KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEODEZİ VE JEOİNFORMASYON MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YEREL DEFORMASYONLAR NEDENİYLE OLUŞAN GERİNİMLERİN INSAR TEKNİĞİ İLE ARAŞTIRILMASI

ESRA KOÇ

KOCAELİ 2025

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEODEZİ VE JEOİNFORMASYON MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YEREL DEFORMASYONLAR NEDENİYLE OLUŞAN GERİNİMLERİN INSAR TEKNİĞİ İLE ARAŞTIRILMASI

ESRA KOÇ

Dr. Öğr. Üyesi Pakize KÜREÇ NEHBİT
Danışman, Kocaeli Üniversitesi **……....**
Prof. Dr. Haluk KONAK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi **……**
Dr.Öğr. Üyesi Emrah BUDAKOĞLU
Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi **……**

Tezin Savunulduğu Tarih: 30.04.2025

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmasında,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

■ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☐ Bu tez çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler ……tarafından……. no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Esra KOÇ

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimler Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan ***"Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge"*** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.

☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.

■ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Esra KOÇ

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Aktif tektonik hareketlerin etkisi altında bulunun ülkemizde, kabuk hareketlerinin izlenmesi modellenmesi ve yorumlanması önemini koruyan güncel konuların başında gelmektedir. Bu çalışma kapsamında jeodezik ve uzaktan algıma teknikleri ile deformasyonların belirlenmesi ve yorumlanması amaçlanmıştır.

Tez çalışması süresi boyunca bana her türlü konuda bilgi ve tecrübelerini aktaran ve her türlü destek ve yardımlarını benden esirgemeyen değerli tez danşmanım ve çok değerli öğretmenim Dr. Öğr. Üyesi Pakize KÜREÇ NEHBİT' e çok teşekkür ederim.

Öğrenim hayatımda yeri büyük olan hayat tecrübesiylede bana yol gösteren çok değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Cankut Dağdal İnce' ye ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak bana her zaman her konuda destek olan hep yanımda hissettiğim canım annem Saniye Koç'a, canım babam Yakup Koç' a, canım kardeşim Muhammet Koç' a ve en yakın arkadaşım Selcan Ayhan'a çok teşekkür ederim.

Nisan – 2025 Esra KOÇ

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ…… . i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI…….. ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR..... iii
İÇİNDEKİLER.....iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....v
TABLOLAR DİZİNİ.....vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ..... vii
ÖZET..... viii
ABSTRACT ix
1. GİRİŞ.....1
2. GAUSS-MARKOFF MODELİNDE JEODEZİK AĞLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ.....5
2.1. Dolaylı Öçüler Dengelemesi 7
2.2. Uyuşumsuz Ölçülerin Belirlenmesi.....11
2.3. Duyarlık ve Güven Ölçütleri 15
3. JEODEZİK AĞLARDA DEFORMASYON ANALİZLERİ.....18
3.1. Statik Modelde Deformasyon Analizi 19
3.1.1. Global tutarlılık testleri..... 20
3.1.2. Hareketli istasyonların yerelleştirilmesi 21
4. GERİNİM ANALİZLERİ.....23
5. INSAR TEKNİĞİ İLE DEFORMASYON ANALİZLERİ.....26
5.1. InSAR Tekniğinin Temelleri.....26
6. SAYISAL UYGULAMA 32
6.1. InSAR Tekniği ile Deformasyon Analizi 33
6.2. Jeodezik GNSS Ağları ile Deformasyonların Belirlenmesi 41
6.3. 1B Gerinim Analizleri 44
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....48
KAYNAKLAR …….....50
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER……54
ÖZGEÇMİŞ…….55

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 4.1. Deformasyon Modelleri 23
Şekil 5.1. Faz Farkı.....27
Şekil 5.2. İnterferometri Geometrisi.....28
Şekil 5.3. Deformasyon Modeli.....29
Şekil 5.4. Snap iş akışı.....30
Şekil 6.1. Pazarcık ve Elbistan depremleri ile artçı şok haritası.....32
Şekil 6.2. Deprem öncesi (04.02.2023) ve sonrası (28.02.2023) SAR görüntüleri.....34
Şekil 6.3. Subswath 1 için 1-2 burstlarda elde edilen deformasyon.....36
Şekil 6.4. Subswath 1 için 3-4 burstlarda elde edilen deformasyon.....36
Şekil 6.5. Subswath 1 için 5-7 burstlarda elde edilen deformasyon.....37
Şekil 6.6. Subswath 1 için 8-9 burstlarda elde edilen deformasyon.....37
Şekil 6.7. Subswath 2 için 1-2 burstlarda elde edilen deformasyon.....38
Şekil 6.8. Subswath 2 için 5-6 burstlarda elde edilen deformasyon.....38
Şekil 6.9. Subswath 2 için 7-8 burstlarda elde edilen deformasyon.....39
Şekil 6.10. Subswath 2 için 9-10 burstlarda elde edilen deformasyon.....39
Şekil 6.11. Jeodezik GNSS Ağı.....41

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Jeodezik Ağlarda Datum Parametreleri 10
Tablo 6.1. SAR görüntü özellikleri 33
Tablo 6.2. InSAR yöntemi ile elde edilen yer değiştirme değerleri örnek dosyası.....40
Tablo 6.3. InSAR'dan elde edilen TUSAGA-Aktif istasyonlarına ait deformasyon vektörleri 41
Tablo 6.4. Deprem öncesi için robust ağırlıklandırmalı uyuşumsuz ölçü testi 42
Tablo 6.5. Deprem sonrası için robust ağırlıklandırmalı uyuşumsuz ölçü testi 42
Tablo 6.6. Deprem Öncesi Dengeli Koordinatlar (m_0 = 2,20 cm).....43
Tablo 6.7. Deprem Sonrası Dengeli Koordinatlar (m_0 = 1,18 cm).....44
Tablo 6.8. TUSAGA-Aktif İstasyonlarına ait Deformasyon vektörleri 45
Tablo 6.9. TUSAGA-Aktif İstasyonlarının dengeli coğrafi koordinatları ve düşey yer değiştirme vektörü 45
Tablo 6.10. InSAR ve jeodezik GNSS Ağ sonuçlarından elde edilen 1B gerinim parametreleri.....46
Tablo 6.11. Farklı tekniklerden elde edilen gerinim parametreleri arasındaki fark için anlamlılık testleri 47

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

δ_{0i}^2 : Dış güven ölçütü
Δ_{0i} : İç güven ölçütü
Δ_i : i. ölçüdeki kaba hata
K_{xx} : Deneysel varyans-kovaryans matrisi
$\bar{P}$: Robust ağırlık matrisi
Q_{dd} : Yer değiştirme vektörünün ters ağırlık matrisi
Q_{xx} : Bilinmeyenlerin ters ağırlık matrisi
W_i : Robust ağırlık fonksiyonu
Σ_{xx} : Kuramsal varyans-kovaryans matrisi
A : Katsayılar matrisi
E : Gerinim matrisi
N : Normal denklemler
d : Yer değiştirme vektörü
l : Ölçüler vektörü
n : Sağ taraf vektörü
v : Düzeltmeler vektörü
x : Dengeleme bilinmeyenleri

Kısaltmalar

InSAR : Sentetik Açıklıklı Radar İnterferometrisi
SAR : Sentetik Açıklıklı Radar
SYM : Sayısal Yükseklik Modeli
TUSAGA-Aktif : Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı-Sabit

YEREL DEFORMASYONLAR NEDENİYLE OLUŞAN GERİNİMLERİN INSAR TEKNİĞİ İLE ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Tektonik hareketlerin etkisi ile oluşan deformasyonların hızlı ve güvenilir bir şekilde elde edilmesi jeodezinin konusu arasındadır. Kabuk hareketleri sonucunda oluşan deformasyonlar fay hattının yapısal özelliklerine göre yatay ya da düşey yönde gerçekleşmektedir. Doğrultu atımlı faylarda yatay yönde oluşan deformasyon büyüklüğü düşey yöndekine göre daha baskındır. Deformasyonlar bölgeyi temsil eden jeodezik ağlar ya da bir uzaktan algılama tekniği olan InSAR ile tespit edilebilmektedir. Bu çalışma kapsamında, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinin etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda bölgeyi temsil eden SAR görüntüleri kullanılarak InSAR tekniği ile düşey yöndeki hareketler tespit edilmiştir. Bununla birlikte TUSAGA-Aktif istasyonları kullanılarak jeodezik GNSS ağı kurulmuştur. Jeodezik GNSS ağının deprem öncesi ve deprem sonrası verileri bivaryat dengeleme modeline göre Gauss- Markoff modelinde en küçük kareler ilkesine göre ve tüm iz minimum koşulu altında değerlendirilerek, TUSAGA-aktif istasyonlarında oluşan deformasyon büyüklükleri tespit edilmiştir. Jeodezik ağlar ile düşey yöndeki deformasyonların tespit edilmesi için kartezyen dik koordinat sisteminde elde edilen dengeli koordinatlar, coğrafi koordinatlara dönüştürülmüştür. Coğrafi koordinatlar kullanılarak kartezyen koordinat sisteminde elde edilen deformasyon vektör bileşenleri yerel koordinat sistemine dönüştürülmüştür. Çalışmanın son aşamasında ise 1B gerinim analizleri ile InSAR ve jeodezik ağlardan elde edilen deformasyonlar geometrik olarak yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Deformasyon, Gerinim, InSAR, Jeodezik Ağlar.

INVESTIGATION OF STRAINS OCCURED BY LOCAL DEFORMATIONS WITH INSAR TECHNIQUE

ABSTRACT

Geodesy aims to obtain the deformations caused by tectonic movements quickly and reliably. Deformations resulting from crustal movements can occur horizontally or vertically, depending on the structure of the fault zone. In strike-slip faults, the magnitude of deformation in the horizontal direction is larger than in the vertical direction. Deformations can be detected with geodetic networks representing the region or with InSAR, a remote sensing technique. The aim of this study is to investigate the effects of the February 6, 2023, Kahramanmaraş earthquake. Vertical movements were detected with the InSAR technique using SAR images representing the region. In addition, a geodetic GNSS network was established using TUSAGA-Active stations. Before and after earthquakes data of the geodetic GNSS network were evaluated according to the least squares in the Gauss-Markoff model according to the bivariate adjustment model and under the minimum condition of the entire trace, and the deformation magnitudes occurring in the TUSAGA-active stations were determined. The adjusted coordinates obtained in the Cartesian coordinate system were converted into geographical coordinates to detect vertical deformations. Using geographical coordinates, the deformation vector components obtained in the cartesian coordinate system were converted to the local coordinate system. In the last stage of the study, deformations obtained from InSAR and geodetic networks were interpreted geometrically with 1D strain analyses.

Keywords: Deformation, Strain, InSAR, Geodetic Network.

1. GİRİŞ

Jeodezi, dünya yüzeyindeki alanların modellenmesi için mekânsal verileri üç boyutlu belirleyebilen ve bu verileri ölçme, işleme, değerlendirme işlemeleriyle analiz eden bir bilim dalıdır. Bu bağlamda jeodezik ağlar, belirli bir amaç doğrultusunda en etkin biçimde yönetilen, değerlendirilen noktalar bütünüdür. Jeodezik ağlar kurulurken dikkat edilen ana unsurlar bu ağların güvenilir ve hassas olmasıdır. Bu nedenle jeodezik ağların duyarlık ve güvenirlik analizleri ile irdelenmesi gerekmektedir.

Jeodezik çalışmaların en önemli kısımlarından birisi büyük mühendislik yapılarındaki veya yer yüzeyindeki deformasyonları incelemektir. Yer kabuğundaki levha hareketlerinden dolayı meydana gelen tektonik hareketler, mühendislik yapılarında ve lokal yüzeylerde deformasyonlara neden olmaktadır. Oluşan yüzey deformasyonları, kurulan jeodezik ağlar ile belirlenebilmektedir. Bununla birlikte uzaktan algılama yöntemlerinden biri olan Sentetik Açıklık Radar İnterferometrisi (InSAR) yöntemi ile düşey deformasyonlar belirlenebilmektedir.

Ülkemiz kuzeyde Avrasya, güneyde Afrika, güneybatıda Arap levhaları arasındaki Anadolu levhası üzerinde yer almaktadır (Küreç Nehbit, 2018). Ülkemiz aktif hareketliliğe sahip Kuzey Anadolu Fay Hattı (KAF), Doğu Anadolu Fay Hattı (DAF) ve Batı Anadolu Fay Hattı'nın (BAF) etkisi altındadır. Bu nedenle, tektonik hareketlerin etkisiyle oluşan deformasyonların belirlenmesi ve deformasyonların geometrik yorumunun gerinim analizleri ile irdelenmesi önemlidir.

Gürbüz (2022)'de, SAR interferometri tekniği ile deformasyon bölgelerinin yeniden haritalanması ve gelecekteki deformasyonların izlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, InSAR tekniğinin ne olduğu, kullanılan yöntemler, çalışma prensipleri, veri işleme adımları ve deformasyon tespiti için InSAR tekniğiyle yapılan uygulamalar detaylı bir şekilde açıklanmıştır. SAR İnterferometri tekniğinin deformasyon meydana gelen bölgelerin yeniden haritalanmasında ve gelecekte oluşabilecek deformasyonların izlenmesinde önemli bir rolü olduğu vurgulanmıştır.

Karaöz (2022)'de bağıl güven elipsleri yardımıyla deformasyon analizleri uygulanmıştır. Aynı zamanda deformasyon sonuçları ve ağın bu deformasyonları algılayabilme

düzeyleri irdelenmiştir. Bununla birlikte jeodezik ağ noktalarında oluşan noktasal gerinimler en küçük kareler (EKK), en küçük kareler ortanca (EKKO) ve en küçük toplam (EKT) kestirim yöntemleri ile elde edilmiştir. Buna göre EKKO kestiriminin EKT kestirimini iyileştirdiği, EKT ve EKK kestirmlerinin davranışlarının birbirine benzediği sonucuna ulaşılmıştır.

Çetin (2010)'da 1 Ekim 1995 Dinar depreminin kaynak parametreleri InSAR tekniği ile belirlenmiştir. Kaydedilen artçı sarsıntıların konumlarının belirlenmesi sonucunda deprem kırığının normalden 7-8 km daha uzun olduğu ve kuzeybatı yönüne doğru ilerlediği belirlenmiştir. Artçı sarsıntıların konumlarının HypoDD tekniği ile iyileştirilmesi ile kırık yapısı listrik olarak tanımlanmıştır. InSAR tekniği ile fay üzerinde elde edilen deformasyonlar ile listrik geometri arasındaki ilişki araştırılmıştır.

Caspary (2000)'de yapmış olduğu çalışmada Gauss-Markov modelinde parametre kestirimleri, deformasyon analizlerinin temelleri, jeodezik ağ yapısı ve uyuşumsuz ölçü testleri hakkında kapsamlı teorik bilgilere ve sayısal uygulamara yer verilmiştir.

Öztürk ve diğ. (2006)'da deprem bölgelerinde deformasyonların belirlenmesi için jeodezik ağların kurulması, farklı epoklarda elde edilen ölçülerin değerlendirilmesi ve deformasyon oluşan nokta kümelerinin belirlenmesi aşamalı olarak irdelenmiştir.

Şengün (2010)'da yapmış olduğu çalışmada GPS ölçüleri kullanılarak InSAR ölçülerinin doğruluğu araştırılmıştır. Çalışma alanı olarak 1999 İzmit depreminin etki alanı seçilmiştir. Buna göre fayın kuzeyinde GPS istasyonlarından elde edilen yer değştirme büyüklükleri ile aynı noktalardaki SAR görüntülerinden elde edilen yer değiştirmeleri arasındaki farkın ortalama değeri 38 mm olarak hesaplanmıştır. Bu farklılıkların kullanılan sayısal yükseklik modelinden, atmosferik koşullardan ve uydu yörünge bilgilerinden kaynaklanabileceği yorumu yapılmıştır.

Şişman ve Dilaver (2005)'de yaptıkları çalışmada ED50 ve WGS84 datumları arasında yapılan dönüşümleri ve datum dönüşümlerinin kaliteleri araştırılmıştır. Çalışma içerisinde datum Bursa-Wolf ve Molodensky Badekas dönüşüm modellerinin temelleri açıklanmıştır. Bununla birlikte dönüşümde kullanılan ölçülerde uyuşumsuz ölçülerin bulunması dönüşüm kalitesini etkileyeği için uyuşumsuz ölçü testinin uygulanması

gerekli görülmüştür. Bu nedenle çalışma içerisinde uyuşumsuz ölçü testlerinin belirlenmesinde kullanılan Data-Snooping, Tau ve Student gibi klasik kestirim yöntemlerin yanında Robust kestirim yöntemleri ve Fuzzy Mantık yöntemi açıklanmıştır.

Wrigt ve diğ. (2004)'de yaptıkları çalışmada çoklu interferogramlar ve farklı görüntüleme teknikleri kullanarak 3B deformasyonun belirlenmesi araştırılmıştır. Kutuplara yakın bölgelerdeki uyduların kullanılmasıyla yer değiştirme vektörünün kuzey bileşeninin belirlenmesinin oldukça zor olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte eğimi 60º ile 120º arasında değişen uydular kullanılarak yer değiştirme vektörünün bileşenlerinin iyi bir şekilde belirleneceği vurgulanmıştır.

Yalçınkaya ve Bayrak (2005)'de Kutlugün heyelan bölgesi çalışma alanı seçilerek statik, dinamik ve kinematik deformasyon modelleri karşılaştırılmıştır. Çalışmanın amacı ise statik ve kinematik deformasyon modelleri kullanılarak dinamik deformasyon modelinin geliştirilmesi olarak tanımlanmıştır. Çalışma alanında jeolojik, jeodezik ve jeofiziksel ölçüler yapılarak deformasyonlar her üç yöntemin kullanılmasıyla belirlenmiştir. Bu çalışma ile heyelan bölgeleri için dinamik deformasyon modelinin daha etkili olduğu ortaya konulmuştur.

Çakır (2003)'de InSAR tekniği kullanılarak 17 Ağustos 1999'da İzmit'te ve 12 Kasım 1999'da Düzce'de gerçekleşen depremlerinin kaynak parametreleri belirlenmiştir. InSAR tekniğinde SAR görüntülerinin faz değerleri kullanılarak topografik yükseklik değişimleri ve yeryüzünde meydana gelen değişimler tespit edilebilmektedir. Çalışmada, SAR görüntüleri üst üste çakıştırılarak eşlenik pikseller arasındaki faz farkından yeni bir görüntü (interferogram) oluşturulduğu açıklanmıştır. Faz farkının oluşma nedenleri, iki görüntünün farklı açılardan elde edilmesi, troposferik gecikmeler ve yeryüzeyindeki değişimler olarak açıklanmıştır. Bununla birlikte, InSAR ile değişimlerin ortaya çıkarılabilmesi için troposfer kaynaklı gecikmelerin olmadığı kabul edilerek farklı bakış açılarından kaynaklanan faz farkı interferogramdan çıkartıldığı belirtilmiştir.

