

T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**FARKLI BÜYÜKLÜKTEKİ DEPREMLERİN NEDEN OLDUĞU YÜZEY
DEFORMASYONLARININ İN SAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS

Osman FIRAT

OCAK-2025
GÜMÜŞHANE



**T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**FARKLI BÜYÜKLÜKTEKİ DEPREMLERİN NEDEN OLDUĞU YÜZEY
DEFORMASYONLARININ InSAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

**INVESTIGATION OF CRUSTAL DEFORMATIONS CAUSED BY
EARTHQUAKES OF DIFFERENT MAGNITUDE BY MEANS OF InSAR
METHOD**

YÜKSEK LİSANS

Osman FIRAT

**OCAK-2025
GÜMÜŞHANE**



**T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**FARKLI BÜYÜKLÜKTEKİ DEPREMLERİN NEDEN OLDUĞU YÜZEY
DEFORMASYONLARININ InSAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

**INVESTIGATION OF CRUSTAL DEFORMATIONS CAUSED BY
EARTHQUAKES OF DIFFERENT MAGNITUDE BY MEANS OF InSAR
METHOD**

YÜKSEK LİSANS

Osman FIRAT

Danışman: Doç. Dr. Sefa YALVAÇ

**OCAK-2025
GÜMÜŞHANE**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlamış olduğum “**Farklı Büyüklükteki Depremlerin Neden Olduğu YüzeY Deformasyonlarının InSAR Yöntemiyle İncelenmesi**” isimli bu tezimin, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, alıntı yaptığım tüm çalışmaları kaynakçada belirttiğimi ve Gümüşhane Üniversitesi'nin lisanslı kullanıcısı olduğum intihal yazılım programı ile Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlediği kıstaslara uygun olarak raporladığımı taahhüt ederim. Tezimin kâğıt ve elektronik kopyalarının Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü arşivinde saklanmasına izin verdiğimi onaylarım.

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim.

15/01/2025

.....
Osman FIRAT

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bilgi ve deneyimlerinden yararlanma fırsatı bulduğum, her aşamada desteğini esirgemeyen danışman hocam sayın Doç. Dr. Sefa YALVAÇ'a ve eğitim hayatım boyunca bana verdikleri destekten dolayı aileme sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Osman FIRAT
GÜMÜŞHANE – 2025



ÖZET

Yapay Açıklıklı Radar İnterferometri (InSAR) yöntemi deformasyonların belirlenmesinde sıklıkla tercih edilen bir jeodezik tekniktir. Günümüzde, geniş bir uygulama alanına sahip olmasıyla birlikte başta yüzey deformasyonlarının belirlenmesi olmak üzere pek çok çalışmada kullanılmaktadır. Ayrıca geniş bölgeleri etkileyen olayları detaylı bir şekilde inceleme imkânı sağlamaktadır. Depremler geniş alanlara etki eden doğa olayları olduğundan, depremlerin izlenmesinde de sıklıkla başvurulan bu tekniğin farklı büyüklükteki depremlerde izlenebilirliği merak konusudur.

Bu tez çalışmasında, farklı büyüklükteki depremlerin neden olduğu yüzey deformasyonlarının InSAR yöntemiyle izlenebilirliğinin ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, Türkiyenin değişik bölgelerinde yer alan, düşük ($M_w=4.5$, Erzurum-Başaklı), orta ($M_w=5.6$, Denizli-Acıpayam) ve büyük ($M_w=6.8$, Elazığ-Sivrice) şiddetli üç deprem bölgesi seçilmiştir. Söz konusu bölgelerde, Avrupa Uzay Ajansı (ESA: European Space Agency)'ya ait Sentinel uydu verileri elde edilerek Sentinel Uygulama Platformu (SNAP: Sentinel Application Platform) yazılımıyla değerlendirilmiş ve farklı büyüklükteki depremlerin, InSAR yöntemiyle izlenebilirliklerinin ortaya çıkarılması amaçlanmıştır.

Bu kapsamda söz konusu bölgelerde Sentinel-1 uydu verileri elde edilerek SNAP yazılımında değerlendirilmiş ve farklı depremlerin izlenebilirliğinin ortaya koyulması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda analiz sonuçları göstermektedir ki düşük büyüklükteki deprem bölgelerinin InSAR ile izlenebilirliği mümkün olmamakla birlikte, orta ve büyük şiddetli deprem bölgelerinin de etkili izleme kabiliyetine sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Deprem, InSAR, İnterferometri, SNAP, Yüzey Deformasyonu

SUMMARY

Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) is a geodetic technique frequently used for detecting deformations. With its wide range of applications, it is especially utilized for determining surface deformations and studying large-scale events in detail. Since earthquakes are natural phenomena that affect vast areas, InSAR is often employed for monitoring earthquakes. However, the ability of this technique to monitor earthquakes of varying magnitudes is a subject of interest.

This thesis aims to assess the detectability of surface deformations caused by earthquakes of different magnitudes using the InSAR method. For this purpose, three earthquake regions in different parts of Turkey were selected: a low-magnitude earthquake ($M_w=4.5$, Erzurum-Başaklı), a medium-magnitude earthquake ($M_w=5.6$, Denizli-Acıpayam), and a high-magnitude earthquake ($M_w=6.8$, Elazığ-Sivrice). Sentinel satellite data from the European Space Agency (ESA) were analyzed using the Sentinel Application Platform (SNAP) software to evaluate the detectability of these earthquakes with InSAR.

In this context, Sentinel-1 satellite data were utilized and analyzed in SNAP to reveal the monitoring capability for different earthquakes. The results of the analysis indicate that while low-magnitude earthquake regions are not detectable with InSAR, medium and high-magnitude earthquake regions can be effectively monitored using this method.

Keywords: Earthquake, InSAR, Interferometry, SNAP, Surface Deformation

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	III
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI.....	IV
TEŞEKKÜR.....	V
ÖZET.....	VI
SUMMARY	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
TABLolar DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Çalışması.....	2
2. MATERYAL VE YÖNTEM	5
2.1. Radar	5
2.2. Yapay Açıklıklı Radar (SAR).....	7
2.3. Yapay Açıklıklı Radar İnterferometrisi (InSAR).....	12
2.3.1. Atmosferik Hatalar.....	12
2.3.2. Topoğrafik Hatalar	13
2.3.3. Zemine Bağlı Geometrik Hatalar	13
2.3.4. Zemine Bağlı Değişiklikler	14
2.3.5. Yörünge Hataları.....	14
2.3.6. Sinyal Gürültüsü	14
2.3.7. InSAR geometrisi.....	15
3. UYGULAMA	17
3.1. SAR verilerinin işlenmesi	17
3.1.1. Görüntü Temini.....	17
3.1.2. SNAP Yazılımında Yapılan Analizlere Ait Akış Şeması ve İşlem Adımları	18
3.1.2.1. Yörünge Dosyası İndirimi ve Görüntü Küçültme	18
3.1.2.2. İnterferogram Üretme.....	18
3.1.2.3. Faz Bileşenlerinin ve Gürültülerin Giderilmesi	19
3.1.2.4. Görüntüdeki Karışıklıkları Giderme	19
3.1.2.5. Yer Değiştirmelerin Tespiti.....	20
3.2. Erzurum-Başaklı Depremi (Mw=4.5).....	20

3.2.1. Erzurum-Başaklı Depremi İçin InSAR Analizlerinin Gerçekleştirilmesi.....	21
3.3. Denizli-Acıpayam Depremi (Mw=5.6).....	23
3.3.1. Denizli-Acıpayam Depremi İçin InSAR Analizlerinin Gerçekleştirilmesi	24
3.4. Elazığ-Sivrice Depremi (Mw=6.8)	27
3.4.1. Elazığ-Sivrice Depremi İçin InSAR Analizlerinin Gerçekleştirilmesi	28
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	31
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	33
KAYNAKÇA	34
ÖZGEÇMİŞ	40



TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. Erzurum-Başaklı depremi Sentinel-1 görüntü detayları	21
Tablo 2. Denizli-Acıpayam depremi Sentinel-1 görüntü detayları.....	24
Tablo 3. Elazığ-Sivrice depremi Sentinel-1 görüntü detayları.....	28
Tablo 4. ELAZ İstasyonundaki yer değiştirme miktarları (mm)	30



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. RAR (sol görüntü) ve SAR (sağ görüntü) sistemleri	6
Şekil 2. Elektromanyetik spektrum	6
Şekil 3. Dalga boylarının nesne üzerine etkisi	7
Şekil 4. RAR (solda) ve SAR (sağda)	8
Şekil 5. Arazi noktası görüntülemesi	8
Şekil 6. SAR sistemi görüntü alma geometrisi	9
Şekil 7. Eğik mesafeler	10
Şekil 8. Eğik mesafe ve yer mesafesi arasındaki ilişki	11
Şekil 09. InSAR geometrisi. Birinci görüntü alımı (B, t_1), İkinci görüntü alımı (I, t_2), R _I -R _B ; uydu ve obje mesafesi	15
Şekil 10. SAR görüntüsünün kapsadığı alan (yeşil kısım), alt çerçeveler (IW-1, IW2, IW3), çalışma yan kolonları (burst) (siyah dikdörtgenler)	17
Şekil 11. SNAP yazılımında 1. Adım işlemlerini gösteren diyagram.....	18
Şekil 12. SNAP yazılımında İnterferogram üretim aşamalarını gösteren diyagram.....	18
Şekil 13. SNAP yazılımında gürültülerin giderilmesi ve SnaphuExport aşamalarını gösteren diyagram.....	19
Şekil 14. SNAP yazılımında görüntüdeki karışıklıkları giderme ve SnaphuImport aşamalarını gösteren diyagram	20
Şekil 15. Erzurum-Başaklı (Mw=4.5) depreminin lokasyon haritası	21
Şekil 16. Erzurum-Başaklı deprem bölgesi için yükselen mod (a) ve alçalan mod (b) kullanılarak elde edilen interferogramlar	22
Şekil 17. Erzurum-Başaklı deprem bölgesi için yükselen mod (a) ve alçalan mod (b) kullanılarak elde edilen çözülmüş interferogramlar	22
Şekil 18. Erzurum-Başaklı deprem bölgesi için yükselen mod (a) ve alçalan mod (b) kullanılarak elde edilen yer değiştirme haritaları.....	23
Şekil 19. Denizli-Acıpayam (Mw=5.6) depreminin lokasyon haritası	23
Şekil 20. Denizli-Acıpayam deprem bölgesi için yükselen mod (a) ve alçalan mod (b) kullanılarak elde edilen interferogramlar	24
Şekil 21. Denizli-Acıpayam deprem bölgesi için yükselen mod (a) ve alçalan mod (b) kullanılarak elde edilen çözülmüş interferogramlar	25
Şekil 22. Denizli-Acıpayam deprem bölgesi için yükselen mod (a) ve alçalan mod (b) kullanılarak elde edilen yer değiştirme haritaları.....	25

Şekil 23. TVAS istasyonu X koordinatının beş günlük zaman serisi	26
Şekil 24. TVAS istasyonu Y koordinatının beş günlük zaman serisi	26
Şekil 25. TVAS istasyonu Z koordinatının beş günlük zaman serisi.....	27
Şekil 26. Elazığ-Sivrice (Mw=6.8) depreminin lokasyon haritası.....	27
Şekil 27. Elazığ-Sivrice deprem bölgesi için yükselen mod (a) ve alçalan mod (b) kullanılarak elde edilen interferogramlar	28
Şekil 28. Elazığ-Sivrice deprem bölgesi için yükselen mod (a) ve alçalan mod (b) kullanılarak elde edilen çözülmüş interferogramlar	29
Şekil 29. Elazığ-Sivrice deprem bölgesi için yükselen mod (a) ve alçalan mod (b) kullanılarak elde edilen yer değiştirme haritaları.....	29



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

cm	: Santimetre
DEM	: Digital Elevation Model (Sayısal Yükseklik Modeli)
ERS	: European Remote Sensing
ESA	: European Space Agency (Avrupa Uzay Ajansı)
GHz	: Gigahertz
GNSS	: Küresel Navigasyon Uydu Sistemi
InSAR	: Yapay Açıklıklı Radar İnterferometrisi
IW	: Interferometric Wide
JERS	: Japanese Earth Resources Satellite
km ²	: Kilometrekare
LIDAR	: Light Detection and Ranging (Işın Algılama ve Mesafe Ölçme)
m	: Metre
MHz	: Megahertz
mm	: Milimetre
QGIS	: Quantum Geographic Information System
Radar	: Radio Detection and Ranging
RAR	: Gerçek Açıklıklı Radar
SAR	: Yapay Açıklıklı Radar
SLC	: Single Look Complex
SNAP	: Sentinel Application Platform
SNAPHU	: Statistical-cost Network-flow Algorithm for Phase Unwrapping
v.d.	: Ve diğerleri
V.V	: Vertical-Vertical

1. GİRİŞ

Depremler yüzey deformasyonlarının oluşmasında etkin rol oynayan jeofiziksel olaylardır. Ani gelişen bu doğa olayı, yer kabuğunda ve dolayısıyla yer kabuğuyla bütünleşik olan mühendislik yapılarının tahrip olması sonucu can ve mal kayıplarına neden olmaktadır. Bu durum depremlerin jeodezik olarak izlenmesi ve gelecek projeksiyonların üretilmesini zorunlu kılmaktadır. Jeodezide teknolojik imkanların el verdiği ölçme ve değerlendirme yöntemleriyle depremlerin izlenmesi yıllardır süre gelen bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Depremler nedeniyle meydana gelen deformasyonların takibi yersel yöntemlerle yapılabildiği gibi uzay bazlı yöntemlerle de yapılabilmektedir.

Deformasyonların izlenmesi tarihsel olarak incelendiğinde 2000’li yıllardan önce doğrultu-kenar ölçmeleri ve nivelman gibi klasik yersel yöntemler yardımıyla yapıldığı görülmektedir (Poland ve Davis., 1969; Poland., 1984; Yalvaç., 2016). 2000’li yıllardan itibaren, uydu teknolojilerinin etkin olarak kullanılmasıyla beraber, geniş alanlarda yapılması planlanan çalışmalarda büyük iş gücü ve yüksek maliyete sebep olan klasik yersel yöntemler yerini hassasiyeti daha fazla olan Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (GNSS: Global Navigation Satellite Systems)’e bırakmıştır (Feigl vd., 1993; Abidin vd., 2008; Üstün vd., 2010; Yalvaç., 2016). Sonraki dönemlerde ise Işın Algılama ve Mesafe Ölçme (LiDAR: Light Detection and Ranging) ve Yapay Açıklıklı Radar İnterferometri (InSAR: Interferometric Synthetic Aperture Radar) gibi uzaktan algılama yöntemlerinin büyük çaplı alansal çalışmalarda getirdiği avantajlar araştırmacıları bu sistemleri kullanmaya yöneltmiştir (Baer vd., 2002; Schmidt ve Bürgmann., 2003; Galloway ve Burbey., 2011; Yalvaç., 2016). Özellikle depremlerin neden olduğu deformasyonların belirlenmesinde, kısa tekrarlı geçiş süresi ve binlerce km²’lik alanlarda yüksek çözünürlüklü deformasyon bilgisi sunan InSAR yönteminin son yıllarda sıklıkla tercih edildiği görülmektedir (Purba vd., 2024; Kobayashi vd., 2024).

InSAR yöntemi, sunduğu yüksek çözünürlüğün yanı sıra istenilen zaman dilimi içerisinde yeryüzünde meydana gelen deformasyonların izlenmesine olanak tanımaktadır (Akoglu, 2001). Tüm bunlara ek olarak arazi çalışmasına ihtiyaç duymaması ve veriye açık erişim sağlaması sayesinde ekonomik bir yöntem olup,

volkan ya da heyelan gibi güvenlik riski yüksek alanlara fiziksel erişim zorunluluğunu ortadan kaldırarak önemli avantajlar sunar. (Akoglu, 2001).

