



T.C.

ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ



HEYELANLARIN ZAMANSAL OLARAK

İZLENEBİLMESİ İÇİN MATLAB

TABANLI JEODEZİK DEFORMASYON

ANALİZİ YAZILIMI GELİŞTİRİLMESİ

Deniz TAYFUR

Coğrafi Bilgi Teknolojileri Anabilim Dalı

ÇANAKKALE

T.C.
ANAkkALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

HEYELANLARIN ZAMANSAL OLARAK
İZLENEBİLMESİ İÇİN MATLAB
TABANLI JEODEZİK DEFORMASYON
ANALİZİ YAZILIMI GELİŞTİRİLMESİ

Deniz TAYFUR

Coğrafi Bilgi Teknolojileri Anabilim Dalı

Tezin Sunulduėu Tarih:18/08/2017

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Ramazan Cüneyt ERENOĞLU

Deniz TAYFUR tarafından Doç. Dr. Ramazan Cüneyt ERENOĞLU yönetiminde hazırlanan ve **18/08/2017** tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan “**Heyelanların Zamansal Olarak İzlenebilmesi İçin Matlab Tabanlı Jeodezik Deformasyon Analizi Geliştirilmesi**” başlıklı çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Coğrafi Bilgi Teknolojileri Anabilim Dalı**’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

JÜRİ

Doç. Dr. Ramazan Cüneyt ERENOĞLU
Başkan

Doç. Dr. Emin ULUGERGERLİ
Üye

Doç. Dr. Niyazi ARSLAN
Üye

.....
.....
.....

Prof. Dr. Levent GENÇ
Müdür
Fen Bilimleri Enstitüsü

Sıra No:.....

İNTİHAL (AŞIRMA) BEYAN SAYFASI



Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belirttiğimi beyan ederim.

Deniz TAYFUR

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımnda bana önderlik eden, beni yönlendiren, bilgiye ulaşmamda ve bilgiyi en verimli şekilde kullanmamda yolumu hep kısaltan, her aradığımda ulaşabildiğim, hiçbir sorumu cevapsız bırakmayan değerli danışman hocam Doç. Dr. Ramazan Cüneyt ERENOĞLU'na sonsuz teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Yüksek Lisans öğrenimim boyunca benden desteklerini esirgemeyen Çanakkale Onsekizmart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölüm Başkanı Doç. Dr. Özgün AKÇAY'a, yüksek lisans öğrenimime başladığımda Bölüm Başkanı olan değerli Hocam Yrd. Doç. Dr. Mehmet Ali YÜCEL'e, değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Oya ERENOĞLU'na, değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Emin Özgür AVŞAR'a ve Arş. Gör. Deniz GÜNGÖRDÜ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Öğrenim hayatım boyunca desteğini hiç esirgemeyen eşim ve kızlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Deniz TAYFUR
Çanakkale, Ağustos 2017

SİMGELER VE KISALTMALAR

C	C programlama dili
MATLAB	Matrix Laboratory
M-File	Matlab dosyası



ÖZET

HEYELANLARIN ZAMANSAL OLARAK İZLENEBİLMESİ İÇİN MATLAB TABANLI JEODEZİK DEFORMASYON ANALİZİ YAZILIMI GELİŞTİRİLMESİ

Deniz TAYFUR

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Coğrafi Bilgi Teknolojileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Ramazan Cüneyt ERENOĞLU

18/08/2017, 99

Teknolojinin gelişmesi ile doğal olarak hesaplama teknikleri de gelişmiş, bu hesaplamalardan ortaya çıkan sonuçlar da gün geçtikçe daha ayırt edilebilir olmuştur. Bu durum mühendislik hesaplamalarını daha dar alanlarda hareket etmek zorunda bırakmıştır.

