



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GNSS TEKNİĞİ İLE YATAY YÖNDEKİ DEFORMASYONLARIN ARAŞTIRILMASI

Burhaneddin BİLGEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2017

KONYA

Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Burhaneddin BİLGEN tarafından hazırlanan "GNSS Tekniği ile Yatay Yöndeki Deformasyonların Araştırılması" adlı tez çalışması 03/01/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	**İmza**
Başkan, Danışman Prof. Dr. Cevat İNAL	.....
Üye Doç. Dr. İsmail ŞANLIOĞLU	.....
Üye Yrd. Doç. Dr. Salih ALÇAY	.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mustafa YILMAZ
FBE Müdürü

Bu tez çalışması Selçuk Üniversitesi Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı Koordinatörlüğü tarafından 2015-ÖYP-046 nolu proje ile desteklenmiştir.

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.



Burhaneddin BİLGEN

03/01/2017

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GNSS TEKNİĞİ İLE YATAY YÖNDEKİ DEFORMASYONLARIN ARAŞTIRILMASI

Burhaneddin BİLGEN

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Cevat İNAL

2017, 68 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Cevat İNAL
Doç. Dr. İsmail ŞANLIOĞLU
Yrd. Doç. Dr. Salih ALÇAY

Deformasyon izleme çalışmaları mühendislik ölçmelerinin önemli konularından biridir. Yerkabuğu ve mühendislik yapılarında meydana gelen deformasyonların belirlenmesi ve gerekli tedbirlerin alınması sayesinde meydana gelebilecek doğal afetlerin etkileri azaltılabilmektedir. Deformasyonları belirlemek amacıyla yapılan ölçmelerin güncel metotlar kullanılarak kısa zamanda gerçekleştirilmesi hem analiz tekniği hem de işletme aksaklıklarının en aza indirilmesi açısından önemlidir.

Yatay yöndeki mutlak deformasyonların araştırılmasında genel olarak referans ve obje noktalarından oluşan bir jeodezik ağ kurulur. Kurulan jeodezik ağ geleneksel teknikler kullanılarak ölçülebileceği gibi uydu bazlı ölçme teknikleri olan GNSS (Global Navigation Satellite Systems) teknikleri ile de ölçülebilir. Yapılan ölçüler araştırılan objeye ve harekete uygun olarak seçilen bir model kullanılarak istatistik yöntemlerle değerlendirilir ve sonuçlar analiz edilir.

Bu tez çalışmasında, GNSS tekniğinin yatay yöndeki deformasyonları belirleyebilmedeki başarısı araştırılmıştır. Bu amaçla, Selçuk Üniversitesi kampüs alanında pilye şeklinde tesis edilen 7 tane referans noktası, 1 tane de obje noktası seçilerek 8 noktalı bir mikrojeodezik ağ tasarlanmıştır. Obje noktası üzerine 1 cm aralıklarla sanal deformasyon oluşturmaya yarayan bir düzenek yerleştirilmiştir. Obje noktasındaki düzenek üzerine yerleştirilen alıcı önce X ekseni yönünde ve sonra Y ekseni yönünde 1 cm'de bir kaydırılarak 2 saat süreyle GNSS ölçüleri yapılırken, referans noktalarında da eş zamanlı ölçüler gerçekleştirilmiştir. Düzenek üzerinde yapılan ölçüler 30, 60, 90 ve 120 dakikalık ölçü grupları halinde Leica Geo Office (LGO) 7.0 yazılımıyla değerlendirilmiştir. Düzenek üzerinde art arda yapılan GNSS ölçülerinden elde edilen koordinat farkları ile düzenekteki sanal kaydırma miktarları X ve Y eksenleri ile 30, 60, 90 ve 120 dakikalık ölçüler için ayrı ayrı karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Deformasyon, Gnss, Obje Noktası, Referans Noktası

ABSTRACT

MSc THESIS

INVESTIGATION OF DEFORMATIONS IN THE HORIZONTAL DIRECTION WITH GNSS TECHNIQUE

Burhaneddin BILGEN

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN GEOMATICS ENGINEERING

Advisor: Prof. Dr. Cevat INAL

2017, 68 Pages

Jury
Prof. Dr. Cevat INAL
Assoc. Prof. Dr. Ismail SANLIOGLU
Asst. Prof. Dr. Salih ALCAY

Deformation monitoring is one of the important activities in engineering surveying. The effects of natural disasters can be reduced by means of determination of the deformations that may occur in the earth's crust and the engineering constructions and taking required precautions. It is important that the measurements carried out in order to determine the deformations are carried out in a short time using new methods, in terms of both minimizing operational failures and the analysis technique.

A geodetic network consisting of reference and object points is established in the investigation of absolute deformations in the horizontal direction. The established geodetic network can be measured using conventional techniques or GNSS (Global Navigation Satellite Systems) techniques, which are satellite based measurement techniques. Carried out measurements are evaluated by statistical methods using a selected model in accordance with the object and motion which is investigated, and the results are analyzed.

In this thesis, the success of the GNSS technique in determining horizontal deformations have been investigated. For this purpose, a microgeodetic network which consists of 7 reference points and 1 object point, designed in the campus area of Selçuk University. All of the points are pillars. A mechanism for creating virtual deformation at 1 cm intervals is placed on the object point. Simultaneous measurements were carried out at the reference points while the receiver placed on the mechanism on object point was first carried out GNSS observations for 2 hours with shifting in the X-axis direction and then in the Y-axis direction by 1 cm. Measurements carried on the device were evaluated with the Leica Geo Office (LGO) 7.0 software in groups of 30, 60, 90 and 120 minutes. Coordinate differences obtained from successive GNSS measurements on the mechanism and virtual shift amounts were compared separately for the measures of 30, 60, 90 and 120 minutes with X and Y axes.

Keywords: Deformation, Gnss, Object point, Reference point

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında büyük katkı sağlayan ve tezin oluşumundan önce ve oluşumu sırasındaki çalışmalarım boyunca bilimsel tecrübelerini benimle paylaşarak her türlü maddi, manevi destek ve anlayışı gösteren değerli danışman hocam Prof. Dr. Cevat İNAL'a teşekkürü bir borç bilirim. Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde 2015-ÖYP-046 numaralı proje ile finansal destek sağlayan Selçuk Üniversitesi Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı Kurum Koordinatörlüğüne de teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışma süresince gerek arazi çalışmaları sırasında, gerekse diğer konularda olsun yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Sercan BÜLBÜL'e de çok teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her zaman desteklerini arkamda hissettiğim ve bu günlere gelmemde en büyük pay sahibi olan aileme ve arazi çalışmaları sırasında büyük emeği geçen kardeşim Sait BİLGEN'e de en içten teşekkürlerimi sunarım.

Burhaneddin BİLGEN
KONYA-2017

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

TEŞEKKÜR ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **ix**

1. GİRİŞ **1**

2. DEFORMASYON ÖLÇMELERİ **8**

2.1. Deformasyonların Sınıflandırılması 8
2.1.1. Kalıcı deformasyonlar 9
2.1.2. Elastiki deformasyonlar 10
2.2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri 10
2.3. Deformasyon Ölçülerinin Analizi 11
2.3. Deformasyonların Nedenleri 12

3. DEFORMASYON MODELLERİ **14**

3.1. Statik Modeller 15
3.2. Kinematik Modeller 16
3.3. Dinamik Modeller 17
3.4. Uyum Modelleri 18

4. GNSS TEKNİĞİ İLE DEFORMASYONLARIN İZLENMESİ **20**

4.1. GNSS ile Göreli Konum Belirleme 21
4.1.1. Göreli konum belirlemede temel düşünce 21
4.1.1.1. Statik göreli konum belirleme 23
4.1.1.2. Pseudokinematik göreli konum belirleme 24
4.1.1.3. Kinematik göreli konum belirleme 24
4.1.1.4. Real-time kinematik göreli konum belirleme 25
4.1.2. Göreli konum belirlemede ulaşılabilen doğruluklar 25
4.2. GNSS Ölçülerinin Değerlendirilmesi 26
4.2.1. GNSS ölçülerinin değerlendirilmesinde kullanılan yazılımlar 27
4.2.1.1. Leica Geo Office 7.0 yazılımı 28
4.3. GNSS Ağlarının Dengelenmesi 35
4.3.1. Sabit noktalar arasındaki baz ölçülerinin analizi 36
4.3.2. Tekrarlı baz ölçülerinin analizi 36
4.3.3. Lup kapanmalarının analizi 36
4.3.4. Minimum zorlamalı dengeleme 37
4.3.5. Matematiksel modelin oluşturulması ve çözüm 37

5. UYGULAMA **40**

5.1. Çalışma Alanı 40

5.2. Ölçü Düzeneğinin Tanıtılması 41
5.3. Çalışma Alanında Yapılan Ölçüler ve Değerlendirme 44

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 62

6.1. Sonuçlar 62
6.2. Öneriler 63

KAYNAKLAR 65

ÖZGEÇMİŞ 68

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

t_1	Başlangıç periyodu
t_2	Bir sonraki periyot
x_1	Başlangıç periyodundaki koordinatlar
x_2	Bir sonraki periyottaki koordinatlar
$\frac{dx}{dt}$	Konumun zamana göre birinci mertebeden türevi
$\frac{d^2x}{dt^2}$	Konumun zamana göre ikinci mertebeden türevi
Δt	Başlangıç periyodu ile bir sonraki periyot arasındaki zaman farkı
$\hat{x}$	Konum vektörü
$\dot{x}$	Hız vektörü
$\ddot{x}$	İvme vektörü
ℓ	Ölçüler vektörü
v	Düzeltmeler vektörü
$E\{\ell\}$	Ölçüler vektörünün umut değeri
H_0	Sıfır hipotezi
A	Katsayılar matrisi
x	Bilinmeyenlere ilişkin düzeltmeler vektörü
$Cov\{\ell\}$	Ölçülerin kovaryansı
σ_0^2	Ölçülerin varyansı
Q	Ölçülerin ağırlık katsayıları
d	Koordinat farkları vektörü
Q_{dd}	Farklara ilişkin ağırlık katsayıları
Θ	Test büyüklüğü
X_A, X_B	A ve B noktalarının x koordinatları
b_{AB}	A – B noktaları arasındaki baz vektörü
ΔX, ΔY, ΔZ	Kartezyen koordinat farkları
MC	Lup kapanma hatası
$\sum L$	Lupu oluşturan bazların toplam uzunluğu
X, Y, Z	Kartezyen koordinatlar
P	Ağırlık matrisi
N	Normal denklem katsayılar matrisi
m_0	Birim ağırlıklı ölçünün karesel ortalama hatası
f	Serbestlik derecesi

Kısaltmalar

AIUB	Astronomisches Institut Universitaet Bern
AOS	Ashtech Office Suite
CNC	Computer Numerical Control
CORS	Continuously Operating Reference Stations
Cors-TR	Continuously Operating Reference Stations-Turkey
FEM	Sonlu Elemanlar Modeli
G	GLONASS Navigasyon Mesajı Dosyası
GIPSY/OASIS	GNSS-Inferred Positioning System and Orbit Analysis Simulation Software package
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPS	Global Positioning System
IGS	International Geodetic Survey
JPL	Jet Propulsion Laboratory
LGO	Leica Geo Office
M	Meteorolojik Dosya
MIT	Massachusets Institute of Technology
MSODP	Multi Satellite Orbit Determination Program
N	GPS Navigasyon Mesajı Dosyası
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
O	Gözlem Dosyası
PPM	Parts Per Million
PPP	Precise Point Positioning
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RTK	Real-Time Kinematik
TEM	Transit European Motorway
TGO	Trimble Geomatics Office
WARTK	Wide Area Real-Time Kinematic
WGS-84	World Geodetic System-1984

1. GİRİŞ

Günümüz mühendislik ölçmelerinde deformasyon izleme çalışmaları; gerek toplumun can ve mal güvenliğinin sağlanması, gerekse büyük mühendislik projelerinde stratejik kararların alınması açısından önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle ülkemizin önemli bir bölümünün deprem kuşağında yer alması nedeniyle yer kabuğu ve mühendislik yapılarının deformasyonlarının incelenmesi başlı başına birer araştırma konusudur. Deformasyon izleme çalışmalarının başlangıcı 20. yüzyılın başlarına dayanmaktadır. Daha sonraki yıllarda teknolojinin ilerlemesine paralel olarak yeni analiz metotları ve deformasyon ölçmeleri için özel aletler geliştirilmiştir. Bilhassa uydu teknolojilerinin gelişimi deformasyon ölçmeleri üzerinde de etkisini göstermiş ve son yıllarda deformasyon ölçmelerinde klasik yersel tekniklerin yanı sıra GNSS (Global Navigation Satellite Systems) teknikleri yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır.

Deformasyon ölçmelerinin tarihsel gelişimine bakıldığında, bu alanda ilk ölçmelerin 1860 yılında San Andreas fay kuşağında yatay açı gözlemleri şeklinde gerçekleştirildiği görülmektedir. Aynı ölçüler 1876 ve 1906 yıllarında yenilenmiştir. 1908 yılında Almanya'da Thuringen Gothear barajında kret üzerindeki iki noktanın hareketleri aliyman yöntemiyle belirlenmiştir. 1921 yılında da İsviçre'de Montervals barajında benzer bir çalışma yapılarak gövde üzerindeki noktaların konumlarını belirlemek için önden kestirme yöntemi kullanılmıştır.

1928 yılında San Francisco barajında yaşanan çökme kazasında 436 kişinin hayatını kaybetmesi sonucu deformasyon ölçmelerinde jeodezik kontrol ağlarının kullanımı yaygınlaşmıştır. 1929'da deformasyon araştırmaları konusunda çeşitli Avrupa ülkelerinde de çalışmalar yapılmıştır. Yine aynı yıllarda İtalya'da ilk kez deformasyon ölçmelerine ilişkin normlar yayınlanmıştır.

1960'lı yıllara kadar deformasyon ölçmelerinin temel motivasyonu yapılan hesaplamaların kolaylaştırılması olmuştur. Matematik ve istatistik bilimindeki gelişmeler ile bilgisayar teknolojilerinin gelişmesi sayesinde modern analiz teknikleri kullanılarak deformasyon ölçülerinin analizi yapılabilir hale gelmiştir. Türkiye'de deformasyon ölçmeleri de ilk olarak 1960 yılında Sarıyar barajında yapılmış ancak, değerlendirmenin nasıl yapılacağı bilinmediği için yenileme ölçüleri yapılmamıştır. Ayrıca, Kemer Bozdoğan, Keban, Gökçekaya, Oymapınar barajlarında ve Kuzey Anadolu Fay Kuşağında da deformasyonların araştırılmasına yönelik ölçüler yapılmıştır (İnal, 2000).

Deformasyon ölçülerinin hassas bir şekilde analiz edilmesi de ancak modern bilgisayarların üretilmesiyle gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Teknolojinin getirdiği yenilikler sayesinde daha yüksek doğruluklu aletlerin üretimi deformasyon ölçmelerine yeni uygulama alanları doğurmuştur. Bu alanlar genel olarak:

- Yerkabuğu hareketlerinin izlenmesi,
- Heyelan izleme çalışmaları,
- Buzul hareketlerinin izlenmesi,
- Zemin çökmeleri,
- Mühendislik yapılarındaki hareketlerin izlenmesi çalışmalarıdır.

Deformasyon ölçmelerinde geleneksel yatay ve düşey ölçme tekniklerinin yanı sıra GNSS teknikleri de kullanılabilmektedir. GNSS tekniklerinin noktaların birbirini görme zorunluluğunu ortadan kaldırması, nokta yerlerinin seçimi konusunda yersel jeodezik ağlara göre esneklik sağlamaktadır. Aletlerin kullanım kolaylığı ve ölçülerin pratik yapılması nedeniyle GNSS teknikleri günümüzde ekonomik bir sistem olarak tercih edilmektedir. Dahası, GNSS tekniklerinin ulaşabildiği doğrulukların deformasyon ölçmelerinde kullanılabilecek seviyede olması da bu tekniklerin ön plana çıkmalarını sağlamaktadır. Ancak, GNSS alıcısının uydu sinyallerini alabilmesi için açık gökyüzünü görme gerekliliği vardır. Bu durum ağaçlıklı ve tünel, maden ocakları gibi kapalı alanlarda ölçüm yapmaya olanak sağlayamamasına neden olmaktadır. Bu da GNSS tekniğinin zayıf bir yönü olarak gözükmektedir. Elde edilen GNSS gözlemlerinin değerlendirilmesinde ise mevcut ticari veya akademik yazılımlar kullanılarak nokta konumları belirlenmektedir.

Yersel veya GNSS teknikleriyle yapılan deformasyon ölçmeleri farklı modeller kullanılarak analiz edilmekte ve sonuçlar yorumlanmaktadır. Ölçülerin analizinde en yaygın kullanılan yöntemler statik model kullanılarak gerçekleştirilen yöntemlerdir. Bunların dışında kinematik ve dinamik modeller kullanılarak da analizler gerçekleştirilebilmektedir.

Literatürde, deformasyon araştırmalarıyla ilgili GNSS teknikleri kullanılarak yapılan pek çok bilimsel çalışma mevcuttur. Çalışmaların ana hedefleri ağırlıklı olarak GNSS tekniğinin yerkabuğu ile köprü ve gökdelen gibi yapıların deformasyonlarını belirleyebilmedeki başarısını ortaya koymaya yöneliktir. Kearns ve ark. (2015) yaptıkları bir çalışmada, Houston metropolitan alanında meydana gelen arazi çökmesi ve yer altı suyu seviyesi değişimlerini izlemişlerdir. Bu kapsamda, 95 sabit GPS (Global Positioning

System) istasyonu verisi ile 11 sondaj genleşmeölçerinden çökme ölçümlerinin yanı sıra 490 su kuyusundan yer altı suyu seviyeleri izlenmiştir. GPS ve genleşmeölçer gözlemlerinden elde edilen sonuçlar bölgede ortalama çökme hızının 2005'ten beri azalma eğiliminde olduğunu ve yer altı suyu seviyesinin arttığı alanlarda çökme hızının yavaşladığını göstermiştir.

Moschas ve Stiros (2015) yaptıkları çalışmada, yapıların 6-7Hz'lik frekanslarının izlenmesinde GNSS tekniğinin kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Bu amaçla ahşap bir yaya köprüsü üzerinde toplanan 100-Hz'lik bir GNSS verisi ile ivmeölçer verisi birlikte analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre GNSS tekniğinin 6-7Hz'e ulaşan doğal salınımları ve birkaç milimetrelik düşey sehimleri belirleyebildiği görülmüştür.

Wang ve Soler (2015) yaptıkları bir çalışmada, Houston, Texas'taki bir çökme alanı ve Porto Riko, Ponce'daki bir heyelan alanında uzun süreli GPS gözlemleri kullanılarak arazi çökmesinin ölçülmesini amaçlamışlardır. Elde edilen sonuca göre, doğrudan GPS'ten elde edilen elipsoidal yükseklikler ve bir jeoid modeli kullanılarak GPS'ten türetilen ortometrik yükseklikler aynı çökme sonuçlarını vermiştir. Bu nedenle uzun süreli çökmeyi ölçmek için nivelman tekniklerinin uygulanmasına gerek kalmadan GPS'in doğrudan kullanılabilir olduğu kanısına varılmıştır.

Wang ve Soler (2013) yaptıkları bir başka çalışmada, uzun yıllardır çökme alanı olan Houston'da bu hareketi izlemek için kurulan CORS (Continuously Operating Reference Stations) ağını kullanarak düşey deformasyonları belirlemişlerdir. Ölçülerin değerlendirilmesinde web tabanlı konumlandırma hizmeti ve GIPSY/OASIS (GNSS-Inferred Positioning System and Orbit Analysis Simulation Software package) yazılımı kullanılmıştır. Her iki değerlendirme sonucu birbiriyle karşılaştırılmış, web tabanlı konumlandırma hizmetinin 1 günlük periyotlarda 1 santimetrelik düşey doğruluğa ulaştığı görülmüştür. 0.5cm/yıl kadar yavaş çökmelerin, 5 veya daha fazla yıllık GPS verisinin web tabanlı konumlandırma hizmeti ile değerlendirilmesiyle tespit edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Zeybek (2013) yüksek lisans tezinde yaptığı uygulamada Konya'nın Taşkent ilçesinde oluşan heyelan bölgesini altı farklı periyotta izlemiştir. Bu amaçla, 30 ile 35 adet obje noktasında GNSS tekniklerinden hızlı statik ölçme yöntemi kullanılarak deformasyon ölçmeleri gerçekleştirilmiş ve analiz yapılmıştır. Bununla birlikte yersel lazer tarama tekniği kullanılarak altı farklı periyotta elde edilen üç boyutlu veriler değerlendirilerek heyelan hareketi incelenmiştir. Çalışma sonucunda, GNSS ve yersel

lazer tarama tekniğinin entegrasyonu sayesinde heyelanın yönü, hareket eden kütlenin hacmi ve heyelanın karakteri yüksek doğrulukta elde edilmiştir.

Schaal ve ark. (2012) yaptıkları bir çalışmada, tek frekanslı L1 GPS alıcısı kullanılarak küçük yer değiştirme miktarlarının tespit edilebilirliğini araştırmışlardır. Bu amaç doğrultusunda, yapılan uygulamada Kanada'daki bir köprüde milimetrelerden santimetrelere kadar olan titreşimleri belirlemek için tek frekanslı GPS alıcısı kullanılmıştır. Değerlendirmeler GPS zaman serilerine Hızlı Fourier Dönüşümü uygulanarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre 3mm'ye yakın genlikli yer değiştirmelerin Hızlı Fourier Dönüşümü ile belirlenebileceği kanısına varılmıştır.

Wang ve Soler (2012) yaptıkları bir çalışmada, web tabanlı konumlandırma hizmetinin GPS verilerinin değerlendirilmesinde ve Porto Riko, Virjin Adaları bölgesinde uzun süreli heyelanların izlenmesinde kullanışlılığını göstermeyi amaçlamışlardır. Heyelan alanında 2 yıllık sürekli GPS verisi; heyelan izlemede sürekli veya kampanya, uzun süreli veya kısa süreli, gündüz veya öğleden sonra, yağışlı veya yağışsız hava gibi durumların etkilerini de değerlendirmek için farklı koşullarda toplanmıştır. Kullanıcı tarafından toplanan veri, web tabanlı konumlandırma hizmeti ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, yağış miktarının yüksek doğruluklu GPS performansını önemli ölçüde düşürdüğü ve web tabanlı statik ve hızlı statik konumlandırma hizmetlerinin santimetre doğrulukta heyelan izlemek için alternatif araçlar olduğu görülmüştür.

Selendi (2011) yüksek lisans tezinde yaptığı uygulamada, Marmara Bölgesi'nde gravite ve GPS ölçme yöntemleri kullanılarak meydana gelen yatay ve düşey yerkabuğu deformasyonlarına ve gerinim birikimine ilişkin bilgilerin sağlanması amacıyla, 2006-2010 yılları arasında 12 Marmara Sürekli GPS Ağı ve 47 GPS kampanya noktalarında beş periyot GPS ölçmesi gerçekleştirmiştir. Ayrıca, bu ağın 24 noktasında bağıl gravite ve 10 noktasında da mutlak gravite ölçmeleri yapılmıştır. Gerçekleştirilen ölçüler Bernese 5.0 yazılımında değerlendirilerek noktaların zamana bağlı yatay ve düşey konum değişiklikleri belirlenmiş ve deformasyon analizi yapılarak hareketlerin anlamlı olup olmadığı ortaya konulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre bölgede yer alan noktalarda anlamlı konum değişiklikleri gözlenmiştir.