Literatürde InSAR yöntemi ile yapılan çalışmalar incelendiğinde, daha çok yerkabuğu deformasyonlarının izlenmesi ile ilgili çalışmalar olduğu görülmektedir. Gabriel vd. (1989), tarafından yapılan çalışma bu alanda yapılan ilk çalışmadır. Bu çalışmada, Kaliforniya'nın Imperial Vadisinde arazinin seçmeli olarak sulanması sebebiyle oluşan yer kabarmasını Seasat uydusunun L-bandı radar sistemi görüntüleri ile belirlenmiştir. Fakat 1992 Landers depremi sonucunda oluşan yer hareketlerinin haritalanması (Massonnet vd., 1993; Zebker vd., 1994) ve Antartika'daki Rutford buzul akıntısındaki buzulların hareketlerinin araştırılmasına kadar (Goldstein vd., 1993) SAR prosedürünün jeodezik bir araç olarak yüksek fayda sağladığı yer bilimciler tarafından fazla anlaşılmamıştır. Landers depremiyle birlikte Yapay Açıklıklı Radar (SAR: Synthetic Aperture Radar) yöntemini kullanan jeologların sayısı artmış ve SAR sistemleri uydu platformlarına kurularak uzaya gönderilmeye başlanmıştır. Bununla birlikte izleme ve çok daha geniş alanlarda veri elde etme mümkün hale getirilmiştir (Horasan, 2013).

InSAR tekniğinin popüler hale gelmesiyle birlikte farklı uzay misyonları tarafından SAR sistemleri yakın yörüngelere fırlatılmıştır. Bunların başında Avrupa Uzay Ajansı (ESA: European Space Agency)'ya ait European Remote Sensing (ERS-1) uydusu yer almaktadır. ERS-1'in piyasaya sürülmesiyle interferometriye uygun yüksek miktarda SAR veri setleri daha rahat elde edilebilir hale getirilmiştir (Horasan, 2013). ERS-1'in 1991'de piyasaya sürülmesinden bu zamana kadar, depremlerin dünya yüzeyinde neden olduğu deformasyonların InSAR yöntemi ile izlenimi yaygın olarak devam etmektedir (Massonnet ve Feigl, 1998). Ayrıca Japonya'nın Japanese Earth Resources Satellite (JERS), Kanada'nın Radarsat uyduları ve SIR-C / X-SAR mekik uçuşlarından erişilen radar görüntüleri ile depremler, volkanlar, buzullar, yer kaymaları, yeryüzündeki çökmeler ve levha sınırlarındaki deformasyonlar gibi pekçok konuda çalışmalar yapılmış ve günümüzde de araştırmalar yapılmaya devam edilmektedir (Purba vd., 2024; Kobayashi vd., 2024).

1.1. Literatür Çalışması

Ulusal ve uluslararası ölçekte, InSAR yöntemiyle gerçekleştirilen birçok yüzey deformasyonu çalışmasına rastlamak mümkündür (Bignami vd., 2020; Ganas vd., 2020;

Şentürk, 2020). Bu çalışmalardan büyük bir kısmı doğrudan deprem kaynaklı hareketlerin (ko-sismik aktivitenin) izlenmesi ile ilgiliyken, küçük bir kısmı ise (pre-sismik veya post sismik) deprem öncesi ya da deprem sonrası aktivitelerin izlenmesi ile ilgilidir (Amarjargal vd., 2012; Wen vd., 2012; Tolomei vd., 2014). Tarihsel olarak çalışmalar incelendiğinde InSAR yöntemi ile gerçekleştirilen ilk deprem çalışması 1992 yılında Landers (Kaliforniya) depremi ile olmuştur (Massonnet vd., 1993; Zebker vd., 1994). Daha sonra Bürgmann vd. (2000) Hayward Fayındaki asismik deformasyonu da InSAR yöntemi ile incelenmiştir. Ülkemizde yapılan ilk çalışmada ise Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun doğu kesiminde birikmiş olan gerinim, Wright vd. (2001) tarafından belirlenmiştir. Bu çalışmalara ek olarak ülkemizde ve uluslararası ölçekte yapılan çalışmalar aşağıdaki paragraflar da özetlenmiştir.

Ko-sismik deformasyon çalışmalarına örnek olarak ERS-1/2 uydu görüntülerinden faydalanarak 1995 Dinar depreminin incelenmesi (Wright vd., 1999), ERS-1/2 uydu görüntülerinden faydalanılarak 1999 Kocaeli depreminin incelenmesi (Wright vd., 2001), ERS-1/2 uydu görüntülerinden yararlanılarak 1999 Düzce depreminin incelenmesi (Bürgmann vd., 2002) ve ERS-1/RADARSAT-1 uydu görüntülerinden yararlanılarak 1999 Kocaeli depreminin incelenmesi çalışmaları gösterilebilir (Feigl vd., 2002).

Peyret (2008), Zagros bindirme kuşağında 2005 yılında meydana gelen ($M_w=4,9$) büyüklüğündeki deprem ve Chalan-Chulan da 2006 yılında meydana gelen ($M_w=6.1$) büyüklüğündeki depremlerin deformasyonu ve kinematığı InSAR yöntemiyle belirlemiştir.

6 Nisan 2009'da İtalya'nın Abruzzo bölgesindeki orta şiddette bir deprem ($M_w=6.3; M_l= 5.8$) gerçekleşmiştir ve bu deprem 250'den fazla ölüme ve köylerde yıkıma sebep olmuştur. Guerrieri vd. (2010) tarafından yapılan bu çalışmada orta şiddetteki depremler ile ilişkili olan yüzey faylanma modelleri ile InSAR tekniğinin izleme kabiliyetini test etmek amaçlanmıştır. Elde edilen InSAR verileri orta şiddetteki bir depremin o zamana kadarki en iyi veri setini oluşturduğu tespit edilmiştir. InSAR tekniği 1 km' yi aşan ve birkaç cm'den daha büyük yer değiştirmeleri tespit etmek için yararlı görülmüştür.

2006 yılında 1999 İzmit depreminin ($M_w=7.4$) neden olduğu faya yakın bölgedeki ko-sismik yüzey deformasyonları InSAR tekniği ile incelenmiştir (Yariv Hamiel ve Yuri Fialko., 2006).

Bos vd. (2004), GNSS ve InSAR verilerinin ortak analizinden 17 Ağustos 1999 İzmit depreminin kosismik yüzey deformasyonu, gerinimi, dönme ve fay kayması analiz edilmiştir.

Fang vd. (2019), 28 Eylül 2018'de Filipin Denizi, Avustralya ve Sunda plakalarının yakınsadığı üçlü bir bağlantı bölgesinde Palu'da $M_w=7.5$ olan bir deprem meydana gelmiştir. Yapılan çalışmada gerçekleşen depremin kaynak geometrisini ve kırılma kinematığını tespit etmek için InSAR verileri bölgesel sismogramlarla birlikte kullanılmıştır.

Zhang vd. (2017), 2015 yılında meydana gelen Şili Illapel depreminin ($M_w=8.3$) yüzey deformasyonu Sentinel-1 yörüngelerinin alçalan ve yükselen modunda elde edilen SAR görüntüleri yardımıyla interferogramlar üretilerek incelenmiştir. Başarıyla InSAR yöntemiyle izlenen bu depremde Nazca ve Güney Amerika plakaları arasında beklenen depremin sağ yanal doğrultu atımlı olduğu tespit edilmiştir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, yapılan çalışmaların çoğunun büyük şiddetli depremleri incelediği görülmektedir. Orta ve düşük şiddetli depremleri inceleyen çalışmaların sayısı oldukça azdır.

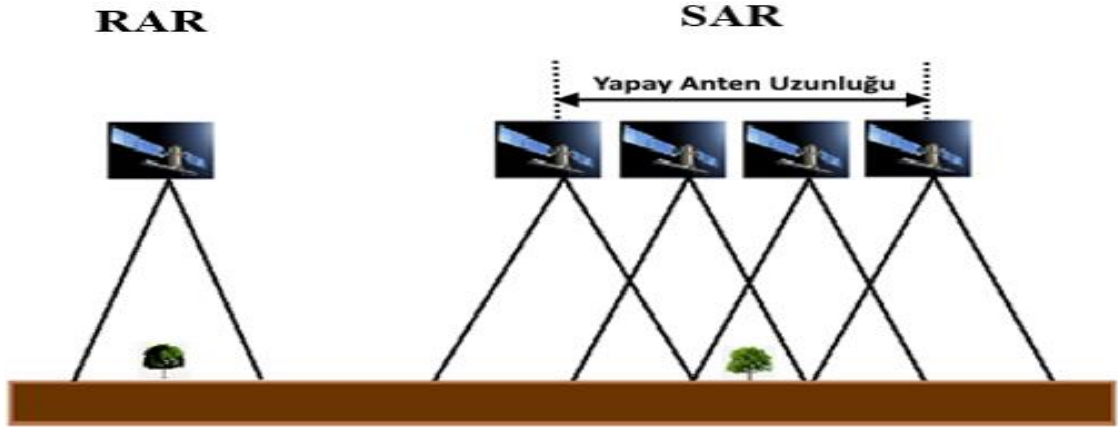
2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, depremler nedeniyle oluşan yüzey deformasyonlarının belirlenmesinde kullanılması planlanan SAR yöntemi ve temel esasları ele alınacaktır.

2.1. Radar

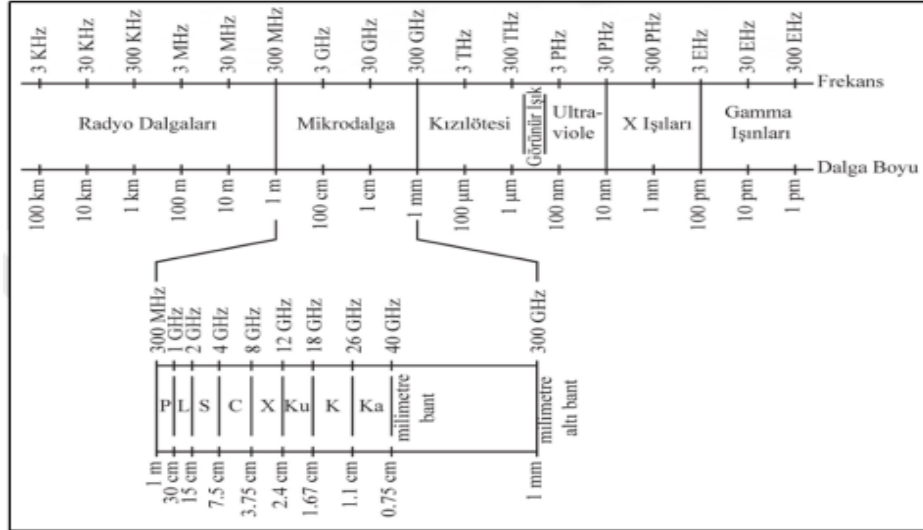
Radio Detecting and Ranging (Radar) kelime anlamı olarak, radyo dalgaları kullanılarak saptama ve mesafe belirleme demektir. Bu teknikte, yeryüzündeki algılanacak olan objeye gönderilen elektromanyetik dalgaların geri dönüşleri algılanarak (ışık hızının gidiş-dönüş süresiyle ölçülerek) radar ile obje arasındaki mesafe belirlenir. Aynı zamanda algılanan objeden yansıyan sinyalin özellikleri izlenerek, objenin boyutu ve yüzey özellikleri hakkında da bilgi elde edilebilmektedir (Görken, 2017).

Bu tekniğin tarihçesinden kısaca bahsedecek olursak Radar üzerine yapılan ilk çalışmaların temeli 1870’li yıllarda atılmıştır ve 1880’li yıllarda Alman fizikçi Heinrich Rudolf Hertz radyo dalgalarının kullanılabilirliğini ispatlamıştır (Hanssen, 2001). 1950’li yıllarda ise Gerçek Açıklıklı Radar (RAR: Real Aperture Radar) sistemleri kullanılmaya başlanmıştır. Bu sistemlerde çözünürlük, anten boyutuyla doğru orantılı olarak değişmekteydi. Ancak anten boyutunu artırmanın pratikte sınırlı olması, bilim insanlarını Yapay Açıklıklı Radar yöntemine yöneltmiştir. SAR sistemleri, fiziksel anteni büyütmek yerine, uydunun uçuş doğrultusu boyunca kaydettiği bağımsız sinyalleri matematiksel olarak birleştirerek çalışır. Bu yöntem, Gerçek Açıklıklı Radar sistemlerinden farklı olarak, defalarca veri toplayarak daha yüksek çözünürlük elde edilmesini sağlar. Ayrıca gece-gündüz, olumsuz hava koşullarından fazlaca etkilenmeksizin çok daha geniş alanlarda algılama yapabilmektedir (Yalvaç, 2021). RAR ve SAR sistemleri Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. RAR (Sol görüntü) ve SAR (Sağ görüntü) sistemleri (Çomut, 2016)'dan uyarlanmıştır

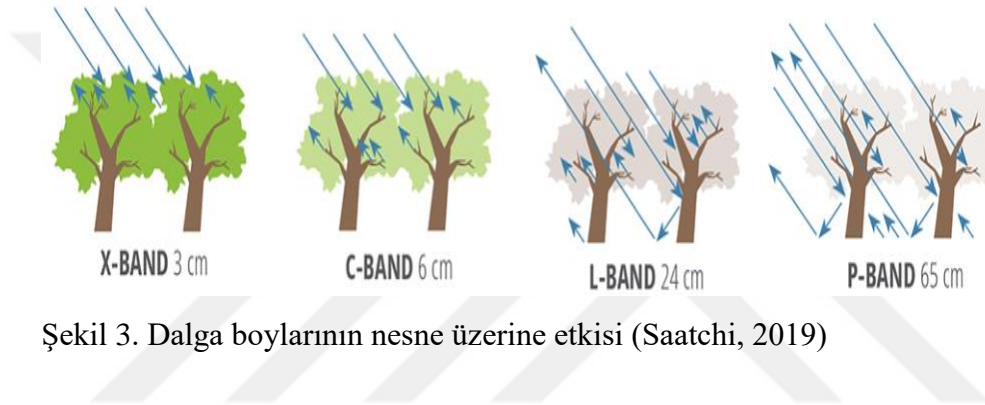
Radar sistemleri, mikrodalga sinyallerini göndermek ve geri yansıyan sinyalleri algılamak için aynı radar antenini kullanır. Bu anten, 300 Megahertz (MHz) ila 30 Gigahertz (GHz) frekans aralığında, 1 cm ile 1 m arasında değişen dalga boylarına sahip mikrodalga sinyallerini algılama yapılacak bölgeye gönderir ve geri yansıyan sinyalleri alır (Curlander, 1991). Ayrıca bu sistemler, elektromanyetik spektrumun mikrodalga kısmındaki farklı dalga boylarında algılama yapabilen radar bantlarını kullanır (Görken, 2017). Radar bantları ve bunlara karşılık gelen frekans aralıkları Şekil 2'de detaylandırılmıştır.



Şekil 2. Elektromanyetik spektrum (Poazar, 2004)

Şekil 2'de gösterilen mikrodalga bant türleri, farklı disiplinlerde ve çalışma alanlarında geniş bir kullanıma sahiptir. Örneğin, C, X ve Ku bantları orta dalga boyuna ve yüksek çözünürlüğe sahiptir; bu nedenle bitki örtüsü ve jeodezik çalışmalar gibi

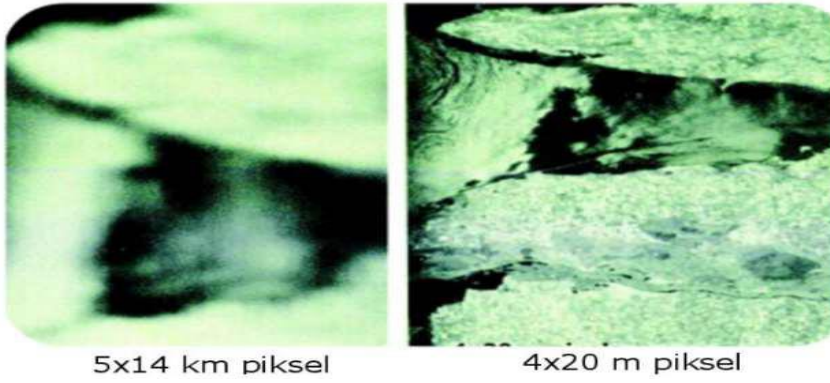
küçük cisimlerin algılanmasında yaygın olarak kullanılır. Ka bandı ise kısa dalga boyuna sahip olduğundan, yağmur damlaları gibi çok daha küçük cisimlerin algılanmasında etkilidir. P, L ve S bantları ise uzun dalga boylarına sahip olup, çözünürlükleri düşüktür. Bu özelliklerinden dolayı jeolojik yüzeyler gibi büyük ölçekli yapıların algılanmasında kullanılır. Farklı dalga boyları ve bantların kullanılmasının temel sebebi, dalga boylarının nesnelere geçme ya da geçememe (penetrasyon) özelliklerini değiştirebilmesidir. Örneğin, uzun dalga boyuna sahip L bandı, nesnelere içinden geçerek yer yüzeyine kadar ulaşabilirken, kısa dalga boyuna sahip X bandı, çarptığı nesneden direkt olarak geri yansır (Bovenga, 2020). Bu özellikler Şekil 3'te detaylı bir şekilde gösterilmiştir.