Kobayashi ve diğ. (2024)'de ScanSAR gözlem yöntemi ile InSAR tekniğinde yüzey deformasyonlarını araştırmıştır. Çalışma alanı olarak 2023 Kahramanmaraş depremlerinin etkilediği bölge seçilmiştir. Buna göre bölgede yatay deformasyonun düşey deformasyona göre daha baskın olduğu ortaya konulmuştur.

He ve diğ. (2024) yaptıkları çalışmada InSAR, ALOS-2 SAR ve Sentinel-2 optik verileri kullanarak Kahramanmaraş depremlerinin kinematiği, fay geometrisi ve deformasyon haritasının oluşturulmasını amaçlamıştır. Buna göre 2023 Kahramanmaraş depremlerinin sol yanal doğrultu atımlı bir hareket sergilediği ortaya konulmuştur.

Bülbül ve diğ. (2023)'de 2023 Kahramanmaraş depremlerinin neden olduğu deformasyonu araştırmak için CORS-TR ve IGS istasyonlarından oluşan bir jeodezik ağ kullanılmıştır. Bu jeodezik ağda tanımlanan üçgensel alanlarda meydana gelen alansal değişim değerleri elde edilmiştir. Çalışmanın sonucunda en büyük deformasyon değeri EKZ1 istasyonunda ve en büyük alansal değişim TUF1-EKZ1-MAR1 üçgensel alanında elde edilmiştir.

Küreç Nehbit (2018)'de yapmış olduğu çalışmada epok oturumlu olarak ölçülüp değerlendirilen sıklaştırma GPS ağında kalite sorgulama işlemleri yapılmıştır. Kalite sorgulama işlemlerinde duyarlık ve güven ölçütlerinin yanı sıra algılayabilirlik ve sağlamlık analizleri de kullanılmıştır. Bununla birlikte sıklaştırma GPS ağının geometrik yapısından kaynaklanan gerinimler elde edilmiştir. Ayrıca, ağın iç yapısından kaynaklanan gerinimlere karşı jeodezik ağın sağlamlığı analiz edilmiştir.

Bu nedenle bu çalışmada tektonik hareketler sonucu oluşan deformasyonların jeodezik GNSS ağı ve InSAR teknikleri ile belirlenmesi planlanmıştır. Bunun yanı sıra, InSAR ve jeodezik GNSS ağından elde edilen deformasyon vektörleri kullanılarak 1B gerinim analizlerinin yapılması amaçlanmıştır. Bu tez çalışması 7 ana başlıktan oluşmaktadır. 1. Bölüm çalışmanın girişini oluşturmaktadır. Bu bölümde tez çalışmasının ana hatları açıklanmıştır. 2. Bölüm, jeodezik verilerin Gauss-Markoff modelinde dolaylı ölçüler olarak dengelenmesi hakkında teorik bilgileri içermektedir. 3. Bölüm, jeodezik ağlarda deformasyon analizleri hakkında teorik bilgiler verilerek bu çalışmada kullanılacak olan statik deformasyon analizinin temelleri açıklanmıştır. 4. Bölüm, deformasyonların geometrik olarak yorumlanmasına olanak sağlayan gerinim analizleri hakkında teorik bilgileri içermektedir. 5. Bölüm, InSAR tekniğinin özelliklerini ve deformasyonların belirlenme yöntemlerini içermektedir. 6. Bölüm, sayısal uygulama bölümünü içermektedir. 7. Bölüm ise sayısal uygulama sonucunda elde edilen bilgilerin yorumlanması ve sonuçların tartışılmasını içermektedir.

2. GAUSS-MARKOFF MODELİNDE JEODEZİK AĞLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Dengeleme işleminin temel konusu istatistiksel anlamda rasgele özelliğe sahip ölçülerden yararlanarak, bilinmeyenlerin, dengeli ölçülerin ve bunların fonksiyonlarının en büyük olasılıklı değerinin belirlenmesidir. Parametre kestiriminde kullanılan doğrusal modeller, ölçülerin umut değerleri ile bilinmeyen parametreler arasındaki doğrusal fonksiyonları ifade etmektedir. Doğrusallaştırma işlemi ile bilinmeyen parametrelerle ölçüler arasında fiziksel, matematiksel ve geometrik ilişkiler kurulmaktadır (Demirel, 2003). Bilinmeyen parametrelerin belirlenmesi için çeşitli kestirim yöntemleri kullanılmaktadır. Kestirim yöntemlerinin temel amacı kestirim değerlerinin ($\hat{x}$, $\hat{s}$), evrensel kümenin istatistik değerleri olan umut değeri (μ) ve varyansı (σ^2) temsil etmesini sağlamaktır. Bu nedenle parametre kesirimi için kullanılacak kestirim yöntemlerinin:

- Tutarlı olma
- Dış merkezli olmama
- Minimum varyanslı olma
- Etkin olma

özelliklerini sağlaması gerekir (Konak, 1995). Bilinmeyen parametrelerin kestirimi için kullanılan başlıca kestirim yöntemleri: moment kestirimi, en büyük olabilirlik kestirimi ve en küçük kareler kestirimidir.

- Moment Kestirim Yöntemi: Moment kestirimi ile parametre kestirimi için bir değişkenin k. dereceden momentleri kullanılmaktadır. Buna göre 1. Dereceden merkezsel moment Denklem (2.1) ile;

$$E\{(x-\mu)\} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\mu) \tag{2.1}$$

ortalama değer, 2. Dereceden merkezsel moment Denklem (2.2) ile;

$$E\{(x-\mu)^2\} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\mu)^2 \tag{2.2}$$

varyans elde edilir (URL-1).

• En Büyük Olabilirlik Kestirim Yöntemi: Bir veri kümesinde gerçekeşme olasılığı en yüksek parametre kestirim değeri olarak belirlenir. Bu yöntem için rasgele değişkenler kümesi $x_i = \{x_1, x_2, \dots \dots x_n\}$ içinde tanımlı rasgele değişkenler birbirinden bağımsız ve aynı olasılık fonksiyonuna sahip ise Bayes kuralı için Denklem (2.3) olduğu gibi;

$$f(x_1, x_2, \dots \dots x_n) = f(x_1)\ ;\ f(x_2) \dots \dots f(x_n) \tag{2.3}$$

geçerli olur. Bayes kuralı kullanılarak, rasgele değişkenler $(x_1, x_2, \dots \dots x_n)$ve kestirim parametrelerine $(P_1, P_2, \dots \dots P_m)$ bağlı olarak benzerlik (likelihood) fonksiyonu (L) Denklem (2.4) ile;

$$L(x_1, x_2, \dots \dots x_n; P_1, P_2, \dots \dots P_m) = \prod_{i=1}^{n} f(x_i: P_1, P_2, \dots \dots P_m) \tag{2.4}$$

belirlenmektedir. Benzerlik fonksiyonunu (likelihood) en büyük yapan parametre değeri en uygun kestirim değeri olarak kabul edilmektedir. En büyük olabilirlik kestirim yönteminde rasgele değişkenlerin olasılık fonksiyonu Denklem (2.5);

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \tag{2.5}$$

ve Likelihood fonksiyonu Denklem (2.6) kullanılarak;

$$L = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{n/2}} e^{-\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\frac{(x_i-\mu)^2}{\sigma^2}} \tag{2.6}$$

olasılık fonksiyonuna bağlı olarak tanımlanmaktadır. Olasılık fonksiyonunu en büyük yapan değer umut değer yani aritmetik ortalama Denklem (2.7);

$$\mu = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \tag{2.7}$$

ile elde edilmektedir. Kestirim değerinin varyansı ise, Likelihood fonksiyonunun varyans değerine göre diferansiyeli ile hesaplanmaktadır.

Buna göre kestirim değerinin varyansı Denklem (2.8);

$$\sigma^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \mu)^2 \tag{2.8}$$

ile belirlenmektedir (URL-1).

• En küçük Kareler Kestirim Yöntemi: Düzeltmelerin kareleri toplamının minimum olması beklenmektedir. Diğer bir ifade ile EKK yönteminde umut değer (μ) yerine kestirim değeri $\hat{x}$ ve ölçüler (l_i) kullanılarak düzeltme değerleri (v) Denklem (2.9);

$$v_i = \hat{x} - l_i \tag{2.9}$$

kullanılarak elde edilmektedir. EKK'nın amaç fonsiyonunun en genel hali ise $v^T P v = min$ olarak tanımlanmaktadır (Öztürk ve Şerbetçi, 1995).

$v^T P v = min$ ilkesine bağlı olarak yapılan bir dengeleme işlemi ile bilinmeyenler için en uygun değer elde edilmektedir. Bununla birlikte bilinmeyenlere ait varyans değerleri en küçük, ağırlık değerleri ise en büyük olarak hesaplanmaktadır (Demirel, 2003).

2.1. Dolaylı Öçüler Dengelemesi

Bilinmeyenlerin doğrudan ölçülemediği durumlarda, bilinmeyenlerin yaklaşık değerleri kullanılarak çok sayıda bilinmeyenin belirlenmesi için dolaylı ölçüler dengelemesi kullanılmaktadır (Öztürk ve Şerbetçi, 1995; Demirel 2003). Ölçü sayısının (n) bilinmeyen sayısından (u) fazla olması durumunda kesin değerler dengelemeli olarak elde edilebilmektedir.

Ölçülerin dengelemeli olarak değerlendirilmesi için matematik modeller kullanılmaktadır. Matematik modeller, fonksiyonel model ve stokastik modelden oluşmaktadır. Buna göre:

a) Fonksiyonel modeller, ölçülerle bilinmeyenler arasındaki sabit, geometrik ve fiziksel ilişkileri tanımlamaktadır. Dengeleme işleminin yapılabilmesi için fonksiyonel modelin doğrusal olması gerekmektedir. Doğrusal olmayan fonksiyonel modellerin, bilinmeyenlerin yaklaşık değerleri kullanılarak, bilinmeyenlere göre kısmi türevleri alınarak doğrulsallaştırılmaktadır. Buna göre en genel hali ile fonksiyonel model Denklem (2.10);

$$L_i + v_i = f(x_0 + dx) \tag{2.10}$$

L_i ölçüler, v_i düzeltmeler, x_0 bilinmeyenlerin yaklaşık değerleri ve dx dengeleme bilinmeyenleri olmak üzere, ile tanımlanmaktadır (Öztürk ve Şerbetçi, 1995).

b) Stokastik Model ise ölçülerin duyarlıkları ve aralarındaki korelasyon bilgilerinden oluşmaktadır. Buna göre stokastik model;

$$K_{ll} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \rho_{12}\sigma_1\sigma_2 & \dots & \rho_{1n}\sigma_1\sigma_n \\ \rho_{12}\sigma_1\sigma_2 & \sigma_2^2 & \dots & \rho_{2n}\sigma_2\sigma_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \tag{2.11}$$

σ kuramsal varyans ve ρ_{12} korelasyon katsayısı olmak üzere Denklem (2.11) ile hesaplanmaktadır (Öztürk ve Şerbetçi, 1995).

Jeodezik ağlarda, dengeleme bilinmeyenleri istasyon noktalarının konum bilgileridir. GNSS ağlarında ise iki istasyon noktası arasındaki baz bileşenleri ölçülmektedir. Dolaylı ölçüler dengelemesi için, ilk aşamada bilinmeyenlerin yaklaşık değerleri kullanılarak Denklem (2.12a) ve (2.12b) ile;

Ölçü + Düzeltmesi = Bilinmeyenlerin Fonksiyonu (2.12a)

$$L_i + v_i = \Phi(x, y, z, \dots \dots u) \tag{2.12b}$$

düzeltme denklemleri yazılır. Bilinmeyenlerin fonksiyonu yaklaşık değerler kullanılarak Taylor serisine açılır. Buna göre Taylor serisi Denklem (2.13);

$$L_i + v_i = \Phi_i(x_0, y_0, z_0) + \frac{\partial \Phi_i}{\partial x} dx + \frac{\partial \Phi_i}{\partial y} dy + \frac{\partial \Phi_i}{\partial y} dz \tag{2.13}$$

ile tanımlanmaktadır. Katsayılar matrisinin elemanları Denklem (2.14);

$$a_i = \frac{\partial \Phi_i}{\partial x}, \quad b_i = \frac{\partial \Phi_i}{\partial y}, \quad c_i = \frac{\partial \Phi_i}{\partial z} \tag{2.14}$$

ve küçültülmüş gözlemler Denklem (2.14);

$$l_i = L_i - \Phi_i(x_0, y_0, z_0) \tag{2.15}$$

kullanılarak elde edilir (Öztürk ve Şerbetçi, 1995). Bu durumda düzeltme denklemleri Denklem (2.16)'da olduğu gibi;

$$v_i = a_i.dx + b_i.dy + c_i.dz - l_i \tag{2.16}$$

şeklinde yazılır. Fonksiyonel model Denklem (2.17) ile;

$$v_{n,1} = A_{n,u}.x_{u,1} - l_{n,1} \tag{2.17}$$

ve stokastik model Denklem (2.18a) ve (2.18b) kullanılarak;

$$K_{ll} = s_0^2.Q_{ll} \tag{2.18a}$$

$$P = {Q_{ll}}^{-1} \tag{2.18b}$$

$v^T Pv = min$ amaç fonksiyonunu sağlayan EKK ilkesine göre dengeleme hesabı gerçekleştirilir.

Bir jeodezik ağın belirli bir koordinat sistemindeki konumu, yönü ve ölçeği, datum parametreleriyle tanımlanmaktadır. Datum parametreleri, jeodezik ağın konumunu, yönünü ve ölçeğini belirleyerek koordinat sistemindeki yerini netleştirir. Yatay ya da eğik uzunluklar, yükseklik farkları, düşey açı ölçümleri ve üç boyutlu koordinat farkları gibi jeodezik ölçüler, ağın konumu, yönü ve ölçeği hakkında doğrudan bilgi vermez. Bu tür ağların dengeleme işlemine ise "Serbest Ağ Dengelemesi" denilmektedir. Serbest ağ dengelemesinde Denklem (2.19)'da olduğu gibi normal denklemlerin (*N*);

$$N = A^T PA \tag{2.19}$$

doğrudan inversi alınamaz. Bu durumda G matrisi kullanılarak normal denklemlerin tersi alınır. G matrisinin boyutu datum defekt sayısına bağlı olarak belirlenmektedir.

Jeodezik ağların bir koordinat sistemindeki yerinin ve yönünün belirlenebilmesi için datum parametreleri olarak adlandırılan, başka bir kaynaktan elde edilen bilgilere ihitiyaç duyulur (Tablo 2.1). Jeodezik ağ gözlemlerinin dolaylı ölçüler dengelemesi sırasında datum parametrelerinin tamamının ya da bir bölümünün eksik olması nedeniyle datum defekti oluşmaktadır (Öztürk ve Şerbetçi, 1992).

Tablo 2.1. Jeodezik Ağlarda Datum Parametreleri (Öztürk ve Şerbetçi, 1992)

Ağın Türü	**Datum Belirsizliği**	**Datum Parametresi**
Nivelman	1	1 düşey yönde öteleme
Doğrultuları gözlenen yatay konum ağları	4	2 öteleme ve 1 dönüklük 1 ölçek
Doğrultu- Kenar	3	2 öteleme 1 dönüklük
Yatay ve Düşey doğrultuları gözlenen 3D Ağ	7	3 öteleme 3 dönüklük 1 ölçek
GNSS Ağı	3	3 öteleme

Jeodezik GNSS ağları için dönüşümün katsayılar matrisi (G) Denklem (2.20);

$$G_{3p,3} = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{p} & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{p} & 0 \\ 0 & 0 & 1/\sqrt{p} \\ & \vdots & \\ 1/\sqrt{p} & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{p} & 0 \\ 0 & 0 & 1/\sqrt{p} \end{bmatrix} \tag{2.20}$$

kullanılarak normal denklemlerin pseudo-inversi Denklem (2.21) olduğu gibi;

$$N^{+} = (A^{T}PA + GG^{T})^{-1} - GG^{T} \tag{2.21}$$

elde edilir. Dengeleme bilinmeyenleri Denklem (2.22) ile;

$$x = N^{+}A^{T}Pl \tag{2.22}$$

ve dengeleme bilinmeyenlerinin ters ağırlık matrisi ters ağırlıkların yayılma ilkesine göre Denklem (2.23) kullanılarak;

$$Q_{xx} = (A^{T}PA)^{-1} \tag{2.23}$$

elde edilmektedir (Öztürk ve Şerbetçi, 1995). Düzeltme vektörü (v) Denklem (2.24)'de olduğu gibi;

$$v = \tilde{l} - l \tag{2.24}$$

dengeli ölçüler $(\tilde{l} = Ax)$ ile ölçüler (l) vektürü arasındaki farktan elde edilmektedir. Dengeleme işleminin denetimleri Denklem (2.25) ve (2.26);

$$[Pvv] = l^{T}Pl - n^{T}x \tag{2.25}$$

$$-v^{T}Pl = l^{T}Pl - x^{T}A^{T}Pl \tag{2.26}$$

kullanılarak yapılmaktadır (Öztürk ve Şerbetçi, 1995).

2.2. Uyuşumsuz Ölçülerin Belirlenmesi

Rasgele hatalara çok yakın kaba hatalar dengeleme işlemlerinin ardından yapılacak olan istatistik testler ile belirlenebilmektedir. Bu nedenle model hipotez testleri kullanılarak dengelemenin matematik modelinin geçerliliği, diğer bir ifade ile matematik modelin ölçü duyarlıklarını ve aralarındaki korelasyonu, fiziksel ve geometrik ilişkileri yeterince temsil edip etmediği test edilmektedir. Bunun için sıfır hipotezi ve seçenek hipotezi Denklem (2.27) ve (2.28)'deki gibi;

$$H_0: E\{s_0^2\} = E\{m_0^2\} \tag{2.27}$$

$$H_S: E\{s_0^2\} \neq E\{m_0^2\} \tag{2.28}$$

oluşturulur. Model hipotez testi için test büyüklüğü, $s_0^2 > m_0^2$ olması durumunda;

$$T = \frac{s_0^2}{m_0^2} \tag{2.29}$$

Denklem (2.29) ile hesaplanmaktadır (Küreç, 2010). $T > F_{f_1, f_{2,1-\frac{\alpha}{2}}}$ olması durumunda α yanılma olasılığı ile model hipotezi geçersizdir yorumu yapılabilir. Model hipotezinin geçersiz çıkma nedeni ölçülerin birinde ya da birkaçında kaba hata olması olarak düşünülmektedir.