Jeodezi bilimi de bu hesaplamalardan güvenilir sonuçlar çıkarmak zorunda olan bir bilim dalıdır. Bu sebepten dolayı hesaplama yöntemlerinde her geçen gün daha güvenilir ve standart sapmaları daha küçük sonuçlar ortaya koymak zorunda kalmıştır. Analiz edilecek verinin doğruluğunun artması mühendislik dünyasını daha doğru sonuçlara götürürken, bu verilerin doğru kullanılması sorumluluğunu da beraberinde arttırmıştır. Bu verilerin analiz edilebilmesi için uygun hale getirilmesi, verilerin içindeki uygun olmayan unsurların ortadan kaldırılması ve verilerin analiz edilecek koşullara ulaştırılması işlemleri de çok daha detaylı ve önemli hale gelmiştir.

Bu çalışmada, Çanakkale İli, Lapseki İlçesi'nin bir köyü olan Adatepe Köyü'nün Çanakkale-Bursa Karayolu güzergahı kenarında heyelanlı olduğu öngörülen bir kısmında meydana gelen değişimlerin gözlenmesi için yapılan bir çalışmadır. Bu hareketliliğin izlenebilmesi için tercih edilen alanda tesis edilen jeodezik test ağında iki periyot ölçüm yapılmıştır. Yapılan ölçümlerden elde edilen verilerin dengelenmesi için Tüm iz minimum serbest dengeleme yöntemi kullanılmıştır. İstatistiksel testleri yapılarak uyuşumsuz ölçüler elemine edilmiştir. Uyuşumsuz ölçü testi olarak pope testi kullanılmış, iki periyot ölçümünden elde edilen sonuçların standart sapmalarının istatistiksel anlamda birbiriyle eşit olup olmadığı varyans testi ile tespit edilmiştir. Ardından uygulanan global testten sonra jeodezik ağda istatistiksel olarak anlamlı bir deformasyon olduğu anlaşılmıştır. Deformasyon analizi s-transformasyon yöntemiyle yerleştirme uygulaması ile

sonuçlandırılmıştır. Deformasyon analizi yapılabilmesi için bahsi geçen bütün hesaplamalarda matematiksel fonksiyon ve formuller ile oluşturulan matematiksel modeller için MATLAB'da bir program hazırlanmıştır.

Anahtar sözcükler: Heyelan, Deformasyon, Jeodezi, MATLAB, Hız.



ABSTRACT

A MATLAB SOFTWARE DEVELOPMENT FOR GEODETIC DEFORMATION ANALYSIS IN USING OF TEMPORAL LANDSLIDE MONITORING

Deniz TAYFUR

Çanakkale Onsekiz Mart University

Graduate School of Geographic Information Technologies

Master of Science Thesis in Geographic Information Systems

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Ramazan Cuneyt ERENOGLU

18/08/2017, 99

With the development of technology, naturally the techniques of calculation have also developed, and the results of these calculations have become increasingly distinguishable day by day. This situation made engineering calculations to study at more limited areas. Geodesy is also has to get more reliable results with minimum standart deviation from these calculations. Increasing the accuracy of the data to be analyzed leads the engineering world to more accurate results. It has also increased the responsibility for correct use of these data. It has become much more detailed and important to make these data suitable for analysis, to remove the inappropriate measurements from the data, and to transmit the data to the conditions to be analyzed.

In this study, it is carried out to observe changes an landslide area on the Çanakkale-Bursa Highway route at Adatepe village of Lapseki district of Çanakkale. Two period measurements were made in the installed geodetic network for monitoring this movement. All trace minimum free equilibrium method was used to stabilize the data obtained from the measurements made. Statistical tests were conducted to eliminate mismatched measures. Pope test was used as a mismatch measure and the variance test was used to determine whether the standard deviations of the results from two period measurements were statistically equal. Then it is understood that there is a statistically significant deformation in the geodetic network after the applied global test. Deformation analysis was concluded with s-transformation method localization application. In order to perform the deformation analysis, a program was prepared in MATLAB for the mathematical models formed by mathematical functions and formulas in all calculations.

