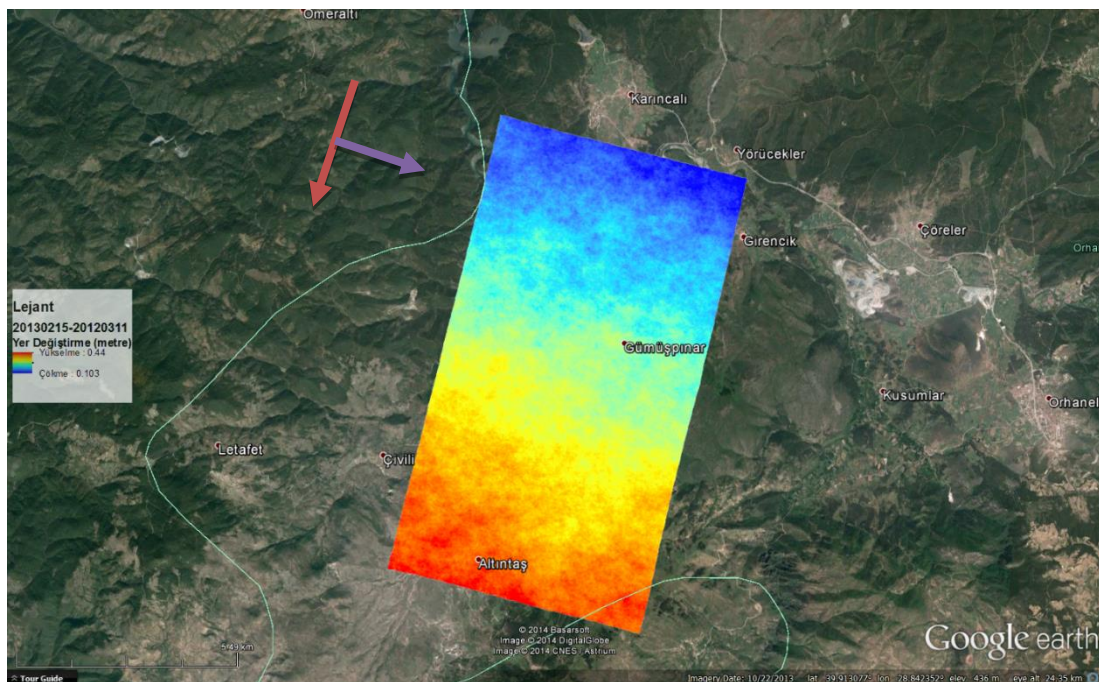
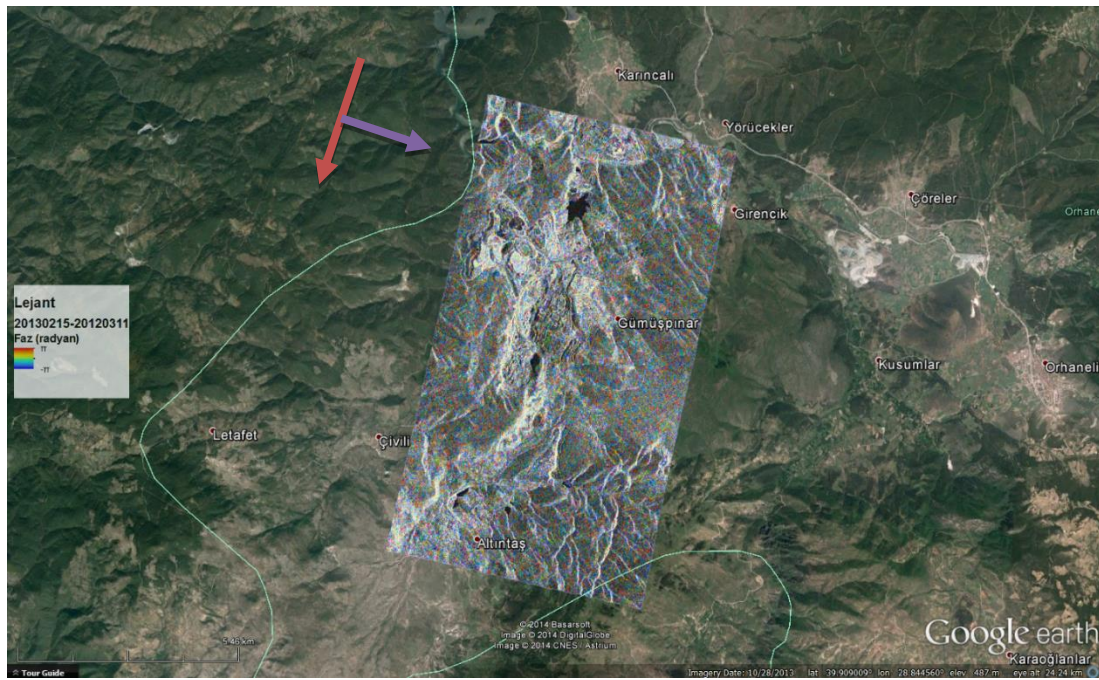
Şekil A.6: 20130215-20120207 yer değişirme haritası.