Kaba hatalı ölçülerin belirlenmesinde kullanılan test yöntemleri: Bardaa Testi, Poppe Testi ve Student Testi olarak üçe ayrılmaktadır. Bardaa testi öncül varyansın bilinmesi durumunda kullanılan bir yöntemdir. Yapılan çalışmalarda öncül varyans tam olarak belirlenemediği için uygulamada pek kullanılmayan bir yöntemdir. Tau testi ve student testi ise deneysel varyansın bilinmesi durumunda kullanılan bir yöntemdir (Şişman ve Dilaver, 2005). Her yöntem için test değeri ve test değerinin sınır değeri:

- Bardaa Testi: Bardaa testi için test değeri Denklem (2.30),

$$T_i = \frac{|\mathrm{v}_i|}{\sigma_0 \sqrt{\mathrm{Q}_{\mathrm{vivi}}}} \tag{2.30}$$

ve test değerinin sınır değeri Denklem (2.31),

$$q = \sqrt{\mathrm{F}_{(\mathrm{h},\infty,1-\alpha)}} \tag{2.31}$$

- Poppe Testi (Tau dağılımı): Poppe testi için test değeri Denklem (2.32),

$$\tau = \frac{|\mathrm{v}_i|}{m_0 \sqrt{\mathrm{Q}_{\mathrm{vivi}}}} \tag{2.32}$$

ve test değerinin sınır değeri Denklem (2.33),

$$q = \sqrt{\frac{\mathrm{f}.\mathrm{F}_{(\mathrm{h},\mathrm{f}-\mathrm{h},1-\alpha_0)}}{\mathrm{f}-\mathrm{h}+\mathrm{h}.\mathrm{F}_{(\mathrm{h},\mathrm{f}-\mathrm{h},1-\alpha_0)}}} \tag{2.33}$$

- Student Testi (t-testi): Student testi için test değeri Denklem (2.34),

$$t = \frac{|v_i|}{m_0\sqrt{Q_{vivi}}} \tag{2.34}$$

ve test değerinin sınır değeri Denklem (2.35);

$$q = t_{f-h,1-\alpha/2} \tag{2.35}$$

kullanılarak hesaplanmaktadır.

Herhangi bir ölçünün (Δ_i) kadar kaba hataya sahip olup olmadığın istatistiksel olarak analiz edilmesi için sıfır ve seçenek hipotezleri Denklem (2.36) ve (2.37)'deki gibi;

$$H_0: E\{\widetilde{l_i}\} = E\{l_i + \varepsilon_i\} \tag{2.36}$$

$$H_S: E\{\widetilde{l_i}\} = E\{l_i + \varepsilon_i + \Delta_i\} \tag{2.37}$$

oluşturulmaktadır. l_i herhangi bir i. ölçüsü, ε_i i. ölçüsünün gerçek hata değeri ve Δ_i i. ölçüsündeki kaba hata değeri ve l' kaba hatalı gözlem olarak tanımlanmaktadır (Küreç, 2010). Kaba hatalardan arındırılmış gözlem;

$$l_i = l' - e_i\Delta_i \tag{2.38}$$

$$e_i^T = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad \dots \quad 0] \tag{2.39}$$

$$l + v = l' - e_i\Delta_i + v = Ax \tag{2.40}$$

e_i i. birim vektör olmak üzere Denklem (2.38), (2.39) ve (2.40)'da olduğu gibi gösterilmektedir. Bu durumda genişletilmiş fonksiyonel model Denklem (2.41);

$$l + v = [A \quad e_i]\begin{bmatrix} x \\ \Delta_i \end{bmatrix} \tag{2.41}$$

ve normal denklemler Denklem (2.42);

$$\begin{bmatrix} A^TPA & A^TPe_i \\ e_i^TPA & e_i^TPe_i \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x \\ \Delta_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} A^TPl \\ e_i^TPl \end{bmatrix} = 0 \tag{2.42}$$

ile tanımlanmaktadır (Öztürk ve Şerbetçi, 1992). Normal denklemlerin çözümü ise Denklem (2.43);

$$\begin{bmatrix} x \\ \Delta_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{x\Delta} \\ Q_{\Delta x} & q_{\Delta\Delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^T Pl \\ {e_i}^T Pl \end{bmatrix} \tag{2.43}$$

ile yapılmaktadır. Kaba hatanın ters ağırlığı ($q_{\Delta\Delta}$) Denklem (2.44);

$$q_{\Delta\Delta} = \frac{1}{e_i^T P Q_{vv} P e_i} \tag{2.44}$$

ve i. ölçüdeki kaba hatanın büyüklüğü (Δ_i) Denklem (2.45);

$$\Delta_i = -\frac{e_i^T Pv}{e_i^T P Q_{vv} P e_i} \tag{2.45}$$

ile hesaplanmaktadır (Öztürk ve Şerbetçi, 1992). i. ölçüdeki kaba hatanın anlamlı olup olmadığı istatistiksel testler ile analiz edilmektedir. Kaba hatalı ölçülerin istatistiksel olarak test edilmesi için test büyüklüğü Denklem (2.46) ve (2.47);

$$Q_{vv} = Q_{ll} - AQ_{xx}A^T \tag{2.46}$$

$$T_i = \frac{\left|\mathrm{e_i^T Pv}\right|}{m_0\sqrt{\mathrm{e_i^T P Q_{vv} Pe_i}}} \tag{2.47}$$

kullanılarak hesaplanmaktadır. Test değeri, tau dağılımının sınır değeri Denklem (2.48);

$$\tau_{f,1-\alpha/2} = \sqrt{\frac{\mathrm{f.F_{(h,f-h,1-\alpha)}}}{\mathrm{f-h+h.F_{(h,f-h,1-\alpha)}}}} \tag{2.48}$$

ile karşılaştırılmaktadır. $T_i > \tau_{f,1-\alpha/2}$ olması durumunda α yanılma olasılığı ile $i.$ ölçünün kaba hatalı olduğu yorumu yapılmaktadır. Kaba hatalı olduğu düşünülen ölçüler ayrı bir küme içerisine toplanır. En büyük test değerine sahip ölçünün uyuşumsuz ölçü olduğu düşünülür. Uyuşumsuz olarak belirlenen gözlem, ağın serbestlik derecesine göre gözlem kümesinden çıkarılır ya da yeniden ölçülür (Küreç, 2010).

En küçük kareler kestiriminde kaba hatalı gözlemler diğer gözlemleri olumsuz yönde etkilemektedir. Diğer bir ifade ile EKK kaba hatalı gözlemlere karşı oldukça duyarlı bir kestirimdir. Robust kestirim ise kaba hatalı gözlemlerden daha az etkilenen bir kestirim

yöntemidir. Robust kesitirimi için ölçü ağırlıkları düzeltmelerin bir fonksiyonu ile belirlenmektedir.

Robust ağırlık fonksiyonu W_i Denklem (2.49);

$$\left.\begin{aligned} W_i &= P_i && => T_i < \tau_{f,1-\alpha/2} \\ W_i &= e^{-\left(\frac{T_i}{\tau_{s,f,1-\alpha/2}}\sqrt{F}\right)^2} && => T_i > \tau_{f,1-\alpha/2} \end{aligned}\right\} \quad (2.49)$$

ile elde edilir. İlk iteresyonda $W_i = 1$ seçilir ve sonraki iterasyonlarda ise robust ağırlıklar ($\bar{P}$) Denklem (2.50);

$$\bar{P}_{k+1} = P.W_k \quad (2.50)$$

kullanılarak hesaplanan yeni robust ağırlıklar ile dengeleme işlemi yinelenir. Ağda uyuşumsuz ölçü kalmayıncaya kadar iterasyonlara devam edilmektedir (Konak ve Dilaver, 1998; Küreç, 2010).

2.3. Duyarlık ve Güven Ölçütleri

Jeodezik ağlardan elde edilen gözlemler kurulan matematik modeller yardımı ile Gauss-Markoff modelinde dolaylı ölçüler olarak dengelenmesi ile değerlendirilmektedir. Matematik model, stokastik model ve fonsiyonel modelden oluşmaktadır. Kurulan fonksiyonel model, ölçüler ile bilinmeyenler arasındaki fiziksel ve matematiksel ilişkileri gerçeğe en uygun şekilde temsil etmelidir. Ayrıca, stokastik model, gözlemlerin duyarlıklarını ve aralarındaki korelasyonları yeterince sağlam bir şekilde yansıtmalıdır (Öztürk ve Şerbetçi, 1992). Dengeleme sonucu elde edilen parametrelerin güvenilirliği ve duyarlığı ancak doğru ve eksiksiz bir model kurulduğunda değerlendirilebilir.

Jeodezik ağların kalitesini değerlendirmek amacıyla duyarlık ve güvenilirlik ölçütleri kullanılır. Duyarlık ölçütleri, istatistiksel bir parametre olarak ortalama hata ile tanımlanır. Ortalama hata, kaba ve sistematik hataların ayıklanmasının yanı sıra rastgele ölçüm hatalarının ve ağın geometrik yapısının etkisiyle meydana gelir. Gerçekçi sonuçlara ulaşılabilmesi için, duyarlık ölçütlerinin uygun bir dengeleme modeline dayandırılarak hesaplanması gerekmektedir.

Duyarlık irdelemeleri için, kuramsal varyans (σ_0^2) kullanılarak elde edilen kuramsal varyans-kovaryans matrisi Denklem (2.51);

$$\Sigma_{xx} = \sigma_0^2 Q_{xx} \tag{2.51}$$

ve deneysel varyans (m_0^2) kullanılarak elde edilen deneysel varyans-kovaryans matrisi Denklem (2.52);

$$K_{xx} = m_0^2 Q_{xx} \tag{2.52}$$

ile elde edilmektedir. Bununla birlikte, duyarlık ölçütleri lokal ve global duyarlık ölçütleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Lokal duyarlık ölçütleri ile jeodezik ağ içindeki herhangi bir istasyon noktası için duyarlık irdelemeleri yapılabilmektedir. Global duyarlık ölçütleri ise jeodezik ağın tamamını temsil etmektedir (Öztürk ve Şerbetçi, 1992; Konak, 1995).

Duyarlık ölçütleri, jeodezik ağların kalitesi hakkında bilgi vermektedir. Bu bilgiler parametre kesitiriminde kullanılan matematik modelinin geçerli olması koşulu altında gerçekçidir. Matematik modelin geçerliliği ise güven ölçütleri kullanılarak test edilmektedir. Güven ölçütleri, iç güven ölçütü ve dış güven ölçütü olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. İç güven ölçütü, ölçülerdeki istatistik testlerle ortaya çıkarılamayan kaba hatanın büyüklüğü hakkında bilgi vermektedir. Korelasyonlu gözlemler için iç güven ölçütü,

$$|\Delta_{0i}| = m_0 \sqrt{\frac{\delta_0}{e_i^T P Q_{vv} P e_i}} \tag{2.53}$$

Denklem (2.53) ile elde edilmektedir.

Dış güven ölçütü ise istatistik testlerle ortaya çıkarılmayan kaba hata değerinin koordinat eksenlerine etkisi olarak tanımlanmaktadır. Diğer bir ifade ile dış güven ölçütü, gözlem planı ve ölçü ağırlıklarına bağlı olarak değişen, jeodezik ağın iç yapısından kaynaklanan deformasyon büyüklükleridir (Öztürk ve Şerbetçi, 1992; Konak, 1995; Küreç Nehbit, 2018). Dış güven ölçütü iç güven ölçütünün bir fonksiyonudur. İç güven ölçütünün koordinat bilinmeyenlerine etkisi datum seçimine bağlı olarak Denklem (2.54);

$$\Delta x_i = QA^T P\Delta_{0i} \tag{2.54}$$

ile hesaplanmaktadır. Bu eşitlik kullanılarak dış güven ölçütü datumdan bağımsız bir şekilde Denklem (2.55);

$$\delta_{0i}^2 = \frac{1}{\sigma_0^2}\Delta x_i{}^T Q_{xx}^{-1}\Delta x_i \tag{2.55}$$

ile elde edilmektedir (Öztürk ve Şerbetçi, 1992; Konak, 1995; Küreç Nehbit, 2018).

3. JEODEZİK AĞLARDA DEFORMASYON ANALİZLERİ

Jeodezik ağlarda deformasyon kavramı tektonik hareketlerin ya da dış faktörlerin etkisi ile bir yüzeyde meydana gelen yatay ve düşey yöndeki hareketler ile açıklanmaktadır (Atasoy ve Öztürk, 2005). Bununla birlikte deformasyon, bir kuvvet etkisiyle bir cisimde meydana gelen şekil, konum ve boyut değişimi olarak da tanımlanmaktadır (Shan-long, 1991). Jeodezik ağlarda meydana gelen deformasyonların belirlenmesi ve yorumlanması işlemlerine ise deformasyon analizleri adı verilmektedir. Deformasyonların belirlenmesi istatistiksel analizlere dayanmaktadır. Bu nedenle deformasyonların tutarlı bir şekilde belirlenmesi model hipotezinin geçerliliğine bağlıdır (Algül, 1982; Shan-long, 1991; Öztürk ve diğ., 2006).

Bir yüzeyde oluşan deformasyonların incelenmesi için statik, kinematik ve dinamik modeller kullanılabilmektedir (Atasoy, 1984). Buna göre:

- Kinematik Model ile deformasyon analizinde nokta hareketleri ve noktaların hız bilgileri kullanılmaktadır.
- Dinamik Model ile deformasyona neden olan kuvetlerin zamana göre değişimleri araştırılmaktadır.
- Statik Modelde ise deformasyon analizleri zamandan ve deformasyona neden olan kuvvetten bağımsız olarak gerçekleştirilmektedir (Atasoy, 1984).

Bir yüzeyde oluşan deformasyonların belirlenmesi ya da izlenmesi amacı ile tesis edilen jeodezik deformasyon ağları belirli aralıklarla ölçülmekte ve değerlendirilmektedir. Jeodezik deformasyon ağları univaryat ve multivaryat modellere göre oluşturulabilmektedir. Univaryat yapıda bulunan bir jeodezik ağda: (i) nokta sayısı ve yerleri, (ii) ölçme planı ve gözlem ağırlıkları değişmez. Multivaryat yapıdaki jeodezik ağda ise (i) nokta sayısı, (ii) gözlem planı ve ölçü ağırlıkları değişmektedir (Atasoy, 1984).

Farklı epoklarda ölçülen jeodezik ağlar, jeodezik ağ modelinden bağımsız olarak epok epok değerlendirilerek (bivaryat dengeleme) ya da tüm epoklar topluca değerlendirilerek (multivaryat dengeleme) deformasyon analizleri uygulanabilmektedir (Atasoy, 1984).

3.1. Statik Modelde Deformasyon Analizi

Farklı epoklarda ölçülen ağlardan elde edilen veriler, bivaryat dengeleme modelinde Gauss-Markoff modeline göre en küçük kareler ilkesinde dolaylı ölçüler dengelemesi ile değerlendirilmektedir. Her epok için, Denklem (3.1) kullanılarak elde edilen dengeli koordinatlar arasındaki farkları,

$$\mathrm{d} = \mathrm{x}^{t_1} - \mathrm{x}^{t_0} \tag{3.1}$$

ve Denklem (3.2) ile hesaplanan dengeli koordinat farklarına ait ters ağırlık matrisleri;

$$\mathrm{Q}_{\mathrm{d\,d}} = \mathrm{Q}_{\mathrm{x\,x}}^{t_1} + \mathrm{Q}_{\mathrm{x\,x}}^{t_0} \tag{3.2}$$

kullanılarak deformasyon analizleri zamandan ve etkiyen kuvvetten bağımsız olarak elde edilmektedir (Yalçınkaya ve Bayrak, 2005). Farklı epoklardan elde edilen dengeli koordinatlar ve koordinat bilinmeyenlerine ait ters ağırlık matrisleri, yaklaşık koordinatlar ve gözlem planı aynı olsa bile S-Dönüşümü ile Denklem (3.3);

$$\mathrm{S} = \mathrm{I} - \mathrm{G}(\mathrm{B}^{\mathrm{T}}\mathrm{G})^{-1}\mathrm{B}^{\mathrm{T}} \tag{3.3}$$

kullanılarak ortak bir ağırlık merkezinde çakıştırılması gerekmektedir. S-Dönüşümü ile iki farklı epokta değerlendirilen jeodezik ağda datum birliği sağlanmaktadır (Öztürk ve Şerbetçi, 1992). Buna göre datum birliği sağlanmış dengeli koordinat farkları (d_{def}) Denklem (3.4);

$$d_{def} = S.x^{t_1} - S.x^{t_0} \tag{3.4}$$

ve dengeli koordinat farklarına ait ters ağırlık matrisi ($Q_{d_{def}}$) Denklem (3.5);

$$\mathrm{Q}_{\mathrm{d_{def}}} = \mathrm{S}.\mathrm{Q}_{\mathrm{dd}}.\mathrm{S}^{\mathrm{T}} \tag{3.5}$$

kullanılarak elde edilmektedir (Öztürk ve Şerbetçi, 1992; Yalçınkaya ve Bayrak, 2005). t_1 ve t_0 epokları arasında deformasyon oluşup oluşmadığı istatistiksel analizler ile irdelenmektedir. Deformasyon oluşan istasyon noktalarının tespit edilmesi için izlenecek aşamalar:

• Global Tutarlılık Testi

• Hareketli noktaların yerelleştirilmesi

şeklindedir.

3.1.1. Global tutarlılık testleri

Deformasyonların tespit edilmesi için oluşturulan jeodezik ağlarda, ağ noktalarının birinde ya da birkaçında deformasyon oluşup oluşmadığını test etmek amacıyla kullanılan en yaygın yöntem global tutarlılık testidir. İki epok arasında deformasyon oluşup oluşmadığını belirlemek amacıyla sıfır hipotezi (H_0) Denklem (3.6) ile;

$$H_0: E\{x^{t_1} - x^{t_0}\} = 0 \tag{3.6}$$

ve seçenek hipotezi (H_S) Denklem (3.7) kullanılarak;

$$H_S: E\{x^{t_1} - x^{t_0}\} \neq 0 \tag{3.7}$$

hipotez testleri oluşturulmaktadır. Yer değiştirme vektörü ve yer değiştirme vektörüne ait ters ağırlık matrisi kullanılarak Teta-Kare (θ^2) ölçütü Denklem (3.8);

$$R = \left(d_{def}{}^T Q^+_{d_{def}}\ d_{def}\right) \tag{3.8}$$

ve test değeri Denklem (3.9) ve (3.10);

$$T = \frac{R}{m_0^2.h} \tag{3.9}$$

$$m_0 = \pm\sqrt{\frac{(v^T Pv)_{t_0} + (v^T Pv)_{t_1}}{f_{t_0} + f_{t_1}}}. \tag{3.10}$$

ile elde edilmektedir (Öztürk ve Şerbetçi, 1992). Elde edilen test değeri Fisher dağılımı ($F_{h,f,1-\alpha}$) ile karşılaştırılır, $T > F_{h,f,1-\alpha}$ olması durumunda iki farklı epok arasında α yanılma olasılığı ile deformasyon oluştuğu yorumu yapılmaktadır (URL-2).