Açıkgöz (2010) doktora tezinde yaptığı uygulamada, Türkiye Ulusal Yatay Kontrol Ağının kurulması ve sıklaştırılması kapsamında yapılan yersel ölçüler ile sonraki yıllarda yapılan GPS ölçülerini birlikte değerlendirerek Yatay Kontrol Ağının kuzeybatı bölümünde yer kabuğu hareketleri sonucu oluşan deformasyonu araştırmıştır. Bu amaçla

1930-1964 yıllarında yapılan yersel ölçüler ve bu ağın 82 noktasında 2000 ve 2003 yıllarında yapılan GPS ölçüleri kullanılmıştır. Yersel ölçülerin değerlendirilmesinde 1930-1964 yılları arasında büyüklüğü bakımından jeodezik ağlarda etkili olduğu düşünülen üç deprem göz önüne alınarak ölçüler üç evreye ayrılmıştır. Ayrıca, triyangulasyon noktalarında yapılan GPS ölçüleri Bernese 5.0 akademik GPS değerlendirme yazılımı ile değerlendirilmiş ve ITRF2005 sistemindeki koordinatları hesaplanmıştır. Bölgedeki ağ noktalarında oluşan yer değiştirmeler üç evre yersel ölçünün GRS80 elipsoidinde ITRF2005 koordinat sisteminde dengelenmesi ve sonuçların güncel GPS koordinatları ile karşılaştırılmasıyla belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre ağın bu bölümünde tektonik hareketler sonucu oluşan toplam yatay yer değiştirmelerin 3.5m'ye ulaştığı, bölgede meydana gelen depremler nedeniyle deformasyonun 2-3m civarında olduğu belirlenmiştir.

Yiğit ve ark. (2010) yaptıkları bir çalışmada, rüzgar yükü altında yüksek katlı (30 katlı) bir betonarme binanın davranışını GPS ve eğim sensörlerini birlikte kullanarak izlemişlerdir. GPS ve eğim sensörlerinden elde edilen veriler zaman ve frekans alanlarında analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda GPS gözlemlerinin, bina üzerindeki yansıtıcı bir yüzeyin yol açtığı maltipath etkisine maruz kaldığı tespit edilmiştir. Frekans alanındaki analizlerden, binanın her iki sensörden de tespit edilen birinci mod doğal frekanslarının birbiriyle çok iyi uyuşum gösterdiği görülmüştür. Bu ölçülen birinci mod doğal frekanslar ile FEM (Sonlu Elemanlar Modeli) tahmini kullanılarak türetilen frekanslar karşılaştırılmış ve aralarındaki tutarsızlık da % 7 olarak tespit edilmiştir.

Hastaoğlu (2009) doktora tezinde yaptığı uygulamada, GPS hızlı statik yöntem ile heyelanların izlenebilirliğinin araştırılması amacıyla seçilen çalışma bölgesinde on iki noktalı bir GPS ağı tesis etmiştir. Toplam altı periyot olmak üzere ve her periyotta 3 gün tekrarlı, günlük ortalama on iki saatlik GPS gözlemleri gerçekleştirilmiştir. GPS gözlemlerinden elde edilen altı periyotluk konum bilgilerinden, noktaların hız değerleri kestirilmiştir. Sonuç olarak, aktif heyelan sahasındaki noktalarda maksimum 2cm/yıl hareket gözlenmiştir.

Özyaşar (2009) yüksek lisans tezinde yaptığı uygulamada, İstanbul GPS Nirengi Ağı 1999 ve 2005 kampanyalarından yararlanarak İstanbul metropolitan alanında deprem sonrası hareketlerin belirlenmesi amacıyla her iki ölçme döneminde 452 ortak noktayı kullanmak suretiyle değerlendirme yapmıştır. Değerlendirmede kullanılan bu ortak noktalara ilişkin 6 yıllık yer değiştirme büyüklükleri hesaplanmıştır.

Erol (2008) doktora tezinde yaptığı uygulamada presizyonlu nivelman tekniği ile GPS tekniğinin matematiksel ve stokastik olarak kombinasyonunun sağlanması ve GPS tekniğinin deformasyon belirleme amaçlı çalışmalarda kullanılabilirliğinin test edilmesini amaçlamıştır. Bu amaçla İstanbul'un güneybatısında, Büyükçekmece gölü üzerinde yer alan ve TEM otoyolunun bir bölümünü oluşturan Karasu viyadüğünün zeminden kaynaklanan deformasyonlarının araştırılması ve mevcut stabilizasyonunun ortaya çıkarılması için tesis edilen 30 noktalı jeodezik kontrol ağında, yaklaşık altı-sekiz aylık aralıklarla, 1996-1998 yılları arasında iki yıl boyunca toplam dört ölçme kampanyasından elde edilen GPS ve presizyonlu nivelman ölçüleri kullanılmıştır. Sonuç olarak, presizyonlu nivelman ölçülerinin GPS tekniğinden elde edilen doğruluklara, bilinmeyenlere ve deformasyon vektörlerine dikkate değer olumlu etkilerinin olduğu görülmüştür. Ayrıca GPS tekniğinin, bazı özel önlemlerin alınması şartıyla milimetre mertebesindeki deformasyonların belirlenmesinde kullanılabileceği ve presizyonlu nivelman tekniği ile desteklenmesiyle daha küçük deformasyonların elde edilebileceği öngörülmüştür.

Satirapod ve ark. (2008) yaptıkları bir çalışmada 2004 Sumatra ve 2005 Nias depremlerinden sonra Thai jeodezik kontrol ağındaki deformasyonu izlemişlerdir. Bu amaçla 2004 yılındaki 9.3 şiddetindeki deprem sonrası yer değiştirmeyi izlemek için GPS kampanyaları yapılmıştır. Ancak 2005'te 8.7 şiddetindeki ikinci depremden sonra durum daha komplike bir hal almıştır. Yapılan GPS kampanyaları ve mevcut sürekli gözlem yapan GPS istasyonlarında 2006 yılının sonuna kadar toplanan veriler GIPSY-OASIS II yazılımında PPP tekniği kullanılarak değerlendirilmiştir.

Yıldırım (2007) yüksek lisans tezinde yaptığı uygulamada Selçuk Üniversitesi Hukuk Fakültesi binasında meydana gelen düşey ve yatay yöndeki hareketliliğin belirlenmesinde GPS tekniğinin kullanılabilirliği araştırmıştır. Bu amaçla, yapı üzerine 4 adet obje noktası ve yapıya 1-2km mesafede hareket etmeyeceği düşünülen noktalara da pilye şeklinde 4 adet obje noktası tesis edilmiştir. Üç periyot ölçü yapılarak oluşturulan jeodezik ağda anlamlı nokta hareketleri araştırılmıştır. GPS ölçülerinin değerlendirilmesinde Leica Geo Office ve GNSS Solutions ticari yazılımları kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre ağda 5 noktada anlamlı nokta hareketlerinin olduğu saptanmış ve GPS tekniğinin mühendislik yapılarının deformasyon analizinde kullanılması için ölçü planlamasının iyi yapılması, uygun ölçü zamanının seçilmesi, GPS alıcılarının yanında ivme ölçer, eğim ölçer, total station gibi ek ölçü sistemlerinin kullanılması, yapıya etkiyen kuvvetlerin de sürekli izlenmesi gerektiği kanısı oluşmuştur.

Altın (2006) yüksek lisans tezinde yaptığı uygulamada, Kuzey Anadolu Fayının Batı Marmara Bölümündeki hareketlerin GPS ölçüleri ile belirlenmesine ilişkin olarak fayın güney ve kuzey kesimlerine homojen dağılacak şekilde 14 noktalı bir GPS ağı tasarlamıştır. Ağda yapılan 3 kampanya GPS ölçüsü GAMIT/GLOBK yazılımıyla değerlendirilmiştir. Aynı yazılım ile bölgenin üç yıllık ölçülere dayanan hız vektörleri hesaplanmıştır.

Uluışık (2006) yüksek lisans tezinde, İstanbul'un yüksek yapılarından biri olan 42 katlı Şişli Plaza'da, yapı hareketlerinin izlenmesine dair bir uygulama yapmıştır. Bu kapsamda, 5 noktalı bir jeodezik ağ oluşturulmuş, 30 saniyelik statik ölçüler yapılmış ve ölçüler Ashtech Solution 2.6 yazılımında değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler zaman serisine açılmıştır. Serilerdeki periyodik bileşenlerde Hızlı Fourier Dönüşümü uygulanarak yapıdaki titreşimin maksimum genliğinin 5mm, toplam bağıl koordinat değişiminin de 5cm olduğu tespit edilmiştir.

Bu tez çalışmasında, GNSS tekniğinin yatay yöndeki deformasyonları belirleyebilmedeki başarısı araştırılmıştır. Bu amaçla Selçuk Üniversitesi Kampüs Alanında pilyelerden oluşan bir mikrojeodezik ağ oluşturulmuştur. Oluşturulan bu ağda bir nokta obje noktası olarak diğerleri ise referans noktası olarak seçilmiştir. Obje noktası üzerinde 1 cm aralıklarla sanal deformasyonlar oluşturmaya imkan tanıyan bir ölçü düzeneği tasarlanmıştır. Tasarlanan düzenek obje noktası üzerine yerleştirildikten sonra, referans noktaları ve düzenek üzerindeki noktalarda eş zamanlı GNSS ölçüleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüler obje noktasına öncelikle X ekseni yönünde, daha sonra da Y ekseni yönünde iki saatte bir 1 cm'lik sanal kaydırmalar uygulanarak yapılmıştır. Yapılan ölçülerin değerlendirilmesinde Leica Geo Office (LGO) 7.0 yazılımı kullanılmıştır.

Oluşturulan jeodezik ağda referans noktalarının koordinatları Cors-TR (Continuously Operating Reference Stations-Turkey) noktalarına dayalı olarak belirlenmiştir. Düzenek üzerindeki ölçüler 30, 60, 90 ve 120 dakikalık ölçü gruplarına ayrılarak değerlendirmeler yapılmış ve her bir ölçü grubu için koordinatlar ağdaki referans noktalarına dayalı olarak hesaplanmıştır. Düzenek üzerinde art arda yapılan GNSS ölçülerinden elde edilen koordinat farkları ile düzenekteki sanal kaydırma miktarları X ve Y eksenleri ile 30, 60, 90 ve 120 dakikalık ölçüler için ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalarla koordinat eksenleri yönünde hangi büyüklükteki kaymaların hangi ölçü süreleriyle belirlenebileceğinin tespit edilmesi amaçlanmıştır.

2. DEFORMASYON ÖLÇMELERİ

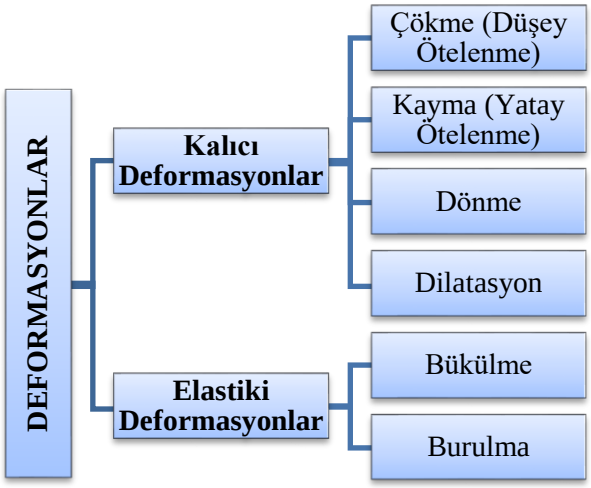
Jeodezik deformasyon ölçmeleri ve ölçülerin değerlendirilmesi konusu mühendislik ölçmelerinin en önemli uygulama alanlarından biridir. Tektonik ve volkanik hareketler ile büyük mühendislik yapılarında, maden galerilerinde, tünellerde ya da bunların yakın çevrelerinde oluşan yatay ve düşey doğrultudaki konum değişiklikleri deformasyon olarak adlandırılır (İnal, 2014). Bu değişimlerin belirlenmesi için yapılan ölçmelere deformasyon ölçmeleri denilmektedir.

Deformasyon ölçmeleri yerkabuğunda, yapılarda veya makine tesislerinde var olan bir problemin tespit edilmesi veya henüz ortaya çıkmamış fakat daha sonra problem oluşturabilecek bir durum olup olmadığını ortaya çıkarmak amacıyla yapılmaktadır. Herhangi bir problem veya tehlike kötü sonuçlar doğurmadan önce tespit edilip gerekli tedbirler alındığı takdirde deformasyon ölçmeleri amacına ulaşmış olacaktır.

Deformasyonların belirlenip yorumlanması için objenin zamana bağlı bir şekilde sürekli gözlenmesi gereklidir. Deformasyonlara ilişkin yorum yapabilmek için bir periyottan fazla ölçüye gereksinim vardır. Burada ilk yapılan ölçmeler sıfır ölçmeleri veya referans ölçmeleri, sonraki ölçmeler ise yineleme veya tekrar ölçüleri olarak adlandırılmaktadır. Ölçülerin yinelenme oranı ise bu iki periyot arasındaki hareket hızına göre belirlenmektedir.

2.1. Deformasyonların Sınıflandırılması

Deformasyonlar, şekil değişimlerinin yapısına ve cinsine göre kalıcı ve elastiki olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Deformasyonların sınıflandırılması (Doğanalp, 2005)

2.1.1. Kalıcı deformasyonlar

Deformasyona uğrayan obje deformasyona uğradıktan sonra eski halini alamıyorsa bu tür deformasyonlara kalıcı deformasyonlar denilmektedir. Kalıcı deformasyonlar çökme (düşey ötelenme), kayma (yatay ötelenme), dönme veya dilatasyon şeklinde gerçekleşebilmektedir.

Yüzeyi gevşek olmayan doğal zeminin, tamamen düşey olarak veya düşeye yakın bir şekilde yerçekimi kuvveti yönünde hereket etmesine çökme denilmektedir. Bir yapının veya doğal zeminin yük ve çeşitli kuvvetlerin etkisiyle aşağıya doğru hareket etmesine de oturma adı verilmektedir. Çökme veya oturma türü deformasyonlarda yatay doğrultuda da çok az bir miktarda hareket olabilir. Çökmeler; kumlu zeminde yük uygulanmasıyla ani oturmalar, killi zeminlerde zamanla azalan konsolidasyon ve zeminin taşıma gücünün aşılmasıyla plastik oturmalar şeklinde gerçekleşmektedirler (İnal, 2014). Çoğu zaman konsolidasyon ile plastik oturmaları birbirinden ayırt etmek zor olmaktadır.

Bir objenin bir kuvvete maruz kalmasıyla yatay yönde yer değiştirmesi kayma olarak adlandırılmaktadır. Objeye uygulanan kuvvet sürtünme kuvvetinden büyük olduğunda kayma meydana gelir (İnal, 2014).

Objenin yatay düzlemde düşey eksen etrafındaki hareketi yatay dönme, düşey düzlemde yatay eksen etrafındaki hareketi de düşey dönme olarak tanımlanabilir.

Dilatasyon olarak da isimlendirilen sünme betonda büzülmenin yanı sıra kalıcı yük altında zamana bağlı olarak oluşan deformasyon olarak tanımlanmaktadır. Sünme şeklinde meydana gelen deformasyonun büyüklüğü bazı değişkenlere bağlıdır. Bu değişkenler aşağıdaki gibi sıralanabilir (Yıldırım, 2007):

- Yük uygulanan betonun yükleme anındaki yaşı sünme oranına etki etmektedir. Yeni bir betondaki sünme eski betondaki sünmeye göre daha fazla olmaktadır.
- Karışımdaki su/çimento oranı arttıkça sünmenin miktarı da artar.
- Ortamdaki nem ve ısının artması sünme miktarını da artırmaktadır.
- Betona kalıcı yük uygulandığında oluşan gerilme düzeyinin betonun basınç dayanımına oranı 0.4'ten büyükse sünme daha hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir.
- Sünmenin hızı zamanla yavaşlamasına rağmen deformasyon miktarının artması yaklaşık üç yıl devam etmektedir.

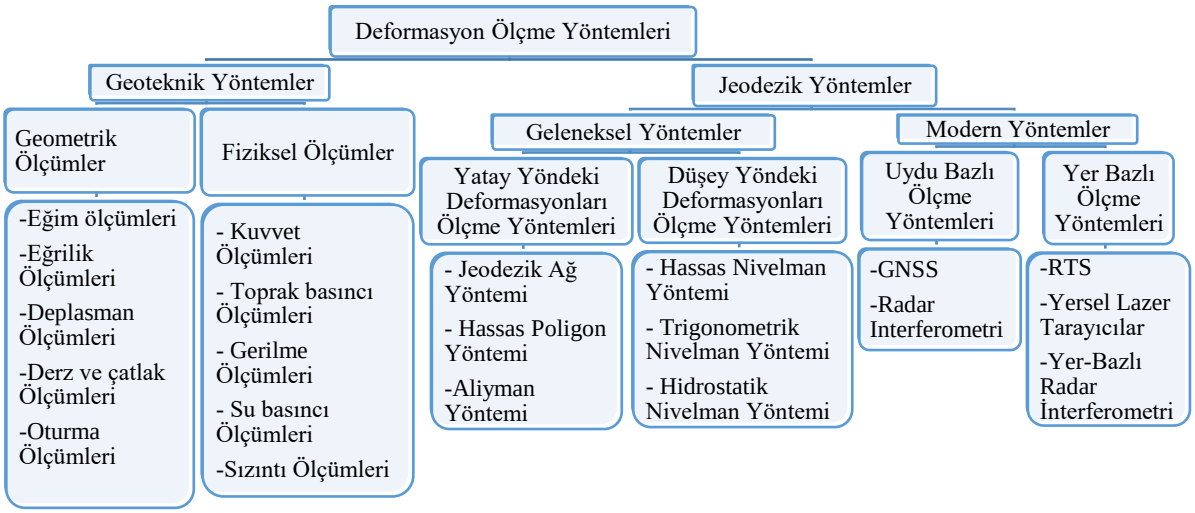
2.1.2. Elastiki deformasyonlar

Deformasyona uğrayan obje deformasyona uğradıktan sonra tekrar eski halini alabiliyorsa bu tür deformasyonlar elastiki deformasyonlar olarak tanımlanmaktadır. Elastiki deformasyonlar bükülme ve burulma şeklinde gerçekleşebilmektedir.

Objelerin ana eksenine dik şekil değişiklikleri bükülme olarak tanımlanmaktadır. Objelerin ana ekseni boyunca meydana gelen dönme hareketi ise burulma olarak adlandırılmaktadır.

2.2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

Deformasyon ölçme yöntemleri, geoteknik yöntemler ve jeodezik yöntemler olmak üzere ikiye ayrılır. Bu yöntemler de kendi aralarında farklı dallara ayrılmaktadır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Deformasyon ölçme yöntemleri (Alçay, 2014)

Mutlak deformasyonların belirlenmesinde genel olarak jeodezik yöntemler kullanılmaktadır. Yatay yöndeki mutlak deformasyonların belirlenmesinde ise çoğunlukla jeodezik ağ yöntemi tercih edilmektedir. Bu yöntemde jeodezik ağ, referans ve obje noktalarından oluşmaktadır. Obje noktaları tamamen hareketli noktalarda referans noktaları ise obje noktalarına mümkün olduğunca yakın fakat hareketten etkilenmeyecek yerlerde seçilmelidir. Referans ve obje noktalarında doğrultu, kenar, semt, yükseklik farkları, konum ve yükseklik koordinat ölçüleri ve bu büyüklüklerde meydana gelen değişimler gibi jeodezik ölçmeler yapılır. Ağdaki ölçmeler, hareketin frekansına bağlı olarak belirli zaman aralıklarında tekrarlanır. Böylece, bir matematik işlem yardımıyla değişik ölçme dönemleri karşılaştırılarak noktalardaki konum değişikliklerinin tespiti mümkün olmaktadır (İnal, 1990).

Bağıl deformasyonların belirlenmesinde çoğunlukla geoteknik yöntemler tercih edilmektedir. Örneğin bir barajda deformasyon ölçüleri gerçekleştirilirken suyun baraj gövdesine yaptığı basınç ve sıcaklığın gövde üzerindeki etkisi dikkate alınarak deformasyonların tespit edilmesinde geoteknik yöntemlerden yararlanılır. Geoteknik yöntemlerle jeodezik yöntemlerin aksine sadece yüzey deformasyonları değil, belli bir derinlikteki deformasyonlar da belirlenebilmektedir. Geoteknik yöntemlerle deformasyonlar belirlenirken özel ölçme aletleri ve donanımların kullanılması gerekmektedir. Bu donanımlar sayesinde araştırılan yapı üzerinde deformasyona neden olan kuvvetler, kuvvet basıncı, su basıncı, gerilme, eğim ve sıcaklık gibi faktörler ölçülmekte ve deformasyonların belirlenmesinde dikkate alınmaktadır.

2.3. Deformasyon Ölçülerinin Analizi

Deformasyon ölçmelerine dayanarak ağdaki nokta hareketlerinin tespit edilmesi, yerelleştirilmesi ve modellenmesi deformasyon analizi olarak adlandırılır. Ölçmeler sonucunda noktaların ilk periyot ve sonraki periyot zamanındaki konumları belirlenir. Bu konumlar arasındaki farkın anlamlı olup olmadığı araştırılır. Nokta konumları genellikle GNSS teknikleri veya trilagon ağlar oluşturularak belirlenir. Yükseklik belirlemelerinde ise genellikle hassas nivelman veya GPS nivelman tekniği kullanılır. Genel olarak deformasyon araştırmalarında izlenen yol aşağıdaki gibidir:

- Periyot ölçüleri ayrı ayrı serbest dengelenir.
- Uyuşumsuz ölçüler ayıklanır.
- Periyot ölçüleri için uyuşum testi yapılır.

- Araştırılan objeye ve harekete uygun bir model seçilerek analiz gerçekleştirilir.

Deformasyon araştırmalarında öncelikle oluşturulan ağın tümünde deformasyon olup olmadığını belirlemek için global test yapılır. Global test sonucunda ağda deformasyon olduğu tespit edilirse yerelleştirme işlemine geçilir. Yerelleştirme işlemi esnasında ağdaki referans noktalarından birinde deformasyon olduğu tespit edilirse o nokta obje noktası olarak ele alınarak işleme devam edilir.

Yatay yöndeki mutlak deformasyonların belirlenebilmesi için konum ağlarında en az iki noktanın sabit olarak kalması, düşey yöndeki mutlak deformasyonların belirlenebilmesi için yükseklik ağlarında en az bir noktanın sabit kalması gerekmektedir.

Objelerde deformasyonlar genellikle üç boyutlu olarak meydana gelmektedir fakat deformasyon ölçmelerinde genellikle yatay yönde doğrultu ve kenar ölçmeleri düşey yönde ise hassas nivelman tekniği kullanıldığından daha iyi doğruluklar elde etmek için deformasyonların konum ve yükseklik için birbirinden ayrı bir şekilde belirlenmesi daha uygundur (Ogundare, 2016).

2.3. Deformasyonların Nedenleri

Yer kabuğunda veya yapılarda meydana gelen deformasyon, oluşma nedenlerine göre çeşitlilik göstermektedir. Deformasyon oluşumuna yol açan etkiler yapay veya doğal olarak ortaya çıkmaktadırlar.

Birçok deformasyonun oluşumunda sıcaklık etkileri önemli bir role sahiptir (Erdoğan, 2006). Bu etkiler obje çevresinde oluşan günlük, aylık ve yıllık sıcaklık farkları, direkt gelen güneş ışınları ve diğer ısı kaynaklarıdır. Objenin malzeme yapısı ve sıcaklığın obje üzerindeki dağılımı objede geometrik değişimlerin meydana gelmesine yol açmaktadır.

Yer altı suyu seviyesindeki değişimler birtakım yerkabuğu deformasyonlarına neden olmaktadır. Barajlarda baraj gölünde biriken suyun gövdeye yaptığı basınç ve kaya sıkıştırması ile baraj gövdesinde deformasyonlar oluşmakta ve su ile betonun etkileşmesi sonucu fizyolojik değişimler oluşabilmektedir. Yine baraj gölünde biriken su ile toprağın etkileşimi sonucunda yamaçlardan baraj gölüne toprak kaymaları meydana gelmektedir (Gülal, 2012).

Köprülerdeki trafik yükü veya yüksek bir kuleye etkiyen rüzgar kuvveti ve raylı sistemlere yakın olan binaların temelindeki gevşemeler ile nem miktarı değişimleri de deformasyonlar meydana getirmektedir.