Şekil 3. Dalga boylarının nesne üzerine etkisi (Saatchi, 2019)

2.2. Yapay Açıklıklı Radar (SAR)

SAR sistemleri çeşitli mikrodalga frekans ve bantlarda çalışan aktif bir uzaktan algılama yöntemidir (Elachi vd., 1988). Bu yöntem uçağa veya uyduya yerleştirilmiş şekilde elektromanyetik dalgalar gönderir ve yeryüzündeki nesnelere geri yansıyan bu dalgaların faz ve genliklerini kayıt altına alır. Bu durumda SAR sistemi karmaşık sayılardan meydana gelen görüntüler oluşturur (Şengün, 2009). SAR sisteminde anten yörüngede ilerledikçe sürekli veri alır ve bu verileri matematiksel olarak birleştirir. Bu şekilde görüntünün çözünürlük anlamında iyileştirilmesini sağlar. Bu durum çözünürlük olarak SAR sisteminin RAR sisteminden farkını ortaya koyar. RAR-SAR görüntülerindeki çözünürlük farkı aşağıda Şekil 4'te gösterilmiştir.

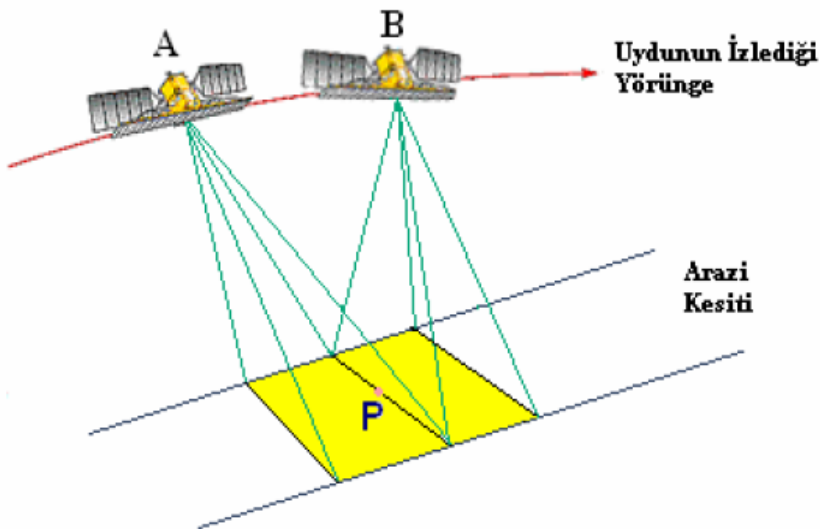


Şekil 4. RAR (solda) ve SAR (sağda) (Massonet ve Feigl, 1998)

RAR sistemleri fiziksel anten kullanırken bu anten yardımıyla ulaşılan çözünürlük formülü aşağıda verilen eşitlikle hesaplanmaktadır.

$$R_{\alpha} = \frac{H \lambda}{\cos \theta d} \quad (\text{Eşitlik 1})$$

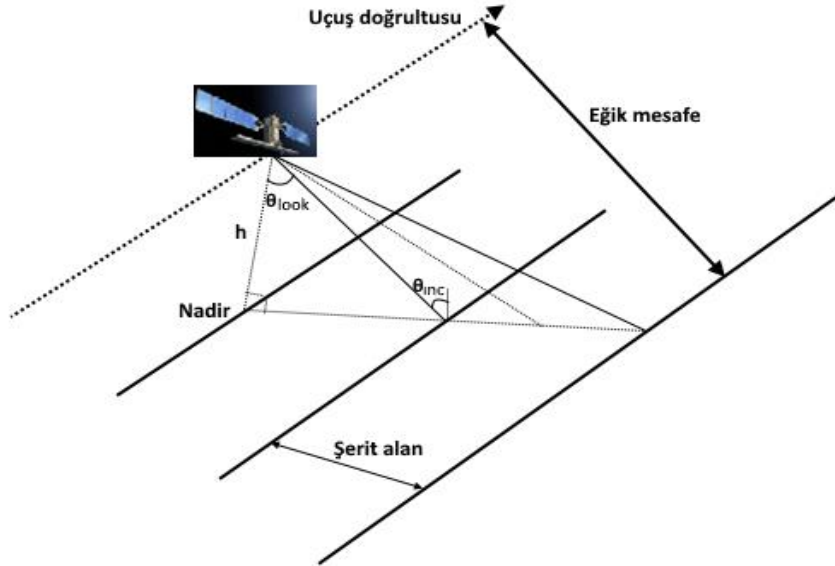
Bu eşitlikte, H sensör yüksekliği, θ yayınlanan sinyalin düşey doğrultu ile arasındaki açıyı, λ yayınlanan sinyalin dalga boyunu, d fiziksel anten uzunluğunu ifade eder (Çomut, 2016). Yukarıda gösterilen formül incelendiğinde mekansal çözünürlüğün anten boyutuyla ilişkili olduğu görülmektedir (Yalvaç, 2021). Uydu sistemlerinde anten uzunluğu konusundaki sınırlılık durumu SAR sistemlerinin geliştirilmesini ve araştırmaların bu sisteme yönelmesini sağlamıştır. SAR sisteminin arazi noktasından görüntü alma prensibi Şekil 5'te gösterilmiştir;



Şekil 5. Arazi noktası görüntülemesi (Köse, 2006)

Şekil 5'te ki P arazi noktası, radarın A noktasından başlayarak B noktasına kadar taranarak görüntülenmektedir. Bu sayede radarın A noktasından B noktasına hareketi süresince P noktası birçok farklı konumdan algılanmış olur (Köse, 2006).

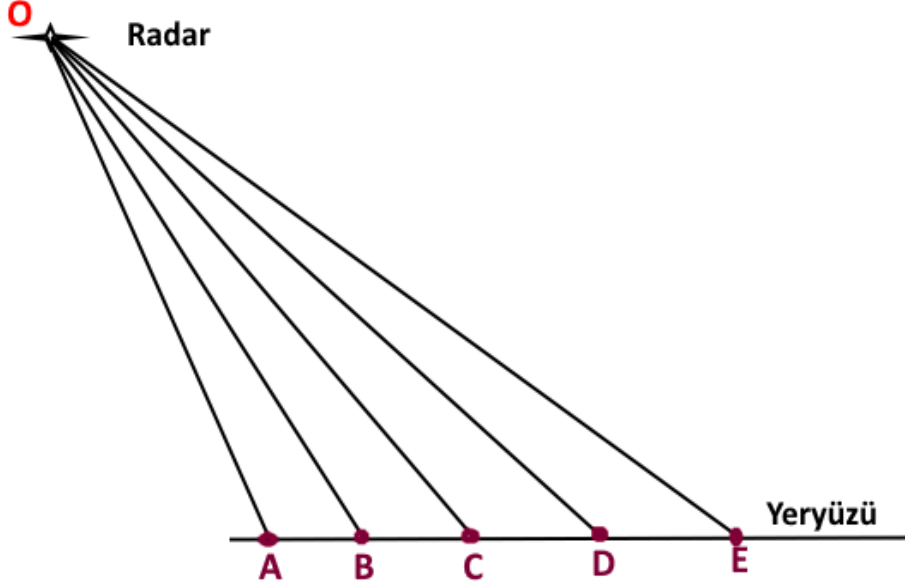
SAR sistemi, yeryüzü olaylarının detaylı bir şekilde incelenmesi için önemli bir araçtır ve bu süreçte SAR geometrisinin anlaşılması kritik bir rol oynar. SAR geometrisi, radar antenin yeryüzü ile olan konumunu, radar ışınının yönünü ve antenin hareketini dikkate alarak çalışır. Bu geometri, yüzeyden gelen yansımaların doğru bir şekilde algılanmasını sağlamak için antenin yerleşimine ve hareketine bağlı olarak tasarlanmıştır. SAR sistemleri, bu prensipleri kullanarak yüksek hassasiyetli görüntüler oluşturur ve yüzeydeki nesnelerin yapısal özelliklerini anlamaya olanak tanır. SAR sisteminin görüntüleme prensibi, Şekil 6'da detaylı bir şekilde sunulmaktadır.



Şekil 6. SAR sistemi görüntü alma geometrisi (Yalvaç, 2021)'den uyarlanmıştır

Şekilde görülen θ_{look} SAR uydusunun yeryüzüne bakış yaptığı açıdır. Eğik mesafe, uydu ile algılanan obje arasındaki mesafedir. Şerit alan ise uydunun görüntü alma işlemi boyunca taradığı alandır. Elektromanyetik sinyalle uydunun geliş açısıyla elipsoit normali arasındaki açı θ_{inc} olarak ifade edilmiştir. SAR uydusu bu görüntü alma prensibiyle sinyalleri şerit alana gönderip geri alarak veriyi matematiksel olarak kaydeder ve görüntüleri oluşturur (Çomut, 2016). Radar verisinin gösterimi eğik mesafe radar görüntüsü ve yer mesafesi radar görüntüsü olarak iki şekilde karşımıza çıkar. Eğik mesafe radar görüntüsü, radar anteni ile yeryüzündeki hedef noktası arasındaki mesafeyi ölçen görüntüdür (Köse, 2006). Yer mesafe radar görüntüsü ise radar sensörünü taşıyan

platformun yer izi ile hedef noktası arasındaki mesafelerin ölçüldüğü ve seçilen referans düzlemine uygun bir pozisyonda yerleştirildiği görüntüdür (Köse, 2006). SAR sensörü tarafından ölçülen eğik mesafeler Şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 7. Eğik mesafeler (Köse, 2006)’dan uyarlanmıştır

Şekil 7’de görülen O noktası radar sensörünü, A, B, C, D, E noktaları ise yeryüzü noktalarını belirtmektedir. Yeryüzü üzerinde \overline{AB} , \overline{BC} , \overline{CD} , \overline{DE} mesafeleri eşittir. Noktalar ile radar anteni arasındaki mesafeler $\overline{OA} < \overline{OB} < \overline{OC} < \overline{OD} < \overline{OE}$ olarak karşımıza çıkar. Eğik mesafe radar görüntüsünde ise yeryüzündeki bu noktalar arasındaki mesafeler aşağıda sunulan eşitliklerle hesaplanmaktadır.

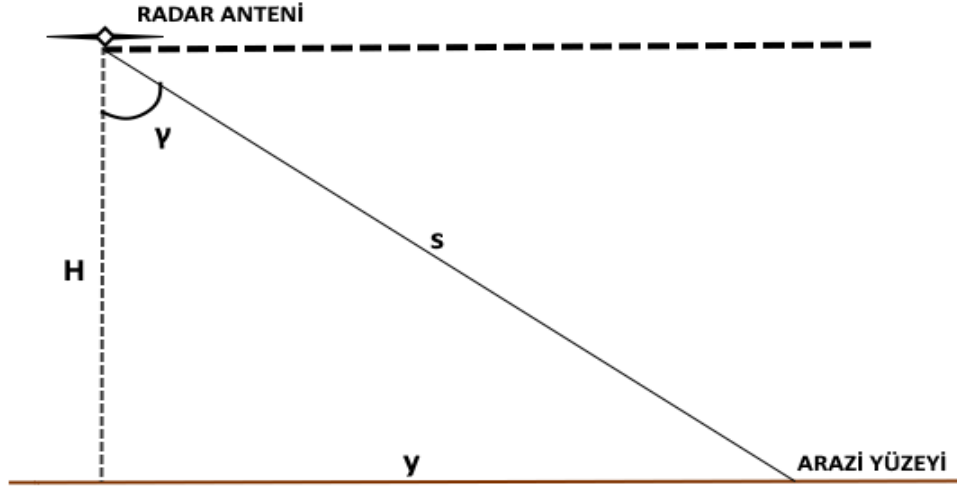
$$\overline{AB} = \overline{OB} - \overline{OA} \quad (\text{Eşitlik 2})$$

$$\overline{BC} = \overline{OC} - \overline{OB} \quad (\text{Eşitlik 3})$$

$$\overline{CD} = \overline{OD} - \overline{OC} \quad (\text{Eşitlik 4})$$

$$\overline{DE} = \overline{OE} - \overline{OD} \quad (\text{Eşitlik 5})$$

Dolayısıyla radar görüntüsü üzerindeki mesafeler $\overline{AB} < \overline{BC} < \overline{CD} < \overline{DE}$ şeklinde olmaktadır. Eğik mesafe ve yer mesafesi arasındaki matematiksel ilişki Şekil 8’de görülmektedir.



Şekil 8. Eğik mesafe ve yer mesafesi arasındaki ilişki (Canaslan, 2010)'dan uyarlanmıştır

Şekil 8'de radar antenin yüksekliği H, eğik mesafe s, arazi mesafesi y, radar bakış açısı γ olarak gösterilmiştir. Bu şekilden yararlanılarak elde edilen matematiksel formül aşağıdaki eşitlikte verilmiştir.

$$s^2 = H^2 + y^2 \quad (\text{Eşitlik 6})$$

$$\sin \gamma = \frac{y}{s} \quad (\text{Eşitlik 7})$$

Bu bağıntılar yardımıyla eğik mesafe verileri arazi mesafesi verilerine dönüştürülebilmektedir.

SAR sistemlerinden alınan görüntünün temel yapı taşı olan piksel, genlik ve faz bilgilerini içermektedir. Genlik bilgisi, radar sinyalinin yansıdığı nesnenin yüzey özellikleri, pürüzsüzlük durumu ve yansıtıcılığı hakkında önemli veriler sunar. Faz bilgisi ise, radar sinyalinin hedefteki nesneye ulaşma süresine bağlı olarak, nesnenin konumu ve uzaklığı ile ilgili kritik bilgilerin elde edilmesini sağlar. Bu iki bileşen bir araya gelerek SAR görüntülerinin yüksek çözünürlükte ve detaylı bir şekilde analiz edilmesine olanak tanır (Çomut, 2016).

SAR sistemlerinden elde edilen genlik ve faz bilgileri, aynı zamanda yüzey analizleri ve nesnelerin hareketlerinin izlenmesi için de kritik bir veri kaynağı oluşturmaktadır. Bu veriler, özellikle farklı zaman dilimlerinde alınan SAR

görüntülerinin karşılaştırılmasıyla, yüzey deformasyonlarının hassas bir şekilde tespit edilmesini mümkün kılar. İşte bu noktada, SAR teknolojisinin bir uzantısı olan InSAR, yüzey hareketlerini ve deformasyonları incelemek için güçlü bir araç olarak devreye girer. InSAR yöntemi, faz bilgilerinin interferometrik analiziyle yüksek doğrulukta sonuçlar sağlayarak, jeolojik ve çevresel araştırmalar gibi birçok alanda geniş uygulama alanı bulmaktadır (Ferretti vd., 2007).

2.3. Yapay Açıklıklı Radar İnterferometrisi (InSAR)

Yapay Açıklıklı Radar İnterferometrisi (InSAR), radar dalgalarını kullanarak yeryüzündeki hareketleri milimetre düzeyinde hassasiyetle ölçen bir uzaktan algılama yöntemidir. Bu yöntem, aynı bölgenin farklı zamanlarda alınan SAR görüntülerinin analizine dayanır. Görüntüler arasındaki faz farklılıklarını gösteren görüntülere interferogram denir ve bu analiz yöntemi interferometri veya girişim olarak adlandırılır (Yalvaç, 2021). InSAR, özellikle yer kabuğundaki küçük hareketlerin izlenmesi ve takip edilmesinde etkili bir araçtır.

Radar interferometrisi, tek geçiş interferometri ve tekrar geçiş interferometri olmak üzere iki ana şekilde uygulanır (Yalvaç, 2021). Tek geçiş interferometrisinde aynı platformda iki anten bulunur, oysa tekrar geçiş interferometrisinde tek bir anten kullanılır. Özellikle jeodezide deformasyonların tespiti için yaygın olarak tercih edilen tekrar geçiş interferometri yöntemi, yüzey hareketlerini hassas bir şekilde ölçmesi ve diğer hava araçlarına göre daha istikrarlı sonuçlar sağlaması nedeniyle öne çıkar (Çakır, 2003; Deguchi, 2006). Bununla birlikte, tekrar geçiş interferometri yöntemi bazı hata kaynaklarına duyarlıdır. Radar sinyallerinin farklı atmosferik koşullarda toplanması nedeniyle oluşan interferogramlar, çeşitli hatalar barındırabilir. Bu hatalar arasında atmosferik etkiler, topografik hatalar, zemine bağlı geometrik hatalar, yüzey değişiklikleri, yörünge hataları ve sinyal gürültüsü yer almaktadır (Görken, 2017). Bu durum, interferometrik analizlerin yorumlanmasında dikkat edilmesi gereken önemli bir faktördür.

