



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



YAPAY AÇIKLIKLI RADAR
İNTERFEROMETRİ (INSAR) TEKNİĞİ VE
DEFORMASYONLAR ÜZERİNE UYGULAMA
ALANLARI

Furkan GÜRBÜZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harita Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Haziran-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Furkan Gürbüz tarafından hazırlanan ‘‘YAPAY AÇIKLIKLI RADAR İNTERFEROMETRİ (INSAR) TEKNİĞİ VE DEFORMASYONLAR ÜZERİNE UYGULAMA ALANLARI’’ adlı tez çalışması 28/06/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Harita Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri yeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Cevat İNAL

.....

Danışman

Prof. Dr. Ayhan CEYLAN

.....

ye

Doç. Dr. Salih ALÇAY

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Furkan GÜRBÜZ

Tarih: 28.06.2022

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAPAY AÇIKLIKLI RADAR İNTERFEROMETRİ (INSAR) TEKNİĞİ VE DEFORMASYONLAR ÜZERİNE UYGULAMA ALANLARI

Furkan GÜRBÜZ

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Ayhan CEYLAN

2022, 57 Sayfa

**Jüri
Prof. Dr. Ayhan CEYLAN
Prof. Dr. Cevat İNAL
Doç. Dr. Salih ALÇAY**

Yapay Açıklıklı Radar İnterferometri (InSAR) Tekniği, uzaktan algılamada kullanılan jeodezik bir radar tekniğidir ve bu teknik yersel ölçümlere ihtiyaç duymaz. InSAR, uydu arasındaki dalgaların içerisinde yer alan fazdaki meydana gelen farkları temel olarak iki veya daha fazla sentetik açıklıklı radar (SAR) görüntüsü kullanmaktadır. Bu sayede yüzeyde meydana gelen deformasyonları interferogramlar elde ederek belirler. Diğer ölçme tekniklerine nazaran belirli bir zaman aralığında her türlü hava koşulunda, geniş alanlarda (100 km) ve cm (± 2 cm) hassasiyetinde ölçüm olanakları sağlayabilir. Aynı zamanda InSAR yönteminin yalnız uydunun bakış doğrultusunda meydana gelen değişimleri belirlemesine rağmen izlenen tüm bölge hakkında orta çözünürlükte veri sağladığı saptanmıştır.

Araştırmalar sonucunda, InSAR'ın uygulama alanlarının geniş olması nedeniyle başta yer kabuğunda meydana gelen deformasyonlar olmak üzere birçok farklı alanda yararlanılabilecek bir teknik olduğu saptanmıştır. InSAR yer bilimlerinde en fazla çökme ve heyelan kaynaklı deformasyonlar deprem kaynaklı oluşan yer kabuğundaki deformasyonların belirlenmesinde kullanılır. Yüksek Lisans düzeyinde yapılmış bu çalışmanın amacı daha önceki yıllarda yapılan birçok çalışma birleştirilerek SAR İnterferometri tekniği kullanılarak deformasyon meydana gelmiş bölgelerin yeniden haritalanması ve ilerleyen zamanlarda meydana gelebilecek deformasyonların izlenmesinde önemli bir rol oynaması beklenmektedir. Bu kapsamda InSAR'ın ne olduğu anlatılmış olup yöntemleri, çalışma prensibi, veri işleme adımları ve InSAR tekniği kullanılarak yapılan deformasyon belirleme çalışmaları belirtilmiştir.

Anahtar Kelimeler: InSAR, İnterferogram, İnterferometri, Radar Görüntüleri, Yüzey Deformasyonu

ABSTRACT

MS THESIS

**INTERFEROMETRIC SYNTHETIC APERTURE RADAR (INSAR)
TECHNIQUE AND APPLICATIONS ON DEFORMATIONS**

Furkan GÜRBÜZ

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Geomatics Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Ayhan CEYLAN

2022, 57 Pages

Jury

**Prof. Dr. Ayhan CEYLAN
Prof. Dr. Cevat İNAL
Assoc. Prof. Dr. Salih ALÇAY**

Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR) is a geodetic radar technology used in remote sensing that does not need terrestrial measurements. This geodetic approach generates maps of surface deformation utilizing changes in phase of waves returning to the satellite from two or more synthetic aperture radar (SAR) images. In comparison to other measuring methods, it can give measurement possibilities in a certain time frame, in all-weather situations, covering large regions (100 km), and with precision of cm (± 2 cm). At the same time, although the InSAR method only detects the changes in the satellite's direction of view, it has been determined that it provides medium resolution data about the entire monitored region.

According to studies, it has been determined that InSAR is a technique that can be used in many different areas, especially deformations in the earth's crust, due to its wide application areas. InSAR is primarily used in earth sciences to assess collapse and landslide deformations, as well as deformations in the earth's crust that occur earthquakes. By merging various research done in previous years, it is believed that the work done as part of the Master's Degree will play a significant role in remapping deformation locations utilizing the SAR Interferometry technology and monitoring deformations that may occur in the future. In this context, several research on the issue are explored, as well as what InSAR is, its methodology, operating principle, and data processing procedures.

Keywords: InSAR, Interferogram, Interferometry, Radar Images, Surface Deformation

ÖNSÖZ

Yapay Açıklıklı Radar İnterferometrisi (InSAR), yeryüzü topoğrafyasının ve deformasyonun belirlenmesi için uzaktan algılamada kullanılan yersel ölçümlere gereksinim duymayan bir radar tekniğidir. Diğer ölçme tekniklerine nazaran belirli bir zaman aralığında her türlü hava koşulunda, geniş alanlarda (100 km) ölçüm olanakları sağlayabilen InSAR tekniği radar görüntüleri ile cm mertebesindeki yüzeyde meydana gelen deformasyonlarının belirlenmesinde kullanılan jeodezik bir tekniktir. InSAR yönteminde interferogramların elde edilmesinde topoğrafik etkiyi yok etmek için faz farkına dayalı iki veya daha fazla radar görüntüsü arasındaki fark ve çalışma bölgesine ait sayısal arazi modeli kullanılmaktadır.

İlerleyen zamanlarda meydana gelebilecek doğal felaketlerin önceden kestirilmesi, daha önceden meydana gelmiş doğal afetlerden kaynaklı ise insanların can ve mal kaybının önlenmesi amacıyla kullanılacak bu yöntemin deformasyon meydana gelmiş yerlerin tekrardan haritalanmasında önemli bir rol oynaması beklenmektedir.

Çalışma süresince bana yol gösteren ve desteklerini esirgemeyen danışman hocam ve Ölçme Tekniği Ana bilim dalı başkanı Sayın Prof. Dr. Ayhan Ceylan'a ve bölüm öğretim üyelerinden Sayın Prof. Dr. Cevat İnal'a şükranlarımı sunarım.

Furkan GÜRBÜZ
KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ VE KAYNAK ARAŞTIRMASI	10
2. YAPAY AÇIKLIKLI RADAR İNTERFEROMETRİ (INSAR) TEKNİĞİ.....	13
3. INSAR TEKNİĞİNİN DEFORMASYONLAR VE TOPOĞRAFYA İLE İLİŞKİSİ.....	16
3.1. Deformasyonun Belirlenmesi	17
3.2. Topoğrafyanın Üretilmesi.....	18
3.2.1. Topoğrafyanın Etkisi	20
4. INSAR'IN DEFORMASYONLAR ÜZERİNE UYGULAMA ALANLARI	22
4.1. Yerin Yükselmesinin ve Çökmesinin İncelenmesi.....	23
4.2. Deprem Kaynaklı Deformasyonların İncelenmesi	29
4.3. Heyelan Kaynaklı Deformasyonların İncelenmesi	35
4.4. Volkanik Hareket Kaynaklı Deformasyonların İncelenmesi.....	38
4.5. Buzul Hareketi Kaynaklı Deformasyonların İncelenmesi	44
4.6. Kıyı Şeridi Deformasyonlarının İncelenmesi	49
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	52
KAYNAKLAR	54

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ϕ	: İnterferometrik faz
ϕ_1	: Referans görüntüdeki faz
ϕ_2	: Tekrar görüntüdeki faz,
R_A	: Yeryüzündeki bir A noktasına olan mesafe
λ	: Dalga boyu
Δr	: Uydunun bakış doğrultusundaki bileşeni
$g_E^*(x,y)$: Eşlenik görüntünün karmaşık eşleniği
$g_A(x,y)$: Asıl görüntünün karmaşık değerleri
n	: Uydu bakış doğrultusu vektörü
u	: Yer değiştirme vektörü
ρ	: Elipsoid üzerindeki bir noktaya olan mesafe
θ_0	: Uydu bakış açısı
α	: Baz yükseklik açısı
B	: Baz uzunluğu
$B_{ }$: Paralel baz mesafesi
B_{\perp}	: Dik baz mesafesi
$\Delta\rho$: Yeryüzü ile radar arasındaki mesafe
ρ	: Uydunun hedefe mesafesi
$\delta\rho_e$: Geometrik değişim
$\delta\rho_t$: Topoğrafik değişim
$\delta\rho_d$: Deformasyonun mesafe değişimi

Kısaltmalar

ALOS	: Advanced Land Observing Satellite
ENVISAT	: Environmental Satellite
ERS	: European Remote Sensing Satellite
ESA	: European Space Agency
GPS	: Global Positioning System
ICE-SAT	: Ice, Cloud and Land Elevation Satellite
InSAR	: Interferometric Synthetic Aperture Radar
JERS	: Japanese Earth Resources Satellite
KAF	: Kuzey Anadolu Fayı
MTA	: Maden Tetkik ve Arama
PALSAR	: Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar
RADAR	: Radio Detection and Ranging
RADARSAT	: Radio Detection and Ranging Satellite
RMS	: Root Mean Square
SAR	: Synthetic Aperture Radar
SYM	: Sayısal Yükseklik Modeli
TBKG	: Tek Bakışlı Karmaşık Görüntü

1. GİRİŞ VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Doğal ve beşerî kaynaklı bazı olaylar sonucunda yüzeyde meydana gelen değişimlerin tespit edilmesi, incelenmesi ve takip edilmesi amacıyla bilimsel nitelikte olan birçok ölçme yöntemi geliştirilmiştir. Geniş bir alana sahip olan bu yöntemler yapılacak uygulamalara yönelik hedefleri içerisinde barındırmaktadır. Burada bahsedilen yöntemlerden bir tanesi de uzaktan algılama ile yapılan çalışmalarıdır. Son dönemlerde yeryüzüne yönelik yapılan çalışmaların uzaktan algılama yöntemleri ile incelenmesi, teknolojinin de ilerlemesiyle daha da basitleşmiştir. Günümüzde ise en etkili uzaktan algılama tekniklerinden biri Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) yani İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar tekniğidir.

InSAR, yeryüzünde meydana gelen deformasyonların ve yeryüzü topoğrafyasının belirlenmesi amacıyla kullanılan yersel ölçümlere ihtiyaç duymayan bir RADAR (Radio Detection and Ranging) tekniğidir. Yapay Açıklıklı Radar yani Synthetic Aperture Radar (SAR) sistemleri yüksek çözünürlükte harita üretme ve uzakta algılama alanında yapılan çalışmalar için geniş bir kullanım alanına sahiptir.

SAR sistemleri uçağa veya uyduya monte edilen bir alet ile elektromanyetik dalgalar gönderir ve yeryüzünde bulunan nesnelere geri yansıyan dalgaların genlik ve faz bilgilerini içerisine kaydeder. Böylece SAR, karmaşık sayılardan meydana gelen görüntüler oluşturarak piksel tabanlı deformasyon bilgisi sağlar. Diğer jeodezik yöntemler düzensiz bir şekilde dağılan ve kesikli ölçü grupları sağlarken InSAR, SAR görüntülerinin içine alabildiği çok büyük alanlarda meydana gelen deformasyonları piksel mertebesinde verebilmektedir. (Zhou ve diğ., 2003).

Aradaki faz farkı kullanılarak oluşturulan interferogramlar, aslında yer kabuğu ile uydudan alınan radar arasındaki mesafenin eşyükselti eğrili bir haritasıdır. Bu haritalar radarın bakış yönünde çok iyi bir piksel yoğunluğuna (100 piksel/km²) ve 1 cm'lik doğruluğa sahiptir ki bu da beklenen değer üzerinde olumlu bir değerdir. (Massonnet ve Feigl, 1993).

Diğer jeodezik tekniklere nazaran her türlü hava koşulunda, geniş alanlarda, yirmi dört saat ölçüm yapılabilen InSAR tekniğinde mikrodalga frekanslar kullanılarak SAR (Synthetic Aperture Radar) görüntüleri oluşturulur ve bu görüntüler ile yüzeyin geometrik şekli belirlenir (Rosen ve diğ., 2010).

InSAR tekniğinin pratikte doğru kullanılabilmesi için, aynı bölge üzerinden alınan iki radar görüntüsü gerekir ve bu görüntülerin birbirlerinden çok az farklı görüntüleme açıları kullanılarak alınmış olması gerekmektedir. Bu görüntü ikilisi bazı özel yazılımlardan yararlanarak birbirleri ile kıyaslanır. Bu kıyaslama sayesinde belirli bir zaman aralığında bu iki görüntü arasında meydana

gelen yüzey deformasyonu belirlenir. Radar sensörler hareketli bir platform üzerinde uzay boşluğunda bulunur ve bu sensörler tarafından bir hedefe mikrodalga sinyaller gönderilir; gönderilen sinyallerin bir kısmı hedeften geri yansır. Bu yansıyan sinyalleri mikrodalga sensörler haznesine kaydederek hedefin radar görüntüsünü oluşturur (Ferretti ve diğ., 2001). InSAR tekniği burada bahsedilen hedef ile sensör arasındaki mesafe farkının yörünge parametreleri yardımıyla karmaşık (kompleks) radar sinyallerini kullanarak ölçülmesini baz alır. Bu sayede, yüzeylerdeki değişimler belirlenebilir. Şayet topoğrafik yükseklikten ötürü meydana gelmiş fazdan interferogram çıkarılabilirse radarın bakış doğrultusunda yer alan hedef yüzeylerdeki hareketler saptanabilir (Hanssen, 2001).

Yeryüzündeki bir noktanın yeri pek çok sebebe bağlı olarak değişebilir. Depremler, heyelanlar, volkanik patlamalar, buzul yer değişiklikleri, yer çökmesi ve yükselmesi, plaka hareketleri gibi nedenlere bağlı olarak meydana gelen yer kabuğundaki deformasyonların tespit edilmesi önemli bir yere sahiptir.

Karmaşık sayıların oluşturduğu SAR görüntüleri, uydu anteni ile hedef anteni arasındaki uzaklık bilgilerini içeren faz ile yansıma özeliğini içeren genlik değerlerinden oluşur. SAR algılayıcıları, hedefe gönderdiği elektromanyetik sinyallerin geri yansıyan kısmının büyüklüğü (amplitude) ile sinyalde meydana gelen gecikme zamanlarını (phase) kaydeder. Çalışma alanına ait sayısal yükseklik modeli, yer kabuğunda meydana gelen deformasyonlar ve oluşan yükseklik farkları interferogram içerisinde yer alan faz bilgisi kullanılarak belirlenir (Doğru, Özener, 2011).

Yeryüzündeki deformasyonların belirlenebilmesi için iki farklı SAR görüntüsünün deformasyonun belirlenmek istendiği yüzey hareketini kapsayacak biçimde olması gerekir (Şengün, 2009).

Doğal afetlerden kaynaklanan can ve mal kaybının önceden kestirilerek önlenmesi için jeodezik ölçülere ve bu ölçülerin değerlendirilmesine ihtiyaç vardır. İşte InSAR diğer jeodezik tekniklere göre birçok üstün özelliğinin bulunması sebebiyle bu ölçme ve değerlendirme işleminde tercih edilebilir bir yöntemdir.

Ayrıca doğalgaz, su, petrol gibi vb. yer altından çıkarılması nedeniyle oluşabilecek yüzey deformasyonları da deformasyon öncesi ve sonrasında oluşan faz bilgilerinin karşılaştırılması ile belirlenebilir (Zhou ve diğ., 2003).

Bu çalışmada SAR İnterferometri tekniği kullanılarak meydana gelen deformasyonların ileride meydana getirebileceği can ve mal kaybını önlemek amacıyla incelenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda InSAR tekniği kullanılarak deformasyonların belirlenmesine yönelik daha önceden yapılmış birçok çalışmanın içerik ve ilgili kaynak araştırmaları yapılmış olup InSAR'ın ne olduğu

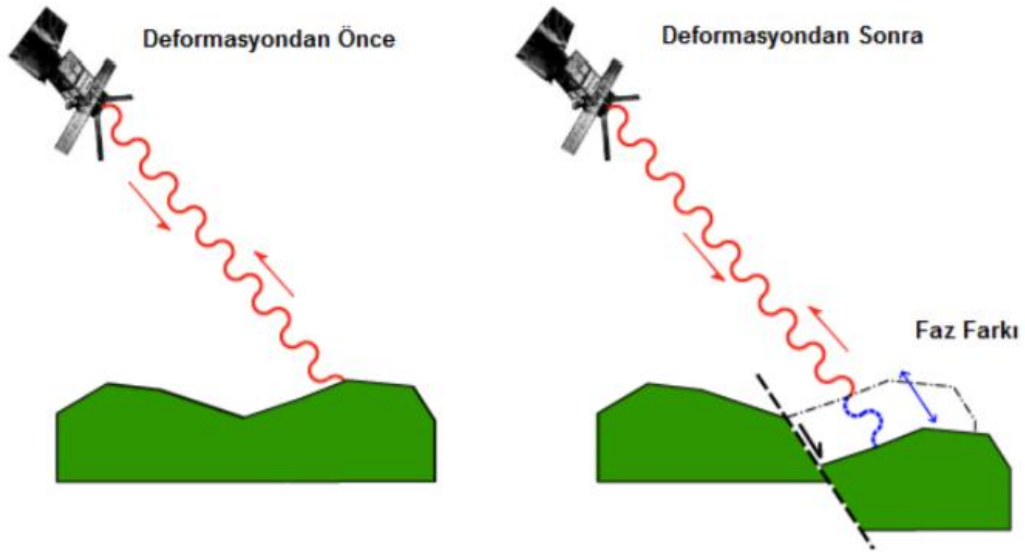
anlatılacak, yöntemleri ve veri işleme adımları belirtilecektir. Yüzey deformasyonu, topoğrafya ve Sayısal Yükseklik Modeli'nin nasıl belirlendiği anlatılacak olup yüzey deformasyonlarıyla alakalı daha önceden yapılmış birçok InSAR uygulaması bir arada sunularak ilerleyen yıllarda meydana gelebilecek deformasyonları öngörme ve meydana gelmiş deformasyonların ise incelenmesi ve yeniden yorumlanması amaçlanmıştır.



2. YAPAY AÇIKLIKLI RADAR İNTERFEROMETRİ (INSAR) TEKNİĞİ

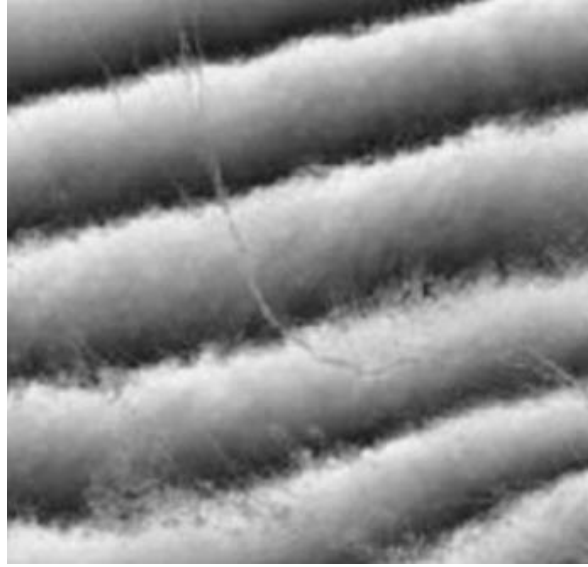
InSAR, jeodezi ve uzaktan algılama ile ilgili yapılan çalışmalarını temel alan bir radar görüntüleme tekniğidir. Bu teknik, uydular veya hava araçlarından toplanan radar görüntülerini birleştirerek Sayısal Arazi Modeli (SAM) belirlemede, yeryüzünde meydana gelen değişimlerin tespit edilmesinde, buzul hareketleri ve volkanik hareketlerden kaynaklanan yer değiştirmelerinin incelenmesinde kullanılır (Hanssen, 2001; Çakır, 2003). InSAR tekniği ilk olarak Ay'ın topoğrafik rölyefini ölçme amacıyla yere konumlandırılmış radarlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Shapiro ve diğ. 1972).

