



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**GÜVEN ELİPSOİTLERİ İLE DEFORMASYON
ANALİZİ**

Kemal Can DEMİRCİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Kemal Can DEMİRCİ tarafından hazırlanan “Güven Elipsoidleri İle Deformasyon Analizi” adlı tez çalışması 08/06/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Ayhan CEYLAN

.....

Danışman

Prof. Dr. Cevat İNAL

.....

Üye

Doç. Dr. Fuat BAŞÇİFTÇİ

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

Kemal Can DEMİRCİ

Tarih: 08.06.2023

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÜVEN ELİPSOİTLERİ İLE DEFORMASYON ANALİZİ

Kemal Can DEMİRCİ

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

Danışman: Prof. Dr. Cevat İNAL

2023, 67 Sayfa

Jüri

**Prof. Dr. Cevat İNAL
Prof. Dr. Ayhan CEYLAN
Doç. Dr. Fuat BAŞÇİFTÇİ**

Deformasyon ölçüleri ve analizi konusu jeodezinin önemli araştırma konuları arasında yer almaktadır. Bina, köprü, baraj ve tünel gibi büyük mühendislik yapıları, farklı nedenlerle deformasyona uğrayabilirler. Yapılarda meydana gelen bu deformasyonların jeodezik ve jeodezik olmayan tekniklerle araştırılması ve gerektiğinde ek önlemlerin alınması önem arz etmektedir.

Günümüze kadar, deformasyon ölçülerinin analizinde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, GNSS gözlemlerinden elde edilen verilerin değerlendirilmesi sonrası Güven Elipsoitleri yöntemi kullanılarak obje noktalarındaki deformasyonların belirlenmesi konusu araştırılmıştır. Güven elipsoitler yöntemi ile deformasyonlar hem analitik hem de grafik olarak yorumlanabilmektedir. Bu yöntem ile deformasyon analizi yapabilmek amacıyla MATLAB R2021a'de bir program hazırlanmıştır. Hazırlanan program sayesinde, GNSS ölçülerinin değerlendirilmesi sonucu elde edilen koordinat ve varyans-kovaryans matrisleri kullanılarak obje noktalarındaki deformasyonların analizi yapılabilmektedir. Bu amaçla, Selçuk Üniversitesi kampüs alanında 6 referans ve 1 obje noktasından oluşan bir mikrojeodezik ağda 2 periyot GNSS oturumu gerçekleştirilmiştir. Referans ve obje noktaları pilye şeklinde tesis edilmiştir. Objeye noktasında sanal deformasyon vermeye yarayan bir düzenek kullanılmıştır. Elde edilen veriler Leica Geo Office versiyon 8.2 (LGO v8.2) ve Bernese v5.2 Bilimsel GNSS Değerlendirme yazılımında değerlendirilmiştir. Elde edilen koordinat ve varyans-kovaryans matrisleri kullanılarak hazırlanan program yardımıyla obje noktasındaki deformasyonlar Güven Elipsoitleri yöntemi ile belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar literatürde robust bir yöntem olarak kabul edilen İteratif Ağırlıklı Dönüşüm yöntemiyle karşılaştırılmıştır. GNSS oturumları sonucunda elde edilen veriler, LGO yazılımı ile değerlendirildiğinde 3 cm'lik sanal deformasyon 3.21 cm, Bernese v5.2 Bilimsel GNSS yazılımı ile değerlendirildiğinde ise 3.24 cm olarak belirlenmiştir. Her iki yöntemle yapılan analiz sonucunda %95 ihtimalle obje noktasında deformasyon olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, Matlab R2021a'da hazırlanan programın test edilmesi amacıyla, güven elipsoitleri yöntemi ile çözüm excel ortamında gerçekleştirilmiş, programla elde edilen sonuçlarla tamamen aynı değerler elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Deformasyon analizi, deformasyon vektörü, güven elipsoidi, iteratif ağırlıklı dönüşüm, özdeğer, özvektör, varyans-kovaryans matris.

ABSTRACT

MS THESIS

DEFORMATION ANALYSIS USING CONFIDENCE ELLIPSOIDS

Kemal Can DEMİRCİ

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

Advisor: Prof. Dr. Cevat İNAL

2023, 67 Pages

Jury

**Prof. Dr. Cevat İNAL
Prof. Dr. Ayhan CEYLAN
Doç. Dr. Fuat BAŞÇİFTÇİ**

Deformation measurements and analysis are among the important research topics in geodesy. Large engineering structures such as buildings, bridges, dams, and tunnels can deform for various reasons. Investigating these deformations in structures using geodetic and non-geodetic techniques and taking additional measures when necessary is important.

Until today, different methods have been used in the analysis of deformation measurements. In this study, the subject of determining deformations in object points using the Confidence Ellipsoids method after evaluating the data obtained from GNSS observations has been researched. Deformations can be determined both analytically and graphically using the Confidence Ellipsoids method. To be able to analyze deformations with this method, a program was prepared in MATLAB R2021a. Using the coordinate and variance-covariance matrices obtained by evaluating GNSS measurements, the analysis of deformations at object points can be carried out with this program. For this purpose, 2-period GNSS sessions were performed in a micro-geodetic network consisting of 6 reference and 1 object points in the Selcuk University campus area. Reference and object points were established in a pillar shape. A device that provides virtual deformation at the object point was used. The data obtained were evaluated in Leica Geo Office version 8.2 (LGO v8.2) and Bernese v5.2 Scientific GNSS Evaluation software. Deformations at the object point were determined using the Confidence Ellipsoids method with the help of the program prepared using the coordinate and variance-covariance matrices obtained, and the results were compared with the Iterative Weighted Transformation method, which is considered a robust method in the literature. When the data obtained from GNSS sessions are evaluated using LGO software, the 3 cm virtual deformation is determined as 3.21 cm, while it is determined as 3.24 cm when evaluated using Bernese v5.2 Scientific GNSS software. It was concluded that there was a deformation at the object point with a 95% probability as a result of the analysis performed with both methods. In addition, for the purpose of testing the program prepared in Matlab R2021a, the deformation analysis method with the Confidence Ellipsoids method was solved in an Excel environment, and the same values were obtained with the program.

Keywords: Deformation analysis, deformation vector, confidence ellipsoid, iterative weighted transformation, eigenvalue, eigenvector, variance-covariance matrix.

ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca kendisini yol gösterici olarak gördüğüm, bana her zaman destek olan, tecrübelerini hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli hocam ve tez danışmanım Prof. Dr. Cevat İNAL'a, tezimin hazırlanması sırasında değerli fikirleriyle beni yönlendiren değerli hocam Doç. Dr. Sercan BÜLBÜL'e, iteratif ağırlıklı dönüşüm kullanarak yaptığım analizde doktora tezi kapsamında açık kaynak kodlu iteratif ağırlıklı dönüşüm programını hazırlayan sayın hocam Dr. Burhaneddin BİLGİN'e ve sanal deformasyon vermeye yarayan ölçü düzeneği konusundaki desteklerinden dolayı Dr. Ahmet Mete GÜNDÜZ'e teşekkürü borç bilirim.

Hayatım boyunca desteklerini hiç esirgemeyen, maddi ve manevi her zaman yanımda olan sevgili aileme, lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca desteğini esirgemeyen, her zaman yanımda olan sevgili arkadaşım Şefika Gizem Güzel'e çok teşekkür ederim.

Kemal Can DEMİRCİ
KONYA-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ	1
2. DEFORMASYON ÖLÇÜLERİ VE ANALİZİ.....	17
2.1. Deformasyonların Sınıflandırılması	17
2.1.1. Kalıcı (Plastik) deformasyonlar	17
2.1.2. Geçici (Elastik) deformasyonlar	18
2.2. Deformasyonların Nedenleri.....	18
2.3. Deformasyon Modelleri	22
2.3.1. Uyum modeli	22
2.3.2. Kinematik model.....	23
2.3.3. Statik model	23
2.3.4. Dinamik model	24
2.4. Deformasyon Modellerinin Karşılaştırılması	24
3. İTERATİF AĞIRLIKLIL DÖNÜŞÜM İLE DEFORMASYON ANALİZİ.....	25
4. GÜVEN ELİPSOİTLERİ İLE DEFORMASYON ANALİZİ	30
4.1. Özdeğer ve Özvektör Kavramları	30
4.2. Güven Elipsoitleri	33
4.3. Küresel ve Yerel Koordinat Sistemleri Arasında Dönüşüm	36
4.4. Deformasyon Analizi	38
5. UYGULAMA	41
6. SONUÇLAR.....	57
KAYNAKLAR	59
EKLER	64

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

\hat{x}_1	: 1. Periyoda ait koordinatlar
\hat{x}_2	: 2. Periyoda ait koordinatlar
$\Delta\hat{x}$: Deformasyon vektörü
$\Sigma_{\hat{x}_1}$: 1. Periyoda ait varyans-kovaryans matrisi
$\Sigma_{\hat{x}_2}$: 2. Periyoda ait varyans-kovaryans matrisi
$\Sigma_{\Delta\hat{x}}$: Toplam varyans-kovaryans matrisi
a_1, a_2, a_3	: Karakteristik katsayılar
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$: Varyans-kovaryans matrisin özdeğerleri
e_1, e_2, e_3	: Özvektörler
R	: Dönme matrisi
φ, λ	: Enlem, Boylam
$\Delta\hat{x}_{Topo}$: Toposentrik koordinat sisteminde deformasyon vektörü
F	: Toposentrik dönme matrisi
k^2	: Test büyüklüğü
χ^2	: Kikare istatistiksel dağılımı

Kısaltmalar

BPE	: Bernese Processing Engine
CSRS	: Canadian Spatial Reference System
CORS-TR	: Continuously Operating Reference Stations - Turkey
CRX	: Bernese v5.2 Bilimsel GNSS yazılımında uydu hatalarını içeren dosyasının uzantısı
DSİ	: Devlet Su İşleri
EKKY	: En Küçük Kareler Yöntemi
GLONASS	: Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS	: Global Navigation Satellite Systems
GPS	: Global Positioning System
HES	: Hidroelektrik Santrali
IGS	: International GNSS Service
KOH	: Karesel Ortalama Hata
LGO	: Leica Geo Office
NATM	: Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu
PPM	: Parts Per Millions
PPP	: Precise Point Positioning
PSI	: Persistent Scatter Interferometry
PSInSAR	: Persistent Scatter Interferometric Synthetic Aperture Radar
RINEX	: Receiver Independent Exchange Format
RTK	: Real Time Kinematik
SAR	: Synthetic Aperture Radar
SLCK-TNFGN	: SLCK-Türkiye Milli Temel GPS Ağı
SINEX	: Solution (Software/technique) INdependent EXchange Format
TBM	: Tünel Açma Makinesi
TUSAGA	: Türkiye Ulusal Sabit GNSS ağı
WGS84	: World Geodetic System 1984

1. GİRİŞ

Deformasyon ölçüleri ve analizi konusu jeodezinin önemli araştırma konuları arasında yer almaktadır. Binalarda, köprü, baraj ve tünel gibi büyük mühendislik yapılarında zamana bağlı oluşan deformasyonların araştırılmasında jeodezik ve jeodezik olmayan teknikler kullanılmaktadır. Jeodezik yöntemlerle deformasyon araştırmasında yaygın olarak jeodezik ağ yöntemi kullanılmakta bu kapsamda oluşturulan ağdaki ölçüler yersel veya GNSS teknikleri ile yapılmakta, uygun analiz yöntemleri ile mühendislik yapılarındaki deformasyonlar istatistik olarak test edilmekte ve sonuçlar yorumlanmaktadır.

Günümüzde, teknolojinin ilerlemesi ile birlikte uygun mühendislik yapılarında, geleneksel yöntemlerin yerini GNSS (Global Navigation Satellite Systems) tekniği almıştır. Bu tekniğin avantajı düşük maliyetli, hızlı ve yüksek doğruluklu konum bilgisi vermesidir. Bu sayede, tekniğin kullanılması tercih sebebi haline gelmiştir. Deformasyon ölçü ve analizini gerçekleştirebilmek için ilk olarak jeodezik bir ağ tasarlanır. Analiz için gerekli doğruluğu sağlayacak ölçme yöntemi kullanılarak en az iki periyot GNSS kampanyası şeklinde veri toplanır. Daha sonra elde edilen GNSS verisi uygun ticari ya da bilimsel yazılımla değerlendirilir. Değerlendirme sonrası, uygun analiz yöntemi kullanılarak büyük mühendislik yapıları ya da yer kabuğunda meydana gelen yer değiştirmenin anlamlı olup olmadığı araştırılır. Ölçülerin analizinde istatistik biliminin yoğun olarak kullanılması ve hesap yükünün fazla olması nedeniyle bilgisayar teknolojilerinin ve uygun analiz yöntemlerinin etkin bir şekilde kullanılması gerekmektedir. Bu amaca yönelik GNSS ölçüleri kullanılarak Güven Elipsoitleri yöntemiyle deformasyon analizi yapan bir program geliştirilmiştir. Aynı GNSS ölçüleriyle iteratif ağırlıklı dönüşüm yöntemi kullanılarak deformasyon analizi yapılmıştır. Günümüzde iteratif ağırlıklı dönüşüm deformasyon analizinde robust bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle güven elipsoitleri ile elde edilen sonuçların iteratif ağırlıklı dönüşümden elde edilen sonuçlarla uyumlu olup olmadığı araştırılmıştır. Tez çalışması kapsamında hazırlanan program sayesinde deformasyon analizindeki hesap yükü ve zaman kayıpları en aza indirilerek, sayısal ve grafik olarak sonuçlar elde edilmiş ve yorumlanmıştır.

Mesleğimiz açısından önemli bir çalışma alanı olan deformasyon ölçme ve analizleri konusunda pek çok bilimsel çalışma ve uygulamalar yapılmıştır. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Cooper (1987) yayınladığı ulusal kitapta, inşaat mühendisleri ve harita mühendisleri uygulamalarına yönelik bilgiler verilmektedir. Koordinat dönüşümleri, varyans yayılımları, düzeltmeler, indirgemeler, dengeleme yöntemleri ve etkili bir kontrol ağının tasarlanıp hesaplanması gibi birçok konuyu kapsamaktadır.

Vanicek ve Krakiwsky (1992) yayınladıkları ulusal kitapta, jeodezinin tarihinden, geoitlerden, uzunluk ve açı ölçme yöntemlerinden, koordinat sistemlerinden, projeksiyonlardan ve birçok jeodezik alt başlıklardan bahsedilmiştir. Kitapta ayrıca örneklere de yer verilmiştir.

Shuster (1993) yayınladığı uluslararası makalede, dönüşümlerle ilgili bir çalışma yapılmıştır. Çalışma içerisinde kinematik denklemler ve dönüşümlerle alakalı olan denklemler ayrıntılı biçimde açıklanmıştır. Ayrıca çalışmada her konu ile ilgili örneklere yer verilmiştir.

Cederholm (2003) yayınladığı makalede, Güven Elipsoitleri yöntemi kullanılarak deformasyon analizi çalışması yapılmıştır. Analiz için tek noktada 2 periyot şeklinde deformasyon ölçümleri yapılarak elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Örnek çalışma sonuçlarına bakıldığında, test büyüklüğü 6.42 olarak hesaplanmıştır. %90 olasılıkla deformasyon olmadığı ancak %95 olasılıkla ise deformasyon olduğu görülmüştür. Ayrıca grafik olarak deformasyonu inceleme şansı veren bu yöntem ile sonuçlara bakıldığında, deformasyon vektörünün güven elipsoidini geçtiği yani noktada deformasyon olduğu görülmüştür.

Kalkan ve ark. (2003) yayınladıkları ulusal makalede, İstanbul Amberli Liman Sahasında heyelan potansiyeli olan bölgede araştırma yapmıştır. Ölçme yöntemleri olarak klasik ve uydu bazlı jeodezik yöntemler ile birlikte geoteknik yöntemler kullanılmıştır. Geoteknik yöntemde inklinometre, piezometre ve oturma kolonu yöntemleri kullanılmıştır. Hem jeodezik hem de geoteknik yöntemler ile elde edilen veriler değerlendirilmiş ve anlamlı harekete sahip olan noktalar tespit edilmiştir. Sonuçlara bakıldığında jeodezik yöntem ile geoteknik yöntemin birbirleriyle uyumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Kalkan ve Alkan (2005) yaptıkları çalışmalarında, Karakaya Barajı Demiryolu köprüsünde deformasyon ölçmeleri ve analizi yapılmıştır. Köprü'nün deformasyon ölçmesi için 36 noktalı, yatay ve düşey deformasyon ağı oluşturulmuştur. Daha sonra köprü çevresi ve köprü ayaklarına tesis edilen noktalarda ölçümler yapılmıştır. Ölçümlerde, yatay ve düşey açıları için teodolit, uzunluklar için ise elektro-optik uzaklık ölçer kullanılmıştır. Yükseklik ölçmesinde de presizyonlu nivelman yöntemi

kullanılmıştır. Analizler için Teta kare, Analitik Yöntem ve Bağıl Güven Elipsleriyle deformasyon analizi yöntemleri kullanılmıştır. Sonuç olarak yatayda ± 2.5 mm ve düşeyde ± 0.3 mm'lik hatalara ulaşılmıştır.

Doğanalp ve Turgut (2009) yayınladıkları çalışmalarında, statik ve kinematik model için deformasyon analizi yapılmıştır. Statik model için S-transformasyon yöntemi, kinematik model için ise Kalman Filtreleme yöntemi kullanılmıştır. Ölçümler, 3 periyot şeklinde, trigonometrik nivelman yöntemi ile yapılmıştır. Ölçülerin dengelenmesi ve analizinin yorumlanması sonucunda, iki modelin de uyumlu olduğunu gözlemlenmiştir.

Can (2011) yaptığı doktora çalışmasında, maden ocaklarında meydana gelen tasmanlar incelenmiştir. Zonguldak bölgesinde bulunan yeni ve eski maden ocaklarına ait aktif ve artık tasmanların 3 periyotluk GPS (Global Positioning System), hassas nivelman ve batimetrik ölçümleri yapılmış, dengelemiş ve analizlerini yorumlanmıştır. GPS ölçümleri, 1'er saatlik statik ölçmeler şeklinde ve 5'er saniyelik kayıt aralığında yapılmıştır. Üç periyot GPS ölçmeleri sonucunda yatay deplasman vektörleri 1.2 cm ile 15.3 cm arasında, koh (Karesel Ortalama Hata) ise ± 2.8 mm ile ± 9.6 mm arasında değiştiği bulunmuştur. Analizler incelendiğinde tasman etkilerinin hasar meydana getirmeyecek düzeyde olduğu sonucuna varılmıştır.

Erdoğan (2011) yaptığı doktora çalışmasında, GPS ve yatay kontrol ağında robust yöntemi ve EKKY (En Küçük Kareler Yöntemi) kestirime dayalı analizler yapılmıştır. Deformasyon ağlarını alt ağlara ayırarak daha güvenilir sonuçlar gözlemlenmiştir. Analiz için veriler yapay olarak üretilmiş ve ortalama başarı oranında artış gözlemlenmiştir. Ayrıca GPS ölçümleri 8 farklı senaryoda denenerek sonucunda geleneksel deformasyon analizi yöntemine göre daha güvenilir olduğu anlaşılmıştır.

Demirci (2012) yaptığı yüksek lisans çalışmasında, İstanbul-İzmir otoyolunun yapımının körfez kısmında, bölgede bulunan TUSAGA-Aktif ağına ait kullanılan noktaların hareketleri, otoyolun yapılan kısmının hareketleri ve o bölgede ki Kuzey Anadolu fay hattının hareketleri incelenmiştir. Çalışma ölçülerin yetersizliği nedeniyle otoyol yapımının sonraki safhalarına hazırlık niteliği taşımıştır.

Turan (2012) yaptığı yüksek lisans çalışmasında, Gümüşhane Üniversitesi yerleşkesinde belirlediği, tek noktada her 3 ayda bir olarak, GNSS alıcıları ile 10 epokluk RTK (Real Time Kinematik) ölçümleri yapılmıştır. RTK için sabit istasyon olarak TUSAGA-Aktifi kullanılmıştır. Ölçüler dengelenmiş ve noktanın deformasyon

analizi statik ve kinematik olarak yapılmıştır. Sonuç olarak bu iki analizin uyumlu olduklarını gözlemlenmiştir.

Turan ve ark. (2012) yayınladıkları ulusal makalede, TUSAGA-Aktif verileri kullanılarak yeni bir deformasyon izleme yöntemi metodolojisi açıklanmıştır. Bunun için bir noktada bir GNSS alıcısı ile 3 ayda bir periyodik olarak 10 epokluk TUSAGA-Aktif ölçüleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüler önce dengelenip sonrasında statik ve kinematik deformasyon analizleri yapılmıştır. Sonuç olarak noktaların yer değiştirmeleri, yer değiştirme hızları ve noktalarda anlamlı değişimler olup olmadığı hakkında bilgi veren ivmeleri belirlenmiştir. Deformasyon çalışmaları için TUSAGA-Aktif verilerinin yeterli doğruluğu sağladığı ve kullanılabilir olduğu önerilmiştir.

İnal ve Bülbül (2013) yayınladıkları ulusal makalede, bağıl güven elipsleri yöntemiyle deformasyon analizi konusu teorik olarak açıklanmış, yöntemin formülasyonu verilmiş, Ermenek barajında yapılan deformasyon ölçüleri değerlendirilmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır.

Bak (2014) yaptığı yüksek lisans çalışmasında, Kuzey Anadolu Fay hattının üzerinde bulunan, İstanbul-İzmir otoyolunun önemli bir parçası ile körfez geçişini sağlayacak köprünün güzergâhında kurulan deformasyon ağı ve Sürekli Gözlem Yapan Referans İstasyonlarının güncel durumları incelenmiştir. Bunun için 2010, 2011 ve 2013 yıllarına ait verilerin baz çözümleri Leica Geo Office programında yapılmış ve elde edilen çözümler Matlab'da yazılan program ile her periyot için dengelenmiştir. Sonrasında S-transformasyonu yöntemiyle deformasyon analizleri yapılmıştır. Sonuç olarak bölgede belirli gerinim birikimi olduğu, sert ve sağlam görünen alanların uzun zaman aralıkları ve yerkabuğundaki kuvvetlerin etkisiyle deforme olduğu gözlemlenmiştir.

Gündüz ve Gökmenoğlu (2014) yaptıkları çalışmada, Ilısu Barajı ve HES Projesi kapsamında yapılan projede, uygulama ve değerlendirme aşamalarında yapılan işlerin, kullanılan malzemelerin ve ölçüm aletlerinin, deformasyon çalışmalarının ve deformasyon yöntemlerinin aktarıldığı bir çalışmadır. Yapımı süren ve daha sonra yapılacak olan çalışmalara örnek olması amacı ile bu çalışma yapılmıştır.

Eren (2014) yaptığı yüksek lisans çalışmasında, İstanbul'da bulunan M5 Metrosunun inşasında kullanılan 2 farklı tünel açma metodu karşılaştırılmıştır. Bu metotlar Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM) ve Tünel Açma Makinesi (TBM) metodudur. Tünelde deformasyon ölçüleri ve analizi yapılmıştır. Elde edilen veriler, tüm iz minimuma göre en küçük kareler yöntemi kullanılarak dengelenmiştir.

TBM metodu için 33 noktada, NATM metodu için ise 34 noktada hareket olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak d fark vektöründe, TBM metodunun uygulandığı bölgede ortalama 1.05 mm, NATM metodunun uygulandığı bölgede ise 3.17 mm'lik farklara rastlanmıştır. Bunun nedenini, TBM'in yapısının silindirik olması ve kazıdan hemen sonra ringlerin örülüp enjeksiyon uygulanması, NATM ile yapılan uygulamalarda ise destek elemanının kazıdan bir süre sonra yerleştirilmesi olarak açıklanmıştır.