2.3.1. Atmosferik Hatalar

Atmosferik hatalar, radar sinyallerinin atmosferdeki değişkenliklerden, özellikle nem ve sıcaklıktan etkilenmesi sonucunda meydana gelir (Massonet vd., 1998; Ferretti vd., 2007). Bu hatalar, aşağıdaki 3 farklı durumla bağlantılıdır:

İnterferogram Oluşumu

Radar sinyalleri atmosferdeki farklı katmanlardan geçerken, sinyallerin hızı ve fazı değişiklik gösterir. Bu durum, elde edilen interferogramda (iki görüntü arasındaki faz farkı) hatalara neden olabilir.

Nem ve Sıcaklık Değişiklikleri

Atmosferdeki nem oranı ve sıcaklık değişiklikleri, radar sinyallerinin yayılma hızını etkiler. Örneğin, nemli havalarda radar sinyalleri daha yavaş hareket eder, bu da faz kaymalarına yol açabilmektedir.

Troposfer ve İyonosfer Etkileri

Troposfer, radar sinyallerinin geçişini en çok etkileyen atmosfer katmanıdır. İyonosfer ise yüksek frekanslı radar sinyallerinde faz kaymalarına yol açabilir; ancak genellikle InSAR uygulamalarında etkisi daha düşüktür. Atmosferik hataların etkilerini azaltmak için modelleme, uzaktan algılama teknolojileri ve istatistiksel analiz gibi çeşitli yöntemlerden faydalanılabilir. Sonuç olarak, atmosferik hatalar InSAR uygulamalarında dikkate alınması gereken önemli bir problemdir. Bu hataların etkili bir şekilde yönetilmesi, doğru analizler yapmak ve güvenilir sonuçlar elde etmek açısından son derece kritik bir rol oynamaktadır.

2.3.2. Topografik Hatalar

Yüksek çözünürlüklü Sayısal Yükseklik Modeli (DEM) eksikliği veya yanlış kullanımı, topografik hatalardan kaynaklanan yanlışlıklara yol açabilmektedir. Özellikle dağlık bölgelerde yüksekliği doğru modelleyememek faz kaymalarına neden olmaktadır (Hanssen, 2001).

2.3.3. Zemine Bağlı Geometrik Hatalar

Radar sinyalinin yüzeye etkileşime girmesi sırasında geometrik hatalar ortaya çıkabilir. Özellikle engebeli arazilerde, gölgeleme ve layover gibi geometrik etkiler, verilerin eksik toplanmasına yol açabilmektedir (Massonnet ve Feigl., 1998; Hanssen., 2001; Ferretti vd., 2007). Bu hatalar 5 farklı sebepten kaynaklanabilir. Bunlar:

Yüzey Düzensizlikleri: Yüzeyin pürüzlü veya karmaşık yapısı, radar sinyallerinin yansıma şeklini etkileyebilir. Bu da hatalı yükseklik ve deformasyon ölçümlerine yol açabilir.

Atmosferik Etkiler: Atmosferdeki nem, sıcaklık ve rüzgar gibi faktörler, radar sinyallerinin hızını etkileyerek geometrik hatalara neden olabilir.

İlk Gönderim Açıları: Radar sisteminin farklı açılardan görüntüleme yapması, aynı noktadan alınan sinyallerin faz farklarını etkileyebilir.

Yükseklik Modeli Hataları: Referans yükseklik modelinin hatalı olması, ölçümlerde sistematik hatalara neden olabilir.

Temporal (Zamansal) Değişiklikler: Zaman içinde yüzeyde meydana gelen değişiklikler, özellikle deformasyon ve hareketler, doğru ölçümlerin yapılmasını güçleştirebilmektedir. Bu geometrik hataların azaltılması için uygun algoritmalar, düzeltme yöntemleri ve yüksek kaliteli verilerin kullanılması büyük önem taşır.

2.3.4. Zemine Bağlı Değişiklikler

İnterferogramın alındığı iki zaman dilimi arasında yüzeyde fiziksel değişiklikler meydana gelmiş olabilir. Bitki örtüsündeki değişiklikler, su seviyesindeki dalgalanmalar veya inşaat faaliyetleri bu tür değişikliklere örnek teşkil eder.

2.3.5. Yörünge Hataları

Yörünge hataları, radar sinyallerinin uydu yörüngesindeki küçük değişikliklerden kaynaklanır. Bu hatalar, elde edilen interferogramların doğruluğunu olumsuz etkileyebilir. Örneğin, bir radar görüntüsündeki yörünge hatası, aynı alandan alınan iki görüntü arasındaki faz farkının yanlış hesaplanmasına yol açabilir. Sonuç olarak, yer yüzeyindeki yükseklik değişimlerinin ve hareketlerin yanlış yorumlanmasına neden olabilir. InSAR verilerinin güvenilirliğini artırmak için yörünge hatalarının düzeltilmesi büyük bir önem taşır. Bu düzeltme işlemi, genellikle uydunun yörüngesinin daha doğru bir şekilde belirlenmesi, düzeltme algoritmalarının uygulanması ve mevcut diğer veri kaynaklarıyla karşılaştırmalar yapılarak gerçekleştirilir (Massonnet ve Feigl., 1998; Hanssen., 2001; Ferretti vd., 2007).

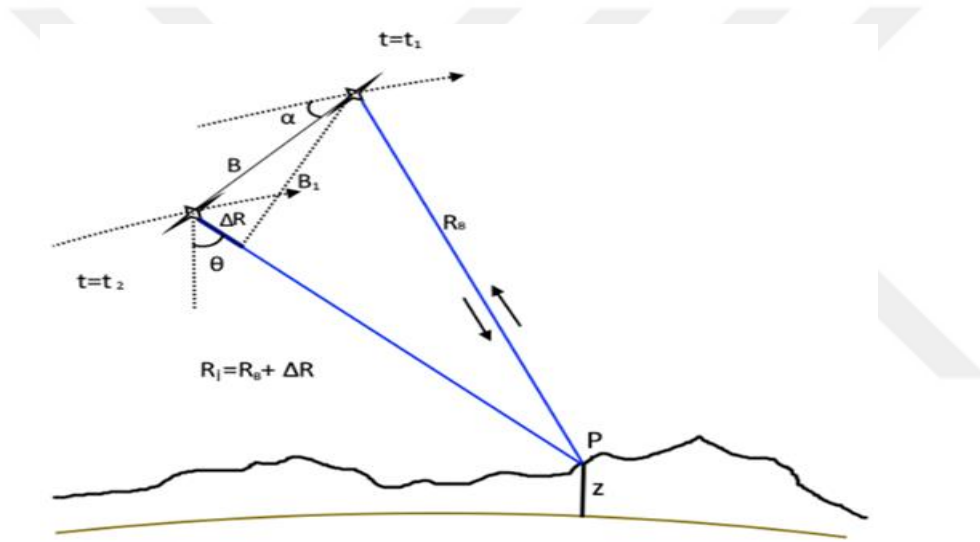
2.3.6. Sinyal Gürültüsü

Sinyalin düşük kalitede olması veya yüksek seviyede arka plan gürültüsüne maruz kalması, interferogramın kalitesini olumsuz etkiler. Özellikle düşük geri saçılım gösteren alanlarda (örneğin su yüzeyleri gibi) bu hatalar daha belirgin hale gelmektedir. Gürültü kaynakları, atmosferik etkiler, radar parametreleri, zemin özellikleri ve teknik hatalar olarak sıralanabilir. Gürültü azaltma yöntemleri ise, veri kalibrasyonu, filtreleme ve çoklu görüntü kullanımı olarak karşımıza çıkmaktadır (Massonnet and Feigl., 1998; Hanssen., 2001; Ferretti vd., 2007).

Genel olarak bu hata kaynakları, InSAR verilerinin hassasiyetini doğrudan etkilediği için analizlerde göz önünde bulundurularak düzeltme ve filtreleme işlemleri uygulanır. Bu düzeltmeler sayesinde InSAR'ın sağladığı veriler daha güvenilir ve kullanışlı hale getirilebilir.

2.3.7. InSAR Geometrisi

InSAR geometrisi, InSAR verilerinin toplanması ve analiz edilmesi sırasında kullanılan geometrik düzenlemeleri ve bu düzenlemelerin ölçümler üzerindeki etkisini ifade eder. Bu kavram, radar uydularının yeryüzü ile olan konumunu, açılarını ve birbirleriyle ilişkilerini kapsar; bu da elde edilen verilerin doğruluğunu doğrudan etkiler. InSAR geometrisi Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. InSAR geometrisi. Birinci görüntü alımı(B, t_1), İkinci görüntü alımı (t_2), R_1-R_B ; uydu ve obje mesafesi (Orhan, 2018)'den uyarlanmıştır

$$\text{Birinci SAR verisi: } \phi_B = \frac{4\pi}{\lambda} R_B \quad (\text{Eşitlik 8})$$

$$\text{İkinci SAR verisi: } \phi_1 = \frac{4\pi}{\lambda} (R_B + \Delta R) \quad (\text{Eşitlik 9})$$

$$\text{İnterferogram: } \phi = \phi_B - \phi_1 = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R \quad (\text{Eşitlik 10})$$

İnterferometrik faz oluşturulurken Eşitlik 11 ile 14 arasında verilen parametrelerden faydalanılır.

$$\Delta_R = R_i - R_b \quad (\text{Eşitlik 11})$$

$$\varphi_b = \frac{4\pi}{\lambda} \times R_b \quad (\text{Eşitlik 12})$$

$$\varphi_i = \frac{4\pi}{\lambda} \times R_i \quad (\text{Eşitlik 13})$$

$$\varphi_1 = 4\pi \times \frac{\Delta_R}{\lambda} \quad (\text{Eşitlik 14})$$

Verilen parametrelerde φ fazı, λ dalga boyunu, I ise birincil ve ikincil görüntülerin karşılıklı olarak çarpımını ($I = B \times \dot{I}^*$) temsil eder. Ayrıca yükselen ve alçalan modda zemin hareketinin (düşey, doğu-batı) hesaplanması aşağıda sunulan eşitlikler yardımıyla yapılmaktadır (Calo vd., 2017).

$$d_{vert} = (d_{desc} + d_{asc}) / 2 \cos \vartheta \quad (\text{Eşitlik 15})$$

$$d_{E-W} = (d_{desc} - d_{asc}) / 2 \sin \vartheta \quad (\text{Eşitlik 16})$$

d_{desc} ve d_{asc} sırasıyla alçalan ve yükselen modda hesaplanan görüş hattını (LOS: Line Of Side) ifade eder.

3.1.2. SNAP Yazılımında Yapılan Analizlere ait akış şeması ve Akış Şeması ve İşlem Adımları

3.1.2.1. Yörünge Dosyası İndirimi ve Görüntü Küçültme

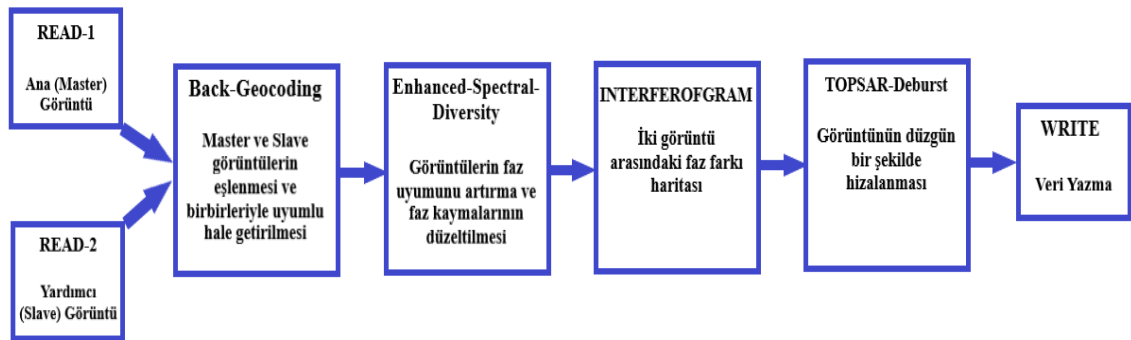
Bu adım Sentinel Scihub'tan indirilmiş görüntülerin çalışma bölgesine göre kırılması ve yörünge dosyalarının elde edilmesini kapsamaktadır. Bu kapsamda, elde edilmiş görüntüler öncelikle SNAP yazılımı tarafından okunmakta (read), daha sonra deformasyon beklenen alan için verilerin küçültülmesi (TOPSAR-Split) işlemi gerçekleştirilmekte ve daha sonra hassas yörünge dosyaları indirilerek (Apply Orbit File), kayıt altına (write) alınmaktadır. Söz konusu işlemleri anlatan diyagram Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. SNAP yazılımında 1. Adım işlemlerini gösteren diyagram

3.1.2.2. İnterferogram Üretme

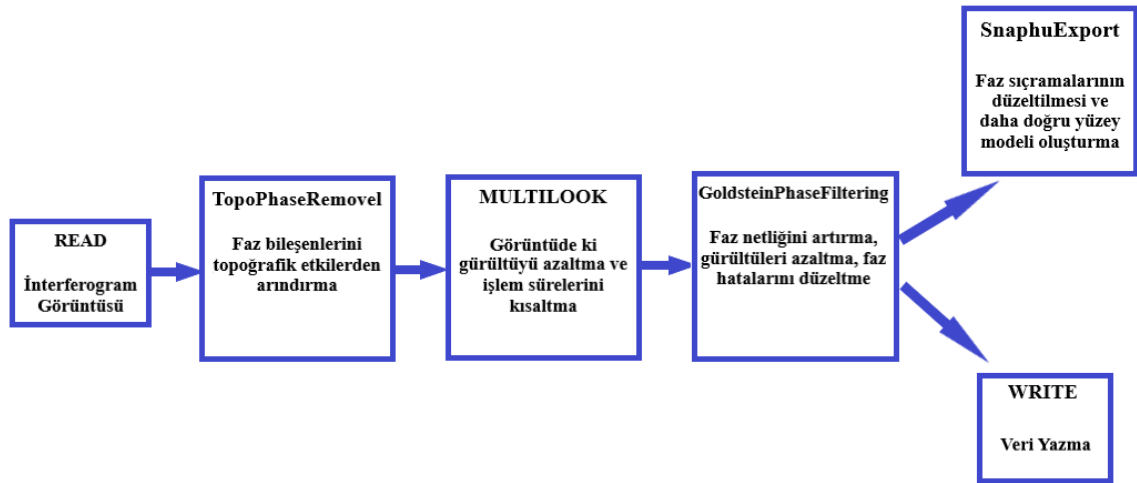
Bu adımda SNAP yazılımında ana ve yardımcı görüntüler birlikte değerlendirilerek öncelikle geri coğrafi kodlama (Back-Geocoding) ve sonrasında gelişmiş spektral çeşitlilik (Enhanced-Spectral-Diversity) işlemiyle görüntülerin birbirleriyle faz uyumu artırılmıştır. Ardından bu iki görüntü arasındaki faz farklarından faydalanarak İnterferogram elde edilmiştir. SNAP yazılımındaki bu işlem aşamaları Şekil 12'de sunulmuştur.