InSAR ile aynı noktaya ait uydudan veya hava aracından alınan iki SAR görüntüsü kullanılarak faz farkına dayalı bir ölçüm sistemi vardır. Şekil 2.1'deki belirlenen bir noktaya belirli zaman aralığıyla frekansları aynı olan sinyallerin gönderilmesiyle oluşan zamansal farkın açısının değeri faz farkıdır (Şengün,2009).



Şekil 2.1. Faz Farkı (Şengün, 2009)

Aynı noktaya belirli zaman aralıkları ile gönderilen sinyaller arasındaki faz farkı esas alınarak oluşturulan görüntüye interferogram denir. Bu sayede belirlenen faz farkı, aynı görüntü üzerinde birden çok halkanın birleşmesiyle modele uygun motifler oluşturur. Motifi oluşturan halkaların her birine örge (fringe), oluşumu interferometrik teknik ile olduğu için de tümüne interferometrik örgeler denir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. İnterferometrik örgeler (Şengün, 2009)

İnterferogram üzerinde belirlenecek olan faz değişimi, yeryüzünde sinyal gönderilen nokta ile görüntüyü alan araç arasındaki mesafedeki değişimi esas alır. Bir tam faz halkası (2π radyan), dalga boyunun yarısı veya dalga boyunun yarısının pozitif tam sayı katları aradaki mesafe değişimini ifade eder (Curlender ve McDonough, 1991).

SAR sistemleri, uydudan yeryüzüne gönderildikten sonra yansıyan sinyalleri kullanır. Bu sinyaller içerisinde hem faz hem de genlik bilgisi taşır. İşte bu faz ve genlik bilgileri tek bakışlı karmaşık görüntüyü (TBKG) meydana getirir. Görüntü içerisinde mevcut faz bilgisi, atmosfere, yeryüzüne olan uzaklığa ve yeryüzü ile oluşacak etkileşime bağlı olarak ortaya çıkan değişikliğe (faz kayıklığına) bağımlı bir değerdir (Şengün,2009).

Radar interferometrisinin işlevi, uydulardan gönderilen ve yeryüzünden yansıyan iki farklı radar görüntüsünün fazlarının birbirleri ile karşılaştırılmasını esas alır. İki farklı radar sistemi S_A ve S_E noktalarından aynı bölgenin görüntüsünü alır. Bu görüntülerden birincisi Asıl anlamına geldiği için baş harfi olan A harfi ile ifade edilirken, ikinci görüntü Eşlenik anlamına geldiği için baş harfi olan E harfi ile ifade edilir. SAR görüntülerinin karmaşık sayıları kullanarak ifade edecek olursak;

$$g_A(x, y) \cong |g_A(x, y)| \exp\{i\phi_A\} ; ; \phi_A = 4\pi R_A(x, y) / \lambda \quad (2.1)$$

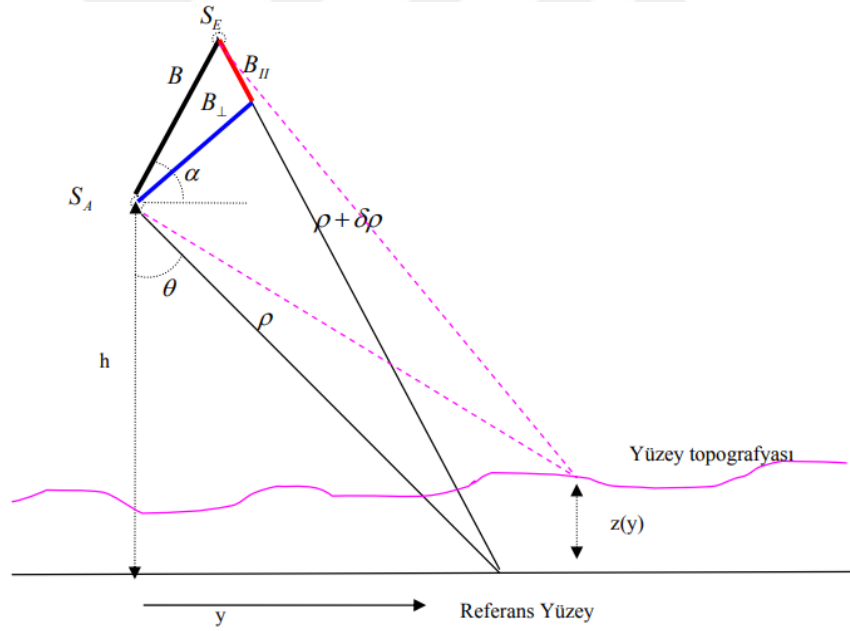
$$g_E(x, y) \cong |g_E(x, y)| \exp\{i\phi_E\} ; ; \phi_E = 4\pi R_E(x, y) / \lambda \quad (2.2)$$

olur. Burada λ dalga boyunu, R_A ve R_E yeryüzündeki belirli bir noktaya olan mesafeyi, $|g_A(x, y)|$ $|g_E(x, y)|$ ise yeryüzünün yansıtma karakteristiğini ifade eden genlik bilgisini ifade eder (Şengün, 2009).

Bu iki görüntüde yer alan birbirlerine olan girişimlerinin sağlanabilmesi için eşlenik görüntü, asıl görüntü içerisinde kendisine karşılık gelen noktalara göre konumlandırılıp yeniden örneklendirilerek yapılır. Bunun için eşlenik görüntünün kompleks (karmaşık) eşleniği (conjugate) $g_E^*(x, y)$ ile asıl görüntünün karmaşık değerleri $g_A(x, y)$ çarpılırsa;

$$g_A(x, y) g_E^*(x, y) \cong |g_A(x, y)| |g_E(x, y) \exp\{i(\phi_A - \phi_E)\}| \quad (2.3)$$

olur. Buradaki çarpım sonucunda elde edilen değer kompleks interferogramdır. Görüntü üzerindeki yeryüzü alanı her bir piksele karşılık gelmektedir. Bu alan iki görüntünün alındığı esnada kendini aynen gösterdiği takdirde yani $|g_A(x, y)| \cong |g_E(x, y)|$ ise iki görüntü arasında meydana gelen faz farkı 2π 'nin modülü olacağından sadece geometrik farklılığa bağımlı olur. Saçılma olgusuna bağımlı olmaz (Zebker ve diğ., 1994).



Şekil 2.3. İnterferometri Geometrisi (Şengün, 2009)

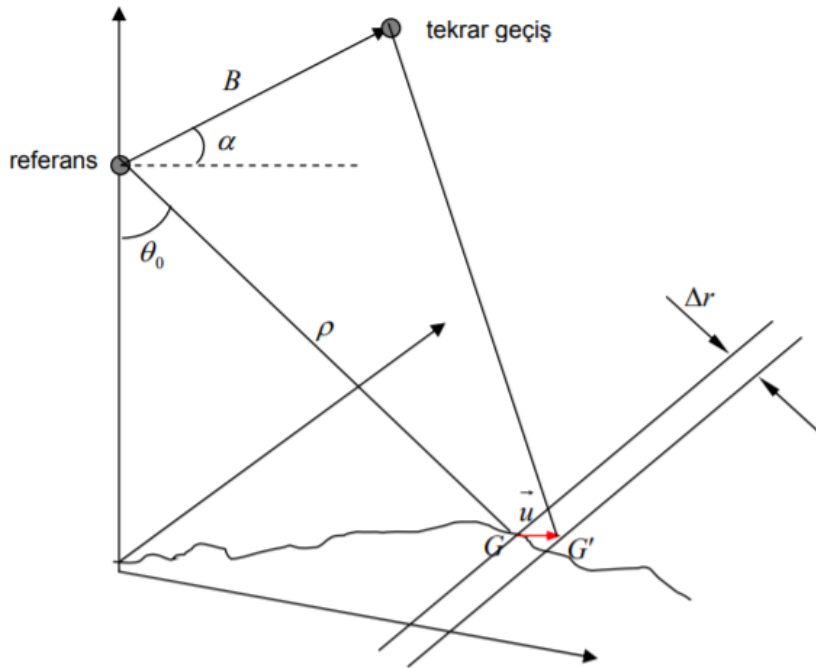
Yani faz farkları alındığında yeryüzünün geri yansıtma karakteristiği değişime uğramamışsa, rastgele katkılar giderek geriye faz farkı kalır. Bu fark yalnızca iki radar geçişi arasında oluşan mesafe değişimine ve atmosferik sebeplerden ötürü oluşan mesafedeki gecikmesinin farkından oluşur (Şekil 2.3). Bu yüzden fazdaki değişimlerin topografya, yeryüzü küreselliği, görüntüleme geometrisi ve yeryüzü deformasyonundan kaynaklandığı belirlenmiştir (Wright, 2000).

3. INSAR TEKNİĞİNİN DEFORMASYONLAR VE TOPOĞRAFYA İLE İLİŞKİSİ

Faz farkını meydana getiren bazı etkenler vardır. Bu etkenlerden yüzey topografyası ve görüntüleme geometrisi sebebiyle oluşan faz etkileri ortadan kaldırılırsa geriye sadece yüzey deformasyonu ve atmosferik gecikme sebebiyle oluşacak faz farkı kalır. Yüzey deformasyonu sebebiyle oluşan faz farkı ele alındığında Şekil 3.1.'de yer alan G noktası G' noktasına deforme olmuşsa bu deformasyon radar ile yer arasındaki mesafede Δr kadar değişime sebep olmakla beraber aynı zamanda fazda ise $\Delta\phi$ kadar değişime sebep olur. Burada bahsedilen Δr yeryüzü yer değiştirme vektörüdür. Aynı zamanda Δr , u vektörünün uydunun bakış doğrultusundaki bileşenidir ve

$$\Delta\phi = 4\pi\Delta r / \lambda = -(4\pi/\lambda) * n * u \quad (3.1)$$

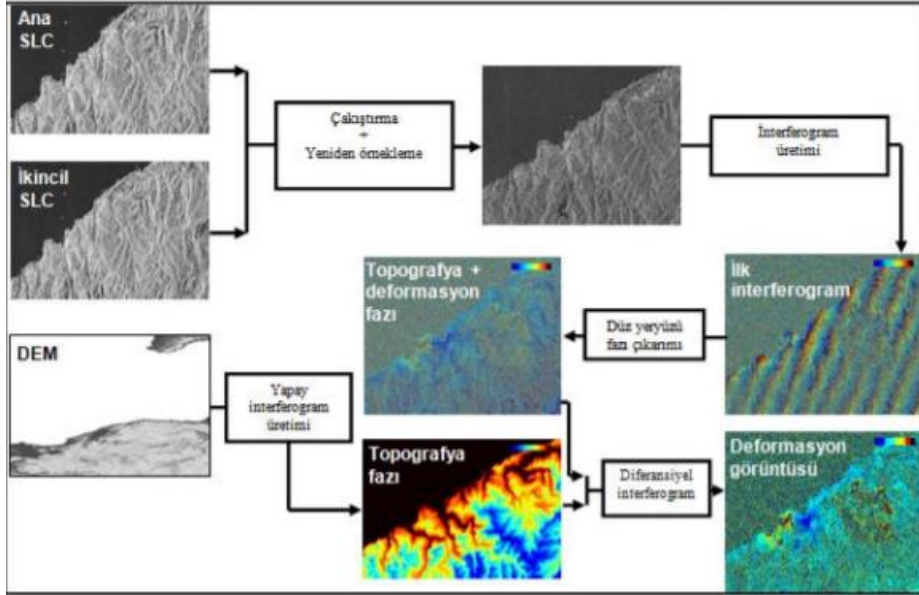
Olarak ifade edilir. Buradaki n, uyduyu gözlem noktasından gösteren birim vektördür (Şengün,2009).



Şekil 3.1. InSAR deformasyon modeli (Şengün, 2009)

3.1. Deformasyonun Belirlenmesi

InSAR yönteminde deformasyon, topoğrafik etki interferogramdan giderilerek ortadan kaldırılır. Bu kapsamda faz, çözülmeye önce gerçekleştirilir. İki geçişli interferometrinin birinci geçişinde referans görüntü alınır. İkinci geçişte ise deformasyon içeren eşlenik görüntünün alınması halinde SYM (Sayısal Yükseklik Modeli) gereksinimi ortaya çıkar. Çünkü topoğrafya sadece interferometriden yardım alınarak oluşturulamaz. Bu kapsamda kullanılacak olan Sayısal Yükseklik Modelinin interferograma göre eşlenmesi ve örnekleme gerekir. Çünkü üzerinde çalışılan interferogram esas alındığında örnekleme aralığı ve yöneltmesi aynı olmayabilir. İlk adımda SYM'nin radar geometrisine uygun olarak örnekleme sağlanır. Bu sırada ortaya çıkan piksellere, Sayısal Yükseklik Modelinin yüksekliğindeki radar görüntü datumu ile Sayısal Yükseklik Modeli datumu arasındaki fark giderilerek sağlanır. SYM radar koordinatlarına entegre edilerek burada bahsedilen simülasyon, interferogram ile eşlenerek interferogramdan referans yüzeyinin çıkarılmasına benzeyen topoğrafya çıkarılır. Bu hesapları referans yüzeyine göre değil de topoğrafik yüzeye göre yapılan hesaplar olarak özetleyebiliriz. İnterferogram fazı topoğrafyadan kaynaklanan katkı giderilmesiyle çözülebilir. Böylelikle uydu bakış doğrultusundaki deformasyon miktarı mutlak anlamda hesaplanmış olur. Bahsi geçen anlatımdaki yüzey deformasyonlarının saptanabilmesi için gerekli en önemli işlem adımları Şekil 3.2'de gösterilmiştir (Şengün, 2009).



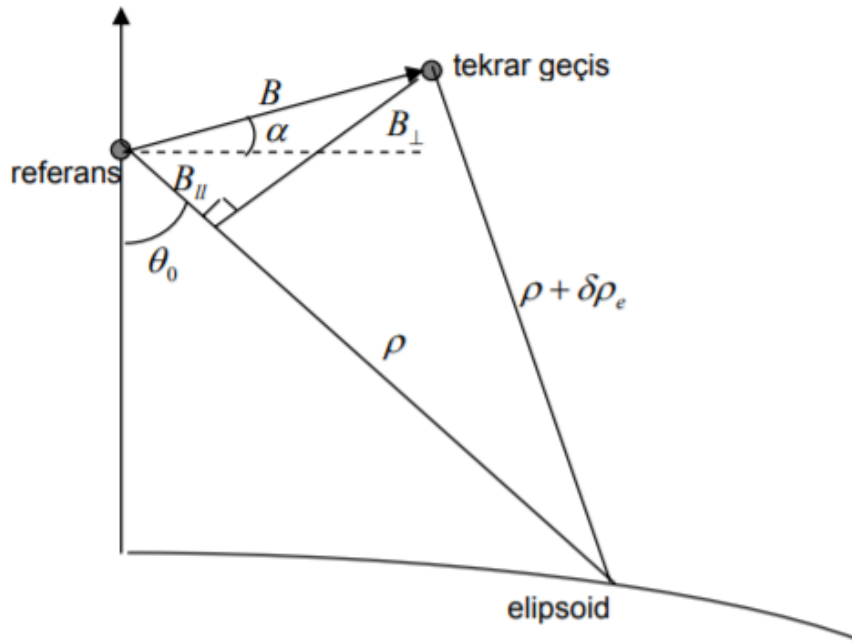
Şekil 3.2. Yüzey deformasyonlarının belirlenebilmesi için uygulanması gereken en önemli işlem adımları

(Kemaldere ve diğ., 2011)

3.2. Topoğrafyanın Üretilmesi

Amaç deformasyonun belirlenmesi değil de topoğrafyanın üretilmesiye interferometrik fazın kendisi ile alakalı olan topoğrafik yüksekliğe dönüşümü yapılır ve bu dönüşümün uygulanması için farklı teknikler mevcuttur (Rodriguez ve Martin, 1992).

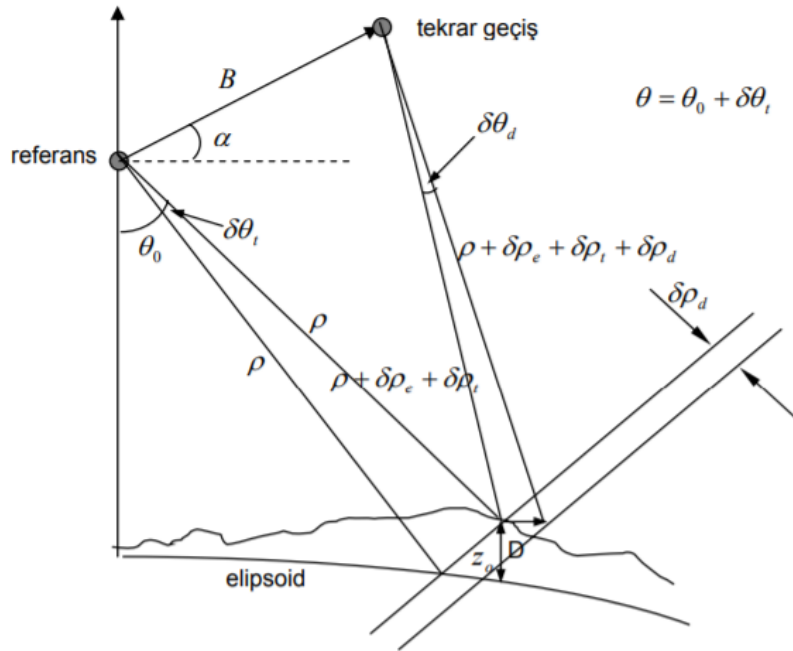
Faz çözümü uygulaması yapıldıktan sonra hassas bir şekilde baz modeli tekrardan hesaplanır. Topoğrafik yüksekliklerin elde edilmesi baz modelinin yükseklik belirsizliği denklemleri kullanılarak tekrardan hesaplanması ile sağlanır. Bu işlem için deformasyonsuz görüntüler kullanmak şarttır. Burada bahsedilen durumlardan biri olan yüzey deformasyonunun topoğrafyanın olmadığı bir elipsoid yeryüzü için InSAR geometrisi Şekil 3.3.'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Topoğrafyanın ve yüzey deformasyonunun olmadığı bir elipsoid yeryüzü için InSAR geometrisi (Şengün, 2009)

- ρ , elipsoid üzerindeki bir noktaya referans geçişinde olan mesafe.
- $\rho + \delta\rho_e$, aynı noktaya uydu tekrar geçişinde olan mesafe.
- θ_0 uydu bakış açısı.
- α baz yükseklik açısı.
- B , baz uzunluğu.
- $B_{||}$, bazın uydunun referans geçişindeki bakış doğrultusuna paralel olan bileşeni
- B_{\perp} , bazın $B_{||}$ 'ye dik olan bileşenidir (Price, 1999).

Deformasyonlar ölçülürken uydu tabanlı InSAR tekniği kullanılabilir. Bu kapsamda Şekil 3.4'te yer alan üç mesafe ışını birbirlerine paralelmış gibi sayılabilir .Fakat referans elipsoide çizilen ışın paralel kabul edilemez. Böylelikle $\delta\rho_d$ 'nin sıfır olduğu kabul edilebilir. InSAR tekniği kullanılarak D yer değiştirmesinin içinde yer alan uydunun bakış doğrultusundaki bileşeni $\delta\rho_d$ ölçülür (Price, 1999).