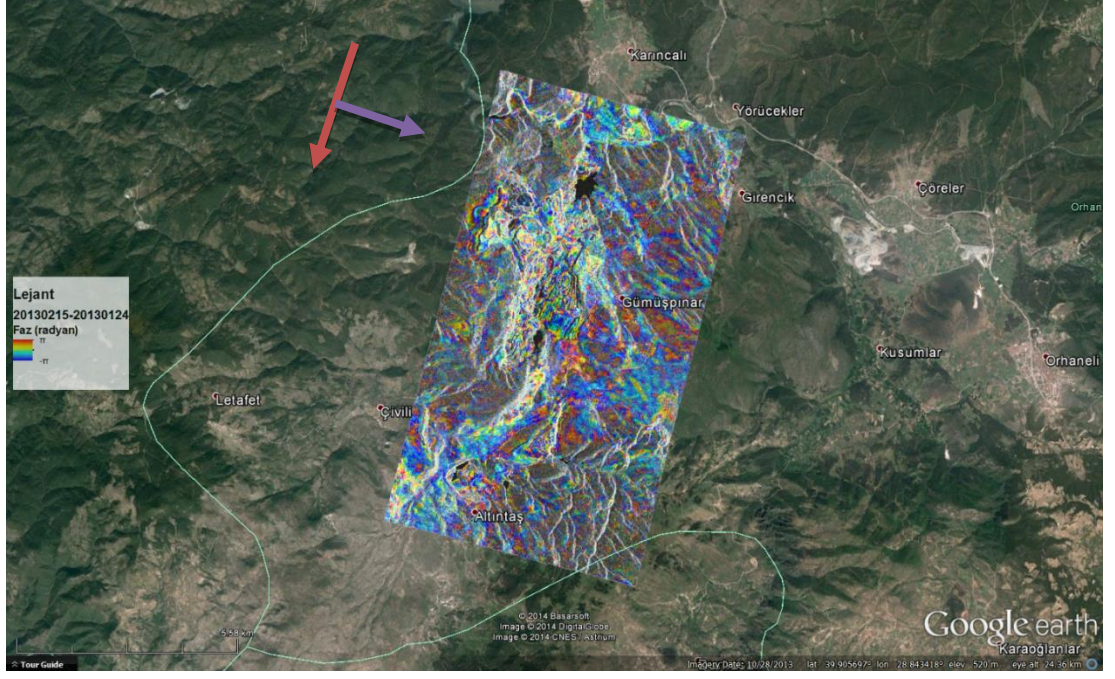


Şekil A.7: 20130215-20120218 farksal interferogram.

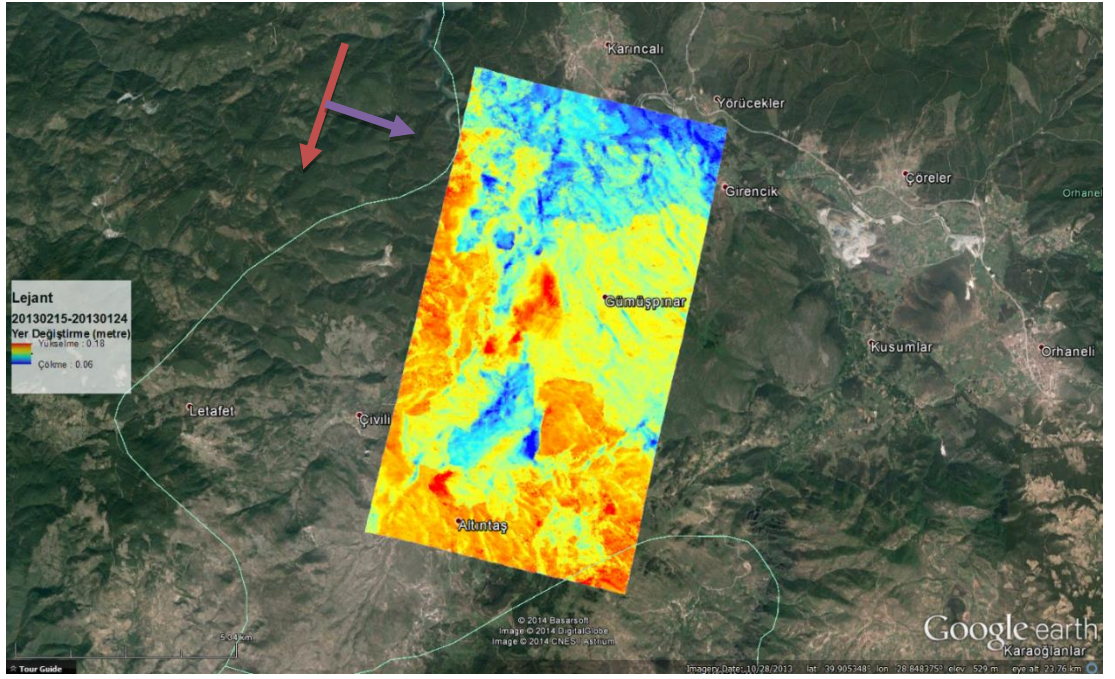


Şekil A.8: 20130215-20120218 yer değiştirme haritası.