Keywords: Landslide, Deformation, Geodesy, MATLAB

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ SINAVI SONUÇ FORMU	ii
İNTİHAL (AŞIRMA) BEYAN SAYFASI.....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	v
ÖZET	vi
ABSTRACT.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
1.1.Deformasyon ve Deformasyon Analizi.....	1
1.2.Deformasyon Analizi Yapılacak Alanlar	2
1.2.1.Mühendislik Yapıları İçin Gerçekleştirilen Deformasyon Analizleri	2
1.2.2.Makine ve Sanayi Tesisleri İçin Gerçekleştirilen Deformasyon Analizleri	2
1.2.3. Zemin ve Kaya Mekaniği, Mühendislik Jeolojisi İçin Yapılan Deformasyon Analizleri	3
1.3.Deformasyon Analizinde Geometrik Obje Modeli	3
1.4. Jeodezik Yöntemlerle Deformasyon Ölçme Yötemleri	5
1.4.1.Jeodezik Kontrol Ağları Yöntemi	6
1.4.1.1.Obje (Deformasyon) Noktaları	8
1.4.1.2.Ölçme (Kontrol) noktaları	8
1.4.1.3.Yöneltme Noktaları.....	9
1.4.1.4.Sigorta Noktaları.....	9
1.5. Deformasyonların Sınıflandırılması.....	10
1.5.1.Kuvvetin Büyüklüğü Doğrultusunda Objede Oluşacak Tepkinin Türüne Göre Deformasyonlar	10
1.5.1.1.Büyük Deformasyonlar.....	10
1.5.1.2.Küçük Deformasyonlar.....	11
1.5.2.Kuvvetin Büyüklüğüne Göre Deformasyon Türleri.....	11
1.6. Deformasyon Modelleri	11
1.6.1. Statik Davranışlı Model.....	11
1.6.2. Kinematik Model.....	12

1.6.3. Dinamik Model	13
BÖLÜM 2	15
ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	15
2.1 Heyelanlar, Deformasyonlar ve Mühendislik Bilimi	15
BÖLÜM 3	17
MATERYAL VE METOT	17
3.1 Parametre Kestirim Yöntemleri ve Dengeleme Türleri.....	17
3.1.1 Beklenen Değere Sadık En Uygun Kestirim Yöntemi	18
3.1.2 En Küçük Kareler Yöntemi	18
3.1.3 Maksimum Likelihood Yöntemi	19
3.2. Dolaysız Ölçüler Dengelemesi	20
3.3. Dolaylı Ölçüler Dengelemesi.....	24
3.3.1. Gauss – Markoff Modeli Düzeltme Denklemleri.....	25
3.3.2. Normal Denklemler	27
3.3.3. Normal Denklemlerin Çözümü	29
3.3.4. Düzeltmeler, Bilinmeyenler, Dengeli Ölçüler ve Denetim İşlemleri	38
3.3.5. Standart Sapmalar.....	39
3.4.Bir Jeodezik Ağın Datumu.....	43
3.5.Serbest Ağ Dengelemesi.....	44
3.5.1.Zorlamasız Klasik Dengeleme.....	45
3.5.2.Tüm İz Minimum Yöntemine Göre Dengeleme.....	45
3.5.3.Kısmi İz Minimum Yöntemine Göre Dengeleme	51
3.6.Periyot Ölçülerinin Dengelenmesi.....	54
3.6.1.Periyot Ölçülerinin Ayır Ayır Dengelenmesi.....	56
3.7.İstatistiksel Testler.....	58
3.7.1.Model Hipotezinin Testi.....	58
3.7.2.Uyuşumsuz Ölçüler Testi	59
3.7.3.Varyans Testi	60
3.7.3.1.Bir Varyansın Test Edilmesi	60
3.7.3.2. İki Varyansın Test Edilmesi.....	60
3.8.Doğrusal Hipotez Testi	61
3.8.1.Deformasyon Analizinde Doğrusal Hipotez Testi (Global Test)	64
3.8.2. Kapalı (İmplicit) Hipotez Testi.....	66
3.8.3. İmplicit Hipotez Testinin Deformasyon Analizine Uygulanması (Kapalı Test).....	67