Şekil 3.4. Topoğrafyası ve yüzey deformasyonu olan elipsoid yeryüzü için InSAR geometrisi (Şengün,2009)

Buradaki $\delta\rho$, uydunun referans ve tekrar geçişleri arasında yeryüzündeki bir noktaya ölçülmesi arasındaki mesafedeki farktır. Mesafedeki bu fark ile interferometrik faz ϕ arasındaki ilişki;

$$\phi = \phi_1 - \phi_2 = (4\pi / \lambda) * \delta\rho \quad (3.2)$$

ile ifade edilir.

- ϕ_1 , referans görüntüdeki faz
- ϕ_2 , tekrar görüntüdeki faz,
- ρ uydunun referans geçişinde hedefe olan mesafedir.

Şayet bu iki görüntüleme zamanları arasında deformasyon varsa,

ϕ ; $\delta\rho_e$ geometrik, $\delta\rho_t$ topoğrafik, $\delta\rho_d$ deformasyonun mesafe değişimine katkılarının toplamı ile doğru orantılıdır (Zebker ve diğ. ,1994) ;

$$\phi = (4\pi / \lambda) * (\delta\rho_e + \delta\rho_t + \delta\rho_d) \quad (3.3)$$

$\delta\rho_e$ ve $\delta\rho_t$ giderildikten sonra kalan fazın deformasyondan ötürü olması beklenebilir. Yeryüzündeki u yer değiştirme vektörünün radarın bakış doğrultusundaki bileşeni $\delta\rho_d$ ise, radar ile yeryüzü arasındaki mesafede $\delta\rho_d$ kadar bir farklılık, fazda ϕ kadar bir farklılığa sebep olur.

$$\phi = (4\pi / \lambda) * \delta\rho_d = -(4\pi / \lambda) * n * u \quad (3.4)$$

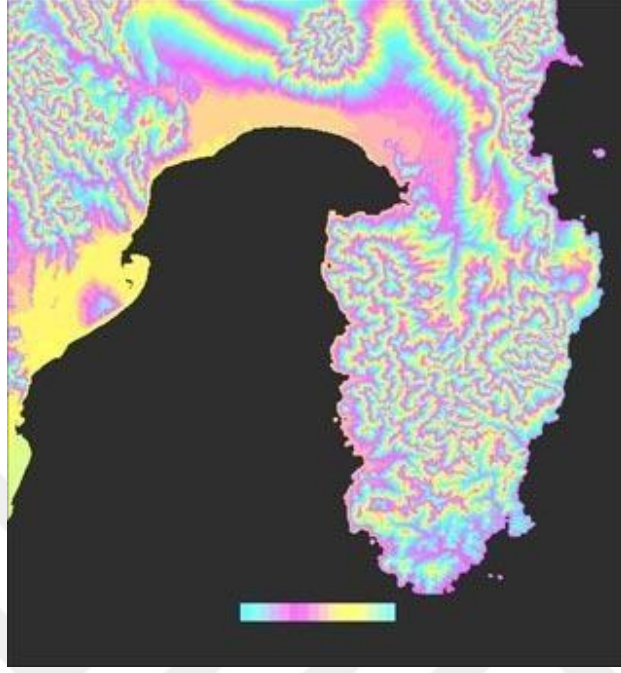
Burada n , uyduyu gözlem noktasından uyduyu gösteren birim vektördür.

3.2.1. Topoğrafyanın Etkisi

InSAR sistematik olarak düşünüldüğünde topoğrafyanın var olması bozucu bir etken olarak düşünülebilir. Meydana gelen topoğrafik değişimdeki faz farkının saptanarak interferogramdan çıkarılması gerekir. Bu işlem için ise ek bir büyüklüğe gereksinim duyulur. Topoğrafyanın etkisi Sayısal Yükseklik Modeli sayesinde interferogramdan çıkarılarak giderilir. Bu durumun tersi olarak, bu özellik kullanılarak bir bölgede şayet deformasyon yoksa da alınan görüntüler sayesinde SYM oluşturulabilir.

Topoğrafik etkiyi ortadan kaldırmak amacıyla işlevselliği aynı olan farklı teknikler kullanılmaktadır. İlkinde tek bir platforma yerleştirilen iki anten kullanıldığından bu tekniğe tek geçiş interferometri tekniği denir. SYM ve bir interferogram kullanılan iki geçiş interferometri tekniğinde ise bir uyduda yer alan tek bir anten kullanılır ve bir yörünge olarak tamamlanmasının ardından aynı bölgeden tekrar görüntü alınır. Bu yöntemde uydunun yer aldığı yörünge hesabı daha hassas ölçmelere dayanmaktadır. Bu sebeple daha uygun olduğu düşünülmektedir (Şentürk,2020). Şekil 3.5. 'te iki geçiş interferometri tekniği kullanılarak elde edilen interferogram gösterilmiştir. Burada topoğrafik etki SYM kullanılarak simüle edilir ve elde edilen simülasyon interferogramdan çıkarılır.

Bu yöntem ilk olarak Massonnet ve diğ. tarafından 1993 yılında Landers Depremi çalışmasında kullanılmıştır (Şengün,2009).



Şekil 3.5. İki geçiş interferogramında topografya kaynaklı örgeler (Yılmaztürk,2015)

Hem tek geçişli hem de tekrar geçişli InSAR tekniği kullanılarak Sayısal Yükseklik Modeli üretilebilir. InSAR yer kontrol noktasına gereksinim duymaması, detayı olmayan alanların yüksekliklerini ölçebilmesi ve gökyüzündeki bulutlardan veya havanın karanlık oluşundan etkilenmemesi yönleri ile optik stereo görüntü yöntemlerine göre daha üstündür (Şengün,2009).

4. INSAR'IN DEFORMASYONLAR ÜZERİNE UYGULAMA ALANLARI

Anadolu 4. Jeolojik zamanda oluşmuştur. Genç araziye sahip olmasından kaynaklı olarak peneplenleşmemiştir(düzleşmemiştir). Bu yüzden Anadolu coğrafyasında meydana gelecek çökme ve yükselmelerin olması olağan deformasyonlardır. Bu deformasyonları belirlemek amacıyla yersel ölçümlere ihtiyaç duymayan InSAR tekniği kullanılmaktadır.

Maden Tetkik ve Arama (MTA) Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi Başkanlığı, Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Koordinatörlüğü'nde uydulardan alınan SAR verilerini kullanarak aktif volkan sahalarına ait yüzey deformasyon bölgelerinin tespiti, çökme ve heyelanların izlenmesi, deprem kaynaklı kabuk deformasyonlarının saptanması ve değişimlerin yüksek hassasiyetle belirlenmesine yönelik teknik analizler yapılarak modellenmektedir. InSAR tekniğinde sadece bir SAR görüntü çifti ile sonuç elde edilebilirken diğer tekniklerde 10 veya daha fazla SAR verisine ihtiyaç duyulur (Dağlıyar, 2017).

InSAR tekniği heyelan, deprem, buzul hareketleri ve volkanik hareketlerden kaynaklı deformasyonların incelenmesinde ve kıyı şeridinde oluşan deformasyonlar ile yer kabuğunun çökmesi ve yükselmesi sonucu oluşan deformasyonların incelenmesinde kullanılır (Şekil 4.1).



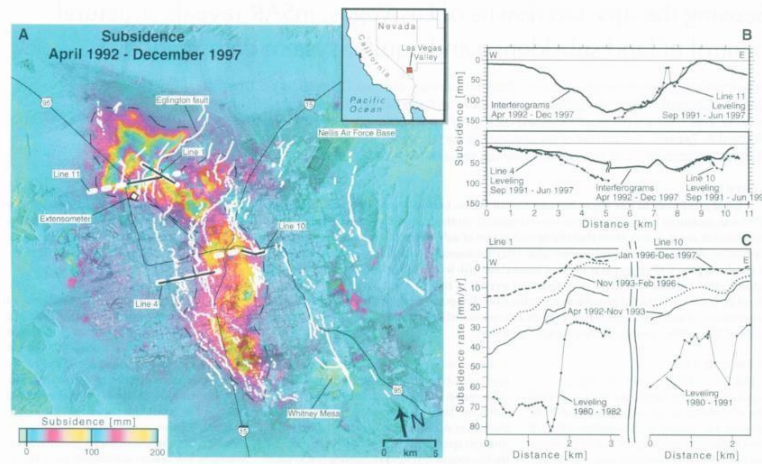
Şekil 4.1 InSAR'ın kullanıldığı deformasyon türleri

4.1. Yerin Yükselmesinin ve Çökmesinin İncelenmesi

Yer kabuğunda meydana gelen deformasyonlar doğal veya beşerî kaynaklıdır. Bu kabuk deformasyonu yerin çökmesi ve yükselmesi olarak iki sınıfa ayrılır. Karstik arazilerin olduğu bölgelerde yer altı sularında mineral oranı yüksek olur. Bu nedenle yer altı suyu içerisinde yer alan maddeler çözülebilir bu da yer altında boşluklar oluşturarak yeryüzünün çökmesine neden olur. Bu çökme tipi doğaldır. Öte yandan diğer çökme nedenleri genellikle insan kaynaklı (beşerî) olarak yer altı madenciliği çalışmaları, tarımsal sulama faaliyetleri, metro-demiryolu çalışmaları, kentsel yeraltı alanı geliştirme çalışmaları gibi faaliyetler sonucunda meydana gelir. Burada yer kabuğunda meydana gelen çökmelerin çıkış nedeni her ne olursa olsun takip edilmesi ilerleyen zamanlarda oluşabilecek tehlikeleri öngörme ve önleyebilme açısından büyük önem arz eder.

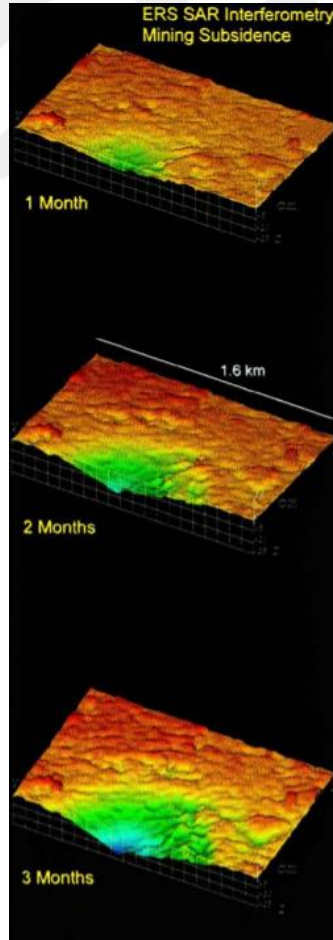
Tao ve diğ. 2004 yılında Çin'in Tianjin kentindeki yer altı sularının çok hızlı bir şekilde çekilmesi sonucunda meydana gelen çökmeyi bölgedeki nivelman ağında yapılan ölçümler ile kıyaslayarak iyi sonuçlar elde etmişlerdir. Fakat elde edilen bu sonuçlarda atmosferik düzensizliklere bağlılık olduğunu dile getirmişlerdir (Tao ve diğ.,2004; Şengün,2009). InSAR tekniği yüzey madenciliği çalışmalarında meydana gelen deformasyonların belirlenmesinde önemli bir teknik olduğunu göstermiştir. En kısıtlayıcı tarafının ise zamansal korelasyonsuzluk olduğu dile getirilmiştir (Wegmüller ve diğ., 2000).

Tarımsal sulama faaliyetleri sonucunda yer altındaki su miktarı azalınca yerde meydana gelen küçük çökmeler ya da daha büyük çökme hali olan obruklar meydana gelebilir. Las Vegas'ta insanların tarımsal sulama faaliyetleri sonucunda gitgide azalan yer altı suyuna bağlı olarak oluşan yer çökmesini belirleme işlemi Şekil 4.2'de gösterilmiştir (Amelung ve diğ. ,1999).



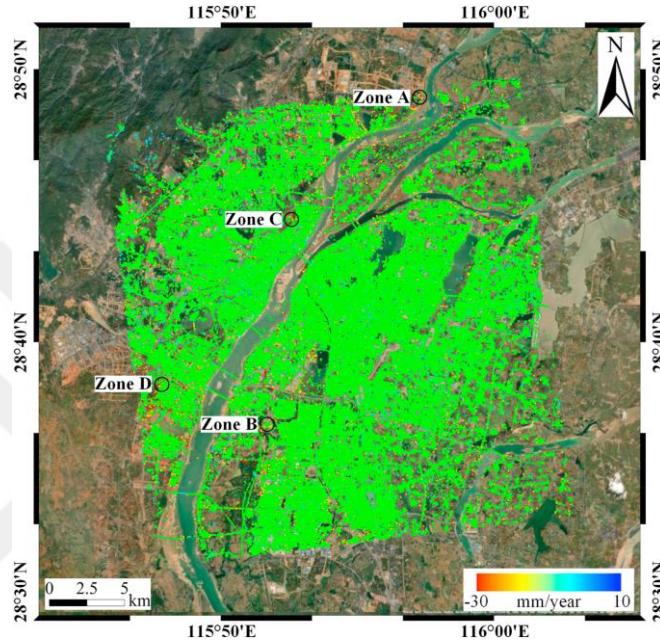
Şekil 4.2. Las Vegas yer çökme haritası ve çökme hız eğilimi (Amelung ve diğ, 1999)

Yer altı madenciliği çalışmalarından birine de kömür çıkarma çalışmaları örnek olarak verilebilir. Fransa'nın Gardanne ve Nord-Pas-de-Calais kömür havzalarındaki yeraltı üretiminden kaynaklanan çökmeler sırasıyla 2000 yılında Carnec ve Delacourt ve 2008 yılında Raucoules ve diğ.'nin yapmış oldukları çalışmalarında incelenmiştir. Gardanne havzası için 1992-1995 yılları arası alınan SAR görüntüleri ve Nord- Pas-de-Calais havzası için 1992-2000 yılları arası alınan SAR görüntüleri kullanılmıştır. Her iki çalışmada da ERS-1 (European Remote Sensing Satellite) ve ERS-2 uydularından alınan SAR görüntüleri kullanılmış olup elde edilen interferogramların nivelman verilerini doğrular nitelikte olduğu saptanmıştır. Öte yandan İngiltere'nin Selby ve Çek Cumhuriyeti'nin Silesain kömür madeni bölgelerinde kömür çıkarılma faaliyetleri sırasında oluşan çökmeler 1999 yılında Wright P. ve Stow R. tarafından InSAR tekniği ile ERS uydusuna ait SAR görüntüleri kullanılarak izlenmiştir. Otuz beşer günlük üç periyot halinde toplamda 105 günlük izleme sonucunda 8 cm kadar yer değiştirme olduğu saptanmıştır (Şekil 4.3), (Wright ve Stow, 1999; Şengün,2009).



Şekil 4.3 Yer çökmelerinin interferogramlarının 105 günlük izlenimi (Wright ve Stow, 1999)

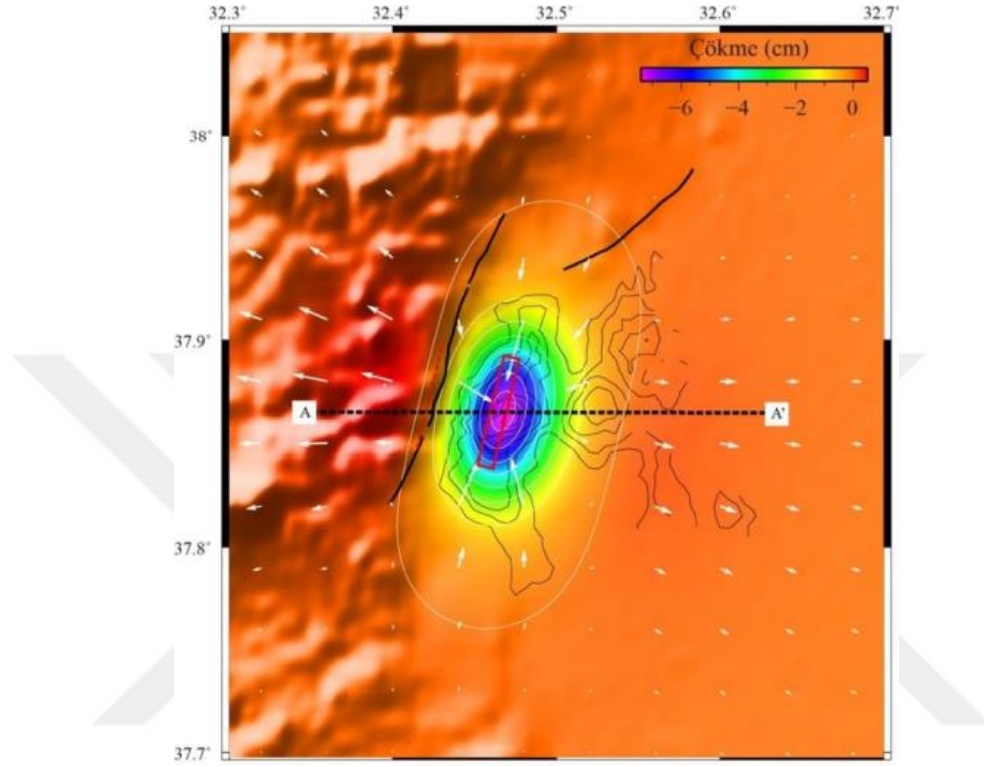
Çin'in güneydoğusundaki Jiangxi eyaletinin başkenti Nanchang kentinde yeraltı sularının bilinçsizce kullanılması, metro-demiryolu çalışmaları, kentsel yeraltı alanı geliştirme çalışmaları ve yüksek binaların temele uyguladığı dinamik yükler sebebiyle meydana gelen yer çökmeleri InSAR tekniği kullanılarak incelenmiştir. 770 km²'lik alan 4 farklı bölgeye ayrılarak Sentinel-1A uydusundan alınan 36 SAR görüntüsü yardımıyla 2018-2020 yılları arasında izlenmiş ve deformasyon haritası oluşturulmuştur (Şekil 4.4), (Xiong ve diğ.,2021).



Şekil 4.4. Nanchang kenti deformasyon haritası (Xiong ve diğ.,2021)

Şekil 4.4'te gösterilen deformasyon haritasında çalışma alanındaki arazi deformasyon hızının -30 mm/yıl ile 10 mm/yıl arasında olduğunu görülmüştür. Ayrıca çökme ve yükselmeler genellikle -5 ile 5 mm/yıl arasında deformasyon oranına sahip olduğundan çalışma alanındaki arazinin büyük çoğunluğunun izleme süresi boyunca neredeyse sabit olduğunu görülmüştür. Şehir merkezinde ise deformasyon miktarı -1 mm/yıl olduğundan yok denecek kadar azdır. Çalışma alanının kuzey kesimindeki A bölgesinde maksimum çökme miktarı yaklaşık -22 mm/yıldır. Güney kesimdeki akarsuların geniş dağılım gösterdiği B bölgesinde ise maksimum çökme miktarı yaklaşık -20 mm/yıldır. Çökmelerin yoğunlaştığı C bölgesinde maksimum çökme miktarı yaklaşık -30 mm/yıldır. Metro hattı ve demiryolu çalışmalarının olduğu D Bölgesinde ise maksimum çökme miktarının -15 mm/yıl olduğu görülmüştür (Xiong ve diğ.,2021).