Şekil 12. SNAP yazılımında İnterferogram üretim aşamalarını gösteren diyagram

3.1.2.3. Faz Bileşenlerinin ve Gürültülerin Giderilmesi

Elde edilen interferogram görüntülerinin analizinde, topoğrafik etkilerin en aza indirilmesi için ilk olarak TopoPhaseRemoval işlemi uygulanmıştır. Bu işlem, görüntüdeki yüksekliğe bağlı faz bileşenlerini kaldırarak deformasyon analizi için temiz bir veri sağlar. Ardından, görüntüdeki gürültüyü azaltmak ve daha net bir görünüm elde etmek amacıyla çoklu bakış (Multilook) işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, faz filtreleme (GoldsteinPhaseFiltering) işlemi kullanılarak faz netliği artırılmış ve gürültü minimum seviyeye indirilmiştir. Son olarak, interferogram verilerinin faz sıçramalarını çözmek için SnaphuExport işlemi yapılmıştır. Statistical-cost Network-flow Algorithm for Phase Unwrapping (SNAPHU), SNAP yazılımına entegre olmayan bir dış yazılım olup, artık fazların çözme işleminin gerçekleştirilebilmesi için ayrıca edinilmesi gerekmektedir. Bu işlem, interferogram verilerini ve ilgili meta bilgilerini SNAPHU tarafından işlenebilir bir formata dönüştürerek deformasyon miktarını hesaplama sürecinin kritik bir aşamasını oluşturur. Bu adım, depresel etkinin açıkça ortaya çıkarılmasını sağlayarak analizlerin doğruluğunu artırır. Bu sürecin tüm aşamaları, diyagram halinde Şekil 13'te görselleştirilmiştir.



Şekil 13. SNAP yazılımında gürültülerin giderilmesi ve SnaphuExport aşamalarını gösteren diyagram

3.1.2.4. Görüntüdeki Karışıklıkları Giderme

Bu adım, görüntüdeki fazların çözülüp düzeltildiği kritik bir süreçtir. SnaphuImport işlemi, bir önceki aşamada elde edilen çözülmüş faz (unwrapped phase) verilerini SNAP yazılımına yüklemek için kullanılır. Bu işlem, çözülmüş faz verisinin deformasyon analizinde kullanılmasına olanak tanır ve depremler nedeniyle oluşan yer değiştirmelerin ve deformasyonların miktarını doğru bir şekilde hesaplamayı sağlar. Faz

bilgilerinin, deformasyon hesaplamalarına dönüştürülmesi için gerekli olan bu aşama, analizlerin doğruluğunu artırarak depremsel etkilerin daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunur. SNAP yazılımında uygulanan bu işlem aşamaları, detaylı olarak Şekil 14'te görselleştirilmiştir.



Şekil 14. SNAP yazılımında görüntüdeki karışıklıkları giderme ve SnapuImport aşamalarını gösteren diyagram

InSAR analizlerinde Snaphu, interferogramlardaki artık fazları çözmek için kullanılan ve ölçülen faz değerlerini fiziksel bir anlam kazandıracak şekilde kesintisiz bir yüzey haline getiren bir yazılımdır; maksimum olasılığa dayalı istatistiksel yöntemler kullanarak gürültülü veya düşük korelasyonlu bölgelerde bile doğru sonuçlar sağlar ve bu sayede yüzey deformasyonu analizi, deprem etkileri ve volkanik hareketlerin incelenmesi gibi uygulamalarda önemli bir adım olarak karşımıza çıkmaktadır.

3.1.2.5. Yer Değiştirmelerin Tespiti

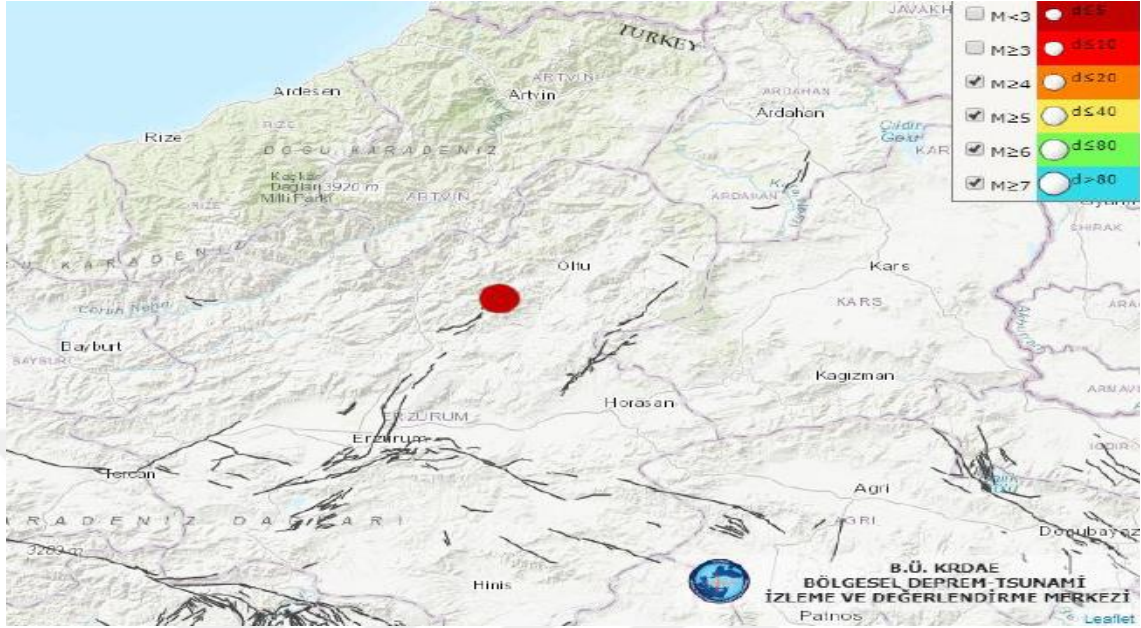
Yüzeydeki hareketin büyüklüğünü ve yönünü belirleme aşamasıdır. Çözümlenen faz verileri kullanılarak yer değiştirme değerleri hesaplanır. Bu aşama, yüzeyde meydana gelen hareketlerin büyüklüğünü ve yönünü belirleme süreçlerini içerir. Çözümlenen faz verileri kullanılarak Radarın bakış doğrultusundaki yer değiştirme değerleri hesaplanmış ve Quantum Geographic Information System (QGIS) yazılımı kullanılarak harita üzerine aktarılmıştır.

Bu tez kapsamında, yukarıdaki prosedüre uygun olarak Erzurum-Başaklı depremi, Denizli-Acıpayam depremi ve Elazığ-Sivrice depremi SNAP yazılımında analiz edilmiş ve elde edilen analiz sonuçları aşağıdaki başlıklar altında detaylı şekilde sunulmuştur.

3.2. Erzurum-Başaklı Depremi (Mw=4.5)

Bu çalışmada incelenen düşük büyüklükteki deprem, 15 Temmuz 2019 tarihinde Erzurum'un Oltu ilçesine bağlı Başaklı köyünde meydana gelen, Mw=4.5

büyükluğindeki depremdir. Depremin odak derinliği yaklaşık 5 km olup, sığ odaklı bir deprem olarak sınıflandırılmaktadır. Bu deprem, Erzurum ili ve çevresinde hafif olarak hissedilmiştir. Depremin meydana geldiği lokasyona ilişkin harita, Şekil 15'te sunulmuştur (URL-2).



Şekil 15. Erzurum-Başaklı (Mw=4.5) depreminin lokasyon haritası (URL-2)

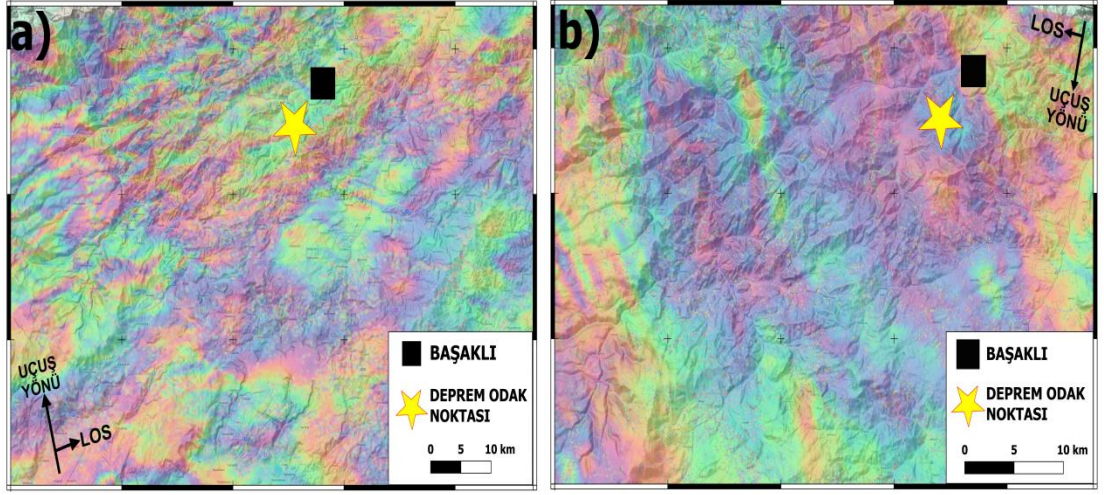
Söz konusu depremin incelenmesi amacıyla yapılan InSAR analizleri yükselen ve alçalan mod için ayrı ayrı gerçekleştirilmiş olup, görüntülere ait detaylar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Erzurum-Başaklı depremi Sentinel-1 görüntü detayları

Mod	1.Görüntü	Yörünge-1	2.Görüntü	Yörünge-2	Track	Gün Farkı
Yükselen	03/07/2019	16971	23/07/2019	17321	145	20
Alçalan	03/07/2019	27947	27/07/2019	28297	50	24

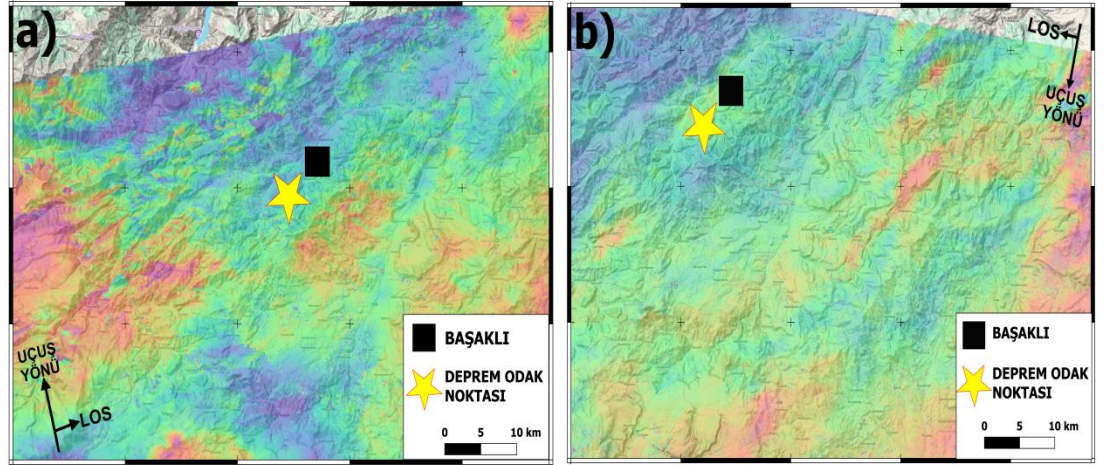
3.2.1. Erzurum-Başaklı Depremi için InSAR analizlerinin gerçekleştirilmesi

Düşük büyüklükteki deprem bölgesinden yükselen ve alçalan modlar için elde edilen SAR görüntüleri SNAP yazılımı kullanılarak 3.1. başlığında sunulan işlem adımları ışığında analiz edilmiştir. Elde edilen interferogramlara artık fazların çözümü için snaphu analizleri uygulanmış ve elde edilen sonuç interferogramlar Şekil 16'da sunulmuştur.



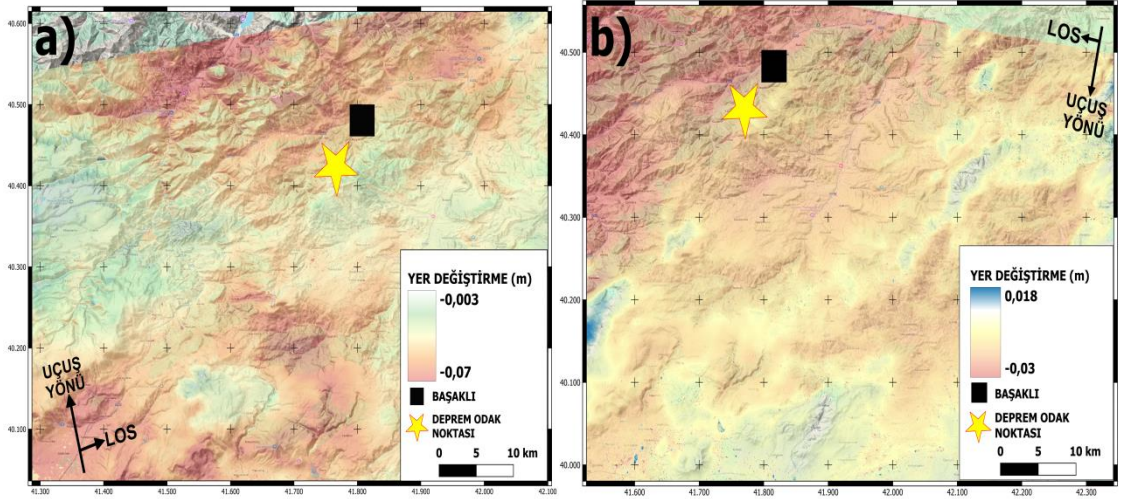
Şekil 16. Erzurum-Başaklı deprem bölgesi için yükselen mod (a) ve alçalan mod (b) kullanılarak elde edilen interferogramlar

Interferogramlardan elde edilen görüntülerde her fringe, $2(\pi)$ faz farkına karşılık gelir ve bu fark, jeodezik izlemelerde radar dalga boyu kullanılarak yüzey deformasyonlarının sayısal olarak izlenmesi için fiziksel birimlere (metrik ölçek) dönüştürülür. Bu bağlamda, Sentinel-1 uydu misyonunun 4,8 cm dalga boyu kullanılarak SNAP yazılımı ile interferogramlar yer değiştirme haritalarına dönüştürülmüş ve sonuçlar Şekil 17’de sunulmuştur.



Şekil 17. Erzurum-Başaklı deprem bölgesi için yükselen mod (a) ve alçalan mod (b) kullanılarak elde edilen çözülmüş interferogramlar

SNAP yazılımında SnaphuImport işlemiyle elde edilen bu görüntüler, sonraki adımda çalışma bölgesindeki yer değiştirme miktarlarını belirlemek için kullanılmıştır. Bu adım, yer değiştirme (displacement) aşaması olarak adlandırılmaktadır. Yer değiştirme haritaları Şekil 18’de gösterilmiştir.

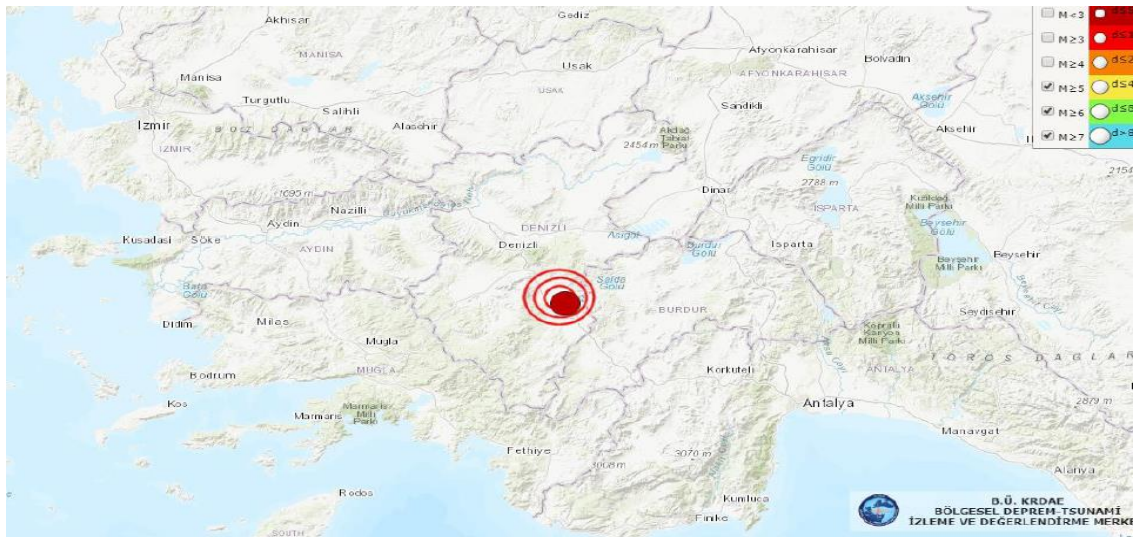


Şekil 18. Erzurum-Başaklı deprem bۆlgesi için yükselen mod (a) ve alçalan mod (b) kullanılarak elde edilen yer değiştirme haritaları

Bu aşamada, yer değiştirme miktarları haritada bulunan lejant yardımıyla incelenebilmektedir. Deprem odak noktası haritada sarı yıldız ile gۆsterilmiřtir. Siyah kare ise Oltu ilçesine bağlı Başaklı Mahallesi'ni temsil etmektedir. Her iki nokta SNAP yazılımında kendi koordinatlarına yerleştirilmiş ve bu bۆlgelerdeki piksellere ait yer değiştirme miktarları hesaplanmıştır.