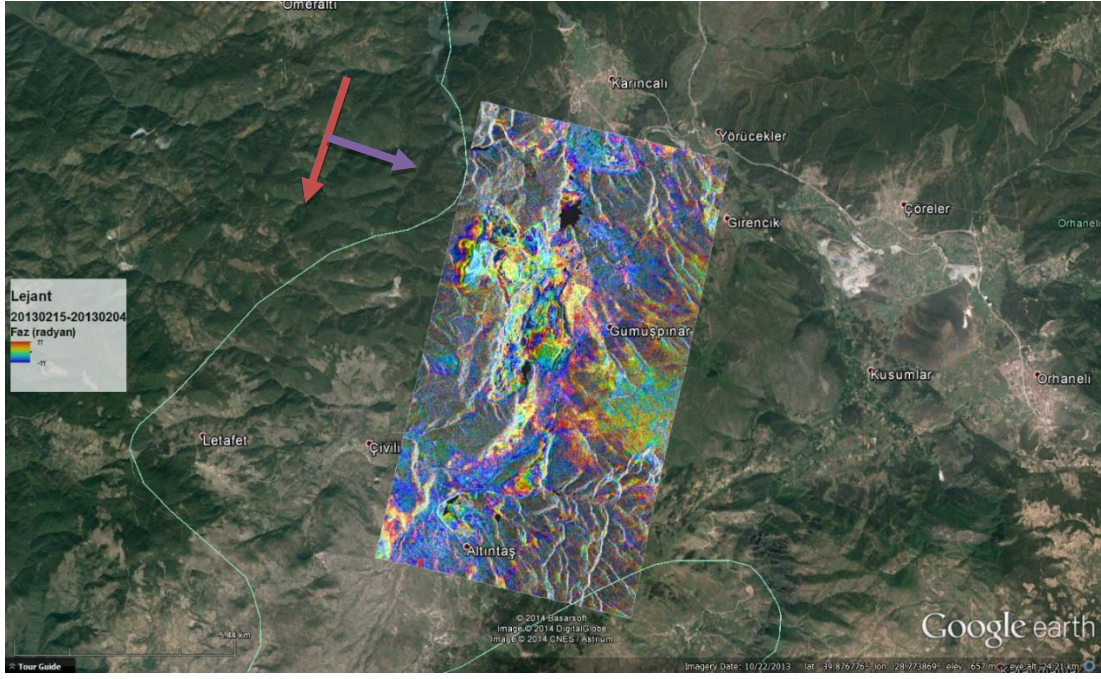




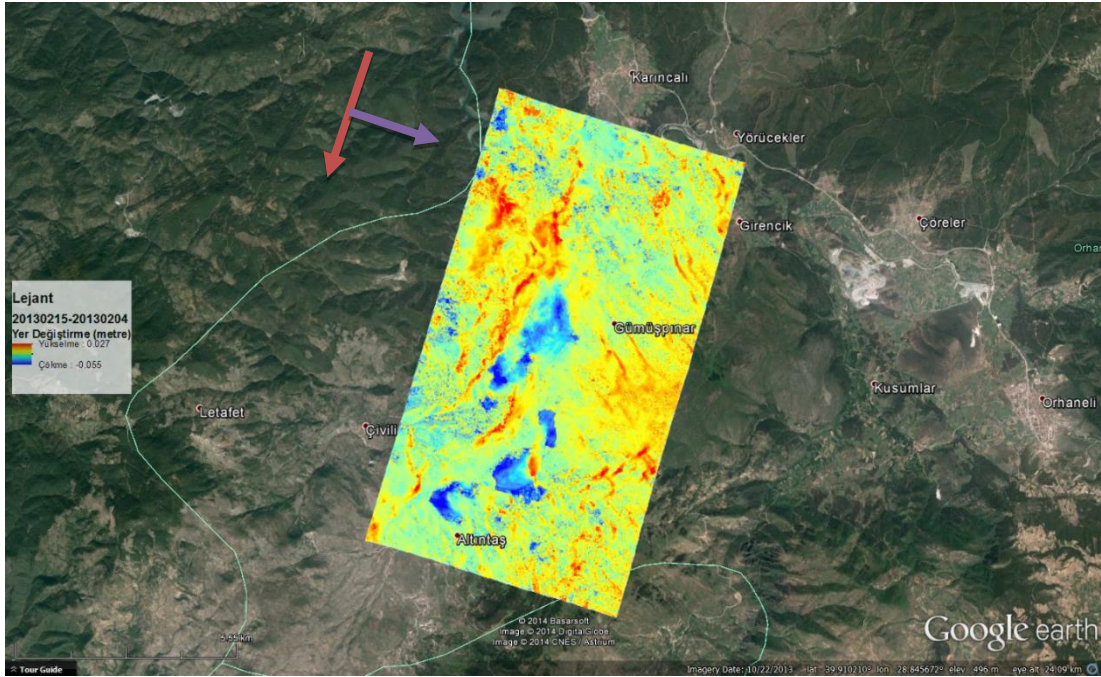
Şekil A.11: 20130215-20130124 farksal interferogram.



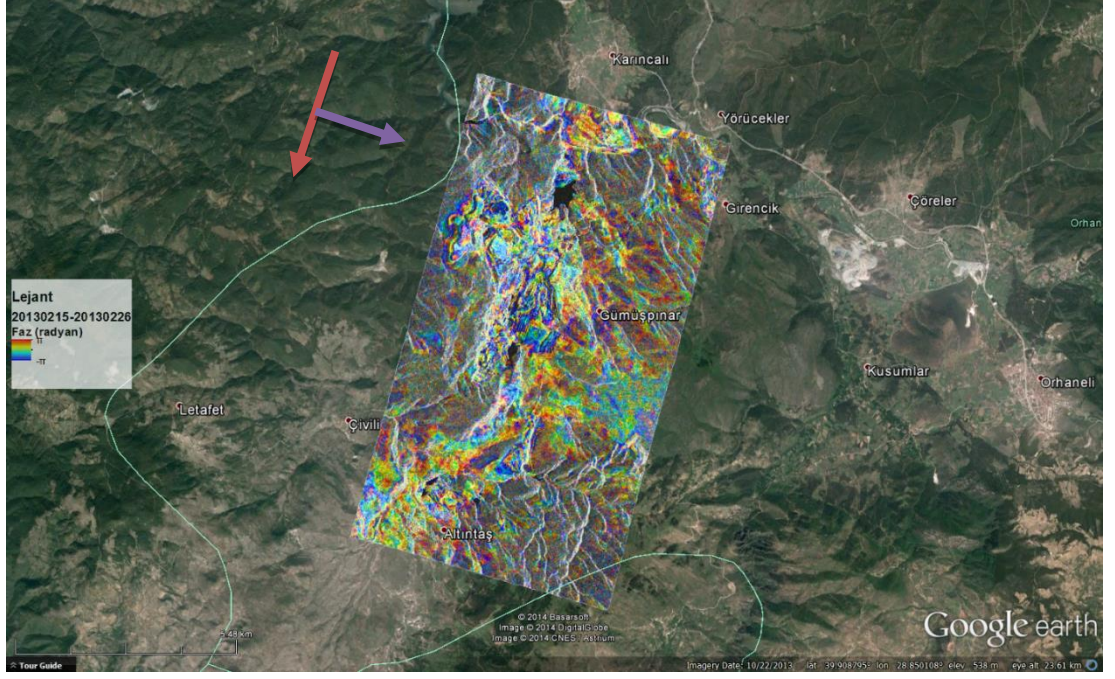
Şekil A.12: 20130215-20130124 yer değiştirme haritası.



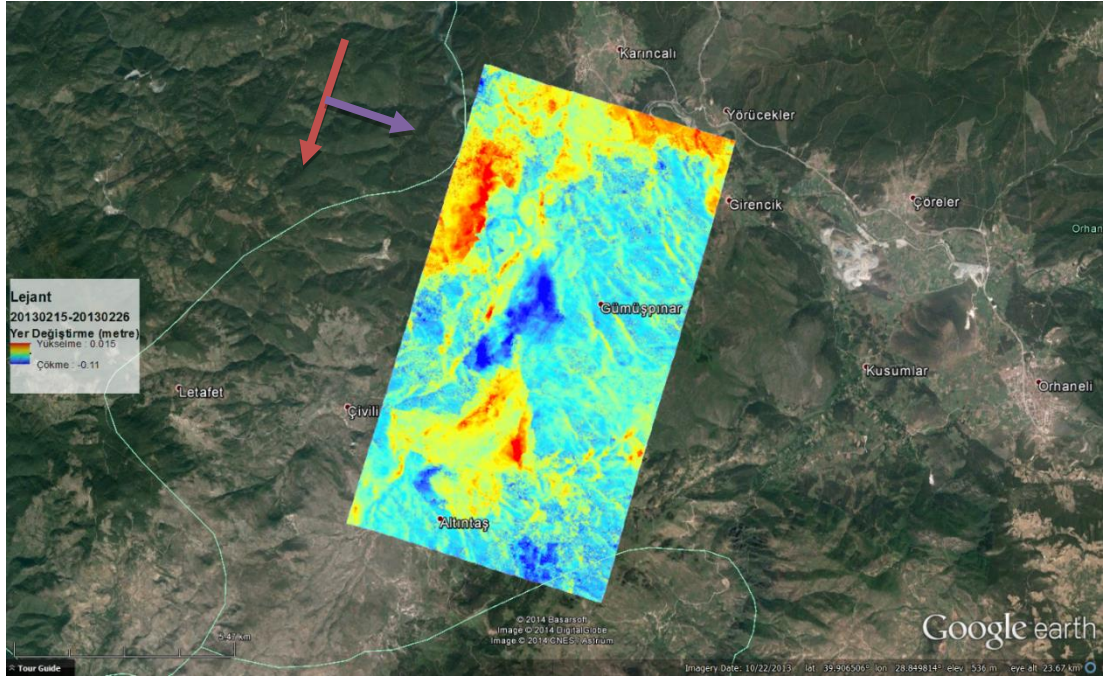
Şekil A.13: 20130215-20130204 farksal interferogram.