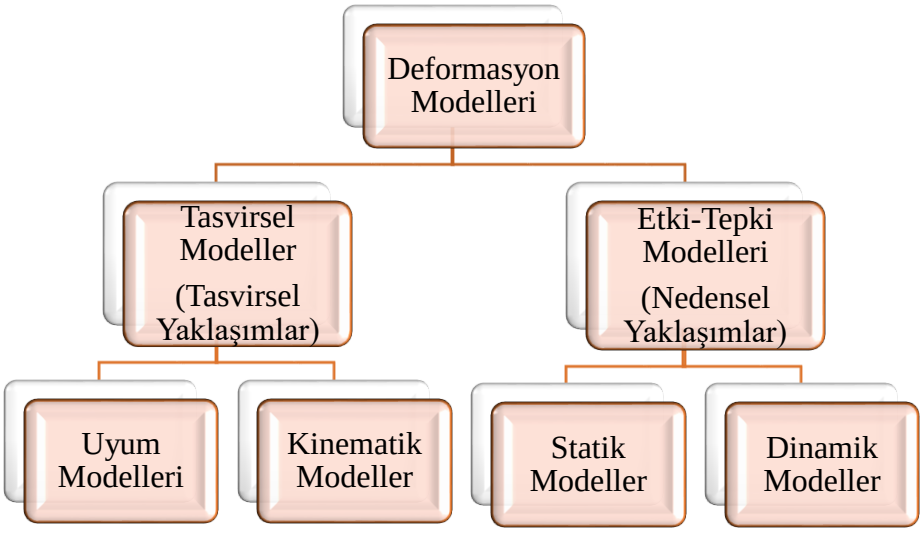
Maden işletmelerinde ya da inşaatlarda temel suyunun çıkışı sonucu oluşan çökme, kayma, sürükleme, biçiminde taban değişikliklerinin meydana gelmesi de birtakım deformasyonlara neden olmaktadır.

3. DEFORMASYON MODELLERİ

Jeodezide, deformasyonların modellenmesi ve analizinde geliştirilmiş farklı yaklaşımlar mevcuttur. Bu yaklaşımlar deformasyon sürecine göre öncelikle iki ana başlık altında sınıflandırılabilmektedir (Şekil 3.1). Birinci grup yaklaşımlar tasvirsel olarak adlandırılmaktadırlar. Bu yaklaşımlar sadece jeodezik araçlar kullanılarak etkilerinin izlenmesi ile deformasyon sürecinin seyrine dayanmaktadır. İkinci grup yaklaşımlar ise süreci etkileyen büyüklükler ve objenin gözlemlenebilir tepkileri arasındaki etki-ve-tepki ilişkisini ifade ettikleri için nedensel olarak adlandırılmaktadırlar (Welsch ve Heunecke, 2001).

Tasvirsel yaklaşımlar, deformasyon sürecinde objeye etkiyen kuvvetleri dikkate almadan süreci analiz etmeye yönelik olarak geliştirilmişlerdir. Tasvirsel yaklaşımlar içerisinde iki ayrı model vardır. Bunlardan uyum modeli nedensel yaklaşımlardaki statik model gibi konumsal referanslıdır, yani zaman boyutu dikkate alınmamaktadır. Kinematik model ise nedensel yaklaşımlardan dinamik model gibi hem konum hem de zaman referanslıdır. Bu durumda zaman boyutu dikkate alınarak nokta hareketleri zamanın fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır.

Nedensel yaklaşımlar, deformasyon sürecinin giriş – çıkış ilişkisine dayanmaktadırlar. Burada tasvirsel yaklaşımların aksine etkiyen kuvvetler, yer çekimi veya sıcaklık değişimleri gibi sürekli güncel faktörler tarafından tetiklenen etki büyüklükleri olarak dikkate alınmaktadır. Nedensel yaklaşımlar içerisinde de iki farklı model vardır. Bunlardan statik model konumsal referanslı, dinamik model ise hem zaman hem de konum referanslıdır.



Şekil 3.1 Jeodezik deformasyon analizinde model hiyerarşisi (Welsch ve Heunecke, 2001)

3.1. Statik Modeller

Basit olarak iki koordinat değerinin karşılaştırılması yerine, ölçülerin tamamının değerlendirildiği istatistik testlere dayalı çeşitli statik deformasyon modelleri geliştirilmiştir. Statik model bir objede hareket oluşup oluşmadığını, o obje ve çevresini kapsayan deformasyon ağının çeşitli zaman periyotlarında belirlenen nokta koordinat farklarının istatistik olarak eşdeğerlik testi ile saptayan en temel yöntemdir.

Statik model kullanılarak deformasyon araştırması yapılan objenin karakteristik noktalarına ait deformasyon vektörleri, zamandan ve etkiyen kuvvetlerden bağımsız olarak belirlenmektedir (Tanır, 2000; Bayrak, 2003; Çakır, 2006; Doğanalp ve Turgut, 2009). Bu model kullanılarak deformasyonun belirlenmesi için ilk önce obje çeşitli zaman periyotlarında ölçülmeli ve her periyottaki ölçüler ayrı ayrı serbest dengelenmelidir. Periyotlardaki serbest dengeleme sonucu elde edilen koordinatların farkları hem araştırılan objedeki deformasyonu hem de ölçülerdeki hataları yansıtır. Bu nedenle periyotlar arasındaki koordinat farkları, istatistik yöntemler vasıtasıyla test edilerek deformasyon olup olmadığı araştırılır. Bu modelde tüm sistemin bir kez ölçülmesi sırasında noktaların sabit kaldığı varsayılır.

Statik modeller baskı ve gerilme arasındaki fonksiyonel ilişkiyi tanımlamaktadırlar. Baskı, objeye etkiyen kuvvetler ya da yükler ve objenin geometrik tepkisi olarak sonuçlanan gerilmeden kaynaklanmaktadır. Statik modellerde zaman faktörü bariz bir şekilde dikkate alınmadığından, obje her iki gözlem periyodunda da yeterince dengede olmak zorundadır. Yeterince dengede demek, objenin gözlenen zaman boyunca hareketsiz olması demektir. Periyotlar arasındaki davranış bilinmeyen olarak kalır ve statik modelin konusu değildir. Objenin hareketleri ve şeklindeki değişimler zamanın değil yalnızca yüklerin bir fonksiyonu olarak dikkate alınmaktadır. Statik modeller için objenin fiziksel ve geometrik yapısı, malzeme parametreleri ve diğer karakteristik özellikleri bilinmelidir ve bunlar objenin baskı-gerilme ilişkisini ifade eden diferansiyel denklemler ile formüle edilmelidir. Eğer köprü, sütun vb. gibi yapıların yük taşıma kapasiteleri test edilecekse, statik modeller jeodezide yaygın olarak kullanılmaktadır.

3.2. Kinematik Modeller

Otomatik ölçme yöntemleri kullanılmaya başlanınca, deformasyon sürecinin zamansal seyri değerlendirme modellerinde daha fazla dikkate alınmaktadır. Bu modeller mekan ve uzayda obje hareketlerinin ve objenin şeklindeki değişimlerin araştırılması ve yorumlanması için kısıtlanırsa, objenin iki farklı zaman noktasındaki durumunun geometrik karşılaştırmasından ibaret olan uyum modellerindeki klasik deformasyon analizinin genişletilmesine imkan tanıyan kinematik modellerden bahsedilebilir.

Kinematik modeller periyot sayısı fazla olduğunda veya yarı-sürekli durumlarda söz konusu olurlar. Yıllık bileşenlerin yanı sıra istasyon konumları ve hızları ile bir yersel referans uygulama sisteminin güncel modellemesi kinematik model için tipik bir örnektir. Kinematik modeller objeye etkiyen kuvvetleri içermez. Sadece deformasyonları yer değiştirme hızları ve ivmeleri aracılığıyla tanımlarlar (Caspary, 2000). Kinematik modellerle deformasyon analizinde zaman boyutunun dikkate alınmasıyla uyum modellerinin aksine hem teşhis hem de tahmin imkanı vardır. Bu modeller kontrol noktası hareketlerinin hızlarını ve hatta çiftli farkları oluşturarak ivmelerini tahmin ederler (Yalçınkaya, 2003).

Kinematik modellerin amacı deformasyona neden olan yükleri dikkate almadan nokta hareketlerinin uygun bir tanımını zamana bağlı fonksiyonlar ile bulmaktır. Polinomal yaklaşımlar, özellikle hızlar, ivmeler ve harmonik fonksiyonlar yaygın bir şekilde uygulanmaktadır (Welsch ve Heunecke, 2001; Acar ve ark., 2008).

Başlangıç periyodu t_1'de mekan-zaman koordinatları x_1 ile bir sonraki periyot t_2'deki ilgili x_2 koordinatları arasındaki ilişki zamana bağlı olarak:

$$\begin{aligned} x_2 &= x_1 + \frac{dx}{dt}(t_2 - t_1) + \frac{1}{2}\frac{d^2x}{dt^2}(t_2 - t_1)^2 + \cdots \\ &= x_1 + \dot{x}\Delta t + \frac{1}{2}\ddot{x}\Delta t^2 + \cdots \end{aligned} \tag{3.1}$$

$\dot{x}$ ve $\ddot{x}$ noktaların Δt zaman aralığındaki ortalama hız ve ivmesidir ve hesaplanacak olan bilinmeyen parametreleri temsil etmektedirler. Bu parametreler sürecin değerlendirilmesiyle alakalıdır.

Buna ilişkin doğrusallaştırılmış gözlem denklemi:

$$\ell + v = \left| a^T \quad a^T \Delta t \quad \frac{1}{2} a^T \Delta t^2 \right| . \begin{vmatrix} \hat{x} \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{vmatrix} \tag{3.2}$$

Bu sistem bir nevi regresyon analizine benzemektedir. Temel regresyon analizinin açılımındaki ardışık dengeleme algoritmaları KALMAN-filtreleme tekniklerine geçiş olan önemli bir matematiksel araçtır ve araştırılan sürecin durumunu güncellemek ve tahmin etmek için ardışık gözlemleri kullandırmaya uygundur.

3.3. Dinamik Modeller

Dinamik modellemenin konusu zaman ve kuvvetler açısından objenin davranışının uygun bir şekilde tanımlanmasıdır. Bir dinamik model statik ve kinematik modellerin kabiliyetlerini birleştirir. Bu modeller tamamıyla dinamik sistemlerin gerçekliğini tanımlamayı hedefledikleri için en genel ve en kapsamlı modellerdir. Objenin hareketleri ve distorsiyonları yük ve zamanın her ikisinin de bir fonksiyonu olarak dikkate alınmaktadır. Bu, baskıların ve tepkilerin zamanla değiştiğini ifade etmektedir. Statik durumun aksine obje sürekli olarak hareketlidir. Böyle bir durumun izlenmesi sürekli ve otomatik gözlem yöntemlerini gerektirmektedir. Dinamik modeller parametrik ya da parametrik olmayan modeller olabilirler. Parametrik olmayan modeller için diğer tanımlar yaklaşım modelleri veya istatistiksel, deneysel ya da ampirik modeller ifadeleridir; parametrik olmayan modellere uygulanan değerlendirme ‘işlevsel yaklaşım’ olarak adlandırılmaktadır. Deformasyon analizine uygulanan dinamik modellerin neredeyse tamamı parametrik olmayan modellerdir.

Değinilen bütün deformasyon modelleri arasında, ikinci bir nedensel yaklaşım olan dinamik model hem zamansal evrimi hem de etkiyen kuvvetleri aynı anda dikkate aldığı için en kapsamlı modeldir. Değişken yükleme etkileri ya da bir karayolu köprüsünün rüzgar ve trafik yükünden kaynaklanan yüksek frekanslı titreşimleri nedeniyle Dünya’nın şeklindeki değişimler bu duruma açıklayıcı örneklerdir.

3.4. Uyum Modelleri

Uyum veya benzerlik modelleri ya da deformasyon analizinde klasik jeodezik yaklaşım, uzay alanında ‘zaman’ ve ‘yükler’ ile açıkça ilgili olmadan karakteristik noktalar ile temsil edilen bir objenin iki farklı periyottaki durumu arasında tamamen geometrik bir karşılaştırma sağlar. Analizin ilk aşaması istatistiksel testler ışığında bir objenin geometrik benzerliğinin incelenmesidir. Belirlenen deformasyonlar ondan sonra ya lokal, ya da global olarak analiz edilir. Yerel deformasyonlar birçok durumda tek nokta hareketleri, bölgesel veya rijit yapı hareketi, affin distorsiyonları ya da diğer yaklaşım fonksiyonları ile genelleştirilebilen ve tanımlanabilen global deformasyonlardan oluşur.

Bir uyum modelinde farklı zaman noktalarındaki obje durumları bütün ağ noktalarının bir alt kümesinin ‘uyumu’ veya ‘benzerliği’ sıfır hipotezine ilişkin bir lineer hipotez testi vasıtasıyla karşılaştırılmaktadır. Sıfır hipotezi reddedilirse, fark ve dolayısıyla deformasyon anlamlı olarak düşünülmektedir. Ardından, stabil ve stabil olmayan noktalar açısından en uygun deformasyon modelini belirlemek için analiz başlatılmaktadır. Buna ek olarak, rijit yapı hareketi ve affin gerilme parametreleri periyotlar arasında benzer konum sapmalarına sahip olan nokta grupları için kestirilebilmektedir. Uyum modeli tek periyot sonuçlarının fonksiyonel bir entegrasyonuna imkan vermemektedir. Dolayısıyla, bir deformasyon sürecinin öngörü veya tahminine, belli bir ölçüde teşhisine olanak sağlamaktadır. Uyum modelleri farklı zamanlardaki obje durumlarını basit bir şekilde karşılaştırmak için barajlar gibi yapıların uzun süreli izlenmesinde, kalite kontrolünde ya da periyotların sayısı oldukça az olduğunda sıklıkla kullanılmaktadırlar.

Değerlendirme modelinin çıktı değerleri x, objeyi tanımlayan noktaların belirli zamanlardaki koordinatlarıyken tek girdi değerleri jeodezik gözlemler ℓ, dir. 1960’lardan beri, nokta koordinatlarının sıfır periyodu veya başlangıç periyoduna göre benzerliği ya da uyumu istatistiksel olarak araştırılır. Yöntem, koordinatların öncekilerle eşit olması gerektiği şeklinde ifade edilen bir sıfır-hipotezi şeklindedir. Bu sıfır-hipotezi klasik en küçük kareler (EKK) GAUSS-MARKOV modeline dahil edilir:

$$\begin{aligned} &\mathrm{E}\{\ell\} = \mathrm{A}x, \\ &\mathrm{H}_0 : \mathrm{H}x = 0, \\ &\mathrm{Cov}\{\ell\} = \sigma_0^2 \mathrm{Q} = \sigma_0^2 \mathrm{P}^{-1} \end{aligned} \tag{3.3}$$

Önemli olan nokta, ortalama farkın istatistiksel testidir (global uyuşum testi);

$$\Theta = \sqrt{\frac{d^T Q_{dd}^{+} d}{h}} \, , h = rk(Q_{dd}) \tag{3.4}$$

(d koordinat farkları vektörü, Q_{dd} farkların kofaktör matrisi) olasılık ilişkisine dayanarak;

$$P\left\{\frac{\Theta^2}{s_0^2} \leq F_{h,f,1-\alpha} \mid H_0\right\} = 1 - \alpha \tag{3.5}$$

elde edililir. Temelde doğal diferansiyel denklem $\dot{x} = 0$ test edilmektedir.

Global test herhangi bir anlamlı koordinat farkı olup olmadığını tespit etmektedir. Herhangi bir anlamlı fark varsa sonraki adım deformasyonların yerelleştirilmesidir. İhtiyaç olursa, nokta kümelerinin hareketleri rijit yapı hareketi veya zorlanma analizi ya da diğer sistematik modeller ile genelleştirilebilmektedir. Bu tür bir deformasyon analizi elde edilen nokta hareketi deseninin deformasyon modeli olarak isimlendirildiği geleneksel deformasyon analizi olduğundan geometrik deformasyon analizi nokta koordinatlarının eşitliği (3.3) hipotezine dayandırılmakta, deformasyon modeli de benzerlik veya uyum modeli olarak adlandırılmaktadır.

Uyum modeli de dahil olmak üzere deformasyon modellerinin zaman, etkiyen kuvvetler ve obje durumu açısından sınıflandırılması çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. 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		Modellenmez
Objenin Durumu	Yükler altında yeterince dengede	Sürekli hareket halinde	Sürekli hareket halinde	Yeterince dengede

4. GNSS TEKNİĞİ İLE DEFORMASYONLARIN İZLENMESİ

Amerika Birleşik Devletleri'nin Küresel Konumlandırma Sistemi GPS, Rusya'nın GLONASS'ı (Global Navigation Satellite System), Avrupa Birliği'nin Galileo'su ve Çin'in Beidou/COMPASS olarak adlandırılan sisteminin yanı sıra çeşitli bölgesel uydularla konum belirleme sistemlerini içeren Uydularla Küresel Konum Belirleme Sistemleri (GNSS), yeryüzüne her türlü hava koşullarında gönderdikleri sinyalleriyle son derece hassas ve sürekli konum belirleme tekniği olarak tanımlanabilir. GNSS'in bu özellikleri oldukça geniş uygulama alanları ve potansiyelinin olduğuna işaret etmektedir (Jin ve ark., 2014). Bu uygulama alanları:

- Konum belirleme, navigasyon ve zamanlama,
- Hassas yörünge belirleme,
- Akıllı ulaşım sistemleri,
- Yersel referans ağları,
- Gerçek zamanlı aktif kontrol ağları (RTK CORS),
- Plaka hareketleri ve yer kabuğu deformasyonlarının izlenmesi,
- Deformasyon ölçmeleri (baraj, köprü, viyadük vb.),
- Konum tabanlı hizmetler,
- Kadastral, fotogrametrik ve hidrografik ölçmeler

olarak sıralanabilir.

GNSS ile konum belirlemenin temeli uydu-alıcı arası uzaklıkların hesaplanarak bir uzayda geriden kestirme probleminin çözülmesine dayanmaktadır. Yani GNSS sinyalleri üzerinde azimut ve yüksekliğe ilişkin bilgiler bulunmamaktadır. GNSS alıcısının gerçekleştirdiği temel işlem tüm yönlerden gelen uydu sinyallerini kaydetmek ve bunları kullanarak uydu-alıcı arası uzaklıkların hesaplanmasıdır (Kahveci ve Yıldız, 2016).

Düşük maliyeti ile hızlı ve hassas konum bilgisi sağlaması sayesinde GNSS, günümüzde yüksek doğruluklu jeodezik ağların oluşturulmasına etkin bir şekilde katkı sağlamaktadır. Her türlü iklim koşullarında ölçüm yapabilmeye imkan sağlayan GNSS teknikleri ile yüksek doğrulukta üç boyutlu konum bilgisi elde edilebilmektedir. Geleneksel tekniklere göre GNSS tekniği ölçüm doğruluğunu ve üretkenliği artıran bir teknik olarak ön plana çıkmaktadır.

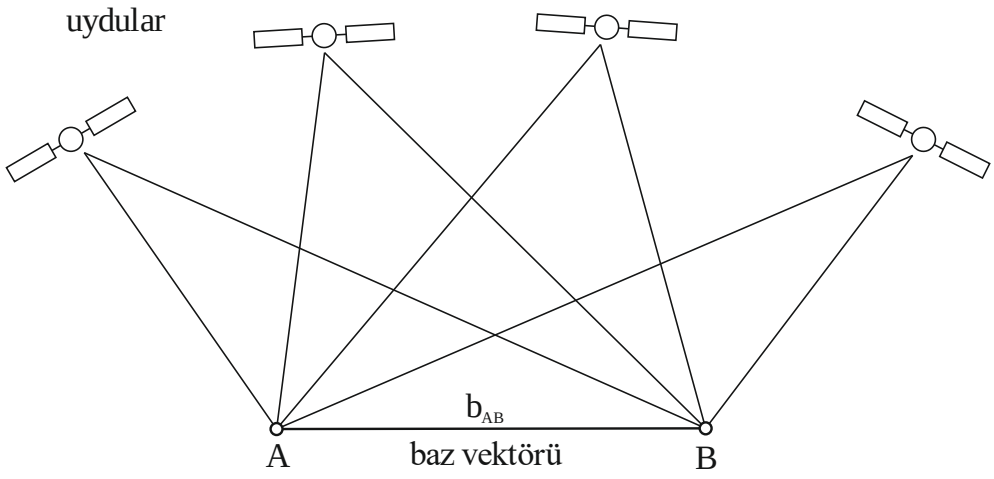
GNSS ile iki temel konum belirleme yöntemi kullanılmakta olup, bunlar mutlak konum belirleme ve göreli konum belirlemedir. Mutlak konum belirlemede konum tahmini doğrudan uydu yörüngelerine göre belirlenmektedir. Göreli konum belirlemede ise en az iki tane eş zamanlı çalışan GNSS alıcısı bulunmaktadır.

4.1. GNSS ile Göreli Konum Belirleme

Göreli konum belirlemenin amacı, aynı anda farklı noktalardaki alıcılarla yapılan GNSS ölçülerinin farklarını alarak hata kaynaklarını azaltmak veya ortadan kaldırmaktır. Göreli konum belirlemede en iyi doğruluklara taşıyıcı faz gözlemleriyle ulaşılmaktadır. Göreli konum belirleme başlangıçta, arazide yapılan ölçüleri büroda uygun GNSS yazılımları ile değerlendirmek (post-proses) amacıyla tasarlanmıştır. Daha sonra, bu metot özellikle haritacılık ve yer bilimlerinde aktif bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde, baz uzunluklarının gerçek zamanlı hesaplanmasını sağlayan ve real-time kinematik tekniğinin çıkmasına yol açan gerçek zamanlı veri transferi de düzenli bir şekilde kullanılmaktadır.

4.1.1. Göreli konum belirlemede temel düşünce

Göreli konum belirlemede temel mantık, bilinmeyen bir noktanın koordinatlarını uygulamalarda sabit olarak alınan bilinen bir noktaya göre belirlemektir. Diğer bir deyişle, göreli konumlandırma iki nokta arasındaki vektörün belirlenmesini amaçlamaktadır ve bu vektör genellikle baz vektörü olarak isimlendirilmektedir (Şekil 4.1). Şekil 4.1'de A koordinatı bilinen referans noktasını, B koordinatı bilinmeyen noktayı ve b_{AB} baz vektörünü göstermektedir.



Şekil 4.1. Göreli konum belirlemede temel düşünce

Nokta koordinatlarını ifade eden X_A, X_B arasındaki ilişki;

$$X_B = X_A + b_{AB} \tag{4.1}$$

Şeklinde formüle edilebilir ve baz vektörü b_{AB} nin bileşenleri;

$$b_{AB} = \begin{bmatrix} X_B - X_A \\ Y_B - Y_A \\ Z_B - Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_{AB} \\ \Delta Y_{AB} \\ \Delta Z_{AB} \end{bmatrix} \tag{4.2}$$

ile ifade edilmektedir. Eşitlik 4.2'de X_A, X_B, Y_A, Y_B, Z_A, Z_B noktaların koordinatlarını, ΔX_{AB}, ΔY_{AB}, ΔZ_{AB} koordinat farklarını ifade etmektedir. Göreli konum belirlemede referans alınan noktanın koordinatları verilmelidir ve bir kod farkı çözümüyle gerçek değere yaklaştırılmalıdır. Genellikle bu koordinatlar GNSS veya diğer metotlar kullanılarak hassas bir şekilde daha önceden belirlenmiş olan koordinatlardır.

Göreli konum belirleme kod farkı gözlemleriyle veya faz farkı gözlemleriyle gerçekleştirilebilir. Kod gözlemleriyle elde edilen çözümlerin duyarlıkları düşüktür. Mühendislik hizmetleri için ihtiyaç duyulan çok daha duyarlı sonuçlar faz farklarına dayalı çözümler ile elde edilmektedir. Göreli konum belirlemede hem referans noktasında hem de koordinatları bilinmeyen noktada eş zamanlı ölçü yapılmaktadır. Faz farkı gözlemleri kullanılarak yapılan göreli konum belirlemede dört farklı yöntem mevcut olup bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir:

- Statik Göreli Konum Belirleme

- Pseudokinematik Göreli Konum Belirleme
- Kinematik Göreli Konum Belirleme
- Real-time Kinematik Göreli Konum Belirleme

4.1.1.1. Statik göreli konum belirleme

Statik konum belirleme yöntemi jeodezik uygulamalarda en yaygın olarak kullanılan konum belirleme yöntemidir. Bu yöntemde gerekli ölçü süreleri baz uzunluğuna, görünür uydu sayısına, taşıyıcı frekans sayısına ve uydu geometrisine bağlıdır. Doğruluk, baz uzunluklarıyla ilişkilidir ve 100 km'ye kadar olan ve hatta daha uzun bazlarda 1 ppm (parts per million) ile 0.1 ppm arasındadır.