3.3. Denizli-Acıpayam Depremi (Mw=5.6)

İncelenen orta büyüklükteki deprem 20 Mart 2019 tarihinde Denizli ilinin Acıpayam ilçesinde meydana gelen Mw=5.6 byklğindeki depremdir. Depremin odak derinliği yaklaşık 5 km civarında olup sığ odaklı bir depremdir. Deprem Denizli, Muğla, Aydın, İzmir, Antalya, Burdur ve Isparta illerinde hissedilmiştir. Depremin lokasyon haritası Şekil 19'da verilmiştir (URL-3).



Şekil 19. Denizli-Acıpayam (Mw=5.6) depreminin lokasyon haritası (URL-3)

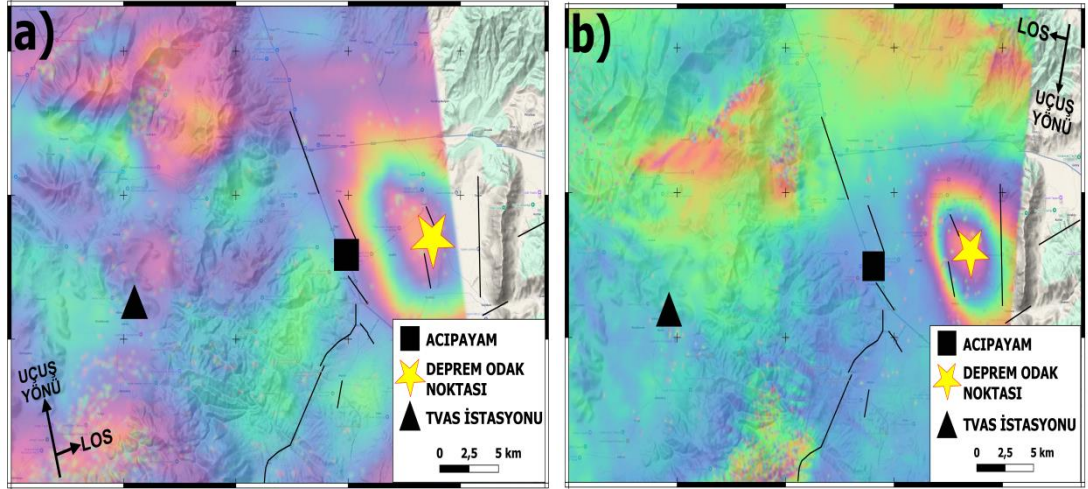
Söz konusu depremin incelenmesi amacıyla yapılan InSAR analizleri yükselen ve alçalan mod için ayrı ayrı gerçekleştirilmiş olup, görüntülere ait detaylar Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Denizli-Acıpayam depremi Sentinel-1 görüntü detayları

Mod	1.Görüntü	Yörünge-1	2.Görüntü	Yörünge-2	Track	Gün Farkı
Yükselen	17/07/2019	26380	23/03/2019	15484	58	6
Alçalan	05/03/2019	15214	10/04/2019	15739	138	36

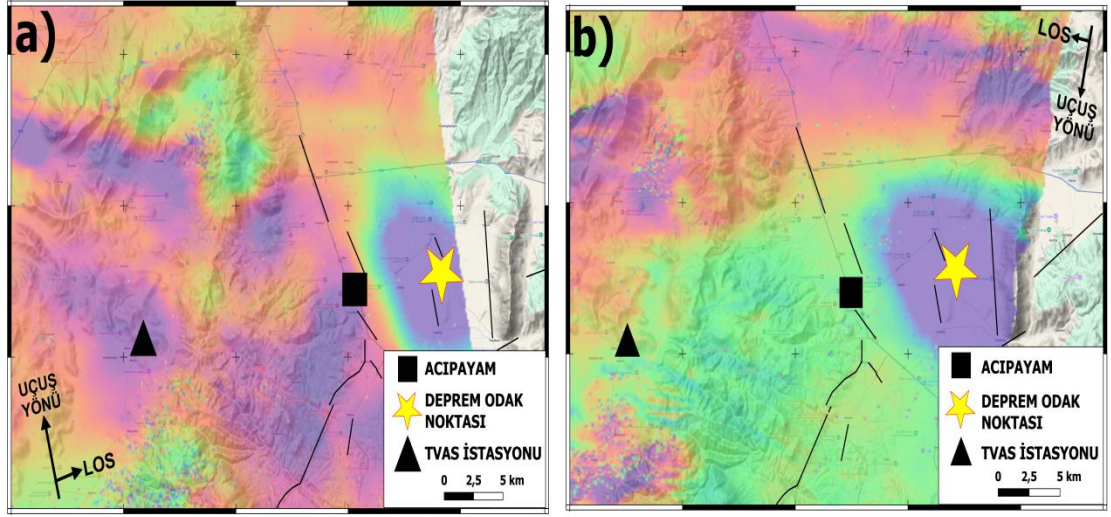
3.3.1. Denizli-Acıpayam Depremi için InSAR analizlerinin gerçekleştirilmesi

Orta şiddetli deprem bölgesine ait yükselen ve alçalan modlarla elde edilen SAR görüntüleri, 3.1. başlığında belirtilen işlem adımları doğrultusunda SNAP yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Elde edilen interferogramlar Şekil 20’de sunulmuştur.



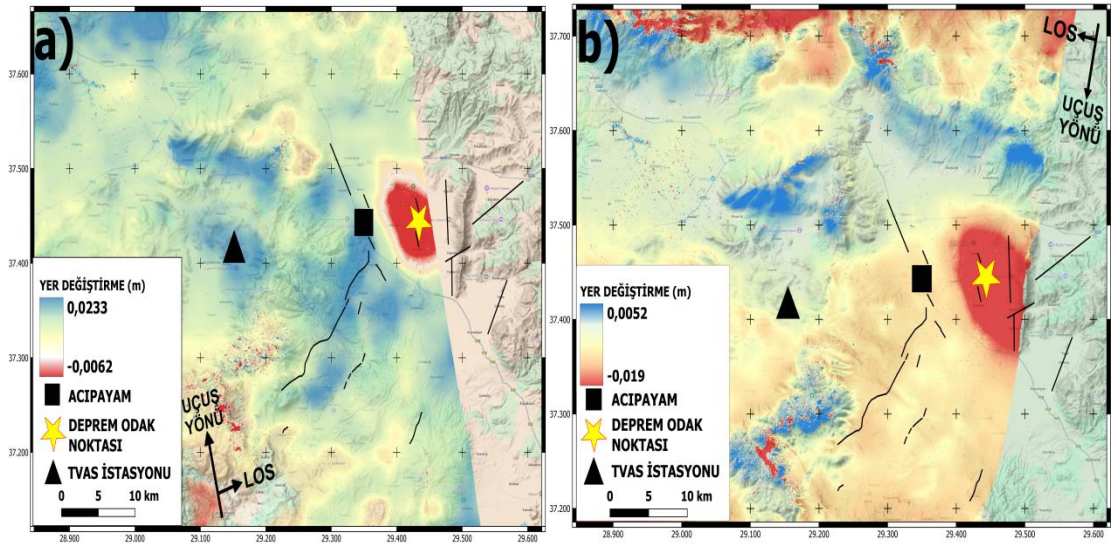
Şekil 20. Denizli-Acıpayam deprem bölgesi için yükselen mod (a) ve alçalan mod (b) kullanılarak elde edilen interferogramlar

Elde edilen interferogramlar, SNAP yazılımında çözümlenmiş ve metrik değerlere dönüştürülmüştür. Sonuç görüntüleri Şekil 21’de sunulmuştur.



Şekil 21. Denizli-Acıpayam deprem bölgesi için yükselen mod (a) ve alçalan mod (b) kullanılarak elde edilmiş interferogramlar

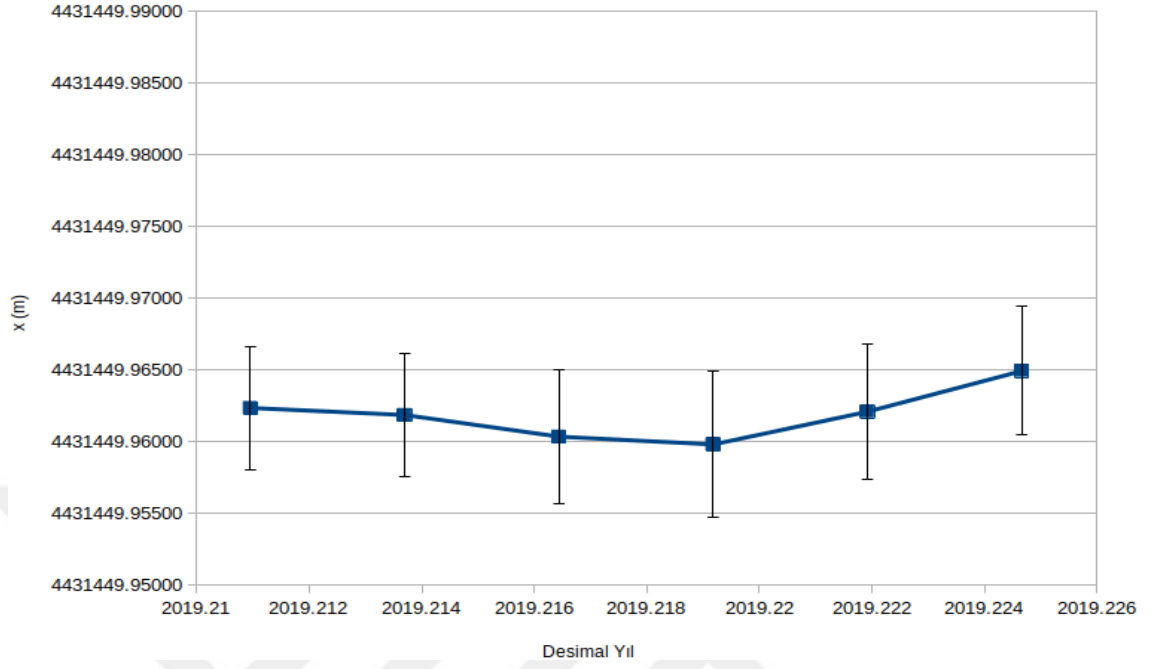
Unwrapping işleminden elde edilen görüntüler, bir sonraki aşamada yer değiştirme haritalarının oluşturulmasında kullanılmıştır. SNAP yazılımında işlenen bu görüntülerden elde edilen yer değiştirme haritaları, Şekil 22’de sunulmuştur.



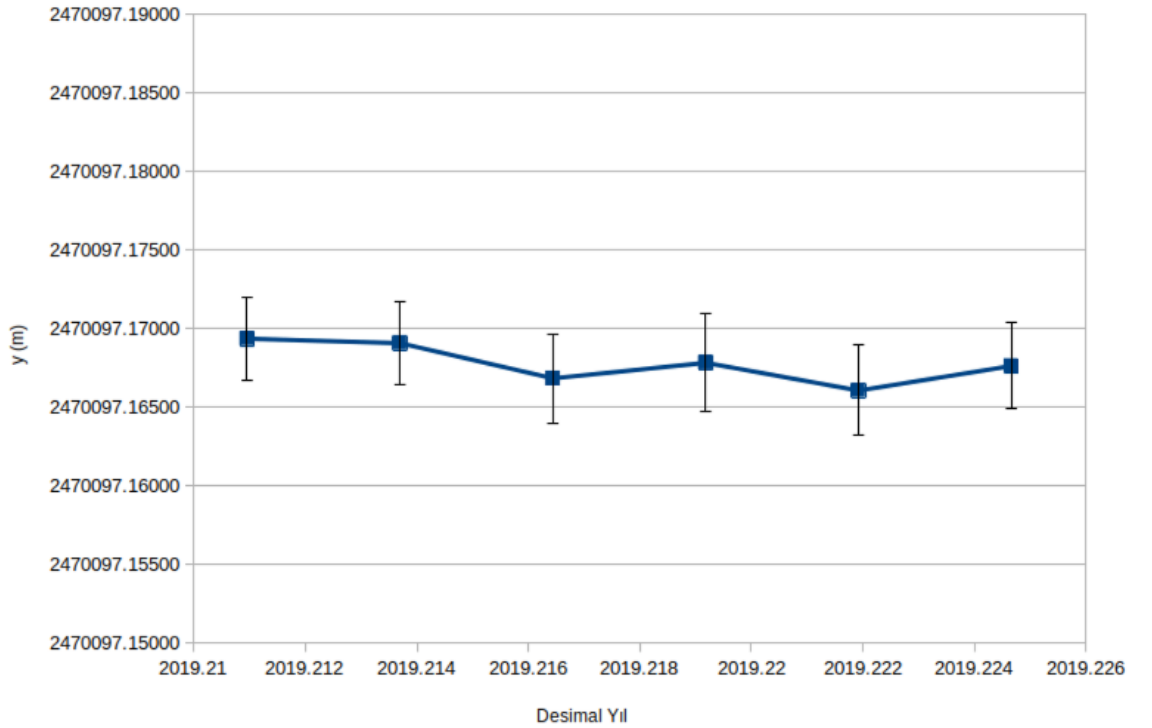
Şekil 22. Denizli-Acıpayam deprem bölgesi için yükselen mod (a) ve alçalan mod (b) kullanılarak elde edilen yer değiştirme haritaları

Deprem odak noktası haritada sarı yıldız ile gösterilmiştir. Siyah üçgen (TVAS İstasyonu) Denizlinin Acıpayam ve Tavas ilçelerinin arasında yer alan sürekli gözlem GNSS istasyonudur. Siyah kare ise Denizli ilinin Acıpayam ilçesini temsil etmektedir. Görüntülerde ki yer değiştirmeleri gösteren kısım lejanttır. Haritada gösterilen bu üç nokta SNAP yazılımında kendi koordinatlarına yerleştirilmiş ve bu bölgelerdeki piksellere ait yer değiştirme miktarları alınmıştır. TVAS istasyonuna ait deprem

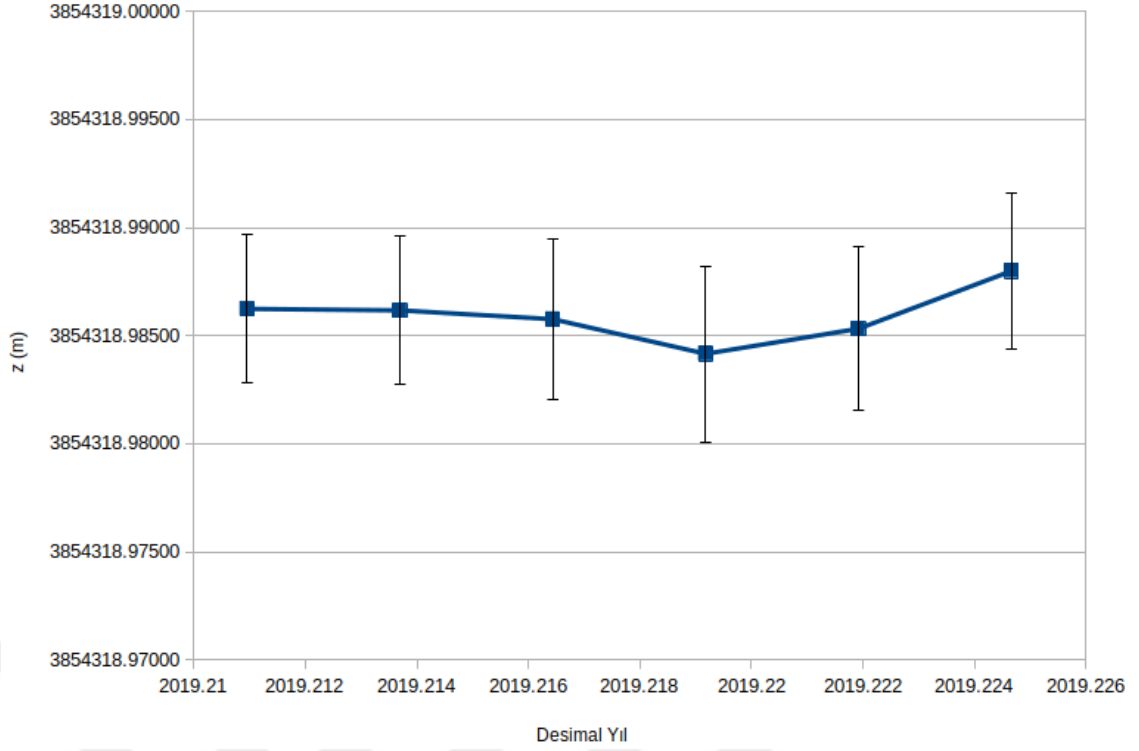
gününün de içinde olduğu beş günün X.Y ve Z koordinatlarının zaman serileri Şekil 23, Şekil 24 ve Şekil 25'te sunulmuştur (URL-4).