3.1.2. Hareketli istasyonların yerelleştirilmesi

Global tutarlılık testleri ile istatistiksel olarak iki farklı epokta ölçülen jeodezik ağ noktaları arasında deformasyon oluştuğu belirlendikten sonra, hangi nokta ya da noktalarda deformasyon oluştuğu yerelleştirme işlemleri ile belirlenmektedir. Yerelleştirme işlemleri için en büyük yerdeğiştirme yöntemi kullanılabilmektedir (URL-2). Bu yöntemde jeodezik ağ noktaları, sabit (d_S) ve hareketli (d_H) nokta kümesi olarak Denklem (3.11)'deki gibi;

$$d = \begin{bmatrix} d_S \\ d_H \end{bmatrix} \tag{3.11}$$

ikiye ayrılmaktadır. Global tutarlılık testinin geçersiz çıkması sonucunda hangi istasyon ya da istasyonlarda deformasyon oluştuğu araştırılmalıdır. Buna göre her istasyon noktası için Teta-Kare (θ^2) ölçütü (R_i) Denklem (3.12);

$$R_i = \left({d_{def}}^T Q_{d_{def}}^{-1} \, d_{def} \right)_i \tag{3.12}$$

ile hesaplanmaktadır. Denklem (3.13)'de olduğu gibi en büyük R_i;

$$R_{max} = max\{R_1, R_2, \dots \dots R_n\}, (i = 1,2, \dots n) \tag{3.13}$$

değerine sahip i. noktada α yanılma olasılığı ile deformasyon oluştuğu yorumu yapılmaktadır. Deformasyon oluştuğu düşünülen i. nokta harekli nokta kümesine (d_H) dahil edilmektedir. Diğer noktalar ise sabit nokta kümesi (d_S) içinde yer almaktadır. Sabit nokta kümesine göre S-dönüşümü Denklem (3.14), (3.15) ve (3.16) kullanılarak;

$$\mathrm{S}_k = \mathrm{I} - \mathrm{G}(\mathrm{B}^{\mathrm{T}}\mathrm{G})^{-1}\mathrm{B}^{\mathrm{T}} \tag{3.14}$$

$$d_k = \mathrm{S}_k . x_i^{t_1} - \mathrm{S}_k . x_i^{t_0} = \begin{bmatrix} d_S \\ d_H \end{bmatrix} \tag{3.15}$$

$$\left(\mathrm{Q}_{\mathrm{d_{def}}}\right)_k = \mathrm{S}_k . \mathrm{Q_{dd}} . {\mathrm{S}_k}^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} Q_{SS} & Q_{SH} \\ Q_{HS} & Q_{HH} \end{bmatrix} \tag{3.16}$$

hesaplanmaktadır. k uygulanan S-dönüşüm sayısı olmak üzere, iterasyonlu olarak S-dönüşümü uygulanır. Sabit noktalar kullanılarak global tutarlılık testi için test değeri (T_S),

$$R_{kalan} = \left({d_S}^T Q_{SS}^{+}\ d_S\right) \tag{3.17}$$

$$T_S = \frac{R_{kalan}}{m_0^2 . h_S} \tag{3.18}$$

$h_S = h - m$ ve m, deformasyon tespit edilen nokta sayısı olmak üzere, Denklem (3.17) ve Denklem (3.18) kullanılarak elde edilmektedir. $T_S > F_{h_S,f,1-\alpha}$ olması durumunda iki farklı epok arasında α yanılma olasılığı ile deformasyon oluştuğu yorumu yapılmaktadır (Öztürk ve diğ., 2006). Buna göre en büyük yer değiştirme yöntemine göre deformasyonlu noktaların yerelleştirilmesi için işlem adımları:

- Global tutarlılık testinin uygulanması,
- En büyük R_i değerine sahip i. noktanın tespit edilmesi,
- En büyük R_i değerine sahip i. noktanın hareketli nokta kümesine dahil edilmesi,
- Sabit nokta kümesine göre S-dönüşümünün uygulanması,
- Sabit nokta kümesine göre global tutarlılık testlerinin, ağda hareketli nokta kalmayıncaya kadar yinelenmesi

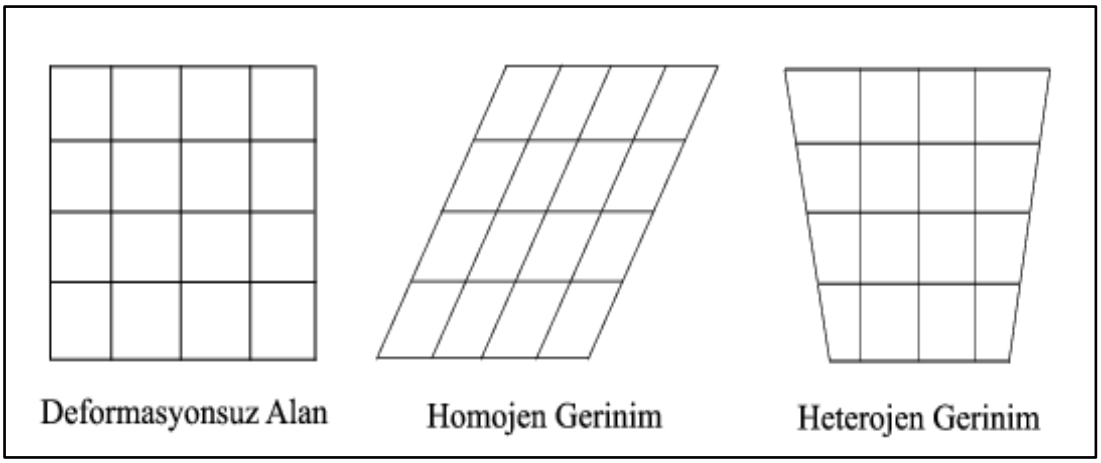
şeklinde özetlenmektedir (URL-2).

4. GERİNİM ANALİZLERİ

Gerinim herhangi bir kuvvet etkisiyle koordinat eksenlerinde meydana gelen değişimlerin başlangıç koordinat değerlerine oranı olarak tanımlanmaktadır. Bir yüzeyde oluşan deformasyonun datumdan bağımsız olarak bir koordinat sistemi içerisinde tanımlanması ve geometrik olarak yorumlanması gerinim analizleri ile sağlanmaktadır (Küreç Nehbit, 2018).

Herhangi bir yüzeyde oluşan deformasyonların homojen ya da heterojen olmasına bağlı olarak elde edilecek gerinimler de homojen gerinimler ve heterojen gerinimler olarak sınıflandırılmaktadır (Şekil 4.1) (Vanicek ve diğ., 1990; Poyraz, 2009; Küreç Nehbit, 2018).

Tektonik hareketlerin etkisiyle bir yüzeyde veya önemli mühendislik yapılarında deformasyonlar oluşmaktadır. Temel deformasyon parametreleri, bağıl öteleme, bağıl dönüklük, gerinim tensörleri ve diferansiyel dönüklük parametreleri olarak tanımlanabilir. Farklı zaman dilimlerinde yapılan jeodezik ağ ölçümleriyle, deformasyon parametreleri, iki zaman arasındaki yer değiştirme vektöründen türetilir. Yer değiştirme, seçilmiş olan deformasyon modeline dayalı olarak hesaplanır ve deformasyon modelinin tercihi, mevcut verilerle elde edilen öncü bilgilere bağlıdır. (Shan-long, 1991; Küreç Nehbit, 2018).



Şekil 4.1. Deformasyon Modelleri (Vanicek ve diğ., 1990)

Bir yüzeyde meydana gelen deformasyon Denklem (4.1)'de olduğu gibi;

$$\Delta X_i = E_i X_i + c_0 \tag{4.1}$$

tanımlanmaktadır. E_i gerinim matrisini, X kartezyen koordinatları, ΔX_i deformasyon vektör bileşenlerini temsil etmektedir. Herhangi bir i istasyon noktası için hesaplanan deformasyon vektörünün boyutuna bağlı olarak gerinim analizleri 3B, 2B ve 1B olarak yapılabilmektedir. Buna göre:

- Yer değiştirme vektörünün 3B olması durumunda gerinim matrisi Denklem (4.2) kullanılarak;

$$E_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial U}{\partial X} & \frac{\partial U}{\partial Y} & \frac{\partial U}{\partial Z} \\ \frac{\partial V}{\partial X} & \frac{\partial V}{\partial Y} & \frac{\partial V}{\partial Z} \\ \frac{\partial W}{\partial X} & \frac{\partial W}{\partial Y} & \frac{\partial W}{\partial Z} \end{bmatrix} \tag{4.2}$$

- Yer değiştirme vektörünün 2B olması durumunda gerinim matrisi Denklem (4.3) ile;

$$E_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial U}{\partial X} & \frac{\partial U}{\partial Y} \\ \frac{\partial V}{\partial X} & \frac{\partial V}{\partial Y} \end{bmatrix} \tag{4.3}$$

- Yer değiştirme vektörünün 1B olması durumunda gerinim parametresi Denklem (4.4) ile;

$$E_i = \left[\frac{\partial W}{\partial Z}\right] \tag{4.4}$$

hesaplanmaktadır (Küreç Nehbit, 2018). Düşey yönde meydana gelen deformasyonlar kullanılarak yapılacak gerinim analizleri sonucunda tek bir gerinim parametresi hesaplanmaktadır (Vanicek ve diğ., 1990; Vanicek ve diğ., 2001; Konak, 2010; Küreç 2010). Jeodezik ağın tamamı için homojen bir deformasyon söz konusu ise deformasyon modeli,

$$dh_i = t_{h_i} + \frac{\partial W}{\partial Z} . h_i \tag{4.5}$$

dh: düşey yönde meydana gelen deformasyon, t_h: öteleme parametresi, h: elipsoit yüksekliği ve i: nokta sayısı olmak üzere Denklem (4.5) kullanılarak oluşturulmaktadır (Küreç Nehbit, 2018). Yer değiştirme vektörü (d) Denklem (4.6) ile;

$$d = \begin{bmatrix} dh_1 \\ dh_2 \\ dh_3 \end{bmatrix} \tag{4.6}$$

bilinmeyenlere ait katsayılar matrisi (H) Denklem (4.7)'de olduğu gibi;

$$H = \begin{bmatrix} 1 & h_1 \\ 1 & h_2 \\ 1 & h_3 \end{bmatrix} \tag{4.7}$$

ve gerinim vektörü (g) Denklem (4.8) ile;

$$g = \begin{bmatrix} t_h \\ \dfrac{\partial W}{\partial Z} \end{bmatrix} \tag{4.8}$$

hesaplanmaktadır. Üçgensel bir alanda deformasyon modeli ise Denklem (4.9)'da olduğu gibi;

$$\begin{bmatrix} dh_1 \\ dh_2 \\ dh_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & h_1 \\ 1 & h_2 \\ 1 & h_3 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} t_h \\ \dfrac{\partial W}{\partial Z} \end{bmatrix} \tag{4.9}$$

matris göstarimi ile tanımlanmaktadır. Gerinim parametreleri ise en küçük kareler ilkesine göre Denklem (4.10) ve (4.11) kullanılarak;

$$d = H . g \tag{4.10}$$

$$g = (H^T H)^{-1} H^T d \tag{4.11}$$

hesaplanmaktadır.

5. INSAR TEKNİĞİ İLE DEFORMASYON ANALİZLERİ

5.1. InSAR Tekniğinin Temelleri

InSAR, yeryüzündeki deformasyonları ve topoğrafik özellikleri belirlemek için kullanılan, yersel ölçümlere gerek duymayan bir radar yöntemidir. Sentetik Açıklıklı Radar sistemleri ise uzaktan algılama ve yüksek çözünürlüklü haritalama çalışmaları için geniş kullanım alanına sahiptir (Gürbüz, 2022).

Sentetik açıklıklı radar sisteminde kısa bir anten, uzun bir antenin görevini görecek şekilde tasarlanarak yapay olarak uzatılmıştır. Bu sistemde Doppler prensibi temel alınmıştır. Dalga özelliği gösteren herhangi bir fiziksel varlık, hareket halindeki bir gözlemci tarafından farklı zamanda ve farklı konumlarda, dalga boyu ve frekans açısından farklı bir şekilde algılanır. Bu değişim, gözlemcinin kaynağa olan uzaklığına ve hareket yönüne bağlı olarak ortaya çıkar. Bu yöntem, özellikle ses, ışık ve radyo dalgalarında, kaynağın hareketine göre gözlemcinin algıladığı frekans değişikliklerini anlamak için kullanılır. Doppler Yöntemi, bu frekans değişimlerini ölçerek, kaynağın hızını, yönünü ve hareketini belirlemede önemli bir araçtır (Gürbüz, 2022).

Frekans sabit kalırken dalga boyu değişse de bu iki parametre birbirine bağlı olduğundan birindeki değişiklik, diğerinin de değişmesine yol açar. Bu ilke, yapay açıklık oluşturulmasında kullanılarak, sanal anten üzerinden gözlemlenen bölgedeki çözünürlüğün önemli ölçüde artırılmasını sağlar (Gürbüz, 2022).

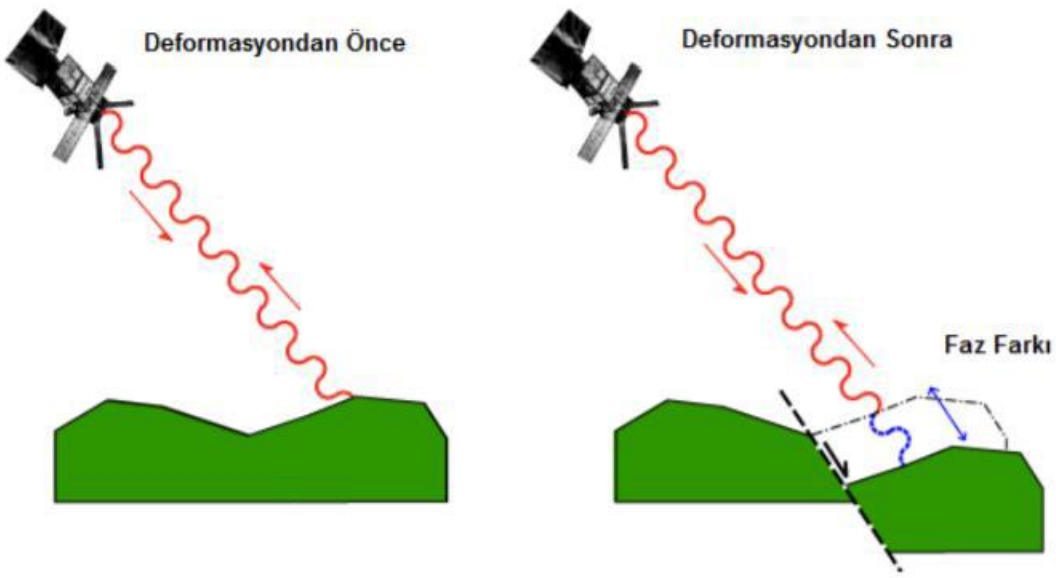
SAR sistemleri, uçaklara veya uydulara yerleştirilen cihazlar aracılığıyla elektromanyetik dalgalar gönderir ve bu dalgaların yeryüzündeki nesnelerden geri yansıyan genlik ve faz bilgilerini kaydeder. Bu yöntemle, SAR, karmaşık sayılarla ifade edilen görüntüler üreterek her bir piksel için detaylı deformasyon bilgisi sunar. Geleneksel jeodezik teknikler genellikle düzensiz ve aralıklı ölçümler sağlarken, InSAR, SAR görüntülerini kullanarak geniş alanlardaki deformasyonları yüksek hassasiyetle tespit edebilir.

Faz farkı yöntemiyle elde edilen interferogramlar, yerkabuğu ile uydu radarı arasındaki mesafeyi, eşyükselti eğrileri biçiminde haritalandırarak görselleştirir. Bu haritalar, radarın bakış yönünde oldukça yüksek bir piksel yoğunluğu (100 piksel/km²) sunar ve yaklaşık 1 cm doğruluğa ulaşır. Diğer jeodezik yöntemlere kıyasla, InSAR tekniği,

mikrodalga frekanslar kullanarak SAR görüntüleri üretir ve bu sayede yüzeyin geometrik özelliklerini belirler. Ayrıca, her türlü hava koşulunda ve geniş alanlarda 24 saat boyunca ölçüm yapabilme avantajı sağlar (Gürbüz, 2022).

InSAR tekniğinin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için, aynı bölgeden alınmış ve görüntüleme açıları birbirine yakın iki radar görüntüsünün kullanılması gereklidir. Bu görüntüler, özel yazılımlar kullanılarak karşılaştırılır ve belirli bir zaman dilimi içerisinde yüzeyde meydana gelen deformasyonlar tespit edilir.

Radar sensörleri, hareketli bir platform üzerinde yer alarak uzaya mikrodalga sinyalleri gönderir ve hedefi algılar. Hedeften geri yansıyan bu sinyaller, sensörler tarafından kaydedilerek radar görüntüsü oluşturulur (Gürbüz, 2022).



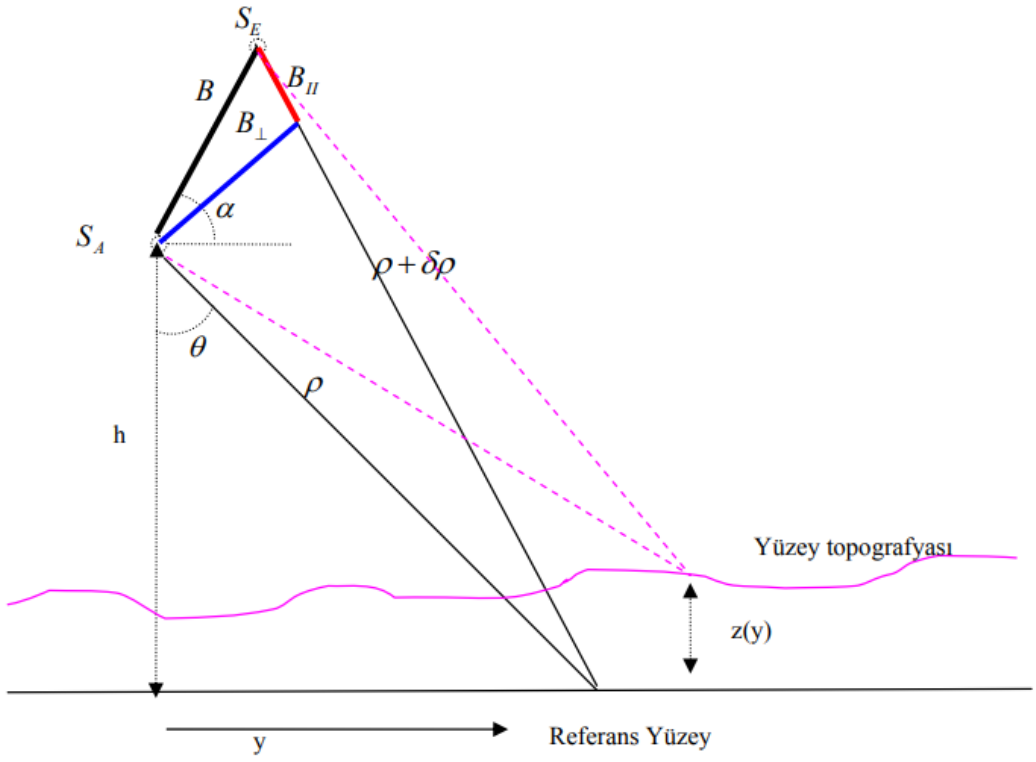
Şekil 5.1. Faz Farkı (Şengün, 2009)

İnterferogram, belirli zaman aralıklarında aynı noktaya gönderilen sinyaller arasındaki faz farkına dayanarak oluşturulan bir görüntü türüdür. Bu yöntemle elde edilen faz farkı, görüntü üzerinde birden fazla halkanın birleşerek belirli bir desen oluşturmasını sağlar. Deseni oluşturan her bir halkaya örüntü (fringe) adı verilirken, interferometrik yöntemle elde edilmeleri nedeniyle bu halkaların tamamına interferometrik örgeler denir.