Statik göreli konum belirleme yöntemi birden fazla alıcı tarafından aynı anda ölçüm yapan istasyonlar ve bu istasyonlar arasındaki baz vektörlerinin elde edilmesini sağlayan posproses işlemi olarak tanımlanabilir. Bu yöntem hızlı başlangıç belirsizliği çözme tekniklerine dayanan hızlı statik ölçü yöntemini de kapsamaktadır. Bu teknikler genellikle tüm frekanslarda kod ve taşıyıcı faz ölçülerinin kombinasyonunu kullanmaktadır. Yöntemin 20 kilometrelik bazlarla sınırlanmasıyla santimetre altı seviyede doğruluklara ulaşılabilmektedir (Wellenhof ve ark., 2008).

Statik ölçüler için standart oturum süreleri (özellikle 20 km'ye kadar olan bazlarda) çizelge 4.1'de verilmiştir (Wellenhof ve ark., 2008). Bu değerler dört uydudan sinyal alınmasına, iyi uydu geometrisine ve normal atmosferik koşullara bağlıdır. İlave bir uydudan daha sinyal alınması oturum sürelerini %20 oranında kısaltabilmektedir.

Statik yöntemin belli başlı uygulama alanları yerkabuğu hareketlerinin belirlenmesi, çok uzun bazların söz konusu olduğu plaka hareketlerinin belirlenmesi gibi bilimsel amaçlı çalışmalar, lokal kontrol ölçmeleri, foto-kontrol ölçmeleri, sınır ölçmeleri ve deformasyon ölçmeleri gibi yüksek doğruluk gerektiren alanlardır.

Çizelge 4.1. Statik ölçüler için oturum süreleri

Alıcı	Geleneksel statik	Hızlı statik
Tek-frekanslı	30 dk + 3 dk/km	20 dk + 2 dk/km
Çift-frekanslı	20 dk + 2 dk/km	10 dk + 1 dk/km

4.1.1.2. Pseudokinematik göreli konum belirleme

B.W. Remondi tarafından geliştirilen pseudokinematik konum belirleme yöntemi, statik ile kinematik arasında bir yöntem olması nedeniyle aralıklı statik veya tekrarlı ölçü yöntemi olarak da adlandırılmaktadır. Bu ölçmeler daha az oturum süresi gerektirir fakat bir "nokta çifti" iki defa ölçülmelidir. Bu yöntemde beş dakika boyunca bir çift noktada ölçü yapılır, diğer noktalara ilerlenir ve sonunda başlangıç ölçüsünden yaklaşık bir saat sonra ilk nokta çiftine dönülerek 5 dakikalık bir ölçü daha yapılır. Tekrarlı ölçü yönteminde santimetre altı doğruluk elde edilebilmektedir. Ölçülerin başlangıç ve bitişi arasında geçen zamanda uydu geometrisindeki değişikliklerden dolayı tam sayı kayıklıkları sabitlenebildiği için yüksek doğruluklara ulaşılabilmektedir. Bir noktadan diğerine ilerlenirken alıcıların uydu izlemeye devam etmesi zorunluluğu yoktur. Yöntemin dezavantajı bölgenin tekrar gezilmesinin gerekmesidir. Bu yöntem özellikle, zayıf uydu geometrisi olduğu durumlarda ya da tek frekanslı alıcılarla ölçü yapıldığında uygun bir yöntemdir.

4.1.1.3. Kinematik göreli konum belirleme

Kısa zamanda çok sayıda noktanın konumu belirlenecekse kinematik konum belirleme yöntemi en kullanışlı yöntemdir. Dezavantajı, ölçü başlatıldıktan sonra en az dört uydudan kesintisiz bir şekilde sinyal alınmasının gerekmesidir.

Yarı kinematik veya dur-git tekniği, bir güzergah boyunca sabit noktaların konumlarını belirlemek için bir alıcının durdurulması ve taşınması ile tanımlanabilir. Bu yöntemin en önemli özelliği durulan noktalarda birkaç epokluk ölçü yapılması ve ortalamalarının alınmasıdır. 20 km'ye kadar olan bazlarda santimetre seviyesinde göreli konum doğruluklarına ulaşılabilmektedir.

Kinematik yöntem, ölçüye başlamadan önce faz belirsizliklerinin çözülmesini gerektirir. Başlangıç durgun veya hareketli olarak yapılabilir. Başlangıç tamsayı belirsizliğinin çözümü durgun haldeki bir alıcıyla daha hızlı gerçekleştirilebilmektedir. Çift frekanslı alıcılar 20 km'ye kadar olan bazlarda belirsizlikleri kinematik olarak çözmek için 1-2 dakikaya ihtiyaç duyarlar (Wellenhof ve ark., 2008). Başlatma işleminden sonra sinyal kaybı olmamalı, aksi halde başlatma işlemi yeniden yapılmalıdır. Üç frekanslı alıcılar belirsizlikleri anında, yani epok epok çözmeye imkan tanmaktadırlar.

Kinematik göreli konum belirlemede hatalı belirsizlik çözümü riskini azaltmak için birkaç epoka ilişkin belirsizliklerin çözülmesi gerekmektedir.

4.1.1.4. Real-time kinematik göreli konum belirleme

Sabit istasyondan geziciye gerçek zamanlı faz ölçüsünün iletilmesinde, belirsizlikler de gerçek zamanlı olarak çözülebilir ve bu yöntem RTK (Real-Time Kinematik) yöntemi olarak adlandırılmaktadır.

Hata kaynaklarının korelasyonsuzluğu göreli konum belirleme yöntemlerini 20 kilometreyle sınırlamaktadır. Geniş alan RTK (WARTK) yöntemi iyonosferik düzeltmeler uygulayarak hata kaynaklarının hızlı bir şekilde korelasyonsuz hale gelmesini önlemektedir. Bu yolla iyonosferik etki önemli ölçüde azaltılmakta ya da elemine edilmekte ve belirsizliklerin tamsayı yapısı korunmaktadır. Ayrıca bu özellik, 400 km'ye kadar olan baz uzunluklarına rağmen belirsizliklerin çözülebilmesini ve santimetre altında doğrulukların elde edilebilmesini sağlamaktadır. RTK'ya benzer bir şekilde WARTK'da da çift frekanslı alıcıları kullanıldığında çözümün yakınsaması birkaç dakika zaman almaktadır. Üç frekanslı alıcılar, geleneksel RTK ölçmelerinde 20 km'ye kadar ve WARTK ölçmelerinde ise 400 km'ye kadar olan bazlarda belirsizlikleri anında çözmeyi sağlamaktadırlar (Wellenhof ve ark., 2008).

RTK tekniklerinin uygulama alanları inşaat, arazi ölçmeleri için dayanak noktaları, büyük ölçekli harita yapımı için nokta sıklaştırılması amacıyla statik yöntemle belirlenen nirengilerin arasının sıkılaştırılması gibi alanlar olarak sıralanabilir.

4.1.2. Göreli konum belirlemede ulaşılabilen doğruluklar

Tek frekanslı alıcılar kullanıldığında göreli konum belirleme yöntemlerinin topluca kullanılması en iyi çözümdür. Örneğin, statik ve pseudokinematik yöntemler, geniş bir kontrol ağı oluşturmak ve köprü gibi yapıların her iki tarafında noktalar belirlemek için kullanılabilmektedir. Kinematik ölçmeler, statik noktaların kontrol noktaları olarak kullanılmasıyla, jeodezik noktaların büyük kısmının koordinatlarını belirlemek için kullanılabilmektedir.

Göreli (statik) konum belirleme birkaç bin kilometre gibi çeşitli uzunluklara varan bazlar üzerinde uygulanabilmektedir. Ancak birçok durumda baz uzunlukları 20 km'yi aşmamaktadır. Bu tür bazlar için yatayda (1σ seviyesinde) erişilebilen doğruluklar çizelge

4.2'de görülmektedir. Yükseklikteki doğruluk 1.5 ila 2 kat daha kötüdür. Bu doğruluklar, normal iyonosferik koşullar altında ve uygun geometriye sahip 5 uydudan sinyal alan tek frekanslı alıcılara göre verilmiştir (Wellenhof ve ark., 2008). Buna ilaveten belirsizliklerin de çözüldüğü kabul edilmektedir. Statik yöntemde, oturum süreleri çift ve üç frekanslı alıcılarla önemli ölçüde azaltılabilir; ancak, konum doğruluğu 20 km'ye kadar olan mesafeler için iyileşmemektedir. Daha uzun bazlar için, iyonosferik hataları azaltmak amacıyla çift frekanslı alıcılar gereklidir. 100 km'lik bazlar için göreli doğruluk 0.1 ppm seviyesindedir.

Çizelge 4.2. Göreli konum belirleme doğruluğu (Wellenhof ve ark., 2008)

Yöntem	Yatay doğruluk
Statik	5 mm + 0.5 ppm
Kinematik	5 cm + 5ppm

Statik yöntemle elde edilen doğruluklar milimetre seviyelerinde olduğu için deformasyon ölçmelerinde statik ölçü yönteminin kullanılması uygun olmaktadır. Bu yötemle arazide yapılan ölçmeler ofis ortamında değerlendirme işlemlerine (post-proses) tabi tutulduktan sonra nokta koordinatları elde edilmektedir.

4.2. GNSS Ölçülerinin Değerlendirilmesi

GNSS ölçülerinin değerlendirilmesinde ilk aşama genellikle ikili formatta alıcıların hafızasında depolanan ölçülerin, değerlendirme yazılımı yüklü olan bir bilgisayarda açılmış olan ilgili proje içerisine aktarılması (download) işlemidir. Alıcıların hafızasında depolanan veriler içerisinde hem ölçüler hem de navigasyon mesajı ve ek bilgiler de bulunmaktadır. Pek çok GNSS üreticisi ölçüleri aktarmak için bir veri yönetim sistemi tasarlamıştır.

Verilerin aktarılması sırasında ikili sistemdeki veriler bilgisayardan bağımsız ASCII formatına dönüştürülebilmesine rağmen, yine de alıcıya bağımlı bir formattadırlar. Ayrıca, her bir GNSS değerlendirme yazılımı kendine özgü bir formata sahiptir ve bu durum değerlendirme işlemi farklı bir program türü ile yapılacağı zaman verilerin yazılımdan bağımsız bir formata dönüştürülmesini gerektirmektedir.

Alıcıdan bağımsız bir GNSS veri formatı, veri değişimine imkan tanımaktadır. GNSS uygulamalarında veri değişimi alıcıdan bağımsız veri değişim formatıyla (RINEX: Receiver Independent Exchange Format) gerçekleştirilmiştir. Bu format ilk olarak GPS

verileri için 1989'da tasarlanmıştır ve Gurtner ve Mader (1990) tarafından yeni bir versiyonda üretilmiştir. Daha sonra bazı küçük değişiklikler yapılmış ve 1997'de bu format GLONASS gözlemleri de dikkate alınarak genişletilmiştir. 2006 yılı itibariyle RINEX 3.0 en son sürümüdür (Wellenhof ve ark., 2008). Ancak, GNSS alıcısının özelliklerine bağlı olarak arazide toplanan verilerin GPS ve GLONASS verilerinden başka veriler içermemesi durumunda RINEX 3.0 formatında veri boşlukları oluşmakta ve bu nedenle ölçülerin değerlendirilmesinde genel olarak RINEX 2.10 veya 2.11 formatları kullanılmaktadır.

RINEX veri formatı, "ssssdddf.yyt" dosya adı kuralını kullanmaktadır. Dizinin ilk dört karakteri (ssss) nokta adı veya nokta numarasını, sonraki üç karakter (ddd) yılın gününü, sekizinci karakter (f) ise gözlem grubu numarasını ifade etmektedir. Dosya uzantısındaki ilk iki karakter (yy), ölçü zamanındaki yılın son iki basamağını ve son karakter (t) dosya türünü belirtmektedir. Bu dosya türü, bir gözlem dosyası (O), bir GPS (N), GLONASS (G) veya Galileo navigasyon mesajı dosyası, bir meteorolojik (M) veri dosyası, karma bir GNSS navigasyon mesajı dosyası olabilir.

Şu anda, RINEX en tercih edilen formattır. Sonuç olarak tüm alıcı üreticileri alıcıya bağımlı formatların RINEX'e dönüşümü için yazılım sağlamaktadırlar.

4.2.1. GNSS ölçülerinin değerlendirilmesinde kullanılan yazılımlar

GNSS ölçülerinin değerlendirilmesinde kullanılan yazılımları ticari amaçlı yazılımlar ve bilimsel amaçlı yazılımlar şeklinde ikiye ayırmak mümkündür. Ticari amaçlı yazılımlar kullanıcılara pratik çözümler sunan yazılımlardır. Bu yazılımlar genelde satın alınan alıcılarla birlikte alıcı üreticisi firmalar tarafından sağlanmaktadırlar. Her bir GNSS alıcısı, gözlem verilerini kendine has bir formatta depoladığı için ticari amaçlı yazılımların geneli alıcı üreten firmalarla özdeşleşmiştir. Bazı firmalar ve değerlendirme yazılımları çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Ticari amaçlı yazılımlar

Firma Adı	Yazılım Adı
Leica	Geo Office
Topcon	Topcon Tools
Trimble	Trimble Geomatics Office (TGO)
Ashtech	Ashtech Office Suite (AOS)
Spectra Precision	Gnss Solutions
Pentax Surveying	EZSurv

Bilimsel amaçlı yazılımlar yüksek doğruluk gerektiren plaka hareketlerinin belirlenmesi, hız alanlarının hesaplanması, ülke temel GNSS ağlarının kurulması, yersel referans sistemlerinin oluşturulması gibi amaçlarla kullanılmaktadır. Son yıllarda bu yazılımların da kullanımı kolaylaştırılarak ticari, bilimsel ve eğitim gibi tüm amaçlara hizmet etmesi sağlanmıştır. Çizelge 4.4'te bilimsel amaçlı yazılımlara ilişkin bilgiler sunulmuştur.

Çizelge 4.4. Bilimsel amaçlı yazılımlar (Kahveci ve Yıldız, 2016)

Yazılım Adı	Geliştiren Kurumlar
GAMIT/GLOBK	MIT (Massachusetts Institute of Technology), SIO (Scripps Instition of Oceanography), Harvard University.
BERNESE	AIUB (Astronomisches Institut Universitaet Bern)
GIPSY/OASISII	JPL (Jet Propulsion Laboratory, NASA)
GEONAP	University of Hannover
DIPOP	University of New Brunswick
MSODP	University of Texas
MICROCOSM	Van Martin Systems
PAGE5	NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)

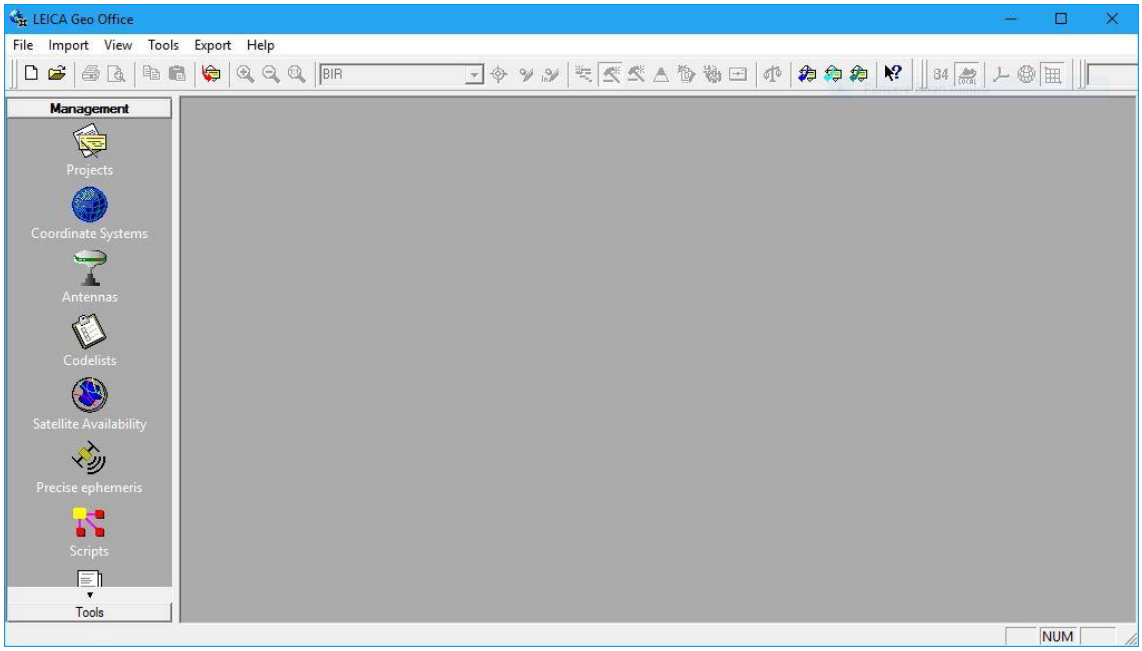
Bilimsel amaçlı yazılımlarda faz başlangıç belirsizliklerinin çözümü, modellemeler, faz kesikliklerinin (cycle slip) giderilmesi, çeşitli istatistiksel analizler gibi uygulanan pek çok aşama ticari amaçlı yazılımlarda otomatik hale getirilmiştir. Bazı ticari amaçlı yazılımlarda da iyonosfer, troposfer ve yer dönme parametrelerine ilişkin modellemeler bulunmaktadır. Bu tür ticari yazılımlar bilimsel çalışmalarda da kullanılabilmektedir (Kahveci ve Yıldız, 2016).

4.2.1.1. Leica Geo Office 7.0 yazılımı

Leica Geo Office (LGO) 7.0 yazılımı Leica Geosystems firmasının geliştirdiği; arazide yapılan GNSS, total station ve nivo ölçülerini ofis ortamında değerlendirmek amacıyla kullanılan bir yazılımdır. LGO yazılımı Leica modeli GNSS alıcılarının ham verilerini ve ortak veri değişim formatı olan RINEX verilerini okuyabilmektedir. Yazılım hem GPS hem de GLONASS gözlemlerini değerlendirmeye imkan sağlamaktadır.

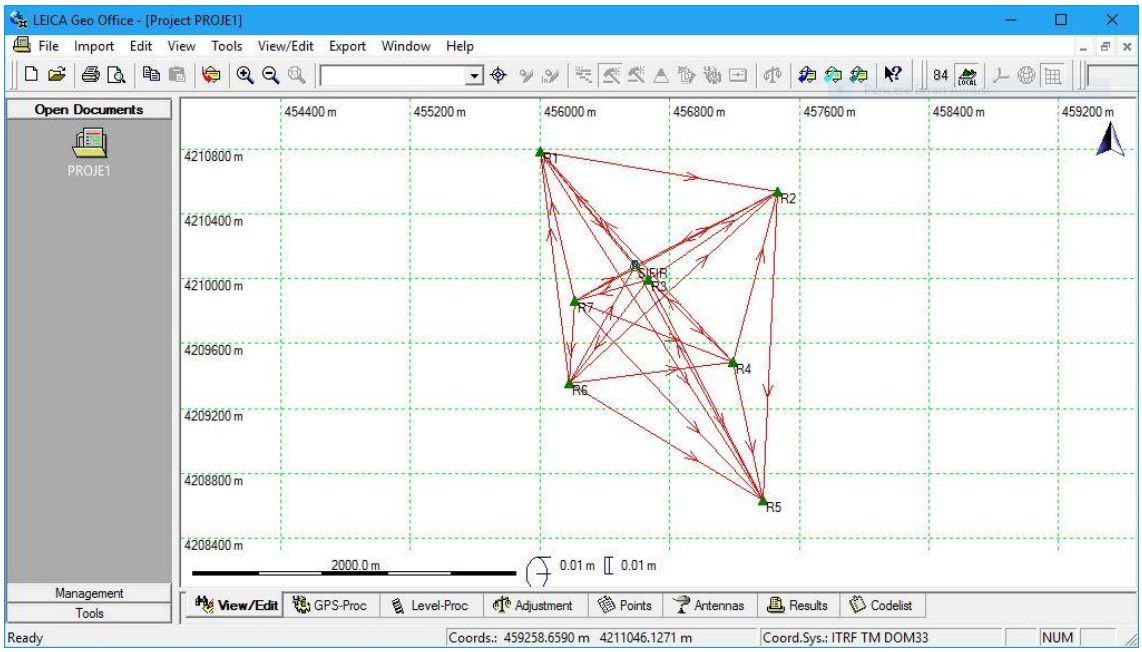
LGO 7.0 yazılımı, açılan bir proje içerisine aktarılan GNSS ölçülerini değerlendirmektedir. Yazılımın ana ekranında file (dosya), import (içe aktar), view (görünüm), tools (araçlar), export (dışa aktar) ve help (yardım) araç çubukları

bulunmaktadır (Şekil 4.2). Yeni bir proje açıldıktan sonra yazılım tarafından kullanıcıya sunulan program pencereleri view/edit (görünüm), GPS-proc, (GPS-proses) level-proc (Nivelman-proses), adjustment (dengeleme), points (noktalar), antennas (antenler), results (sonuçlar) ve codelist (kod listesi) pencereleridir.



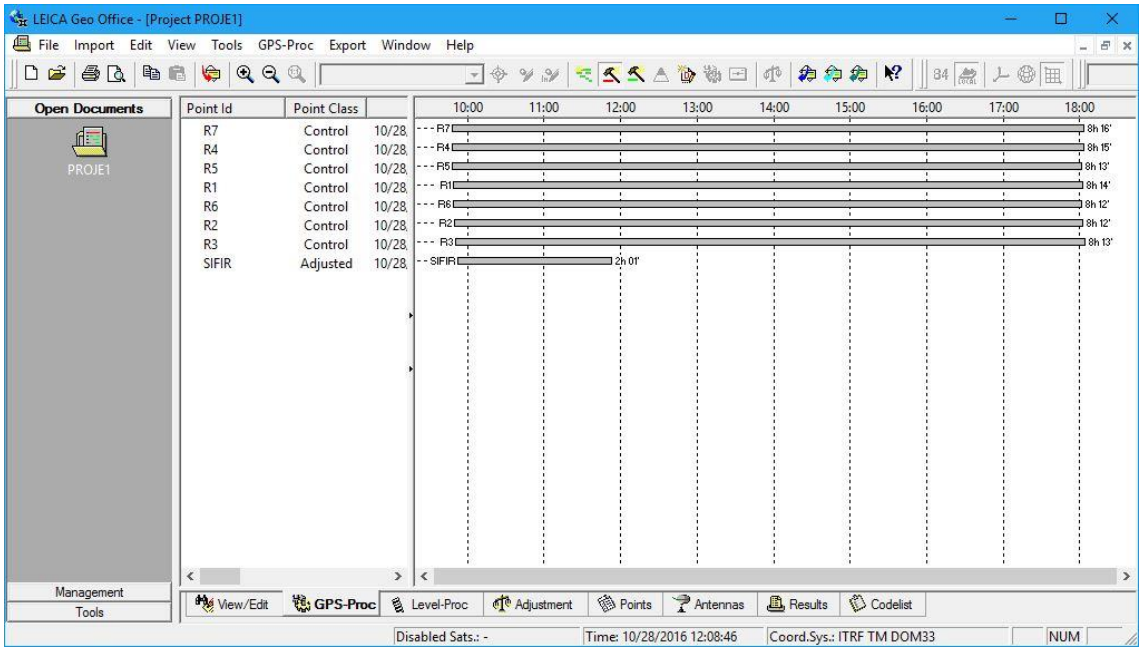
Şekil 4.2. Leica Geo Office yazılımı ana ekranı

Görünüm penceresi proje içerisine aktarılan ölçülere ilişkin noktaların ve ağın şeklinin ölçekli olarak görüntülendiği penceredir (Şekil 4.3).