Kalkan (2014) yayınladığı uluslararası makalede, Türkiye'nin en büyük barajı olan Atatürk barajında radyal deformasyonların büyüklüğünü ve yönünü belirlemek amacıyla çalışma yapılmıştır. Deformasyon ölçümleri, 2006 yılından 2008 yılına kadar 6 ayda bir, 2008 yılından 2010 yılına kadar da yılda bir kez olacak şekilde yapılmıştır. Deformasyon ölçümleri GPS ve geleneksel jeodezik ölçüm teknikleri kullanılmıştır. Ölçümler için sabit kabul edilen referans noktaları ile hareketli kabul edilen deformasyon noktalarından oluşan bir ağ kullanılmıştır. 32 adet olan sabit noktalardan gerekli ölçümler, GPS ve geleneksel jeodezik ölçüm teknikleri ile yapıldıktan sonra uyum testleri ile kontroller yapılmıştır. Değerlendirmeler sonucunda, deformasyon noktalarının %72'sinde yatay yer değiştirmenin önemli boyutta olduğu ve bu noktaların %71'inde de önemli derecede radyal yer değişikliğinin olduğu tespit edilmiştir. Kretin memba kısmı ile dolgunun 0+230 ve 0+460 profillerinde en büyük yer değiştirmelere rastlanmıştır. Çalışma süresince en büyük yatay yer değiştirme 14.08 cm radyal bileşen ile 14.12 cm olarak belirlenmiştir. Uygulanan iki ölçüm tekniğinde de konum doğruluğu ± 1 cm olmasından dolayı sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Bu doğruluğun barajlarda ki deformasyonları izlemek için uygun olduğunu önerilmiştir.

Kazancı ve ark. (2014) yayınladıkları ulusal bildiride, Gümüşhane İmam Hatip Lisesi ve çevresinde statik ölçme yöntemi kullanılarak deformasyon analizi yapılmıştır. Bölge geçmişte patlama, kazı çalışmaları ve ani meteorolojik değişimlerin etkisi ile heyelana uğramıştır. Çalışma için bölgede belirlenen üç noktada, 2012 Nisan ve 2014 Ocak aylarında 2 periyot statik ölçümler yapılmıştır. Elde edilen veriler, statik deformasyon analizinde θ^2 -Ölçütü yöntemi ile değerlendirilmiş ve tüm baz ölçümlerine Tau uyuşumsuz ölçüler testi uygulanmıştır. Sonuçlara bakıldığında belirlenen üç noktada da deformasyon olduğu belirlenmiştir.

Metivier ve ark. (2014) yayınladıkları uluslararası makalede, yirmi yıllık süre boyunca meydana gelen deprem sonrası deformasyonların GPS istasyon koordinatlarındaki zaman serileri üzerindeki etkisi ve jeodezik gözlemlerin deprem ölçeklendirme ilişkilerine verdiği kısıtlamalar araştırılmıştır. Farklı deprem

ölçeklendirme ilişkileri varsayılarak deprem sonrası için hızlı ve basit bir deformasyon modeli oluşturulmuş ve 4 şiddetinden büyük olan depremlerde uygulanmıştır. Sonuçlara bakıldığında yer değiştirmelerin yerel olarak 10 metreden fazla olduğu ve yer değiştirmenin sadece büyük depremler değil küçük depremlerinde etkilediği görülmüştür. Küresel GPS istasyonu üzerinde yapılan çalışma ile deprem sonrası deformasyonlara ait küresel modellemenin, GPS koordinat zaman serilerindeki kesintileri tespit etmede büyük ölçüde yardımcı olduğu kanıtlanmıştır. Bu kesintiler referans çerçeve oluşturmada hata kaynaklarından, mevsimsel varyasyonlar ve GPS gürültüsünden dolayı görsel olarak tespit edilemeyecek kadar küçüktür. Bu kesintileri dikkate almamak hassasiyet değerleri göz önüne alındığında, istasyon hız belirlemede büyük bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

Bilgen (2017) yaptığı yüksek lisans çalışmasında, Selçuk Üniversitesi kampüsünde 7 tanesi referans 1 tanesi obje noktası olmak üzere 8 noktalı mikrojeodezik ağ tasarlanmıştır. Objeye noktasına yerleştirilen ve 1'er cm aralığa sahip sanal deformasyon oluşturmaya yarayan bir düzenek ile GNSS tekniğinin yatay yöndeki deformasyonlardaki başarısı test edilmiştir. Bu test için objeye noktasına kurulan düzenek önce X yönünde, sonra Y yönünde 1 cm kaydırılarak her 2 saatte bir GNSS ölçümü yapılmıştır. Aynı zamanda referans noktalarında da ölçümler gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümler daha sonra 30, 60, 90 ve 120 dakikalık gruplara ayrılmış ve Leica Geo Office programında değerlendirilmiştir. Daha sonra 30, 60, 90 ve 120 dakikalık ölçüler için ölçülerin koordinat farkları ile düzeneğin sağladığı sanal kaydırma miktarları X ve Y ekleri ile ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Sonuçlar irdelendiği zaman mikrojeodezik ağlarda 30 dakikalık ölçü sürelerinin deformasyon ölçmeleri için yeterli doğrulukta sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Karabulut (2017) yaptığı yüksek lisans çalışmasında, Marmara Bölgesi'nde sürekli gözlem yapan ağlardan 36 adet GNSS istasyonu seçilmiştir. İlk gününden Kasım 2016'ya kadar olan süredeki tüm veriler kullanılarak, GAMIT/GLOBK yazılımı ile hızları belirlenmiş ve böylece bölgeye ait yüzey deformasyonları ve gerinim değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlara bakıldığında, Avrasya plakasına göre Anadolu plakası yılda yaklaşık 25 mm/y hızla batıya doğru, saat yönünün tersine dönerek hareket ettiği gözlemlenmiştir. Bölgedeki gerinime bakılırsa, 25 noktada yapılan analiz sonucunda 210 nanostrain/y olarak hesaplanmıştır. En az 2 yıl veri toplanmış GNSS istasyonlarına, bölgede artacak ve sıklaşacak olan GNSS noktaları eklendiğinde daha güvenilir sonuçlar elde edileceği öngörülmektedir.

Taşkıran ve Oral (2017) yayınladıkları ulusal makalede, Pamukçay Barajının sızma ve oturma analizlerini sonlu elemanlar yöntemine göre araştırmışlardır. Gerekli verilerin elde edilmesi amacıyla boşluk basıncını ölçen Gövde Tipi Titreşen Telli Piyezometre ve düşey deplasmanları ölçen Manyetik Ekstansometre kullanılmıştır. Analiz için üç eksenli ve geçirgenlik deney sonuçları ile DSİ şartnamesinden parametreler elde edilmiştir. Analiz Geostudio programı kullanılmıştır. Analiz sonuçlarından elde edilen oturma değerleri ile gerçekleşen oturma değerleri karşılaştırılmış ve değerlerin birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir.

Tayfur (2017) yaptığı yüksek lisans çalışmasında, Çanakkale ili Lapseki ilçesinde bulunan bir heyelan bölgesinde deformasyon analizi yapılmıştır. Çalışmada, 2 periyotluk ölçüler tüm iz minimum ile dengelenmiş, pope testiyle uyumsuz ölçüler ayıklanmış ve global test ile bölgede deformasyon olduğu anlaşılmıştır. Ölçüler 5 noktalı nivelman ağında yapılmıştır. İlk periyotta 4 nokta 6 ölçü, ikinci periyotta 5 nokta 8 ölçü şeklinde ölçülmüştür. Deformasyon analizi için S-transformasyon yöntemi kullanılmıştır. Sonuç olarak deformasyonların anlamlı olduğu belirlenmiştir.

Amirali ve Amirali (2018) yayınladıkları ulusal kitapta, klasik nümerik analiz teorisini sistematik olarak açıklamışlardır. Kitapta enterpolasyon, lineer denklemler, diferansiyel denklemler gibi konulara yer verilmiştir.

Barzaghi ve ark. (2018) yayınladıkları uluslararası makalede, Sardinya'da yer alan Eleonora D'Arborea (Cantoniera) barajında yapılan GNSS ölçmeleriyle deformasyon analizi sonuçları sarkaç verileri ile karşılaştırılmıştır. 2.5 yıllık ölçümlerin kullanılması ile yapılan karşılaştırma da GNSS yönteminin daha iyi sonuçlar verdiği, sarkaca göre daha az maliyetli olduğu ve GNSS'in sarkaçtan daha az hassas olsa bile yeterince doğru sonuçlar verdiği görülmüştür.

İnal ve ark. (2018) yayınladıkları uluslararası makalede, farklı düzeltme teknikleri kullanılarak GNSS alıcılarının doğruluk ve kesinlikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaç doğrultusunda, Türkiye'de 146 referans istasyonundan oluşan Türkiye Sürekli Çalışan Referans İstasyonları Ağı'na (CORS-TR) dayalı olarak, 12'şer saatlik GNSS gözlemleri gerçekleştirilmiştir. Gözlemler için SLCK-Türkiye Milli Temel GPS Ağı (SLCK-TNFGN) noktası kullanılmıştır. Farklı GNSS alıcıları kullanılarak yapılan Network-RTK (N-RTK) ölçümleri ile alıcıların doğrulukları incelenmiştir. RTK ölçümlerinin ortalamalarının hesaplanması ile alıcıların hassasiyetleri belirlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde alıcılara ait doğruluk ve hassasiyetin düzeltme tekniğiyle ilişkili olarak değiştiği görülmüştür.

Erenoğlu ve Yüceses (2019) yayınladıkları uluslararası makalede, Çanakkale ili içinde bulunan T1 tüneli için jeodezik, jeoteknik ve deprensellik verileri ile inceleme yapılmıştır. Dengeleme ve deformasyon analizini Matlab programı ile yapmıştır. Jeoteknik veri analizi amacıyla, düşey deplasmanlar için ekstansometre, yük miktarı için loadcell, basınç miktarı için Pressurecell ve tünelde ki gerilmeyi gözlemek için strain gauge kullanılmıştır. İnceleme deprem bölgesinin etkisini de içine alacak şekilde 100 yıllık değişimi öngörerek tünelin en verimli biçimde tamamlanmasını sağlamıştır.

Tanyıldızı ve Kaya (2019) yayınladıkları makalede, Keban Barajındaki deformasyon ölçmelerinin belirlenmesinde ve analiz edilmesinde Gri Sistem metodunun kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu çalışmada Gri Sistem metodunun GM(1,1) ve GM(1,N) tahmin modelleri kullanılmıştır. GM(1,1) tahmin modeli tek değişkenli ve türevlenebilir olan, doğrusal davranış gösteren bir sistemdir. GM(1,N) tahmin modeli ise N adet değişkene sahip birinci dereceden türevlenebilir eşitliklerin olduğu bir sistemdir. Gri sistemde ki ana düşünce, hareketli noktalarda sınırlı sayıda veri yardımı ile noktada deformasyon olup olmadığını tahmin etmektir. Çalışmada deformasyon ölçümleri, 2010 yılından 2015 yılına kadar olan sürede, jeoteknik yöntemleri kullanarak, boşluk suyu basıncı ve barajın su seviyesindeki değişimlerine ait veriler elde edilmiştir. Bu sürede toplanan veriler referans olarak kullanılıp 2023 yılına kadar olan değişimler tahmin edilmiştir. Sonuçlara bakıldığında, GM(1,N) tahmin metoduna ait verilerin deformasyon değerlerini tam anlamıyla temsil etmemekle beraber, oluşabilecek deformasyonlar hakkında anlamlı bilgiler vermektedir. Buna göre, Gri Sistem'in deformasyon analizinde kullanılabilir bir yöntem olduğu görülmektedir.

Topçu (2019) yaptığı yüksek lisans çalışmasında, Özdeğer-Özvektör problemlerinin çözüm yöntemlerin incelenmesi için birkaç iterasyon yöntemlerinin yakınsaklık özellikleri ile Dejenere Çekirdekli Fredholm İntegral Denklemleri ele alınmıştır. İlk olarak Özdeğer-Özvektör problemleri için iterasyon çözüm metodlarında hata payı sifıra yakın olanları belirlenerek, uygulanabilirliği gösterilmiştir. Sonrasında Dejenere Çekirdekli Fredholm İntegral Denklemleri için çözüm yöntemleri incelenerek örnekler üzerinde nümerik sonuçların teorik sonuçlar ile uyumlu olduğu gösterilmiştir.

Yang ve ark. (2019) yayınladıkları uluslararası makalede, GNSS reflektometrisi (GNSS-R) teknolojisinin deformasyon izlemedeki kullanılabilirliği araştırılmıştır. GNSS-R teknolojisi için bir prototip geliştirilmiştir. Uydu alıcısının sabitlendiği 3 ayak üzerine, uydu sinyallerinin gözlemlenen alandan çarparak gelen sinyalleri alan bir anten yerleştirilmiştir. Böylelikle deformasyon analizi yapılacak bölgeden yansıyan dalgaların

değişimleri ile deformasyon analizi yapılmıştır. Uydulardan gelen sinyallerin gecikmeleri telafi edilmiş ve kalan taşıyıcı faz farkındaki değişiklikler deformasyonla ilişkilendirilmiştir. GNSS-R teknolojisi ile yapılan testlerin sonucunda santimetre altı düzeyde deformasyon gözlemlenmiştir.

Yıldırım ve Şişman (2019) yayınladıkları uluslararası makalede, Samsun ili Toybelen köyünde biri kontrol noktası olmak üzere, belirledikleri 15 noktalı deformasyon ağında, üç periyot şeklinde deformasyon ölçümleri yapılmıştır. Alınan veriler Matlab programlama dilinde değerlendirilmiştir ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonrasında hipotez testleri uygulanmıştır. Sonuçlara bakıldığında genel olarak y yönünde hareket olmadığı ancak z yönünde hareketlerin olduğu gözlemlenmiştir. Daha sonra uygulama süresinin artması ile test değerlerinde de artışların olduğu belirlenmiştir. Buna göre 2. noktada, x ve y yönünde az, z yönünde ki hareketliliğin fazla olduğu, 4. noktada x yönünde hareket olduğu ve bu eksenlerde test değerinin çok fazla arttığı sonuçları gözlemlenmiştir. Kontrol noktasında ise değişim olduğu ama test değerlerinin birbirine yakın olduğu sonucuna varılmıştır.

Yüceses (2019) yaptığı yüksek lisans çalışmasında, Çanakkale’de bulunan T1 tüneline Jeodezik ve Jeoteknik ölçme yöntemlerini kullanarak yapıda deformasyon olup olmadığı araştırılmıştır. Ayrıca bölgenin deprem kuşağında olmasından dolayı çalışma süresi boyunca oluşan depremlerin imalata etkisi de araştırılmıştır. Araştırma sonucunda bölgenin 100 yıllık analizi yapılmış ve imalatta buna göre revizeler yapılmıştır. Revizelerle birlikte imalat hem ekonomik hem de güvenli bir şekilde tamamlanmıştır.

Ansari ve Bae (2020) yayınladıkları uluslararası makalede, Güney Korede 1 Ocak 2000 - 31 Aralık 2018 tarihleri arasındaki içinde 2011 Tohoku-Okı (TO) Depremi'nin de yer aldığı GNSS ölçümleri kullanılarak ülkenin blok bazında jeodezik deformasyon ve gerilim modeli incelenmiştir. GNSS istasyonlarının hızları, üstel düzleştirme yöntemiyle modellemeleri yapılmış, zaman serileri analiz edilmiş ve tektonik deformasyon elde edilmiştir. Gerilim modeli ve düşey yer değiştirmelerin analiziyle, Kore bloklarının kuzeyinden güneyine doğru basınçlı deformasyonu takip eden gerilme deformasyonu olduğu görülmüştür. GNSS istasyonlarının deprem öncesi ve sonrası yer değiştirmeleri kullanılarak Güney Kore bloklarının açılma hızı ve dönme eksenini incelenmiştir. Sonuç olarak, kuzey bloklarının açılma hızının daha düşük, TO depreminden sonra güney bloğunun hızının ise daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Çalışmada kullanılan entegre yaklaşımların Güney Kore'nin aktif deformasyonunun daha iyi inceleneceği düşünülmüştür.

Eyübagil (2020) yaptığı yüksek lisans çalışmasında, diri fay olan Gülbahçe fayının kinematik yapısını incelemiştir. Oluşturulan 17 noktalı GNSS ağında, geçmiş yıllar ait ölçümler temin edilip, 2019 yılında tek kampanya ölçü yapılmıştır. Elde edilen 3 kampanya GNSS verileri ile bölgeye ait güncel hız ve gerinim alanları bulunmuştur. Gerinim bölgesine bakıldığında KKD-GGB açılma ve KKB-GGD sıkışma bileşenlerinin baskın olduğu görülmüştür. Fay mekanizması ile ilgili yorum yapabilmek amacıyla rölatif hız kombinasyonları elde edilmiştir. Bununla birlikte fay mekanizmasının sol doğrultu atımı işaret ettiğine varılmıştır. Gerinim parametreleri kullanılarak, uygulama bölgesinin $M_w \geq 6$ ve $M_w \geq 7$ için jeodezik deprem tekrarlama haritaları üretilmiştir ve haritalar incelenmiştir. İnceleme sonucunda, uygulama bölgesinin $M_w \geq 6$ için 65-120 yıl, $M_w \geq 7$ için 790-4330 yıl tekrarlama periyotlarını kapsadığı görülmüştür.

İnal (2020) hazırlamış olduğu ders notunda, deformasyon ölçmeleri ve analiziyle ilgili temel kavramlar verilmiş, deformasyon ölçmelerinde kullanılan jeodezik yöntemler açıklanmış, 1D, 2D, 3D ağlarda yaygın olarak kullanılan ortalama aykırılıklar yöntemiyle (teta-kare ölçütü) deformasyon analizi konusu anlatılmış, univaryant ve multivaryant ağlara ilişkin örnek çözümler yapılmıştır.

Altıntaş ve Gökalp (2021) yayınladıkları uluslararası makalede Trabzon'da denize dolgu yapılarak inşa edilen Şenol Güneş Medical Park Arena'nın, 20/12/2016-20/01/2018 tarihleri arasındaki yüzey deformasyonu incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, benzer bölgelerde denize dolgu şeklinde yapılacak inşalara örnek olabilecek niteliktedir. Çalışmada SNAP-StaMPS Entegrasyonlu PSI (Persistent Scatter Interferometry) tekniği uygulanmış ve StaMPS Visualizer yazılımı kullanılmıştır. Deformasyon analizi için gerekli olan uydu görüntüleri Sentinel-1 uydusundan elde edilmiştir. Sentinel-1 SAR (Synthetic Aperture Radar) görüntülerinin değerlendirilmesi ile çalışma alanında -25 mm/yıl ile +15 mm/yıl arasında değişimler los yönünde elde edilmiştir. Çalışma alanındaki zeminin uygunluğuna göre PS noktalarının dağılımı (toprak kısımlarda daha az, betonarme kısımlar da ise daha çok) heterojen şeklindedir. Çalışmanın sonrasında ise los yöndeki değişimlerden düşey deformasyon elde edilmesi ve elde edilen verilere atmosferik düzeltmeler getirilip hassas nivelman ile değişimlerin karşılaştırması planlanmıştır.

Gündüz (2021) yaptığı doktora çalışmasında, yer kabuğundaki veya mühendislik yapılarındaki deformasyonların belirlenmesi amacıyla TUSAGA-Aktif noktalarının kullanılıp kullanılmayacağı test edilmiştir. Bunun için çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada TUSAGA-Aktif sisteminde, 1 ve 30 saniyelik veriler kullanılarak yer kabuğundaki veya mühendislik yapılarındaki hangi büyüklükte deformasyonların belirlenebileceği ve en uygun ölçü süresinin ne olacağı tespit edilmeye çalışılmıştır. Bunun için yatay ve düşey yönde birer cm kaydırma yaparak sanal deformasyon vermeye yarayan bir düzenek imal edilmiştir. Düzenek üzerine sabitlenip kaydırma yapılarak elde edilen ölçüler sonucunda, yatay yöndeki deformasyonlar için 6 ve 12 saatlik ölçü sürelerinin, düşey yönde ise 24 saatlik ölçü süresinin yeterli olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında, KAF (Kuzey Anadolu Fay hattı) etrafında belirlenen TUSAGA-Aktif sistemine ait 9 adet istasyon seçilmiş ve 30 saniye kayıt aralıklı 2009-2018 yıllarını kapsayan 10 yıllık veriler kullanılmıştır. Bu veriler 7 adet IGS noktasına dayalı şekilde çözümleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra güven elipsoidleri yöntemi kullanılarak KAF üzerinde seçilen TUSAGA-Aktif noktalarının tamamında deformasyona uğradığı belirlenmiştir. Belirlenen deformasyonların, literatürde bulunan TUSAGA-Aktif nokta hızlarıyla uyumlu oldukları görülmüştür.

Konakoğlu (2021) yayınladığı uluslararası makalede, Türkiye’de bulunan Deriner Barajı’nda deformasyon incelemesi yapılmıştır. GNSS verileri 2016-2017 yılları arasında 4 oturum şeklinde elde edilmiştir. Ölçümler daha önce DSİ tarafında tesis edilmiş 12 referans, 7 obje noktasından jeodezik ağda yapılmıştır. Nokta hareketleri önce θ^2 -Ölçütü yöntemiyle statik deformasyon modeli kullanılarak belirlenmiştir. Daha sonra bu hareketler Kalman-Filtreleme yöntemi ile kinematik deformasyon modeli kullanılarak tespit edilmiştir. Statik ve kinematik deformasyon modelleri noktadaki hareketleri başarıyla belirleyebilir; ancak su basıncı, mevsimsel sıcaklık, depremler gibi yük etkilerini ihmal ederler. Bundan dolayı Kalman-Filtreleme yöntemine dayalı dinamik bir deformasyon modeli geliştirilmiştir ve rezervuar su seviyesi değişimi etkileyen kuvvet olarak kabul edilmiştir. Barajdaki hareketlilik ile rezervuar su seviyesi değişimi arasında açık bir ilişki olduğu dinamik deformasyon modeli ile ortaya konmuştur. Dinamik modelde, düşey bileşenlerdeki hassasiyetin düşük olması sebebiyle düşey yer değiştirmeler olumsuz etkilenmiştir. Sonuç olarak, dikey yer değiştirmeler yanlış bulunmuştur.

Oktar ve ark. (2021) yayınladıkları uluslararası makalede, Büyük Menderes Grabeni'ndeki yüzey deformasyonu ve tektonik hareketler, GNSS ve Kalıcı Saçılımlı İnterferometrik Sentetik Açıklıklı Radar (PSInSAR) yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Bunun için bölgede bulunan 8 GNSS istasyonundan veriler alınmış ve bölgenin tamamını kapsayan PSInSAR analizleri yapılarak bölgenin LOS yönündeki hareketleri belirlenmiştir. Verilerin değerlendirilmesi neticesinde, PSInSAR ile elde edilen LOS hızlarının ve GNSS istasyonlarından alınan üç boyutlu hızların dönüştürülmesinden elde edilen bir karşılaştırma ile sonuçların çok yakın olduğu ortaya çıkmıştır. Böylelikle GNSS yöntemi ile alansal olarak belirlenemeyen graben deformasyon miktarı, PSInSAR verileri kullanılarak alansal olarak belirlenmiştir.

Wu ve ark. (2021) yayınladıkları uluslararası makalede, Kuzey Çin bölgesinde 1999-2018 yılları arasında elde edilen GNSS ölçüleri ile GNSS hızlarına dayanarak, gerinim hızı, hız profilleri ve fay kayma hızları gibi deformasyon parametreleri analiz edilmiştir. Analiz için en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır. Sonuçlara bakıldığında, 1999-2007 yılları arasında gerinim hızı, Shanxi sismik bölgesinde maksimum 0.7×10^{-8} /yıl değeriyle güneydoğu yönlü gerilme olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda deformasyon, Yinshan ve Zhangjiakou-Bohai sismik bölgesinde kuzeybatı yönlü ve maksimum kayma gerilme hızı 0.7×10^{-8} /yıl değerinde olduğu belirlenmiştir. 2011 Japonya depremi ile gerinim hızları 1999-2007 döneminde 3.3 mm/yıl 'dan 2013-2018 döneminde 2.6 mm/yıl ve 0.9 mm/yıl değerlerine düşmüştür. Yapılan çalışma ile Yinshan ve Zhangjiakou-Bohai fay bölgesinin orta kesiminde büyük bir deprem potansiyelinin olabileceği öngörülmüştür.