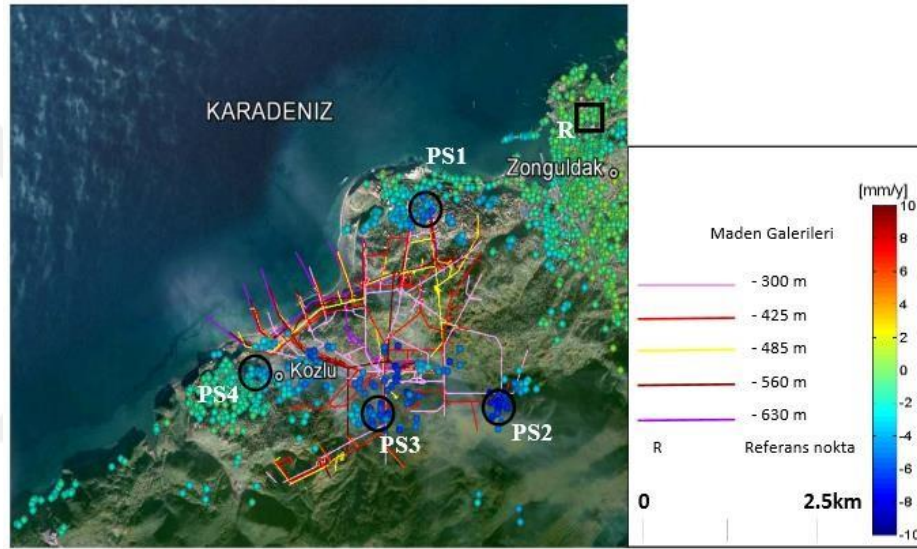
Konya şehir merkezinde aşırı yer altı suyu çekilmesinden ve şehrin altına uzanan Konya fayı üzerindeki asismik hareketlerden kaynaklı deformasyonlar oluşmuştur. Bu deformasyonların miktarı ve yönü 2004-2020 yılları arasında ENVISAT (Environmental Satellite), ALOS-1 ve Sentinel-1 uydularından alınan SAR görüntüleri yardımıyla belirlenmiştir (Şekil 4.5), (Şireci,2021).



Şekil 4.5. Konya şehir merkezi deformasyon haritası (Şireci,2021)

Şekil 4.5'teki siyah konturlar 2014 ve 2018 yılları arasında meydana gelen düşey deformasyonun 1 cm/yıl aralığındaki konturlarını göstermektedir. Beyaz çizgiler ise modelleme sonucu elde edilen düşey deformasyon konturlarını göstermektedir. Renk kodlaması modelin düşey hareketini gösterirken, oklar yatay hareketi göstermektedir. Modellenen fay kırmızı kutu ile gösterilirken, fayın yüzeye projeksiyonu kırmızı kesikli çizgiler ile gösterilmektedir ki bu da yüzeyde Konya fayı ile çakışmaktadır. 2004-2008 yılları arasında başta yılda 2 cm/yıl olan deformasyon, 2008-2020 arasında ortalama 11 cm/yıl olmuştur. Şehrin doğu bölümündeki deformasyonun son iki yılda yavaşlayarak 6 cm/yıl olduğu, batı kısmındaki deformasyonun ise son iki yılda yavaşlayarak 2 cm/yıl olduğu saptanmıştır. Deformasyonların daha çok yerleşim yerleri, mühendislik yapıları ve bitki örtüsü olmayan dağlık bölgelerde olduğu görülmüştür (Şireci,2021).

Maden çıkarma çalışmalarında meydana gelen yer değiştirmelerin zaman serilerinin analiz edilmesiyle incelenmesi amacıyla Türkiye'de yapılan yalnız bir çalışma vardır. Bunlardan biri de 2013 yılında Zonguldak kömür madenlerindeki yer çökmesi hareketlerinin incelendiği Abdikan ve diğ. çalışmasıdır. 1993-2001 yılları arasında alınmış Avrupa Uzay Ajansı'na (European Space Agency) (ESA) ait 21 adet uydu görüntüsü kullanılmıştır. InSAR yöntemiyle Zonguldak ili Kozlu bölgesine ait ortalama yer değiştirme hızı ve toplam zemin hareketi miktarı ölçülmüştür (Şekil 4.6). Bu kapsamda ortalama yer değiştirme hızınının 7-8 mm/yıl olduğu saptanmıştır. Periyotlar halinde toplamda 8 yıl izlenen bölgenin zemininde toplamda 50-65 mm hareket olduğu gözlemlenmiştir. (Abdikan ve diğ, 2013)

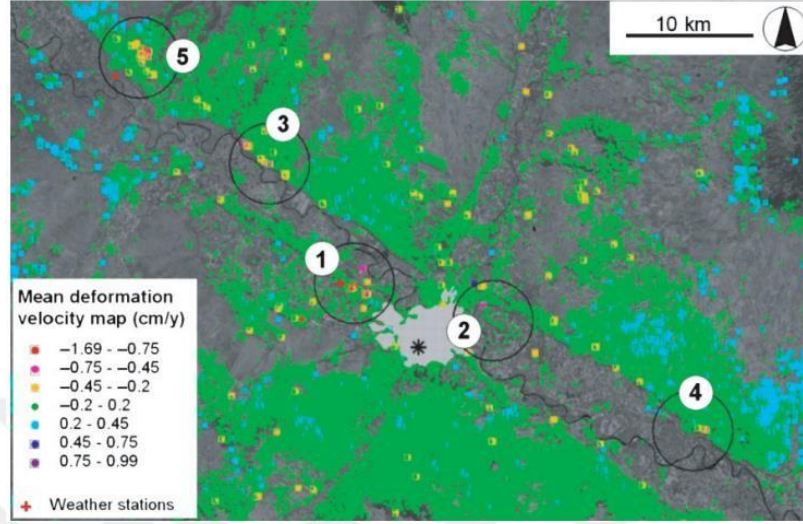


Şekil 4.6. Zonguldak ili Kozlu madeni çökmelerine ait hız vektörleri (Abdikan ve diğ, 2013)

Öte yandan Güney Kore'nin Gangwon-do bölgesinde yapılan kömür madenciliği çalışmalarında InSAR tekniği kullanılarak meydana gelen yer çökme hızının belirlendiği Baek ve diğ. (2008) çalışmasında 1992-1998 yılları arasında alınmış JERS-1 (Japanese Earth Resources Satellite) uydusuna ait 23 adet SAR görüntüsü kullanılmıştır. Toplamda 6 yıl izlenen bölgede 22 cm yer değiştirme olduğu tespit edilmiş ve sonuçlar jeolojik verilerle desteklenmiştir.

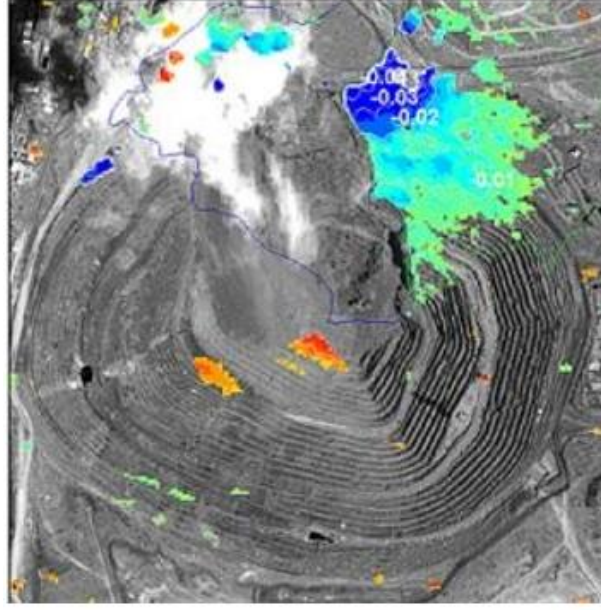
İspanya'nın Ebro Nehri Evaporit havzalarında meydana gelen heyelanlardan ve tuz madenciliğinden kaynaklanan deformasyonlar 2009 yılında InSAR tekniği kullanılarak Castaneda ve diğ. tarafından ayrı ayrı incelenmiştir. Burada ERS-1 ve ERS-2 uydularına ait 1995-2000 yılları arasında alınmış 27 adet SAR görüntüsü InSAR tekniği kullanılarak yer değiştirme hızı belirlenmiştir (Şekil 4.7). Yer çökmelerinden dolayı meydana gelen deformasyonların yıllık hızının

1-1,69 cm arasında olduğu, heyelanlardan meydana gelen deformasyonların yıllık hızının 0-0.75 cm arasında olduğu ve madencilik kaynaklı deformasyonların yıllık hızının ise 0.45-1 cm arasında olduğu belirlenmiştir (Castaneda, 2009).



Şekil 4.7. Deformasyon hızı haritası (Castaneda, 2009)

Güney Afrika'nın başkenti Pretoria'nın 360 kilometre kuzeydoğusunda bulunan Palabora bakır madeni bölgesinde yapılan madencilik çalışmaları Afrika'daki en geniş insan yapımı deliği meydana getirmiştir. Delikte daha fazla oluşabilecek çökmenin çukurun doğu kenarındaki maden altyapısını tehdit edebileceğinden endişe duyulması üzerine ortaya çıkan tehdidin doğruluğu Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından 2004 yılında InSAR tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Art arda 24 günlük iki periyot şeklinde çeşitli SAR görüntüleri elde edilerek bölge incelenmiştir. İlk periyot boyunca meydana gelen kayma miktarı doğudaki büyük kuzey bölümü için 5 cm, ikinci periyot sırasında meydana gelen kayma miktarının ise 2 cm olduğu ortaya çıkmıştır (Şekil 4.8). Bu kapsamda elde edilen SAR görüntüleri incelendiğinde deformasyon meydana gelen bölgenin sanıldığından daha küçük olduğu ve doğu duvarının etkilenmedi görülmüştür. Bu araştırma sonucunda elde edilen verilere de bağlı olarak InSAR'ın gelecekte meydana gelebilecek çökmelere karşı erken uyarıcı bir araç olarak kullanılabilmesi Palabora Maden Ocağı üzerinden de görülmüştür (URL-1).



Şekil 4.8. Palabora bakır maden ocağındaki deformasyon haritası (URL-1)

4.2. Deprem Kaynaklı Deformasyonların İncelenmesi

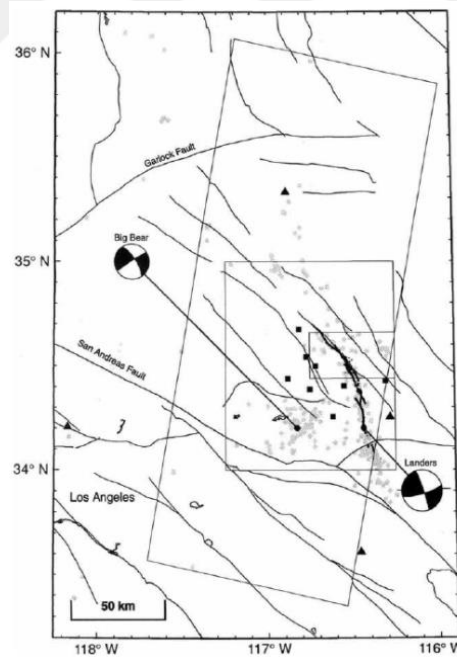
Günümüzde en çok göç türü kentten kente olduğundan ve kent merkezlerindeki nüfus yoğunluğundan kaynaklı özellikle şehir merkezlerinde olabilecek depremlerin önceden kestirilmesine ihtiyaç vardır. Bu kapsamda InSAR tekniği kullanılabilir.

Deprem kaynaklı yer değiştirmelerin belirlenebilmesine yönelik yapılan çalışmaların bir çoğunda InSAR tekniği kullanılmış olup ilerleyen zamanlarda yapılacak çalışmalarda bu teknikten faydalanılması beklenmektedir. Çünkü InSAR geniş kapsama alanı ve maliyeti ucuz bir yöntem olması sebebiyle üstün bir yöntem olmakla beraber bir çok deprem çalışmasında ve fayların modellenmesinde kullanılabilir (Şengün,2009).

Eğer bir bölgenin deprem öncesi görüntüsü alınmış ise deprem sonrasında da alınan bir görüntü yardımıyla birbirine uygun interferogramlar oluşturularak meydana gelen deformasyon miktarı saptanabilir. 1992 yılında meydana gelen Landers depremi ile ilgili yapılan çalışma InSAR yardımıyla yapılan ilk deprem çalışmasıdır. InSAR tekniği kullanılarak meydana gelen deprem ile ilgili oluşturulan interferogramdan, mevcut Sayısal Yükseklik Modeli ile topografyanın etkisi çıkarılmıştır. Aynı bölge için klasik jeodezik yöntemlerle yapılan çalışmanın doğruluğu karşılaştırılmış ve klasik yöntemlerin Kare Ortalama Hatasının (Root Mean Square) (RMS) 34mm olduğu saptanmıştır (Massonet ve diğ., 1993). Aynı şekilde ilerleyen yıllarda Zebker aynı bölge

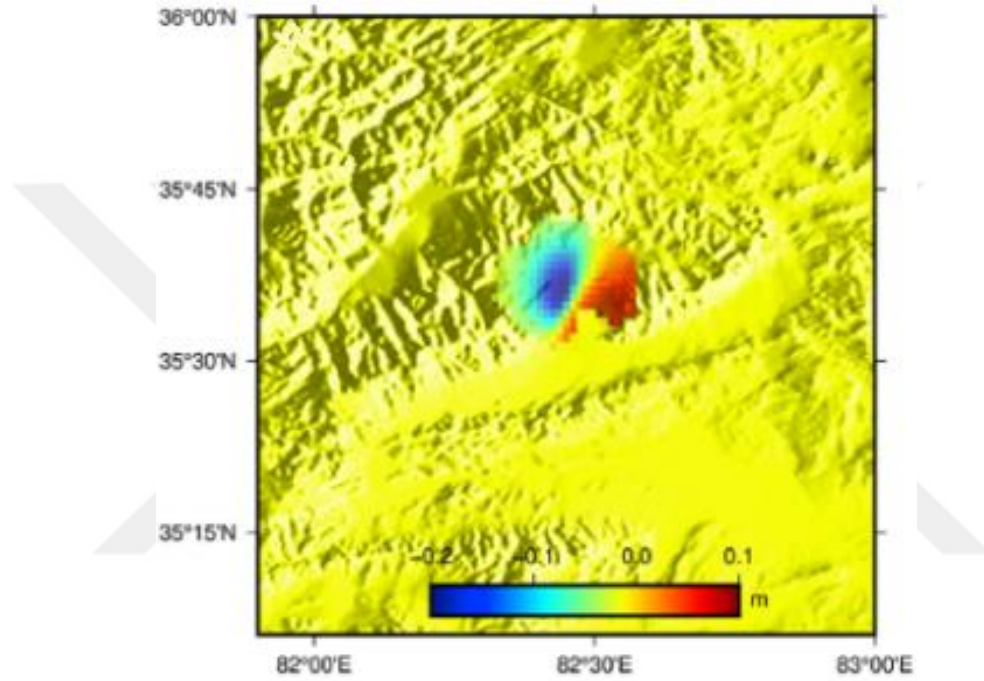
için benzer bir çalışma gerçekleştirmiştir. Fakat Zebker Sayısal Yükseklik Modelini InSAR yöntemiyle oluşturmuştur (Zebker ve diğ., 1994; Şengün,2009).

Bir bölgede deprem meydana geldikten sonra oluşan geçici hareketlere postsismik hareketler denir. Bilim adamları daha önceden meydana gelmiş büyük depremlere bağlı olarak meydana gelen ve bazen yıllarca sürebilen bu postsismik hareketleri özellikle incelemişlerdir. Bu kapsamda InSAR tekniği ilk olarak 1992 yılında California'nın Landers bölgesinde meydana gelen deprem yüzünden oluşan hareketleri gözlemlenmesinde kullanılmış ve bölgeye ait yer değiştirme haritası oluşturulmuştur. Deprem öncesinde ve sonrasında ERS-1 uydusundan alınan topoğrafik bilgiler ile SAR görüntülerinin bir araya getirilmesi sonucunda interferogram elde edilerek meydana gelen deformasyonlar belirlenmiştir. Yeryüzünden uyduya kadar olan mesafede meydana gelen farklılıklar ile arazide ölçülen kayma miktarındaki yer değiştirmelerin ve bu yer değiştirmenin modellenmesi arasındaki ilişkinin uyumlu ve doğru olduğu görülmüştür. Burada SAR görüntüleri kullanarak interferogram oluşturmanın, diğer ölçme tekniklerine göre daha yoğun bir uzaysal örnekleme sağladığı ve daha yüksek bir hassasiyette ölçüm olanağı sağladığı görülmüştür. Landers depremi çalışmasında yaklaşık 7-8 cm.lik postsismik hareketler tespit edilmiştir (Şekil 4.9), (Massonnet ve diğ., 1994; Massonnet ve diğ., 1996; Peltzer ve diğ., 1996).



Şekil 4.9. InSAR tekniği kullanılarak Landers depremi sonrası yer değiştirme alanı haritası (Massonnet ve diğ., 1994; Massonnet ve diğ., 1996; Peltzer ve diğ., 1996)

Çin'deki Altyn Tagh fayı üzerinde bulunan Yutian kentinde 26 Haziran 2020 tarihinde deprem meydana gelmiştir. Önceki yıllarda kentin 56 km güneybatısında ve 69 km kuzeydoğusunda meydana gelen depremlerin de olması, kent için ilerleyen zamanlarda meydana gelebilecek depremlerin önceden kestirilip önlem alınması ve Yutian depremi sonrasında oluşan deformasyonların belirlenebilmesi amacıyla bölgede yapılacak çalışmaları zorunlu hale getirmiştir. Bu kapsamda Sentinel-1 uydusundan alınan SAR görüntüleri yardımıyla InSAR tekniği kullanılarak bölgedeki deformasyon miktarı belirlenmiştir (Jiang ve diğ.,2021).

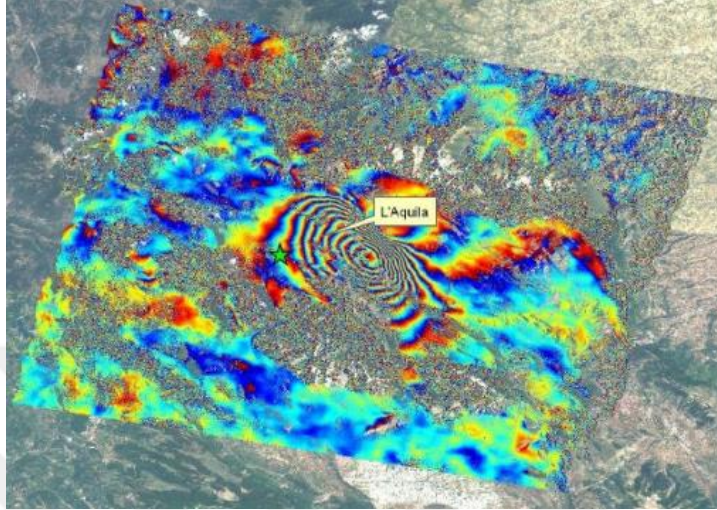


Şekil 4.10 Yutian depremi sonrası deformasyon haritası (Jiang ve diğ.,2021)

Şekil 4.10'daki deprem meydana gelen bölgede yakın aralıklarda çökme ve yükselmeler meydana gelmiştir. Burada mavi renkli alanlar çökmeyi, kırmızı renkli alanlar ise yükselmeyi temsil etmektedir. Çökmelerin daha çok deprem meydana gelen bölgenin merkezi ve çevresinde olduğu görülmüştür. Çökme miktarının merkez kısmı için 16-20 cm aralığında olduğu ve kuzey-güney yönlü gidildikçe azaldığı görülmüştür. Deprem meydana gelen bölgenin güneybatısında ise yoğun olarak 8-10 cm aralığında yükselmeler olduğu görülmüştür (Jiang ve diğ.,2021).

Her ne kadar atmosferik faz gecikmesi ve gürültülerden kaynaklı hataları barındırsa da InSAR'ın, deprem sonrası oluşan deformasyonlar ile deformasyon haritasındaki kayma miktarlarının oldukça uyumlu olması bu tekniğin deprem çalışmalarında kullanılabilir tutarlı bir teknik olduğunu bir kez daha göstermiştir (Jiang ve diğ.,2021).