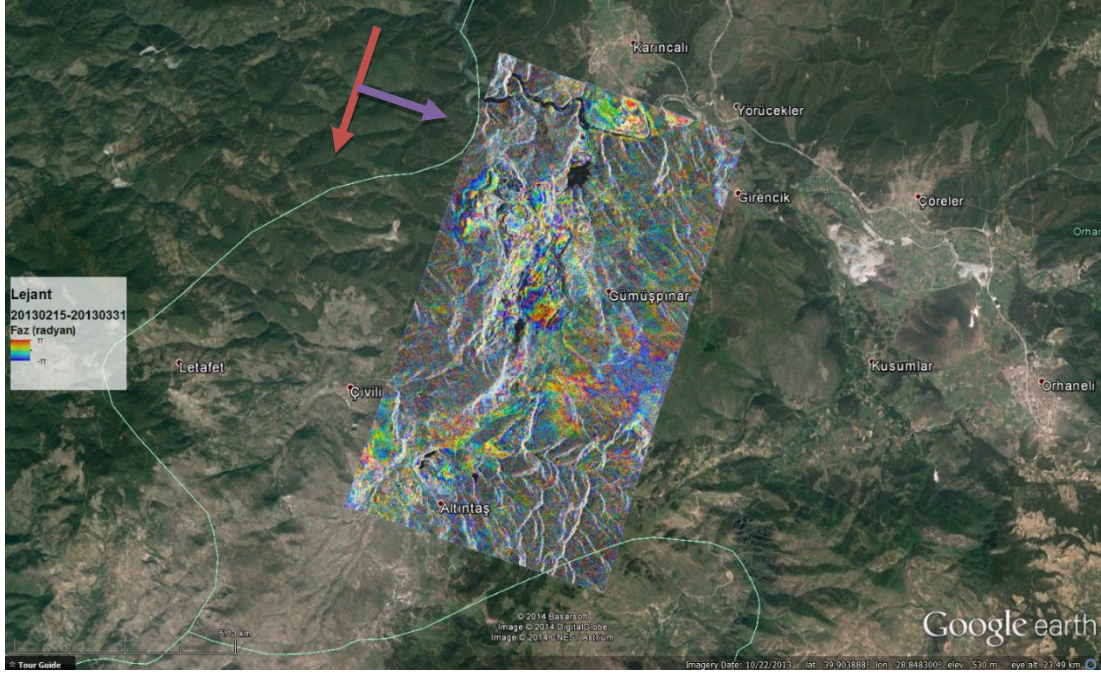
Şekil A.14: 20130215-20130204 yer değiştirme haritası.



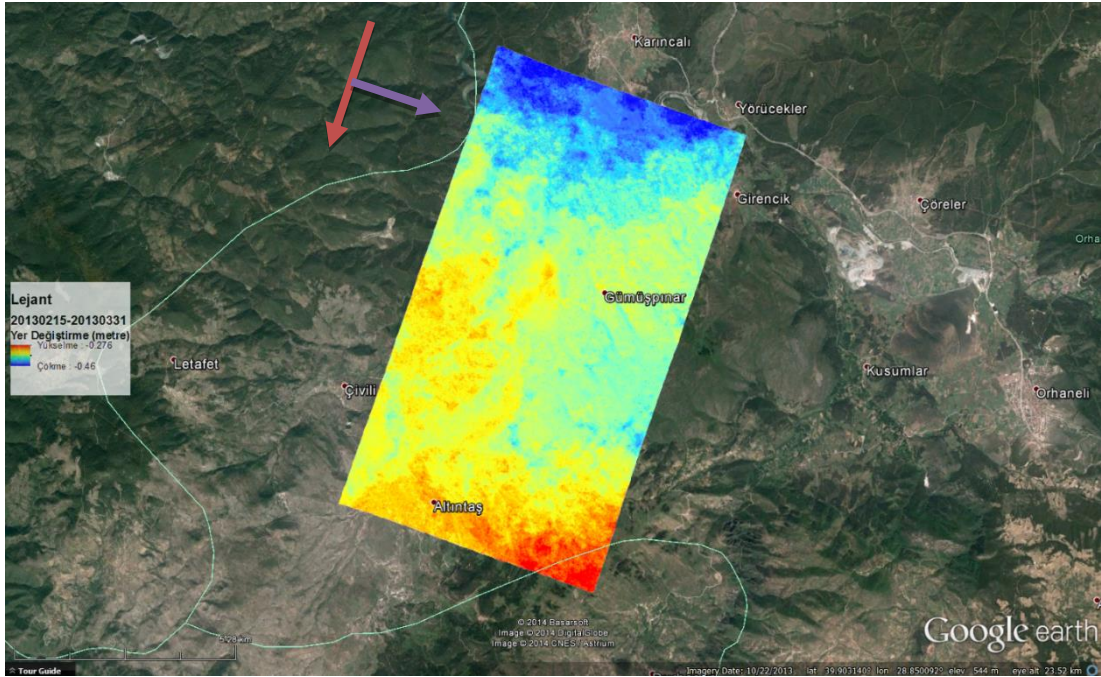
Şekil A.15: 20130215-20130226 farksal interferogram.