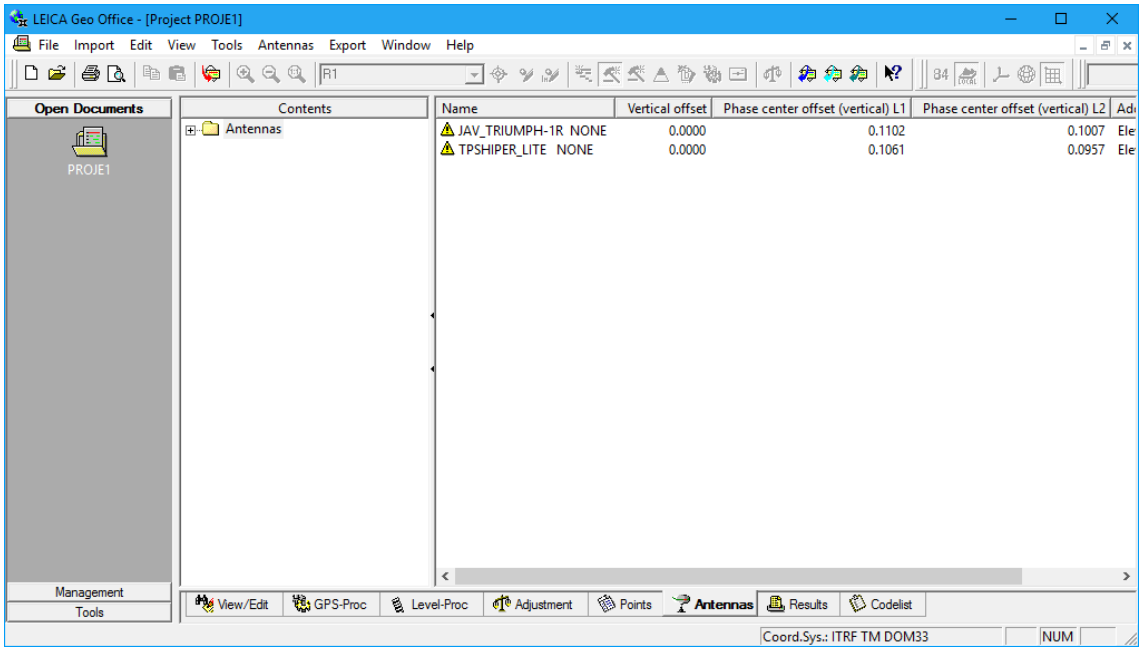
Şekil 4.3. Görünüm penceresi

GPS-proses penceresinde GNSS ölçüleri değerlendirilip baz çözümleri yapılmakta ve aynı zamanda değerlendirme parametreleri de ayarlanmaktadır (Şekil 4.4).



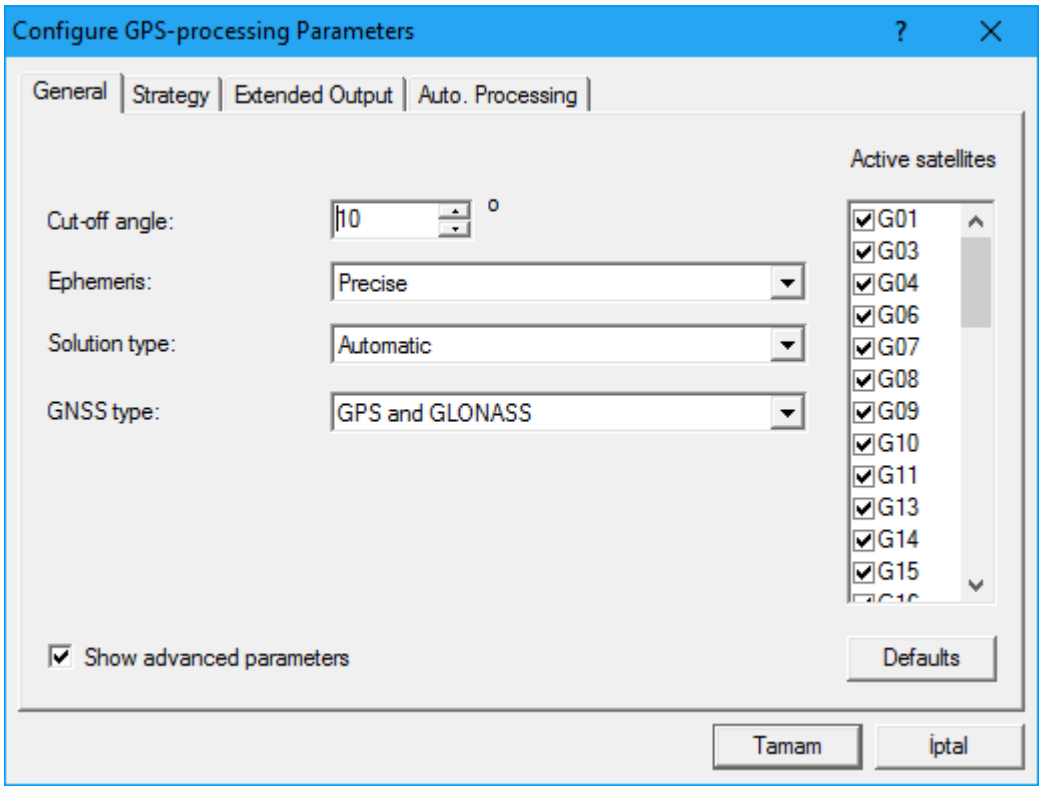
Şekil 4.4. GPS-proses penceresi

Antenler penceresi GNSS ölçülerinin yapıldığı antenlere ilişkin kalibrasyon bilgilerinin baz çözümlerinden önce projeye elle girildiği veya dosyadan aktarılarak alındığı penceredir (Şekil 4.5).

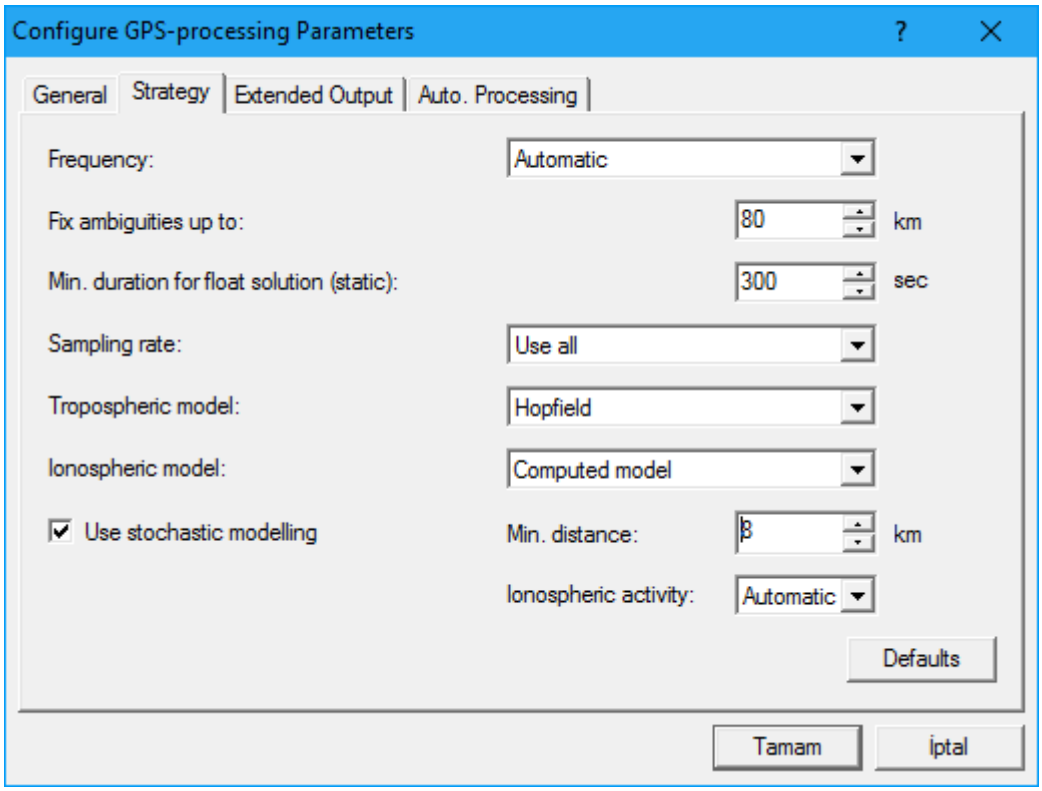


Şekil 4.5. Antenler penceresi

Ölçülerin değerlendirilmesinde hem yayın efemerisi hem de hassas efemeris dosyaları değerlendirme parametreleri penceresinden ilgili ayarlar yapılarak kullanılabilmektedir (Şekil 4.6). Değerlendirmede kullanılacak iyonosfer ve troposfer modelleri ile iyonosferik aktivite seviyesi de seçilebilmektedir (Şekil 4.7). Yazılımın kullanıcıya sunduğu iyonosfer modelleri; computed, klobuchar, standart ve global/regional modeller, troposfer modelleri ise hopfield, simplified hopfield, saastamoinen, essen and froome ve computed modellerdir. Yine değerlendirme parametreleri penceresinden iyonosfere ilişkin stokastik modelleme kullanıp kullanmama seçeneği de kullanıcının isteğine bağlı olarak ayarlanabilmektedir. Stokastik modelleme kullanıldığında kullanıcının seçimine sunulan iyonosferik aktivite ise automatic (otomatik), low (düşük), medium (orta) ve high (yüksek) olmak üzere dört farklı şekilde seçilebilmektedir.

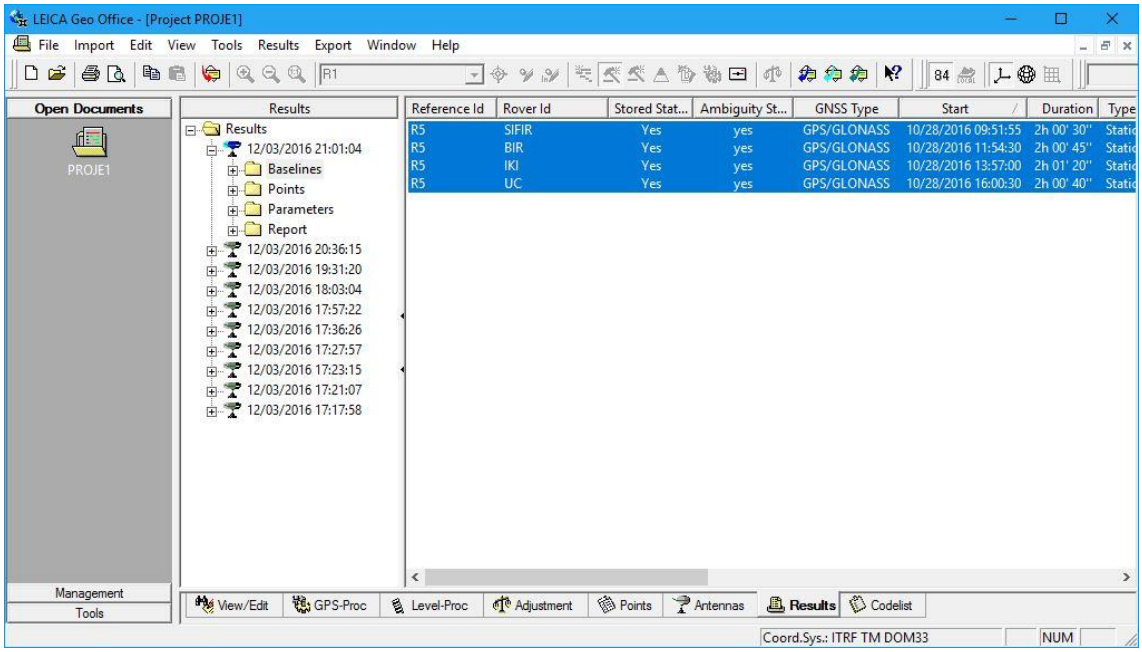


Şekil 4.6. Değerlendirme parametreleri penceresi



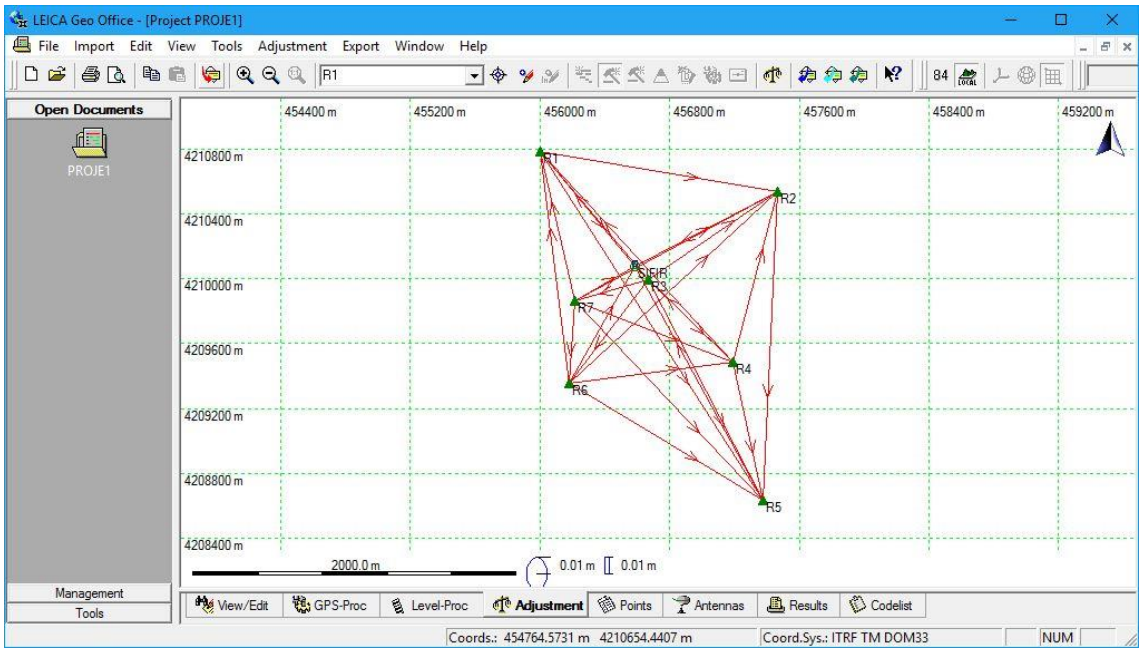
Şekil 4.7. Değerlendirmede kullanılacak stratejilerin ayarlanması

Değerlendirme parametreleri ve anten kalibrasyon bilgileri de ayarlandıktan sonra baz çözümleri yapılmaktadır. Baz çözümlerine ilişkin sonuçlar, sonuçlar penceresinde görüntülenmekte ve çözülen her bir baz bu pencere kullanılarak projeye kaydedilebilmektedir (Şekil 4.8). Baz çözümleri tamamlandıktan sonra oluşan kapalı lupların kapanma hataları isteğe göre manuel veya otomatik olarak hesaplanabilmektedir. Kapanma hataları incelenerek lupları oluşturan kenarlarda kaba hata olup olmadığı tespit edilebilmektedir.



Şekil 4.8. Sonuçlar penceresi

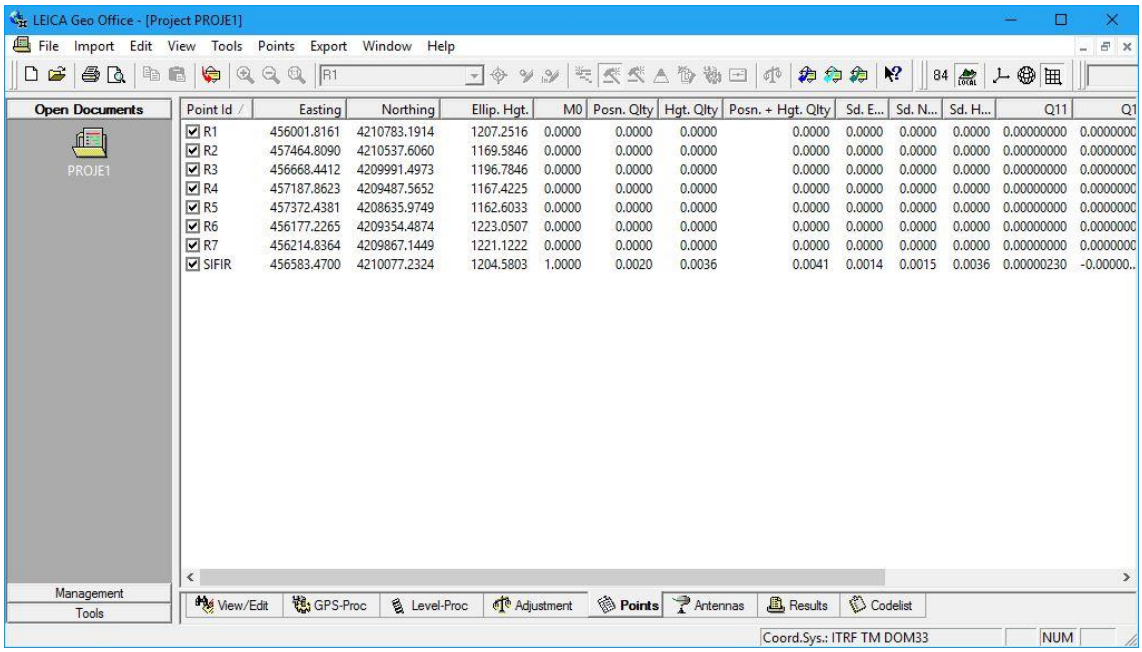
LGO yazılımı ile serbest dengeleme, dayalı dengeleme ve benzerlik dönüşümü de yapılabilmektedir. Lup kapanma hatalarının incelenmesinden sonra minimum zorlamalı veya serbest dengeleme, dengeleme penceresi kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir (Şekil 4.9). Minimum zorlamalı dengeleme sonucunda hesaplanan düzeltmelerin incelenmesiyle lup kapanma hatalarının hesabı sırasında gözden kaçan kaba hatalar varsa ortaya çıkarılabilmektedir.



Şekil 4.9. Dengeleme penceresi

Dayalı dengeleme yapmadan önce ise dayalı dengelemede dayanak noktası olarak kullanılacak olan noktaların ölçü epoğuna kaydırılmış koordinatları ile minimum zorlamalı veya serbest dengeleme sonucu bulunan koordinatları arasında yazılım vasıtasıyla iki boyutlu (2D) veya üç boyutlu (3D) benzerlik dönüşümü yapılabilmekte ve ölçek uyuşumu bir matematik istatistik yöntem ile test edilebilmektedir. İstatistik test sonucunda ölçek faktörünün (scale factor) 3 ppm'den küçük olması gerekmektedir.

Projedeki dayalı dengeleme sonucunda noktaların sonuç koordinatlarına yazılımın kullanıcıya sunduğu noktalar penceresinden ulaşılabilmektedir (Şekil 4.10). Bu koordinatlar hem WGS-84 sisteminde hem de kullanıcının yazılıma çalışma bölgesinde kullanılan projeksiyon ve koordinat sistemini tanımlamasıyla istenilen projeksiyonda .csv uzantılı excel dosyası veya .txt uzantılı metin dosyası olarak dışa aktarılabilmektedir.



Şekil 4.10. Noktalar penceresi

Yazılımda bulunan import (içe aktar) araç çubuğuyla GNSS ham dataları ve metin dosyası şeklindeki koordinat dataları projeye aktarılabilmektedir. Export (dışa aktar) aracıyla projedeki RINEX dosyaları istenildiği takdirde ölçü gruplarına da ayrılarak dışa aktarılabilmekte ve aynı zamanda proje içerisindeki koordinatlar metin dosyası olarak kaydedilebilmektedir.

4.3. GNSS Ağlarının Dengelenmesi

GNSS ölçülerinin uygun yazılımlar kullanılarak değerlendirilmesi sonucu ölçü yapılan noktalar arasında WGS-84 sisteminde kartezyen koordinat farkları ΔX, ΔY, ΔZ ile her bir baz için 3x3 boyutunda kovaryans matrisi elde edilir. Bu kovaryans matrisleri ağ dengelemesinde ölçüleri ağırlıklandırmada kullanılır. Dengelemede ölçüler kartezyen koordinat farklarıdır. Ölçülerin dengelenmesi sonucu noktaların X, Y, Z kartezyen koordinatları elde edilir. Elde edilen koordinatlar uygun dönüşüm yöntemleriyle datum dönüşümü yapılır ve noktaların mühendislik uygulamalarında kullanılabilecek nitelikteki projeksiyon koordinatları hesaplanır.

GNSS ağlarının dengelenmesinden önce ağın iç güvenilirliğini artırmak ve olası kaba hataları elemine etmek için bir dizi analiz yapılır. Bu analizler, sabit ve ölçülen baz

bileşenleri arasındaki farkların analizi, aynı baz bileşenlerine ait tekrarlı ölçülerin analizi ve lup kapanmalarının analizidir.

4.3.1. Sabit noktalar arasındaki baz ölçülerinin analizi

GNSS çalışmaları sabit alınan noktalar arasındaki baz ölçülerinin de yapılmasını gerektirir. Bu ölçülerin faydası hem GNSS ölçü sisteminin hem de sabit noktaların doğruluğunu kontrol etmektir. Ölçülen ve bilinen baz uzunlukları arasında küçük farkların olması gerekmektedir. Eğer farklar tolore edilemeyecek kadar büyükse, işleme başlanmadan önce bu durumun nedenleri araştırılmalıdır.

Sabit noktalar arasındaki baz ölçülerinin analizinde bilinen baz uzunluğu ile ölçülen baz uzunluğu arasındaki farklar baz uzunluğuna bölünür ve 1 000 000 ile çarpılarak ppm (Parts Per Million) cinsinden karşılıkları bulunur ve bu değerler doğruluk standartları ile karşılaştırılır.

4.3.2. Tekrarlı baz ölçülerinin analizi

Ölçülerin tutarlılığının değerlendirilmesinde ve kaba hataların ayıklanmasında yapılan diğer bir işlem, bazı bazlarda tekrarlı ölçüler yapmaktır. Bu tekrarlı ölçüler farklı oturumlarda yapılır ve sonuçlar karşılaştırılır.

4.3.3. Lup kapanmalarının analizi

Statik ölçü ağ tasarımlarında GNSS ağları birbirine bağlı pek çok kapalı luptan oluşmaktadır. Her bir kapalı lup için ΔX, ΔY ve ΔZ koordinat farklarının cebrik toplamının sıfır olması gerekmektedir. Herhangi bir lupta beklenmeyen büyük bir kapanma varsa, lupu oluşturan bazlardan birinde ya bir kaba hata ya da büyük bir rastgele hata olduğu anlaşılır. Lup kapanmaları hesaplanırken seçilen lup için baz bileşenleri basit cebirsel hesaplamalarla birbirine eklenir. Her bir lup için toplam kapanma hatası (Misclosure):

$$\mathrm{MC} = \frac{\sqrt{(\sum \Delta X)^2 + (\sum \Delta Y)^2 + (\sum \Delta Z)^2}}{\sum L} \tag{4.3}$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada $\sum L$ lupu oluşturan baz bileşenlerinin toplam uzunluğudur. $\sum \Delta X$, $\sum \Delta Y$ ve $\sum \Delta Z$ ise lupu oluşturan bazlardaki kartezyen koordinat farklarının toplamını ifade etmektedir. Elde edilen kapanma hataları 1 000 000 ile çarpılarak ppm cinsinden karşılıkları bulunur. Herhangi bir ağ için, her bir baz en az bir lupta yer alacak şekilde yeterli sayıda lup kapanması hesaplanmalıdır. Bu yöntem herhangi bir büyük kaba hata varsa onu ortaya çıkarmaktadır.

4.3.4. Minimum zorlamalı dengeleme

Bir GNSS ağında baz ölçülerinin son dengelemesi yapılmadan önce genellikle minimum zorlamalı en küçük kareler dengelemesi gerçekleştirilir. Bazen serbest dengeleme olarak da adlandırılan bu dengelemede ağdaki herhangi bir nokta sabit olarak alınabilir. Bu dengelemeden elde edilen sonuç düzeltmeler incelenir ve bunlardan ilk analizlerde belirlenemeyen kaba hatalar bulunabilir ve elemine edilebilir.