İtalya'nın L'Aquila şehrinde meydana gelen deprem sonucunda meydana gelen deformasyonlar ENVISAT uydusundan deprem öncesi ve deprem sonrası alınan SAR görüntüleri yardımıyla interferogramlar oluşturularak incelenmiştir. Şekil 4.11'de bu depremden sonra oluşturulan interferogramlar gösterilmiştir (Poyraz ve diğ., 2015).

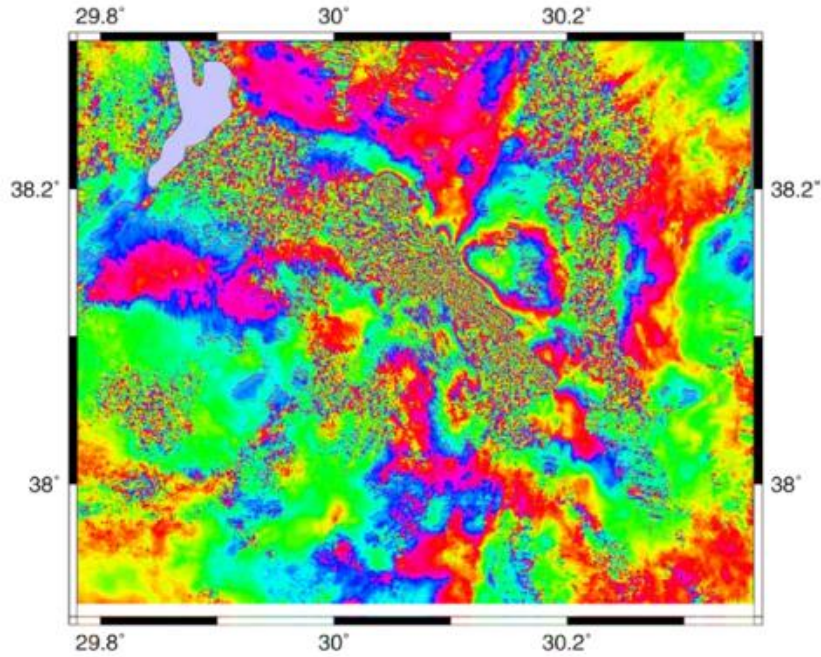


Şekil 4.11. L'Aquila depremi öncesi ve sonrası çekilen iki radar görüntüsünden üretilen interferogramlar (Poyraz ve diğ., 2015)

Şekil 4.11'de gösterilen renkli bantlar, saçaklar olarak tanımlanmaktadır ve bu saçaklar deformasyon olan bölgeleri ifade etmektedir. Alacalı olan bölgelerde korelasyonun düşük olduğu saptanmıştır. Bu alacalı alanlar yüksek ihtimalle bitki örtüsünün bulunduğu bölgeleri göstermektedir. Dolayısıyla da bu bölgelerden sağlıklı veri alınamamıştır. Ayrıca bir faz döngüsü boyunca görüş mesafesinde 28 mm'lik deformasyon olduğu saptanmıştır. Çizgilerin sıklaştığı fay üzerinde bulunan bölgede deformasyonların yoğun olduğu ve yıllık 2-3 cm aralığında olduğu görülürken fay çevresindeki alanlarda yıllık 0.5-2 cm aralığında deformasyonlar görülmüştür (Poyraz ve diğ., 2015).

Öte yandan sismolojik ve tektonik gözlemleri en iyi şekilde yapabilmek amacıyla InSAR tekniği kullanılarak Afyon ilinin Dinar ilçesinde meydana gelen depreme bağlı olarak oluşan deformasyonlar modellenmeye çalışılmıştır. Burada fayın geometrisi tam olarak çıkarılamamıştır. Bunun temel sebebi InSAR verisinin yalnız başına fay geometrisinin belirlenmesinde yeterli olmadığı ve başka verilere ihtiyaç duymasından kaynaklıdır. Bu yüzden fayın geometrisini kabaca da olsa belirlemek amacıyla InSAR verilerini kullanarak fay üzerinde meydana gelen kayma miktarının dağılımı bulunmuştur. Bu kapsamda ERS1 ve ERS2 uydularından alınan SAR görüntüleri ile Şekil

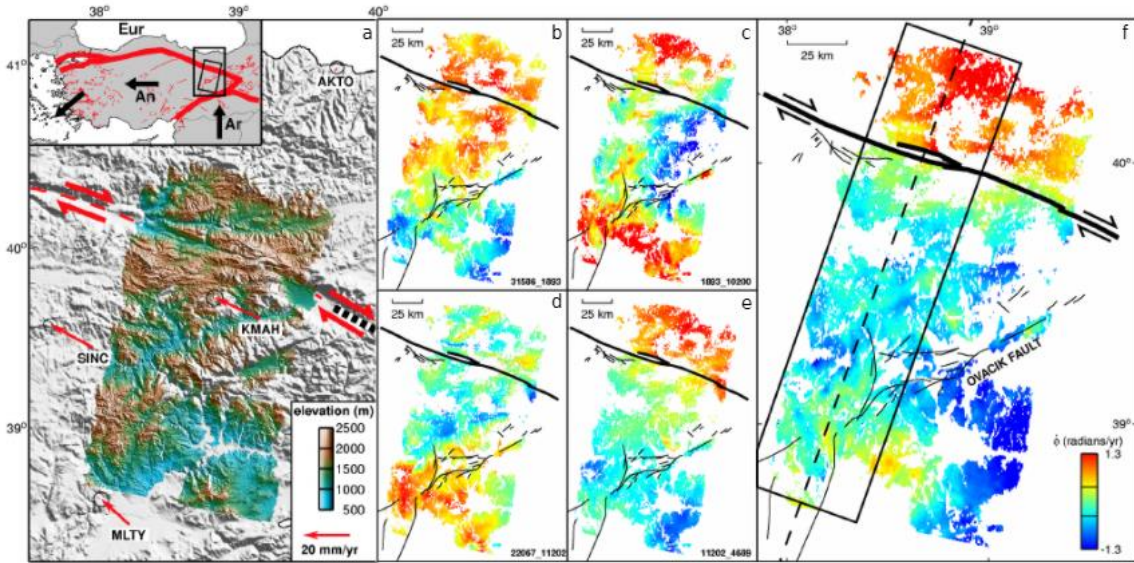
4.12’de gösterilen interferogram oluşturulmuş ve bu uydulardan alınarak üretilen interferogramlara bakıldığında meydana gelen kayma miktarının en çok 2.8 cm olduğu saptanmıştır. Burada Batı Anadolu fayına yakın yerlerde meydana gelen deformasyonların olası basit deformasyonlar olmadığı, daha karmaşık ve şiddeti büyük deformasyonlar olduğu saptanmıştır. Öte yandan Şekil 4.12’de verilen interferogram şeklindeki renklerin kontur aralığının radar sinyalinin dalga boyuna bağlı olduğu ve InSAR ile ölçülen mesafe değişiminin mutlak değişimler olmayıp bağıl değişimler olduğu bir kez daha görülmüştür (Çetin, 2010).



Şekil 4.12. Dinar depremi sonrası meydana gelen deformasyonun interferogramı (Çetin, 2010)

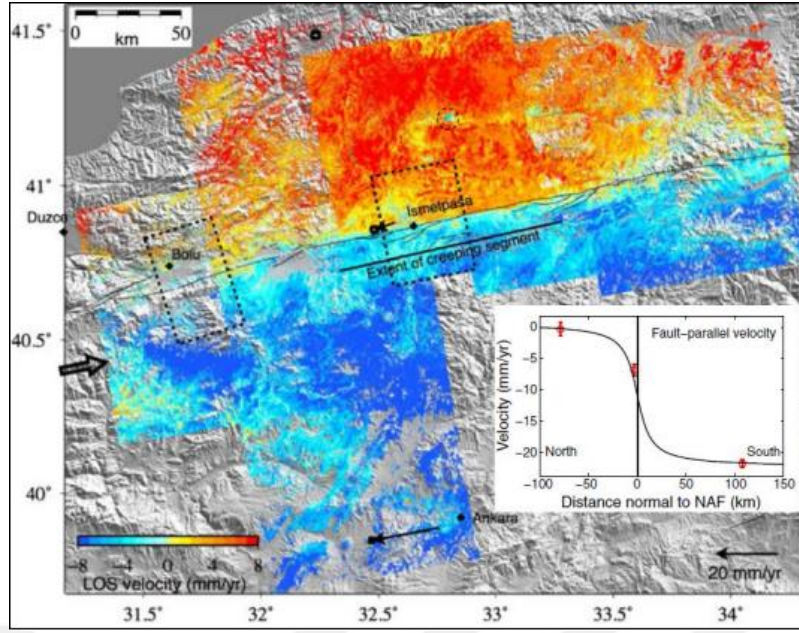
Dünya üzerinde çok az görülen tektonik krip olayının gözlemlendiği yerlerden birisi olan Kuzey Anadolu Fay Zonu için geçmişten günümüze bir çok çalışma bilim adamları tarafından gerçekleştirilmiştir. Bilim adamları hem araziye gözlemleyerek hem de jeodezik yöntemleri kullanarak bahsi geçen krip hareketiyle ilgili çalışmalarına günümüzde de devam etmektedir. Son zamanlarda ölçümü diğer yerlere göre daha zor ve daha uzak mesafede olan tektonik alanlar için InSAR tekniği yardımıyla tekrarlı ölçümler yapılarak bu alanlar içerisinde meydana gelen postsismik kabuk hareketleri ve bu hareketlerin hızları bulunmuştur. InSAR tekniğinde yer kabuğunda meydana gelen küçük deformasyonlara ait kısa zaman aralıklarında alınan atmosferik, topoğrafik ve yörünge etkilerinden kaynaklanan sinyal yansıma hataları sıkça görülür. Bahsi geçen atmosferik düzeltmeler için tarama işlemi yapıldıktan sonra, önceki kısa zaman aralığında alınan görüntülere nazaran daha uzun bir zaman aralığında alınan görüntüler ile yeni bir interferogram meydana getirilerek, bu

interferogramları birbirleri üstüne çakıştırılarak beraber kullanıldıklarında bu etkilerin üstesinden gelinebileceğini saptanmıştır. Bu kapsamda Anadolu Toprakları içerisinde yer alan ve 3. Jeolojik zamanda oluşan KAF'ın doğu ucunda 70 km genişliğinde bir deformasyon meydana gelmiş bir bölge izlenmiştir. Bu kapsamda Şekil 4.13'te gösterilen deformasyon haritası oluşturulmuş ve yüzeyde fayın derin kısmındaki uzantısındaki kabuk deformasyonunun yılda 17–32 mm aralığında olduğu saptanmıştır (Wright ve diğ., 2001).



Şekil 4.13. Kuzey Anadolu fayının doğu ucunda meydana gelen deformasyon haritası (Wright ve diğ.,2001)

Kuzey Anadolu Fayının İsmetpaşa bölümü için ALOS (Advanced Land Observing Satellite) ve ENVISAT uydularından alınan görüntülerde kalitesi yüksek interferogramlar elde edilememiştir (Şekil 4.14). Bunun temel sebepleri bölgede meydana gelen erozyonlar, bitki örtüsünün yoğunluğu ve yağışlara bağlı olarak meydana gelen su seviyesindeki değişimler olduğu gözlemlenmiştir. Bu yüzden bölgeden alınan radar görüntülerinin korelasyon seviyeleri düşüktür. Korelasyonun neredeyse hiç olmadığı alanların ise yoğun ormanlık bölgeleri olduğu görülmüştür. Bahsi geçen çalışma sonucunda İsmetpaşa bölümü için belirlenen krip oranının fay doğrultusu boyunca yaklaşık 75 km² 'lik bir alanı etkilediği ve kayma miktarı hızının ise 9 mm/yıl olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar aynı bölge için daha önceden yapılan Çakır Z. ve diğ. (2005) çalışması ile de uyumluluk göstermektedir (Kaneko ve diğ. 2012; Aslan,2019).



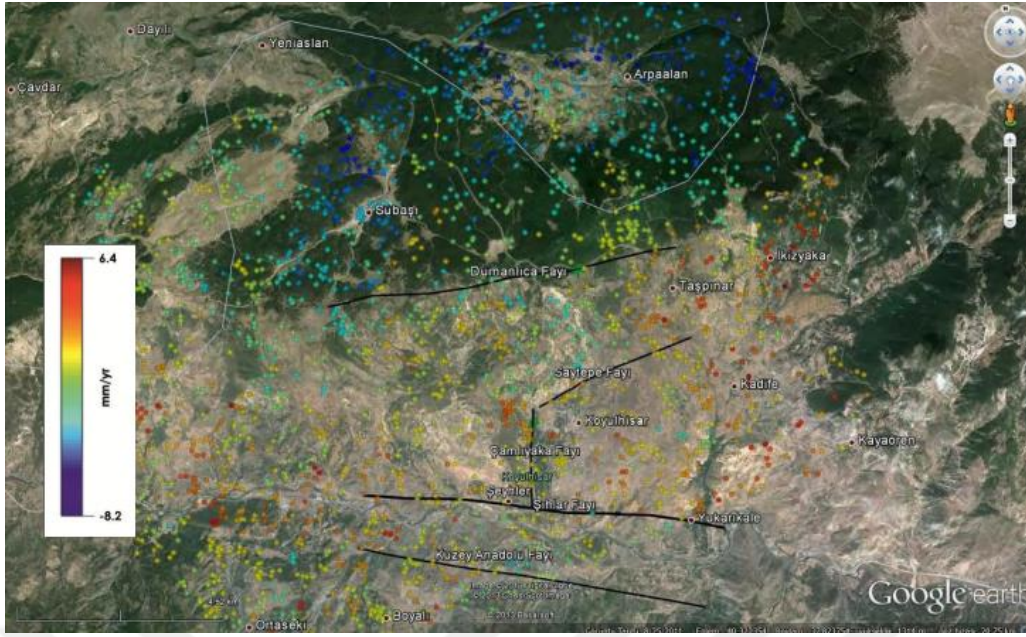
Şekil 4.14. İsmetpaşa bölgesinin ALOS ve ENVISAT uydularından alınan interferogram görüntüleri (Kaneko ve diğ., 2012; Aslan, 2019)

4.3. Heyelan Kaynaklı Deformasyonların İncelenmesi

Jeolojik kökenli doğal afetlerden biri olan heyelanlar; eğim, yağış, yer çekimi gibi etmenlere bağlı olarak toprağın suya doyduğunda kütle halinde yer değiştirmesidir. Bu doğal felakete bağlı can ve mal kaybının en aza indirilmesi açısından jeodezik bir teknik olan InSAR'ın, maliyet, süre, çalışma prensibi ve diğer jeodezik ve uzaktan algılama tekniklerine göre üstün özellikleri olması sebebiyle kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Ancak InSAR alansal olarak çok küçük olan bir bölgede direkt olarak hava şartlarına bağımlıdır.

Heyelanların çoğu hızlı bir şekilde ve anlık olduğu için görüntü korelasyonunun düşük olmasına sebep olur bu da heyelanların incelenmesini zorlaştırır. Fakat düşük hızlarda gerçekleşen toprak kütlelerinin yer değiştirmesinde korelasyon korunabileceğinden bazı heyelan deformasyonları belirlenebilir.

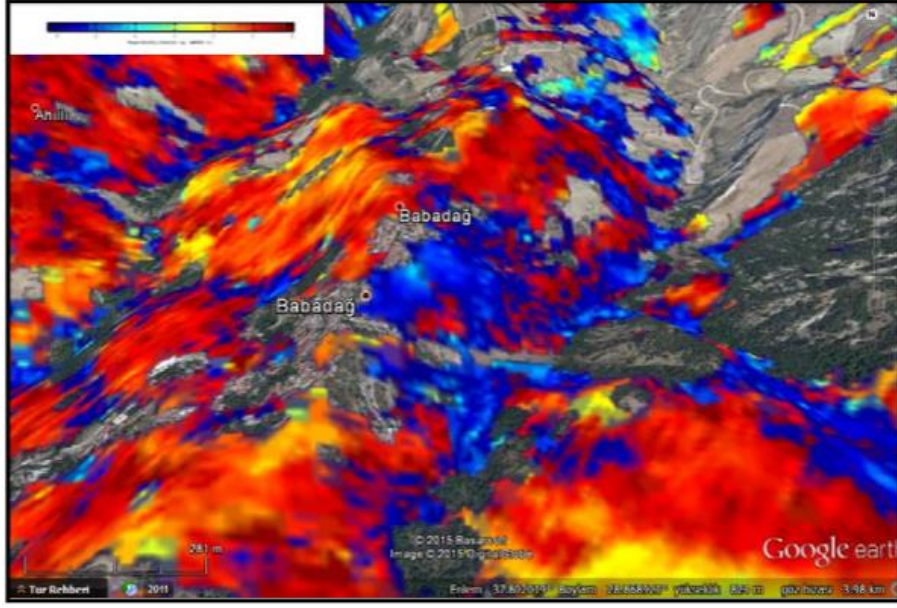
Sivas ili Koyulhisar bölgesinde eğime bağlı olarak birçok heyelan meydana gelmektedir. Bu alan içerisinde en çok heyelan meydana gelen bölge InSAR tekniği kullanılarak incelenmiştir. Bu kapsamda ALOS uydusundan alınan SAR görüntüleri kullanılarak heyelan meydana gelen yerler ve bunların deformasyon hızları belirlenmiştir (Şekil 4.15), (Hastaoğlu ve diğ., 2014).



Şekil 4.15. Koyulhisar heyelan bölgesinde meydana gelen deformasyonlar ve deformasyon hızı haritası (Hastaoğlu ve diğ., 2014)

Şekil 4.15'teki deformasyon haritasında kırmızı renkli alanlarda yıllık ortalama 5-6.4 mm, sarı-turuncu renkli alanlarda yıllık ortalama 1-5 mm yükselmeler gözlemlenirken, turkuaz-mavi renkli alanlarda yıllık ortalama 1-5 mm, mor renkli alanlarda ise yıllık ortalama 5-8.2 mm çökmeler olduğu görülmüştür. Özellikle önceki yıllarda heyelan meydana gelmiş kuzeyde yer alan bölgelerdeki heyelan kütlesi üzerinde uydu bakış doğrultusunda çökmeler gözlenirken, daha güneyde yer alan şehir merkezinde ise yükselmeler görülmüştür. Bu durumun genellikle 1998 ve 2000 yılları arasında meydana gelen heyelanlara bağlı olduğu da yapılan çalışma sonucunda görülmüştür (Hastaoğlu ve diğ., 2014).

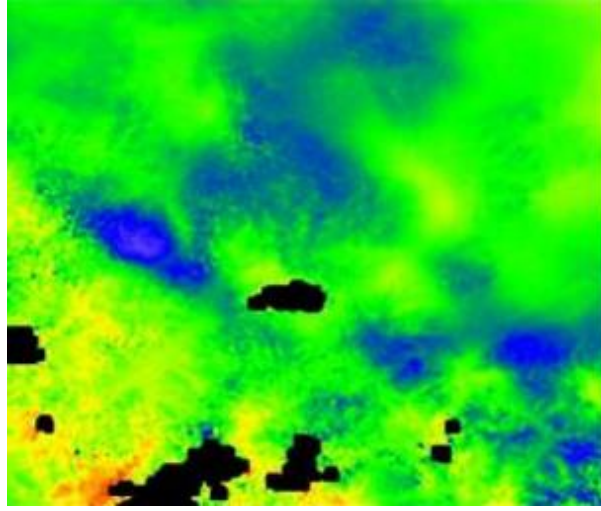
Denizli ili Babadağ ilçesinde heyelan kaynaklı meydana gelen deformasyonlar InSAR tekniği kullanılarak incelenmiştir. Bu kapsamda Babadağ ve çevresi ALOS ve PALSAR (Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar) uydularından alınan SAR görüntüleri yardımıyla bölgede meydana gelen deformasyon alanları ve deformasyon oranları yüksek uyuma sahip interferogramlar oluşturularak modellenmiştir (Şekil 4.16), (Canaslan Çomut ve diğ.,2015).