3.8.4. Ağ Konfigurasyonu Her İki Peryotta Eşlenik Değilse Global Test	69
3.9. S- Dönüşümü ile Yerelleştirme	71
3.10. Matlab Teknik Programlama Dili	74
3.11. Deformasyon Analizi Yapılacak Alan ile Ölçülerin Matlab Programına Tanıtılması ve İlişkilendirilmesi	76
3.11.1. Ana Modül	77
3.11.2. Dengeleme Aşamaları	78
3.11.3. Deformasyon Analizi Aşaması	79
3.11.4. Sonuçlandırma Adımı	79
BÖLÜM 4	82
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	82
4.1. Çanakkale Bölgesi ve Heyelanlar	82
4.1.1. Çanakkale Bölgesinin Genel Jeolojik Durumu	82
4.1.2. Adatepe Heyelan Bölgesinin Tanımı	83
4.1.3. Adatepe Heyelan Bölgesinin Jeolojik Durumu	83
4.2. Uygulama	85
4.2.1. Periyot Dengelemeleri	86
4.2.2. İstatistiksel Testler	87
4.2.3. Global Test	88
4.2.4. S-Dönüşüm	89
BÖLÜM 5	96
SONUÇ VE ÖNERİLER	96
KAYNAKLAR	97
ÖZGEÇMİŞ	I

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Mühendislik ölçmesinde kontrol ağı	4
Şekil 1.2. Mühendislik yapısında referans, obje ve sigorta noktalarının dağılımı.....	7
Şekil 1.3. İzleme noktalarında kullanılan tesis inşaatı.....	9
Şekil 3.1. İki periyotta eşlenik ağ konfigürasyonu	69
Şekil 3.2. Her iki epokta 1, 2, 3 ve 4 no'lu eşlenik noktalar	70
Şekil 3.3. Matlab yazılımı ana komut penceresi	75
Şekil 3.4. Matlab yazılımını komut penceresi	75
Şekil 3.5. Matlab yazılımı grafik çizim penceresi	76
Şekil 3.6. Deformasyon analizi iş-akış şeması	77
Şekil 3.7. Birinci periyot ölçülerinin matematiksel modeli	80
Şekil 3.8. Global test modeli.....	80
Şekil 3.9. Varyans test modeli	81
Şekil 3.10. Uyuşumsuz ölçü testi.....	81
Şekil 4.1. Çalışma alanı	83
Şekil 4.2. Çalışma alanının uydu görüntüsü ve yersel fotoğraflardaki zamansal değişimi .	84
Şekil 4.3. Heyelan alanında tesis edilen nivelman ağı.....	85

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 3.1 Bilinmeyenlerin Gauss Yöntemi ile hesaplanması	31
Çizelge 3.2 Bilinmeyenler ve ağırlık katsayılarının Gauss Yöntemi ile çözümü	33
Çizelge 3.3 Bilinmeyenler ve ağırlık katsayılarının çözüm alroritması	35
Çizelge 3.4 Bilinmeyenlerin Cholesky Yöntemi ile çözümü	36
Çizelge 3.5 Bilinmeyenlerin ve ağırlık katsayılarının Cholesky Yöntemi ile hesaplanması	37
Çizelge 4.1 Dengelemenin katsayılar matrisi ve düzeltme denklemleri.....	86
Çizelge 4.2 Birinci ve ikinci ölçme epoklarına ilişkin bilinmeyenlerin ağırlık katsayıları ve küçültülmüş bilinmeyenler vektörleri	87
Çizelge 4.3 Birinci ve ikinci ölçme epoklarına ilişkin uyumsuz ölçü testleri.....	88
Çizelge 4.4 S-Dönüşüm döngülerinin F global test değerleri ve F sınır değerleri sonuçları	95



BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1.Deformasyon ve Deformasyon Analizi

Mühendislik yapılarında veya yerkabuğunda meydana gelen şekil değişikliklerine genel anlamda deformasyon denilmektedir (Bedir, 2011; Algül, 1983; Atasoy, 1984). Herhangi bir bölgede yerkabuğu üzerinde veya bir mühendislik yapısı üzerinde belirlenen bir noktanın t_1 ve t_2 anlarında elde edilen konumlarının rakamsal ifadeleri birbirinden çıkarıldığında elde edilen sonucun sıfırdan farklı olduğu istatistiksel olarak kanıtlanabiliyorsa “deformasyon\deplasman” varlığından söz edilebilir.

Dünya üzerinde herhangi bir bölgede bulunan yerkabuğu veya bir mühendislik yapısının yukarıda bahsedilen parametrelere bağlı olarak şeklinin değişmesini izleyerek ortaya çıkan farklılıkları tespit etmeye yönelik yapılan gözlem ve ölçümlere deformasyon ölçmeleri denilmektedir. Yapılan bu gözlem ve ölçümlerden elde edilen veriler ışığında mekan, zaman, boyut ve büyüklük parametreleri doğrultusunda ortaya çıkan değişim ve gelişimin tespit edilmesi ve yorumlanması işlemlerine de deformasyon analizi denilmektedir.

Jeodezide deformasyon gözlem ve analizlerinin temel amacı, seçilen noktaların hareket edip etmediklerini, hareket etmediği ön görülüyorsa sabit kaldıklarını tespit etmek ve kanıtlamaktır. Bu durumu ortaya koymak için de doğal olarak farklı zaman dilimlerinde birden fazla gözlemler gerçekleştirmek gerekmektedir.

Deformasyon ölçmeleri yerkabuğu hareketleri ve mühendislik ölçmelerinin beraber yürütülmesiyle gerçekleştirilir. Çünkü deformasyonun ortaya koyulması için bir referans ölçüye ihtiyaç duyulmaktadır. Yani söz konusu yerkabuğu hareketi de olsa mühendislik yapılarındaki değişim de olsa hareket etmediği varsayılan referans nirengi ağlarından hareket edilerek kanıtlanabilecek bir durumdur.

Ülke referans ağları düşünüldüğünde akla gelen en temel jeodezik ağlar Ülke Temel Jeodezik Ağlarıdır. Bu durumda yapılacak gözlemlerde ölçümümüzü dayandırdığımız Ülke Temel Jeodezik Ağlarının hareket etmediği, yani statik olduğu varsayılmaktadır. Bu sabit kabul edilen noktalardan türetilen jeodezik deformasyon ağıımız için ölçümler yapılır. Bu ölçümlerden rölatif nokta konumları belirlenir. Ölçümlerden elde edilen göreceli koordinatlar dengelenir. Dengeleme işlemi sonrasında jeodezik ağda bulunan noktaların kestirim (tahmin) değerleri ile bu değerlerin duyarlılık ölçütleri belirlenir.

Deformasyon analizi sürekliliği olan bir süreçtir. Hareket olduğu öngörülen bölgeye

yerleştirilen jeodezik ağ noktaları bir defa değil belirli aralıklarla tekrarlanan ölçümler sonucunda sürekli olarak yapılmaktadır. Buradan hareketle göreceli koordinatları belirlenen, dengelemeleri yapılan jeodezik ağın tekrarlanan ölçümlerinde sabit olması gereken, yani hareket görülmemesi öngörülen bölgelerdeki noktaların koordinatlarının değişmediği her defasında kontrol edilir.