İnterferogram üzerinde ölçülecek faz değişimi, sinyalin gönderildiği yeryüzü noktası ile sinyali algılayan araç arasındaki mesafedeki değişime dayanır. Bir tam faz halkası (2π

radyan), dalga boyunun yarısı veya dalga boyunun yarısının pozitif tam sayı katlarına karşılık gelen bir mesafe değişimini ifade eder (Gürbüz, 2022).

Radar İnterferometrisi, uydulardan gönderilen radar sinyallerinin yeryüzünden yansıyarak elde edilen iki farklı radar görüntüsünün fazlarının karşılaştırılmasına dayanır. SA ve SE noktalarındaki iki ayrı radar sistemi, aynı bölgenin görüntülerini kaydeder. İlk görüntü, "Asıl" kelimesinin baş harfi olan "A" ile, ikinci görüntü ise "Eşlenik" kelimesinin baş harfi olan "E" ile gösterilir. B_{ll}, B bazının uydunun referans geçişindeki bakış doğrultusuna paralel, $B_{\perp}$ ise bazın B_{ll}'ye dik olan bileşenidir (Şekil 5.2) (Gürbüz, 2022).



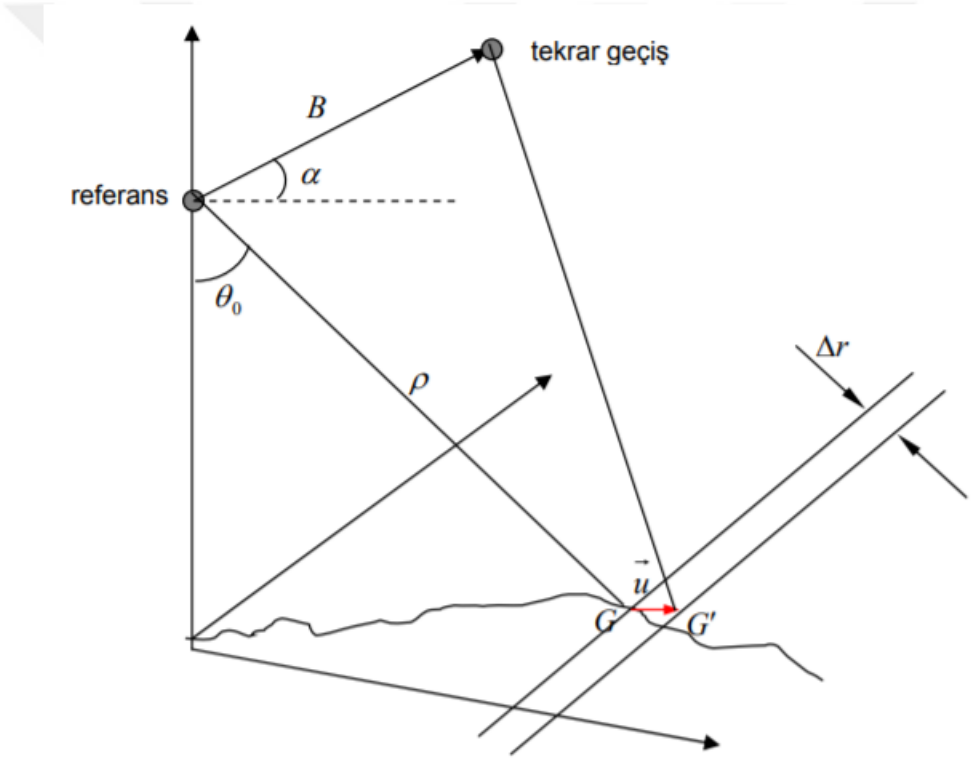
Şekil 5.2. İnterferometri Geometrisi (Şengün, 2010)

Faz farkını etkileyen unsurlar, genellikle iki ana kategoriye ayrılabilir: yüzey deformasyonu ve atmosferik gecikme. Ancak bu etkilerin izole edilebilmesi için yüzey topografyası ve görüntüleme geometrisinden kaynaklanan faz etkilerinin ortadan kaldırılması gerekmektedir. Topografya ve geometrik etkiler başarıyla giderildiğinde, yüzey deformasyonu ortaya çıkar.

Yüzey deformasyonu sonucu oluşan Denklem (5.1)'de olduğu gibi faz farkı;

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi\Delta r}{\lambda} = -\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right).n.u \tag{5.1}$$

dikkate alındığında, Şekil 5.3'de gösterilen G noktası, deformasyonun etkisiyle G′ noktasına kaymıştır. Bu kayma, radar ile yüzey arasındaki mesafede Δr kadar bir değişime yol açarken, fazda da Δr ile orantılı bir değişim meydana getirir. Buradaki Δr, yeryüzündeki yer değiştirme vektörünü ifade eder ve aynı zamanda u vektörünün, uydunun bakış doğrultusundaki bileşeni olarak tanımlanabilir. Burdaki n, uyduyu gözlem noktasından gösteren birim vektörüdür (Şengün, 2009).

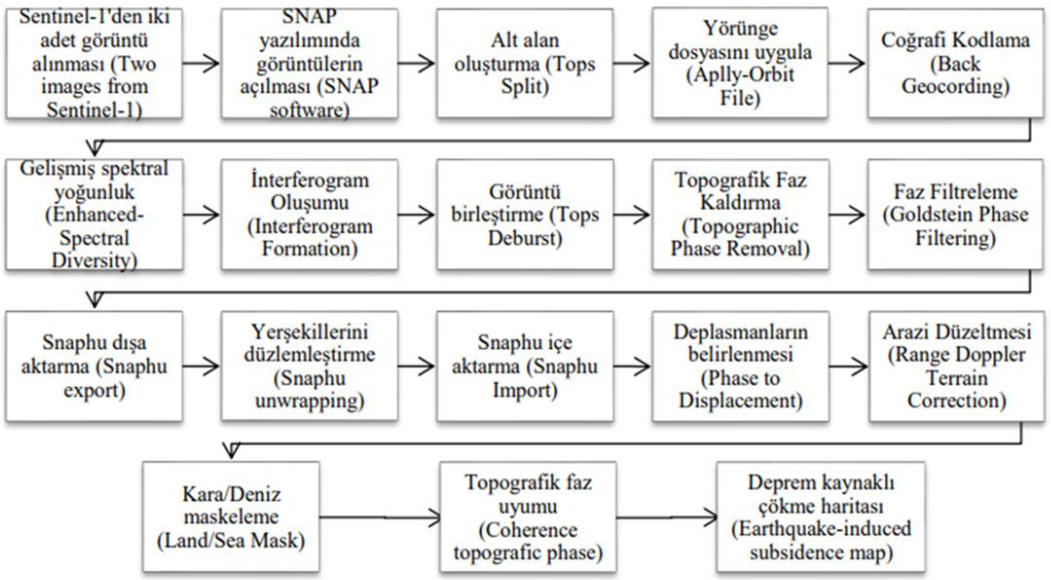


Şekil 5.3. Deformasyon Modeli (Şengün ve Kılıçoğlu, 2005; Şengün, 2010)

- ρ, elipsoid üzerindeki bir noktaya referans mesafe.
- θ_0 uydu bakış açısı.
- α, baz yükseklik açısı.
- B, baz uzunluğu.

• Δr, yer değiştirme, (Gürbüz, 2022).

InSAR yönteminde, topoğrafik etkilerin interferogramdan çıkarılmasıyla deformasyon hesaplanır. Bu işlemde, faz çözülmeden önce topoğrafik etkiyi gidermek için bazı adımlar uygulanır. İlk geçişte referans görüntüsü alınırken, ikinci geçişte deformasyon içeren eşlenik görüntü kullanılır ve bu durumda Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) gereklidir. Çünkü topoğrafya yalnızca interferogram verisiyle oluşturulamaz. Bu nedenle, SYM'nin interferogram ile uyumlu hale getirilip örneklenmesi gerekir. Bu aşamada, sayısal yükseklik modeli, radar geometrisine uyumlu olacak şekilde örneklenir. Sayısal yükseklik modeli ile radar görüntü datumları arasındaki fark giderilir. SYM, radar koordinatlarına entegre edilerek, interferogramla eşleştirilip topografya çıkarma işlemi gerçekleştirilir. Bu hesaplamalar, referans yüzey yerine topoğrafik yüzey üzerinden yapılır. İnterferogram fazı, topoğrafik etkilerden arındırıldığında, uydu bakış açısındaki deformasyon miktarı net bir şekilde hesaplanabilir (Şengün, 2009). Bu süreci takip eden işlem adımları Şekil 5.4'de gösterilmektedir.



Şekil 5.4. Snap iş akışı (Karslıoğlu ve diğ., 2021)

InSAR tekniği aynı zamanda radar uydu görüntülerindeki faz bilgilerini kullanarak yüzey deformasyonlarını, arazi yüksekliğini ve diğer topografik değişiklikleri ölçen bir yöntemdir. Radar görüntülerinin çözünürlüğü anten uzunluğu ile doğru orantılıdır. Ne kadar çok yüksek çözünürlükte veri elde etmek istenirse anten uzunluğu o kadar

arttırılmalıdır. Fakat bu uygulamada pek elverişli değildir. Bunun yerine Doppler etkisi ile hedeften gelen sinyal frekans değişimleri kullanılarak yüksek çözünürlükte veri elde edilebilmektedir. Sentetik açıklıklı radar interferometrisindeki Sentetik açıklık buradan gelmektedir (Çetin, 2010).

Faz bilgisi, radar dalgalarının hedefe çarpıp geri dönerken kat ettiği yol uzunluğuna bağlıdır ve dalganın interferometrik analizinde kullanılır. Bu analiz sayesinde, iki farklı zaman diliminde alınan radar görüntüleri arasındaki faz farkları hesaplanarak yüzeydeki milimetre ölçeğindeki değişiklikler tespit edilebilir. Diğer yandan, genlik bilgisi, radar sinyalinin yoğunluğunu (yansıma gücünü) ifade eder ve genellikle yüzeyin fiziksel özelliklerini (pürüzlülük, nem oranı, vb.) belirlemek için kullanılır. Ancak, InSAR analizinde genlikten ziyade faz verisi esas alınır çünkü yüzey değişikliklerini izlemek için interferometrik faz farkı gereklidir.

Yüzey hareketlerinden deformasyon sonucunu elde etmek için farklı zamanlarda fakat aynı modda olan görüntülerin faz farkları kullanılmaktadır. Faz farkını etkileyen birçok etmen vardır. Bunlar;

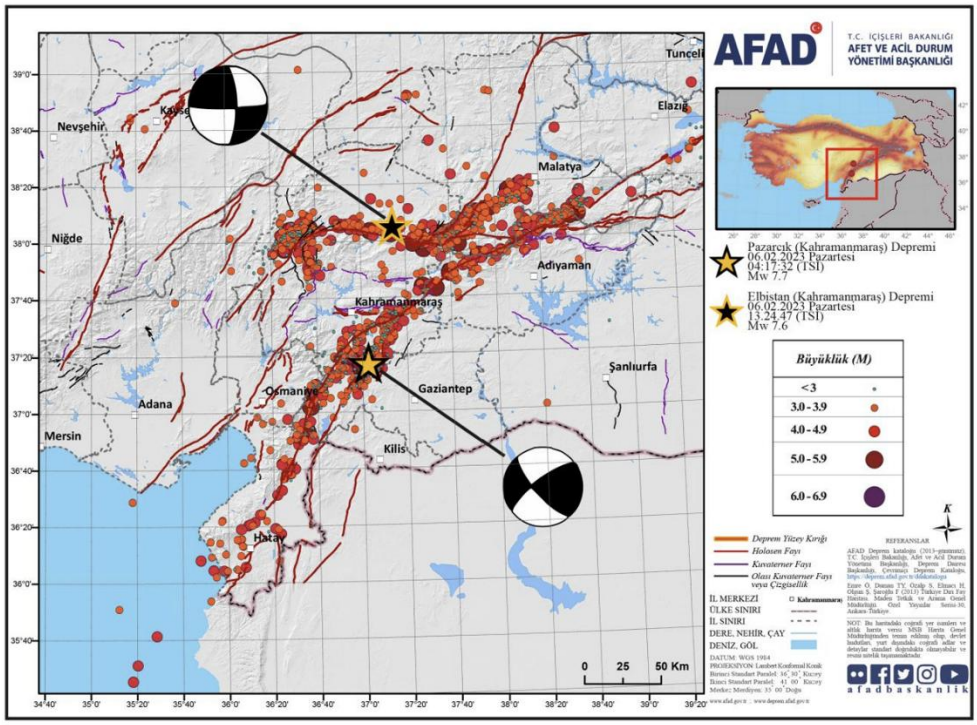
1- Topoğrafya (uydu bakış açısı),
2- Atmosferik koşullar (çekim esnasında değişebilir),
3- Uydunun konum hesaplama hataları,

olarak tanımlanmaktadır. Deformasyon çalışmalarında bu etkiler dikkate alınmalıdır (Karslıoğlu ve diğ., 2021).

Sentinel-1 uydusu 24 saat görüntü alabilen, InSAR yöntemi ile alım yapan ve her türlü hava koşulunda görüntü alabilen, kutupsal yörüngede dönen iki uydudan oluşmaktadır. Uzaysal çözünürlüğü 5 m olan ve 400x400 km'ye kadar alım yapan bir alana sahiptir (URL-5). Deprem araştırmalarında bu teknik ilk kez 1992 Landers, Kaliforniya (ABD) depreminin yüzeyde yarattığı deformasyonun ortaya çıkartılması için kullanılmıştır (Çetin, 2010).

6. SAYISAL UYGULAMA

Bu çalışmada, 6 Şubat 2023 tarihinde saat 04:17 ve 13:24' de, merkez üssü sırasıyla Pazarcık (Kahramanmaraş) ve Elbistan (Kahramanmaraş) olan Mw 7.7 ve Mw 7.6 büyüklüklerinde meydana gelen depremlerden etkilenen bölge çalışma alanı olarak seçilmiştir. Depremler Anadolu, Arap ve Afrika levhalarının birleşim yerinde bulunan ve baskın olarak doğrultu atımlı faylanma ile karakterize edilen karmaşık bir bölgede oluşmuştur (Şekil 6.1). İlk depremin dış merkezi, Doğu Anadolu Fay Zonu'nun (DAFZ) yaklaşık 28 km güneyinde yer almaktadır ve Pazarcık segmenti üzerinde meydana gelmiştir. Bu fayın özelliği olan sol yanal hareketle uyumlu bir doğrultu atım mekanizması göstermektedir (Goldberg ve diğ., 2023). Türkiye' nin Ege Denizi'ne doğru batıya hareketinde önemli rol oynayan DAFZ, yılda yaklaşık 10 ± 1 mm kayma oranına sahiptir (Reilinger ve diğ., 2006). DAFZ'nin güneyinde, Arap Yarımadası'nın Afrika ve Avrasya levhalarına göre kuzeye doğru hareketini barındıran sol yanal Ölü Deniz Fayı (ÖDF) uzanmaktadır. İkinci depremin konumu ise, Adıyaman'ın Mestan köyü yakınlarında DAFZ ile birleşen sol yanal karkteristikli Çardak Fayı (ÇF) üzerinde gerçekleşmiştir (Goldberg ve diğ., 2023) (Şekil 6.1).



Şekil 6.1. Pazarcık ve Elbistan depremleri ile artçı şok haritası (URL-3)

Meydana gelen depremlerin yıkıcı etkisi sonucu Türkiye'de Adana, Adıyaman, Elâzığ, Gaziantep, Hatay, Kahramanmaraş, Kilis, Malatya, Osmaniye, Şanlıurfa ve Diyarbakır illeri etkilenirken, Suriye'de Halep, Hama, İdlip, Lazkiye ve Tartus illeri etkilenmiştir (URL-4). Bu nedenle yıkıcı etkiye sahip Kahramanmaraş depremlerinin etkisi sonucu oluşan deformasyonların ve bu deformasyonların geometrik yorumu olan gerinimlerin araştırılması çalışmanın önemini oluşturmaktadır. 6 Şubat depremlerinin neden olduğu deformasyonlar bir uzaktan algılama tekniği olan InSAR ve bir jeodezik GNSS ağı kullanılarak incelenmiştir. Her iki teknikten elde edilen deformasyon büyüklükleri kullanılarak üçgensel bir alanda tek boyutlu gerinim analizleri gerçekleştirilmiştir. InSAR ve GNSS verileri ile ayrı ayrı hesaplanan 1B gerinim parametreleri arasında anlamlı bir fark olup olmadığı istatistiksel analizlerle araştırılmıştır.

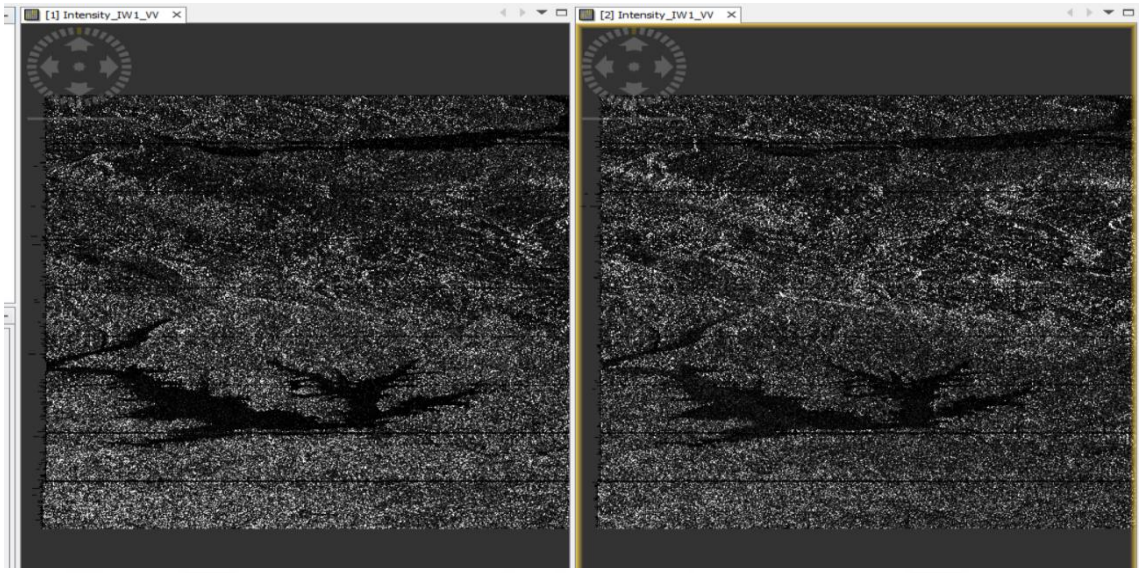
6.1. InSAR Tekniği ile Deformasyon Analizi

6 Şubat 2023 depremlerinin etkisiyle oluşan deformasyonların belirlenmesi için Avrupa komisyonu ve Avrupa Uzay Ajansının desteklediği Copernicus Rus Browser platformu (https://browser.dataspace.copernicus.eu/) üzerinden deprem öncesi için 4 Şubat 2023, deprem sonrası için 28 Şubat 2023 Sentinel-1 uydu görüntüleri indirilmiştir (Tablo 6.1). Deformasyon analizleri için indirilen SAR görüntülerinin aynı ize (yol, track) sahip olması gerekmektedir. 4 Şubat 2023 tarihli SAR görüntüsü referans görüntü olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte 28 Şubat 2023 görüntüsü deformasyon içeren eşlenik görüntü olarak seçilmiştir.