Şekil 4.16. Babadağ ilçesinde meydana gelen deformasyonların interferogramı (Canaslan Çomut ve diğ.,2015)

Uydulardan alınan SAR görüntüleri kullanılarak uydu geçişleri arasındaki baz uzunluk değerleri de dikkate alındığında Şekil 4.16'daki sonuç interferogram elde edilmiştir. Elde edilen interferogramda atmosferik etki ve interferometrik fazı etkileyen diğer bozucu etkenler tam anlamıyla ortadan kaldırılamadığı için, deformasyon meydana gelen yerler ve deformasyon oranları net bir şekilde yorumlanamasa da kırmızı renkli alanlarda yıllık ortalama 1.5-3 cm yükselme, sarı-turuncu renkli alanlarda yıllık ortalama 0.5-1.5 cm yükselme, turkuaz renkli alanlarda yıllık ortalama 0.5-1.5 cm çökme ve mavi renkli alanlarda ise yıllık ortalama 1.5-3 cm çökme olduğu belirlenebilmiştir (Canaslan Çomut ve diğ.,2015).

Samsun ili Çarşamba ilçesinde Karadeniz iklimine bağlı yağış fazlalığı ve eğim kaynaklı heyelanlar meydana gelmektedir. Bu kapsamda bölgede heyelan kaynaklı deformasyonların incelenmesi ve değerlendirilmesinde InSAR tekniği kullanılmıştır. Bölge 2018 yılında 1 yıl boyunca yüksek zamansal çözünürlüğe sahip Sentinel-1 uydusu ile izlenmiştir. Uydudan alınan 193 SAR görüntüsü kullanılarak deformasyon meydana gelen bölge için interferogramlar oluşturulmuştur (Şekil 4.17), (Şentürk,2020).



Şekil 4.17. Çarşamba ilçesinde meydana gelen deformasyonların interferogramı (Şentürk,2020)

Şekil 4.17'deki kırmızı-sarı renk aralığında 1-2 cm yükselme, yeşil alanlarda 0-1 cm yükselme, mavi alanlarda ise 0-1 cm çökme olduğu saptanmıştır. İnterferogram üzerindeki siyah alanların ise platform kaynaklı olduğu tespit edilmiştir (Şentürk,2020).

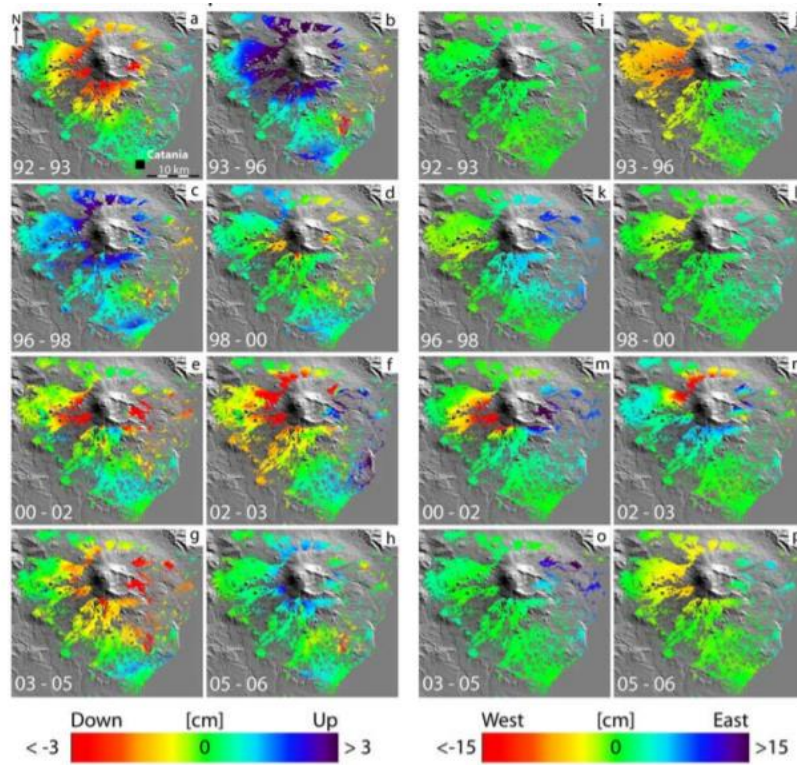
4.4. Volkanik Hareket Kaynaklı Deformasyonların İncelenmesi

Yer kabuğundaki erimiş kayaların yeryüzüne çıkabileceği bir boşluk bulmasıyla patlamanın da etkisiyle volkanlar oluşur. Uzaklaşan veya yaklaşan levhalar sonucunda oluşan volkanlar doğal tehlike arz eder. Volkanik patlamaların olduğu alanlarda lavlar, sıcak gazlar ve küllere karşı önlem alınması insan sağlığı açısından büyük bir önem arz eder. InSAR tekniği kullanılarak magma veya tektonik hareketler sonucu oluşan volkanların yüzeyde meydana getirdiği deformasyonlar modellenilebilir. Öte yandan InSAR tekniği volkanların faaliyetlerinin incelenmesi hakkında bilgi vermesi yanı sıra gelecekte meydana gelebilecek patlamaların da tahmin edilmesi açısından veriler sunabilir.

Magma kaynaklı oluşan yüksek basınç sebebiyle volkanik patlamalardan önce yüzey deformasyonu meydana gelir. InSAR ile tespit edilen yüzey deformasyonu, arazide yapılacak çalışmaların güçlüğü göz önünde bulundurulduğunda magmadaki dinamiklerin saptanması açısından mühim bilgiler verir (Şengün,2009).

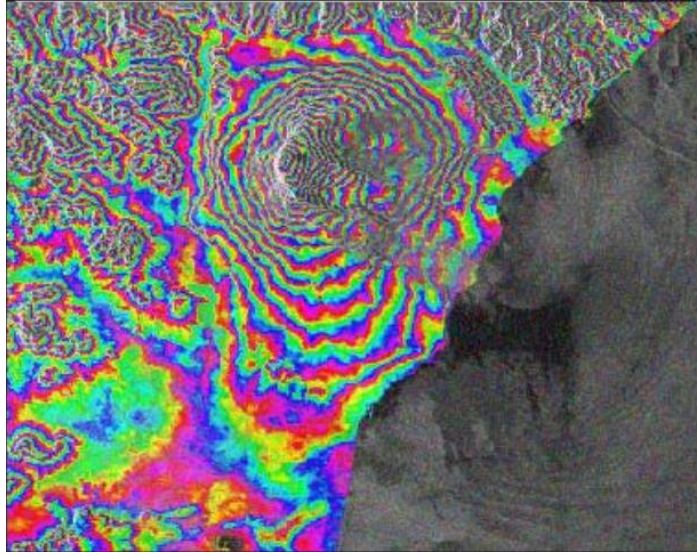
InSAR tekniği volkanik alanlarda ilk defa (Massonnet ve diğ.,1995) çalışmasında Etna Yanardağı için kullanılmıştır. 1 yıllık bir sürede periyotlar halinde izleme yapılarak ERS-1 uydularından alınan SAR görüntüleri kullanılarak volkan üzerindeki deformasyon yerleri ve miktarı InSAR tekniği kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 4.18). Burada doğu- batı yönlü gerçekleşen kaymaların ortalama 10

cm ve üzerinde olduğu yerler olduğu ve bu alanların genellikle patlamanın yeryüzeyine çıktığı bölgede yani dağın üst kısımlarında olduğu görülmüştür. Dağın daha alt kısımlarının kuzey tarafında batı yönlü ortalama 3-5 cm kayma olduğu, güney tarafında ise ortalama 3-5 cm doğu yönlü sapmalar olduğu saptanmıştır. Öte yandan dağın üst kısımlarındaki ağız kısmına yakın yerlerde ortalama 2-3 cm civarında yükselmeler ve alçalmalar olduğu saptanmıştır. Dağın daha aşağı kısımlarında ise genellikle 1-2 cm aralığında yükselmeler olduğu görülmüştür (Massonnet ve diğ.,1995).



Şekil 4.18. Bir yıllık ortalama yer değiştirme miktarını gösteren deformasyon haritaları (Massonnet ve diğ.,1995)

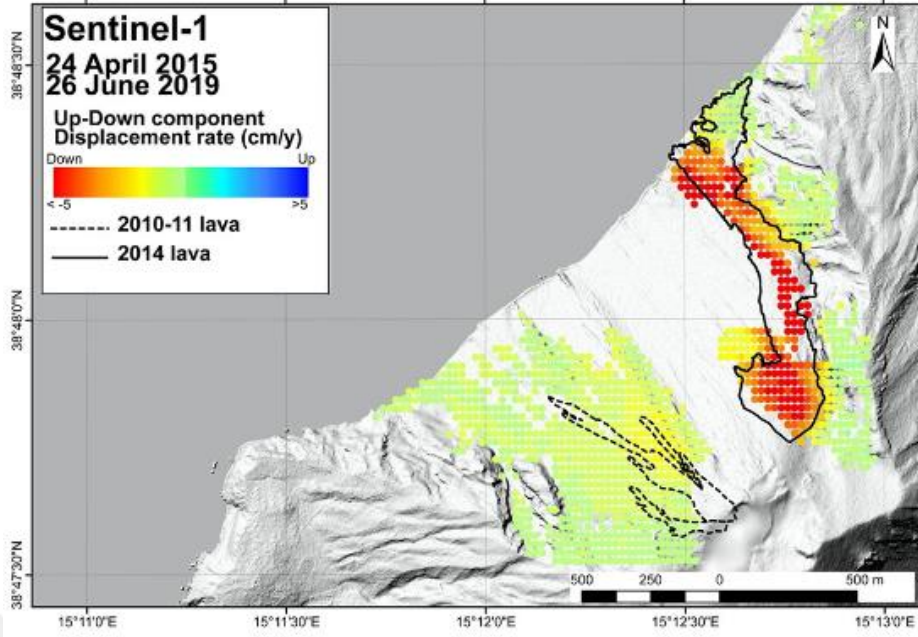
Etna Yanardağına ilişkin bir çok çalışma yapılmıştır. En son olarak 2016 yılında ERS-1 ve ERS-2 uydularından alınan SAR görüntüleri sayısal yükseklik modeli üzerinde birleştirilerek yüzey deformasyon modeli elde edilmiştir (Şekil 4.19). Sonuçların (Massonnet ve diğ.,1995) alışması ile uyumlu olduğu grlmştir (Dağlıyar,2017).



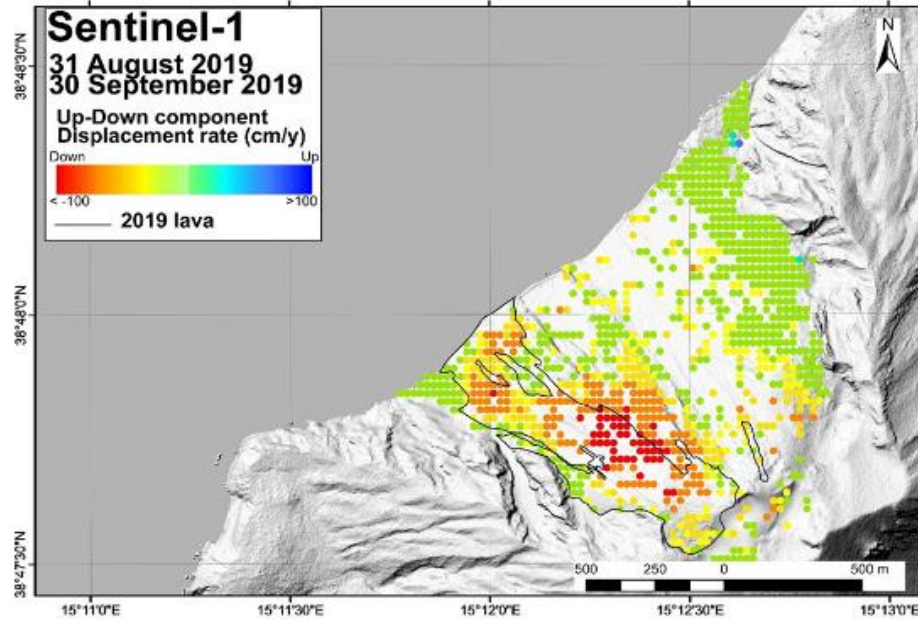
Şekil 4.19. Etna yanardağının SYM üzerinde SAR görüntülerinin birleştirilmesiyle elde edilen yüzey deformasyon görüntüsü (Dağlıyar,2017)

Şekil 4.19'da gösterilen deformasyon görüntüsündeki deformasyonların daha çok Etna Yanardağının ağız kısmında olduğu saptanmıştır. Burada doğu- batı yönlü deformasyonların ortalama 10-16 cm arasında olduğu ve bu alanların genellikle patlamanın yeryüzeyine çıktığı bölgede yani dağın üst kısımlarında olduğu görülmüştür. Dağın orta kısımlarında, ortalama 4-6 cm aralığında yükselme ve alçalmalar meydana geldiği görülmüştür. Dağın alt bölümünde ise 1-2 cm aralığında deformasyonlar olduğu görülmüştür (Dağlıyar,2017).

Tiren Denizi üzerinde ve Sicilya'nın kuzey kıyısı açıklarında bulunan İtalya'nın aktif yanardağlarından biri olan Stromboli Yanardağında püskürmeler ve patlamalar sonucunda meydana gelen deformasyonlar InSAR tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Bu kapsamda Sentinel-1 uydusundan alınan SAR görüntüleri kullanılarak 2 farklı periyot halinde izleme yapılarak deformasyon haritası oluşturulmuştur. Periyotlardan ilki 2014 yılındaki püskürmeden sonra yapılan 2015-2019 arası izlemeyi, 2. periyot 2019 yılında gerçekleşen patlama sonrası 3 aylık izlemeyi kapsamaktadır (Şekil 4.20), (Di Traglia ve diğ.,2021).



Şekil 4.20.a. Stromboli yanardağı 2014 püskürmesi sonrası 2015-2019 arası yer değiştirme haritası (Di Traglia ve diğ.,2021)



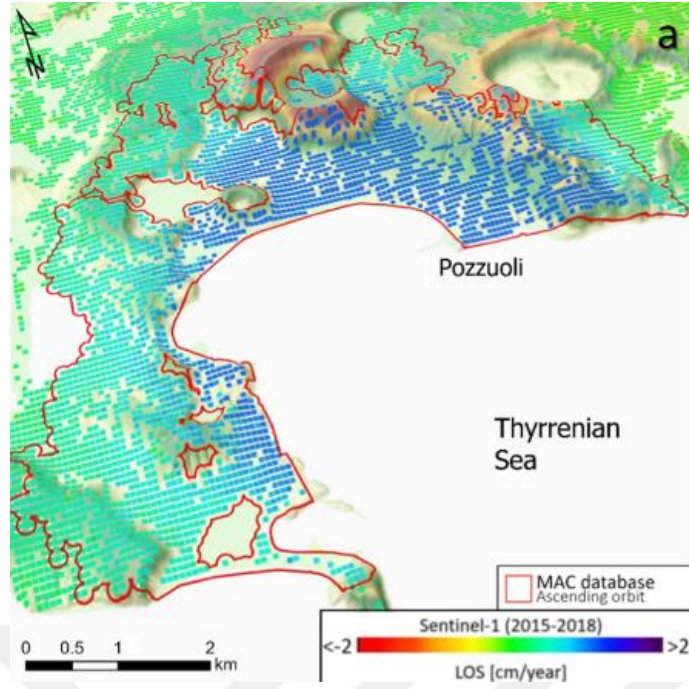
Şekil 4.20.b. Stromboli yanardağı 2019 patlaması sonrası yer değiştirme haritası (Di Traglia ve diğ.,2021)

Şekil 4.20.a Stromboli Yanardağının 2014 yılında püskürmesi sonrasında yapılan 2015-2019 yılları arasındaki yer değiştirme haritasını göstermektedir. Buradaki siyah çizgi ile gösterilen alan 2010-2011 arasında lav taşmalarından sıçrayan lavların toplandığı bölgeyi, kesikli siyah çizgi ile gösterilen alan ise 2014 yılında püskürme sonucu lav taşan alanı göstermektedir. Lav taşmalarının olduğu

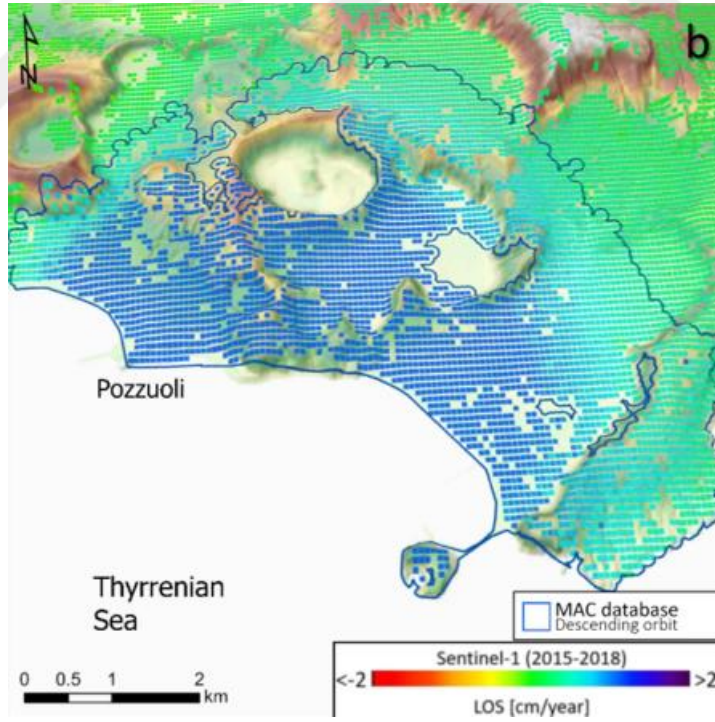
alanın dağın ağız kısmında olduğu ve bu alanda yıllık ortalama 4-5 cm okmeler meydana geldiği görülmüstür. Lav taşmalarının sıçradığı bölgede ise yıllık ortalama 0.5-1.5 cm okmeler olduğu görülmüstür. Öte yandan dağın lav taşan ve sıçrayan bölgelerinin yakınındaki alanlarda ise yılda ortalama 1 cm okmeler olduğu görülmüstür (Di Traglia ve diğ.,2021).

şekil 4.20.b’de ise Stromboli Yanardağında 2019 yılında meydana gelen patlama sonrası 3 aylık izleme sonucundaki yer değiştirme haritasını göstermektedir. Buradaki siyah çizgi ile gösterilen alan patlama ile birlikte lav birikiminin olduğu alanı göstermektedir. Pskrmeye kıyasla patlamada 20 kat fazla deformasyon meydana gelmiştir. Özellikle patlama sonrası lav biriken alanda yıllık ortalama 60- 100 cm aralığında okmeler meydana gelirken dağın ağız kısmında yıllık ortamala 10 cm’lik alçalmalar meydana gelmiştir. Ağız kısmının hemen üst tarafındaki küçük bir alanda ise yıllık ortalama 90 cm’lik yükselmenin görülmesi bu alandaki kuruyan lavın dağın anakayası ile birleştiğini göstermiştir. Ayrıca 2019 yılındaki izleme sayesinde zamanla deformasyonun kademeli olarak azaldığı görülmüstür. Diğer çalışmalara nazaran bu çalışmada uydu ve karasal SAR sistemleri aracılığıyla elde edilen InSAR llerinin ortak kullanımı ile volkanik alanlarda meydana gelen deformasyonların haritalanmasında ve yorumlanmasında daha doğru sonuçlar verdiği görülmüstür (Di Traglia ve diğ.,2021).