Yılmaz ve Demirsoy (2021) yayınladıkları uluslararası makalede, Trabzon'da bulunan gelgit istasyonu ve çevresinde yer kabuğundaki dikey hareketi incelenmiştir. Çalışma bölgesinde belirlenen noktalarda hassas nivelman yöntemi kullanılarak yükseklik ölçmeleri yapılmıştır. Ölçümler 2020 yılı Haziran ve Ekim aylarında ki periyot şeklinde yapılmıştır. Ölçüm sonrası elde edilen veriler Matlab programlama dilinde değerlendirilmiştir. Her periyot için t-dağılım testi uygulanmış ve uyumsuz ölçü kalmayana kadar bu işlemler devam etmiştir. Ayrıca, aynı ölçümler kullanılarak statik deformasyon modeli olan θ^2 -Ölçütü yöntemi ile deformasyon analizi yapılmıştır. Yapılan işlemler sonrasında 1. periyotta 2.77 mm ve 2. periyotta 0.29 mm ile maksimum ortalama hataya RS494/684 noktasına ait olduğu görülmektedir. θ^2 -Ölçütü yöntemi ile deformasyon analizinde de test büyüklüklerinin (7.1513×10^{-4}), F-Tablo

değerinden (4.3874) küçük geldiği yani iki periyot arasında çalışma bölgesinde deformasyon olmadığı sonucuna varılmıştır.

Bak ve Çelik (2022) yayınladıkları ulusal makalede, kabuk deformasyon çalışmaları için web tabanlı, açık kaynak kodlu Hiper Metin İşaretleme (Hyper Text Markup Language, HTML) ve Basamaklı Biçim Şablonları (Cascading Style Sheets, CSS) uygulamaları yapıp Javascript ile deformasyon analizi uygulaması geliştirilmiştir. Geliştirilen web tabanlı programın adı Web-NDefA'dır. Univaryant olarak tasarlanan ağlarda, statik oturumlar şeklinde veriler elde edilmektedir. Sonrasında, Leica Geo Office (LGO) yazılımından tek kampanyaya ait baz çözüm dosyası olarak (ASCII) geliştirilen programa yüklenmektedir. Programda, serbest dengeleme, güven ölçütleri, deformasyon analizi, karşılaştırılan periyotlardaki noktaların koordinat farkları, yer değiştirme vektörleri ve bu vektörlerin hata elipsleri işlemleri gerçekleştirilebilmektedir.

Bilgen (2022) yaptığı doktora çalışmasında, Selçuk Üniversitesi kampüs alanında 1 obje ve 4 referans noktası olmak üzere toplam 5 noktadan oluşan mikro jeodezik ağda statik GNSS tekniği ile pilye üzerine kurulan özel düzenekte veriler elde edilmiştir. Düzenek, yatay ve düşey yönde birer cm kaydırma yapılarak sanal deformasyon vermeye yaramaktadır. GPS ve GPS-GLONASS şeklinde elde edilen veriler Bernese v5.2 programı kullanılarak değerlendirilmiş ve sonuç ürünlere ulaşılmıştır. Sonrasında R programlama dilinde, İteratif Ağırlıklı Dönüşüm Yöntemi (IWST) ile deformasyon analizi yapabilmesi için DefAn-for-GNSS-networks adında bir program geliştirilmiştir. Geliştirilen program ile yapılan analizler sonucunda yer değiştirmeler yerel jeodezik koordinat sistemine dönüştürülmüş ve ilgili eksen yönünde de ortaya konulmuştur. Geliştirilen program sayesinde deformasyonların geometrik boyutları ve nokta hareketlerinin anlamlı olup olmadığı uygulamada kullanılan mikro jeodezik ağda pratik bir şekilde tespit edilebilmiştir. Hazırlanan program ile deformasyonlar her ne kadar belirleniyor olsa da GNSS ölçülerinin değerlendirme sonuçlarında etkili olan faz başlangıç belirsizliği çözümleme oranlarının ve gözlem sayılarının analizden önce kontrol edilmesi ve uygun şartlar sağlandıktan sonra analize geçilmesinin önem arz ettiği öngörülmüştür.

Bilgen ve İnal (2022) yayınladıkları uluslararası makalede, tasarlanan mikro jeodezik ağda statik GNSS tekniği ile pilye üzerine kurulan yatay ve düşey yönde birer cm kaydırma yapılarak sanal deformasyon vermeye yarayan özel düzenekte veriler elde edilmiştir. Bu veriler Bernese v5.2 programı kullanılarak değerlendirilmiş ve sonuç

ürünlere ulaşılmıştır. Sonrasında R programlama dilinde, İteratif Ağırlıklı Dönüşüm Yöntemi (IWST) ile deformasyon analizi yapabilmek için DefAn-for-GNSS-networks adında bir program geliştirilmiştir. Geliştirilen program ile deformasyonların geometrik boyutları ve nokta hareketlerinin anlamlı olup olmadığı uygulamada kullanılan mikro jeodezik ağda pratik bir şekilde tespit edilebilmiştir. Bundan dolayı hazırlanan programın deformasyonların belirlenmesinde büyük ölçüde kolaylık sağladığı görülmüştür.

İnal (2022) hazırlamış olduğu ders notunda, deformasyon analiziyle ilgili temel kavramlar verilmiş, uyuşumsuz ölçü ayıklaması anlatılmış, deformasyon modelleri açıklanmış, bağıl güven elipsleriyle deformasyon analizi, cholesky çarpanlara ayırma yöntemiyle deformasyon analizi, S-transformasyonu ile deformasyon analizi, iteratif ağırlıklı dönüşümle deformasyon analizi, Mierlo yöntemiyle deformasyon analizi ve kinematik yöntemle deformasyon analizi konuları anlatılmıştır. Ayrıca anılan yöntemler aynı jeodezik ağa uygulanarak yöntemlerin sayısal uygulamalarla karşılaştırması yapılmıştır.

Yang ve ark. (2022) yayınladıkları uluslararası makalede, deniz üstü petrol platformun genel dinamik yer değiştirmesi, aynı zaman dilimi için GNSS ve ivme verilerine dayalı olarak yeniden oluşturulmuştur. T-testi ve korelasyon katsayıları prensiplerine dayanarak, CEEMD-Chebyshev hibrid filtresi, GNSS sinyaline ait yüksek frekanslı bileşenini ve düşük frekanslı bileşenin gürültülü kısmını çıkararak düşük frekanslı yer değiştirmenin elde edilmesini sağlamıştır. Maksimum yer değiştirme genliği 26.79 mm'den 21.22 mm'ye düşürülmüş ve gürültü giderildikten sonra korelasyon 0.8860 olarak hesaplanmıştır. Entegre edilen ivmeölçer ile elde edilen yer değiştirme miktarının GNSS verileriyle örtüştüğü görülmüştür. Hibrid filtre ile güç spektrumu tanımlama birleştirildiğinde, ivme verilerinin işlenmesi uygun hale gelmiştir. İşlenen ivme verileri yeniden oluşturularak platformun yüksek frekanslı dinamik yer değiştirme miktarları milimetrik hassasiyetle elde edilecek hale gelmiştir. GNSS 'ten alınan düşük frekanslı bileşenler ile ivmeölçerlerden alınan yüksek frekanslı bileşenler birleştirilmiş ve küresel dinamik yer değişimi elde edilmiştir. Esas GNSS izleme verileriyle korelasyon katsayısı 0.8576 olmuş ve gürültü giderilip yeniden yapılandırıldıktan sonra sinyal korelasyonu %85'in üzerinde hesaplanmıştır. Yapılan çalışma ile entegre GNSS ve ivmeölçer izleme tekniği kullanılarak deniz üstü petrol platformlarının dinamik yer değişimini izlemede pratiklik ve güvenilirlik sağlamıştır.

Zhou ve ark. (2022) yayınladıkları uluslararası makalede, Çin'de bulunan en ciddi üç jeolojik felaket bölgelerinden biri olan Loess Platosunda heyelan deformasyonu araştırması yapılmıştır. Araştırma benzer heyelanların deformasyonu, tetiklenme sebeplerini öğrenmek ve önlemek veya azaltmak için yapılmıştır. Bu kapsamda, konum bilgileri ve topraktaki nem oranı, entegre bir karasal GNSS uzaktan algılama sistemi ile elde edilmiştir. Konum için GNSS, nem oranı için L-Band mikrodalga sinyali kullanılmıştır. Yağışın, heyelan deformasyonu ve deformasyon hızını analiz etmek için önemli bir gösterge olduğu ve yağışın artması ile heyelan ve deformasyonunda arttığı gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda sistemin, heyelan felaket izleme ve erken uyarı için güçlü bir araç olduğu ve yüksek hassasiyetli 3 boyutlu deformasyon zaman serileri sağlayarak beklenmedik heyelanları hızlı bir şekilde tespit etmeyi kolaylaştırdığı görülmüştür.

Ülkemizin deprem kuşağında yer alması yer kabuğu deformasyonlarının izlenmesi ve analizini zorunlu kılarken büyük mühendislik yapılarının da herhangi bir can ve mal kaybına yol açıp açmayacağı konusu bu yapılarda deformasyon ölçülerinin yapılması ve analiz edilmesini gerektirmektedir. Bu çalışma sayesinde GNSS ölçülerine uygulanabilecek analiz yöntemlerinden bir tanesi olan Güven Elipsoitleri yöntemiyle deformasyon analizi hızlı bir şekilde yapılabilen ve deformasyonların geometrik büyüklükleri hazırlanan bir program yardımıyla belirlenebilmektedir. Aynı GNSS ölçülerinin deformasyon belirlemede robust bir yöntem olduğu pek çok bilimsel çalışmada belirtilen iteratif ağırlıklı dönüşüm yöntemiyle analiz edilmesi ve deformasyon belirlemede pratik bir yöntem olarak güven elipsoitleri yönteminin başarısının değerlendirilmesi çalışmanın önemini göstermektedir.

Gerçekleştirilen bu çalışmada, GNSS ölçülerinin 3 boyutlu deformasyon belirlemede kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla, Selçuk Üniversitesi kampüs alanında 6 referans ve 1 obje noktasından oluşan bir mikrojeodezik ağ oluşturulmuştur. Jeodezik ağda 4'er saatlik statik yöntemle GNSS ölçüsü yapılmıştır. Objeye noktasındaki ölçümler pilye üzerine kurulan sanal deformasyon vermeye yarayan bir düzenek ile gerçekleştirilmiştir. Düzenek yatayda ve düşeyde birer cm'lik kaydırma yapılabilecek şekilde tasarlanmıştır. Elde edilen veriler LGO ve Bernese programlarında değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonucunda elde edilen koordinatlar ve varyans-kovaryans matrisleri kullanılarak, MATLAB R2021a'da Güven Elipsoitleri ile deformasyon analizi yapabilen bir program geliştirilmiştir. Güven Elipsoitleri yöntemi ile hem analitik hem de grafik olarak deformasyonlar yorumlanabilmektedir. Bu

yöntemle analitik olarak elde edilen analizi sonuçları robust bir yöntem olan iteratif ağırlıklı dönüşüm yöntemi ile karşılaştırılmış ve her iki yönteminde benzer sonuçlar elde edilmiştir. GNSS oturumları sonucunda elde edilen veriler, LGO yazılımı ile değerlendirildiğinde 3 cm'lik sanal deformasyon 3.21 cm, Bernese v5.2 Bilimsel GNSS yazılımı ile değerlendirildiğinde ise 3.24 cm olarak belirlenmiştir. Her iki yöntemle yapılan analiz sonucunda %95 ihtimalle obje noktasında deformasyon olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, Matlab R2021a'da hazırlanan programın test edilmesi amacıyla, güven elipsoidleri yöntemi ile deformasyon analizi yöntemi excel ortamında çözülmüş, programla elde edilen sonuçlarla tamamen aynı değerler elde edilmiştir.



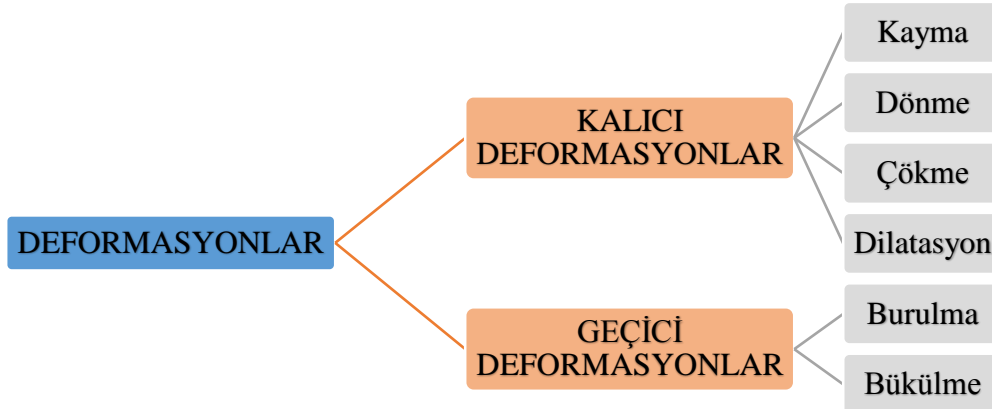
2. DEFORMASYON ÖLÇÜLERİ VE ANALİZİ

Yer kabuğunda veya mühendislik yapılarında (tünel, köprü, yol, baraj vb.) geçici ya da kalıcı etkilere maruz kalarak meydana gelen şekil değişimlerine **Deformasyon** denir. Deformasyonlar, buldukları koşullara ve zamana göre oluşmaktadır. Meydana gelen bu şekil değişimlerinin belirlenmesi amacıyla yapılan ölçmelere de **Deformasyon Ölçmeleri** denir. Yapılan ölçmelerin değerlendirilmesi ve yorumlanması aşaması ise **Deformasyon Ölçülerinin Analizi** olarak adlandırılmaktadır (İnal, 2020).

Geçmişten günümüze kadar teknolojinin ilerlemesi, deformasyon analizi için gerekli verilerin daha kolay elde edilmesinde yarar sağlamıştır. GNSS'in deformasyon ölçümlerinde kullanılmaya başlanmasından sonra klasik yersel tekniklere göre daha hızlı ve daha kolay veri elde edildiği görülmektedir. Klasik yersel tekniklerde ölçüler hem zahmetli hem de daha düşük duyarlılıkta olmaktadır.

2.1. Deformasyonların Sınıflandırılması

Deformasyonlar, kalıcı (plastik) ve geçici (elastik) deformasyonlar olarak iki başlık altında karşımıza çıkmaktadır (İnal, 2022) (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Deformasyonların Sınıflandırılması

2.1.1. Kalıcı (Plastik) deformasyonlar

Kalıcı deformasyon, deformasyona uğrayan alan ya da noktanın bu etki ortadan kalktıktan sonra eski haline gelmemesi şeklinde tanımlanır. Kalıcı deformasyonlar; kayma, dönme, dilatasyon veya çökme şeklinde meydana gelmektedir (Bilgen, 2022).

Yüzeyi sert olan doğal zeminin, düşey ya da düşeye yakın olacak şekilde yerçekimi kuvveti yönünde hareket etmesi çökme olarak adlandırılır. Oturma ise doğal zeminin veya yapının çeşitli kuvvetlerin ve yüklerin etkisi ile aşağı yönde hareket etmesiyle oluşur. Çökme ya da oturma türü deformasyonlarda çok az miktarda yatay doğrultuda da hareket olabilir. Çökmeler; kumlu zeminde yük uygulanmasıyla ani oturmalar, killi zeminlerde zamanla azalan konsolidasyon ve zeminin taşıma gücü sınırının aşılmasıyla plastik oturmalar şeklinde gerçekleşmektedirler. Çoğunlukla plastik oturmalar ile konsolidasyonu birbirinden ayırt etmek zor olmaktadır (İnal, 2022).

Kayma, bir objenin maruz kaldığı bir kuvvetle yatay yönde yer değiştirmesine denir. Objenin maruz kaldığı kuvvet sürtünme kuvvetinden büyük olduğu durumlarda kayma meydana gelmektedir (İnal, 2022).

2.1.2. Geçici (Elastik) deformasyonlar

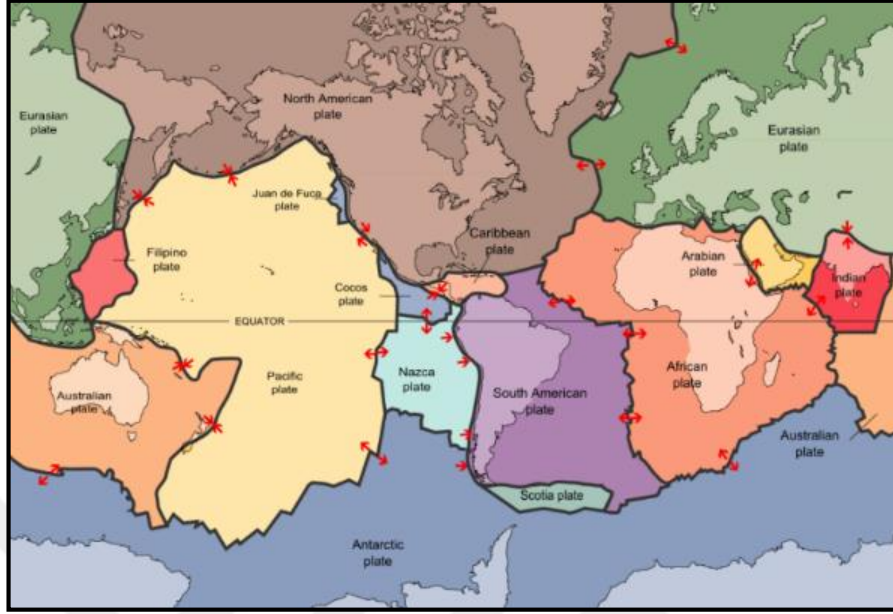
Elastiki deformasyonlar, deformasyona uğrayan objenin deformasyon sonrası tekrar eski halini alması durumudur. Burulma veya burkulma şeklinde ortaya çıkmaktadırlar (Bilgen, 2022).

2.2. Deformasyonların Nedenleri

Deformasyona; nem, sıcaklık, basınç, yer kabuğu hareketleri, rüzgârlar, maden ve tünellerde tavanın taşıyamamasından kaynaklanan çökmeler, yol ve yapı altlarında gevşemeler, paslanmalar, çürümeler vb. olaylar neden olmaktadır (İnal, 2022).

Deformasyon ölçmeleri, noktaların buldukları koşullara göre ölçme yöntemlerinde değişiklikler gösterebilir. Deformasyon ölçmeleri, jeodezik yöntemler ve geoteknik (jeodezik olmayan) yöntemler olarak ikiye ayrılır. Ölçmelerde alinyman, klasik konum, uydu bazlı konum, presizyonlu trigonometrik ve geometrik nivelman ölçmeleri kullanılırsa jeodezik yöntemle deformasyon ölçmesi yapılmış olur. Bahsedilen yöntemlerde teodolit, total station, nivo, GNSS uydu alıcıları kullanılmaktadır. Geoteknik yöntemine bakıldığında, donanımlar zeminde meydana gelen hareketlerin takibinde kullanılır. Piezometre (boşluk suyu basıncı), manyetik oturma kolonu (zemin düşey hareketi), basınçölçer, inkilinometre (eğim ölçme), crackmetre (çatlak ölçer), strengaç (şekil değiştirme), extensometre vb. aletler kullanılmaktadır (Kalkan, 2014).

Jeoloji biliminin ilgilendiği, yer kabuğu hareketlerinin sebebi olarak dünyada farklı yoğunluk ve büyüklükte 12 levha vardır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Dünya Üzerindeki Levhalar (Url.1).

Bu levhaların uzaklaşma, yaklaşma veya yan yana kayma şeklinde hareket etmesi sonucunda depremler meydana gelmektedir (Demirci, 2012). Depremler yapıların zarar görmesine hatta yıkılmasına, yer kabuğunda da çökme ve kaymaya neden olurlar. Sonucunda da can ve mal kayıpları meydana gelmektedir. Deprem sonrasında yapının maruz kaldığı kuvvet ile hangi boyutta hareket ettiği deformasyon analiziyle belirlenebilmektedir.

Barajlarda, barajın üzerinde belirlenen obje noktalardan ve barajın dışından sabit kabul edilen noktalardan yararlanılarak, hassas ölçüm yapan aletler ile deformasyon ölçmeleri yapılmaktadır (Şekil 2.3-2.4). Aynı zamanda barajın geoteknik yöntemlerle de deformasyon ölçümleri yapılmaktadır. Deformasyonu etkileyen faktörler olarak sıcaklık, basınç, nem ve yer kabuğu hareketleri vb. örnek verilebilir.



Şekil 2.3. Baraj Ölçmelerinde Pilye Örneği (İnal ve Bülbül, 2013)



Şekil 2.4. Baraj Ölçmelerinde Kret Üzerindeki Obje Noktası (İnal ve Bülbül, 2013).

Tüneller de ise etkiyen dış kuvvetler ile daralma ve çökme gibi olaylar gerçekleşmektedir. Yüksek maliyetli oldukları için deformasyon ölçmeleri ve analizi ile dış kuvvetlerden oluşabilecek sorunların önüne geçilebilir (Yüceses, 2019). Deformasyon ölçmeleri, tünelde ki araçlardan etkilenmeyecek şekilde belirlenen, obje noktalarının ölçülmesi ile gerçekleştirilmektedir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Tünel İçerisinde Yapılan Ölçme İşlemi (Url.5).

Tüneller, dış etkenlerin ve bakımsızlığın sonucunda da kalıcı deformasyona uğrayabilirler (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Tavanı Çökmüş Tünel (Url.2).

Köprülerde, rüzgâr ve deprem gibi etkiler, deformasyona neden olmaktadır (Şekil 2.7). Köprüleri, kara parçasına bağlayan ayaklarında ve yol kısmında uygun yerlere nokta tesis edilerek, deformasyon ölçmeleri ve sonrasında analizi yapılabilir (Kalkan ve Alkan, 2005). Böylelikle deformasyon analizi ile önceden müdahale edilerek can ve mal kayıplarının önüne geçilmesi mümkündür.



Şekil 2.7. ABD’de yeni yapılmış olan Tacoma Narrows köprüsünün rüzgârın etkisi ile salınımı (Url.3).

Kalıcı deformasyonlara başka örnekler vermek gerekirse; yatayda, sürtünme kuvvetinin önüne geçen nesnenin hareket etmesi, kaymayı tanımlar. Bu duruma heyelan örnek gösterilebilir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. İzmir’de Meydana Gelmiş Heyelan (Url.4).

Göçük ve tasman gibi oluşumlar düşey yöndeki hareketlerden meydana gelmektedir (Can, 2011). Düşeyde yaşanan hareketler ve değişimler, çökmeye örnek olarak gösterilebilir (Şekil 2.6). Dilatasyona ise fabrikalarda uzun süreli hatta durmadan çalışan mekanik malzemeleri örnek gösterebiliriz. Elastiki deformasyona ise en güzel örnek olarak yay gösterilebilir.

2.3. Deformasyon Modelleri

Deformasyon ölçülerinin analizinde kullanılan farklı modeller vardır. Tasvirsel modeller ve etki-tepki modelleri olarak iki başlık altında incelenmektedirler. Tasvirsel modele bakıldığında deformasyon sürecindeki etkilerinin izlediği görülmektedir. Etki-tepki modelinin amacı ise deformasyon süresince etkiyen büyüklükler ve incelenen objenin bu büyüklüklere karşı verdiği tepkileri arasındaki ilişkinin analiz edilmesidir.

Tasvirsel modeller, uyum modelleri ve kinematik modeller olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bu modeller, objeye etkiyen kuvvetleri sürece dâhil etmeden analiz yapılmasını için geliştirilmiştir. Etki-tepki modelleri, sıcaklık, yer çekimi vb. gibi objeye etki eden kuvvetlerin dikkate alınmaktadır. Bu modeller de statik ve dinamik model olarak iki başlıkta ayrılmaktadır (Bilgen, 2022).