İndirilen uydu görüntüleri açık erişimli SNAP (https://step.esa.int/) yazılımı ile değerlendirilmiştir (Şekil 6.2). Öncelikle veride bölme işlemi ile alt alan oluşturma (Topsar-split), ardından yörünge dosyası ile uydu hız ve konum bilgisi eklenmesi işlemi yapılmıştır. Yörünge dosyası doğru konumu ve hız bilgisini sağlamaktadır (URL-5).

Tablo 6.1.SAR görüntü özellikleri

Veri Tarihi	İz (Yol)	Yörünge	Referans/Eşlenik
4 Şubat 2023	116	47088	Referans
28 Şubat 2023	116	47438	Eşlenik



Şekil 6.2. Deprem öncesi (04.02.2023) ve sonrası (28.02.2023) SAR görüntüleri

İki veride de 9 alt alan bulunmaktadır. Kullanılan bilgisayarın kapasitesine bağlı olarak ardışık alt alanlar birlikte değerlendirilmektedir.

İlk adımda Topsar-split ile veriyi bölüp Apply- Orbit File operatörü ile üretimden günler ila haftalar sonra mevcut olan hassas yörünge dosyaları ile rafine edilebilir. Yörünge dosyası doğru konumu ve hız bilgisi sağlamaktadır.

Ardından interferogram adımına geçilir. İnterferogram oluşturma işlemine geçmeden önce, ham verilerin odaklanması gerekir. Bu işlem tamamlandıktan sonra, iki görüntü arasında geometrik farklar veya diğer nedenlerle oluşabilecek piksel kaymaları giderilerek görüntüler düzeltilir ve hizalanır. İnterferogram oluşmadan önce, topoğrafik etkiler ve yörünge kaynaklı hatalar da ortadan kaldırılır. Program, iki görüntünün genlik değerlerini kullanarak kayma ve gerilme gibi hata miktarlarını hassas bir şekilde hesaplar ve görüntüleri hizalar. İnterferogram oluşturulduktan sonra ise, topoğrafik faz kaldırma ve faz filtreleme işlemleri gerçekleştirilir.

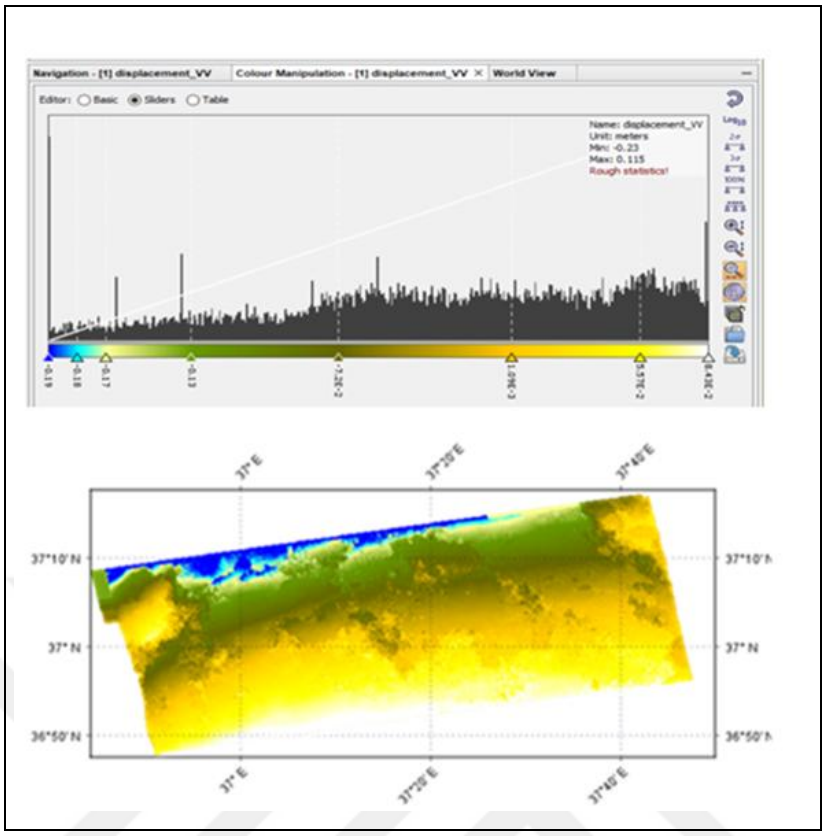
Back-Geocoding sekmesinde, istenilen türdeki SYM ve enterpolasyon yöntemi seçilebilmektedir. 90 m çözünürlüğe sahip varsayılan SRTM 3sec yerine 30 m çözünürlüğe sahip SRTM 1Sec HGT kullanılmıştır. Enterpolasyon yöntemi olarak bilineer enterpolasyon seçilmiştir.

İnterferogram için, ham veriler odaklandıktan sonra iki görüntü arasındaki geometrik ya da diğer nedenlerle oluşabilecek piksel kaymalarını gidermek ve görüntüleri hizalamak gerekmektedir. Kullandığımız yazılım, bu hassas hizalamayı sağlamak için iki görüntünün genlik değerlerinden faydalanarak kayma, gerilme gibi hata miktarlarını hesaplar.

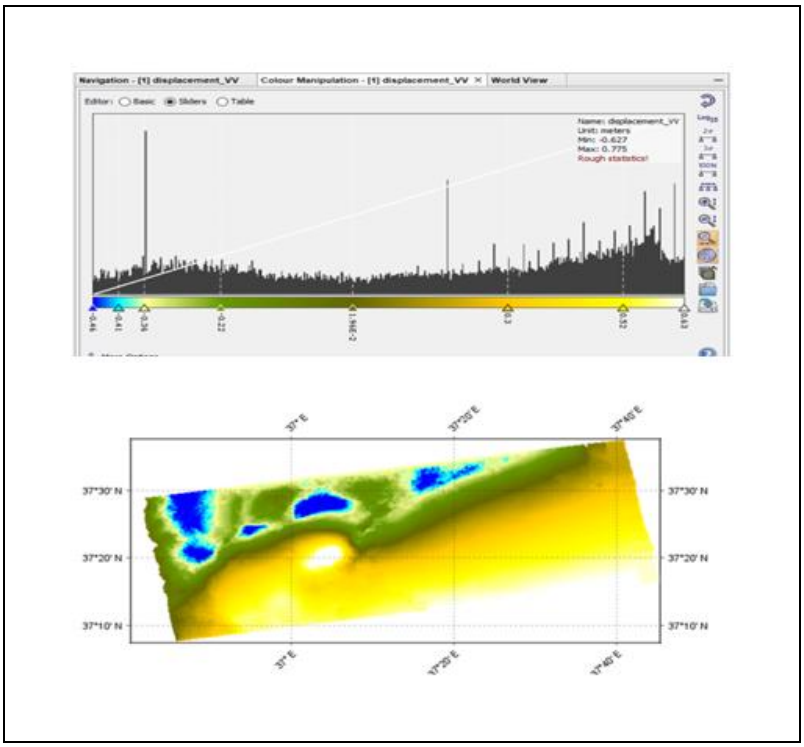
Görüntüler doğru bir şekilde hizalandıktan sonra, referans görüntüde bulunan her bir pikselin faz bileşeni, diğer görüntüde ona karşılık gelen pikselin faz bileşeninden çıkarılır. Bu işlem sonucunda elde edilen görüntünün faz değerleri, interferogramı oluşturur.

Gelişmiş Spektral Çeşitlilik operatörü, Arka Coğrafi Kodlama operatörünü takip eder, önce bir patlamanın (burst) merkezinde küçük bir veri bloğu kullanarak her seri çekim için sabit aralık ofseti ve ardından sabit bir azimut ofsetini tahmin eder. Son olarak, finali elde etmek için tüm patlamalardan elde edilen tahminlerin ortalaması alınır. Ardından varsayılan değerlerle interferogram oluşturulur. Topsar –Deburst ile görüntü birleştirilir.

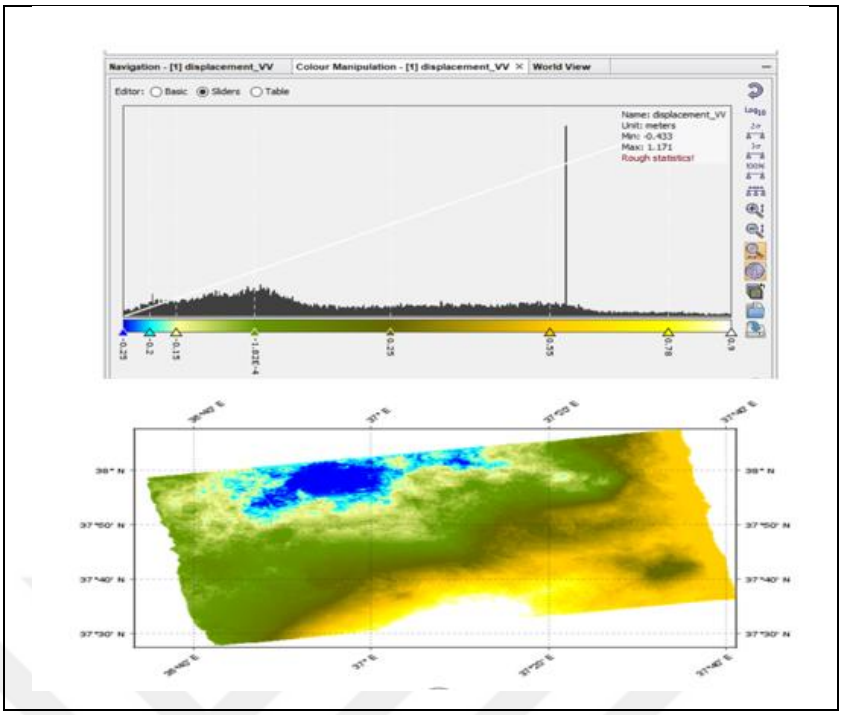
İnterferogramdan deformasyon elde etmek için faz bileşenlerini yani topoğrafyayı çıkarmak gerekir. Diğer bir ifade ile sayısal yükseklik verisi silinir. Çoklu görünüm hem çözünürlüğü hem de piksel boyutunu azaltır. Faz filtreleme, faz gürültüsünü azaltır. Gürültü sebebleri ise zamansal ilişki, geometrik dekor ilişkisi, hacim dağılımı işlem hatası olabilmektedir (URL-5). Snaphu export ile oluşan görüntü dışa aktarılır. Phase Unwrapping faz birimlerini uzunluk birimlerine dönüştürmek için ön koşuldur. Sürekli faz bilgisi örneklenir. Doğru tam sayı faz sayısını bulmak belirsizliği gidermek için uygulanır. Ardından deformasyon hesaplanır. Bu çalışmada deprem bölgesini temsil eden SAR görüntüleri iki alt banttan (subswath) ve her bant ise alt patlamalardan (burst) oluşmaktadır. SAR görüntüleri her alt bant için ikişerli ve üçerli patlamalar (bursts) halinde değerlendirilerek deformasyonlar elde edilmiştir (Şekil 6.3, Şekil 6.4, Şekil 6.5, Şekil 6.6, Şekil 6.7, Şekil 6.8, Şekil 6.9, Şekil 6.10). Buna göre bölge içerisinde uyduya yaklaşan yönde uydu bakış açısına göre 1.528 m maximum yer değiştirme elde edilmiştir (Şekil 6.6). Uydudan uzaklaşan yönde, uydu bakış açısına göre 0.892 m maximum yer değiştirme elde edilmiştir (Şekil 6.8).



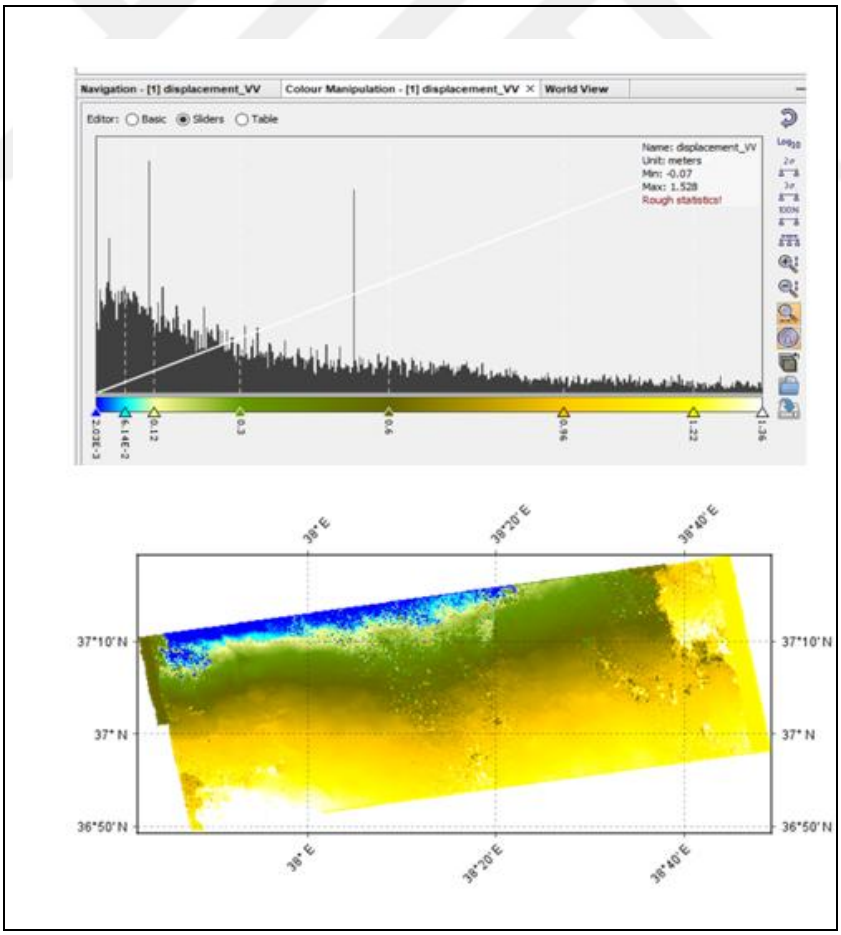
Şekil 6.3. Subswath 1 için 1-2 burstlarda elde edilen deformasyon



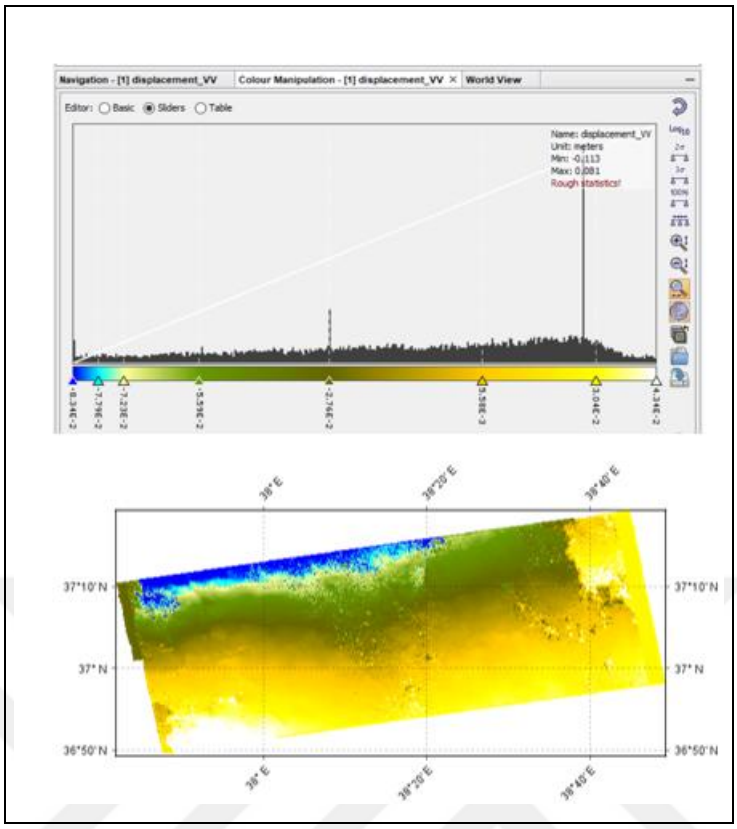
Şekil 6.4. Subswath 1 için 3-4 burstlarda elde edilen deformasyon



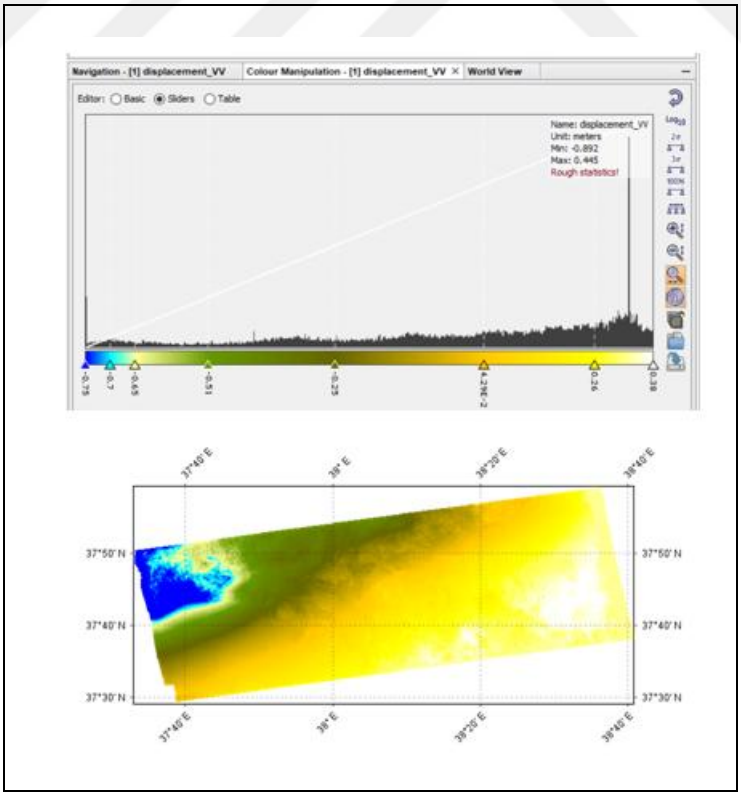
Şekil 6.5. Subswath 1 için 5-7 burstlarda elde edilen deformasyon