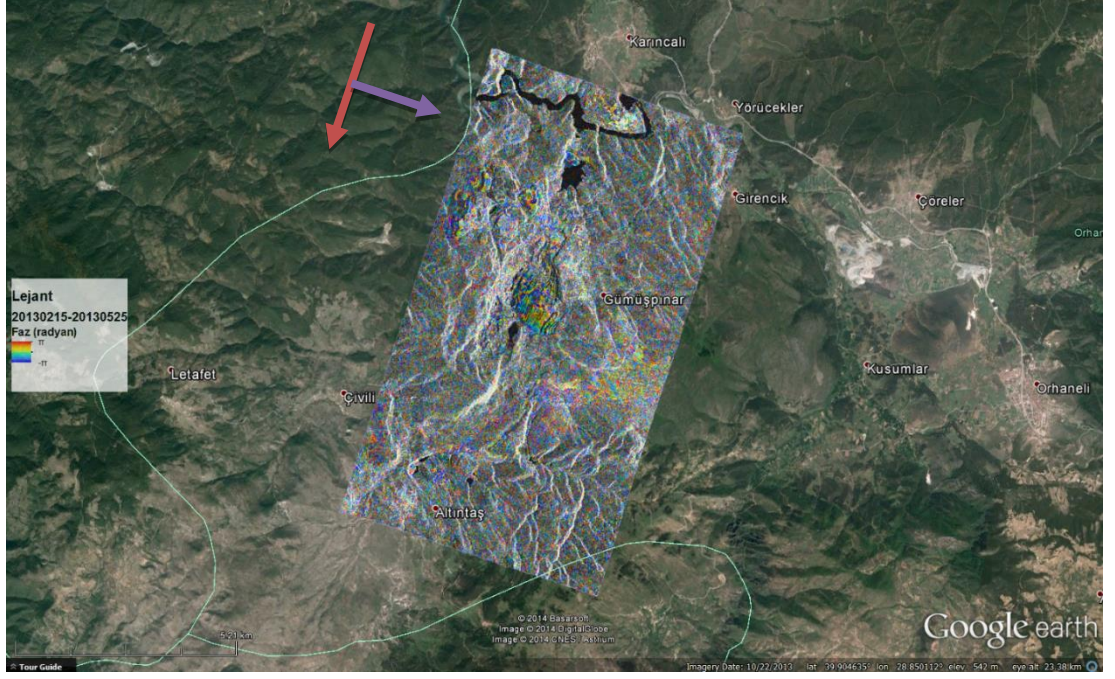
Şekil A.16: 20130215-20130226 yer değişimi haritası.



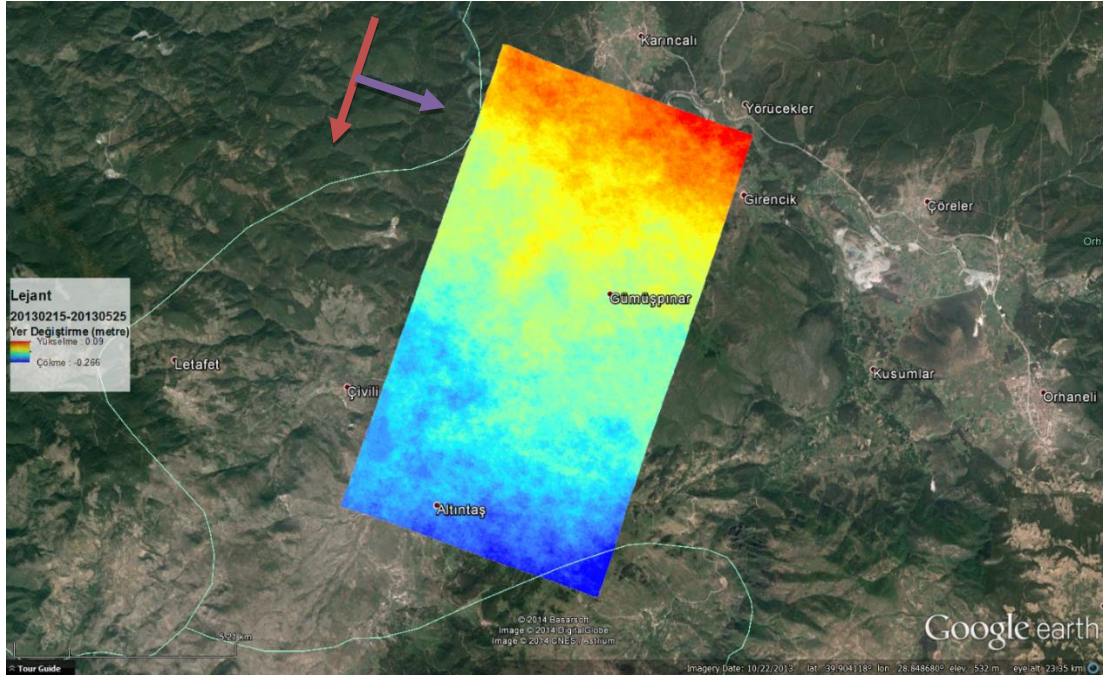
Şekil A.17: 20130215-20130331 farksal interferogram.



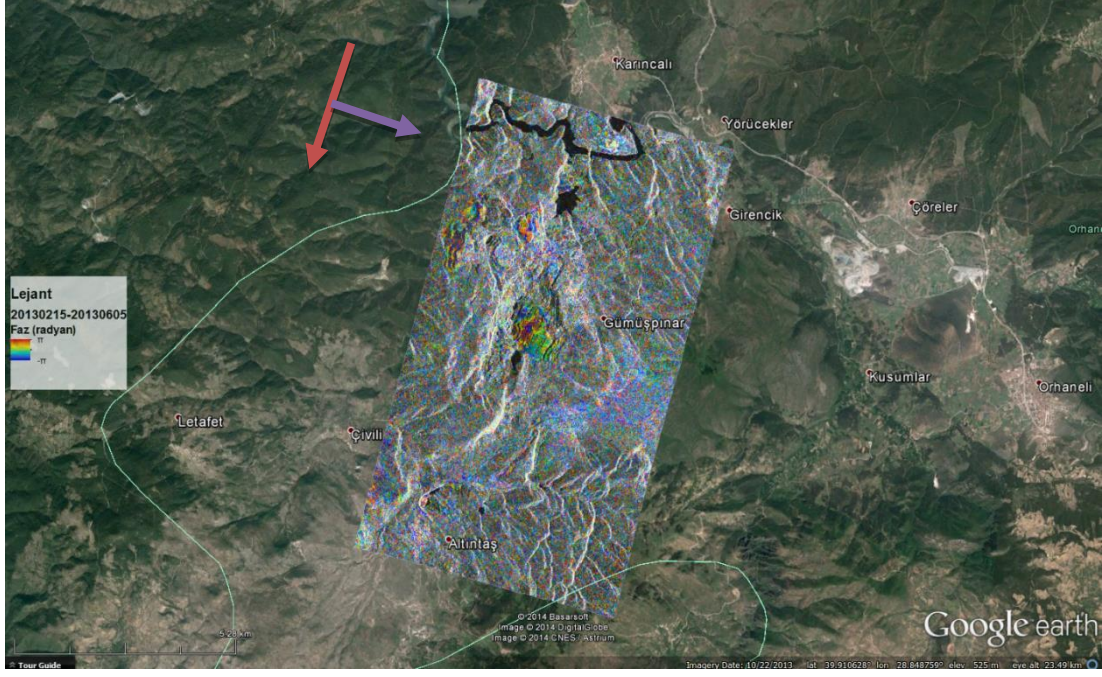
Şekil A.18: 20130215-20130331 yer değişirme haritası.