4.3.5. Matematiksel modelin oluşturulması ve çözüm

GNSS ağları fazla ölçüler içerdiği için bütün koordinat farklarını tutarlı hale getirmek amacıyla ölçüler dengelenmelidir. En küçük karelerin GNSS ağlarındaki baz ölçülerinin dengelenmesi problemine uygulanmasında ölçü eşitlikleri, nokta koordinatları ile ölçülen koordinat farkları ve onların düzeltme hatalarıyla ilişkilendirilerek yazılır.

Bu işlemi gerçekleştirmek için, A ve B noktalarının bulunduğu bir GNSS ağında AB bazı için ölçü eşitliği:

$$\begin{aligned} X_B &= X_A + \Delta X_{AB} + v_{X_{AB}} \\ Y_B &= Y_A + \Delta Y_{AB} + v_{Y_{AB}} \\ Z_B &= Z_A + \Delta Z_{AB} + v_{Z_{AB}} \end{aligned} \tag{4.4}$$

şeklinde yazılabilir. Ölçülen her bir baz bileşenine ilişkin ölçü eşitlikleri eşitlik 4.4'te AB bazı için gösterilene benzer şekilde yazılır. Ölçü eşitlikleri matris gösterimiyle;

$$Ax = \ell + v \tag{4.5}$$

şeklinde ifade edilebilir. ℓ matrisinin elemanlarının sayısal değerleri ölçü eşitliklerinin yeniden düzenlenmesiyle belirlenir. ℓ matrisinin ilk üç elemanı sırasıyla AB bazının ΔX, ΔY ve ΔZ bileşenleridir. Bu elemanlar:

$$\begin{aligned} \ell_X &= X_A + \Delta X_{AB} \\ \ell_Y &= Y_A + \Delta Y_{AB} \\ \ell_Z &= Z_A + \Delta Z_{AB} \end{aligned} \tag{4.6}$$

eşitlikleriyle hesaplanabilir.

ℓ matrisinin diğer elemanları eşitlik (4.4) ve (4.6)'da AB bazı için gösterilen şekillerde oluşturulur.

GNSS ağlarının dengelenmesi için yazılan ölçü eşitlikleri doğrusaldır ve A matrisinin elemanları 0, 1 veya -1'lerdir. GNSS ile göreli konum belirlemede, ölçülen üç baz bileşeni korelasyonludur. Bu nedenle, her bir baz için taşıyıcı faz ölçülerinin en küçük kareler dengelemesinin bir ürünü olarak 3x3 boyutunda bir kovaryans matrisi elde edilir. Bu kovaryans matrisi her bir baz için ağ dengelemesinde ölçüleri ağırlıklandırmada kullanılır. Bu yüzden herhangi bir GNSS ağı için ağırlık matrisi, köşegenlerinde ölçülen her bir baz için kendine has 3x3 boyutunda matris bulunan blok köşegen tipte bir matristir. Matrisin diğer tüm elemanları sıfırdır.

GNSS ağlarının dengelenmesinde A, $P = Q_{\ell\ell}^{-1}$ ve ℓ matrisleri oluşturulduktan sonra x bilinmeyenler vektörü;

$$N = A^T P A \quad \text{ve} \quad n = A^T P \ell \tag{4.7}$$

olmak üzere;

$$x = N^{-1}.n \tag{4.8}$$

eşitliği ile hesaplanır. Birim ağırlıklı ölçünün ortalama hatasının hesabında,

$$m_0 = \pm\sqrt{\frac{v^T P v}{f}} \tag{4.9}$$

eşitliğinden yararlanılır. Burada f fazla ölçü sayısı;

$$f = n - u + d \tag{4.10}$$

eşitliği kullanılarak hesaplanır. n ağdaki ölçü sayısını, u bilinmeyen sayısını ve d ise defekt sayısını temsil etmektedir. Defekt sayısı GNSS ağları için 3'tür.

5. UYGULAMA

5.1. Çalışma Alanı

Bu tez çalışmasında, GNSS tekniğinin yatay yöndeki deformasyonları belirleyebilmedeki başarısını araştırmak amacıyla Selçuk Üniversitesi Kampüs Alanında pilye şeklinde tesis edilmiş noktalardan 1 tanesi obje noktası, 7 tanesi de referans noktası olmak üzere 8 noktalı bir mikrojeodezik ağ tasarlanmıştır (Şekil 5.1). Obje noktasının referans noktalarına olan uzaklıkları 120.6 metre ile 1.6 km arasında değişmektedir. Oluşturulan ağdaki referans noktalarının koordinatlarının belirlenmesi amacıyla Çevredeki Cors-TR noktaları olarak AKHR, BEYS, CIHA, HALP, KAMN, KAPN, KLUU, KNY1, YUN1 noktaları kullanılmıştır. Noktaların çalışma alanına olan uzaklığı 16.9 km ile 161.9 km'dir (Şekil 5.1).

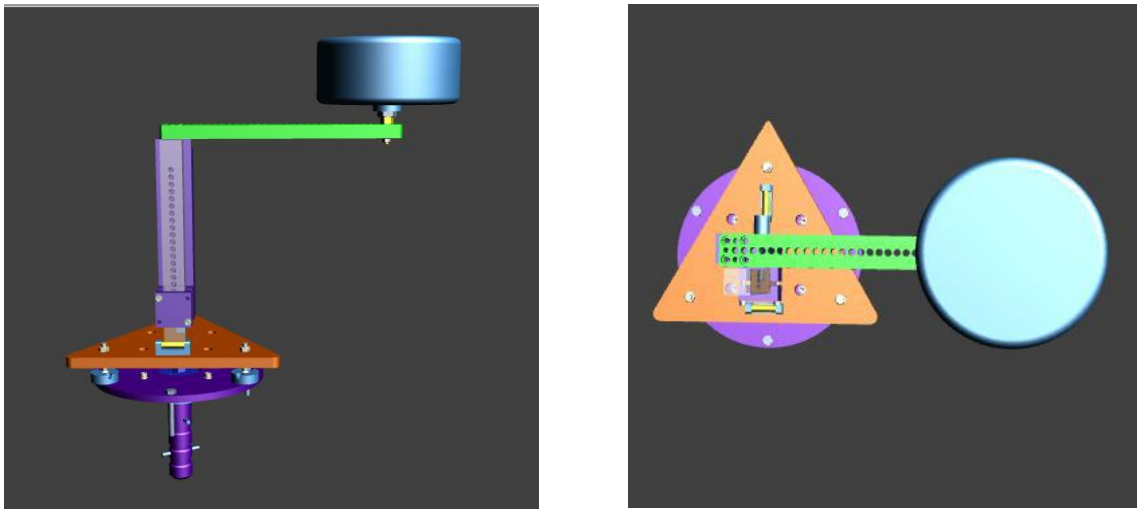


Şekil 5.1. Çalışma alanı ve kullanılan Cors-TR noktaları

Çalışma alanında oluşturulan mikrojeodezik ağda Tutga-SLCK (L29G002) noktası obje noktası olarak kullanılmıştır. SLCK noktası üzerine sanal deformasyonlar oluşturmaya yarayan bir düzenek yerleştirilmiş ve SLCK noktasındaki ölçmeler bu düzenek üzerinde gerçekleştirilmiştir.

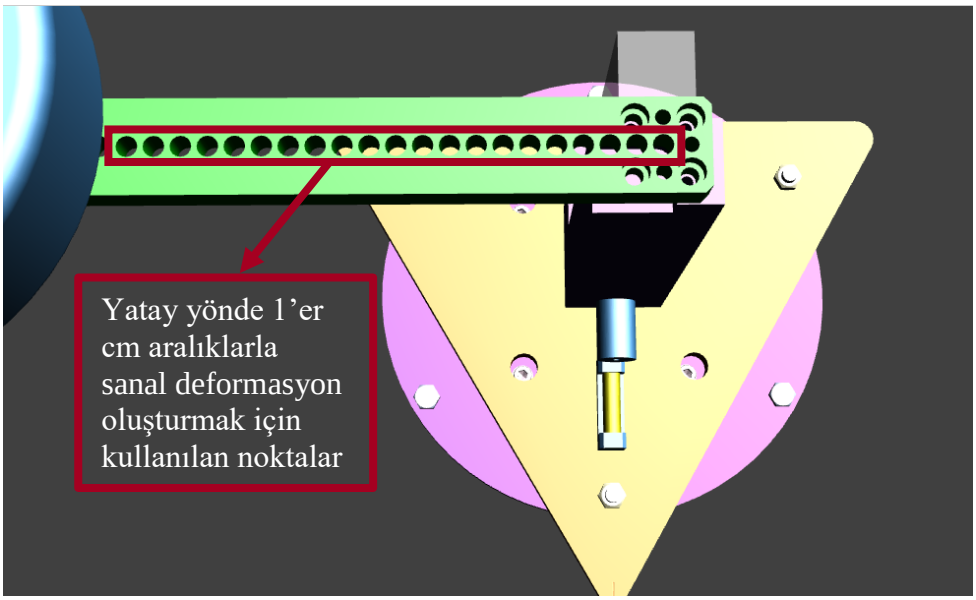
5.2. Ölçü Düzeneğinin Tanıtılması

Tutga-SLCK (L29G002) noktasında sanal deformasyonlar oluşturmak ve bunları belirlemek amacıyla bir ölçü düzeneği geliştirilmiştir (Şekil 5.2). Düzeneğin imalatında tamamen bilgisayarlı sistemler ve CNC (Computer Numerical Control) torna tezgâhları kullanılmıştır.



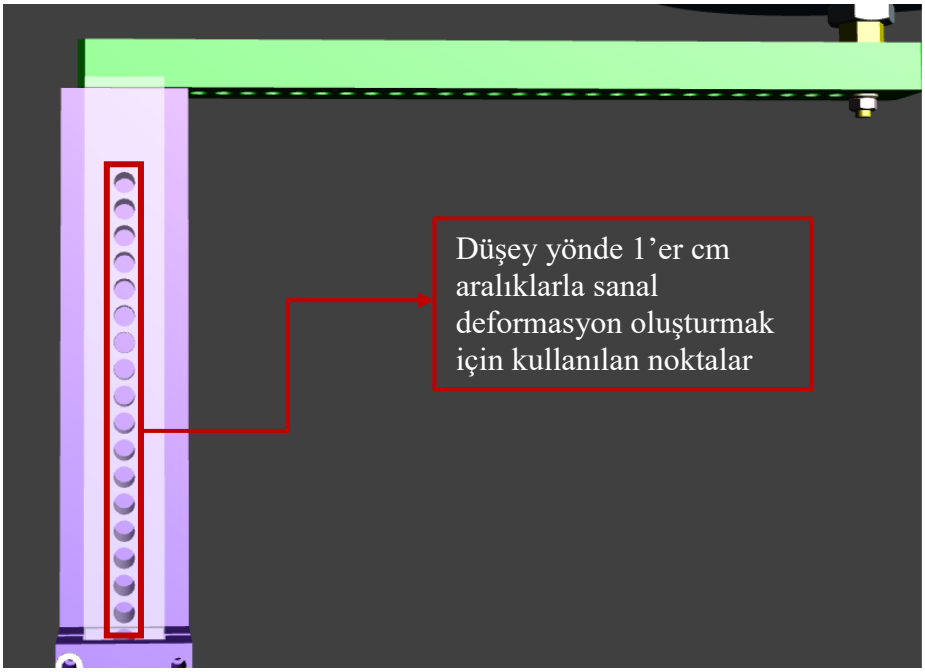
Şekil 5.2. Ölçü düzeneğinin yandan (sol taraf) ve üstten (sağ taraf) görünümü

Ölçü düzeneği yardımıyla yatay ve düşey yönde 1'er cm aralıklı sanal deformasyonlar oluşturulabilmektedir. Düzenek üzerinde bulunan 1'er cm aralıklı noktalar GNSS alıcısını yatay yönde kaydırmak için kullanılmaktadır (Şekil 5.3). GNSS alıcısı bu noktaların her biri üzerine kurulabilmektedir. Düzenek, ölçüden önce hangi doğrultuya yöneltilerek pilye üzerine monte edilmişse oluşturulan deformasyonlar da o doğrultuda meydana gelmektedir.



Şekil 5.3. Yatay yönde 1'er cm aralıklarla sanal deformasyon oluşturmak için kullanılan noktalar

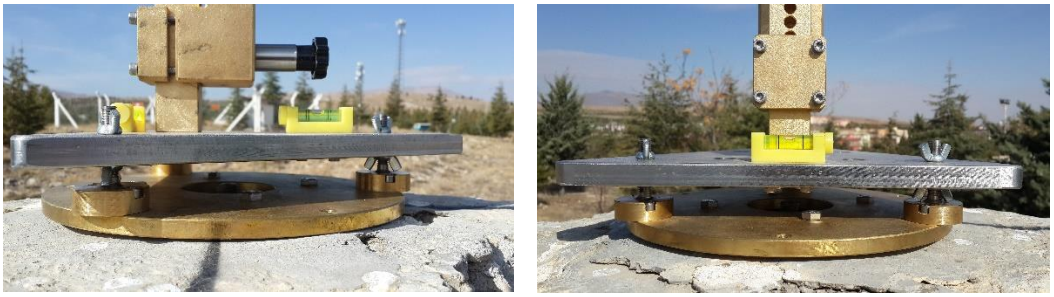
Düşey yönde sanal deformasyonlar oluşturulmak istendiğinde düzeneğin yandan görüntüsünde görülen 1 cm aralıklı noktalar kullanılmaktadır (Şekil 5.4).



Şekil 5.4. Düşey yönde 1 cm aralıklarla sanal deformasyon oluşturmak için kullanılan noktalar

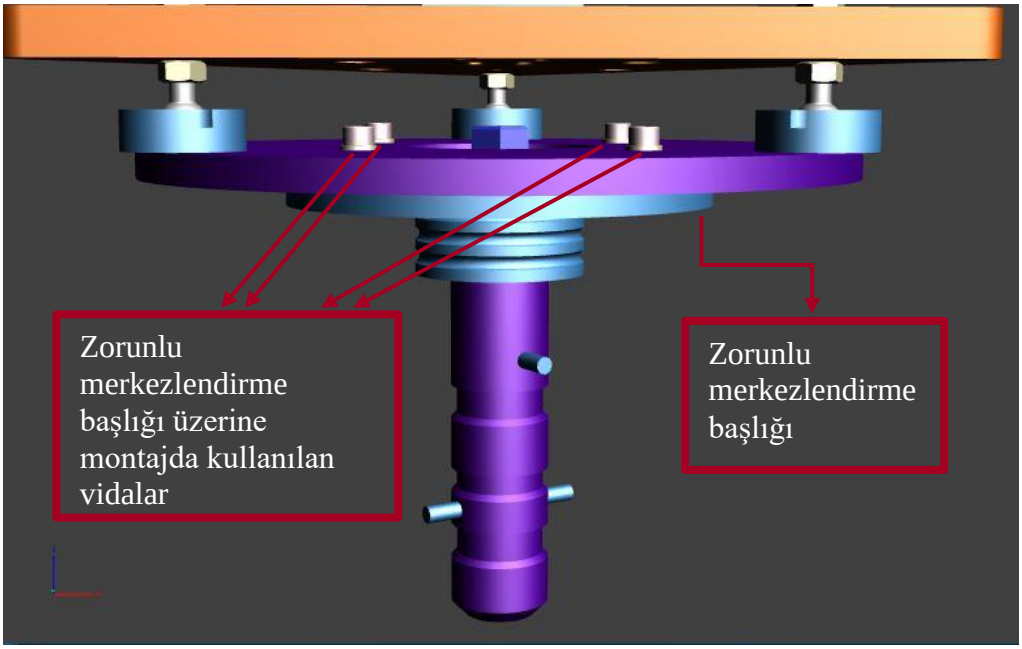
Düzeneğin üzerine oturtulduğu üçgen şeklindeki tabla üzerinde birbirine dik şekilde konumlandırılmış iki adet silindirik düzeç bulunmakadır (Şekil 5.5). Bu düzeçler,

tablanın köşelerindeki kelebek vidaları kullanılarak ayarlanmakta ve böylelikle GNSS alıcısının tam olarak düşeylenmesi sağlanmaktadır.



Şekil 5.5. Düzeneğin tablası üzerindeki silindirik düzeçler

Ölçü düzeneği, pilyenin zorunlu merkezlendirme başlığı üzerine dört adet vida kullanılarak istenilen doğrultuya yöneltilip monte edilmektedir (Şekil 5.6).



Şekil 5.6. Zorunlu merkezlendirme başlığı ve tabla

Ölçü düzeneği pilye üzerine monte edilip silindirik düzeçler ayarlandıktan sonra üzerinde ölçü yapmaya hazır hale gelmektedir.

5.3. Çalışma Alanında Yapılan Ölçüler ve Değerlendirme

Selçuk Üniversitesi kampüs alanında oluşturulan mikrojeodezik ağda kuzey-güney doğrultusundaki sanal deformasyonların belirlenebilirliğini araştırmak amacıyla ölçü düzeneği, Tutga-SLCK noktasına öncelikle kuzeye yöneltilmiş olarak yerleştirilmiştir. SLCK noktasındaki düzenek üzerine GNSS alıcısı kurulup ilk noktadan başlanmak suretiyle art arda kaydırılarak her bir noktada ikişer saatlik GNSS ölçüleri yapılırken referans noktalarındaki GNSS alıcıları sürekli ölçü yapmıştır (Şekil 5.7). Sonrasında doğu-batı doğrultusundaki sanal deformasyonların belirlenebilirliğini araştırmak için de aynı ölçü düzeneği doğuya yöneltilmiş ve aynı ölçme planı uygulanmıştır. Ölçülerin veri kayıt aralığı 5 saniye olarak belirlenmiştir. Ölçülerde dört adet Javad marka dört adet de Topcon marka GNSS alıcısı kullanılmıştır. Kullanılan alıcılara ilişkin teknik özellikler çizelge 5.1'de görülmektedir.

Çizelge 5.1. Ölçmelerde kullanılan GNSS alıcıları

Alıcı / **Teknik Özellikler**		 JAVAD TRIUMPH-1	 TOPCON HIPER PRO	 TOPCON HIPER LITE
Statik Doğruluğu	Yatay	3 mm + 0.1 ppm	3 mm + 0.5 ppm	3 mm + 0.5 ppm
	Düşey	3.5mm + 0.4 ppm	5 mm + 0.5 ppm	5 mm + 0.5 ppm
Kaydedilen sinyaller	GPS	C/A, P1, P2, L2C (L+M), L5(I+Q)	L1, L1/L2	L1, L1/L2
	GLONASS	C/A, L2C, P1, P2, L3 (I+Q)	L1, L1/L2	L1, L1/L2
	Beidou	B1, B2	x	x
	SBAS	L1, L5	x	x
	QZSS	C/A, L1C (I+Q), L2C(L+M), L5(I+Q)	x	x
	GALILEO	E1 (B+C),E5A (I+Q), E5B (I+Q)	x	x
Anten Tipi		Dahili	Dahili	Dahili



Şekil 5.7. Tutga-SLCK noktasında yapılan ölçmeler

Kuzey-güney doğrultusundaki sanal hareketler belirlenirken kullanılan referans noktalarının koordinatları 26, 27 ve 28 Temmuz 2016 tarihlerinde, günde 10'ar saat süreyle yapılan ölçülerle, doğu-batı doğrultusundaki sanal hareketler belirlenirken ise 28, 29, 30 ve 31 Ekim 2016 tarihlerinde, günde 8'er saat süreyle yapılan ölçülerle şekil 5.1'de görülen Cors-Tr noktalarına dayalı olarak hesaplanmıştır. Hem kuzey-güney hem de doğu-batı doğrultusunda düzenek üzerinde ölçü yapılan her bir noktanın koordinatları referans noktalarına dayalı bir şekilde; 30, 60, 90 ve 120 dakikalık ölçüler kullanılarak belirlenmiştir.

Ölçülerin değerlendirilmesinde Leica Geo Office (LGO) 7.0 yazılımı kullanılmıştır. Baz çözümlerinde IGS (International Geodetic Survey) ürünlerinden son duyarlı efemeris dosyaları kullanılmıştır. Değerlendirme parametreleri olarak uydu yükseklik açısı 10^{o}, veri kayıt aralığı (epok aralığı) referans noktalarının koordinatları belirlenirken 30 saniye, düzenek üzerindeki noktaların koordinatları belirlenirken 5 saniye seçilmiş ve GPS ile GLONASS gözlemleri birlikte değerlendirmeye alınmıştır. İyonosfer modeli olarak computed model, troposfer modeli olarak ise hopfield modeli kullanılmıştır.

Düzenek üzerinde art arda gelen ve aralarında 1 cm mesafe olan bu noktaların x ve y yönündeki koordinat farkları ve farklara ilişkin ortalama hatalar hesaplanmıştır.

Ortalama hataların hesaplanmasında:

$$m_{dx} = \sqrt{m_{x_i}^2 + m_{x_{i+1}}^2} \tag{5.1}$$

eşitliği kullanılmıştır. Koordinat farkları ve ortalama hatalar hem ardışık noktalar arasında, hem de ölçüye başlanılan ilk nokta ile diğer noktalar arasında elde edilmiştir. Kuzey-güney doğrultusunda koordinat farkları ve ortalama hatalar çizelge 5.2 ile çizelge 5.5 arasında verilmiştir.