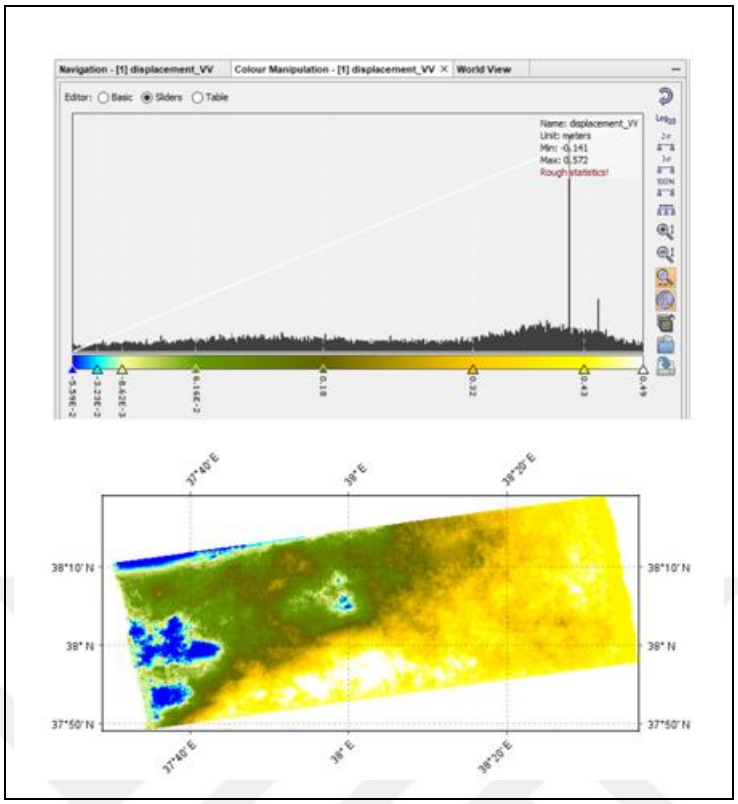
Şekil 6.6. Subswath 1 için 8-9 burstlarda elde edilen deformasyon



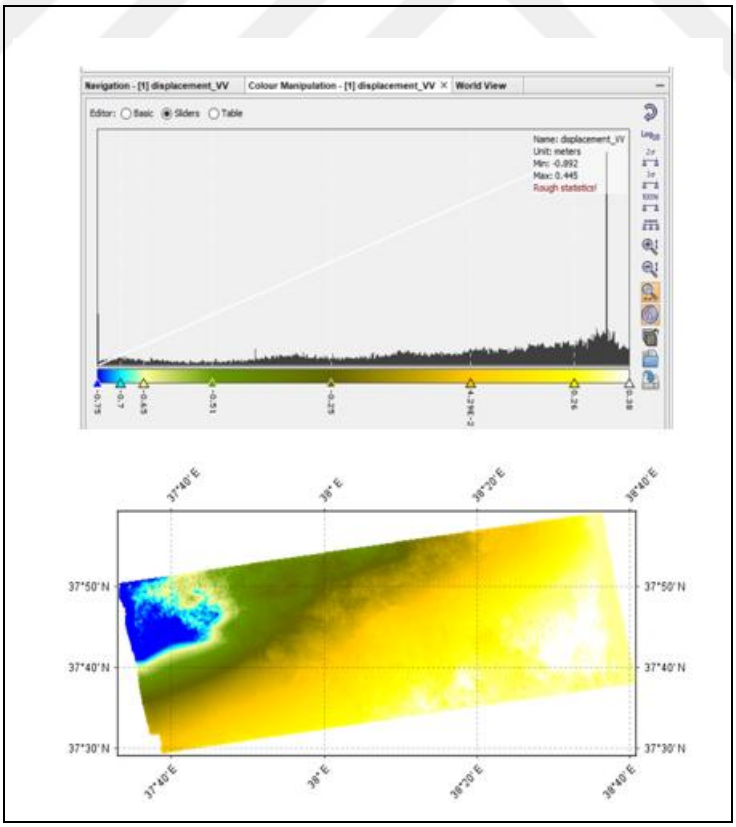
Şekil 6.7. Subswath 2 için 1-2 burstlarda elde edilen deformasyon



Şekil 6.8. Subswath 2 için 5-6 burstlarda elde edilen deformasyon



Şekil 6.9. Subswath 2 için 7-8 burstlarda elde edilen deformasyon



Şekil 6.10. Subswath 2 için 9-10 burstlarda elde edilen deformasyon.

InSAR görüntülerinden elde edilen uydu bakış açısı yönündeki deformasyonlar, düşey yöndeki deformasyonları temsil etmektedir. Pixeller için elde edilen bu deformasyon büyükleri pixel koordinatları ve yükseklik bilgileri ile birlikte depolanmaktadır (Tablo 6.2).

Tablo 6.2. InSAR yöntemi ile elde edilen yer değiştirme değerleri örnek dosyası

Pixel-X	Pixel-Y	Longitude	Latitude	Displacement_VV (m)	Elevation (m)
2334,5	466,5	37,32270138	37,17691325	-0,09602	936,945
2335,5	466,5	37,32295223	37,17691325	-0,09677	937,501
2336,5	466,5	37,32320309	37,17691325	-0,10018	937,890
2337,5	466,5	37,32345394	37,17691325	-0,10509	937,942
1714,5	2048,5	36,98609604	37,61194589	0,3818	1196,254
1715,5	2048,5	36,98634689	37,61194589	0,38155	1202,806
1716,5	2048,5	36,98659775	37,61194589	0,38129	1207,637
1909,5	2442,5	37,03501278	37,51310899	0,97065	635,193
1908,5	2442,5	37,03476192	37,51310899	0,97065	635,148
1907,5	2442,5	37,03451107	37,51310899	0,97065	633,921
1906,5	2442,5	37,03426021	37,51310899	0,97065	632,207
1905,5	2442,5	37,03400936	37,51310899	0,97065	630,859
1904,5	2442,5	37,0337585	37,51310899	0,97065	630,343
1903,5	2442,5	37,03350765	37,51310899	0,97065	630,344
1902,5	2442,5	37,03325679	37,51310899	0,97065	629,793

InSAR ile SNAP (https://step.esa.int/) yazılımdan elde edilen piksel bazlı yer değiştirme vektörleri kullanılarak EKZ1, MAR1 ve ANTE TUSAGA-Aktif istasyonlarının konumlarına denk gelen yerlerde yer değiştirme vektörleri elde edilmiştir. Bunun için öncelikle TUSAGA-Aktif istasyonlarının yakınlarına denk gelen piksellere ait enlem-boylam-yer değiştirme bilgileri ile GMT-6 açık erişim yazılımı (Wessel ve diğ., 2019) kullanılarak bir yüzey oluşturulmuştur. Yüzey oluşturmak için TUSAGA-Aktif istasyonlarının enlem boylam bilgilerine göre max/min enlem-boylam bilgileri kullanılmıştır. Burada kullanılan max/min enlem boylam bilgilerinin seçimi elde edilecek yer değiştirme bilgilerini etkilemektedir. Bu nedenle değişimin fazla olduğu yüzeyler için seçilen max/min enlem-boylam bilgileri arasındaki fark oldukça küçük olmalıdır. Oluşturulan yüzeyden GMT-6 yazılımı kullanılarak enterpolasyon yöntemi ile TUSAGA-Aktif istasyonlarının bulunduğu konum için InSAR verilerinden uydu bakış

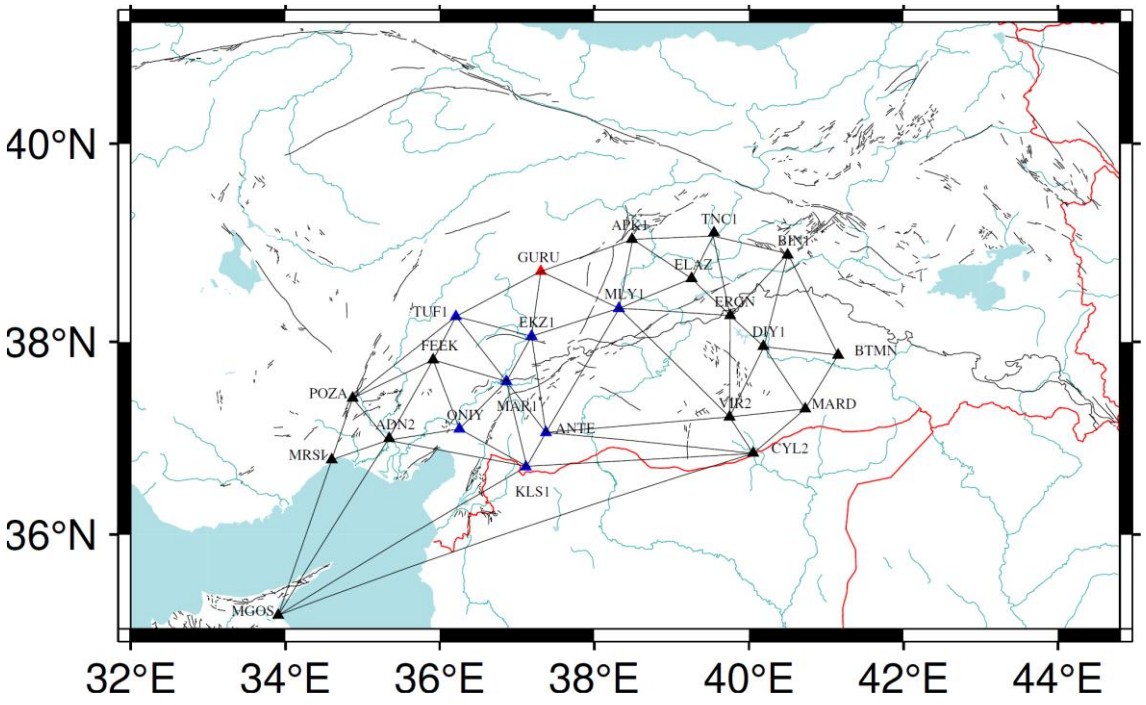
açısı yönünde yer değiştirme vektörleri elde edilmiştir. Her istasyon için elde edilen uydu bakış açıları kullanılarak (θ), düşey yönde deformasyon vektör bileşeni (du) hesaplanmıştır (Tablo 6.3).

Tablo 6.3. InSAR'dan elde edilen TUSAGA-Aktif istasyonlarına ait deformasyon vektörleri

NN	Max B [°]/ Min B [°]	Max L [°]/ Min L [°]	B [°]	L [°]	Def. [m]	θ [°]	du [m]
EKZ1	37,99/38,10	37,09/37,22	38,058168	37,187277	-0,1351	33,47	-0,1127
ANTE	36,50/37,15	37,31/37,40	37.064964	37.373613	0,0435	35,34	0,0389
MAR1	37,49/37,70	36,75/36,91	37,593377	36,861501	0,0532	26,60	0,0434

6.2. Jeodezik GNSS Ağları ile Deformasyonların Belirlenmesi

6 Şubat 2023 Kahramanmaraş bölgesinde yer alan TUSAGA-Aktif istasyonları kullanılarak bölgeyi temsil eden bir jeodezik GNSS Ağı kurulmuştur. Jeodezik GNSS ağını oluşturan 23 TUSAGA-Aktif istasyonundan deprem öncesi ve deprem sonrası için 30 sn'lik rinex verileri elde edilmiştir. Jeodezik ağ planı epok oturumlu gözlemlerden oluşmaktadır. Bununla birlikte gözlem planı Delaunay üçgenlemesine göre belirlenmiştir (Şekil 6.11).



Şekil 6.11. Jeodezik GNSS Ağı

Şekil 6.11'de kırmızı üçgen: yaklaşık koordinatların belirlendiği TUSAGA-Aktif istasyonunu, siyah üçgenler: kullanılan TUSAGA-Aktif istasyonlarını, mavi üçgenler: deformasyon tespit edilen üçgenleri, siyah çizgiler: baz gözlemlerini temsil etmektedir (Küreç Nehbit, 2023).

Deprem öncesi ve deprem sonrası elde edilen gözlemler ayrı ayrı Gauss-Markoff modelinde EKK ilkesine göre tüm iz minimum koşulu altında serbest dengelenmiştir. Dengeleme işlemlerinde kullanılan yaklaşık koordinatlar kümesi, GURU istasyonunun ITRF96 referans koordinat sisteminde 2005.00 epoğunda verilen koordinatı kullanılarak hesaplanmıştır. Serbest dengelemenin ardından uyuşumsuz ölçü testi ile uyuşumsuz ölçüler belirlenmiştir. Tespit edilen uyuşumsuz gözlemler robust ağırlıklandırma ile yeniden ağırlıklandırılarak dengeleme modeli içerisindeki etkisi azaltılmıştır. Bu koşulda ağda uyuşumsuz ölçü kalmayıncaya kadar iteratif çözümler gerçekleştirilmiştir. Yapılan iterasyonlar sonucunda deprem öncesi için 2 baz uyuşumsuz çıkmıştır (Tablo 6.4). Deprem sonrası için ise 5 baz uyuşumsuz olarak tespit edilmiştir (Tablo 6.5). Bu bazların ağırlıkları robust ağırlıklandırma ile azaltılara ölçüler yeniden dengelenmiştir.

Tablo 6.4. Deprem öncesi için robust ağırlıklandırmalı uyuşumsuz ölçü testi

BAZ	Robust Ağırlık	Test değeri	Sınır değer	Karar
ANTE-CYL2	0.0452	1.6447	2.1089	Uyuşumlu
DIY1-VIR2	0.0130	1.4537	2.1089	Uyuşumlu

Tablo 6.5. Deprem sonrası için robust ağırlıklandırmalı uyuşumsuz ölçü testi

BAZ	Robust Ağırlık	Test değeri	Sınır değer	Karar
CYL2-KLS1	0.2772	1.7010	2.1089	Uyuşumlu
CYL2-MGOS	0.2262	1.7792	2.1089	Uyuşumlu
CYL2-VIR2	0.2435	1.4060	2.1089	Uyuşumlu
MARD-VIR2	0.2537	1.7000	2.1089	Uyuşumlu
MGOS-MRSI	0.2017	1.6058	2.1089	Uyuşumlu

Serbest dengeleme sonucunca deprem öncesi ve deprem sonrası için dengeli koordinatlar ve koordinat bilinmeyenlerine ait ters ağırlık matrisi elde edilmiştir (Tablo 6.6, Tablo 6.7). İki epok arasında tektonik hareketler sonucu oluşan deformasyonları hesaplamak için datum birliği S-Dönüşümü ile sağlanmıştır. Datum birliği sağlanmış dengeli

koordinatlar arasındaki farklar ve yer değiştirme vektörüne ait ters ağırlıklar matrisi kullanılarak statik modelde deformasyon analizine göre anlamlı bir deformasyonun oluşup oluşmadığı araştırılmıştır. Buna göre iteratif olarak yapılan analiz işlemleri sonucunda sırasıyla EKZ1, MLY1, MAR1, ONIY, ANTE, TUF1 ve KLS1 istasyonlarında deformasyon oluştuğu tespit edilmiştir. Bu nedenle deformasyon oluşan istasyonlar dışlanarak kısmi iz minimum koşulu altında serbest dengeleme yapılarak deformasyon vektörleri elde edilmiştir. En büyük deformasyon büyüklüğü EKZ1 istasyonunda 4,67 m olarak hesaplanmıştır (Tablo 6.8).

Tablo 6.6. Deprem Öncesi Dengeli Koordinatlar (m_0 = 2,20 cm)

NN	X[m]	Y[m]	Z[m]	mxx[cm]	myy[cm]	mzz[cm]	mp[cm]
TNC1	3824418.083	3156521.176	3999423.899	0.3600	0.3092	0.3600	0.5957
APK1	3883190.724	3088089.284	3996611.635	0.3755	0.3188	0.3664	0.6139
GURU	3964282.603	3020834.794	3968732.728	0.3657	0.3014	0.3495	0.5888
FEEK	4086437.574	2959427.771	3889620.884	0.3906	0.3234	0.3733	0.6297
POZA	4161506.430	2900048.364	3855204.786	0.4117	0.3372	0.3852	0.6570
MRSI	4209893.632	2904492.514	3797979.850	0.5255	0.4448	0.4898	0.8449
ELAZ	3862978.870	3156913.316	3962227.021	0.3563	0.2949	0.3397	0.5739
BIN1	3780135.683	3228853.981	3984178.056	0.3696	0.3292	0.3845	0.6268
MGOS	4333260.725	2912641.858	3651135.838	0.4280	0.3604	0.4101	0.6937
ADN2	4162045.537	2949431.429	3815967.499	0.3876	0.3194	0.3597	0.6178
BTMN	3796500.714	3318261.952	3893902.478	0.4180	0.3584	0.4199	0.6925
CYL2	3911820.898	3288655.504	3804003.070	0.4245	0.3608	0.4059	0.6893
DIY1	3847078.638	3250432.149	3901616.989	0.3460	0.3044	0.3224	0.5625
ERGN	3855071.573	3207162.316	3929594.492	0.2770	0.2372	0.2690	0.4531
MARD	3849706.401	3314578.435	3845502.742	0.3710	0.3155	0.3438	0.5961
VIR2	3909915.564	3251696.061	3837715.757	0.3603	0.3063	0.3478	0.5870
EKZ1	4006820.815	3039940.343	3911348.890	0.3644	0.3128	0.3520	0.5955
MLY1	3930555.038	3106233.422	3935930.685	0.2669	0.2260	0.2581	0.4347
MAR1	4048981.496	3035809.147	3870229.045	0.3335	0.2773	0.3180	0.5378
ONIY	4107229.845	3011971.028	3826521.411	0.4389	0.3512	0.4066	0.6938
ANTE	4050046.932	3093540.258	3823683.001	0.3352	0.2842	0.3241	0.5460
TUF1	4047077.438	2962929.497	3929124.794	0.3616	0.2972	0.3426	0.5800
KLS1	4082077.649	3089902.562	3792267.339	0.3727	0.3120	0.3574	0.6033

Tablo 6.7. Deprem Sonrası Dengeli Koordinatlar (m_0 = 1,18 cm)

NN	X[m]	Y[m]	Z[m]	mxx[cm]	myy[cm]	mzz[cm]	mp[cm]
TNC1	3824418.099	3156521.162	3999423.874	0.3735	0.3309	0.3632	0.6172
APK1	3883190.837	3088089.282	3996611.548	0.3880	0.3283	0.3743	0.6312
GURU	3964282.723	3020834.703	3968732.670	0.4015	0.3323	0.3835	0.6470
FEEK	4086437.603	2959427.737	3889620.939	0.4321	0.3512	0.3978	0.6844
POZA	4161506.415	2900048.338	3855204.806	0.4940	0.3998	0.4571	0.7828
MRSI	4209893.660	2904492.524	3797979.917	0.5757	0.4661	0.5225	0.9065
ELAZ	3862978.911	3156913.295	3962226.978	0.3604	0.3122	0.3461	0.5892
BIN1	3780135.665	3228853.978	3984178.058	0.3953	0.3658	0.3956	0.6682
MGOS	4333260.663	2912641.827	3651135.839	0.7710	0.6877	0.6513	1.2213
ADN2	4162045.579	2949431.429	3815967.550	0.4534	0.3691	0.4119	0.7152
BTMN	3796500.677	3318261.974	3893902.496	0.4319	0.3975	0.4500	0.7396
CYL2	3911820.839	3288655.531	3804003.048	0.4580	0.4289	0.4083	0.7487
DIY1	3847078.595	3250432.186	3901617.008	0.3474	0.3079	0.3382	0.5743
ERGN	3855071.530	3207162.346	3929594.489	0.3187	0.2775	0.3084	0.5232
MARD	3849706.350	3314578.467	3845502.749	0.4206	0.3844	0.3988	0.6956
VIR2	3909915.501	3251696.122	3837715.752	0.3739	0.3339	0.3464	0.6094
EKZ1	4006823.277	3039936.391	3911349.203	0.3852	0.3211	0.3611	0.6180
MLY1	3930555.565	3106233.354	3935930.176	0.3337	0.2804	0.3175	0.5393
MAR1	4048981.954	3035808.760	3870228.965	0.3946	0.3268	0.3615	0.6270
ONIY	4107230.119	3011971.021	3826521.306	0.4621	0.3789	0.4241	0.7328
ANTE	4050046.612	3093540.411	3823683.286	0.3851	0.3185	0.3419	0.6055
TUF1	4047077.509	2962929.152	3929124.918	0.4238	0.3433	0.3922	0.6718
KLS1	4082077.465	3089902.619	3792267.614	0.4195	0.3493	0.3851	0.6680

6.3. 1B Gerinim Analizleri

Bu bölümde 1B gerinim analizleri InSAR tekniği ve jeodezik GNSS ağları ile elde edilen deformasyon vektör büyüklükleri kullanılarak iki farklı teknik için uygulanmıştır. InSAR tekniğinde uydu bakış açısı yönündeki yer değiştirme vektörleri düşey yönde meydana gelen deformasyonları temsil etmektedir. Bu nedenle bu çalışma içerisinde düşey yönde oluşan deformasyonların geometrik yorumu olarak değerlendirilen gerinim parametreleri hesaplanmıştır. Karşılaştırma yapılabilmesi açısından TUSAGA-Aktif istasyonlarının coğrafi koordinatlarına karşılık gelen piksellerde meydana gelen yer değiştirme vektörleri araştırılmıştır. InSAR ve jeodezik GNSS ağ verilerinin karşılaştırılması için, SAR görüntüleri içerisinde yer alan TUSAGA-Aktif istasyonları EKZ1, MAR1 ve ANTE seçilmiştir. Bu istasyonların coğrafi koordinatları kullanılarak kartezyen koordinat sisteminde tanımlı deformasyon vektör bileşenleri;

$$\begin{bmatrix} dn \\ de \\ du \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -sin\varphi cos\lambda & -sin\varphi sin\lambda & cos\varphi \\ -sin\lambda & cos\lambda & 0 \\ cos\varphi cos\lambda & cos\varphi sin\lambda & sin\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

Denklem (6.1) ile yerel koordinatlara dönüştürülmüştür (Tablo 6.9).