İtalya’nın Napoli kentinin batısında yer alan Campania bölgesindeki 458 m ykseklisindeki Phlegraean Fields kalderasında son yıllarda meydana gelen 2 büyük patlama sonucunda Campania bölgesi ve Pozzuoli Körfezi’nde deformasyonlar meydana gelmiştir. Patlamanın olduğu bölge 2015-2018 yılları arasında InSAR tekniği kullanılarak incelenmiştir. Sentinel-1 uydusundan alınan SAR görüntüleri yardımıyla bölgeye ait deformasyon haritası oluşturulmuştur (Festa ve diğ., 2022).



Şekil 4.21.a Phlegraean Fields kalderasının patlaması sonucu yükselme haritası (Festa ve diğ., 2022)



Şekil 4.21.b Phlegraean Fields kalderasının patlaması sonucu alçalma haritası (Festa ve diğ., 2022)

Şekil 4.21.a ve şekil 4.21.b' deki Pozzuoli Körfezi'nin doğu ve batı kısımlarında 33.5 km²'lik alanda yükselmeler ve 33.2 km²'lik alanda alçalmalar olduğu görülmüştür. Yükselmenin görüldüğü yerlerin yıllık yer değiştirme hızının ortalama 1.2 cm, alçalmaların olduğu bölgenin ise yıllık yer değiştirme hızının ortalama 1.5 cm olduğu görülmüştür. En yüksek deformasyonların yükseltinin azaldığı dağın güney kısmındaki Pozzuoli Körfezi'nde olduğu gözlemlenirken dağın kuzey kesiminde ise nadiren deformasyonlara rastlanmıştır. Ayrıca Pozzuoli bölgesinin doğu ve batı yönlerini son yıllarda yükselen alanlara bölen bir sırt bölgesi olduğu saptanmıştır. 1995-2015 yılları arasında çökme evresi geçiren Phlegraean Fields kalderasının son yıllarda yavaş ivme kaydeden bir yükselme hareketi sergilediği görülmüştür (Festa ve diğ., 2022).

4.5. Buzul Hareketi Kaynaklı Deformasyonların İncelenmesi

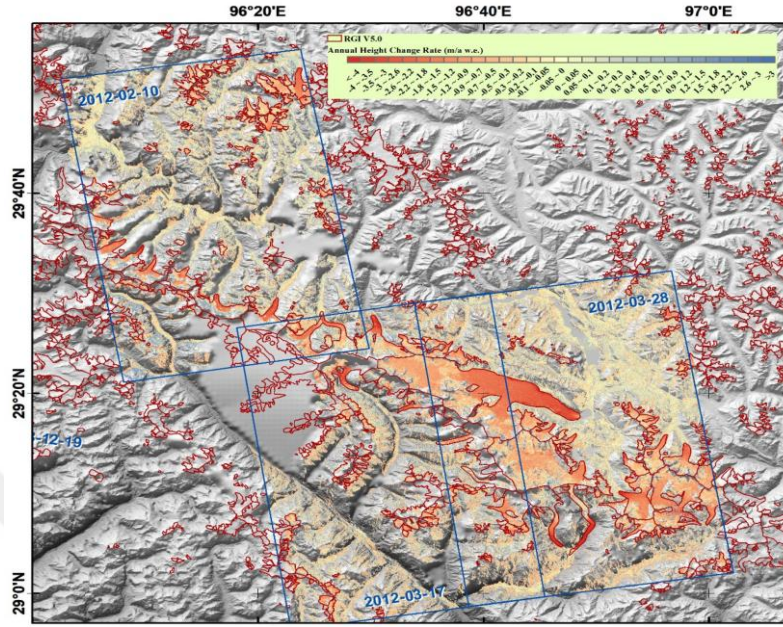
Buzullarda meydana gelen deformasyonlar genellikle buzul yataklarında ya da buzulun iç kısmında meydana gelir. Yatak üzerinde meydana gelen deformasyonlarda yatak, yumuşak tortulardan oluşmuşsa veya yataktaki çözülme miktarı fazla olup erimiş su miktarı fazla ise bu tip kaymalar oluşur. İç deformasyonlar ise buzulun güncel ağırlığı buz kristallerinde deforme meydana getirerek oluşur. Genellikle basıncı yüksek buzul bölgelerinde gözlenen bu deformasyonlar buzul sarsıntıları ile de meydana gelebilir.

Öte yandan buzul hareketleri küresel iklim şartlarına bağlı olarak da gelişebilir (Zebker,2000). Bu tip deformasyonların belirlenebilmesi için bir çok jeodezik ve uzaktan algılama tekniği kullanılmıştır. Bunlardan birisi de InSAR tekniğidir.

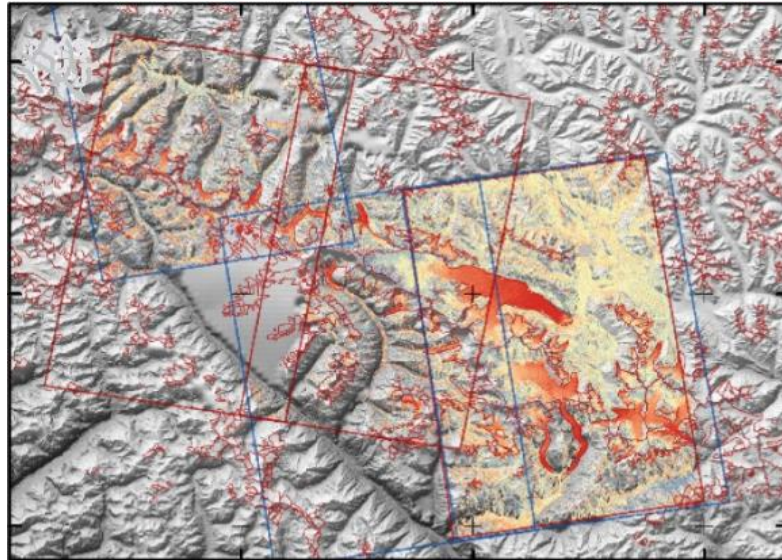
Kutup bölgeleri insanların yaşadığı alanlara uzak ve alansal olarak geniş büyüklüğe sahip olduğu için buzullarda meydana gelen deformasyonların belirlenmesinde InSAR tekniği kendisine ideal bir uygulama alanı bulur. Buradaki temel ölçüt plaka hareketlerine göre buzul hareket hızının daha fazla olması nedeniyle bir kısıtlanma söz konusudur. Bu kısıtlanma daha sık gözlem yapılarak giderilmektedir (Goldstein ve diğ.,1993; Şengün,2009).

Çin'in Tibet Özerk Bölgesi'nde bulunan 700 kilometrelik uzunluğa ve 7162 m yüksekliğe sahip Nyenchen Tanglha dağlarındaki Yanong, Xueyougu ve Azha buzulların bazı bölgelerinde küresel ısınmaya bağlı olarak ciddi deformasyonlar meydana gelmiştir. Buzul kütleindeki değişimleri gözlemlenmek için 2000-2012 yılları ile 2012-2017 yıllarında ICE-SAT (Ice, Cloud

and Land Elevation Satellite) uydusundan alınan SAR görüntüleri kullanılarak bölgedeki deformasyon miktarı belirlenmiştir (Li ve diğ.,2021).



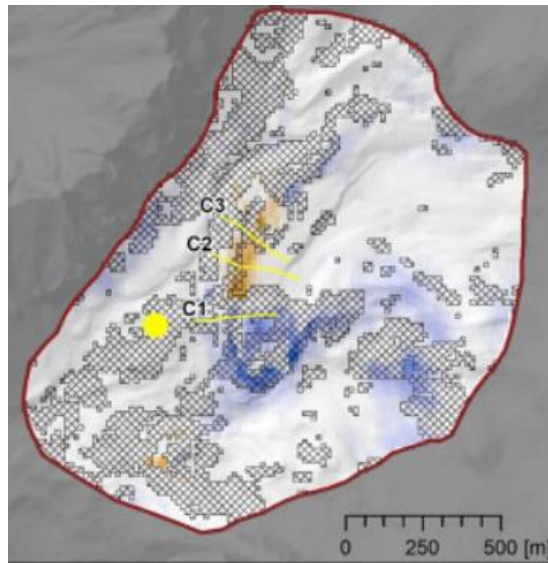
Şekil 4.22.a. 2000-2012 Yanong, Xueyougu ve Azha buzulları deformasyon haritası (Li ve diğ.,2021)



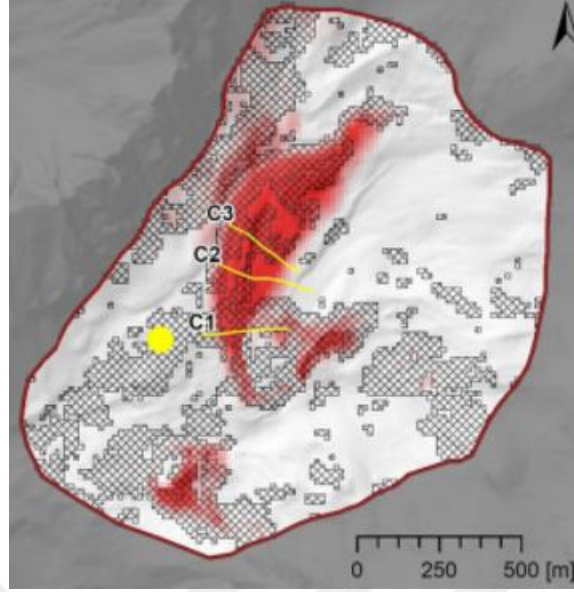
Şekil 4.22.b. 2012-2017 Yanong, Xueyougu ve Azha buzulları deformasyon haritası (Li ve diğ.,2021)

Şekil 4.22.a'daki üst kısımdaki alan Yanong buzulunu, sağ alt kısımdaki alan Xueyougu buzulunu, sol alttaki alan ise Azha buzulunu göstermektedir. Buzulların büyük çoğunluğunda bariz bir düşüş görülmüştür. Yanong buzulunun çoğu kısmı için yükseklik değişim miktarının 1.8-2.2 m/yıl olduğu görülmüştür. Büyük bir havzaya sahip olan Azha buzulundaki yükseklik değişim miktarının ise 4 m/yıl olduğu saptanmıştır. Xueyougu buzulunda ise buzul kaybı miktarının 3.8-4 m/yıl olduğu saptanmıştır. Şekil 4.22.b'deki Yanong buzulunda daha çok 2012-2017 yılları arasında 4600 m'nin altında olan yerlerde buzul kaybı yaşandığı görülmüştür. Xueyougu ve Azha buzullarında ise 2000-2012 yılları arasında neredeyse hiç buzul kaybı gözlenmezken 2012-2017 yılları arasında 3200 m ile 3500 m arasında genellikle buzul kayıpları görülmüştür. Öte yandan Yanong buzulunun bitişiğinde bulunan gölün buzuldaki erime ile gitgide genişlediği görülmüştür. Yapılan çalışmanın diğer jeodezik ve uzaktan algılama teknikleri ile yapılan çalışmalar ile uyumlu olduğu görülmüş ve onlara kıyasla 2012 öncesi ve sonrası olmak üzere iki farklı buzul kütle değişim değerleri elde edilmiştir. Bu da buzul üzerinde meydana gelen değişimin ilerleyen yıllarda şimdiye kıyasla daha da artacağını göstermiştir (Li ve diğ.,2021).

Alp dağlarının İtalya'nın kuzeyindeki Ortler bölgesinde yer alan buzullarında küresel iklim değişiklikleri sebebiyle deformasyonlar meydana gelmiştir. Bölgedeki dağın, ön kısmındaki moren buzulunda meydana gelen deformasyonlar InSAR tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Bu kapsamda Sentinel-1 uydusundan alınan SAR görüntüleri yardımıyla bölgede doğu-batı yönlü yer değişim miktarları ve yükseklik değişimlerinin haritalaması yapılmıştır (Kunz ve diğ.,2022).



Şekil 4.23.a. Ortler buzulu doğu-batı yönlü yer değişim haritası (Kunz ve diğ.,2022)

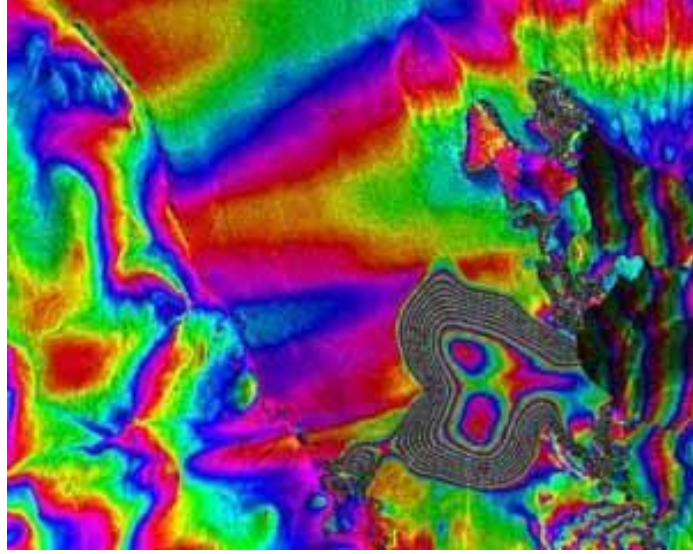


Şekil 4.23.b. Ortler buzulu yükseklik değişimi haritası (Kunz ve diğ.,2022)

Şekil 4.23.a ve şekil 4.23.b’de gösterilen; sarı nokta referans noktasını, kırmızı alan veri alınabilen alanı, C1,C2,C3 farklı bölgelerden seçilen yer değiştirme profillerinin çıkarılacağı noktaları, gri alan veri alınamayan bölgeyi, kareli çizgili alanlar ise artan veya azalan koherans (uyuşum) bölgelerini göstermektedir (Kunz ve diğ.,2022).

Şekil 4.23.a’daki doğu-batı yönlü yer değiştirme haritasında turuncu alanlar doğu yönlü yer değiştirmeyi gösterirken mavi alanlar batı yönlü yer değiştirmeyi göstermektedir. Doğü-batı yönlü değişim miktarının her iki yön için de yıllık ortalama 15-20 cm olduğu görülmüştür. Doğü-batı yönlü deformasyon meydana gelen alanlarda, morenin buzul ilerlemelerine yakın olan taraftaki yer değiştirmeler ile aynı yönlü yer değiştirme eğiliminde olduğu görülmüştür. Şekil 4.23.b’deki yükseklik değişimlerinin gösterildiği haritadaki kırmızı alanlarda ise yıllık ortalama 15-20 cm’lik alçalma meydana gelmiştir. Bu alanlardaki değişimlerin küresel ısınmaya bağlı olarak buzulda meydana gelen erimelerden kaynaklı olduğu görülmüştür (Kunz ve diğ.,2022).

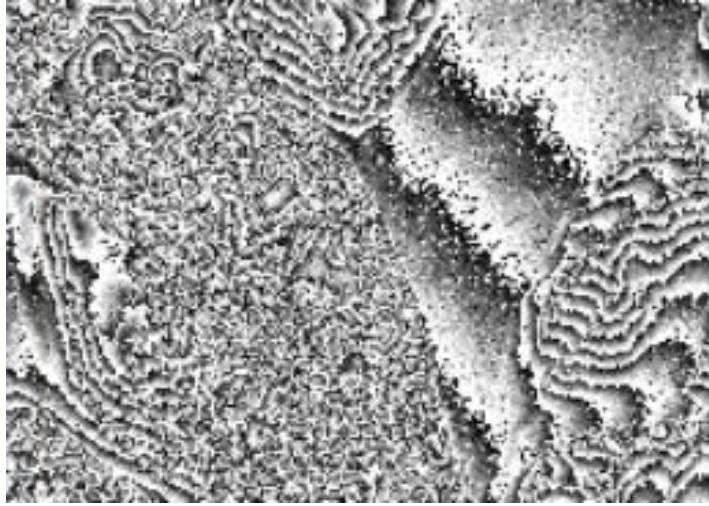
Grönland’da yer alan Storstrømmen buzulunun alçalma yerleri için ERS-1 ve ERS-2 uydusundan alınan tekrarlı SAR görüntüleri kullanılarak yer değişimini gösteren interferogram oluşturulmuştur. Yılın farklı zamanlarında tekrarlı olarak alınan bu görüntüler 35 günlük veya daha uzun süreli interferogramlar çakıştırılarak bir araya getirilmiştir. Bunun sonucunda elde edilen interferogram Şekil 4.24’te gösterilmiştir (Mohr ve Madsen, 1996).



Şekil 4.24. Storstrømmen buzununun yer değişimini gösteren interferogram (Mohr ve Madsen, 1996)

Şekil 4.24'teki interferogramda kırmızı renkli yerlerin yüksekliği 0 m, yeşil renkli yerler 300-600 m, mavi renkli yerler 600-1000 m diğer renkteki yerler ise 1000 m ve üzeri alanlardır. Genel anlamda gerçek buzul hareketinin 1.10-2.35 m aralığında olduğu görölmüştür. Görüntüde korelasyon ortaya çıkmıştır. Bunun nedeninin sensörden kaynaklı mı yoksa topoğrafik etkilerden (sinyal gecikmesi) olup olmadığı tam olarak kestirilemediğinden buzul bölgesinin daha yakından incelenmesi gerektiği saptanmıştır (Mohr ve Madsen, 1996).

Norveç anakarasının yaklaşık 1250 km kuzeyinde yer alan Svalbard'ın batı tarafında bulunan Kongsvegen ve Kronebreen gelgit suyu buzullarının alt kısımlarında meydana gelen buzul kaymaları InSAR tekniği kullanılarak tespit edilmiştir. Bu kapsamda ERS-1 ve ERS-2 uydularından alınan SAR görüntüleri yardımıyla Şekil 4.25'teki interferogram oluşturulmuştur (Eldhuset ve diğ., 1996).



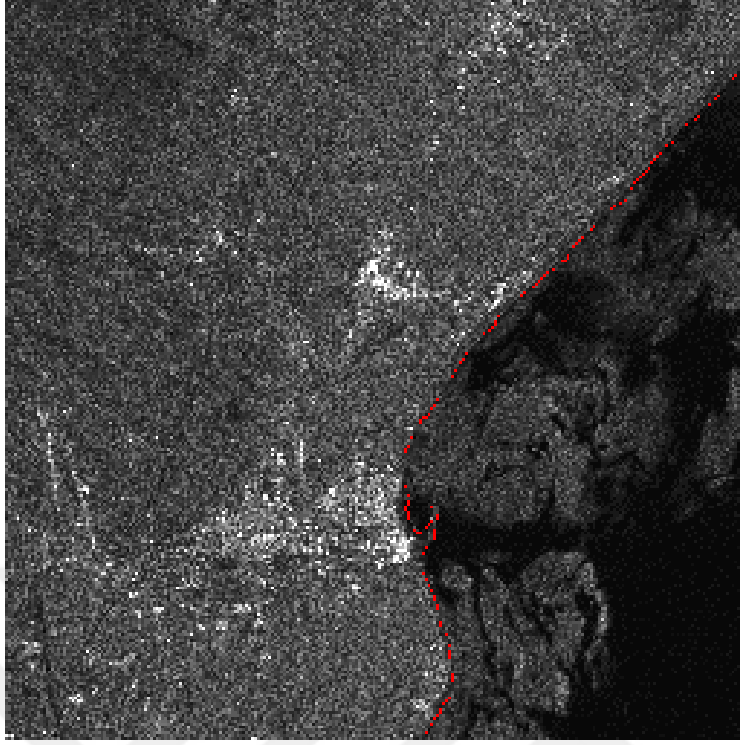
Şekil 4.25. Kronebreen ve Kongsvegen buzullarının alt kısımları için oluşturulan interferogram (Eldhuset ve diğ., 1996)

Şekil 4.25'te verilen interferogramda Kronebreen buzulunun günde ortalama 2 m yer değiştirerek günde 1-2 cm yer değiştiren Kongsvegen buzulu ile birleşerek Arktik Okyanusuna kadar ulaştığı görülmüştür. Orta bölümde yer alan desenler bu iki buzulun birleştiği esnada oluşan yarıklardır. Kuzeydoğu yönünden yaklaşan Kronebreen'in tipik saçaklara sahip olduğu görülürken Güneybatı yönünden yaklaşan Kongsvegen'in genellikle arazi saçaklarına sahip olduğu görülmüştür. İnterferogramlardan elde edilen deformasyon hız değerlerinin diğer çalışmalar ile uyumlu olduğu da görülmüştür (Eldhuset ve diğ., 1996).