2.3.1. Uyum modeli

Uyum modeli, zamandan ve etkiyen kuvvetlerden ayrı olacak şekilde deformasyon analizinde incelenen objenin iki farklı periyottaki durumu arasında sadece geometrik bir karşılaştırma yapmaktadır. Uyum modelinde sıfır hipotezi “Her iki periyotta karakteristik noktalardan oluşan obje birbirine benzerdir.” şeklinde

tanımlanmaktadır. Objenin iki farklı durumu da bir doğrusal bir hipotez testi ile karşılaştırılmaktadır. Deformasyonun anlamlı olarak kabul edilmesi için sıfır hipotezinin geçerli olmaması gerekmektedir. Sonrasında deformasyonların yerleştirilmesi işlemi ile sabit ve hareketli noktalar belirlenir (Bilgen, 2022).

2.3.2. Kinematik model

Yerkabuğunda meydana gelen yatay ve düşey yöndeki hareketlerin belirlenmesinde genel olarak zamanın bir fonksiyonu olan kinematik modeller kullanılır. Kinematik deformasyon analizinde, deformasyona sebep olan dış etkenler göz ardı edilerek dayanak ve obje noktalarının konumları zamanın fonksiyonları şeklinde tanımlanır. Kinematik modelde hesaplanan parametre sayısı fazladır. Bu parametreler, noktaların hızları, ivmeleri ve noktalara ait değişim miktarlarıdır (Doğanalp ve Turgut, 2009).

Kinematik modellerde, deformasyon çalışmasına konu olan bölge veya yapının bir periyottaki ölçme işleminin uzun sürdüğü durumlarda kullanılmaktadır. Ülke genelinde nivelman ağlarında deformasyon araştırması yapılacağı varsayılırsa bu durum da nivelman ölçme işlemleri bir periyot için 3-4 yılda tamamlanabilmektedir. Bu süre zarfında nivelman noktalarına ait yüksekliklerin sabit kaldıkları düşünülmeceği için noktaların yükseklikleri yerine yükseklik değişimleri zamanın fonksiyonu olarak ifade edilir ve düşey hareketlerin hızları irdelenir (Atasoy ve Öztürk, 2005; Bilgen, 2022).

2.3.3. Statik model

Statik model ile gerçekleştirilen deformasyon çalışmalarında deformasyon vektörleri, zamandan ve etkileyen kuvvetlerden bağımsız olacak şekilde belirlenmektedirler. Statik deformasyon analizinde bulunan değerler kısıtlıdır ve bunlar, objedeki noktaların değişim miktarlarını içermektedir (Doğanalp ve Turgut, 2009).

Statik modelde deformasyonlar zamandan bağımsız olarak belirlendiği için obje noktalarının her iki periyota ait ölçümleri sırasında sabit kaldıkları varsayılmaktadır. Objenin hareketleri zamanın değil sadece yüklerin bir fonksiyonu olarak dikkate alınmaktadır. Bu yönlerinden dolayı jeodezik yöntemlerle deformasyon analizinde en çok statik model tercih edilmektedir (Bilgen, 2022).

2.3.4. Dinamik model

Dinamik model kullanılarak gerçekleştirilen deformasyon çalışmalarında obje hareketleri zamana ve etkiyen kuvvetlere bağımlı olarak belirlenmektedir. Dinamik modelde obje, ölçüm esnasında hareketli kabul edilir. Bundan dolayı obje hareketlerinin takibi sürekli ve otomatik gözlem metotlarının kullanılmasını zorunlu kılmaktadır.

Dinamik model, zaman ve etkiyen kuvvete bağımlı olduğu için en geniş ve en kapsamlı model olarak nitelendirilir. Dinamik model kendi içinde iki başlıkta ayrılmaktadır. Bunlar parametrik ve parametrik olmayan modellerdir (İnal, 2022).

2.4. Deformasyon Modellerinin Karşılaştırılması

Kendi aralarında farklılıklar olan deformasyon modellerinin karşılaştırılması Çizelge 2.1.'de gösterilmektedir.

Çizelge 2.1. Deformasyon modellerinin sınıflandırılması (Welsch ve Heunecke, 2001)

Deformasyon Modeli	Statik Model	Kinematik Model	Dinamik Model	Uyum Modeli
Zaman	Modellenmez	Hareketler zamanın bir fonksiyonudur.	Hareketler zamanın ve yüklerin bir fonksiyonudur.	Modellenmez
Etkiyen Kuvvetler	Yer değiştirmeler yüklerin bir fonksiyonudur.	Modellenmez	Hareketler zamanın ve yüklerin bir fonksiyonudur.	Modellenmez
Objenin Durumu	Yükler altında yeterince dengede	Sürekli hareket halinde	Sürekli hareket halinde	Yeterince dengede

3. İTERATİF AĞIRLIKLİ DÖNÜŞÜM İLE DEFORMASYON ANALİZİ

Obje veya bölgelerdeki deformasyonları belirlemek üzere yapılan ölçümlerin değerlendirilmesi için kullanılan pek çok deformasyon analiz yöntemi mevcuttur. Jeodezik yöntemlerle deformasyon analizinde Ortalama Aykırılıklar Yöntemi (θ^2 Ölçütü), S-transformasyonu, Bağlı Güven Elipsleri, Cholesky Çarpanlarına Ayrılma Yöntemi, Mierlo Yöntemi ve İteratif Ağırlıklı Dönüşüm Yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin bazıları sadece 2D ağlarda, bazıları ise 1D, 2D ve 3D ağlarda kullanılabilir. İteratif Ağırlıklı Dönüşüm yönteminin Robust bir yöntem olması ve son yıllarda tercih ediliyor olması bu çalışmada kullanılması için tercih sebebi olmuştur.

Objenin periyodik bir şekilde zamana bağlı gözlemlenerek deformasyonların tam olarak belirlenebilmesi mümkündür. Bir tek ölçü ile deformasyonlara ilişkin sonuçlara ulaşamazken değişik zamanlarda veya özel durumların olduğu zamanlarda ölçümler yapılarak deformasyonlar ile ilgili yorum yapılabilir. Deformasyonda objenin hızına bağlı olarak ölçmelerin tekrarlama aralığı belirlenir. Hızın az olduğu durumlarda klasik jeodezik ölçme yöntemleri kullanılabilirken, hızın fazla olduğu durumlarda ise özel ölçme yöntemleri kullanılmalıdır. Deformasyon ölçmeleri ya asıl problemin belirlenmesi ya da bir tehlikenin ortaya çıkarılması için yapılır.

Ölçülerin her iki durumda da kanıt gücü ve güvenilirliği önemli olduğundan gerekli ölçü doğruluğu önceden belirlenir. Deformasyonların gözlenmesinde genel olarak jeodezik ağ yöntemi kullanılır. Ölçmeler yüksek doğrulukta yapılır. Sonrasında sırasıyla uyumsuz ölçüler ayıklanır ve uygun analiz yöntemi ile ölçüler değerlendirilir. Değerlendirme sonrası sonuçlar yorumlanır ve objedeki hareketliliğin anlamlı olup olmadığı belirlenir (İnal, 2019).

İteratif ağırlıklı dönüşüm yöntemiyle deformasyon analizi için belirlenen jeodezik ağda hareketli olan noktaların ön bilgisine ihtiyaç duyulmamaktadır. Diğer taraftan bu yöntem ile ulaşılan sonuçlar gerçek deformasyon modelini yansıtmaktadır. Chen'e (1983) göre bu yöntem, datum belirlemesi sağlarken aynı zamanda GNSS ile deformasyon analizinde kullanışlı ve programlamaya elverişli Robust bir yöntemdir. İki periyottan elde edilen ölçülerin dengelenmesi esnasında iki farklı datum tanımlanmasından veya hesap edilen yer değiştirme değerleri tercih edilen datumdan dolayı etkilenmiş olabilir. Dolayısıyla ağırlık matrisi iteratif olarak elde edilir.

Referans noktalarının sabit kabul edilmediği bir jeodezik deformasyon ağında, ağ serbest bir ağ olarak tasarlanmaktadır (Chen ve ark., 1990; Bilgen, 2022). Bundan dolayı iteratif ağırlıklı dönüşüm yönteminin uygulanmasında periyot ölçüleri serbest dengelenir. İki ayrı dengeleme sonrasında ağdaki noktaların dengelenmiş koordinatları \hat{x}_1 , \hat{x}_2 ve kofaktör matrisleri $Q_{\hat{x}_1}$, $Q_{\hat{x}_2}$ olarak hesaplanır.

İteratif ağırlıklı dönüşüm yönteminin uygulandığı aşağıdaki şekilde gerçekleştirilmektedir (Chen ve ark., 1990; Bilgen, 2022). İki ayrı dengeleme ile elde edilen sonuçlardan fark vektörü (d) ve ona ait kofaktör matrisi (Q_d);

$$d = \hat{x}_2 - \hat{x}_1, \quad Q_d = Q_{\hat{x}_2} + Q_{\hat{x}_1} \quad (3.1)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Toplam varyans faktörü ($\hat{\sigma}_{0_p}^2$) ve onun serbestlik derecesi (df_p);

$$\hat{\sigma}_{0_p}^2 = \frac{df_1(\hat{\sigma}_{0_1}^2) + df_2(\hat{\sigma}_{0_2}^2)}{df_p}, \quad df_p = df_1 + df_2 \quad (3.2)$$

eşitliğinden hesaplanır. Eşitlikte bulunan df_1 ve df_2 sırasıyla birinci ve ikinci periyota ait ölçülerin dengelemesinde serbestlik dereceleri, $\hat{\sigma}_{0_1}^2$ ve $\hat{\sigma}_{0_2}^2$ sırasıyla birinci ve ikinci periyota ait ölçülerinin dengelenmesi sonucu elde edilen varyanslardır. Eğer öncül varyans faktörü yoksa ve $H_0: \hat{\sigma}_{0_1}^2 = \hat{\sigma}_{0_2}^2$ sıfır hipotezi olmak üzere α güven seviyesinde istatistik test:

$$\left[F_{df_2, df_1, \frac{\alpha}{2}} \right]^{-1} < \frac{\hat{\sigma}_{0_1}^2}{\hat{\sigma}_{0_2}^2} < F_{df_2, df_1, \frac{\alpha}{2}} \quad (3.3)$$

geçerlidir. Yukarıdaki testin geçerli olmaması durumunda iki dengeleme arasında ölçülerin uygun ağırlıklandırılmadığı düşünülür (Chen ve ark., 1990; Bilgen 2022).

d_r ve Q_{d_r} sırasıyla referans noktaları için eşitlik (3.1)'deki d ve Q_d den elde edilen fark vektörü ve kofaktör matrisi olmak üzere, datum dönüşümü (3.4) ve (3.5) eşitlikleri kullanılarak gerçekleştirilir:

$$S_r = (I - G(G^T P G)^{-1} G^T P)$$

$$\tilde{d}_r = [I - G(G^T P G)^{-1} G^T P] d_r = S_r d_r \quad (3.4)$$

ve

$$Q\tilde{d}_r = S_r Q d_r S_r^T \quad (3.5)$$

Burada G matrisi S-transformasyonundaki G matrisi ile aynı tarzdadır. Nivelman ve trigonometrik nivelman ağırları için G matrisi eşitlik (3.6)'da verilmiştir.

$$G = [1]_{p \times 1} \quad (3.6)$$

GPS ağırları için G matrisi;

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{3p \times 3} \quad (3.7)$$

doğrultu ağırları için G matrisi;

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -y_1^0 & x_1^0 \\ 0 & 1 & x_1^0 & y_1^0 \end{bmatrix}_{2p \times 4} \quad (3.8)$$

doğrultu-kenar ağırları için G matrisi;

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -y_1^0 \\ 0 & 1 & x_1^0 \end{bmatrix}_{2p \times 3} \quad (3.9)$$

üç boyutlu ağırlar için G matrisi;

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_1^0 & -y_1^0 & x_1^0 \\ 0 & 1 & 0 & -z_1^0 & 0 & x_1^0 & y_1^0 \\ 0 & 0 & 1 & y_1^0 & -x_1^0 & 0 & z_1^0 \end{bmatrix}_{3p \times 7} \quad (3.10)$$

şeklinde. Burada p ağıdaki nokta sayısını ifade etmektedir. x_1^0 , y_1^0 , z_1^0 ise P_i noktasının ağırlık merkezine göre koordinat bileşenleridir. Yani:

$$\begin{aligned}
x_1^0 &= x_i - (\sum_1^m x_i)/m \\
y_1^0 &= y_i - (\sum_1^m y_i)/m \\
z_1^0 &= z_i - (\sum_1^m z_i)/m
\end{aligned} \tag{3.11}$$

Chen ve ark. (1990)'a göre, tek boyutlu ağlara ait datum parametresi düşey yöndeki öteleme büyüklüğü t_z 'dir. d_i , P_i noktasının yer değiştirmesi olmak üzere $\{\sum_i |d_i - t_z|\}$ minimum şartını sağlamak amacıyla ağırlık matrisi P , d fark vektörünün tüm elemanlarının cebirsel değerlerinin artışına göre sıralanması ile oluşturulur. t_z değeri orta değerdir. Eğer ağda noktaların sayısı çiftse, ya iki orta fark değeri ya da onların ortalaması orta değer olarak kullanılır ve dönüşümdeki ağırlık matrisi P elde edilir. Yeni fark vektörü ve kofaktör matrisi eşitlik (3.4) ve (3.5)'ten hesaplanmaktadır.

İteratif ağırlıklı dönüşüm yöntemi, iki boyutlu ağlar için detaylandırılmıştır (Chen, 1983). Bu yönteme bakıldığında eşitlik (3.4)'teki P ağırlık matrisi, datum belirlenirken ağda bulunan noktaların aynı öneme sahip olduğunu belirtmek için başlangıçta birim matris olarak alınır. Bu hususta çözüm Helmert Dönüşümün benzeridir. İteratif ağırlıklı dönüşüm yönteminde ağdaki her noktanın sabit olmadığı veya ağda bulunan her noktanın eşit öneme sahip olmadığı varsayılır. Bundan dolayı ağırlık matrisi P iteratif olarak eşitlik (3.12)'deki gibi elde edilir. Bu durumda $(k+1)$ 'inci dönüşümde ağırlık matrisi aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$P^{(k+1)} = \text{köşegen}\{1/|\tilde{d}_r^{(k)}(i)|\} \tag{3.12}$$

Burada $\tilde{d}_r^{(k)}(i)$, k 'inci iterasyondan sonra \tilde{d}_r vektörünün i 'nci bileşenidir. İteratif süreç ardışık dönüştürülmüş yer değiştirme bileşenleri arasındaki mutlak farklar δ tolerans miktarından (yer değiştirme bileşenlerinin ortalama doğruluğunun yarısı) $|\tilde{d}_r^{(k+1)} - \tilde{d}_r^{(k)}| < \delta$ eşitliği sağlanana kadar devam eder. Son iterasyonun, $(k + 1)$ 'inci olduğu düşünülürse, kofaktör matrisi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q\tilde{d}_r = S_r^{(k+1)} Q d_r [S_r^{(k+1)}]^T \tag{3.13}$$

Sonrasında her nokta için birer c_i değeri hesaplanır.

$$c_i = \frac{d_i^2}{q_{d_i} \hat{\sigma}_{0_p}^2} \quad (3.14)$$

Eşitlik (3.14)'teki d_i i noktasına ait yer değiştirme, q_{d_i} i noktasının yer değiştirmenin kofaktör değeri ve eşitlik (3.2)'den hesaplanan ortak varyans faktörü ise $\hat{\sigma}_{0_p}^2$ 'dir;

$$c_i < F_{1,d_{f_p},1-\alpha} \quad (3.15)$$

ise nokta hareketsiz, aksi halde hareketli olduğu söylenebilir. Eşitlik (3.15)'de α yanılma olasılığı, d_{f_p} ise eşitlik (3.2)'de açıklanan serbestlik derecesidir.

4. GÜVEN ELİPSOİTLERİ İLE DEFORMASYON ANALİZİ

Güven elipsoitleri ile deformasyon analizi, tek noktada iki periyot şeklinde GNSS ölçüleri ile yapılmaktadır. Ölçülerden elde edilen koordinat ve varyans-kovaryans değerleri kullanılmaktadır. Bu deformasyon analizinin uygulanması için ölçülerin korelasyonsuz olduğu varsayılmaktadır. Basit ve uygulanması kolay bir deformasyon analiz yöntemidir (Cederholm, 2003).

Bu yöntemde deformasyon analizi sayısal ya da grafik üzerinde yorumlanabilir. Grafik üzerinde deformasyon analizinin yorumlanması için özdeğer ve özvektör kavramlarının bilinmesi gerekmektedir.

4.1. Özdeğer ve Özvektör Kavramları

Özdeğer ve özvektör matematiksel olarak şöyle tanımlanır; A , $n \times n$ boyutunda bir matris olsun ve x vektörü de sıfırdan farklı kabul edilsin. $A \cdot x = \lambda \cdot x$ eşitliğini sağlayan λ değerine A matrisinin **özdeğeri** denir. x vektörü de bu özdeğere karşılık gelen **özvektördür** (Amirali ve Amirali, 2018; Topçu, 2019).

Özdeğer ve özvektörler, deformasyon analizinin grafik üzerinde yorumlanabilmesi için gereklidirler. Deformasyon vektörü hesaplandıktan sonra yorumlamanın yapılabilmesi için elipsoidin çizilmesi gerekmektedir. Bu çizimde elipsoidin boyutu, şekli ve yönü bilinmelidir. Özvektörler ile elipsoidin yönü, özdeğerler ile elipsoidin boyutu ve şekli elde edilmektedir (Cederholm, 2003).

Özdeğer ve özvektör hesabı için gerekli olan eşitliklere aşağıda yer verilmiştir.

Simetrik bir A matrisi ile e vektörünün çarpımı sonucu yeni bir z vektörü ortaya çıkar.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix},$$

$$e = [e_1 \quad e_2 \quad e_3]^T. \quad (4.1)$$

$$z = A \cdot e \quad (4.2)$$

Genellikle z 'nin yönü e 'nin yönünden farklıdır. e 'nin yönü ile $z = A.e$ 'nin yönünün aynı olduğu durumlar bazı e vektörlerine bağlıdır. Bu çalışmada ki e vektörünün bu özellikte olduğu varsayılmaktadır. z ile e 'nin tek ortak yanı aynı yön olmasından dolayı, e ile çarpılan bir sabit z 'yi verecektir.

$$z = \lambda . e \quad (4.3)$$

Eşitlik (4.3) 'ün diğer hali eşitlik (4.4) 'teki gibi yazılabilir.

$$A . e = \lambda . e \quad (4.4)$$

Eşitlik (4.4) 'e bakıldığında, e vektörü sıfıra eşit değildir ve e vektörü A 'ya ait bir özvektördür, λ ise özdeğerdir. Bu durumda eşitlik tekrar yazılarak eşitlik (4.5) ortaya çıkar.

$$\begin{aligned} A . e - \lambda . e &= 0 \\ (A - \lambda . I)e &= 0 \end{aligned} \quad (4.5)$$

I matrisi, 3×3 'lük bir özdeşlik matrisi olarak adlandırmaktadır. $(A - \lambda . I)$ 'nin determinanı sıfır ise eşitlik (4.5) 'in önemli bir çözüme sahip olduğunu doğrusal cebir teoremi gösterir.

$$|A - \lambda . I| = 0$$

$$\left| \begin{bmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} - \lambda \end{bmatrix} \right| = 0 \quad (4.6)$$

A 'nın karakteristik eşitliği, eşitlik (4.6) 'dır. Genişleyen eşitlik (4.6), A 'nın 3. mertebeden karakteristik polinomunu verir.

$$\begin{aligned} \lambda^3 + a_1 . \lambda^2 + a_2 \lambda + a_3 &= 0 , \\ a_1 &= -(a_{11} + a_{22} + a_{33}) \\ a_2 &= -(a_{13}a_{31} - a_{11}a_{22} + (-a_{11} - a_{22}).a_{33} + a_{23}a_{32} + a_{12}a_{21}) \\ a_3 &= -(a_{11}a_{22}a_{33} + a_{13}a_{21}a_{32} - a_{13}a_{22}a_{31} + a_{12}a_{23}a_{31} - a_{11}a_{23}a_{32} - a_{12}a_{21}a_{33}) \end{aligned} \quad (4.7)$$

A matrisi simetrik bir matris olduğu için eşitlik (4.7) daha düzenli ve kısa yazılabilir. A matrisinin aynı zamanda pozitif olmasından dolayı polinomun üç kökü vardır. Bu matrisin özdeğerleri yani polinomun kökleri hesaplanabilir (Cederholm, 2003).

$$\lambda_{1,2,3} = \begin{cases} -2\sqrt{Q} \cos\left(\frac{\theta}{3}\right) - \frac{a_1}{3} \\ -2\sqrt{Q} \cos\left(\frac{\theta+2\pi}{3}\right) - \frac{a_1}{3}, \\ -2\sqrt{Q} \cos\left(\frac{\theta+4\pi}{3}\right) - \frac{a_1}{3} \end{cases}$$

$$Q = \frac{a_1^2 - 3a_2}{9}, \quad (4.8)$$

$$R = \frac{2a_1^3 - 9a_1a_2 + 27a_3}{54},$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{R}{\sqrt{Q^3}}\right).$$

Hesaplanan özdeğerler aşağıdaki kurala uygun olmalıdır.

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq 0 \quad (4.9)$$

Eşitlik (4.5) 'e göre özdeğerler elde edildikten sonra her özdeğer için özvektörler (e_1, e_2, e_3) hesaplanır.

$$(A - \lambda_i \cdot I) \cdot e_i = 0, \quad (4.10)$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} - \lambda_i & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda_i & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} - \lambda_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_{i1} \\ e_{i2} \\ e_{i3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, 3.$$

Bizi ilgilendiren kısım özvektörün uzunluğu değil yönüdür. Bundan dolayı vektör elemanlarından birine keyfi bir değer atanır. Sonrasında diğer iki eleman hesaplanır. Örnek olarak e_{i1} elemanı 1 değerini alırsa eşitlik (4.10) aşağıdaki gibi olur.

$$\begin{bmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{22} - \lambda_i & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} - \lambda_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_{i2} \\ e_{i3} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} a_{11} - \lambda_i \\ a_{21} \\ a_{31} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Kalan iki eleman da aynı şekilde hesaplanır.

4.2. Güven Elipsoitleri

Küresel koordinat sistemi olarak adlandırılan kartezyen koordinat sisteminde, bir noktadan üç boyutlu $\hat{x} = [x \ y \ z]^T$ elde edilir. Noktaya ait varyans-kovaryans matrisi de çıktı verisinden bulunur. Varyans-kovaryans matrisi:

$$\Sigma_{\hat{x}} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Burada $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$, $\sigma_{xz} = \sigma_{zx}$, $\sigma_{yz} = \sigma_{zy}$ 'dir. Noktanın istatistiksel özellikleri irdelenir ve değerlendirilmesi yapılır. Üç boyutlu normal dağılımda varsayılan bir $x = [x \ y \ z]^T$ vektörü olsun. $f(x)$ olasılık yoğunluk fonksiyonu x için verilir.

$$f(x) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \sqrt{|\Sigma_x|}} \exp\{-0.5(x - \mu)^T \Sigma_x^{-1}(x - \mu)\} \quad (4.13)$$

Bu eşitlikte, Σ_x , x 'in varyans-kovaryans matrisidir, $|\Sigma_x|$, varyans-kovaryans matrisin determinanı, μ ise x 'in ortalamasıdır. Σ_x ve μ bilinmediği için $\Sigma_{\hat{x}}$ ve \hat{x} kullanılır. Böylece yeni fonksiyon aşağıdaki gibi olur:

$$f(x) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \sqrt{|\Sigma_{\hat{x}}|}} \exp\{-0.5(x - \hat{x})^T \Sigma_{\hat{x}}^{-1}(x - \hat{x})\} \quad (4.14)$$

Bu $f(x)$ fonksiyonu, aşağıdaki denklemi sağlayan noktalar için sabit bir değere sahiptir. (Cederholm, 2003; Cooley and Lohnes, 1971; Cooper, 1987; Johnson, 1987; Mikhail and Ackermann, 1976; Vanicek and Krakiwsky, 1992).

$$(x - \hat{x})^T \Sigma_{\hat{x}}^{-1}(x - \hat{x}) = k^2 \quad (4.15)$$

$\Sigma_{\hat{x}}^{-1}$ pozitif ve simetrik yapıya sahip bir matris olduğu için burada üç eksenli bir elipsoidi tanımlanmış olur. Tanımlanan elipsoide güven elipsoidi denir. Elipsoidin boyutu k^2 ile yönü ve şekli ise $\Sigma_{\hat{x}}$ ile üç boyutlu uzayda belirlenir. Eğer koordinat sisteminin orijinini \hat{x} konumuna dönüştürülecek olunursa eşitlik (4.15) indirgenir ve yeni eşitlik aşağıda ki gibi olur:

$$(x)^T \Sigma_{\hat{x}}^{-1}(x) = [x \quad y \quad z] \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = k^2 \quad (4.16)$$

Köşegen dışında elemanlara sahip olan varyans-kovaryans matrisi ($\Sigma_{\hat{x}}$), elipsoit eksenleri ile küresel koordinat sistemine ait eksenlerin paralel olmadığını göstermektedir. Eğer eksenleri paralel yapmak için varyans-kovaryans matrisi başka bir koordinat sistemine dönüştürülür ise varyans-kovaryans matris köşegen matris olacaktır. Köşegen harici tüm elemanlar sıfır değerini alacaktır. Köşegende bulunan elemanlar da koordinat sisteminin eksenleri boyunca noktanın varyanslarıdır. Varyans-kovaryans matrisinin özvektörleri tarafından tanımlanan bu koordinat sistemine yerel koordinat sistemi denir. Elipsoide ait yarı eksen uzunlukları ise varyans-kovaryans matrisin köşegenlerinin yani özdeğerlerinin karekökleri ile elde edilir. Elipsoidin belirlenmesi için varyans-kovaryans matrisin özdeğerlerinin ve özvektörlerinin hesaplanması gerekmektedir. Varyans-kovaryans matrisin özdeğerleri λ_1 , λ_2 ve λ_3 'tür. Özdeğerler boyutlarına göre sıralanırlar ve adlandırılırlar.