Çizelge 5.2. 120 dakikalık ölçülerden hesaplanan koordinatlar arasındaki farklar ve ortalama hataları

Noktalar	dx (mm)	dy (mm)	m_{dx}(mm)	m_{dy} (mm)
0 - 1	12.2	-0.2	±3.8	±2.9
1 - 2	9.1	0.4	±3.5	±2.9
2 - 3	9.8	0.2	±3.1	±2.7
3 - 4	11.7	-1.1	±3.1	±2.8
4 - 5	11.0	0.1	±3.7	±3.2
5 - 6	11.4	0.5	±3.8	±3.2
6 - 7	7.2	-0.4	±3.2	±2.7
7 - 8	8.7	-2.0	±3.3	±2.8
8 - 9	11.0	0.6	±3.5	±3.0
9 - 10	9.0	-0.6	±3.2	±2.8
10 - 11	9.9	-0.9	±3.0	±2.8

Çizelge 5.3. 90 dakikalık ölçülerden hesaplanan koordinatlar arasındaki farklar ve ortalama hataları

Noktalar	dx (mm)	dy (mm)	m_{dx}(mm)	m_{dy} (mm)
0 - 1	12.3	-0.1	±3.9	±3.1
1 - 2	9.0	0.4	±3.8	±3.1
2 - 3	9.3	0.3	±3.3	±2.8
3 - 4	12.2	-1.2	±3.0	±2.6
4 - 5	11.0	-0.1	±3.5	±3.1
5 - 6	11.1	0.4	±3.8	±3.2
6 - 7	7.5	0.1	±3.2	±2.7
7 - 8	9.0	-1.8	±3.7	±3.0
8 - 9	10.6	0.9	±3.9	±3.2
9 - 10	8.8	-0.7	±3.5	±3.0
10 - 11	10.4	-0.4	±3.3	±3.0

Çizelge 5.4. 60 dakikalık ölçülerden hesaplanan koordinatlar arasındaki farklar ve ortalama hataları

Noktalar	dx (mm)	dy (mm)	m_{dx}(mm)	m_{dy} (mm)
0 - 1	12.7	0.0	±4.0	±3.2
1 - 2	8.6	0.3	±3.7	±3.1
2 - 3	9.2	0.4	±3.3	±2.8
3 - 4	13.1	-1.7	±3.3	±2.8
4 - 5	10.1	0.6	±3.9	±3.2
5 - 6	10.7	0.2	±3.9	±3.1
6 - 7	8.1	-0.1	±3.1	±2.6
7 - 8	8.8	-2.6	±3.7	±2.8
8 - 9	11.1	1.1	±3.8	±2.9
9 - 10	8.6	-1.0	±3.2	±2.7
10 - 11	10.0	-0.1	±3.0	±2.7

Çizelge 5.5. 30 dakikalık ölçülerden hesaplanan koordinatlar arasındaki farklar ve ortalama hataları

Noktalar	dx (mm)	dy (mm)	m_{dx}(mm)	m_{dy} (mm)
0 – 1	12.6	0.2	±3.5	±2.8
1 – 2	9.1	0.9	±3.3	±2.7
2 – 3	9.7	-0.3	±3.3	±2.8
3 – 4	11.4	-1.1	±3.2	±2.9
4 – 5	11.5	0.4	±4.0	±3.4
5 – 6	9.8	0.5	±4.1	±3.4
6 – 7	9.1	-0.7	±3.3	±2.8
7 – 8	7.4	-2.2	±3.9	±3.0
8 – 9	11.8	1.3	±3.8	±2.8
9 – 10	8.3	-1.6	±3.2	±2.7
10 – 11	10.6	-0.1	±3.1	±2.8

Obje noktası üzerinde kuzey-güney doğrultusundaki ölçüler sırasında düzenek kuzeye yönlendirilmiş olduğundan sanal deformasyon da X ekseni yönünde elde edilmiştir. Bu nedenle 1 cm aralıklı noktaların X koordinat farkları ve gerçek değer arasındaki fark (d) hesaplanmıştır. Farkların anlamlı olup olmadığını tespit etmek için bir istatistik test yapılmıştır. d farkları ve anlamlılık testine ilişkin sonuçlar çizelge 5.6 ile çizelge 5.9 arasında verilmiştir. Yapılan anlamlılık testinde test büyüklüğü:

$$t = \frac{|d|}{m_{dx}} \tag{5.2}$$

eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.6. 120 dakikalık ölçülerle elde edilen d farkları için anlamlılık testi

d(mm)	m_{dx} (mm)	Test Büyüklüğü	Karar $T_{tablo}=1.96$
2.2	±3.8	0.58	$t<T_{tablo}$ Farklar anlamlı değildir.
-0.9	±3.5	0.25	
-0.2	±3.1	0.06	
1.7	±3.1	0.55	
1.0	±3.7	0.27	
1.4	±3.8	0.37	
-2.8	±3.2	0.88	
-1.3	±3.3	0.39	
1.0	±3.5	0.29	
-1.0	±3.2	0.31	
-0.1	±3.0	0.03	

Çizelge 5.7. 90 dakikalık ölçülerle elde edilen d farkları için anlamlılık testi

d(mm)	m_{dx} (mm)	Test Büyüklüğü	Karar $T_{tablo}=1.96$
2.3	±3.9	0.59	$t<T_{tablo}$ Farklar anlamlı değildir.
-1.0	±3.8	0.26	
-0.7	±3.3	0.22	
2.2	±3.0	0.74	
1.0	±3.5	0.28	
1.1	±3.8	0.29	
-2.5	±3.2	0.78	
-1.0	±3.7	0.27	
0.6	±3.9	0.15	
-1.2	±3.5	0.35	
0.4	±3.3	0.12	

Çizelge 5.8. 60 dakikalık ölçülerle elde edilen d farkları için anlamlılık testi

d(mm)	m_{dx} (mm)	Test Büyüklüğü	Karar $T_{tablo}=1.96$
2.7	±4.0	0.68	$t<T_{tablo}$ Farklar anlamlı değildir.
-1.4	±3.7	0.38	
-0.8	±3.3	0.25	
3.1	±3.3	0.93	
0.1	±3.9	0.03	
0.7	±3.9	0.18	
-1.9	±3.1	0.61	
-1.2	±3.7	0.33	
1.1	±3.8	0.29	
-1.4	±3.2	0.44	
0.0	±3.0	0.00	

Çizelge 5.9. 30 dakikalık ölçülerle elde edilen d farkları için anlamlılık testi

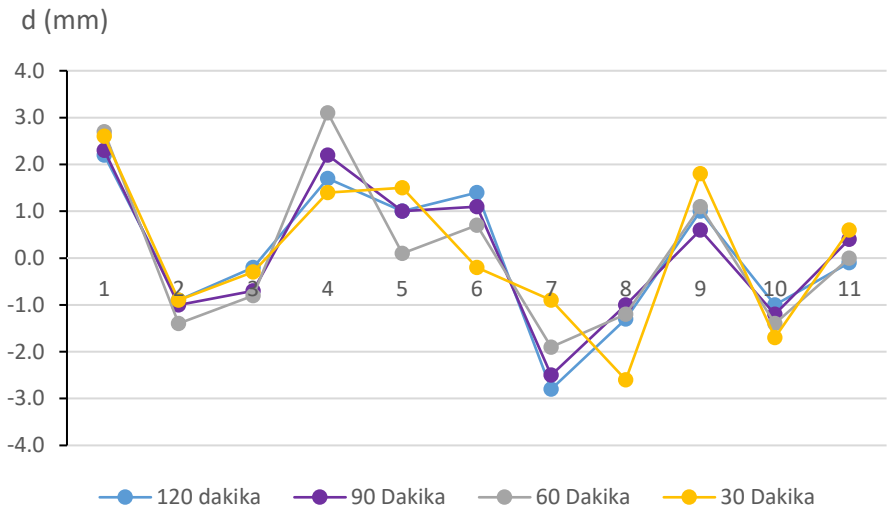
d(mm)	m_{dx} (mm)	Test Büyüklüğü	Karar $T_{tablo}=1.96$
2.6	±3.5	0.73	$t<T_{tablo}$ Farklar anlamlı değildir.
-0.9	±3.3	0.27	
-0.3	±3.3	0.09	
1.4	±3.2	0.44	
1.5	±4.0	0.37	
-0.2	±4.1	0.05	
-0.9	±3.3	0.28	
-2.6	±3.9	0.67	
1.8	±3.8	0.47	
-1.7	±3.2	0.53	
0.6	±3.1	0.19	

Ölçü sürelerine göre elde edilen minimum ve maksimum d farkları ve standart sapma aralıkları çizelge 5.10'da verilmiştir.

Çizelge 5.10. Minimum ve maksimum farklar ile standart sapma aralıkları

Ölçü Süresi	Farklar (mm)		Standart Sapma Aralığı (mm)
	Min.	Max.	
30 Dakika	-2.6	2.6	±3.1 – ±4.1
60 Dakika	-1.9	3.1	±3.0 – ±4.0
90 Dakika	-2.5	2.3	±3.0 – ±3.9
120 Dakika	-2.8	2.2	±3.0 – ±3.8

Hesaplanan d değerleri grafik üzerinde de gösterilmiştir (Şekil 5.8).



Şekil 5.8. Kuzey-güney doğrultusunda ölçü düzeneği ile GNSS değerleri arasındaki fark

Obje noktasında belirlenen koordinatların düzenek üzerindeki ilk noktaya göre farkları da hesaplanmıştır. Böylece kuzey-güney doğrultusunda 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 ve 11 cm'lik sanal hareketlerin belirlenebilirliği de araştırılmıştır. Bunlara ilişkin koordinat farkları ve ortalama hatalar çizelge 5.11 ile çizelge 5.14 arasındaki çizelgelerde, düzenek üzerindeki bilinen değer ile X koordinat farkları arasındaki farklar ve anlamlılık testleri çizelge 5.15 ile çizelge 5.18 arasındaki çizelgelerde verilmiştir.

Çizelge 5.11. 120 dakikalık ölçülerden hesaplanan koordinatlar arasındaki farklar ve ortalama hataları

Noktalar	dx (mm)	dy (mm)	m_{dx}(mm)	m_{dy} (mm)
0 - 1	12.2	-0.2	±3.8	±2.9
0 - 2	21.3	0.2	±3.5	±2.7
0 - 3	31.1	0.4	±3.4	±2.7
0 - 4	42.8	-0.7	±3.5	±2.8
0 - 5	53.8	-0.6	±4.0	±3.1
0 - 6	65.2	-0.1	±3.6	±2.8
0 - 7	72.4	-0.5	±3.4	±2.6
0 - 8	81.1	-2.5	±3.7	±2.9
0 - 9	92.1	-1.9	±3.5	±2.8
0 - 10	101.1	-2.5	±3.5	±2.7
0 - 11	111.0	-3.4	±3.4	±2.8

Çizelge 5.12. 90 dakikalık ölçülerden hesaplanan koordinatlar arasındaki farklar ve ortalama hataları

Noktalar	dx (mm)	dy (mm)	m_{dx}(mm)	m_{dy} (mm)
0 - 1	12.3	-0.1	±3.9	±3.1
0 - 2	21.3	0.3	±3.5	±2.8
0 - 3	30.6	0.6	±3.3	±2.7
0 - 4	42.8	-0.6	±3.2	±2.6
0 - 5	53.8	-0.7	±3.8	±3.1
0 - 6	64.9	-0.3	±3.5	±2.8
0 - 7	72.4	-0.2	±3.3	±2.6
0 - 8	81.4	-2.0	±3.9	±3.1
0 - 9	92.0	-1.1	±3.5	±2.8
0 - 10	100.8	-1.8	±3.5	±2.8
0 - 11	111.2	-2.2	±3.3	±2.9

Çizelge 5.13. 60 dakikalık ölçülerden hesaplanan koordinatlar arasındaki farklar ve ortalama hataları

Noktalar	dx (mm)	dy (mm)	m_{dx}(mm)	m_{dy} (mm)
0 - 1	12.7	0.0	±4.0	±3.2
0 - 2	21.3	0.3	±3.5	±2.8
0 - 3	30.5	0.7	±3.5	±2.8
0 - 4	43.6	-1.0	±3.6	±2.8
0 - 5	53.7	-0.4	±4.1	±3.2
0 - 6	64.4	-0.2	±3.5	±2.8
0 - 7	72.5	-0.3	±3.4	±2.7
0 - 8	81.3	-2.9	±4.0	±3.0
0 - 9	92.4	-1.8	±3.5	±2.8
0 - 10	101.0	-2.8	±3.5	±2.8
0 - 11	111.0	-2.9	±3.4	±2.8

Çizelge 5.14. 30 dakikalık ölçülerden hesaplanan koordinatlar arasındaki farklar ve ortalama hataları

Noktalar	dx (mm)	dy (mm)	m_{dx}(mm)	m_{dy} (mm)
0 - 1	12.6	0.2	±3.5	±2.8
0 - 2	21.7	1.1	±3.5	±2.6
0 - 3	31.4	0.8	±3.5	±2.8
0 - 4	42.8	-0.3	±3.4	±2.8
0 - 5	54.3	0.1	±4.3	±3.3
0 - 6	64.1	0.6	±3.5	±2.8
0 - 7	73.2	-0.1	±3.5	±2.8
0 - 8	80.6	-2.3	±4.0	±2.9
0 - 9	92.4	-1.0	±3.4	±2.6
0 - 10	100.7	-2.6	±3.5	±2.8
0 - 11	111.3	-2.7	±3.3	±2.7

Çizelge 5.15. 120 dakikalık ölçülerle elde edilen d farkları için anlamlılık testi

d(mm)	m_{dx} (mm)	Test Büyüklüğü	Karar $T_{tablo}=1.96$
2.2	±3.8	0.58	$t<T_{tablo}$ Farklar anlamlı değildir.
1.3	±3.5	0.37	
1.1	±3.4	0.32	
2.8	±3.5	0.79	
3.8	±4.0	0.96	
5.2	±3.6	1.44	
2.4	±3.4	0.70	
1.1	±3.7	0.29	
2.1	±3.5	0.59	
1.1	±3.5	0.32	
1.0	±3.4	0.29	

Çizelge 5.16. 90 dakikalık ölçülerle elde edilen d farkları için anlamlılık testi

d(mm)	m_{dx} (mm)	Test Büyüklüğü	Karar $T_{tablo}=1.96$
2.3	±3.9	0.59	$t<T_{tablo}$ Farklar anlamlı değildir.
1.3	±3.5	0.38	
0.6	±3.3	0.18	
2.8	±3.2	0.87	
3.8	±3.8	0.99	
4.9	±3.5	1.41	
2.4	±3.3	0.74	
1.4	±3.9	0.36	
2.0	±3.5	0.57	
0.8	±3.5	0.23	
1.2	±3.3	0.36	

Çizelge 5.17. 60 dakikalık ölçülerle elde edilen d farkları için anlamlılık testi

d(mm)	m_{dx} (mm)	Test Büyüklüğü	Karar $T_{tablo}=1.96$
2.7	±4.0	0.68	$t<T_{tablo}$ Farklar anlamlı değildir.
1.3	±3.5	0.37	
0.5	±3.5	0.14	
3.6	±3.6	1.00	
3.7	±4.1	0.90	
4.4	±3.5	1.24	
2.5	±3.4	0.73	
1.3	±4.0	0.32	
2.4	±3.5	0.68	
1.0	±3.5	0.29	
1.0	±3.4	0.30	

Çizelge 5.18. 30 dakikalık ölçülerle elde edilen d farkları için anlamlılık testi

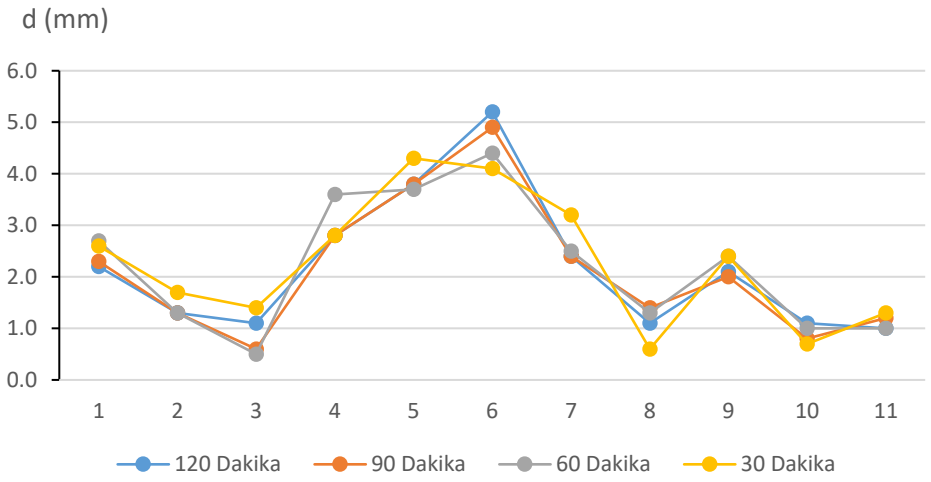
d(mm)	m_{dx} (mm)	Test Büyüklüğü	Karar $T_{tablo}=1.96$
2.6	±3.5	0.73	$t<T_{tablo}$ Farklar anlamlı değildir.
1.7	±3.5	0.49	
1.4	±3.5	0.40	
2.8	±3.4	0.82	
4.3	±4.3	1.00	
4.1	±3.5	1.18	
3.2	±3.5	0.92	
0.6	±4.0	0.15	
2.4	±3.4	0.70	
0.7	±3.5	0.20	
1.3	±3.3	0.39	

Ölçü sürelerine göre kuzey-güney doğrultusunda düzenek üzerindeki ilk noktaya göre elde edilen minimum ve maksimum d farkları ve standart sapma aralıkları çizelge 5.19'da verilmiştir.

Çizelge 5.19. Minimum ve maksimum farklar ile standart sapma aralıkları

Ölçü Süresi	Farklar (mm)		Standart Sapma Aralığı (mm)
	Min.	Max.	
30 Dakika	0.6	4.3	±3.3 – ±4.3
60 Dakika	0.5	4.4	±3.4 – ±4.1
90 Dakika	0.6	4.9	±3.2 – ±3.9
120 Dakika	1.0	5.2	±3.4 – ±4.0

Hesaplanan d değerleri grafikler üzerinde de gösterilmiştir (Şekil 5.9).



Şekil 5.9. Kuzey-güney doğrultusunda düzenek üzerindeki ilk noktaya göre elde edilen d farkları

Doğu-batı doğrultusunda da düzenek üzerinde art arda gelen ve aralarında 1 cm mesafe olan bu noktaların x ve y yönündeki koordinat farkları ve farklara ilişkin ortalama hatalar hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler çizelge 5.20 ile çizelge 5.23 arasında verilmiştir.

Çizelge 5.20. 120 dakikalık ölçülerden hesaplanan koordinatlar arasındaki farklar ve ortalama hataları

Noktalar	dx (mm)	dy (mm)	m_{dx}(mm)	m_{dy} (mm)
1 - 2	0.7	9.2	±2.1	±1.8
2 - 3	0.0	11.6	±2.1	±1.8
3 - 4	0.0	8.7	±2.1	±2.0
4 - 5	-1.1	9.8	±2.1	±1.9
5 - 6	1.2	10.2	±2.2	±1.8
6 - 7	2.9	7.0	±2.1	±1.9
7 - 8	3.4	9.6	±2.1	±1.8
8 - 9	-0.2	9.0	±1.9	±1.8
9 - 10	0.3	8.2	±1.9	±1.8
10-11	0.8	9.9	±1.8	±1.6

Çizelge 5.21. 90 dakikalık ölçülerden hesaplanan koordinatlar arasındaki farklar ve ortalama hataları

Noktalar	dx (mm)	dy (mm)	m_{dx}(mm)	m_{dy} (mm)
1 - 2	0.5	9.4	±2.1	±1.9
2 - 3	1.3	10.2	±2.2	±1.8
3 - 4	-0.9	9.8	±2.1	±2.0
4 - 5	-1.3	9.9	±2.1	±1.8
5 - 6	1.2	10.4	±2.2	±1.9
6 - 7	2.8	7.0	±2.1	±1.9
7 - 8	3.2	10.1	±2.1	±1.8
8 - 9	0.4	8.2	±1.9	±1.8
9 - 10	0.1	8.1	±1.9	±1.8
10-11	1.3	10.1	±1.8	±1.6

Çizelge 5.22. 60 dakikalık ölçülerden hesaplanan koordinatlar arasındaki farklar ve ortalama hataları

Noktalar	dx (mm)	dy (mm)	m_{dx}(mm)	m_{dy} (mm)
1 - 2	1.0	9.8	±2.3	±2.1
2 - 3	0.9	10.4	±2.4	±1.9
3 - 4	-1.0	9.6	±2.2	±2.1
4 - 5	-1.4	10.0	±2.1	±2.1
5 - 6	2.0	9.2	±2.1	±1.9
6 - 7	3.2	6.5	±2.3	±2.0
7 - 8	3.4	10.1	±2.2	±1.9
8 - 9	0.6	7.6	±1.8	±1.8
9 - 10	0.2	8.7	±1.8	±1.8
10-11	0.7	10.1	±1.9	±1.7

Çizelge 5.23. 30 dakikalık ölçülerden hesaplanan koordinatlar arasındaki farklar ve ortalama hataları

Noktalar	dx (mm)	dy (mm)	m_{dx}(mm)	m_{dy} (mm)
1 - 2	1.6	10.0	±2.3	±2.0
2 - 3	1.1	10.3	±2.3	±1.9
3 - 4	-1.7	10.2	±2.3	±2.1
4 - 5	-0.3	9.5	±2.3	±2.1
5 - 6	1.7	9.5	±2.2	±1.9
6 - 7	3.3	7.3	±2.3	±2.0
7 - 8	2.8	10.1	±2.2	±1.9
8 - 9	-0.9	9.9	±2.0	±1.8
9 - 10	0.6	8.1	±2.0	±1.8
10-11	0.8	10.3	±1.8	±1.6

Doğu-batı doğrultusundaki ölçüler sırasında ise düzenek doğuya yönlendirilmiş olduğundan sanal deformasyon da Y ekseni yönünde elde edilmiştir. Bu nedenle Y koordinat farkları ve düzenek üzerindeki gerçek değer arasındaki fark (d) hesaplanmıştır. Farkların anlamlı olup olmadığını tespit etmek için kuzey-güney doğrultusundaki

anlamlılık testi burada da uygulanmıştır. Hesaplanan d farkları ve anlamlılık testine ilişkin sonuçlar çizelge 5.24 ile çizelge 5.27 arasında verilmiştir.

Çizelge 5.24. 120 dakikalık ölçülerle elde edilen d farkları için anlamlılık testi

d(mm)	m_{dy} (mm)	test Büyüklüğü	Karar $T_{tablo}=1.96$
-0.8	±1.8	0.43	$t<T_{tablo}$ Farklar anlamlı değildir.
1.6	±1.8	0.90	
-1.3	±2.0	0.65	
-0.2	±1.9	0.10	
0.2	±1.8	0.11	
-3.0	±1.9	1.57	
-0.4	±1.8	0.22	
-1.0	±1.8	0.57	
-1.8	±1.8	1.02	
-0.1	±1.6	0.06	

Çizelge 5.25. 90 dakikalık ölçülerle elde edilen d farkları için anlamlılık testi

d(mm)	m_{dy} (mm)	test Büyüklüğü	Karar $T_{tablo}=1.96$
-0.6	±1.9	0.31	$t<T_{tablo}$ Farklar anlamlı değildir.
0.2	±1.8	0.11	
-0.2	±2.0	0.10	
-0.1	±1.8	0.05	
0.4	±1.9	0.21	
-3.0	±1.9	1.57	
0.1	±1.8	0.05	
-1.8	±1.8	1.02	
-1.9	±1.8	1.07	
0.1	±1.6	0.06	

Çizelge 5.26. 60 dakikalık ölçülerle elde edilen d farkları için anlamlılık testi

d(mm)	m_{dy} (mm)	test Büyüklüğü	Karar T_{tablo}=1.96
-0.2	±2.1	0.10	$t<T_{tablo}$ Farklar anlamlı değildir.
0.4	±1.9	0.21	
-0.4	±2.1	0.19	
0.0	±2.1	0.00	
-0.8	±1.9	0.42	
-3.5	±2.0	1.76	
0.1	±1.9	0.05	
-2.4	±1.8	1.36	
-1.3	±1.8	0.73	
0.1	±1.7	0.06	

Çizelge 5.27. 30 dakikalık ölçülerle elde edilen d farkları için anlamlılık testi

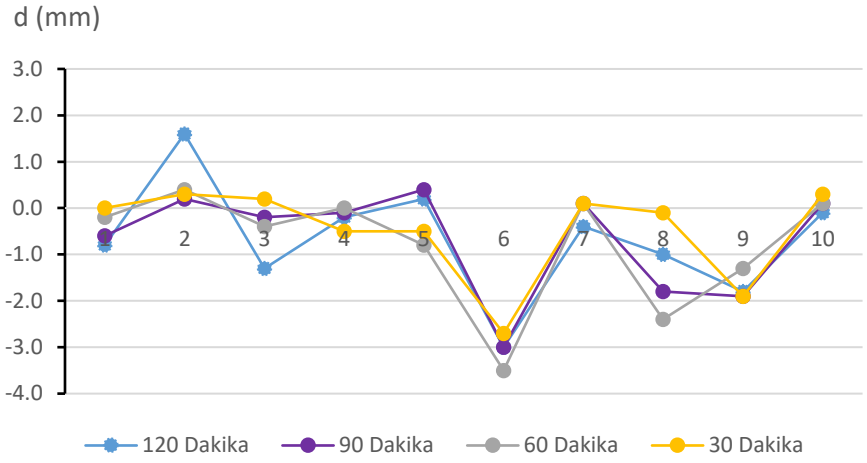
d(mm)	m_{dy} (mm)	test Büyüklüğü	Karar T_{tablo}=1.96
0.0	±2.0	0.00	$t<T_{tablo}$ Farklar anlamlı değildir.
0.3	±1.9	0.16	
0.2	±2.1	0.09	
-0.5	±2.1	0.24	
-0.5	±1.9	0.26	
-2.7	±2.0	1.36	
0.1	±1.9	0.05	
-0.1	±1.8	0.06	
-1.9	±1.8	1.07	
0.3	±1.6	0.18	

Ölçü sürelerine göre elde edilen minimum ve maksimum d farkları ve standart sapma aralıkları çizelge 5.28'de verilmiştir.

Çizelge 5.28. Minimum ve maksimum farklar ile standart sapma aralıkları

Ölçü Süresi	Farklar (mm)		Standart Sapma Aralığı (mm)
	Min.	Max.	
30 Dakika	-2.7	0.3	±1.6 – ±2.1
60 Dakika	-3.5	0.4	±1.7 – ±2.1
90 Dakika	-3.0	0.4	±1.6 – ±2.0
120 Dakika	-3.0	1.6	±1.6 – ±2.0

Doğu-batı doğrultusunda hesaplanan bu d değerleri bir grafik üzerinde de gösterilmiştir (Şekil 5.10).