4.6. Kıyı Şeridi Deformasyonlarının İncelenmesi

Kara ile okyanus veya denizin birleştiği alana kıyı şeridi denir. Kıyı şeridinde zamanla değişimler görülür. Bu değişimlerin temel sebepleri kıyının topoğrafik özellikleri (kıyı ve gerisindeki yeryüzü şekilleri), iç kuvvetler (deprem, orojenez, epirojenez, volkanizma), dış kuvvetler (rüzgâr, dalga, akarsu, heyelan, erozyon) ve kıyıdaki kayaçların yapısıdır. Bu değişimlerin belirlenebilmesi amacıyla InSAR tekniği olağan bir tekniktir.

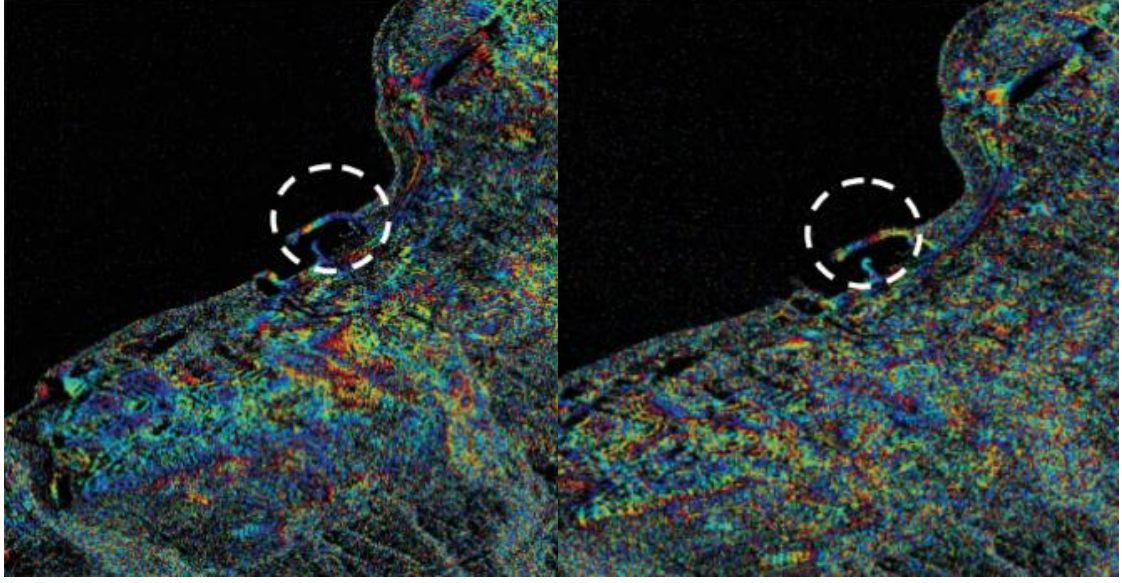
Okyanus yüzeyi karaya kıyasla oldukça durağan olduğundan bölgelerin kara-deniz sınırını belirlemek için SAR görüntülerinin çakıştırılması ile elde edilen uyuşum haritalarından yararlanılabilir. Bu kapsamda Sicilya adasını İtalya'nın güneyindeki Calabria bölgesinden ayıran Messina boğazının kara-deniz sınırında meydana gelen değişiklikler incelenmiştir (Şekil 4.26), (Schwäbisch ve diğ, 1997).



Şekil 4.26 Messina boğazı kara-deniz sınırı belirleme çalışması (Schwäbisch ve diğ., 1997; Yılmaztürk,2015)

Şekil 4.26'da ERS-1 ve ERS-2 uydularından bir günlük izleme sonucunda alınan SAR görüntüleri yardımıyla kıyı şeridindeki değişim tespit edilmiştir. Alman Federal Su Enstitüsünden alınan bölgenin topoğrafyasını yansıtan SYM ile InSAR tekniğiyle elde edilen model karşılaştırılmış ve biraz kayma da olsa sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Bir günlük izleme sonucunda InSAR tekniği ile elde edilen uyuşum haritalarına bakıldığında kıyı şeridinde 1 metreye kadar değişiklikler olduğu görülmüştür. Bir günlük kısa bir sürede 1 metrelik değişimin temel nedeninin okyanus kaynaklı gel-git etkisi olduğu saptanmıştır (Schwäbisch ve diğ., 1997).

Öte yandan Interferometrik SAR tekniği yardımıyla Zonguldak ili Kozlu maden bölgesindeki bir balıkçı barınağı izlenmiştir. 2003-2010 yılları arasında ENVISAT ve ASAR uydularından alınan 25 adet SAR görüntüsü yardımıyla meydana gelen kayma miktarı belirlenmiştir (Şekil 4.27), (Kemaldere ve diğ.,2011).



Şekil 4.27. Kozlu balıkçı barınağının deformasyon görüntüleri (Kemaldere ve diğ.,2011)

Şekil 4.27'deki daire içerisine alınmış alanlarda deformasyonlar görülmektedir. Bahsi geçen deformasyonun karadan başladığı ve barınak üzerinde de devam ettiği görülmüştür. Yani meydana gelen deformasyonun karada oluşan deformasyonun bir devamı niteliğinde olduğu saptanmıştır. Bölgedeki ortalama deformasyon hızı 7-8 mm/yıl olarak bulunmuştur. Bu kayma hareketinin tamamen düşey olduğu farz edilirse bu hızın yaklaşık 8-9 mm/yıl olabileceği öngörülmüştür. Sonuçların aynı bölge ile alakalı yapılan diğer çalışmalar ile de uyumlu olduğu görülmüştür (Kemaldere ve diğ.,2011).

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Her geçen gün gelişmekte olan Yapay Açıklıklı Radar İnterferometri (InSAR) tekniği, uzaktan algılamada kullanılan jeodezik bir radar tekniğidir ve bu teknik yersel ölçümlere ihtiyaç duymaz. InSAR'ın uydu ile yeryüzü arasındaki dalgaların içerisinde yer alan fazdaki meydana gelen farkları temel alarak iki veya daha fazla Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) görüntüsünü kullandığı ve Sayısal Yükseklik Modeline ihtiyaç duymadan ölçüm yapabildiği görülmüştür. Bu sayede yüzeyde meydana gelen deformasyonlar interferogramlar elde ederek belirlenmektedir. Bu interferogramlar elde edilirken topoğrafik etkiyi yok etmek amacıyla faz farkına dayalı iki veya daha fazla radar görüntüsü arasındaki farkın ve çalışma bölgesine ait sayısal arazi modelinin kullanıldığı görülmüştür.

InSAR'ın diğer ölçme tekniklerine nazaran belirli bir zaman aralığında her türlü hava koşulunda, geniş alanlarda (100 km) ve cm (± 2 cm) hassasiyetinde ölçüm olanakları sağlayabildiğinden orta çözünürlüklü sayısal yükseklik modeli elde edilmesinde, topoğrafik haritalamada ve yüzeylerde meydana gelen deformasyonların belirlenmesinde rahatlıkla faydalanabileceğimiz bir yöntem olduğu görülmüştür.

InSAR tekniğinin heyelan, deprem, buzul hareketleri ve volkanik hareketlerden kaynaklı deformasyonların incelenmesinde ve kıyı şeridinde oluşan deformasyonlar ile yer kabuğunun çökmesi ve yükselmesi sonucu oluşan deformasyonların incelenmesinde kullanılacak bir yöntem olduğu görülmüştür. Aynı zamanda ekonomik ve aynı bölgeler için farklı teknikler kullanılarak yapılan çalışmalarla da uyumlu olduğundan güvenilir bir yöntem olduğu görülmüştür. Kısacası InSAR'ın doğal ve beşerî kaynaklı bazı olaylar sonucunda yüzeyde meydana gelen deformasyonlardan kaynaklı oluşabilecek tehlikeleri öngörme ve bu tehlikeleri engelleyebilmek için tespit edilmesi, incelenmesi ve takip edilmesi bilimsel nitelikte olan ve en etkili uzaktan algılama yöntemlerinden biri olduğu görülmüştür.

Yapılan çalışma sonucunda uygun geometri, uygun sayısal yükseklik verisi ve uygun atmosferik koşullarda oluşturulacak interferogramların yüzey deformasyonlarının incelenmesinde ve yorumlanmasında kullanılacağı görülmüştür. Bu kapsamda uydulardan alınan SAR görüntüleri yardımıyla deformasyon haritaları oluşturularak meydana gelen deformasyonların yönü ve büyüklüğü belirlenmiş ve InSAR'ın ilerleyen yıllarda aynı bölge üzerinde devam edebilecek deformasyonların büyüklüğü ve yönünün önceden kestirilmesine fayda sağladığı görülmüştür.

Sonuç olarak, InSAR, deformasyon belirleme ve sayısal yükseklik modeli oluşturma konusunda diğer yöntemlere göre daha üstün avantajları olması sebebiyle her geçen gün kullanım

sayısı hızla artarak kullanımı olağan bir teknik haline gelmiştir. InSAR en doğru ölçü yöntemi olmamasına rağmen, diğerlerine nazaran mali ve yöntem kolaylığı açısından en umut verici teknik olduğu görülmüştür.

Öte yandan doğal afetler sonucu yaşanan can kaybının yanında milyarlarca liralık maddi kayıp da olmuştur. İlerleyen zamanlarda meydana gelebilecek doğal felaketlerin önceden kestirilmesi, daha önceden meydana gelmiş doğal afetlerden kaynaklı ise yaşanan can ve mal kaybının önlenmesi ve en aza indirilebilmesi amacıyla kullanılacak bu yöntemle ilgili yapılan birçok çalışma incelenmiş ve bu çalışmalar derli ve toplu bir şekilde birleştirilerek bir arada sunulmuştur. Bu kapsamda InSAR tekniğinin deformasyon meydana gelmiş yerlerin tekrardan haritalanmasında ve yorumlanmasında 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.
- 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*, 27 (6), 483–486.
- Aslan, G. (2019), Türkiye'nin kuzey-batı bölgesindeki yüzey deformasyonlarının yüksek çözünürlüklü InSAR verileri yardımı ile gözlenmesi: asismik slip ve çöküntü olguları”, Yüksek lisans, *İTÜ Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul,82-85.
- Canaslan, F. (2010), InSAR yöntemiyle düşey yönlü deformasyonların belirlenmesinde Konya örneği”, Yüksek lisans, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya,11.
- Canaslan Çomut, F., Gürboğa, Ş., Üstün, A., 2015, Denizli Babadağ ilçesinde heyelanların interferometrik yapay açıklıklı radar (INSaR) tekniği ile gözlemlenmesi, *International Burdur Earthquake & Environment Symposium (IBEES2015)*, Burdur, 58, 58-60.
- 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*, Spain, 34 (11),1562-1574.
- Curlender, J. C., McDonough, R. N., 1991, Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing, *John Wiley & Sons, Inc.*, 90(4), 164-176.
- Çakır, Z., Chabali, 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.
- Çetin, A. (2010), 1 Ekim 1995 Dinar depremi faylanma parametrelerinin InSAR ve sismoloji verileriyle belirlenmesi”, Yüksek lisans, *İTÜ Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul,65-68.
- Dağlıyar, A., 2017, Volkanik sahaların incelenmesi ve izlenmesinde radar teknolojileri, *Doğal Kay.ve Eko. Bült.*, Ankara, 79-84.
- Di Traglia, F., De Luca, C., Manzo, M., Nolesini, T., La Casagli, N., Lanari, R., Casu, F., 2021, Joint exploitation of space-borne and ground-based multitemporal InSAR measurements for volcano monitoring: The Stromboli volcano case study, *Remote Sensing of Environment*, 260, 112-144.
- Doğru, A., Özener, H., 2011, GPS ve InSAR ile yerdeğiştirmelerin belirlenmesi, *13. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, Ankara,1-2.
- Eldhuset, K., Aanvik, F., Aksnes, K., Andersen, J.A.H., Hauge, S., Isaksson, E., Wahl, T., Weydahl, D.J.,1996, First results from ERS tandem INSAR processing on Svalbard, *The European Space Agency 3. ERS Symposium*, Florence-Italy, *Fringe* 96.

- Feigl, K. L., Sarti, F., Vadon, H., Durand, P., Mcluskay, 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(1), 138-160.
- Ferretti, A., Prati, C., Rotta, F., 2001, Permanent scatterers in SAR interferometry, *IEEE Trans.Geoscience Remote Sensing*, 39(1), 8-20.
- Festa, D., Bonano, M., Casagli, N., Confuorto, P., De Luca, C., Del Soldato, M., Lanari, R., Lu, P., Manunta, M., Manzo, M., Onorato, G., Federico, R., Zinno, I., Casu, F., 2022, Nation-wide mapping and classification of ground deformation phenomena through the spatial clustering of P-SBAS InSAR measurements: Italy case study, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 189, 1-22.
- 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.
- Hanssen, R., 2001, Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis, *Kluwer Academic Publishers Dordrecht*, 10, 328.
- Hastaoğlu, K. Ö., Poyraz, F., Türk, T., Koçbulut, F., Şanlı, U., Yılmaz, I., Balık Şanlı, F., Kuçak, R. A., Demirel, M., Gürsoy, Ö., Duman, H., 2014, GPS ve Ps-Insar yöntemleri kullanılarak Koyulhisar (Sivas) heyelanlarının izlenmesi: İlk Sonuçlar, *GÜFBED/GUSTIJ*, Sivas, 4 (2), 172-173.
- Jiang, X., Li, W., Wang, S., Jiang, M., 2021, Coseismic deformation of the 2020 Yutian M_w 6.4 earthquake from Sentinel-1A and the slip inversion, *Earthquake Research Advances*, 1(2), 100-127.
- Kaneko, Y., Fialko, Y., Sandwell, D. T., Tong, X., and Furuya, M., 2013, Interseismic deformation and creep along the central section of the North Anatolian fault (Turkey): InSAR observations and implications for rate-and-state friction properties, *Journal of Geophysical Research*, 118, 316–331.
- Kemaldere, H., Polat, Özölçer, İ.H., Kutoğlu, Ş.H.,2011, Radar interferometri tekniği ile kıyı yapılarındaki deformasyonların izlenmesi, *8. Kıyı Mühendisliği Sempozyumu*, İstanbul, 919-928.
- Kunz, J., Ullmann, T., Kneisel, C., 2022, Internal structure and recent dynamics of a moraine complex in an alpine glacier forefield revealed by geophysical surveying and Sentinel-1 InSAR time series, *Geomorphology*, 398, 108-152.
- Li, G., Li, Y., Lin, H., Ye, Q., Jiang, L., 2021, Two periods of geodetic glacier mass balance at Eastern Nyainqentanglha derived from multi-platform bistatic SAR interferometry, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 104, 102-115.
- Massonnet, D., Briole, P., Arnaud, A., 1995, Deflation of mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry, *Nature*, 375, 567-570.

- Massonnet, D., Feigl, K., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., 1994, Radar interferometric mapping of deformation in the year after the Landers Earthquake, *Nature*, 369, 227-230.
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., Rabaut, T., 1993, The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, *Nature*, 364(8), 138-142.
- Massonnet, D., Thatcher, W. ve Vadon, H., 1996, Detection of postseismic fault- zone collapse following the Landers earthquake, *Nature*, 382, 612-616.
- 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, 1,345-352.
- Peltzer, G., Rosen, P., Rogez, F., ve Hudnut, K., 1996, Postseismic rebound in fault step-overs caused by pore fluid flow, *Science*, 273, 1202-1204.
- Poyraz, F., Tatar, O., Hastaoğlu, K.Ö., Tiryakioğlu, İ., Gürsoy, Ö., Koçbulut, F., Türk, T., Demirel, M., Duman, H., Çiğner, A. F., Gül, D., 2015, Gediz grabeninin doğu kesimindeki güncel tektonik hareketlerin GPS ve Ps-InSAR yöntemleri kullanılarak belirlenmesi; ilk sonuçlar, *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7 (1), 17-28.
- Price, E. (1999), Coseismic and postseismic deformations associated with the 1992 Landers California Earthquake measured by Synthetic Aperture Radar Interferometry”, Ph.D.Thesis, *University of California*, California,10-11.
- Rodriguez, E. ve Martin, J. M., 1992, Theory and design of interferometric synthetic aperture radars, *IEEE Proc. of Radar and Signal Processing*, 139(2), 147-159.
- Rosen, P., Hensley, S., Joughin, I., Li, F., Madsen, N., Rodriguez, E., Goldstein, R., 2010, Synthetic Aperture Radar Interferometry, *Proceedings of the IEEE*, 88(3), 333-382.
- Schwäbisch, M., Lehner, S., Winkel, N., 1997, Coastline extraction using ERS SAR interferometry, *Proceedings of the third ERS Symposium*, 1049-1060
- Shapiro, I.I., Zisk, S. H., Rogers, A.E.E., Slade, M.A., Thompson, T.W., 1972, Lunar Topography: Global Determination by Radar, *Science*, 178, 939-948.
- Şengün, Y. (2009), GPS ve InSAR ölçülerini birlikte kullanarak İzmit depreminde oluşan deformasyonların belirlenmesi: nokta seyrekleştirmede yeni bir algoritma”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 17-44.
- Şengün Y., Kılıçoğlu A., 2009, İnterferometrik yapay açıklıklı radar tekniğinin Jeodezide kullanılması, *Hrt.Gn.K.lığı Harita Dergisi Sayı: 133*, İstanbul, 307-310.
- Şentürk, S. (2020), InSAR uzaktan algılama tekniği ile aktif heyelanların izlenmesi: Ağcagüney (Samsun) örneği”, Yüksek lisans, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, 25-46.

- Şireci, N. (2021), Konya şehir alanı yüzey deformasyonlarının InSAR yöntemiyle incelenmesi”, Yüksek lisans, *İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, İstanbul, 36.
- 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., Strozzi, T., Werner, C., Wiesmann, A., Benecke, N., Spreckels, V., 2000, Monitoring of mining-induced surface deformation in the Ruhregebiet(Germany), *Proceedings of IGARSS'00*, Hawaii- USA, 2771-2773.
- Wright, T., 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, 46-62.
- Wright, T., Parsons, B. ve Fielding, E., 2001, Measurement of interseismic strain accumulation across the North Anatolian Fault by satellite radar interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, 28(10), 2117-2120.
- Xiong, J., Xiao, R., He, X., 2021, Land surface deformation in Nanchang, China 2018–2020 revealed by multi-temporal InSAR, *Natural Hazards Research*, 1(4), 187-195.
- Yılmaztürk, S. (2015), SBAS-InSAR yöntemiyle düşey yönlü yüzey deformasyonlarının belirlenmesi: Bursa-Orhaneli linyit madeni örneği”, Yüksek lisans, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul,37.
- Zebker,H., 2000, Studying the Earth with interferometric radar, *Computing in Science and Engineering*, 02 (3), 52-60.
- 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.*, 99,617-643.
- Zhou, Y., Stein, A., Molenaar, M., 2003, Integrating interferometric SAR data with levelling measurements of land subsidence using geostatistics, *International Journal of Remote Sensing*, 24 (18), 3547-3563.
- URL1: ESA (European Space Agency), 2006, Radar Satellite Service Checks Stability of Africa's Largest Artificial Hole [online], Kanada, <https://phys.org/news/2006-01-radar-satellite-stability-africa-largest.html> [Ziyaret Tarihi: 15 Ağustos 2014].