Hareket olması öngörülen bölgenin etrafına genişleyen halkalar şeklinde tasarlanan jeodezik ağın en sonunda dayandığı koordinatların Ülke Temel Jeodezik Ağlarının koordinatları olduğu söylenmişti. Ülke Temel Jeodezik Ağları Sistemi hiyerarşik grupların oluşturduğu bir yapıda tasarlanmıştır. Her grup nirengi bir üst gruba dayalı bir şekilde koordinatlandırılmıştır. Yapılacak her türlü deformasyon ölçümü de bu genişleyen halkalardan sabit olduğu kanıtlanan noktalardan başlayarak yapılır ve en son obje noktalarının hareket edip etmediği, hareket varsa bu hareketin anlamlı olup olmadığının analizi yapılır.

1.2.Deformasyon Analizi Yapılacak Alanlar

1.2.1.Mühendislik Yapıları İçin Gerçekleştirilen Deformasyon Analizleri

Akla gelebilecek her türlü mühendislik yapılarında (Köprü, baraj, gölet, gökdelen) meydana gelecek değişimlerin kontrol altında tutulması ve yapılabiliriyorsa önlenmesi amaçlı yapılan ölçümler ve analizler bu gruba girmektedir. Bu tür yapılar için gerçekleştirilecek ölçümler ve bu ölçümlerden elde edilecek veriler ışığında yapıların yapım özellikleri, yapılarda kullanılan malzemelerin özellikleri de irdelenmiş olur. Bu sayede daha sonra yapılacak inşaatlarda yapım teknikleri ve malzeme kalitelerinin gelişimine de olanak sağlanmış olur. Bu işlemler mühendislik yapıları ile uğraşan işletmelerin ekonomik analizlerinde ve çevre kirliliğinin ile inşaat esnasında oluşacak tehlikelerin minimuma indirilmesi konularında istatistiksel veriler ortaya koyar.

1.2.2.Makine ve Sanayi Tesisleri İçin Gerçekleştirilen Deformasyon Analizleri

Sanayi bölgelerinde inşa edilen fabrika binaları ile bu binaların içinde ve çevresinde meydana getirilen üretime yönelik makine ve sanayi tesislerinin aplikasyonlarının projelerine uygunluğunun tespit edilmesi, aplikasyonları tamamlanıp faaliyete geçtikten sonra zaman içerisinde herhangi bir değişime uğrayıp uğramadığının tespit edilmesine yönelik yapılan ölçümler ve deformasyon analizleri bu gruba girer. Bu ölçüm ve analizlerde de yine daha sonra yapılacak fabrika binaları ile bu binaların içinde ve çevresinde meydana getirilen üretime yönelik makine ve sanayi tesislerinin yapım

teknikleri ve malzeme kalitelerinin gelişimine de olanak sağlanmış olur. Bu işlemler mühendislik yapıları ile uğraşan işletmelerin ekonomik analizlerinde ve çevre kirliliğinin ile inşaat esnasında oluşacak tehlikelerin minimuma indirilmesi konularında istatistiksel veriler ortaya koyar.

1.2.3. Zemin ve Kaya Mekanik, Mühendislik Jeolojisi İçin Yapılan Deformasyon Analizleri

Yerkabuğunda meydana gelen değişimler dünyanın oluşmasıyla beraber başlamış olup günümüzde de artarak devam etmektedir. Çeşitli sebeplerden dolayı oluşan yer değiştirmeler karşımıza heyelan olarak çıkmaktadır. Arazilerin doğal yapısı olan jeolojik katmanların fazla eğimli arazilerin eğimine paralel uzanması, arazinin jeolojik yapısının gevşek bir durum ortaya koyması, yağışların çokluğu ve/veya dengesiz yoğunlukta olması, deprem, sel, tektonik hareketler, şiddetli rüzgar gibi doğal sebeplerin yanı sıra, bitki örtülerinin tahrip edilmesi, jeolojik yapılar göz ardı edilerek yapılan dengesiz yapılaşma, akarsu yataklarının değiştirilmesi gibi insan kaynaklı tahribatlar da heyelanları tetiklemektedir.