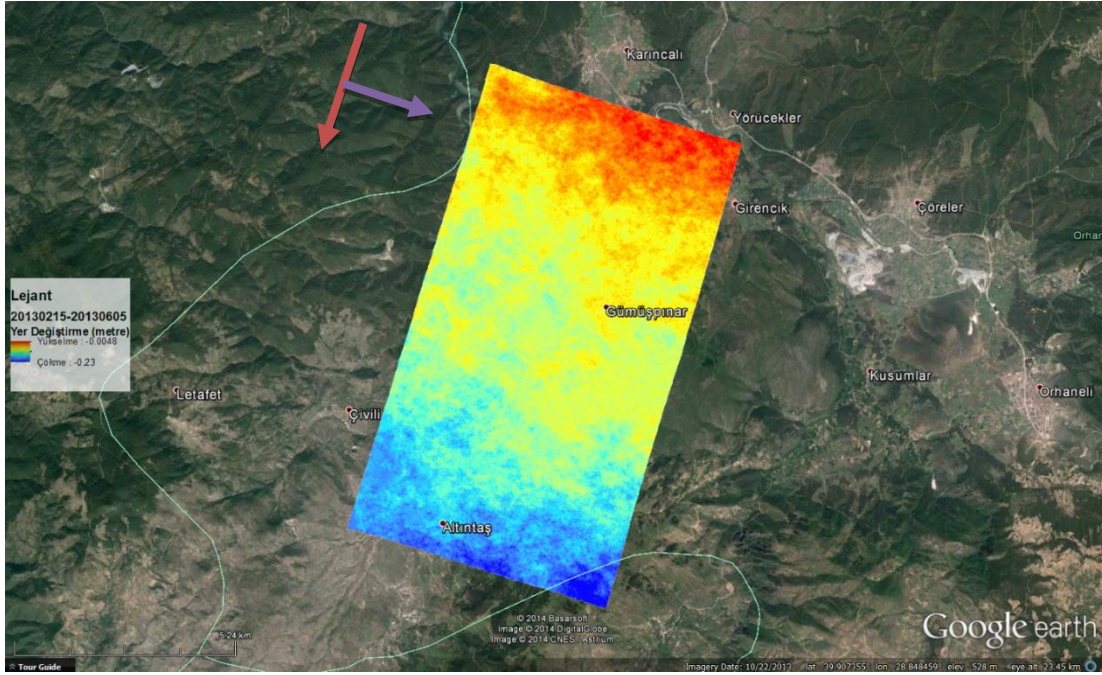
Şekil A.19: 20130215-20130525 farksal interferogram.



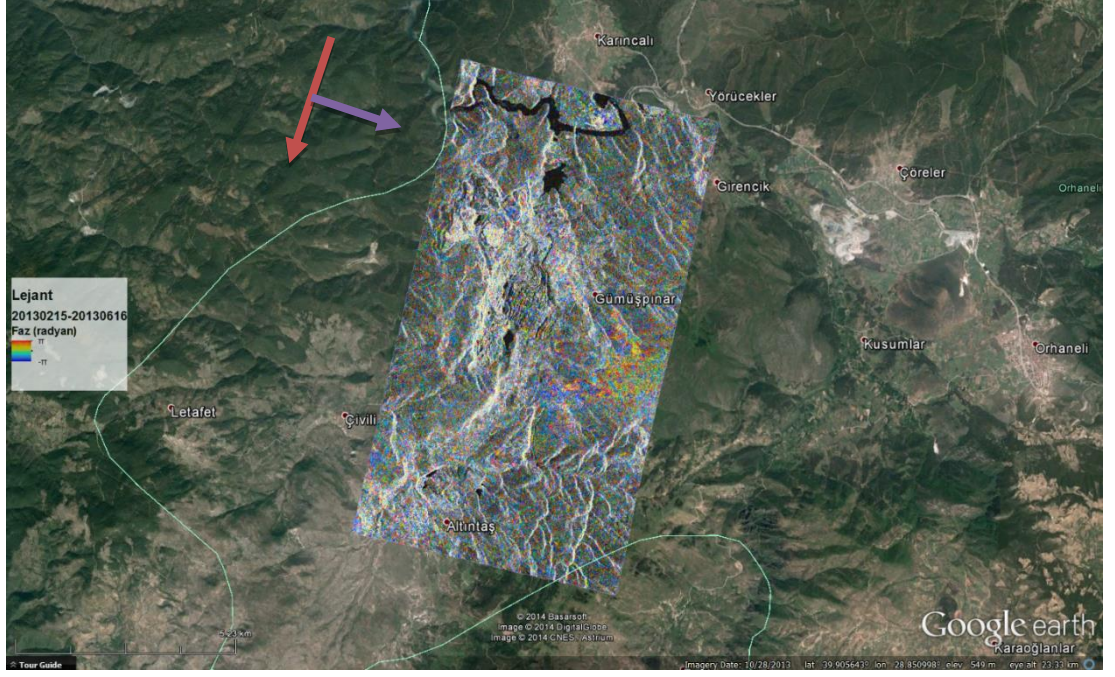
Şekil A.20: 20130215-20130525 yer değıştirme haritası.