Şekil 23. TVAS istasyonu X koordinatının beş günlük zaman serisi



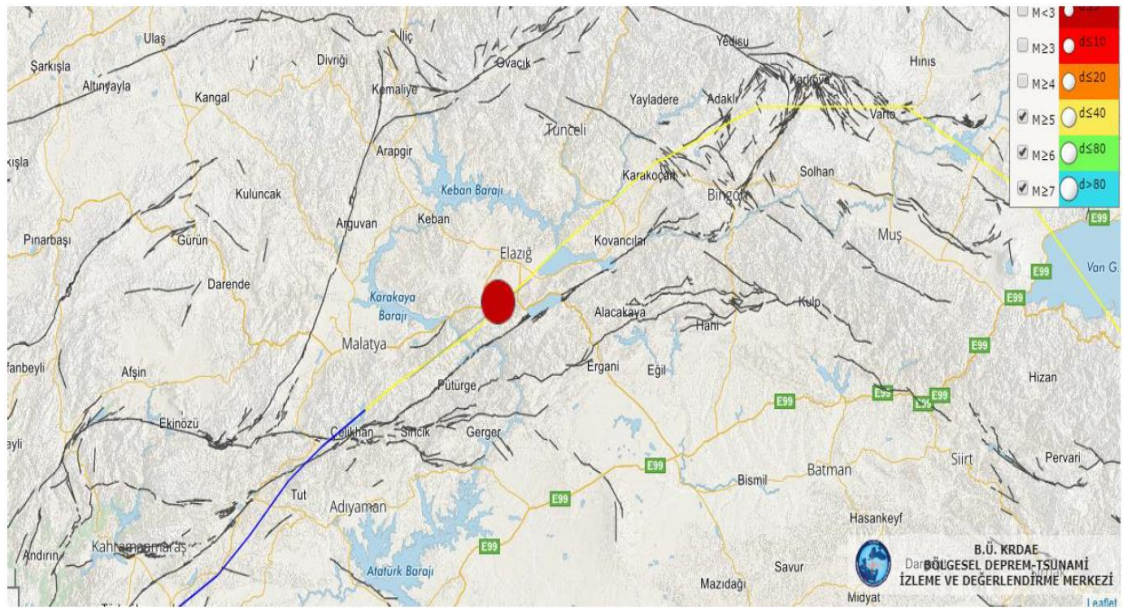
Şekil 24. TVAS istasyonu Y koordinatının beş günlük zaman serisi



Şekil 25. TVAS istasyonu Z koordinatının beş günlük zaman serisi

3.4. Elazığ-Sivrice Depremi (Mw=6.8)

İncelenen büyük şiddetli deprem 24 Ocak 2020 tarihinde Elazığ ilinin Sivrice ilçesinde meydana gelen Mw= 6.8 büyüklüğündeki depremdir. Depremın odak derinliği yaklaşık 5 km civarında olup, sığ odaklı depremdir. Deprem Elazığ ilinin dışında, Doğu Anadolu, Güneydoğu Anadolu, Orta Anadolu ve Karadeniz bölgelerinde hissedilmiştir. Depremın lokasyon haritası Şekil 26’da verilmiştir (URL-5).



Şekil 26. Elazığ-Sivrice (Mw=6.8) depreminin lokasyon haritası (URL-5)

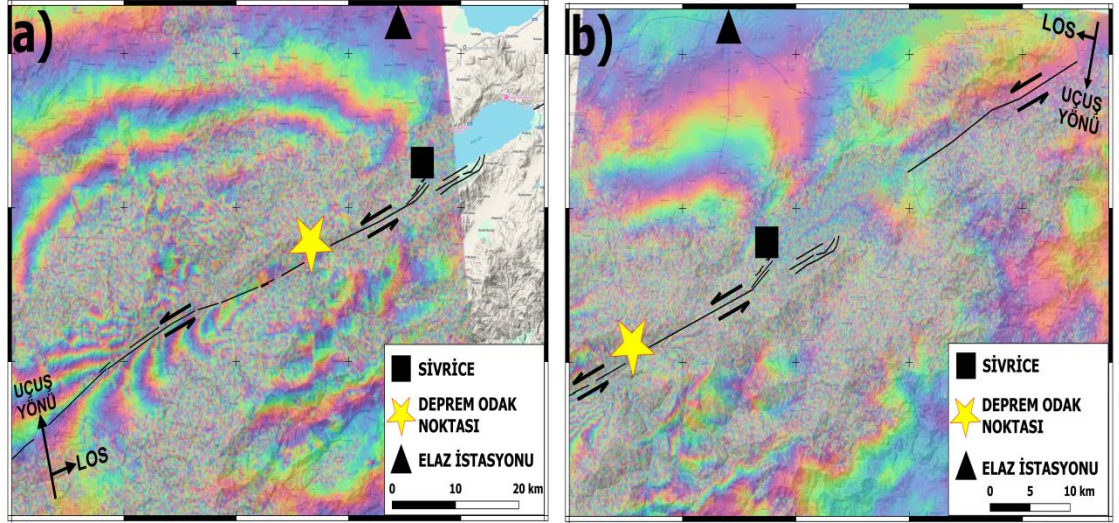
Söz konusu depremin incelenmesi amacıyla yapılan InSAR analizleri yükselen ve alçalan mod için ayrı ayrı gerçekleştirilmiş olup, görüntülere ait detaylar Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Elazığ-Sivrice depremi Sentinel-1 görüntü detayları

Mod	1.Görüntü	Yörünge-1	2.Görüntü	Yörünge-2	Track	Gün Farkı
Yükselen	15/01/2020	30813	20/02/2020	31338	116	36
Alçalan	22/01/2020	19924	03/02/2020	20099	123	12

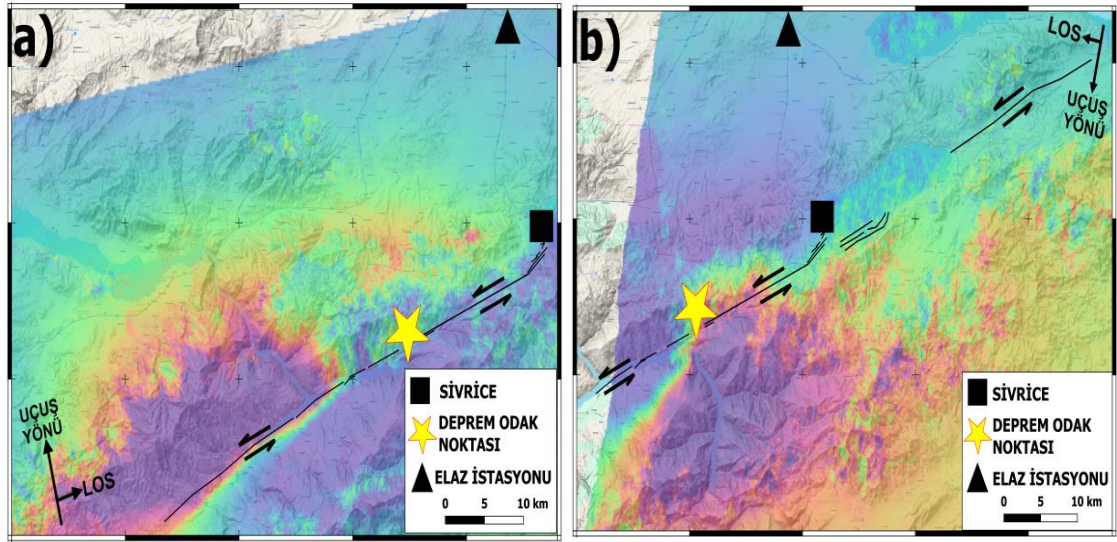
3.4.1. Elazığ-Sivrice Depremi için InSAR analizlerinin gerçekleştirilmesi

Büyük şiddetli deprem bölgesinden yükselen ve alçalan modlar için elde edilen SAR görüntüleri SNAP yazılımı kullanılarak 3.1.başlığında sunulan işlem adımları doğrultusunda analiz edilmiştir. Elde edilen interferogramlar Şekil 27'de gösterilmiştir.



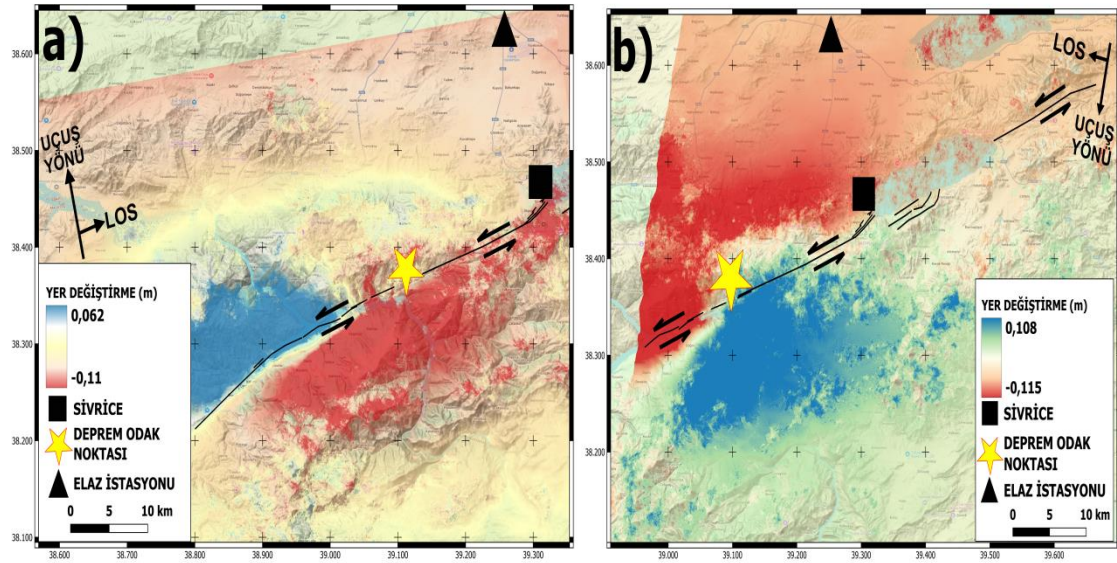
Şekil 27. Elazığ-Sivrice deprem bölgesi için yükselen mod (a) ve alçalan mod (b) kullanılarak elde edilen interferogramlar

Interferogramlardan elde edilen görüntüler SNAP yazılımı yardımıyla çözülmüş ve sayısal değerlere dönüştürülmüştür. Elde edilen görüntüler Şekil 28'de verilmiştir.



Şekil 28. Elazığ-Sivrice deprem bölgesi için yükselen mod (a) ve alçalan mod (b) kullanılarak elde edilen çözülmüş interferogramlar

Çözülmüş görüntüler, SNAP yazılımı kullanılarak yer değiştirme haritalarına dönüştürülmüştür. Elde edilen yer değiştirme haritaları, Şekil 29’da sunulmuştur.



Şekil 29. Elazığ-Sivrice deprem bölgesi için yükselen mod (a) ve alçalan mod (b) kullanılarak elde edilen yer değiştirme haritaları

Deprem odak noktası sarı yıldız ile gösterilmiştir. Siyah üçgen, Elazığ il merkezine yakın sürekli gözlem GNSS istasyonu olan ELAZ İstasyonu'nu göstermektedir. Siyah kare ise Elazığ ilinin Sivrice ilçesini temsil etmektedir. Haritada gösterilen bu üç nokta SNAP yazılımında ilgili koordinatlarına yerleştirilmiş ve bu koordinatlara denk gelen piksellere ait yer değiştirme miktarları alınmıştır. İmajda ki genel yer değiştirme miktarları sağ alt köşede ki lejantta belirtilmiştir. ELAZ istasyonundaki yer değiştirme miktarları Tablo 4’te sunulmuştur.

Tablo 4. ELAZ istasyonundaki yer değiştirme miktarları (mm)

İstasyon	InSAR		GNSS		
	Yükselen Mod	Açalan Mod	Kuzey	Doğu	Yukarı
ELAZ	-68,1	65,4	-53,5	-20,9	0,5



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde uygulama aşamasında gerçekleştirilen analizlerden elde edilen bulgular tartışılacaktır.

Bu kapsamda 3.2. başlığı altında ele alınan düşük şiddetli depreme ait, Şekil 16, 17 ve 18’de ki analiz çıktıları incelendiğinde bölgedeki interferogramlarda herhangi bir frinç oluşumuna rastlanmamış olup yer değiştirme haritalarında da herhangi bir hareket saptanmamıştır. Söz konusu yer değiştirmeler, yükselen modda 0,3 cm ile 7 cm arasında, alçalan modda 1,8 cm ile 3 cm arasında değişmekte olup, bu değerler bölgenin dağlık bir bölge olduğu göz önünde bulunduğu söz konusu değişimlerin topoğrafya etkisinden kaynaklanan hatalardan ibaret olduğu düşünülmektedir. Deprem odak noktasının koordinatlarına karşılık gelen yer değiştirme miktarları, hem yükselen modda hem de alçalan modda uydunun bakış doğrultusunda yaklaşık $\pm 1,7$ cm olarak tespit edilmiştir. Deprem düşük şiddette olması ve en yakın GNSS istasyonunun deprem odak noktasına oldukça uzak bir konumda bulunması nedeniyle GNSS verilerinden faydalanılmamıştır.

3.3. başlığında sunulan orta şiddetli depreme ait, Şekil 20, 21 ve 22’de yer alan interferogram haritalarında deprem odak noktası ve çevresinde frinçlenmelerin olduğu gözlemlenmektedir. Bu kapsamda, yer değiştirme haritalarında meydana gelen yer değiştirmeler açık bir şekilde görülmektedir. Söz konusu yer değiştirme miktarları yükselen modda 0,6 cm ile 2,3 cm arasında, alçalan modda ise 0,5 cm ile 1,9 cm arasında gözlemlenmiştir. Deprem odak noktasına karşılık gelen koordinatlarda yer değiştirme miktarı uydunun bakış doğrultusunda yaklaşık olarak $\pm 4,8$ cm olarak analiz edilmiştir. TVAS istasyonunun yer aldığı koordinatlara karşılık gelen pikseldeki yer değiştirme miktarları incelendiğinde, yükselen modda 2,17 cm, alçalan modda ise 0,4 cm olarak tespit edilmiştir. InSAR verilerinden elde edilen bu değerlerin doğruluğunun araştırılması için bölgeye en yakın sürekli gözlem GNSS istasyonu olan TVAS istasyonunda deprem günü ve öncesi ve sonrasındaki ikişer günü kapsayan beş günlük zaman serisi incelenmiştir. Ancak, TVAS istasyonunun frinçlenmenin dışında olması ve deprem odak noktasına uzaklığı sebebiyle, deprem nedenli deformasyona uğramadığı görüldüğünden, malesef doğrulama amaçlı kullanılamamıştır.