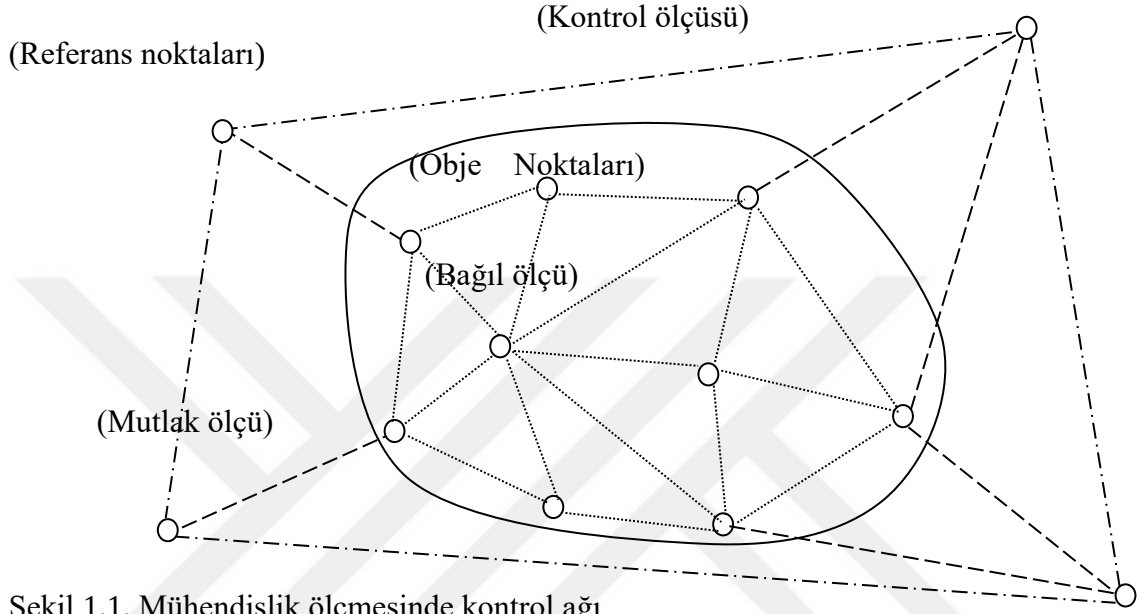
Deformasyon analizi ölçmelerinin bir amacı da yer kabuğunda meydana gelebilecek bu tür hareketleri takip ve tespit etmektir. Hareket edeceği öngörülen bölgelere yerleştirilen jeodezik ağların belirli aralıklarla gözlemlenmesiyle elde edilecek verilerin işlenerek analiz edilmesi, belirlenen bu bölgelerde hareket olup olmadığının ortaya konması da deformasyon analizi ölçümlerinin amaçladığı durumlardandır.

Yerkabuğu hareketleri ile yerkabuğu ve yer altı jeolojisi araştırmaları hem ülke planlamasına altlık olabilecek hem de insan hayatını doğal tehlikelerden izole edebilecek çalışmalardandır. Bu çalışmaların kullanılması devletlere kalmış bir durumdur. Deprem araştırmaları bu çalışmaların en göz önünde olanıdır. Ülkemizde de bu çalışmalar belirli bir yörüngede devam etmektedir. Bu çalışmalar insanların yapılaşacakları, ağaçlandıracakları, tarım yapabilecekleri alanları ayırt etmekte, yerkabuğu hareketleri bakımından aktif olan bölgelerin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Böylece yapılarda kullanılacak statik ve dinamik mekanizmaların niteliklerinin belirlenmesi de bu analiz çalışmalarının sonuçları doğrultusunda belirlenmek durumundadır.