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq 0 \quad (4.17)$$

λ_1 , λ_2 ve λ_3 'e karşılık gelen özvektörler de sırasıyla e_1 , e_2 ve e_3 'tür ve özvektörlerin normalize edildiği varsayılmaktadır.

$$\|e_1\| = \|e_2\| = \|e_3\| = 1. \quad (4.18)$$

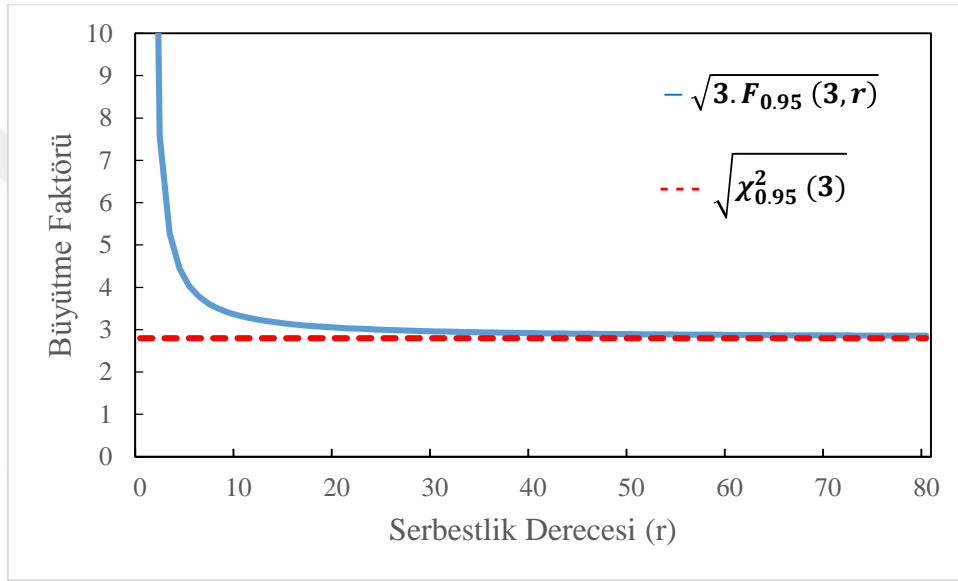
Elipsoidin hacmi, $1 - \alpha$ (Vanicek and Krakiwsky, 1992), güven düzeyine eşittir. Eşitlik (4.15)'teki k^2 değişmesi durumunda hacim ve güven seviyesi değişir. Eğer $k^2 = 1$ olması durumunda elipsoide standart güven elipsoidi denir. Elipsoidin güven seviyesi $1 - \alpha = \%19.1$ 'dir. Yani sonsuz sayıda noktanın $\%19.1$ 'i elipsoidin içinde kalır. Eşitlik (4.15)'in sol tarafına F dağılıma göre bakılırsa, 3 ve r serbestlik derecesine sahip olur. r, noktanın serbestlik derecesidir. Güven elipsoidi ayrı bir güven düzeyi ifade edecek ise elipsoit eksenlerinin k ile çarpılması gerekmektedir (Cederholm, 2003).

$$k = \sqrt{3F_{1-\alpha}(3, r)}. \quad (4.19)$$

Elde edilen konum ve varyans-kovaryans matrisinde r serbestlik derecesi genelde bilinmediği için χ dağılımı da kullanılabilir.

$$k = \sqrt{\chi_{1-\alpha}^2(3)}. \quad (4.20)$$

Serbestlik derecesinin büyük olması durumunda $X_{1-\alpha}^2(3) = 3F_{1-\alpha}(3, r)$ hemen hemen eşit sayılırlar. Eğer eşitlik (4.20) kullanılacaksa noktanın ölçümü, serbestlik derecesinin mantıklı değer alacağı biçimde tasarlanmalıdır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1 F dağılımı ve X dağılımı ile hesaplanan güven elipsoidinin büyütme faktörüdür. %95 güven seviyesi için geçerlidir (Cederholm, 2003).

$1 - \alpha$ güven düzeyinde olan eksen uzunlukları a , b ve c olarak verilmiştir. Sırasıyla büyük yarı, orta yarı ve küçük yarı eksen uzunluklarıdır.

$$\begin{aligned} a &= k\sqrt{\lambda_1}, \\ b &= k\sqrt{\lambda_2}, \\ c &= k\sqrt{\lambda_3}. \end{aligned} \quad (4.21)$$

burada k , eşitlik (4.19) ya da eşitlik (4.20)'den hesaplanır. Elipsoit elde edilen verilerle, e_1 , e_2 ve e_3 ile uzaydaki yönü, a , b ve c ile ise şekli ve boyutu belirlenir.

4.3. Küresel ve Yerel Koordinat Sistemleri Arasında Dönüşüm

Güven elipsoidinin bilgisayarda 3D çizimi için küresel ve yerel koordinat sistemleri arasındaki dönüşüme ihtiyaç vardır.

Yerel sistemde eksenler özvektörler olan e_1 , e_2 ve e_3 ile tanımlanmaktadır. Matematiksel olarak özvektörler çift haldeki iç çarpımları sıfırdır ve her vektörün kendi iç çarpımı 1'dir. Bu durum ortonormal temel oluşturmaktadır (Shuster, 1993).

$$\begin{aligned} e_1 \cdot e_2 &= e_1 \cdot e_3 = e_2 \cdot e_3 = 0, \\ e_1 \cdot e_1 &= e_2 \cdot e_2 = e_3 \cdot e_3 = 1. \end{aligned} \quad (4.22)$$

Özvektörler, yan yana sırasıyla gelerek ortogonal E matrisini oluşturur.

$$E = [e_1 \quad e_2 \quad e_3]. \quad (4.23)$$

Yerel sistemde, i_1, i_2, i_3 vektörleriyle eksen yönleri tanımlanır. Bu vektörler de ortonormal temel oluşturmaktadır. I, ortogonal matrisi de i_1, i_2, i_3 sırasıyla sütun halinde yan yana birleşerek birim matrisi oluşur.

$$i_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, i_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, i_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4.24)$$

$$I = [i_1 \quad i_2 \quad i_3]. \quad (4.25)$$

Küresel ve yerel koordinat sistemi arasında dönüşüm için gerekli olan 3 x 3'lük ortogonal dönme matrisi olan R hesaplanır (Mortenson, 1985; Shuster, 1993).

$$R = E^{-1} \cdot I. \quad (4.26)$$

I matrisi birim matris olduğu için ve E matrisi ortogonal olduğundan dolayı eşitlik (4.26) indirgenir ve aşağıdaki hali alır:

$$R = E^T. \quad (4.27)$$

Herhangi 3 x 3'lük bir dönme matrisi olan R 'nin karakteristik özellikleri vardır. R dönme matrisi normalize edilmiştir ve satır ya da sütun elemanlarının kareleri toplamı 1'e eşittir. R matrisi ortogondur ve değinildiği gibi bir satır veya sütun çiftinin iç çarpımı 0'dır. R matrisinin satırları, yerel koordinat sisteminin (döndürülen uzay) eksenleri boyunca birim vektörlerin, küresel koordinat sistemini (orijinal uzay) temsil eder. R matrisinin sütunları ise küresel koordinat sisteminin (orijinal uzay) eksenleri boyunca birim vektörlerin, yerel koordinat sistemini (döndürülen uzay) temsil eder. Son olarak da R matrisinin determinanı +1 'dir (Cederholm, 2003).

Küresel koordinat sisteminde ölçülen \hat{x} noktası, yerel koordinat sistemine dönüştürülebilir.

$$\begin{aligned} \hat{u} &= R \cdot \hat{x}, \\ \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} &= R \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (4.28)$$

bu eşitlikte $\hat{u} = [u \ v \ w]^T$, yerel koordinat sistemine ait üç boyutlu koordinattır. Ters dönüşüm ile aşağıda ki eşitlik elde edilir.

$$\begin{aligned} \hat{x} &= R^T \cdot \hat{u}, \\ \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} &= R^T \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (4.29)$$

Küresel ve yerel koordinat sistemi arasında ki dönüşümün doğruluğunu yine bu dönüşümde kullanılan dönme matrisinin doğruluğuyla ilişkilidir. Yerel koordinat sisteminde varyans-kovaryans matrisi köşegen matristir (Cederholm, 2003). Eşitlik (4.28)'in hata yayılımına göre hesaplanır.

$$\Sigma_{\hat{u}} = R \Sigma_{\hat{x}} R^T = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

Yerel koordinat sistemin de güven elipsoidine ait eşitlikler aşağıdaki gibidir;

$$k^2 = [u \ v \ w] \Sigma_{\hat{u}}^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = [u \ v \ w] \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} =$$

$$[u \ v \ w] \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\lambda_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\lambda_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\lambda_3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \frac{u^2}{\lambda_1} + \frac{v^2}{\lambda_2} + \frac{w^2}{\lambda_3} \quad (4.31)$$

4.4. Deformasyon Analizi

Noktanın iki periyotta ölçümü yapılır ve \hat{x}_1, \hat{x}_2 koordinatları elde edilir. Bu iki periyot arasında ki hareket:

$$\Delta \hat{x} = \hat{x}_2 - \hat{x}_1 = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}. \quad (4.32)$$

Her iki noktaya ait varyans-kovaryans matrisleri toplam şeklinde hesaplanır. $\Delta \hat{x}$ deformasyon vektörüne ait varyans-kovaryans matrisi eşitlik (4.33)'e göre hesaplanır. Her iki periyotta da yapılan ölçümlerin korelasyonsuz olduğu varsayımına göre yapılır.

$$\Sigma_{\Delta \hat{x}} = \Sigma_{\hat{x}_2} + \Sigma_{\hat{x}_1}. \quad (4.33)$$

$\Delta \hat{x}$ deformasyon vektörü, elipsoidin orijinine çevrilir. Deformasyon vektörü güven elipsoidinin dışına çıkarsa, nokta iki periyot arasında önemli düzeyde hareket etmiştir. Deformasyon vektörünün güven elipsoidini geçip geçmediği eşitlik (4.34) ile hesaplanabilir.

$$\Delta \hat{x}^T \Sigma_{\Delta \hat{x}}^{-1} \Delta \hat{x} = k^2. \quad (4.34)$$

Eşitlik (4.34) 'te test büyüklüğü tablo değerinden büyükse, nokta önemli ölçüde hareket vardır. Eşitlik (4.34) 'te tablo değeri, eşitlik (4.19) ya da eşitlik (4.20) ile hesaplanır. Deformasyon analizi, eşitlik (4.31) - (4.34) formülleri kullanılarak yerel koordinat sisteminde de yapılabilir. Hangi koordinat sistemi kullanılırsa kullanılsın analizin sonucu aynıdır.

GNSS ile nokta ölçümü yapılması durumunda, deformasyon vektörü WGS84 'e göre ifade edilir. Ancak, WGS84 'e ait koordinat eksenlerinin ve deformasyon vektörünün dünya yüzeyinde nasıl yönlendirildiğini hayal etmek kolay değildir. Bunun yanı sıra deformasyon analizinin kolay yorumlanması için toposentrik koordinat sistemi tercih edilebilir. Bunun için deformasyon vektörünün toposentrik koordinat sistemine dönüştürülmesi gerekmektedir (Cederholm, 2003).

$$\Delta \hat{x}_{Topo} = F \cdot \Delta \hat{x} = \begin{bmatrix} \Delta e \\ \Delta n \\ \Delta u \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

eşitlikte bulunan $\Delta \hat{x}_{Topo}$, toposentrik koordinat sisteminde deformasyon vektörünü ifade eder. F ise dönme matrisidir.

$$F = \begin{bmatrix} -\sin(\lambda) & \cos(\lambda) & 0 \\ -\sin(\varphi) \cos(\lambda) & -\sin(\varphi) \sin(\lambda) & \cos(\varphi) \\ \cos(\varphi) \cos(\lambda) & \cos(\varphi) \sin(\lambda) & \sin(\varphi) \end{bmatrix}. \quad (4.36)$$

Yerel toposentrik koordinat sisteminin eksenleri e, n ve u sırasıyla doğuya, kuzeye ve yukarıya doğru olan yönleri ifade eder. φ ve λ ise sırasıyla WGS84 'teki enlem ve boylamı ifade etmektedir.

Deformasyon vektörünün varyans-kovaryans matrisi, hata yayılımı ile belirlenir.

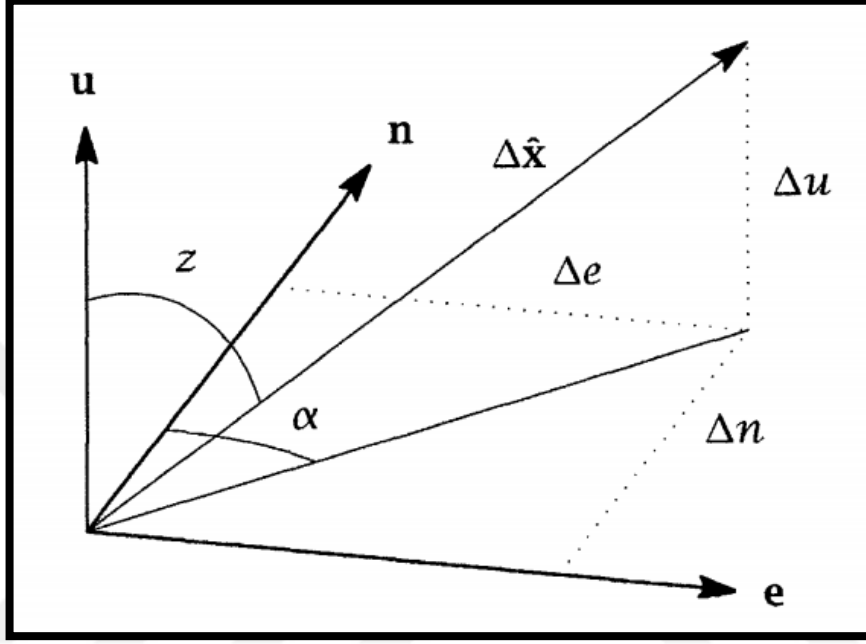
$$\Sigma_{\Delta \hat{x}-Topo} = F \cdot \Sigma_{\Delta \hat{x}} F^T. \quad (4.37)$$

Deformasyon analizi artık yerel toposentrik sistemde açıklanabilir. Bunun için eşitlik (4.34) - (4.39) formülleri kullanılır.

$$\Delta \hat{x}_{Topo}^T \cdot \Sigma_{\Delta \hat{x}-Topo}^{-1} \Delta \hat{x}_{Topo} = k^2 \quad (4.38)$$

Deformasyon vektörünün yorumlanması, yerel toposentrik koordinat sisteminde daha kolaydır (Şekil 5.2). Bunu sağlayan etkenler vektörün boyunun, azimut ve zenit açılarının hesaplanabilir olmasıdır.

$$\begin{aligned}
\alpha &= \tan^{-1} \left(\frac{\Delta e}{\Delta n} \right), \\
S_1 &= \sqrt{\Delta e^2 + \Delta n^2}, \\
S_2 &= \sqrt{\Delta e^2 + \Delta n^2 + \Delta u^2}, \\
z &= \sin^{-1} \left(\frac{S_1}{S_2} \right).
\end{aligned}
\tag{4.39}$$



Şekil 5.2 Yerel toposentrik koordinat sistemi (Cederholm, 2003).

Yerel ya da küresel hangi koordinat sistemi verisi kullanılırsa kullanılsın deformasyon analizi sonucu değişmemektedir.

5. UYGULAMA

Uygulama alanı olarak daha önceden farklı amaçlar için tesis edilen ve her biri pilye şeklinde olan 7 noktalı bir mikrojeodezik ağ oluşturulmuştur. Bu noktalardan merkez konumda olan bir nokta obje noktası, diğer noktalar ise referans noktası olarak alınmıştır. Obje noktasının referans noktasına olan uzaklığı 97 m – 1116 m arasında değişmektedir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Tasarlanan mikro jeodezik ağ

Obje noktası üzerine sanal deformasyon vermeye yarayan bir düzenek yerleştirilmiş ve GNSS alıcılarından birisi bu düzenek üzerine konumlandırılmıştır. İmal edilen düzenek sıcak, soğuk ve genişmeden en az düzeyde etkilenmesi için pirinç malzemeden yapılmıştır ve 4 kg ağırlığı taşıyabilmektedir. Bu düzenek ile 1 cm aralıklarda yatay ve düşey yönde sanal deformasyonlar meydana getirilebilmektedir (Şekil 5.2). Düzenegin alt kısmında, üçgen tabla üzerinde birbirine dik şekilde yerleştirilmiş iki adet silindirik düzeç ile GNSS alıcısının tam anlamıyla düşeylenmesi sağlanmaktadır (Gündüz, 2019).



Şekil 5.2. Ölçüde kullanılan düzenek (Bilgen, 2022)

Referans noktalarında 4'er saat, obje noktası üzerine yerleştirilen düzeneğin 0 cm ve 3.cm'lik bölümünde 2'şer saat statik yöntemle eş zamanlı olarak GNSS verisi toplanmıştır. Başka bir deyişle, düzenek üzerinde 3 cm' lik sanal deformasyon verilmiştir. 0 ve 3 cm' lik bölümler için toplanan GNSS verileri Bernese v5.2 ve Leica Geo Office (LGO) v8.2 yazılımları ile değerlendirilmiş, her iki periyot için obje noktasına ait koordinatlar ve koordinatların varyans-kovaryans matrisleri elde edilmiştir.

Değerlendirme kullanılan Bernese v5.2 GNSS Yazılımı, GNSS bazlı jeodezik ve diğer çalışmalar için birden fazla GNSS verisini çözümleyebilen, yüksek kalite standartları için elverişli ve Bern Üniversitesi Astronomi Enstitüsü (Astronomical Institute of the University of Bern: AIUB) tarafından geliştirilen bilimsel bir yazılım paketidir (Bilgen, 2022).

Bu yazılımın kullanıcıları olarak;

- GNSS ölçmelerinde yüksek doğruluk, güvenilirlik ve verimlilik bekleyenler,
- Bilim insanları,
- Sabit GNSS ağlarının kesintisiz gözlem yapması, çalışması ve bakımından sorumlu kuruluşlar

şeklinde sıralanabilir (Dach ve ark., 2015; Bilgen, 2022).

Yazılımın genel özellikleri ise;

- Unix/Linux, Mac ve Windows işletim sistemlerinde çalışması,
- Tek ve çift frekanslı verilerin aynı kestirim adımında işlenebilmesi,

- GPS, GLONASS ve GPS/GLONASS alıcıları ile elde edilen verileri işleyebilme,
- GPS ve GLONASS verileri için birkaç bin kilometreleri bulan bazlarda faz başlangıç belirsizliklerinin çözebilme,
- Yüksek hassasiyetli jeodezik alıcılar ile kaydedilen tüm temel gözlemler olan kod ve faz gözlemlerinin işlenebilmesi,
- Yakın Yer Uydusu (LEO) verilerine dayalı kinematik ve indirgenmiş-dinamik hassas uydu yörünge belirleme,
- Farklı troposfer haritalama işlevleri (VMF1, GMF/GPT) sayesinde troposfer gradyent parametrelerinin kestirimini yapabilme,
- Bernese ile birlikte farklı BPE'lerin (BPE: Bernese Processing Engine) kullanıma hazır olması Hassas Nokta Konumlama (PPP: Precise Point Positioning), ikili farklar tekniğiyle ağ işleme (RINEX-to-SINEX), saat belirleme, LEO yörünge belirleme ve SLR yörünge doğrulaması,
- Farklı alıcı ve anten tiplerine uyum sağlayabilme,
- Modern troposfer modellerini sunabilme (VMF1, GMF/GPT),
- İkinci ve üçüncü derece iyonosfer modellemesi yapabilme,
- İyonosfer ve troposferin izlenmesi

şeklinde sıralanabilir (Dach ve ark., 2015; Bilgen, 2022).

GNSS değerlendirme yazılımı olan Bernese Bilimsel yazılımı diğerlerine göre “proje” yerine, “kampanya” terimi kullanılmaktadır. Yazılım da iki tür dosya grubu bulunmaktadır. İlk grup, ölçülerin değerlendirilmesi aşamasında yazılımın gerek duyduğu genel dosyalardan oluşmaktadır. İkinci gruba bakıldığında işlenen verinin zaman dilimine ait hassas yörünge, saat düzeltme ve atmosferik düzeltme dosyaları gibi çözümde kullanılacak dosyalardan oluştuğu görülmektedir.

İlk gruptaki dosyaların büyük bir kısmı yazılımın kurulmasıyla yüklenmektedir bu yüzden güncelleme gerektirmemektedir. Ancak, gruptaki bazı dosyalar yazılım geliştiricileri tarafından zaman zaman güncellenmektedir. Bu dosyalar, uydulara ait hataların yer aldığı CRX uzantılı dosyalar, anten faz merkezi kayıklıklarının olduğu dosyalar, alıcı tiplerini bulunduran “receiver” ve uydu yörüngelerine ait bilgileri içeren “satellite” dosyalardır. Bundan dolayı kullanıcılar en güncel sürümleri kullanabilmesi için güncellemeleri sık sık takip etmelidirler.

İkinci gruptaki dosyalar ise verilerin işlenmesi esnasında kullanılacak olan ve her çözümlene için düzenlenmesi gereken dosyalardır. Farklı kaynaklardan, kurum veya kuruluşlardan elde edilebilen bu dosyalar, başlanılan projede aynı kaynaktan indirilen veriler ile proje sonlandırılmalıdır.

Bernese yazılımında temel anlamda kullanılan 4 adet klasör bulunmaktadır. CAMPAIGN52 klasörü, GNSS ölçülerinin çözümlerini içeren dosyaların bulunduğu dizindir. DATAPOOL klasörü, BPE'nin çalışarak verilerin işlenmesi için gerekli olan tüm dosyaların yüklendiği dizindir. SAVEDISK klasörü, verilerin işlenip çözümlendikten sonra elde edilen ve kullanıcıya daha sonrası için yarar sağlayacak özet sonuç dosyalarının depolandığı dizindir. GPSUSER klasörü ise, yazılımın genel parametrelerinin bulunduğu ve belirli zaman aralıklarında güncellenmesi gereken dosyaların bulunduğu dizindir (Bilgen, 2022).