3.4. başlığında incelenen büyük şiddetli depreme ait Şekil 27, 28 ve 29’da sunulan interferogram imajlarında yoğun frinçlenmelerin bulunduğu ve renk geçişlerinin oldukça belirgin olduğu fark edilmiştir. Ayrıca, deprem odak noktasının yanı sıra fay hattının da net bir şekilde gözlemlenebildiği tespit edilmiştir. Şiddetli bir deprem sınıfında olması neticesiyle görüntülerde depremden etkilenen bölgeleri açıkça gözlemlenmek mümkündür. Doğal olarak yer değiştirme haritalarında yüksek miktarda yer değiştirmenin olduğu gözlemlenmektedir. Bu yer değiştirmeler yükselen mod için 6 ile 11 cm, alçalan mod için 10 ile 11 cm arasında olduğu saptanmıştır. Deprem odak noktasının bulunduğu koordinatlardaki yer değiştirme miktarları incelendiğinde, yükselen modda uydunun bakış doğrultusunda 5,7 cm, alçalan modda ise 7,5 cm olduğu gözlemlenmiştir. ELAZ istasyonunun bulunduğu piksellerdeki yer değiştirme miktarı ise Tablo 4’ te ki değerler incelendiğinde, yükselen modda 6,8 cm, alçalan modda ise 6,5 cm olarak kaydedilmiştir. InSAR verilerinden elde edilen bu değerler, sürekli gözlem GNSS istasyonu olan ELAZ’dan alınan ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Yalvaç (2020)’de sunulan analizlere göre, bu bölgede yer değiştirmeler kuzey yönünde 5,35 cm, doğu yönünde 2,09 cm ve yukarı yönde 0,5 cm olarak belirlenmiştir. InSAR yöntemiyle bulunan yer değiştirme değerleri Eşitlik 15 ve Eşitlik 16’da yer alan parametrelerde yerine koyulduğunda, düşeydeki (V) yer değiştirme miktarı $\pm 0,18$ cm, yataydaki (E-W) yer değiştirme ise $\pm 10,38$ cm olarak hesaplanmıştır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, InSAR yöntemi kullanılarak farklı büyüklüklerdeki depremlerin neden olduğu kabuk deformasyonları analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar GNSS verileriyle doğrulanmaya çalışılmıştır. Düşük şiddetli depremler için yapılan analizlerde interferogramlarda frinçlenme gözlemlenmemiş ve yer değiştirme miktarlarının $\pm 1,7$ cm ile sınırlı olduğu tespit edilmiştir. Bu değişimlerin topoğrafik etkilerden kaynaklanan hatalar olduğu düşünülmüş ve GNSS istasyonlarının uzaklığı nedeniyle doğrulama da yapılamamıştır. Orta şiddetli depremler için yapılan analizlerde interferogramlarda belirgin frinçlenmeler gözlenmiş, deprem odak noktasındaki yer değiştirmeler $\pm 4,8$ cm olarak belirlenmiştir. Büyük şiddetli depremler için yapılan analizlerde ise interferogramlarda, deprem odak noktası çevresinde yoğun frinçlenmeler ve fay hattı boyunca belirgin deformasyonlar tespit edilmiştir. Deprem odak noktasında $\pm 7,5$ cm yer değiştirme ölçülmüş ve bu değerlerin GNSS ölçümleriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

Elde edilen bu bulgular, InSAR yönteminin deprem araştırmalarında yüksek hassasiyetli bir araç olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak düşük şiddetli depremler için, hem frinçlenmenin olmaması hem de GNSS istasyonlarının sınırlı olması doğrulamayı zorlaştırdığından daha fazla GNSS istasyonu olan bir bölge için deneylerin tekrarlanması önerilmektedir. Ayrıca, InSAR analizlerinde atmosferik etkiler ve topoğrafik hataların azaltılması için daha gelişmiş modelleme ve düzeltme tekniklerinin kullanılması gerekmektedir. Özellikle düşük şiddetli depremler için daha hassas veri işleme algoritmaları geliştirilmelidir. Bunun yanı sıra, InSAR yöntemi yalnızca depremler değil, heyelan, volkanik hareketler ve yeraltı suyu çekilmesi kaynaklı zemin çökmeleri gibi diğer yüzey deformasyonlarının izlenmesinde de etkin bir şekilde kullanılabilir. Sonuç olarak InSAR yönteminin deprem araştırmaları başta olmak üzere geniş bir uygulama alanında etkin bir şekilde başarıyla kullanılabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

- Abidin, H.Z., Andreas, H., Djaja, R., Darmawan, D., ve Gamanl, M. (2008). Land subsidence characteristics of jakarta between 1997 and 2005, as estimated using GPS surveys. *GPS Solutions*, 12(1): 23-32.
- Akoğlu, A. (2001) 17 Ağustos 1999 İzmit depremi postsismik deformasyonunun sentetik açıklık radar interferometrisi yöntemi ile incelenmesi. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Amarjargal, Sh., Kato, T., Furuya, M. (2012). Surface deformations from moderate-sized earthquakes in Mongolia observed by InSAR. *Earth Planet Space*, 1-10.
- Baer, G., Schattner, U., Wachs, D., Sandwell, D., Wdowinski, S. ve Frydman, S. (2002). The lowest place on earth is subsiding an InSAR (interferometric synthetic aperture radar) perspective. *Geological Society of America Bulletin*, 114(1):12-23.
- Bignami, C., Antonioli, A., Atzori, S., Kiratzi, A., Polcari, M., Svigkas, N., Tolomei, C. (2020). Mapping InSAR deformation of low and moderate earthquakes. *Proc. Comp. Sci*, 181, 214-219.
- 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.
- Bovenga, F. (2020). Synthetic Aperture Radar (SAR) Techniques and Applications, Institute for Electromagnetic Sensing of the Environment (IREA), Italian National Research Council, Via Amendola Bari İtaly, 122/d, 70126.
- Bürgmann, R., Rosen, P.A. ve Fielding, E.J. (2000). Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci*, 28, 169-209.
- Bürgmann, R., Ergintav, S., Segall, P., Hearn, E.H., McClusky, S., Reilinger, R. E., Woith, H. ve Zschau, J. (2002a). Time-dependent distributed after-slip on and deep below the İzmit Earthquake rupture. *Bull. Seism. Soc. Am*, 92, 126-137.

- Caló, F., Notti, D., Galve, JP, Abdikan, S., Görüm, T., Pepe, A., & Balık Şanlı, F. (2017). DInSAR Tabanlı Kara Çökmesinin Tespiti ve Konya Ovası, Türkiye'deki Yeraltı Suyu Tükenmesiyle Korelasyonu. *Uzaktan Algılama* , 9 (1), 83. <https://doi.org/10.3390/rs9010083>
- Canaslan, F. (2010). *Insar yöntemiyle düşey yönlü yüzey deformasyonlarının belirlenmesi: Konya örneği. Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.*
- Curlander, J.C. ve McDonough, R. N. (1991). Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing, Wiley Series in Remote Sensing. *John Wiley and Sons Inc, New York, NY: 396.*
- 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.*
- Çomut, F.C. (2016). *Farklı yeryüzü özelliklerinde ileri InSAR teknikleri kullanılarak yüzey deformasyonlarının belirlenmesi. Doktora tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.*
- Deguchi, T., Kato, M., Akcin, H. ve Kutoglu, H. S. (2006). Automatic processing of Interferometric SAR and accuracy of surface deformation measurement. In SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques. *International Society for Optics and Photonics, VIII (Vol.6363, pp.636309).*
- Elachi, C. (1988). Spaceborne Radar Remote Sensing: Applications and Techniques. *IEEE Press. New York, 1988, pp. 72–77.*
- Feigl, K. L., Agnew, D. C., Bock, Y., Dong, D., Donnellan, A., Hager, B. H., Herring, T. A., Jackson, D. D., Jordan, T. H., King, R. W., vd. (1993). Space geodetic measurement of crustal deformation in central and southern california. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 98(B12):21677-21712.*
- Feigl, K. L., Sarti, F., Vadon, H., McClusky, S., Ergintav, S., Durand, P., Bürgmann, R., Rigo, A., Massonnet, D. and Reillinger, R. (2002). Estimating slip distribution for the İzmit mainhock from coseismic GPS, ERS1, RADARSAT. And SPOT measurements. *Bull. Seism. Soc. Am, 92, 138-160.*
- Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., and Rocca, F. (2007). InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. Noordwijk, The Netherlands: ESA.

- Gabriel, A.K., Goldstein R.M., Zebker, H.A. (1989). Mapping Small Elevation Changes over large areas--differential radar interferometry. *J.Geophys. Res*, 94(B7), 9183-9191.
- Galloway, D. L. ve Burbey, T.J. (2011). Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, 19:1459-1486
- Ganas, A., Elias, P., Briole, P., Cannavo, F., Valkaniotis, S., Tsiromi, V., Partheniou, E. (2020). Ground Deformation and Seismic Fault Model of The M6.4 Durres (Albania) Nov. 26, 2019 Earthquake, Based on GNSS/InSAR Observations, MDPI.
- Goldstein, R. M., Enelhardt, H., Kamp, B., Frolisch, R. M. (1993). Satellite Radar Interferometry for Monitoring Ice Sheet Motion:Application to an Antartic Ice Stream. 141, 117-1172.
- Görken, M. (2017). *Sentinel-1 yapay açıklıklı radar uydusunun topoğrafik tasviri. Yüksek lisans tezi, Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak.*
- Guerrieri, L., Baer, G., Hamiel., Amit, 2R., Blumetti, A.M., Comerci, V., . . . Vittori, E. (2010), InSAR data as a field guide for mapping minor earthquake surface ruptures: Ground displacements along the Paganica Fault during the 6 April 2009 L'Aquila earthquake. *Geophys. Res. Lett*, 115, B12331.
- Hanssen, R. (2001). Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. *Kluwer Academic Publishers Dordrecht*, 10, 328.
- Horasan. (2013). *Investigation of post seismic deformation in karlıova (Turkey) inferred from InSAR analysis. Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.*
- Jin, F., Caijun, X., Yangmao, W., Shuai, W., Guangyu, X., Yingwen, Z., Lei, Y. (2019). The 2018 Mw 7.5 Palu Earthquake: A Supershear Rupture Event Constrained by InSAR and Broadband Regional Seismograms. MDPI.
- Kobayashi, T., Munekane, H., Kuwahara, M., & Furui, H. (2024). Insights on the 2023 Kahramanmaraş Earthquake, Turkey, from InSAR: fault locations, rupture styles and induced deformation. *Geophysical Journal International*, 236(2), 1068-1088.

- Köse, M. H. (2006). Uydu radar görüntülerinden üç boyutlu sayısal arazi modelinin üretilmesi, Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- 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, 138-142.
- Massonnet, D., Feigl, K. L. (1998). Radar Interferometry and its Application to Changes in the Earth's Surface. *Reviews of Geophysics*, 36(4), 441-500. Doi: 10.1029/97RG03139.
- Orhan, O. (2018). *Uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemleri ile muhtemel obruk alanlarının belirlenmesi. Doktora tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.*
- Peyret M., Djamour Y., Rizza M., Ritz J.-F., Hurtrez J.-E., Goudarzi M.A., Nankali H., Chery J., Le Dortz K., Uri F. (2008). Monitoring of the large slow Kahrod landslide in Alborz mountain range (Iran) by GPS and SAR interferometry. *Engineering Geology*, 100, 131-141.
- Pozar, D. M. (2004). *Microwave Engineering* Wiley.
- Poland, J. ve Davis, G. (1969). Land subsidence due to withdrawal of uids. *Reviews in Engineering Geology*, 2:187-269.
- Poland, J. (1984). *Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal.* UNESCO.
- Purba, J., Priadi, R., Amelia, R., Dwilyantari, A. A. I., Jaya, L. M. G., La Restele, O., & Gana Putra, I. (2024). Surface deformation and its implications for land degradation after the 2021 Flores earthquake (M7. 4) using differential interferometry synthetic aperture radar. *Journal of Degraded & Mining Lands Management*, 12(1).
- Saatchi, S. (2019). "SAR Methods for Mapping and Monitoring Forest Biomass. " *SAR Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation.* Eds. Flores, A., Herndon, K., Thapa, R., Cherrington, E., NASA. Doi:10.25966/hbm1-ej07.

Schmidt, D. A. ve Burgmann, R. (2003). Time-dependent land uplift and subsidence in the santa clara valley, california, from a large interferometric synthetic aperture data set. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 108(B9).

Şengün, Y. (2009). *GPS ve InSAR ölçülerini birlikte kullanarak İzmit depreminde oluşan deformasyonların belirlenmesi: nokta seyrekleştirmede yeni bir algoritma. Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.*

Şentürk, S. (2020). *InSAR uzaktan algılama tekniği ile aktif heyelanların izlenmesi: Ağcagüney (Samsun) örneği. Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.*

Tolomei, C., Salvini, S., Merryman, J.P., Boncori., Pezzo, G. (2014), InSAR measurement of crustal deformation transients during the earthquake preparation processes: a review. *Boll. Di Geo. Teo. ed App*, 56, 151-166.

URL-1, <https://scihub.copernicus.eu>. 01 Ocak 2024

URL-2, <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/15-temmuz-2019-basakli-oltu-erzurum-depremi>. 01 Ocak 2023

URL-3, <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/20-mart-2019-yenikoy-acipayam-denizli-depremi-6>. 01 Ocak 2023

URL-4, <https://www.harita.gov.tr/public/sunum>. 25.12.2024

URL-5, <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/24-ocak-sivrice-elazig-depremi-2>. 01 Ocak 2023

Üstün, A., Tuşat, E., ve Yalvaç, S. (2010). Preliminary results of land subsidence monitoring project in Konya closed basin between 2006-2009 by means of GNSS observations. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10:1151-1157.

Wen, Y., Li, Z., Xu, C., Ryder, I., Bürgmann, R. (2012), Postseismic motion after the 2001 Mw 7.8 Kokoxili earthquake in Tibet observed by InSAR time series. *Jour. of Geo. Res*, 117, B08405.

Wright, T.J., Parsons, B.E., Jackson, J.A., Haynes, M., Fielding, E.J., England, P.C., Clarke, P.J. (1999). Source parameters of the 1 October 1995 Dinar (Turkey) earthquake from SAR interferometry and seismic bodywave modelling. *Earth Planet. Sci. Lett*, 172, 23-37.

- Wright, T.J., Fielding, E.J., ve Parsons, B.E. (2001). Triggered slip: observations of the 17 August 1999 Izmit (Turkey) earthquake using radar interferometry. *Geophys. Res. Lett*, 28(6), 1079-1082.
- Wright, T.J., Parsons, B.E., ve Fielding, E.J. (2001). Measurement of interseismic strain accumulation across the North Anatolian Fault by satellite radar interferometry. *Geophys. Res. Lett*, 28(10), 2117-2120.
- Yalvaç, M. (2021). *Küçük mendere havzasında oluşan zemin çökmelerinin yapay açıklıklı radar yöntemiyle izlenmesi. Yüksek lisans tezi, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane.*
- Yalvaç, S. (2016). *Konya kapalı havzasında düşey yönlü zemin hareketlerinin GNSS zaman serileri yardımıyla belirlenmesi. Doktora tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.*
- Yalvaç, S. (2020). Determining the effects of the 2020 Elazığ-Sivrice/Turkey (Mw 6.7) earthquake from the surrounding CORS-TR GNSS stations. *Turkish Journal of Geosciences*, 1(1), 15-21.
- Yariv Hamiel ve Yuri Fialko.(2006). Structure and mechanical properties of faults in the North Anatolian Fault system from InSAR observations of coseismic deformation due to the 1999 Izmit (Turkey) earthquake. *Geophys. Res. Lett*, 112, B07412.
- Yingfeng, Z., Guohong, Z., Eric A, H., Xinjian S., Shaoyan, W., Ronghu Z. (2017). Coseismic Fault Slip of the September 16, 2015 Mw 8.3 Illapel, Chile Earthquake Estimated from InSAR Data. *Pure and App. Geop*, pp, 73-82.
- Zebker, H.A. ve Rosen, P. (1994). On the derivation of coseismic displacement field using differential radar interferometry: The Landers earthquake, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1994. IGARSS'94. Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis and Interpretation. *International*, 286-288.

ÖZGEÇMİŞ

Osman Fırat, lise eğitimini Anadolu Meslek Lisesi'nde Harita-Tapu-Kadastro bölümü üzerine tamamlamış ve bu alanda teknisyen olarak mezun olmuştur. Hayatının büyük bir kısmını spora adanmış ve bu bağlamda Karate dalının Shotokan disiplinde siyah kuşak 1. Dan sahibi olmuştur. Lisans eğitimini 2020 yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesinde tamamlamış ve 2021 yılında Gümüşhane Üniversitesinde yüksek lisans eğitimine başlamıştır. Mesleki kariyerinde, Toplu Konut İdaresi Başkanlığı (TOKİ) projelerinde kapsamlı bir deneyim elde etmiştir. Birçok şehirde farklı projelerde görev alarak, binlerce konutun inşa sürecine önemli katkılarda bulunmuştur. Şuan da aktif olarak büyük projelerde saha şefliği, kontrol mühendisliği ve müşavirlik yapmaktadır. Alt yapı ve üst yapı projelerde uzmandır. Mesleki anlamda birçok belgeye ve sertifikaya sahiptir. Hedefi, elde ettiği başarıların her zaman bir adım daha ötesine geçmek olmuştur.