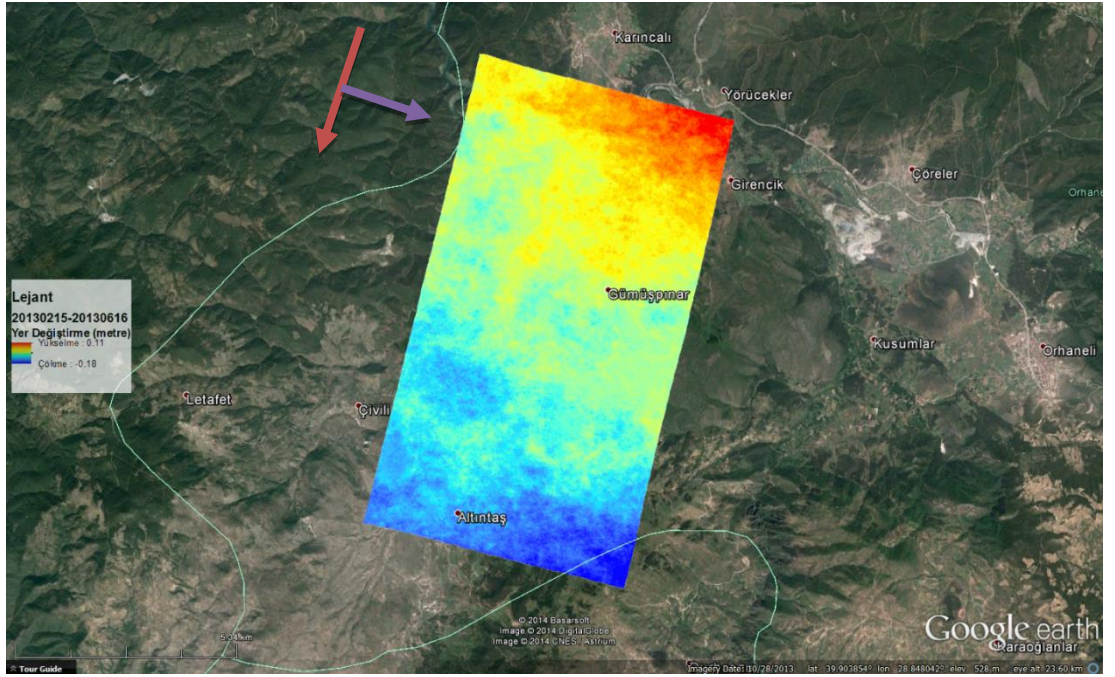
Şekil A.21: 20130215-20130605 farksal interferogram.



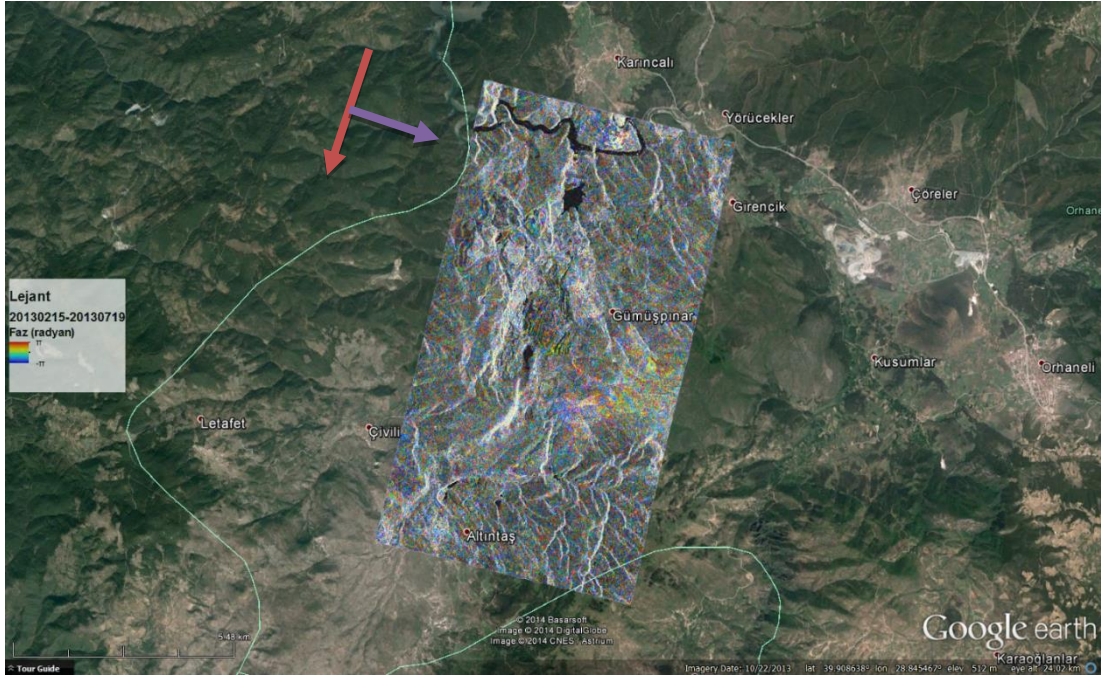
Şekil A.22: 20130215-20130605 yer değiştirme haritası.



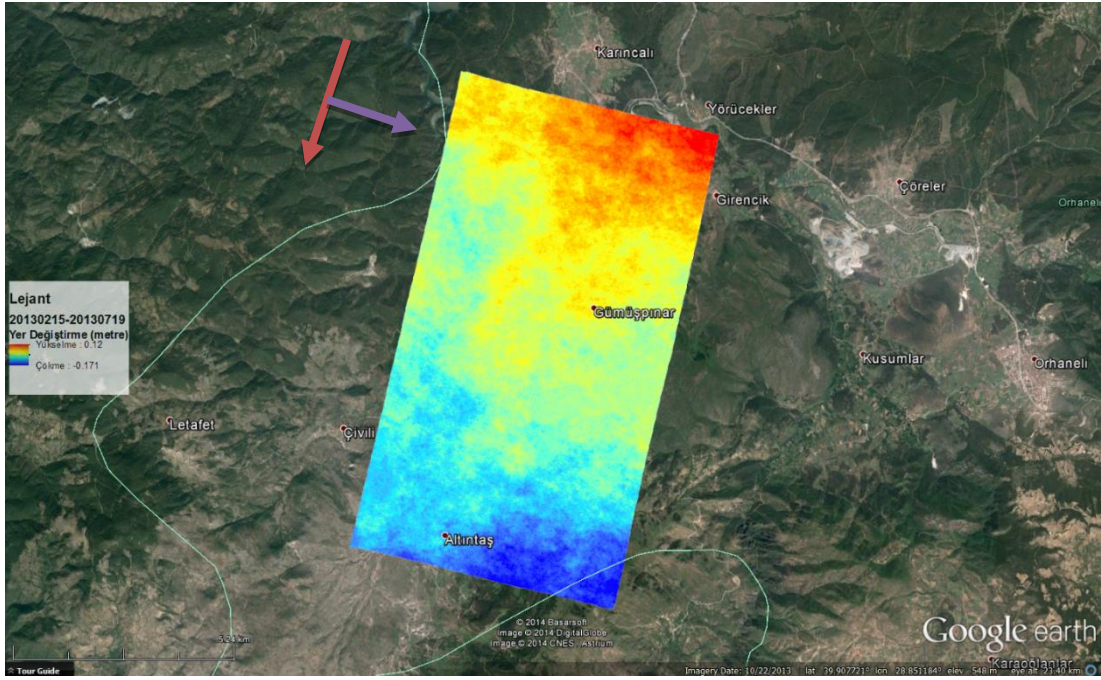
Şekil A.23: 20130215-20130616 farksal interferogram.