Şekil 5.10. Doğu-batı doğrultusunda ölçü düzeneği ile GNSS değerleri arasındaki fark

Doğu-batı doğrultusunda düzenek üzerindeki ilk noktaya göre hesaplanan koordinat farkları ve farkların ortalama hataları çizelge 5.29, 5.30, 5.31 ve 5.32'de görülmektedir.

Çizelge 5.29. 120 dakikalık ölçülerden hesaplanan koordinatlar arasındaki farklar ve ortalama hataları

Noktalar	dx (mm)	dy (mm)	m_{dx}(mm)	m_{dy} (mm)
1 - 2	0.7	9.2	±2.1	±1.8
1 - 3	0.7	20.8	±2.1	±1.9
1 - 4	0.7	29.5	±2.1	±2.1
1 - 5	-0.4	39.3	±2.1	±1.8
1 - 6	0.8	49.5	±2.1	±2.0
1 - 7	4.2	59.9	±2.1	±2.0
1 - 8	7.1	66.9	±2.1	±1.9
1 - 9	9.8	82.5	±2.1	±1.8
1 - 10	9.6	91.5	±2.0	±1.9
1 - 11	9.9	99.7	±2.1	±1.8

Çizelge 5.30. 90 dakikalık ölçülerden hesaplanan koordinatlar arasındaki farklar ve ortalama hataları

Noktalar	dx (mm)	dy (mm)	m_{dx}(mm)	m_{dy} (mm)
1 - 2	0.5	9.4	±2.1	±1.9
1 - 3	1.8	19.6	±2.1	±2.0
1 - 4	0.9	29.4	±2.1	±2.1
1 - 5	-0.4	39.3	±2.1	±2.0
1 - 6	0.8	49.7	±2.1	±2.1
1 - 7	4.2	59.6	±2.2	±2.1
1 - 8	7.0	66.6	±2.2	±2.1
1 - 9	9.1	82.9	±2.1	±2.0
1 - 10	9.5	91.1	±2.1	±2.1
1 - 11	9.6	99.2	±2.1	±2.0

Çizelge 5.31. 60 dakikalık ölçülerden hesaplanan koordinatlar arasındaki farklar ve ortalama hataları

Noktalar	dx (mm)	dy (mm)	m_{dx}(mm)	m_{dy} (mm)
1 - 2	1.0	9.8	±2.3	±2.1
1 - 3	1.9	20.2	±2.2	±2.1
1 - 4	0.9	29.8	±2.1	±2.3
1 - 5	-0.5	39.8	±2.1	±2.1
1 - 6	1.5	49.0	±2.1	±2.1
1 - 7	3.4	60.6	±2.1	±2.0
1 - 8	6.6	67.1	±2.1	±1.8
1 - 9	10.0	77.2	±2.1	±1.9
1 - 10	9.2	91.3	±1.8	±1.8
1 - 11	9.4	100.0	±2.0	±1.8

Çizelge 5.32. 30 dakikalık ölçülerden hesaplanan koordinatlar arasındaki farklar ve ortalama hataları

Noktalar	dx (mm)	dy (mm)	m_{dx}(mm)	m_{dy} (mm)
1 - 2	1.6	10.0	±2.3	±2.0
1 - 3	2.7	20.3	±2.2	±2.1
1 - 4	1.0	30.5	±2.3	±2.2
1 - 5	0.7	40.0	±2.2	±2.0
1 - 6	2.4	49.5	±2.1	±2.1
1 - 7	3.1	60.2	±2.1	±1.9
1 - 8	6.4	67.5	±2.1	±1.8
1 - 9	9.7	81.9	±1.9	±1.7
1 - 10	8.8	91.8	±1.9	±1.8
1 - 11	9.4	99.9	±1.9	±1.7

Düzenek üzerindeki gerçek değer ile Y koordinat farkları arasındaki farklar (d) ve anlamlılık testleri çizelge 5.33, 5.34, 5.35 ve 5.36'da verilmiştir.

Çizelge 5.33. 120 dakikalık ölçülerle elde edilen d farkları için anlamlılık testi

d(mm)	**m_{dy} (mm)**	**Test Büyüklüğü**	**Karar T_{tablo}=1.96**
-0.8	±1.8	0.43	$t<T_{tablo}$ Farklar anlamlı değildir.
0.8	±1.9	0.42	
-0.5	±2.1	0.24	
-0.7	±1.8	0.38	
-0.5	±2.0	0.25	
-0.1	±2.0	0.05	
-3.1	±1.9	1.62	
2.5	±1.8	1.36	
1.5	±1.9	0.79	
-0.3	±1.8	0.16	

Çizelge 5.34. 90 dakikalık ölçülerle elde edilen d farkları için anlamlılık testi

d(mm)	**m_{dy} (mm)**	**Test Büyüklüğü**	**Karar T_{tablo}=1.96**
-0.6	±1.9	0.31	$t<T_{tablo}$ Farklar anlamlı değildir.
-0.4	±2.0	0.20	
-0.6	±2.1	0.28	
-0.7	±2.0	0.35	
-0.3	±2.1	0.15	
-0.4	±2.1	0.19	
-3.4	±2.1	1.65	
2.9	±2.0	1.45	
1.1	±2.1	0.53	
-0.8	±2.0	0.40	

Çizelge 5.35. 60 dakikalık ölçülerle elde edilen d farkları için anlamlılık testi

d(mm)	**m_{dy} (mm)**	**Test Büyüklüğü**	**Karar T_{tablo}=1.96**
-0.2	±2.1	0.10	$t<T_{tablo}$ Farklar anlamlı değildir.
0.2	±2.1	0.09	
-0.2	±2.3	0.09	
-0.2	±2.1	0.10	
-1.0	±2.1	0.47	
0.6	±2.0	0.30	
-2.9	±1.8	1.58	
-2.8	±1.9	1.47	
1.3	±1.8	0.71	
0.0	±1.8	0.00	

Çizelge 5.36. 30 dakikalık ölçülerle elde edilen d farkları için anlamlılık testi

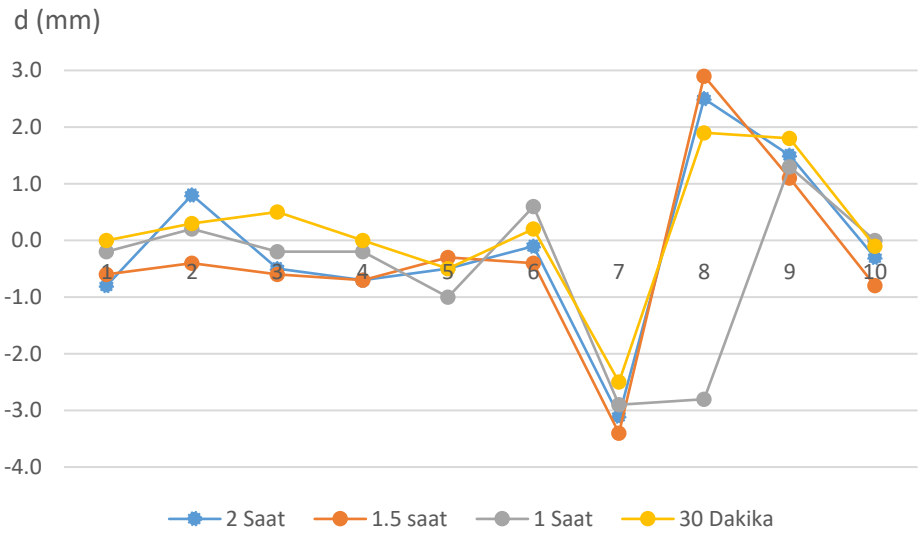
d(mm)	m_{dy} (mm)	Test Büyüklüğü	Karar $T_{tablo}=1.96$
0.0	±2.0	0.00	$t<T_{tablo}$ Farklar anlamlı değildir.
0.3	±2.1	0.15	
0.5	±2.2	0.23	
0.0	±2.0	0.00	
-0.5	±2.1	0.24	
0.2	±1.9	0.10	
-2.5	±1.8	1.41	
1.9	±1.7	1.12	
1.8	±1.8	1.02	
-0.1	±1.7	0.06	

Ölçü sürelerine göre doğu-batı doğrultusunda düzenek üzerindeki ilk noktaya göre elde edilen minimum ve maksimum d farkları ve standart sapma aralıkları çizelge 5.37'de verilmiştir.

Çizelge 5.37. Minimum ve maksimum farklar ile standart sapma aralıkları

Ölçü Süresi	Farklar (mm)		Standart Sapma Aralığı (mm)
	Min.	Max.	
30 Dakika	-2.5	1.9	±1.7 – ±2.2
60 Dakika	-2.9	1.3	±1.8 – ±2.3
90 Dakika	-3.4	2.9	±1.9 – ±2.1
120 Dakika	-3.1	2.5	±1.8 – ±2.1

Hesaplanan d değerleri bir grafik üzerinde de gösterilmiştir (Şekil 5.11).



Şekil 5.11. Doğu-Batı doğrultusunda düzenek üzerindeki ilk noktaya göre elde edilen d farkları

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Günümüzde deformasyon ölçmeleri GNSS teknikleri kullanılarak da yapılabilmektedir. GNSS tekniğinin kullanımı yersel tekniklere göre daha kolay, hızlı ve ekonomik olmaktadır. Bu tez çalışmasında, tasarlanan ölçü düzeneği yardımıyla koordinat eksenleri yönünde hangi büyüklükteki kaymaların, hangi ölçü süreleriyle deformasyon olarak belirlenebileceği konusu araştırılmıştır. Sanal deformasyon oluşturmaya yarayan düzenek üzerinde 1 cm aralıklı art arda gelen noktaların koordinatları GNSS tekniği ile belirlenmiş ve hesaplanan değerler düzenek üzerindeki gerçek değerler ile koordinat eksenleri yönünde ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma hem ardışık noktalar arasında yapılmış hem de ilk nokta ile diğer noktalar arasında yapılmıştır.

Karşılaştırma sonunda X ekseni yönünde gerçek değerleri 1 cm olan farklar; 120 dakikalık ölçü süresiyle -2.8 mm ile +2.2 mm arasında, 90 dakikalık ölçü süresiyle -2.5 mm ile +2.3 mm arasında, 60 dakikalık ölçü süresiyle -1.9 mm ile +3.1 mm arasında, 30 dakikalık ölçü süresiyle -2.6 mm ile +2.6 mm arasında değişen farklarla elde edilmiştir. Yapılan istatistik test sonucunda bu farkların anlamlı olmadığı %95 ihtimalle ölçü hatalarından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Elde edilen d farklarının ortalama hataları 120 dakikalık ölçüler için ±3.0 mm ile ±3.8 mm arasında, 90 dakikalık ölçüler için ±3.0 mm ile ±3.9 mm arasında, 60 dakikalık ölçüler için ±3.0 mm ile ±4.0 mm arasında, 30 dakikalık ölçüler için ±3.1 mm ile ±4.1 mm arasında değişmektedir. İstatistik tablo değerinin 1.96 olduğu düşünülürse kuzey-doğrultusunda 120, 90 ve 60 dakikalık ölçülerle ancak 5.8 mm'den sonraki değişimlerin, 30 dakikalık ölçülerle ise 6 mm'den sonraki değişimlerin deformasyon olarak değerlendirilebileceği görülmektedir. Fakat her durumda 120 dakikalık ölçülerle 7 mm ve üzeri, 90 dakikalık ölçülerle 7.5 mm ve üzeri, 60 ve 30 dakikalık ölçülerle de 8 mm ve üzeri değişikliklerin %95 ihtimalle deformasyon olarak tespit edilebileceği görülmektedir. X ekseni yönünde ilk noktaya göre olan koordinat farkları ile gerçek değerler arasındaki farklar 120 dakikalık ölçü süresiyle +1 mm ile +5.2 mm arasında, 90 dakikalık ölçü süresiyle +0.6 mm ile +4.9 mm arasında, 60 dakikalık ölçü süresiyle +0.5 mm ile +4.4 mm arasında, 30 dakikalık ölçü süresiyle +0.6 mm ile +4.3 mm arasında değişen farklarla elde edilmiştir. Yapılan istatistik test sonuçlarına göre bu farkların anlamlı olmadığı %95 ihtimalle ölçü hatalarından

kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Elde edilen d farklarının ortalama hataları 120 dakikalık ölçüler için ±3.4 mm ile ±4.0 mm arasında, 90 dakikalık ölçüler için ±3.2 mm ile ±3.9 mm arasında, 60 dakikalık ölçüler için ±3.4 mm ile ±4.1 mm arasında, 30 dakikalık ölçüler için ±3.3 mm ile ±4.3 mm arasında değişmektedir.

Y ekseni yönünde gerçek değerleri 1 cm olan farklar; 120 dakikalık ölçü süresiyle -3.0 mm ile +1.6 mm arasında, 90 dakikalık ölçü süresiyle -3.0 mm ile +0.4 mm arasında, 60 dakikalık ölçü süresiyle -3.5 mm ile +0.4 mm arasında, 30 dakikalık ölçü süresiyle -2.7 mm ile +0.3 mm arasında değişen farklarla elde edilmiştir. Yapılan istatistik test sonucunda bu farkların anlamlı olmadığı %95 ihtimalle ölçü hatalarından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Elde edilen d farklarının ortalama hataları 120 ve 90 dakikalık ölçüler için ±1.6 mm ile ±2.0 mm arasında, 60 dakikalık ölçüler için ±1.7 mm ile ±2.1 mm arasında, 30 dakikalık ölçüler için ±1.6 mm ile ±2.1 mm arasında değişmektedir. İstatistik tablo değerinin 1.96 olduğu düşünülürse 120, 90, 60 ve 30 dakikalık ölçülerle doğu-batı doğrultusunda ancak 3.1 mm'den sonraki değişimlerin deformasyon olarak değerlendirilebileceği, fakat her durumda 120 ve 90 dakikalık ölçülerle 3.9 mm ve üzeri, 60 ve 30 dakikalık ölçülerle 4.1 mm ve üzeri değişikliklerin %95 ihtimalle deformasyon olarak tespit edilebileceği görülmektedir. Y ekseni yönünde ilk noktaya göre olan koordinat farkları ile gerçek değerler arasındaki farklar 120 dakikalık ölçü süresiyle -3.1 mm ile +2.5 mm arasında, 90 dakikalık ölçü süresiyle -3.4 mm ile +2.9 mm arasında, 60 dakikalık ölçü süresiyle -2.9 mm ile +1.3 mm arasında, 30 dakikalık ölçü süresiyle -2.5 mm ile +1.9 mm arasında değişen farklarla elde edilmiştir. Yapılan istatistik test sonuçlarına göre bu farkların anlamlı olmadığı %95 ihtimalle ölçü hatalarından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Elde edilen d farklarının ortalama hataları 120 dakikalık ölçüler için ±1.8 mm ile ±2.1 mm arasında, 90 dakikalık ölçüler için ±1.9 mm ile ±2.1 mm arasında, 60 dakikalık ölçüler için ±1.8 mm ile ±2.3 mm arasında, 30 dakikalık ölçüler için ±1.7 mm ile ±2.2 mm arasında değişmektedir.

6.2. Öneriler

Günümüzde uydularla konum belirleme sistemleri olarak en aktif kullanılan ve faaliyette olan sistemler Amerika Birleşik Devletleri'nin GPS'i ve Rusya'nın GLONASS'ıdır. Bu sistemler deformasyon ölçmelerinde ve diğer haritacılık uygulamalarında yeterli doğrulukta sonuçlar vermektedir fakat çeşitli ülkeler tarafından faaliyete geçirilmesi düşünülen yeni konum belirleme sistemlerinin gelecekte faaliyete

geçmesi hizmet kalitesini ve potansiyel kullanıcıların ve uygulamaların sayısını artıracaktır.

Çalışmadan elde edilen sayısal sonuçlar göz önüne alındığında LGO yazılımının da mikrojeodezik ağlar söz konusu olduğunda bilimsel amaçlı çalışmalarda kullanılabileceği görülmektedir. Deformasyon ölçmelerinde GNSS teknikleri kullanılacağı zaman optimal ölçü süresi ve ihtiyaca uygun bir ölçme stratejisi geliştirilebilir niteliktedir. Mikrojeodezik ağlar için yarım saatlik bir ölçü süresinin deformasyon ölçmelerinde yeterli doğrulukta sonuçlar verdiği düşünülmektedir. Farklı GNSS değerlendirme yazılımlarının ve seçilen ağ geometrisinin deformasyonların belirlenmesi üzerindeki etkileri araştırılabilir nitelikte konular olarak gözükmektedir.

KAYNAKLAR

Acar, M., Özlüdemir, M. T., Erol, S., Çelik, R. N. ve Ayan, T., 2008, Kinematic landslide monitoring with Kalman filtering, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8 (2), 213-221.

Açıkgöz, M., 2010, Türkiye Ulusal Yatay Kontrol Ağı'nın Kuzeybatı Bölümünde Yer Kabuğu Hareketleri Nedeniyle Oluşan Deformasyonun Yersel ve GPS ölçüleri ile Araştırılması, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,* İstanbul.

Alçay, S., 2014, Beton Kemer Barajlardaki Deformasyonların Jeodezik ve Geoteknik Yöntemlerle İzlenmesi ve Ermenek Barajı Örneği, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.

Altın, M. U., 2006, Kuzey Anadolu Fayının Batı Marmara Bölümündeki Hareketlerinin GPS Ölçmeleri ile Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Bayrak, T., 2003, Heyelanlar için Bir Dinamik Deformasyon ve Bir Dinamik Hareket Yüzeyi Modelinin Oluşturulması, Doktora Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, 186.

Caspary, W. F., 2000, Concepts of Network and Deformation Analysis, *Australia*, School of Geomatic Engineering The University of New Southwales UNSW, p. 1-3.

Çakır, S., 2006, Mühendislik Yapılarındaki Deformasyonların S-Transformasyonu ile Belirlenmesi ve Bir Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 105.

Doğanalp, S., 2005, Kinematik Modelde Kalman Filtreleme Yöntemi ile Deformasyon Analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,* Konya.

Doğanalp, S. ve Turgut, B., 2009, Statik ve Kinematik Modelde Deformasyon Analizi, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24 (2), 31-44.

Erdoğan, H., 2006, Mühendislik Yapılarındaki Dinamik Davranışların Jeodezik Ölçmelerle Belirlenmesi, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Erol, S., 2008, GPS ve Nivelman Ölçüleriyle Deformasyonların Belirlenmesi, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Gülal, E., 2012, Mühendislik Jeodezisinde Sistem Analizi Ders Notları. İstanbul.

Hastaoğlu, K. Ö., 2009, GPS Hızlı Statik Yöntem ile Heyelanların İzlenebilirliğinin Araştırılması: Sivas Koyulhisar Heyelanı Örneği, Doktora Tezi, *Yıldız teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

İnal, C., 1990, Yerkabuğu ve Yapılardaki Deformasyonların Oluşumu ve Yorumu, *Harita ve Kadastro Mühendisliği Dergisi* (66), 42-48.

İnal, C., 2000, Lisans ve Yüksek Lisans Ders Notları. Selçuk Üniversitesi, Konya.

İnal, C., 2014, Deformasyon Ölçülerinin Analizi Yüksek Lisans Ders Notları. Selçuk Üniversitesi, Konya.

Jin, S., Cardellach, E. ve Xie, F., 2014, GNSS Remote Sensing, *New York*, Springer, p.

Kahveci, M. ve Yıldız, F., 2016, GPS/GNSS Uydularla Konum Belirleme Sistemleri: Teori-Uygulama, *Ankara*, Nobel Yayın Dağıtım, p.

Kearns, T. J., Wang, G., Bao, Y., Jiang, J. ve Lee, D., 2015, Current Land Subsidence and Groundwater Level Changes in the Houston Metropolitan Area (2005–2012), *Journal of Surveying Engineering*, 141 (4), 05015002.

Moschas, F. ve Stiros, S., 2015, Dynamic Deflections of a Stiff Footbridge Using 100-Hz GNSS and Accelerometer Data, *Journal of Surveying Engineering*, 141 (4), 04015003.

Ogundare, J. O., 2016, Precision Surveying: The Principles and Geomatics Practice, *United States of America*, John Wiley, p.

Özyaşar, M., 2009, İstanbul GPS Nirengi Ağı 1999 ve 2005 Kampanyalarından Yararlanarak İstanbul Metropolitan Alanında Deprem Sonrası Hareketlerin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Satirapod, C., Simons, W. J. F. ve Promthong, C., 2008, Monitoring Deformation of Thai Geodetic Network due to the 2004 Sumatra-Andaman and 2005 Nias Earthquakes by GPS, *Journal of Surveying Engineering*, 134 (3), 83-88.

Schaal, R. E., Larocca, A. P. C. ve Guimarães, G. N., 2012, Use of a Single L1 GPS Receiver for Monitoring Structures: First Results of the Detection of Millimetric Dynamic Oscillations, *Journal of Surveying Engineering*, 138 (2), 92-95.

Selendi, A., 2011, Marmara Bölgesi'nde Yerkabuğu Hareketlerinin GPS ve Gravite Ölçmeleri (2006-2010) ile Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Tanır, E., 2000, Deformasyon Analizinde Statik Değerlendirme Yöntemleri, Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, 105.

Uluışık, P., 2006, Yüksek Bina Hareketinin GPS ile İzlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Wang, G. ve Soler, T., 2012, OPUS for Horizontal Subcentimeter-Accuracy Landslide Monitoring: Case Study in the Puerto Rico and Virgin Islands Region, *Journal of Surveying Engineering*, 138 (3), 143-153.

Wang, G. ve Soler, T., 2013, Using OPUS for Measuring Vertical Displacements in Houston, Texas, *Journal of Surveying Engineering*, 139 (3), 126-134.

Wang, G. ve Soler, T., 2015, Measuring Land Subsidence Using GPS: Ellipsoid Height versus Orthometric Height, *Journal of Surveying Engineering*, 141 (2), 05014004.

Wellenhof, B. H., Lichtenegger, H. ve Wasle, E., 2008, GNSS - Global Navigation Satellite Systems, *Avusturya*, Springer, p.

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.

Yalçınkaya, M., 2003, Monitoring crustal movements in West Anatolia by precision leveling, *Journal of Surveying Engineering-Asce*, 129 (1), 44-49.

Yiğit, C., Li, X., İnal, C., Linlin, G. ve Yetkin, M., 2010, Preliminary Evaluation of Precise Inclination Sensor and GPS for Monitoring Full-Scale Dynamic Response of a Tall Reinforced Concrete Building, *Journal of Applied Geodesy*, 4 (2), 103-113.

Yıldırım, A. F., 2007, Mühendislik Yapılarının Deformasyon Analizinde GPS Ölçülerinin Kullanılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi, Fen BİIimleri Enstitüsü*, Konya.

Zeybek, M., 2013, Heyelanların İzlenmesinde GNSS ve Yersel Lazer Tarama Tekniklerinin Birlikte Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**:**	Burhaneddin BİLGEN
Uyruğu	**:**	T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi	**:**	Altındağ – 04.07.1990
Telefon	**:**	(332) 223 19 34
Faks	**:**	
e-mail	**:**	bbilgen@selcuk.edu.tr

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	:	Yavuz Sultan Selim Anadolu Lisesi, Mamak, Ankara	2008
Üniversite	:	Aksaray Ü., Harita Mühendisliği, Merkez, Aksaray	2012
Yüksek Lisans	:	Selçuk Ü., Harita Mühendisliği ABD, Selçuklu,Konya	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
2013-2015	Gazi Üniversitesi, Tapu Kadastro Yüksekokulu	Araştırma Görevlisi
2015-	Selçuk Ü, Harita Mühendisliği, Ölçme Tekniği ABD.	Araştırma Görevlisi

UZMANLIK ALANI

Ölçme Tekniği

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

Bilgen, B., İnal, C. ve Bülbül, S., (2016), GNSS Tekniği ile Yatay Yöndeki Deformasyonların Araştırılması, 8. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, 19-21 Ekim 2016.

Bülbül, S., İnal, C. ve Bilgen, B., (2016), Ağ GZK'da Alıcı Seçiminin Nokta Konumlamaya Etkisi, 8. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, 19-21 Ekim 2016.