Değerlendirmede kullanılan bir diğer yazılım olan LGO yazılımı ise, Leica Geosystems firmasına ait GNSS, total station ve nivo ölçülerinin ofis ortamında değerlendirilmesi için kullanılan bir yazılımdır. Yazılım hem Leica modeli GNSS alıcılarına ait ham verileri hem de RINEX verilerini okuyabilmektedir. Ayrıca yazılım GPS ve GLONASS gözlemlerini değerlendirebilmektedir.

Yazılımda baz çözümleri yapılabilir ve değerlendirme parametreleri ayarlanabilmektedir. Antenlere dair kalibrasyon bilgileri baz çözümleri öncesinde projeye elle girilebilir veya dosyadan da aktarılabilir. Değerlendirme aşamasında kullanılacak iyonosfer ve troposfer modelleri seçilebilmektedir. Kullanıcıya sunulan iyonosfer modelleri; computed, klobuchar, standart ve global/regional modellerdir. Troposfer modelleri ise hopfield, simplified hopfield, saastamoinen, essen and froome ve computed modellerdir.

Baz çözümleri anten kalibrasyon bilgileri ve değerlendirme parametreleri ayarlandıktan sonra yapılmaktadır. Baz çözümlerinden sonra oluşan kapalı lupların kapanma hataları kullanıcı isteğine göre manuel veya otomatik şekilde hesaplanabilmektedir. Hatalar incelenerek lupları oluşturan kenarlarda kaba hatanın varlığı saptanabilmektedir (Bilgen, 2017).

LGO yazılımıyla benzerlik dönüşümü, serbest ve dayalı dengeleme de yapılabilmektedir. Lup kapanma hatalarının irdelenmesinden sonra minimum zorlamalı veya serbest dengeleme gerçekleştirilebilmektedir. Lup kapanma hatalarının hesabından sonra gözden kaçan kaba hatalar var ise minimum zorlamalı dengeleme sonucunda hesaplanan düzeltmelerin incelenmesiyle ortaya çıkarılabilmektedir (Bilgen, 2017).

Dayalı dengeleme öncesinde dayanak noktası olarak kullanılacak noktaların ölçü epoğuna kaydırılmış koordinatları ile serbest veya minimum zorlamalı dengeleme sonucu bulunan koordinatları arasında yazılım vasıtasıyla iki boyutlu (2D) ya da üç boyutlu (3D) benzerlik dönüşümü yapılabilmektedir. Ayrıca ölçek uyuşumu bir matematik istatistik yöntemiyle test edilebilmektedir. İstatistik test sonucunda ölçek faktörü (scale factor) değerinin 3 ppm'den küçük olması şarttır. Projedeki dayalı dengeleme ile elde edilen noktaların sonuç koordinatları, WGS-84 sisteminde ve kullanıcının yazılıma tanımladığı çalışma bölgesine ait projeksiyon ve koordinat sistemini istenilen projeksiyonda “.csv” uzantılı excel dosyası veya “.txt” uzantılı metin dosyası şeklinde dışa aktarılabilir (Bilgen, 2017).

Bernese v5.2 Bilimsel GNSS ve LGO v8.2 yazılımları ile elde edilen koordinat ve bu koordinatların varyans-kovaryans matrisleri giriş verisi olarak kullanılmış ve Matlab R2021a'da hazırlanan program yardımıyla Güven Elipsoitleri Yöntemi ile deformasyon analizi gerçekleştirilmiştir.

Matlab R2021a'da hazırlanan programın kullanılmasında aşağıdaki sıra izlenir.

Öncelikle programın kayıt edileceği ve istenilen verilerin çekileceği “Yuksek_Lisans_Matlab” adında bir dosya bilgisayarın C dizinde oluşturuldu. Dosya içerisinde programda kullanılacak verilerin olduğu “.xlsx” uzantılı bir Excel dosyası, kodların olduğu MATLAB programına ait “.m” uzantılı fonksiyon dosyası ve program çalıştırıldıktan sonra işlem sonuçlarının yazıldığı Not defteri olan “.txt” uzantılı bir dosya bulunacaktır.

Excel dosyasında işlemlerin gerçekleştirilmesi için gerekli olan veriler; koordinatlar, varyans-kovaryans matrisler ve coğrafi koordinatlar bulunmaktadır (Şekil 5.3). Öncelikle bu veriler excel çalışma sayfasına manuel olarak aktarılmaktadır. Excel'in 1. sayfasında 1. (X1, Y1, Z1) ve 2. (X2, Y2, Z2) periyota ait dengelenmiş koordinatlar, 2. sayfasında 1. (X1) ve 2. (X2) periyota ait dengelenmiş kovaryans matrisler ve 3. sayfasında ise küresel ve yerel koordinat sistemleri arasında dönüşüm yapılabilmesi için gerekli olan coğrafi koordinatlar yer almaktadır. Coğrafi koordinatlar sayfaya ondalık olacak biçimde kayıt edilmelidir. Excelde sayfa isimleri daha anlaşılır olması açısından 1. sayfa adı “Koord”, 2. sayfa adı “Kovaryans” ve 3. sayfa adı “Enlem_Boylam” şeklinde belirlenmiştir. Şekil 5.3'de “Koord” sayfası üzerinde “Kovaryans” ve “Enlem_Boylam” sayfası eklenerek gösterilmektedir.

	A	B
1	x1	4243567.010
2	y1	2704027.398
3	z1	3908127.158
4	x2	4243566.994
5	y2	2704027.386
6	z2	3908127.183

	A	B	C	D
1		0.00000226	0.00000103	0.00000144
2	X1	0.00000103	0.00000093	0.00000074
3		0.00000144	0.00000074	0.00000224
4		0.00000320	0.00000168	0.00000204
5	X2	0.00000168	0.00000201	0.00000108
6		0.00000204	0.00000108	0.00000300

	A	B
1	Coğrafi Koordinat	
2	$\varphi =$	38.02220
3	$\lambda =$	32.50554

Şekil 5.3. Programda kullanılacak verilerin excel dosyası

Öncelikle program açılır ve kod yazımı için ekranda “New Script” başlığına tıklanır ve sayfa açılır. Açılan boş sayfa deformasyon analizi için gerekli olan tüm kodların yazılacağı penceredir (Şekil 5.4). Bu kısım C:\YukseK_Lisans_Matlab konumuna “Uc_Boyutlu_Deformasyon_Analizi” adıyla kaydı sağlanır. Bundan sonraki her kayıt bu isim altında yapılmış olur.

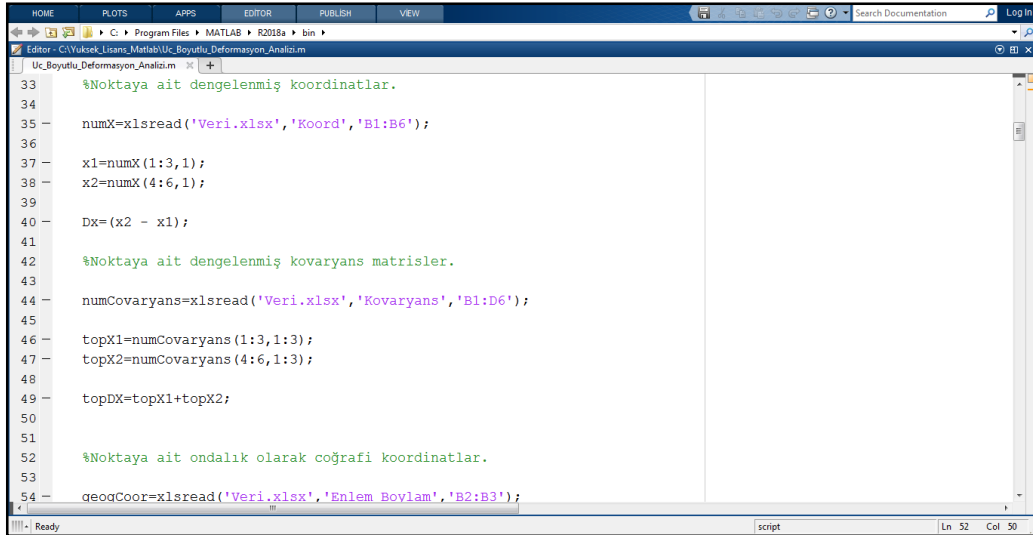
```

4 - diary Sonuclar.txt % Sonuçların yazdırıldığı .txt dosyası
5
6 - disp(' ')
7 - disp(' ')
8 - disp(' ')
9 - disp(' *****');
10 - disp(' * * * * *');
11 - disp(' * * * * *');
12 - disp(' *   Güven Elipsoidleri ile Deformasyon Analizi   *');
13 - disp(' * * * * *');
14 - disp(' * * * * *');
15 - disp(' *****');
16 - disp(' ::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::');
17 - disp(':::İlk Olusturma Tarihi   : 23/01/2022   ::');
18 - disp(':::Son Güncelleme Tarihi   : 29/09/2022   ::');
19 - disp(':::Yazılım                 : MATLAB R2021a M-File   ::');
20 - disp(':::Algoritma               : Bağıl Güven Elipsoidleri yöntemi ile   ::');
21 - disp(':::Kodlari Yazan           : Kemal Can DEMİRCİ   ::');
22 - disp(':::ADRES                   : KTUN/LEE/Harita Müh. Böl./Ölçme Tekniği ABD   ::');
23 - disp(':::e-mail                  : kmlcndmrci@gmail.com   ::');
24 - disp(' ::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::');
25 - disp(' ');

```

Şekil 5.4. Kodların yazıldığı pencere

Açılan pencere ile kod yazımına başlandı. Öncelikle dengelenmiş veriler ve coğrafi koordinatlar programa çekildi. Daha sonra dengelenmiş veriler hesaplanan deformasyon vektörü ve kovaryans matrisinin hesabı için gerekli kodlar yazıldı (Şekil 5.5).



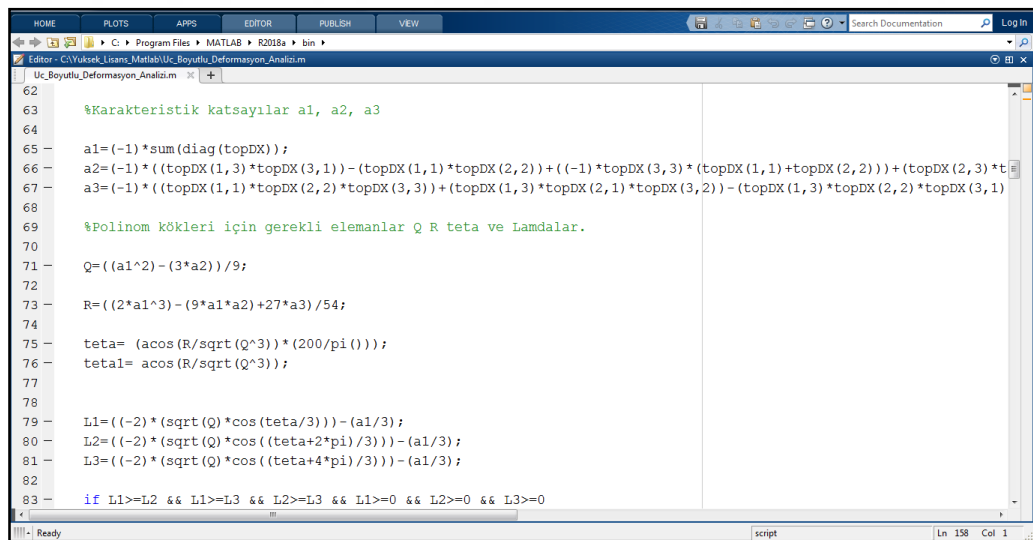
```

33 %Noktaya ait dengelenmiş koordinatlar.
34
35 numX=xlsread('Veri.xlsx','Koord','B1:B6');
36
37 x1=numX(1:3,1);
38 x2=numX(4:6,1);
39
40 DX=(x2 - x1);
41
42 %Noktaya ait dengelenmiş kovaryans matrisler.
43
44 numCovaryans=xlsread('Veri.xlsx','Kovaryans','B1:D6');
45
46 topX1=numCovaryans(1:3,1:3);
47 topX2=numCovaryans(4:6,1:3);
48
49 topDX=topX1+topX2;
50
51
52 %Noktaya ait ondalık olarak coğrafi koordinatlar.
53
54 deoqCoor=xlsread('Veri.xlsx','Enlem Boylam','B2:B3');

```

Şekil 5.5. Verilerin çekilmesi ve deformasyon vektörü ile kovaryans matrisinin hesabı

Kovaryans matrisinin karakteristik katsayıları olan a_1, a_2 ve a_3 hesaplatıldı ve bunlarla bağlantılı olarak özdeğerlerin (e_1, e_2, e_3) elde edilebilmesi için önce Q, R ve θ ile ara işlemler ve akabinde özdeğerlerin ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) hesabı için gerekli olan kodlar yazıldı. Hesaplamaların ve özdeğerlerin doğruluğunun kontrolü için $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq 0$ kuralına uygun kontrol kodu yazıldı (Şekil 5.6).



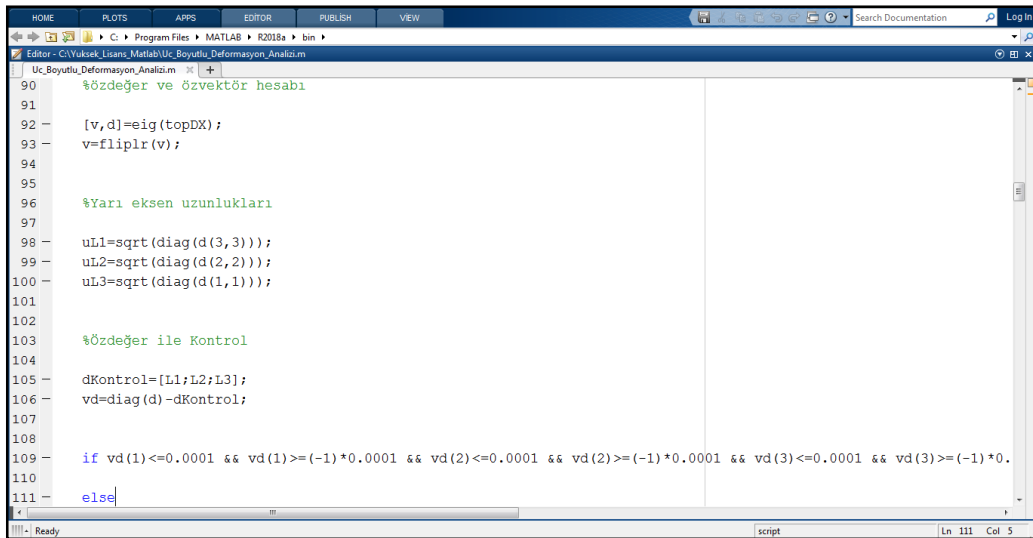
```

62
63 %Karakteristik katsayılar a1, a2, a3
64
65 a1=(-1)*sum(diag(topDX));
66 a2=(-1)*((topDX(1,3)*topDX(3,1))-(topDX(1,1)*topDX(2,2))+((-1)*topDX(3,3)*(topDX(1,1)+topDX(2,2)))+(topDX(2,3)*t
67 a3=(-1)*((topDX(1,1)*topDX(2,2)*topDX(3,3))+(topDX(1,3)*topDX(2,1)*topDX(3,2))-(topDX(1,3)*topDX(2,2)*topDX(3,1)
68
69 %Polinom kökleri için gerekli elemanlar Q R teta ve Lamdalar.
70
71 Q=((a1^2)-(3*a2))/9;
72
73 R=((2*a1^3)-(9*a1*a2)+27*a3)/54;
74
75 teta=(acos(R/sqrt(Q^3))*(200/pi()));
76 tetal=acos(R/sqrt(Q^3));
77
78
79 L1=(-2)*(sqrt(Q)*cos(teta/3))-(a1/3);
80 L2=(-2)*(sqrt(Q)*cos((teta+2*pi)/3))-(a1/3);
81 L3=(-2)*(sqrt(Q)*cos((teta+4*pi)/3))-(a1/3);
82
83 if L1>=L2 && L1>=L3 && L2>=L3 && L1>=0 && L2>=0 && L3>=0

```

Şekil 5.6. Karakteristik katsayılar, özdeğerler ve kontrol hesabı

Hesaplamalar ile elde edilebilen özdeğer ve özvektörler aynı zamanda matlaba ait özel kodlar ile de hesaplanabilmektedir. Özdeğerler ile büyük yarı, orta yarı ve küçük yarı eksen uzunluklarının hesabı ve burada hesaplanan özdeğerlerin kontrolü için de gerekli kodlar yazıldı. (Şekil 5.7).



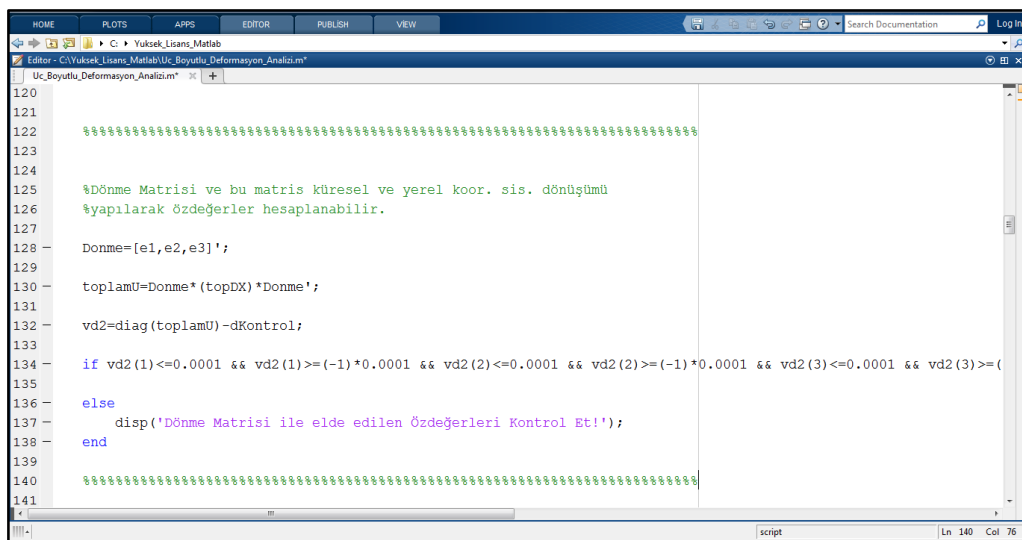
```

90 %Özdeğer ve özvektör hesabı
91
92 [v,d]=eig(topDX);
93 v=flipr(v);
94
95
96 %Yarı eksen uzunlukları
97
98 uL1=sqrt(diag(d(3,3)));
99 uL2=sqrt(diag(d(2,2)));
100 uL3=sqrt(diag(d(1,1)));
101
102
103 %Özdeğer ile Kontrol
104
105 dKontrol=[L1;L2;L3];
106 vd=diag(d)-dKontrol;
107
108
109 if vd(1)<=0.0001 && vd(1)>=(-1)*0.0001 && vd(2)<=0.0001 && vd(2)>=(-1)*0.0001 && vd(3)<=0.0001 && vd(3)>=(-1)*0.
110
111 else

```

Şekil 5.7. Büyük yarı, orta yarı ve küçük yarı eksen uzunluklarının hesabı

Sonrasında yerel koordinat sistemine dönüşüm yapılabilmesi amacıyla Dönme matrisi hesabı için kodlar yazıldı (Şekil 5.8). Dönme matrisi ile elde edilen toplam U matrisinin köşegenleri ile özdeğerlere ulaşıldığından dolayı burada da kontrol hesabı yapıldı. Bu hesaplamalar neticesinde deformasyon analizinin yapılabilmesi için önce test büyüklüğü değerine ulaşılması ve tablo değerinin hangi olasılık derecesinde olduğuna karar verebilmek için kullanıcıdan olasılık değeri sorgulaması yapılan kodlar yazıldı (Şekil 5.9).

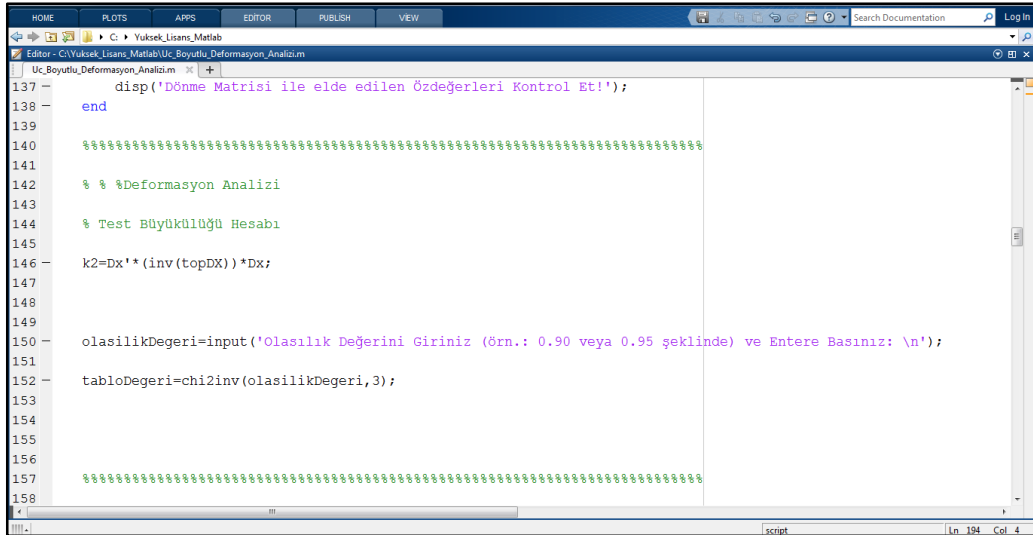


```

120
121
122 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
123
124
125 %Dönme Matrisi ve bu matris küresel ve yerel koor. sis. dönüşümü
126 %yapılarak özdeğerler hesaplanabilir.
127
128 Donme=[e1,e2,e3]';
129
130 toplamU=Donme*(topDX)*Donme';
131
132 vd2=diag(toplamU)-dKontrol;
133
134 if vd2(1)<=0.0001 && vd2(1)>=(-1)*0.0001 && vd2(2)<=0.0001 && vd2(2)>=(-1)*0.0001 && vd2(3)<=0.0001 && vd2(3)>= (
135
136 else
137 disp('Dönme Matrisi ile elde edilen Özdeğerleri Kontrol Et!');
138 end
139
140 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
141

```

Şekil 5.8. Dönme matrisi hesabı



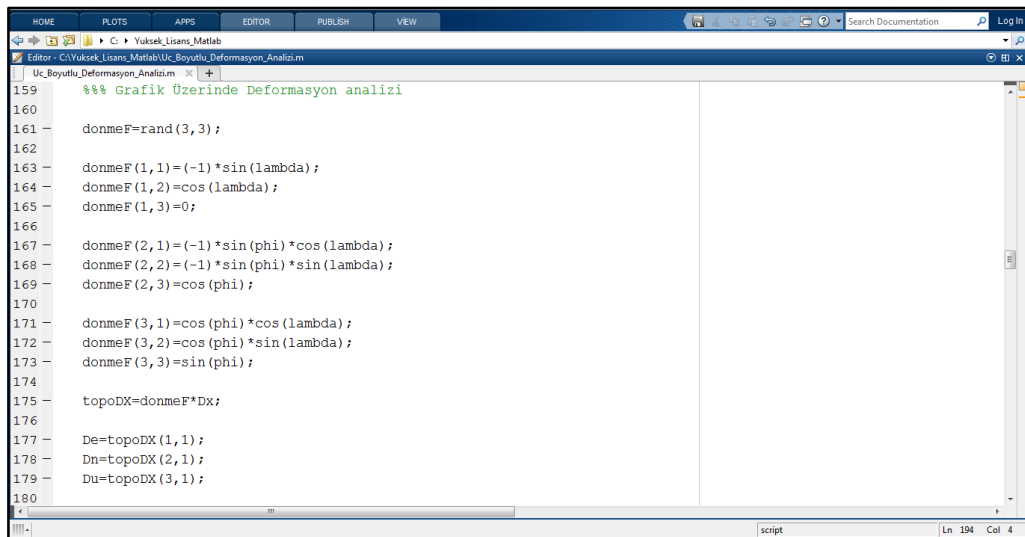
```

137 disp('Dönme Matrisi ile elde edilen Özdeğerleri Kontrol Et!');
138 end
139
140 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
141
142 %% %Deformasyon Analizi
143
144 % Test Büyüklüğü Hesabı
145
146 k2=DX'*(inv(topDX))*DX;
147
148
149
150 olasilikDegeri=input('Olasılık Değerini Giriniz (örn.: 0.90 veya 0.95 şeklinde) ve Entere Basınız: \n');
151
152 tabloDegeri=chi2inv(olasilikDegeri,3);
153
154
155
156
157 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
158