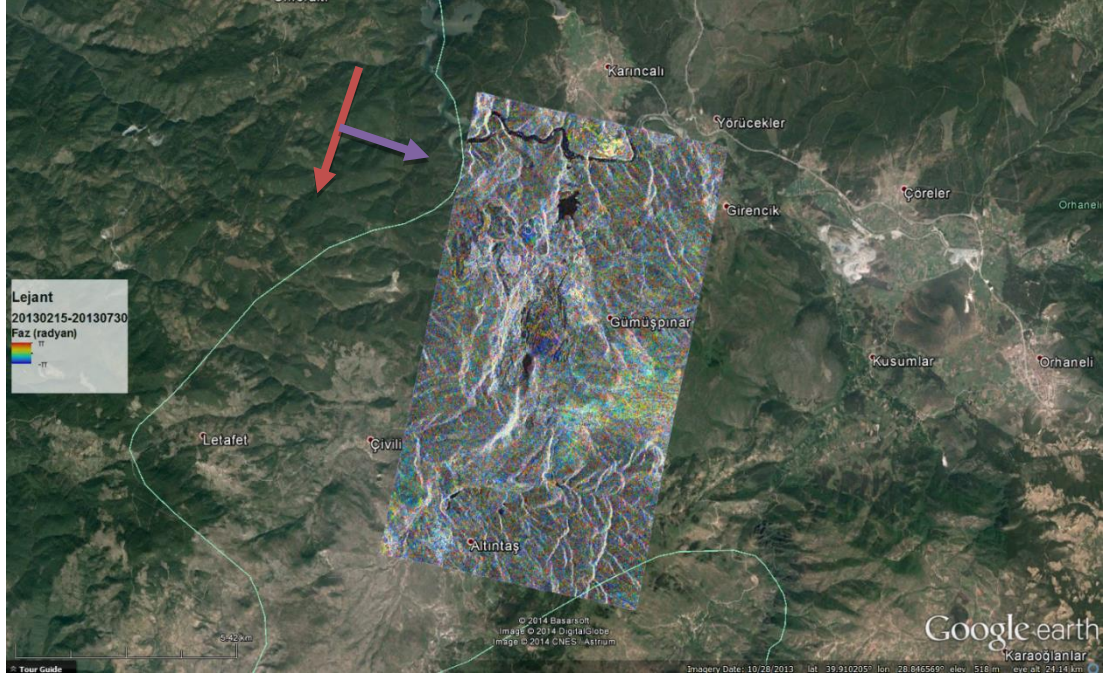
Şekil A.24: 20130215-20130616 yer değıştirme haritası.



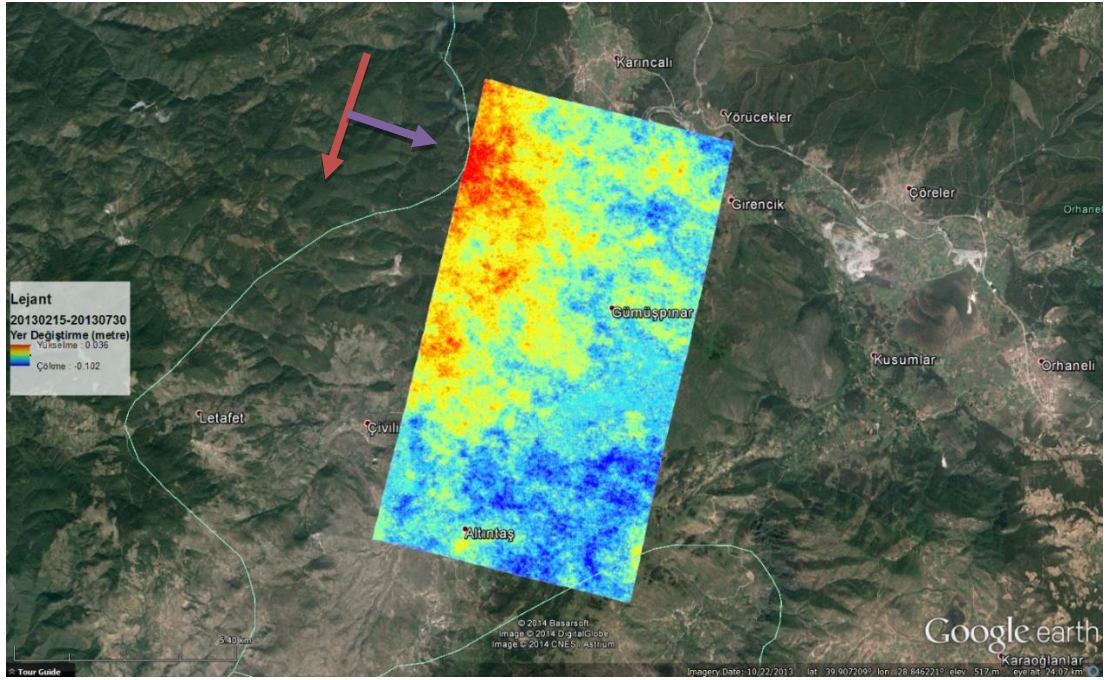
Şekil A.25: 20130215-20130719 farksal interferogram.



Şekil A.26: 20130215-20130719 yer değiştirme haritası.



Şekil A.27: 20130215-20130730 farksal interferogram.



Şekil A.28: 20130215-20130730 yer değiştirme haritası.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Serhat YILMAZTÜRK
Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 4 Temmuz 1986
E-Posta: serhat@yilmazturk.info
Lisans: Jeoloji Mühendisliği (2009) / İstanbul Üniversitesi

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

- GRM İletişim ve Bilişim (Mayıs 2013 – Devam)
- NİK Sistem (Ocak 2013 – Mayıs 2013)
- Ekinoks Harita Yazılım (Ekim 2011 – Kasım 2012)
- ESRI Turkey (Haziran 2011 – Ağustos 2011)

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

- Akçay O., Akyılmaz O., Tuncdemir H., Guclu E., Yilmazturk S., Monitoring and evaluation of the continuous surface changes on Orhaneli open-pit mine, 5. TerraSAR-X / 4. TanDEM-X Science Team Meeting, 10-14 June 2013, DLR – Oberpfaffenhofen.
- H.Tunçdemir, Ö.Akçay, O.Akyılmaz, E.Güçlü, S.Yılmaztürk, M.Motagh, "A Methodology for Deformation Control with InSAR: Orhaneli Open Pit Mine Case Study", 04/2013, IMCET, Antalya/Turkey, 4/16/2013 - 4/19/2013.