Tablo 6.8. TUSAGA-Aktif İstasyonlarına ait Deformasyon vektörleri

NN	dx[cm]	dy [cm]	dz [cm]	Deformasyon büyüklüğü [cm]
TNC1	1,663	-1,444	-2,549	3,368
APK1	11,294	-0,135	-8,658	14,232
GURU	12,004	-9,074	-5,786	16,122
FEEK	2,835	-3,314	5,538	7,048
POZA	-1,453	-2,543	1,992	3,542
MRSI	2,851	1,042	6,731	7,383
ELAZ	4,114	-2,081	-4,234	6,259
BIN1	-1,758	-0,265	0,257	1,797
MGOS	-6,123	-3,126	0,092	6,875
ADN2	4,238	0,030	5,155	6,674
BTMN	-3,707	2,244	1,835	4,705
CYL2	-5,907	2,675	-2,125	6,824
DIY1	-4,299	3,774	1,866	6,017
ERGN	-4,420	2,948	-0,267	5,320
MARD	-5,102	3,195	0,704	6,061
VIR2	-6,231	6,074	-0,552	8,719
EKZ1	246,266	-395,209	31,285	466,707
MLY1	52,692	-6,813	-50,856	73,547
MAR1	45,829	-38,712	-8,007	60,523
ONIY	27,465	-0,697	-10,515	29,417
ANTE	-31,936	15,326	28,441	45,428
TUF1	7,059	-34,459	12,411	37,300
KLS1	-18,388	5,710	27,489	33,562

Bununla birlikte SAR görüntülerinden faz farkı kullanılarak elde edilen interferogramlardan WGS84 referans sisteminde ve sayısal yükseklik modeli SRTM 1Sec HGT kullanılarak 30 m çözünürlüklü verilerle yer değiştirme vektörleri elde edilmiştir.

Tablo 6.9. TUSAGA-Aktif İstasyonlarının dengeli coğrafi koordinatları ve düşey yer değiştirme vektörü

NN	B [°]	L [°]	h [m]	du [m]
EKZ1	38,058168	37,187277	1328,813	-0,1432
ANTE	37,064963	37,373613	886,792	0,0431
MAR1	37,593377	36,861501	734,233	0,0577

Yükseklik bilgileri ise SYM'den bilinear enterpolasyonla hesaplanmıştır. SAR görüntülerinden elde edilen uydu bakış açısı yönündeki yer değiştirme vektörleri kullanılarak TUSAGA-Aktif istasyonlarına denk gelen yerlerdeki yer değiştirme vektörleri GMT-6 açık erişim yazılımı ile elde edilmiştir. EKZ1, MAR1 ve ANTE istasyonlarındaki uydu bakış açıları kullanılarak uydu bakış açısı yönündeki deformasyon vektörünün düşey bileşeni hesaplanmıştır. EKZ1, MAR1 ve ANTE istasyonlarının düşey yöndeki yer değiştirme değerleri ve elipsoit yükseklikleri kullanılarak EKZ1-MAR1-ANTE üçgensel alanı için 1B gerinim parametreleri InSAR tekniği için hesaplanmıştır (Tablo 6.10). Bunun yanı sıra EKZ1, MAR1 ve ANTE istasyonlarının jeodezik GNSS ağ sonuçlarından elde edilen yerel sistemdeki düşey yer değiştirme vektörleri ve elipsoit yükseklikleri kullanılarak EKZ1-MAR1-ANTE üçgensel alanı için 1B gerinim parametreleri elde edilmiştir (Tablo 6.10).

Tablo 6.10. InSAR ve jeodezik GNSS Ağ sonuçlarından elde edilen 1B gerinim parametreleri

Üçgen	InSAR		GNSS	
EKZ1-MAR1-ANTE	t_{h_i}	$\frac{\partial W}{\partial Z}$	t_{h_i}	$\frac{\partial W}{\partial Z}$
	-0,0101	-0,0002805	-0,0141	-0,00035659

InSAR ve GNSS ağ verileri kullanılarak, üçgensel alanda elde edilen gerinim parametrelerinin eşdeğer olup olmadığı istatistiksel testlerle analiz edilmiştir. Bu analizler için, her iki teknikten elde edilen gerinim parametreleri ve gerinim parametrelerine ait ters ağırlık matrisleri kullanılmıştır. Buna göre iki teknikten elde edilen gerinim paremetleri farkı ve bu fark vektörüne ait ters ağırlık matrisi Denklem (6.2) ve (6.3) kullanılarak;

$$d_{fark} = g^{InSAR} - g^{GNSS} \tag{6.2}$$

$$Q_{d_{fark}} = \{(H^T H)^{-1}\}^{InSAR} - \{(H^T H)^{-1}\}^{GNSS} \tag{6.3}$$

elde edilmiştir. Fark vektörü ve fark vektörüne ait ters ağırlık matrisinden her parametre için test değeri Denklem (6.4) ve (6.5);

$$T_i = \frac{\left(d_{fark}\right)_i}{m_0^T \sqrt{\left(Q_{d_{fark}}\right)_i}} \tag{6.4}$$

$$m_0^T = \pm \sqrt{\frac{(v^T v)_{InSAR} + (v^T v)_{GNSS}}{f_{InSAR} + f_{GNSS}}} \tag{6.5}$$

ile elde edilmiş ve $t_{f,1-\alpha/2}$ eşitliğinden elde edilen test değerinin sınır değeri ile karşılaştırılmıştır. Buna göre her iki teknikten elde verilere göre üçgensel bir alan için elde edilen gerinim parametreleri arasında anlamlı bir farklılık olmadığı görülmüştür (Tablo 6.11).

Tablo 6.11. Farklı tekniklerden elde edilen gerinim parametreleri arasındaki fark için anlamlılık testleri

d_{fark}	T	$t_{f,1-\alpha}$	Karar
dt_h	0,172	2,92	Anlamsız
$\frac{\partial W}{\partial Z}$	0,824	2,92	Anlamsız

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tektonik hareketler sonucunda oluşan düşey deformasyonların InSAR tekniği ile araştırılması sonucunda çalışma alanı için maximum 1,528 m uydu bakış açısı yönünde düşey deformasyon büyüklüğü elde edilmiştir. Meydana gelen yıkıcı depremin etkisi ile çalışma alanında bulunan EKZ1 istasyonunda, GNSS ağı sonuçlarına göre X-Y eksenleri yönünde sırasıyla 2,46 m ve -3,95 m deformasyon elde edilmiştir. Bununla birlikte InSAR tekniği ile bu istasyonda düşey yönde -0,113 m deformasyon elde edilmiş olması depremin meydana geldiği fay hattının hareket özelliklerini yansıtmaktadır. Doğrultu atımlı faylarda düşey yönde hareket az olurken yatay yöndeki hareket düşeye göre daha baskın olmaktadır (Kobayashi ve diğ., 2024; He ve diğ., 2023).

Aynı bölge içerinde tesis edilen jeodezik GNSS ağının değerlendirilmesi sonucunda ise en büyük deformasyon büyüklüğü EKZ1 istasyonunda 4,67 m olarak elde edilmiştir. Kartezyen koordinat sisteminde elde edilen deformasyon vektör bileşenlerinin yerel koordinat sistemine dönüştürülmesi ile EKZ1 istasyonunda düşey yönde -14,3 cm yer değiştirme hesaplanmıştır. Bülbül ve diğ. (2023)'de yaptıkları çalışmada bölgede oluşturulan jeodezik ağın değerlendirilmesi ile kullanılan istasyon noktalarındaki değişimlerin 4,20 cm ile 4,67 m arasında değiştiği tespit edilmiştir. En büyük koordinat değişiminin ise EKZ1 istasyonunda oluştuğu ortaya konmuştur.

Bununla birlikte çalışma alanı içerisinde seçilen EKZ1-MAR1-ANTE üçgensel alanda hesaplanacak 1B gerinim için TUSAGA-Aktif istasyonlarına denk gelen piksellerdeki uydu bakış açısı yönündeki deformasyon büyüklükleri GMT-6 açık erişim yazılım kullanılarak enterpolasyonla elde edilmiştir. Enterpolasyonun tutarlı olabilmesi enterpolasyon için kullanılacak yüzey alanının olabildiğince küçük tutulmasına bağlıdır. Bunun sonucunda ise GNSS ağından elde edilen düşey yönde deformasyonlarla tutarlı sonuçlar elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

Algül, E., (1982). Barajlarda Jeodezik Deformasyon Ölçmeleri ve Analizi. Doçentlik Tezi, İstanbul.

Atasoy V., Öztürk E., (2005). Jeodezik Deformasyon Ölçmeleri ve Sonuçların Yorumu. *Harita ve Kadastro Mühendisliği Dergisi*, *50*(51), 27-40.

Atasoy, V., (1984). Jeodezik Deformasyon Ölçülerinin İrdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Bulbul, S., Gundogan, T., Inal, C, Basciftci, F., Yildirim, O., (2023). Monitoring deformations caused by Pazarcık (Mw=7.7) and Ekinözü (Mw=7.6) earthquakes in Kahramanmaraş on 6 February 2023 with GNSS. *The European Physical Journal Plus, 138*, 1110. DOI: 10.1140/epjp/s13360-023-04759-8.

Çakır, Z., (2003). Analysis Of The Crustal Deformation Caused By The 1999 İzmit and Düzce Earthquakes Using Synthetic Aperture Radar İnterferometry. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 143111.

Caspary, W. F., (2000). Concepts of Network and Deformation Analysis, Editted by J.M. Rüeger, Third (corrected) Impression, Monograph 11. Scholl of Geomatic Engineering, The University of New South Wales, Sydney, Australia, ISBN: 0-85839-044-2.

Çetin, E., (2010). 1 Ekim 1995 Dinar Depremi Faylanma Parametrelerinin InSAR ve Sismoloji Verileriyle Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniveristesi, Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 266236.

Demirel, H., (2003). Dengeleme Hesabı, Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi, Yayın No: YTÜ.İN.DK-03.0703, İstanbul.

Goldberg, D. E., Taymaz, T., Reitman, N.G., Hatem, A.E., Yolsal- Çevikbilen, S., Barnhart, W. D., & Altuntaş, C. (2023). Rapid characterization of the February 2023 Kahramanmaraş, Türkiye, earthquake sequence. *The Seicmic Record, 3*(2), 156-167.

Gürbüz, F., (2022). Yapay Açıklıklı Radar İnterferometrisi (InSAR) Tekniği ve Deformasyonlar Üzerine Uygulama Alanları. Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya,742937.

He, L., Feng, G., Xu, W., Wang, Y., Xiong, Z., Gao, H., Liu, X., (2023). Coseismic kinematics of the 2023 Kahramanmaraş. Turkey earthquake seguence from InSAR and optical data. *Geophysical Research Letters, 50*. DOI: 10.1029/2023GL104693.

Karaöz, A., (2022). Jeodezik Ağlarda Deformasyon Sonuçlarının Yorumlanması ve Kalite Sorgulaması. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli,743506.

Karslıoğlu, A., Alkayış, M. H., Onur, M. İ., (2021). Sentinel-1 uydusu ile deprem kaynaklı yüzey çökme analizi: Sivrice-Doğanyol-Pütürge örneği. Gümüşhane Üniversitesi, *Fen Bilimleri Dergisi*, *11*(2), 510-521. 10.17714/gumusfenbil.861951.

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, DOI: 10.1093/gji/ggad464.

Konak H., (1995). Yüzey Ağlarının Optimizasyonu. Doktora Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitü, Trabzon, 33787.

Konak H., Dilaver A. (1998). Jeodezik Ağlarda Uyuşumsuz Ölçülerin Yerelleştirilmesinde Kullanılan Yöntemlerin Davranışları-II, *HKMO Dergisi*, *85*, 91-109.

Küreç Nehbit, P., (2018). GPS/GNSS Ağları İçin Sürekli Bir Gerinim İzleme ve Kalite Değerlendirme Stratejisi. Doktora Tezi, KOÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli,526668.

Küreç Nehbit, P., (2023). Yüzey Deformasyonlarının Analizleri: Mw 7.7 ve Mw 7.6 Büyüklüğündeki Kahramanmaraş Depremleri Örneği. *XXII. Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu (TUJK) Sempozyumu.* 2023-Afetler ve Afet Yönetiminde Jeodezinin Katkıları, 29 Kasım-01 Aralık 2023, Trabzon.

Küreç P., (2010). Yüzey ağlarının değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, KOÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 275768.

Öztürk, E., Konak, H., Atasoy, V., (2006). Deprem Bölgelerinde Yerkabuğu Hareketlerinin İzlenmesi, *Harita Dergisi*, *155*, 52-63.

Öztürk, E., Şerbetçi, M. (1992). *Dengeleme Hesabı* (Cilt III). K.T.Ü Basımevi, Trabzon, Mimarlık Fakültesi Yayınevi.

Öztürk, E., Şerbetçi, M., (1995). *Dengeleme Hesabı* (Cilt II). *K.T.*Ü Basımevi, Trabzon, Mimarlık Fakültesi Yayınevi.

Poyraz F. (2009). Kuzey Anadolu fay zonu doğu kesiminde yatay yerkabuğu hareketleri ve gerilme birikiminin araştırılması. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 244421.

Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., & Karam, G., (2006). GPS Constraints on Continental Deformation in the Africa-Arabia-Eurasia Continental Collision Zone and İmplications for the Dynamics of Plate İnteractions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 111*(B5).

Şengün Y. S., Kılıçoğlu A., (2005). İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar Tekniğinin Jeodezide Kullanılması, *Harita Dergisi. 1*(133), 53-62.

Şengün, Y. S., (2009). GPS ve InSAR Ölçülerini Birlikte Kullanarak İzmit Depreminde Oluşan Deformasyonlarin Belirlenmesi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 252081.

Şengün, Y. S., (2010). InSAR Ölçülerinin Doğruluk Araştırması. *Harita Dergisi*, *143*, 19-25.

Shan-long K. (1991). Optimization and Design of Deformation Monitoring Schemes, Ph.D Dissertation. Department of Surveying Engineering Technical Report, *University of New Brunswick*, *157*, 19-24.

Şişman, Y., Dilaver, A., (2005). Datum Dönüşümünde Kalite Kontrol, *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 10. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, Mart, Ankara.

URL-1: https://avys.omu.edu.tr/storage/app/public/ysisman/111308/Jeodezide%20kestirim%20y%C3%B6ntemleri%20IV.%20Hafta.pdf, (Ziyaret tarihi: 10 Nisan 2025).

URL-2: http://cidbimena.bvs.hn/docum/crid/Septiembre2004/pdf/eng/doc6192/doc6192-e.pdf, (Ziyaret tarihi: 24 Mart 2025).

URL-3: Kahramanmaras Depremleri On Degerlendirme Raporu.pdf, (Ziyaret tarihi: 09 Nisan 2025).

URL-4: 2023 Hatay depremi, (Ziyaret tarihi: 10 Nisan 2025).

URL-5: https://eo4society.esa.int/resources/copernicus-rus-training-materials/, (Ziyaret tarihi: 12 Nisan 2025).

Vanicek P., Craymer M. R., Krakiwsky E. J. (2001). Robustness Analysis of Geodetic Horizontal Networks. *Journal Of Geodesy*, *75*(4), 199-209.

Vanicek P., Krakiwsky E. J., Craymer M. R., Gao Y., Ong P. S. (1990). Robustness Analysis Final Contract Report. Department of Surveying Engineering Technical Report, *University of New Brunswich*, *156*.

Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F., & Tian, D. (2019). The Generic Mapping Tools Version 6. Geochemistry, Geophysics, *Geosystems, 20*(11), 5556–5564. 10.1029/2019GC008515.

Wright, T. J., B. E. Parsons, and Z. Lu (2004). Toward Mapping Surface Deformation in Three Dimensions Using InSAR. *Geophys. Res. Lett., 31*, L01607. 10.1029/2003GL018827.

Yalçınkaya, M., Bayrak, T., (2005). Comparison of Static, Kinematic and Dynamic Geodetic Deformation Models for Kutlugün Landslide in Northeastern Turkey. *Natural Hazards*, *34*, 91-110.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Koç, E., Küreç Nehbit, P., (2024). Tektonik Hareketlerin Etkisiyle Oluşan Gerinimlerin InSAR Tekniği ile Araştırılması, *IMASCON Uluslararası Marmara Fen Ve Sosyal Bilimler Kongresi*, Kocaeli, Türkiye, 29 - 30 Kasım 2024.

ÖZGEÇMİŞ

Esra KOÇ ilk, orta ve lise öğrenimini İzmir'de tamamladı. 2017 yılında Kocaeli Üniveristesi Harita Mühendisliği Bölümüne başladı. 2021 yılında 3.41 ortalama ile Harita Mühendisi olarak mezun oldu. Aynı yıl Kocaeli Üniversitesi Jeodezi Jeoinformasyon Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans eğitimine başladı. 2022 yılında Gdz Elektrik Dağıtım Şirketinde Kamulaştırma Biriminde Harita Mühendisi olarak çalışmaya başladı.