```

Şekil 5.9. Test büyüklüğü, olasılık değeri girişi ve tablo değeri

Güven elipsoidinin ve deformasyon vektörünün çizimi için gerekli verilerin elde edilmesi gerekmektedir. Bunun için öncelikle coğrafi koordinatlar kullanılarak F dönme matrisi, toposentrik deformasyon vektörü ve toposentrik kovaryans matrisinin hesaplanması için kodlar yazıldı (Şekil 5.10). Toposentrik deformasyon vektörünün birinci satırı Δe , ikinci satırı Δn ve üçüncü satırı Δu 'yu temsil etmektedir.



```

159 %%% Grafik Üzerinde Deformasyon analizi
160
161 donmeF=rand(3,3);
162
163 donmeF(1,1)=(-1)*sin(lambda);
164 donmeF(1,2)=cos(lambda);
165 donmeF(1,3)=0;
166
167 donmeF(2,1)=(-1)*sin(phi)*cos(lambda);
168 donmeF(2,2)=(-1)*sin(phi)*sin(lambda);
169 donmeF(2,3)=cos(phi);
170
171 donmeF(3,1)=cos(phi)*cos(lambda);
172 donmeF(3,2)=cos(phi)*sin(lambda);
173 donmeF(3,3)=sin(phi);
174
175 topoDX=donmeF*DX;
176
177 De=topoDX(1,1);
178 Dn=topoDX(2,1);
179 Du=topoDX(3,1);
180

```

Şekil 5.10. Toposentrik F dönme matrisi, toposentrik deformasyon vektörü ve toposentrik kovaryans matrisinin hesaplanması

Toposentrik koordinatların hesaplanması ile bu aşamada test büyüklüğünün hesaplanması ve R dönme matrisi ile hesaplanan test büyüklüğüyle karşılaştırılması için gerekli kodlar yazıldı. Toposentrik deformasyon vektöründen elde edilen Δe , Δn ve Δu

ile çizilecek vektörün; α , z açıları ve S_1 , S_2 uzunluklarının hesabı için gerekli kodlar yazıldı (Şekil 5.11).

```

HOME PLOTS APPS EDITOR PUBLISH VIEW
Editor - C:\Yüksek Lisans_Matlab\Uc_Boyutlu_Deformasyon_Analizim
Uc_Boyutlu_Deformasyon_Analizim
181 %Toposentrik değerler ile test büyüklüğü hesaplanıp kontrolü yapılabilir.
182
183 topoTDX=donmeF*topDX*donmeF';
184
185 k2_2=topoDX*(inv(topoTDX))*topoDX;
186
187 k2Kontrol=k2-k2_2;
188
189 if k2Kontrol<=0.0000001 && k2Kontrol>=-0.0000001
190
191 else
192     disp('Test Büyüklüğünde Hata Var!');
193
194 end
195
196
197 %Vektör boyunun, azimut ve zenit açılarının hesabı.
198
199 alfa=atan(De/Dn);
200 s1=sqrt((De^2)+(Dn^2));
201 s2=sqrt((De^2)+(Dn^2)+(Du^2));
202 zenit=asin(s1/s2);

```

Şekil 5.11. Test büyüklüğü ve deformasyon vektörünün çizim elemanlarının hesabı

Yapılan deformasyon analizi kod yazımlarının ardından işlem sonuçlarının olduğu bir “.txt” formatında “Sonuclar.txt” adında çıktı dosyası olacaktır. Bu amaç için programın ilk satırlarında başlık ve son satırlarında ise çıktı ile ilgili kodlar yazıldı. Sonuç dosyasında analiz için kullanılan dengelenmiş veriler, işlem adımları ve analizin sonuçları yer almaktadır (Şekil 5.12).

Sonuc - Not Defteri	Sonuc - Not Defteri	Sonuc - Not Defteri
Dosya Düzen Biçim Görünüm Yardım	Dosya Düzen Biçim Görünüm Yardım	Dosya Düzen Biçim Görünüm Yardım
<pre> ***** * * Güven Elipsoidleri ile Deformasyon Analizi * ***** ::: İlk Oluşturma Tarihi : 29/01/2022 ::: Son Güncellenme Tarihi : 29/09/2022 ::: Yazılım : Matlab R2022a W-File ::: Algoritma : Bağıl Güven Elipsoidleri yöntemi ile ::: Kodları Yazan : Kemal Can DEMİRCİ ::: Adres : KTÜNİLEZ Harita Müh. Böl. Ölçme Tekniği ABD ::: E-mail : kcalcnderc1@gmail.com ***** *** Noktaya Ait Dengelenmiş koordinatlar *** k1 = 4243367.0102 2704027.3977 3908127.158 k2 = 4243366.9984 2704027.3857 3908127.1833 Dx Değerleri= -0.0158 -0.012 0.0253 *** Noktaya Ait Kovaryans Matrisler *** k1 Kovaryans Matrisi= 1.0e-05 * 0.2260 0.1030 0.1440 0.1030 0.0930 0.0740 0.1440 0.0740 0.2240 k2 Kovaryans Matrisi= 1.0e-05 * 0.3200 0.1680 0.2040 0.1680 0.2010 0.1080 0.2040 0.1080 0.3000 </pre>	<pre> ***** * * Toplam Kovaryans Matrisi= * 1.0e-05 * * 0.5460 0.2710 0.3480 * 0.2710 0.2940 0.1820 * 0.3480 0.1820 0.5240 * *** Karakteristik katsayılar *** a1 Değeri= -1.3640e-05 a2 Değeri= 3.7302e-11 a3 Değeri= -2.6269e-17 Q Değeri= 6.2383e-12 R Değeri= -7.2325e-17 Teta Açısı= 2.8058 *** Özdeğerler *** L1 Değeri= 1.0251e-05 L2 Değeri= 2.2497e-06 L3 Değeri= 1.1391e-06 *** Yarı Büyük, Yarı Orta ve Yarı Küçük Eksen uzunlukları *** Yarı Büyük Eksen uzunluğu= 0.0032 Yarı Orta Eksen uzunluğu= 0.0015 Yarı Küçük Eksen uzunluğu= 0.0011 </pre>	<pre> *** Özvektörler *** e1 = 0.6761 0.4040 0.6162 e2 = 0.3748 0.5315 -0.7596 e3 = 0.6344 -0.7445 -0.2079 *** Rotasyon Matrisi *** R = 0.6761 0.4040 0.6162 0.3748 0.5315 -0.7596 0.6344 -0.7445 -0.2079 Rotasyon Matrisi ile hesaplanan Toplam U Matrisi = 1.0e-04 * 0.1025 0.0000 -0.0000 0.0000 0.0225 -0.0000 -0.0000 -0.0000 0.0114 Bu matris aynı zamanda özdeğerlerin olduğu köşegen matristir. *** Deformasyon Analizi için Tablo ve test büyüklüğü değerleri *** Girilen olasılık Değeri= 0.9500 Test Büyüklüğü= 476.9777 Tablo Değeri= 7.8147 Test Büyüklüğü: 476.98 Tablo Değeri: 7.81 Test Büyüklüğü, Tablo Değerinden büyük olduğu için noktadaki deformasyon anlamlıdır. </pre>

Şekil 5.12. Sonuç dosyasına ait üç ayrı ekran görüntüsü

Çıktı dosyası içerisinde;

- Noktaya ait dengelenmiş koordinat ve varyans-kovaryans matrisler,
- Deformasyon vektörü ve ona ait varyans-kovaryans matrisi,
- Karakteristik katsayılar,
- Özdeğer ve özvektörler,
- Küçük yarı, orta ve büyük eksen uzunlukları,
- R ve F dönme matrisleri,
- Coğrafi koordinatlar,
- Toposentrik değerler,
- Test büyüklüğü ve tablo değeri,
- Noktada meydana gelen deformasyonun anlamlı olup olmadığı

bilgileri yer almaktadır. İşlemler ortalama ~10 saniye sürmektedir.

Hazırlanan programın doğruluğunu test etmek amacıyla, hesaplamalar excel ortamında da yapılmıştır. Değerlendirme sonucunda elde edilen nokta koordinatları ve kovaryans matrisleri aşağıda verilmiştir.

$$\hat{x}_1 = \begin{bmatrix} 4243567.010 \\ 2704027.398 \\ 3908127.158 \end{bmatrix}, \quad \hat{x}_2 = \begin{bmatrix} 4243566.994 \\ 2704027.386 \\ 3908127.183 \end{bmatrix}$$

Periyotlara ait dengelenmiş koordinatları sırasıyla \hat{x}_1 ve \hat{x}_2 'dir.

$$\Sigma_{\hat{x}_1} = \begin{bmatrix} 0.00000226 & 0.00000103 & 0.00000144 \\ 0.00000103 & 0.00000093 & 0.00000074 \\ 0.00000144 & 0.00000074 & 0.00000224 \end{bmatrix},$$

$$\Sigma_{\hat{x}_2} = \begin{bmatrix} 0.00000320 & 0.00000168 & 0.00000204 \\ 0.00000168 & 0.00000201 & 0.00000108 \\ 0.00000204 & 0.00000108 & 0.00000300 \end{bmatrix}$$

Dengeleme sonrası elde edilen 1. periyot için varyans-kovaryans matrisi $\Sigma_{\hat{x}_1}$, 2. periyot için elde edilen varyans-kovaryans matrisi $\Sigma_{\hat{x}_2}$ olarak verilmiştir.

Dengelenmiş koordinatlar ve varyans-kovaryans matrisleri kullanılarak deformasyon vektörü ve varyans-kovaryans matrisi hesaplanır. Deformasyon vektörü eşitlik (4.32) ve varyans-kovaryans matrisi eşitlik (4.33) ile hesaplanmıştır.

Deformasyon vektörü koordinat farklarından, varyans-kovaryans matrisi ise iki noktaya ait varyans-kovaryans matrislerin toplamı ile elde edilir.

$$\Delta \hat{x} = \begin{bmatrix} -0.016 \\ -0.012 \\ 0.025 \end{bmatrix}, \quad \Sigma_{\Delta \hat{x}} = \begin{bmatrix} 0.00000546 & 0.00000271 & 0.00000348 \\ 0.00000271 & 0.00000294 & 0.00000182 \\ 0.00000348 & 0.00000182 & 0.00000524 \end{bmatrix}$$

Hesaplanan deformasyon vektörü $\Delta \hat{x}$, varyans-kovaryans matrisi de $\Sigma_{\Delta \hat{x}}$ 'dir.

Varyans-kovaryans matrisin karakteristik katsayıları olan a_1, a_2 ve a_3 eşitlik (4.7) ile hesaplanmıştır. a_1, a_2 ve a_3 'e ait sonuçlar aşağıda verilmiştir.

$$a_1 = -1.3640 \times 10^{-05} \quad a_2 = 3.7302 \times 10^{-11} \quad a_3 = -2.6269 \times 10^{-17}$$

Elde edilen katsayılar kullanılarak özdeğerler hesaplanır. Ara hesaplamalar Q, R ve θ ile özdeğerler ise $\lambda_{1,2,3}$ ile hesaplanır. Tüm katsayılar eşitlik (4.8) ile hesaplanmıştır. Q, R ve θ 'ya ait değerler,

$$Q = 8.2383 \times 10^{-12} \quad R = -2.2325 \times 10^{-17} \quad \theta = 2.8058$$

Özdeğere ait sonuçlar sırasıyla λ_1, λ_2 ve λ_3 'tür ve sonuçlar $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq 0$ şeklinde olmalıdır. Bu kontrol geliştirilen programda daha bilinçli analiz yapabilmek için yer almaktadır.

$$\lambda_1 = 1.0251 \times 10^{-05} \text{ m} \quad \lambda_2 = 2.2497 \times 10^{-06} \text{ m} \quad \lambda_3 = 1.1391 \times 10^{-06} \text{ m}$$

Hesaplanan özdeğerler ile büyük yarı, orta yarı ve küçük yarı eksen uzunlukları elde edilmektedir. Uzunluklar sırasıyla, $\sqrt{\lambda_1} = 0.0032 \text{ m}$, $\sqrt{\lambda_2} = 0.0015 \text{ m}$, $\sqrt{\lambda_3} = 0.0011 \text{ m}$ olarak hesaplanmıştır.

Daha sonra özvektör hesabı için eşitlik (4.10) ve (4.11) kullanılabilir. e_1 hesaplandıktan sonra e_2 ve e_3 aynı şekilde hesaplanır. e_1, e_2 ve e_3 özvektörleri elde edilir. Ayrıca özdeğer ve özvektörler mühendislik yazılımlarında gerekli kod yazılarak da hesaplanabilir. Aşağıda ki sonuçlar matlab yazılımından tek satır kod ile elde edilmiştir.

$$e_1 = \begin{bmatrix} 0.6761 \\ 0.4040 \\ 0.6162 \end{bmatrix}, \quad e_2 = \begin{bmatrix} 0.3748 \\ 0.5315 \\ -0.7596 \end{bmatrix}, \quad e_3 = \begin{bmatrix} 0.6344 \\ -0.7445 \\ -0.2079 \end{bmatrix}$$

Özvektörler olan, büyük yarı (e_1), orta yarı (e_2) ve küçük yarı (e_3) eksen yönlerini vermektedir.

3D bilgisayar çizimi yapılacak ise küresel ve yerel koordinat sistemindeki dönüşüme ihtiyaç vardır. Bundan dolayı dönme matrisi eşitlik (4.22)'den hesaplanır. Daha sonra özdeğere ait köşegen matrisi hesabı eşitlik (4.30) ile yapılmaktadır.

$R = [e_1 \ e_2 \ e_3]^T$, eşitlikte ki R, dönme matrisidir.

$$R = \begin{bmatrix} 0.6761 & 0.4040 & 0.6162 \\ 0.3748 & 0.5315 & -0.7596 \\ 0.6344 & -0.7445 & -0.2079 \end{bmatrix}$$

Özdeğer matrisinin ($\Sigma_{\hat{u}}$) köşegen matris olduğu görülmektedir. Köşegende ki değerler sırasıyla λ_1, λ_2 ve λ_3 'tür.

$$\Sigma_{\hat{u}} = \begin{bmatrix} 0.00001025 & 0 & 0 \\ 0 & 0.00000225 & 0 \\ 0 & 0 & 0.00000114 \end{bmatrix}$$

Deformasyon analizi yapılması için öncelikle üç boyutlu deformasyon analizi olmasından dolayı serbestlik derecesi 3 alınarak χ^2 tablosundan, olasılık değeri %95 alınır.

$$k_{0,95}^2 = 7.81$$

Daha sonra veriler yardımıyla test büyüklüğü hesaplanmalıdır. Analiz için gerekli olan test büyüklüğü eşitlik (4.34)'ten hesaplanır. Deformasyon vektörü ve varyans-kovaryans matrisi ile hesaplanan test büyüklüğü 476.98 olarak bulunmuştur. Bu iki değer karşılaştırılır. Eğer test büyüklüğü, tablo değerinden büyük olursa deformasyon anlamlıdır denir. Küçük olursa deformasyon anlamlı değildir denir.

Yapılan analiz yorumlandığında %95 olasılıkta noktada deformasyon olduğu gözlemlenmiştir. Diğer bir ifade ile noktada deformasyon anlamlıdır denir.

Deformasyon analizi için güven elipsoidinin bir diğer avantajı ise grafik üzerinde de bu yorumun yapılabilir olmasıdır. Bunun için Kartezyen koordinatlara ek olarak coğrafi koordinatların (φ , λ) olması gerekmektedir.

Sırasıyla enlem (φ) ve boylam (λ) bilgileri aşağıda verilmiştir.

$$\varphi = 38^{\circ}01'19.90969'' \quad \lambda = 32^{\circ}30'19.95004''$$

Coğrafi koordinatlar eşitlik (4.35) ile toposentrik koordinat sistemine dönüştürülür. Bu dönüşüm için önce dönme matrisi olan F matrisi eşitlik (4.36) ile hesaplanır.

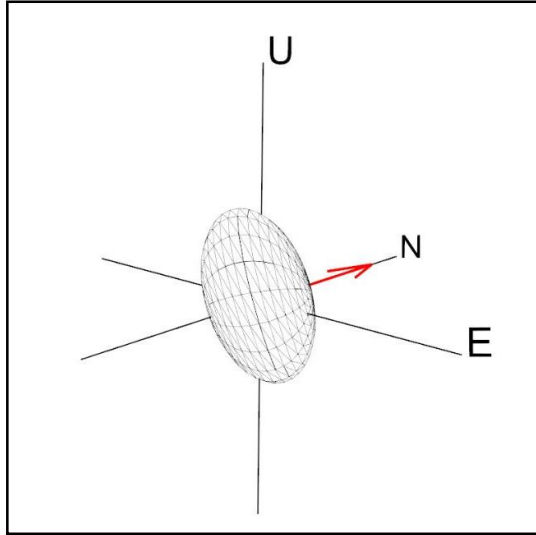
$$F = \begin{bmatrix} -0.5374 & 0.8433 & 0 \\ -0.5195 & -0.3310 & 0.7878 \\ 0.664 & 0.4233 & 0.6160 \end{bmatrix}$$

Dönme matrisi, deformasyon vektörü ve varyans-kovaryans matrisi kullanılarak toposentrik deformasyon vektörü ve toposentrik varyans-kovaryans matrisi hesaplanır. Bulunan bu değerler ile aynı zamanda test büyüklüğü de hesaplanır. Ama asıl amaç vektörün boyunun, azimut (α) ve zenit (z) açılarının belirlenmesidir. Vektör ve açıları elde etmek için eşitlik (4.39) kullanılarak hesaplanır (Cederholm, 2003).

Toposentrik deformasyon vektöründe 1. satır Δe , 2. Satır Δn ve 3. Satır Δu 'yu temsil etmektedir. Eşitlik (4.35) ile hesaplanan bu değerler α , z , S_1 ve S_2 'nin hesaplanmasında kullanılmıştır.

$$\begin{aligned} \Delta e &= -0.0016, & \Delta n &= 0.0321, & \Delta u &= 7.0725 \times 10^{-06} \\ \alpha &= -3.2278^g, & S_1 &= 0.0322 \text{ m} \\ z &= 99.9860^g, & S_2 &= 0.0322 \text{ m} \end{aligned}$$

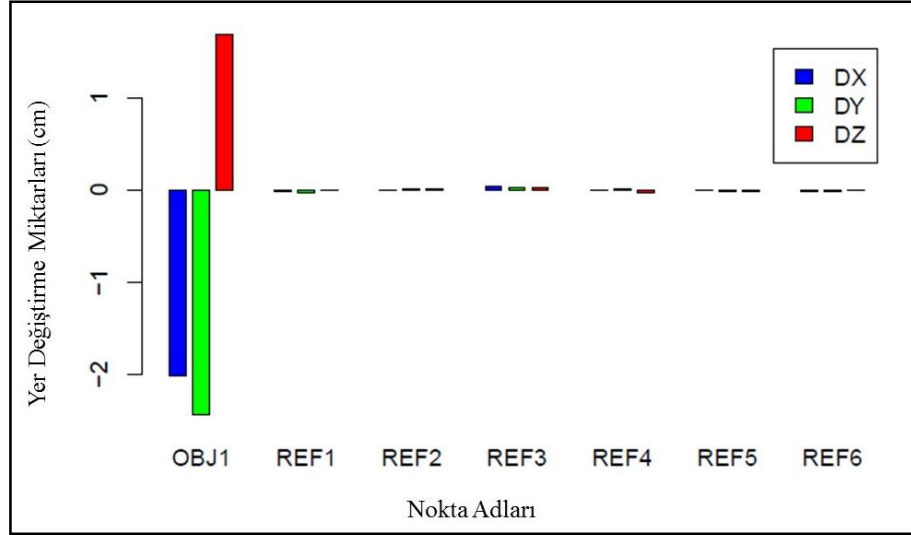
Bu değerler ile toposentrik koordinat sisteminde deformasyon analizinin yorumlanması daha basit olmaktadır. Elde edilen değerler ile çizilmiş olan güven elipsoidi ve deformasyon vektörü incelenerek deformasyon vektörünün güven elipsoidini aştığı görülmüş ve noktada deformasyon olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 5.13).



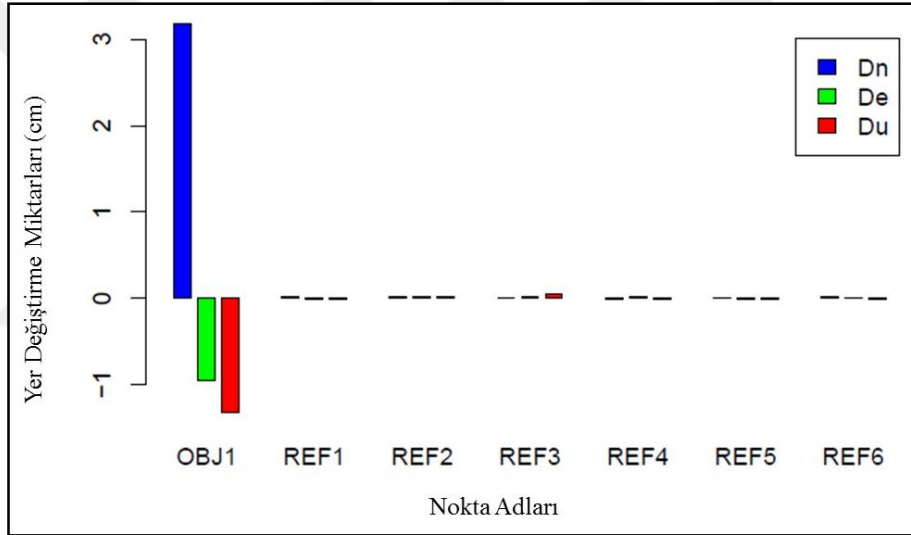
Şekil 5.13. Toposentrik koordinat sisteminde güven elipsoidi ve deformasyon vektörü.

Robust bir yöntem olan İteratif Ağırlıklı Dönüşüm yöntemiyle deformasyon analizi Bilgen (2022) tarafından R programlama dilinde hazırlanan Geodetic Deformation Analysis programı ile yapılmıştır. Bu program Bernese v5.2 Bilimsel GNSS yazılımı ile değerlendirilmiş GNSS verilerinden elde edilen SINEX ve OUT dosyalarının yüklenmesiyle birlikte deformasyon analizini gerçekleştirmektedir. Yazılımın çıktı dosyası incelendiğinde, iterasyon sayısının 3 ve olasılık değerinin %95 olarak belirlenmiştir. Tablo değeri 2.4069 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca bu sonuç çıktısında, obje noktasında meydana gelen deformasyon için yerel jeodezik koordinat sistemine dönüşüm yapılmadan önce ve sonraki yer değiştirme miktarları bulunmaktadır.

Deformasyon analizi sonuçlarına bakıldığında referans noktalarına ait yatayda ve düşeyde ki kayıklık miktarları kritik değeri altında olduğu ve sıfıra yakın değerler olduğu görülmektedir. Ancak obje noktasına bakıldığında test büyüklüğünün 974.2176 olarak hesaplanmıştır. Koordinat dönüşümü öncesindeki değerlerin yatay yönde DX için -20.2417 mm, DY için -24.3500 mm, düşey yönde ise bu değer 16.8883 mm olarak hesaplanmıştır. Dönüşüm sonrası değerler ise $D_n = 31.8791$ mm, $D_e = -9.6578$ mm ve $D_u = -13.3533$ mm şeklindedir. Ayrıca bu sonuçlar grafik olarak da kullanıcıya sunulmaktadır (Şekil 5.14-5.15). Programın çıktı dosyası Ek-1’de verilmiştir.



Şekil 5.14. Kartezyen koordinat eksenleri boyunca nokta yer değiştirmeleri



Şekil 5.15. Toposentrik koordinat eksenleri boyunca nokta yer değiştirmeleri

GNSS oturumları sonucunda elde edilen veriler, LGO yazılımı ile değerlendirildiğinde 3 cm'lik sanal deformasyon 3.21 cm, Bernese v5.2 Bilimsel GNSS yazılımı ile değerlendirildiğinde ise 3.24 cm olarak belirlenmiştir. Her iki yöntemle yapılan analiz sonucunda %95 ihtimalle obje noktasında deformasyon olduğu sonucuna varılmıştır.

6. SONUÇLAR

Jeodezik yöntemlerle deformasyon araştırmasının en önemli bölümü verilerin değerlendirilmesi ve sonuçların yorumu aşamasıdır. Verilerin değerlendirilmesinde yapılabilecek bir hata, yanlış sonuçların ortaya çıkmasına ve sonuçların yanlış yorumlanmasına neden olabilmektedir. Yanlış bir karar verilmesinde doğacak sorumlulukta bazen ödenemeyecek kadar büyük olmaktadır. Bu nedenle, verilerin değerlendirilmesinde çok dikkatli davranmak gerekmektedir. Jeodezik yöntemlerle elde edilen geometrik değişimlerin ilgili başka meslek disiplinleri ile birlikte yorumlanması önem arz etmektedir.

Jeodezik yöntemlerle deformasyon analizinde Ortalama Aykırılıklar Yöntemi (θ^2 Ölçütü), S-transformasyonu, Bağlı Güven Elipsleri, Cholesky Çarpanlarına Ayrılma Yöntemi, Mierlo Yöntemi ve İtiratif Ağırlıklı Dönüşüm Yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin bazıları sadece 2D ağlarda, bazıları ise 1D, 2D ve 3D ağlarda kullanılabilir. Bu çalışmada, GNSS ölçüleri kullanılarak Güven Elipsoitleri Yöntemiyle deformasyon analizi konusu teorik olarak incelenmiş ve çalışma kapsamında yapılan uygulama açıklanmıştır. Güven Elipsoitleri ile Deformasyon Analizinde 2 periyot GNSS verileri toplanır, toplanan verileri herhangi bir GNSS değerlendirme yazılımında değerlendirilerek, incelenecek noktaya ait koordinatlar ve varyans-kovaryans matrisleri elde edilir. Yöntemin nokta bazında kullanılması, yöntemi uygulanabilirlik açısından basit kılmaktadır. Aynı zamanda değerlendirme sonucunda elde edilen veriler ile özdeğer ve özvektörlerin hesaplanması sonucunda deformasyon vektörü belirlenir. Belirlenen özdeğer ve özvektörler ile güven elipsoidinin yönü, şekli ve boyutu hesaplanır. Böylece deformasyonun görsel olarak da yorumlanabilmesi sağlanır. Bu durum, güven elipsoitleri yönteminin diğer yöntemlere göre en büyük avantajı olarak görülmektedir. Çalışma kapsamında, Güven Elipsoitleri yöntemi ile deformasyon analizinde için MATLAB R2021a'da bir program geliştirilmiştir. Bu program sayesinde, statik yöntemle toplanmış ve herhangi bir yazılımda değerlendirilen GNSS ölçülerinden elde edilen koordinatlar ve varyans-kovaryans matrisleri kullanılarak deformasyon analizi gerçekleştirilebilmektedir. Programa veri girişi sağlandıktan sonra kullanılan bilgisayara bağlı olarak ~10 sn gibi bir sürede sonuçlar alınabilmektedir. Programın çalışmasının testi excel ortamında da çözüm yapılarak kontrol edilmiştir.

Güven elipsoidleri yöntemi ile elde edilen analiz sonuçlarının doğruluğu, İteratif Ağırlıklı Dönüşümü ile deformasyon analizi yapılarak da test edilmiştir. Bu yöntemde, deformasyon analizi için jeodezik noktalara ilişkin ön bir bilgiye ihtiyaç yoktur. Bu yöntem, datum belirlemesi sağlarken aynı zamanda GNSS ile deformasyon analizinde kullanışlı ve programlamaya elverişli robust bir yöntemdir.

Yapılan çalışmada Selçuk Üniversitesi kampüs alanında 1 obje ve 6 referans noktasından oluşan bir mikrojeodezik ağ kullanılmıştır. Ağdaki noktaların tamamı pilye şeklindedir. Objeye noktası üzerinde sanal deformasyon verilen her konum için en az 2 saat olmak üzere toplamda min 4 saat statik yöntemle eş zamanlı olarak GNSS verisi toplanmıştır. Toplanan GNSS verileri LGO, Bernese v5.2 Bilimsel GNSS yazılımı ile değerlendirilmiştir. LGO ile değerlendirme sonucunda objeye noktasına ait koordinatlar ve varyans-kovaryans matrisleri yardımıyla güven elipsoidleri yöntemi ile deformasyon analizi hem hazırlanan program ile hem de kontrol amacıyla excel ortamında çözülerek, sanal olarak verilen deformasyonlar ortaya çıkartılmıştır. Bernese v5.2 Bilimsel GNSS yazılımı ile değerlendirilen GNSS verileri sonucunda elde edilen SNX ve OUT çıktıları ile iteratif ağırlıklı dönüşüm yöntemi ile deformasyon analizi de gerçekleştirilmiştir. Güven elipsoidleri ve iteratif ağırlıklı dönüşümü ile elde edilen deformasyon sonuçları birbirleriyle karşılaştırılmıştır. GNSS oturumları sonucunda elde edilen veriler, LGO yazılımı ile değerlendirildiğinde 3 cm'lik sanal deformasyon 3.21 cm, Bernese v5.2 Bilimsel GNSS yazılımı ile değerlendirildiğinde ise 3.24 cm olarak belirlenmiştir. Her iki yöntemle yapılan analiz sonucunda %95 ihtimalle objeye noktasında deformasyon olduğu sonucuna varılmıştır.

Tez çalışması kapsamında hazırlanan program sayesinde deformasyon analizindeki hesap yükü ve zaman kayıpları en aza indirilmiş sonuçlar sayısal ve grafik olarak elde edilmiş ve yorumlanmıştır.

KAYNAKLAR

- Altıntaş, F. and Gökalp, E. 2021. Monitoring surface deformations of the reclamation site using PS interferometry: Senol Gunes sport complex (Turkey), *Geocarto International*, 1-14.
- Amirali, G., Amirali, I., 2018. Nümerik Analiz 1, *Seçkin Yayıncılık 1*, s.1- 495, Ankara.
- Ansari, K., Bae, TS., 2020. Contemporary deformation and strain analysis in South Korea based on long-term (2000–2018) GNSS measurements. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)* 109, 391–405.
- Atasoy V., Öztürk E., 2005, Jeodezik Deformasyon Ölçmeleri ve Sonuçların Yorumu, *Harita ve Kadastro Mühendisliği Dergisi*, 50, (51), 27-40.
- Bak, M., 2014. Jeodezik Çalışmalarla İzmit Körfezi Ve Yakın Çevresi Kabuk Deformasyonlarının Belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Bak, M., ve Çelik, R. N., 2022. Web-NDefA: Açık kaynak kodlu GNSS tabanlı deformasyon analizi platformu. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, 9(2), 166-181.
- Barzaghi, R., Cazzaniga, N. E., De Gaetani, C. I., Pinto, L., and Tornatore, V., 2018. Estimating and comparing dam deformation using classical and GNSS techniques. *Sensors*, 18(3), 756.
- Bilgen, B., 2017. GNSS Tekniği İle Yatay Yöndeki Deformasyonların Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Bilgen, B., 2022. GNSS Ölçüleri İle Deformasyon Analizi Amaçlı Yazılım Geliştirme, *Doktora Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya.
- Bilgen, B., Inal, C., 2022. An open-source software for geodetic deformation analysis in GNSS networks. *Earth Sci Inform* 15, 2051–2062.
- Can, E., 2011. Taşkömür Havzasındaki Artık Ve Aktif Tasman Oluşumlarının Yapılar ve Altyapı Tesisleri Üzerindeki Deformasyon Etkilerinin Belirlenmesi ve Araştırılması, *Doktora Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak.
- Cederholm, P., 2003. Deformation Analysis Using Confidence Ellipsoids, *Survey Review*, 37:287, 31-45.
- Chen, Y. Q., 1983. Analysis of deformation surveys – a generalized method. Technical Report no. 94, Dept. of Surveying Engineering, University of New Brunswick.
- Chen, Y. Q., Chrzanowski, A., Secord, J. M., 1990. A strategy for the Analysis of the Stability of Reference Points in Deformation Surveys, *Cism Journal ACSGS*, 44, (2), 141-149.

- Cooley, W. W. L., P. R., 1971, Multivariate Data Analysis, John Wiley & Sons, p.
- Cooper, M.A.R., 1987. Control Surveys in Civil Engineering. First Edition. *William Collins Sons & Co. Ltd*, London. 381 pages.
- Dach, R., Lutz, S., Walser, P., ve Fridez, P., 2015, Bernese GNSS Software Version 5.2 User Manual, Astronomical Institute, University of Bern.
- Demirci, P., 2012. Yerel, Ulusal Ve Uluslararası Sabit Referans İstasyonlarının Kabuk ve Yapısal Deformasyon Belirleme Amaçlı Tasarlanan Jeodezik Ağlara Entegrasyonu, Ölçme ve Değerlendirme Stratejileri, *Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Doğanalp, S. ve Turgut, B., 2009. Statik Ve Kinematik Modelde Deformasyon Analizi, *Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, C.24, S.2, Konya.
- Erdoğan, B., 2011. Deformasyon Analizi Güvenilirliğinin Farklı Yöntemler İçin Araştırılması, *Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Eren, M., 2014, İki Farklı Yöntemle (Natm-Tbm) İle Açılan Bir Tünelde Düşey Deformasyon/Deplasman'ların Belirlenmesi: M5 Metro Örneği, *Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Erenoğlu, R. C. ve Yüceses, O., 2019. Deformation Analysis by Geomatic and Geotechnical Methods in Highway Tunnels, *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 6.2: 163-171.
- Eyübagil, E. E., 2020. GNSS Ölçüleri İle Tektonik Hareketlerin Modellenmesi: Gülbahçe Fayı Örneği, *Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyonkarahisar.
- Gündüz, A. M., 2019. TUSAGA-Aktif Noktalarının Deformasyon Belirlemede Kullanılabilirliği, *Doktora Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya.
- Gündüz, İ. ve Gökmenoğlu, A., H., 2014. İlsu Barajı ve Hidroelektrik Santrali ÖBKD Baraj Gövdesi Kayadolgu Ölçüm Cihazları Tasarım ve Uygulaması, *T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü DSİ İlsu Projesi 16. Bölge Müdürlüğü*, Mardin.
- İnal, C., 2022. Deformasyon Ölçülerinin Analizi Yüksek Lisans Ders Notları (Basılmamış), *Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Enstitüsü*, Konya.
- İnal, C., 2020. Mühendislik Ölçmeleri Ders Notları (Basılmamış), *Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi*, Konya.
- İnal, C., 2019. Mühendislik Yapılarında Jeodezik Deformasyon Ölçülerinin Analizi, TUJK 2019 Çalıştay, Güncel Jeodezik Uygulamalar, 14-15 Kasım 2019, Konya.

- İnal, C. ve Bülbül, S., 2013. Bağıl Güven Elipsleri Yöntemiyle Deformasyon Analizi: Ermenek Barajı Örneği, *Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c.1, s.3, Konya.
- Johnson, M. E., 1987, *Multivariate Statistical Simulation*, John Wiley & Sons, p.
- Kalkan, Y., 2014. Geodetic deformation monitoring of Ataturk Dam in Turkey, *Arabian journal of geosciences*, 7(1), 397-405.
- Kalkan, Y., Alkan, R. M., Baykal, O., Yanalak, M., Erden, T. ve Yıldırım, H., 2003. Heyelanların Jeodezik ve Geoteknik Yöntemlerle İzlenmesi Ambarlı Liman Bölgesinde Bir Uygulama, *1. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu*, ss.91-105, İstanbul.
- Kalkan, Y. ve Alkan, R. M., 2005. Mühendislik Yapılarında Deformasyon Ölçmeleri, Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, *Mühendislik Ölçmeleri STB Komisyonu, 2. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu*, İTÜ, İstanbul.
- Karabulut, M. F., 2017. Yerkabuğu Deformasyonlarının GNSS Ölçüleri ile Kestirimi, *Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Kazancı, E., Başoğlu, N. ve Bayrak, T., 2014. Statik TUSAGA-Aktif Ölçüleri Yardımı ile Heyelanların İzlenmesi Gümüşhane İmam Hatip Lisesi Heyelan Örneği, *HKMO-Mühendislik Ölçmeleri STB Komisyonu, 7. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, Hitit Üniversitesi, Çorum*.
- Konakoğlu, B., 2021. Deformation analysis using static, kinematic and dynamic geodetic deformation models with GNSS: Deriner Dam, Artvin, Turkey, *Experimental Techniques*, 45(5), 645-660.
- Métivier, L., Collilieux, X., Lercier, D., Altamimi, Z., Beauducel, F., 2014. Global coseismic deformations, GNSS time series analysis, and earthquake scaling laws, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, 9095–9109.
- Mikhail, E. M. ve Ackermann, F., 1976, *Observations and Least Squares*, A Dun-Donnelley p.
- Mortenson, M. E., 1985, *Geometric Modeling*, John Wiley & Sons, p.
- Oktar, O., Erdoğan, H., Poyraz, F., and Tiryakioğlu, İ., 2021. Investigation of deformations with the GNSS and PSInSAR methods, *Arabian Journal of Geosciences*, 14(23), 1-16.
- Shuster, M.D., 1993. A Survey of Attitude Representations. *The Journal of the Astronautical Sciences*, 41(4):439-517.
- Tanyıldızı, E., ve Kaya, K., 2019. Deformasyon Tahmininde Gri Model Uygulaması: Keban Barajı Örneği. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 31(2), 345-352.

- Taşkıran, T. ve Oral, İ., H., 2017. Pamukçay Barajının Ölçülen Deplasman/Boşluksuyu Parametrelerinin Sonlu Eleman Analiz Sonuçlarıyla Karşılaştırılması, 7. *Geoteknik Sempozyumu*, İstanbul.
- Tayfur, D., 2017. Heyelanların Zamansal Olarak İzlenebilmesi İçin Matlab Tabanlı Jeodezik Deformasyon Analizi Yazılımı Geliştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Çanakkale.
- Topçu, Ş., 2019. Özdeğer-Özvektör Problemleri İçin İterasyon Yöntemleri ve Dejenere Olmuş Fredholm İntegral Denklemleri, *Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzincan.
- Turan, S. N., 2012. Periyodik Toplanmış TUSAGA-Aktif Ölçülerinin Deformasyon İzlemede Kullanılabilirliğinin Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Gümüşhane.
- Turan, S. N., Eyo, E. E., Acar, M., ve Bayrak, T., 2012. Periyodik Toplanmış TUSAGA-Aktif Ölçülerinin Deformasyon İzlemede Kullanılabilirliğinin Araştırılması, *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4(2), 19-29.
- Url.1 https://tr.wikipedia.org/wiki/Levha_tektoni%C4%9Fi , [19.05.2021].
- Url.2 <https://www.liverpoolecho.co.uk/news/liverpool-news/gallery/amazing-pictures-taken-down-years-18036493> , [20.05.2021].
- Url.3 <https://dipnots.com/2020/11/14/tacoma-narrows-koprusu-neden-yikildi/> , [20.05.2021].
- Url.4 <https://www.karar.com/izmir-bornovada-heyelan-10-evde-hasar-olustu-bir-ev-tamamen-yikildi-1121496> , [21.05.2021].
- Url.5 <https://www.sistemas.com.tr/haber?h=uzun-baz-olcumlerinde-tm50> , [20.05.2021].
- Vanicek, P. and Krakiwsky, E., 1992. Geodesy: The Concepts. Second Edition, 4th printing. *Elsevier Science Publishers B.V.*, The Netherlands. 697 pages.
- Welsch, W. M. ve Heunecke, O., 2001, Models and Terminology For the Analysis of Geodetic Monitoring Observations-Official Report of the Ad-Hoc Committee of FIG Working Group 6.1-. The 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements. Orange, California, USA.
- Wu, Y., Li, L., Chen, C., Liang, H., Guo, N., Li, Y., 2021. GNSS deformation characteristics of North China in the past two decades, *Geodesy and Geodynamics*, Volume 12, Issue 6, Pages 392-398, 1674-9847.
- Yang, Y., Zheng, Y., Yu, W., Chen, W., Weng, D., 2019. Deformation monitoring using GNSS-R technology, *Advances in Space Research*, Volume 63, Issue 10, Pages 3303-3314, 0273-1177.

- Yang, S., Xu, C., Mi, J., and Gu, S., 2022. "Dynamic Deformation Monitoring of Offshore Oil Platforms with Integrated GNSS and Accelerometer" *Sustainability* 14, no. 17: 10521.
- Yıldırım, U. K. and Şişman, Y., 2019. The deformation analysis using hypothesis tests. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 4(2), 88-93.
- Yılmaz, N. and Demirsoy, N., 2021. Investigation of Vertical Deformation Around Trabzon Tide Gauge Station. *GeoScience Engineering*, 67(2).
- Yüceses, O., 2019. Karayolu Tünellerinde Jeodezik ve Jeoteknik Yöntemlerle Deformasyon Analizi, *Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çanakkale*.
- Zhou, X., Zhang, S., Zhang, Q., Liu, Q., Ma, Z., Wang, T., Tian, J., and Li, X., 2022. "Research of Deformation and Soil Moisture in Loess Landslide Simultaneous Retrieved with Ground-Based GNSS" *Remote Sensing* 14, no. 22: 5687.

EKLER

EK-1 Geodetic Deformation Analysis programıyla elde edilen İteratif Ağırlıklı Dönüşüm İle Deformasyon Analizi sonuç çıktısı

GEODETIC DEFORMATION ANALYSIS REPORT

by DefAn-for-GNSS-networks

09 04 2023

Parameters and Coordinates

Number of stations : 7

Table 1: Coordinates of Epoch on 26-07-2016

	X	Y	Z
OBJ1	4243567.03524	2704027.42702	3908127.18048
REF1	4243518.21021	2703302.03508	3908682.54374
REF2	4242829.71494	2704599.89086	3908471.95934
REF3	4243560.22302	2704124.37565	3908055.16570
REF4	4243857.44646	2705157.21202	3906968.93018
REF5	4244172.15898	2703935.78242	3907567.35407
REF6	4243885.67938	2703794.59557	3907970.25742

Table 2: Coordinates of Epoch on 27-07-2016

	X	Y	Z
OBJ1	4243567.01500	2704027.40267	3908127.19737
REF1	4243518.21009	2703302.03482	3908682.54377
REF2	4242829.71495	2704599.89101	3908471.95950
REF3	4243560.22336	2704124.37596	3908055.16598
REF4	4243857.44639	2705157.21208	3906968.92989
REF5	4244172.15900	2703935.78229	3907567.35393
REF6	4243885.67921	2703794.59544	3907970.25739

Variance Ratio Test

A Posteriori RMS of Unit Weight of Epoch on 26-07-2016 : 0.00188 m

A Posteriori RMS of Unit Weight of Epoch on 27-07-2016 : 0.00186 m

Pooled Variance Factor on 27-07-2016 : 3.50

Pooled variance factor values are in mm^2 .

Significance Level of Variance Ratio Test : 0.05

Variance ratio test passed for 27-07-2016

Results of Geodetic Deformation Analysis

Number of Iterations: 3

Significance Level of Single Point Test: 0.05

Critical Value on 27-07-2016 : 2.6049

Table 3: Single Point Test Results on 27-07-2016

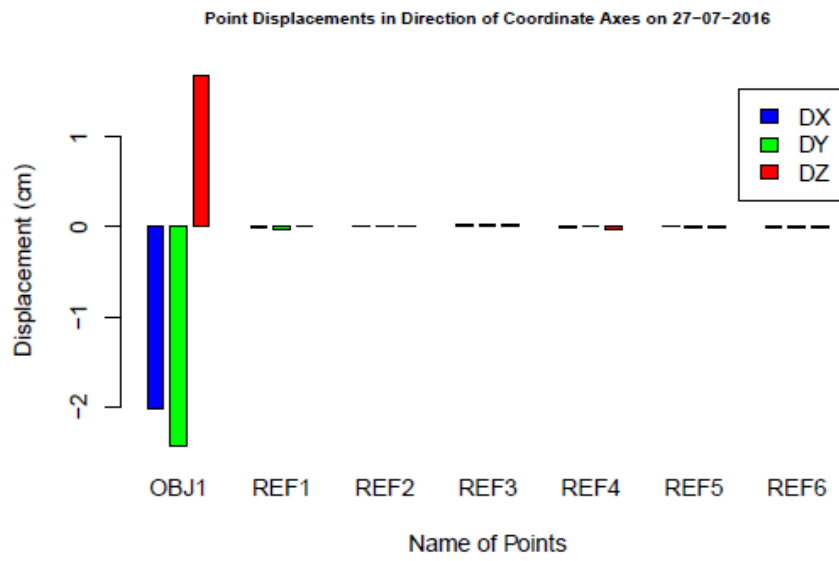
Station	DX (mm)	DY (mm)	DZ (mm)	Disp Vector (mm)	Test Value	Status
OBJ1	-20.2417	-24.3500	16.8883	35.8868	974.2176	unstable
REF1	-0.1217	-0.2600	0.0283	0.2885	0.2397	stable
REF2	0.0083	0.1500	0.1583	0.2183	0.1095	stable
REF3	0.3383	0.3100	0.2783	0.5367	0.3626	stable
REF4	-0.0717	0.0600	-0.2917	0.3063	0.2080	stable
REF5	0.0183	-0.1300	-0.1417	0.1931	0.1846	stable
REF6	-0.1717	-0.1300	-0.0317	0.2177	0.1392	stable

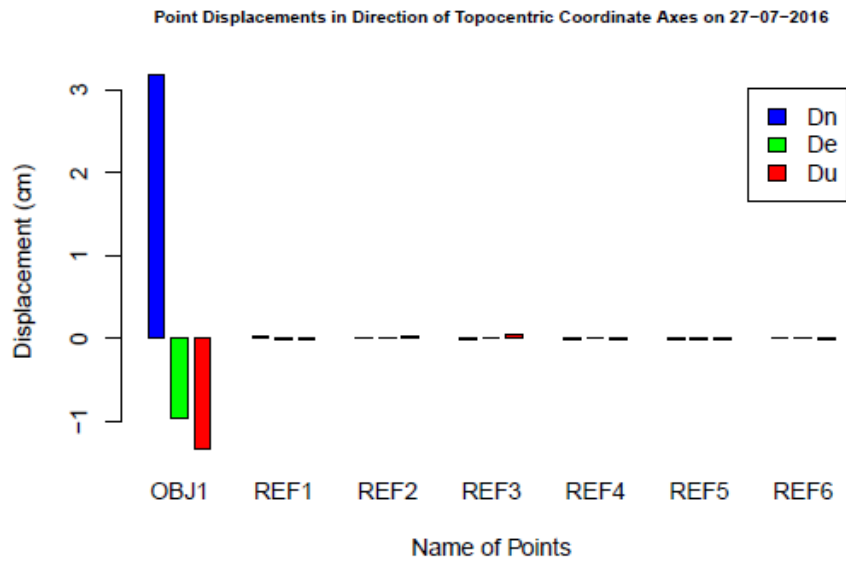
Table 4: Displacements in Local Geodetic Coordinate System on 27-07-2016

Station	Dn (mm)	De (mm)	Du (mm)	Disp Vector (mm)
OBJ1	31.8791	-9.6578	-13.3533	35.8868
REF1	0.1716	-0.1539	-0.1734	0.2885
REF2	0.0707	0.1220	0.1666	0.2183
REF3	-0.0591	0.0796	0.5275	0.5367
REF4	-0.2125	0.0891	-0.2018	0.3063
REF5	-0.0781	-0.1195	-0.1301	0.1931
REF6	0.1073	-0.0174	-0.1886	0.2177

Plots of Point Displacements

Plots of displacements are given as follows.





Sayfa 4