1.3. Deformasyon Analizinde Geometrik Obje Modeli

Geometrik model, deformasyon olduğunu düşündüğümüz bölgeye yerleştirdiğimiz obje noktaları ve varsa onların referans noktalarının oluşturduğu, ve deformasyon olduğu

düşünülen bölgeyi temsil edecek şekilde kurulacak jeodezik deformasyon ağlarını oluşturan (Erdoğan, 2011) noktalar modelidir. Bu model, heyelanlı bölgeyi temsil eden noktaların birbirlerine göre olan konumlarında ve\veya mutlak konumlarında meydana gelecek değişiklikleri izlemek için, birbirlerine hangi parametrelerle bağlı olduklarının, birbirlerini nasıl ve ne kadar etkilediklerinin ortaya konması için oluşturulur.



Şekil 1.1. Mühendislik ölçmesinde kontrol ağı

Daha önce de bahsettiğimiz gibi bir yerde deformasyon analizi yapılıyorsa, orada deformasyon olduğu varsayımı vardır. Eğer bir yerde deformasyon olduğu varsayılıyorsa, deformasyon olup olmadığı, bu bölgede tekrarlı ölçüler sonrasında elde edilen veriler yardımı ile yapılaca istatistiksel uygulamalar sonucunda ortaya koyulur.

Deformasyon olduğu varsayılan bölge “obje noktaları” ile tanımlanır (Şekil 1.1). Deformasyon analizinde asıl hedef obje noktalarının hareket edip etmediğinin kanıtlanmasıdır. Objeye noktasında yapılan ölçümler, obje noktalarının etrafında bulunan ölçme noktalarına dayandırılır ya da ölçme noktalarına kurulan ölçme aletleriyle obje noktalarının okunması yoluyla ölçümler gerçekleştirilir. Ölçme noktalarının daha dışında ve etrafında yöneltme noktaları vardır. Yöneltme noktaları referans noktaları olarak da adlandırılabilir. Yöneltme noktalarının etrafında da röper sisteminde çalışılacak sigorta noktaları bulunmaktadır. Yapılan incelemeler sonunda yerleri belirlenen yöneltme noktalarının bulundukları noktalar jeolojik olarak sağlam olan bölgelerden seçilirler ve hareket etmedikleri kabul edilir. Her deformasyon ölçümünden önce de hareket etmedikleri istatistiksel olarak kanıtlanır. Burada anlatıldığı gibi hareket etmediği kanıtlanan noktalar

referans alınarak oluşturulan jeodezik ağ modellerine "Mutlak Model" denir. Referans noktaları olmaksızın sadece deformasyon olan bölgede tesis edilen obje noktalarından oluşan jeodezik ağ modellerine "Bağıl Model" denir. Bu modelde obje noktalarının birbirine göre olan durumları tanımlanır. Hareketler sadece obje noktalarının birbirlerine göre olan konumlarının değişip değişmemesine göre yorumlanır.

Harita Mühendisliği, deformasyon analizi yapılacak bölgeyi temsil eden noktaları birbiriyle ilişkilendirirken, koordinat, kot, açı, mesafe, kot farkı gibi parametreleri kullanır. Deformasyon bölgesi, belirli aralıklarla yapılan gözlemlerden elde edilen veriler yardımıyla ve bu parametreler kullanılarak oluşturulan matematiksel model ve fonksiyonlarla tanımlanır. Belirli aralıklarla yapılan tanımlamalar birbiriyle ilişkilendirilir ve matematiksel model ve fonksiyonlardan elde edilen rakamsal sonuçlar, bir hareket olup olmadığını ortaya koyar. Bir deformasyon modelinde eğer noktalar Ülke Temel Jeodezik Ağlarında bulunan nirengilere dayandırılıyorsa ve hiyerarşi içinde obje noktalarına kadar birbirine bağlı bir model oluşturuluyorsa ortaya konacak sonuçlar mutlak sonuçlar olacaktır. Fakat, karşımızda sadece obje noktalarından oluşan bir model varsa ve herhangi bir sabit referansa bağlanmıyorsa ortaya konacak sonuçlar bağıl sonuçlar olacaktır. Bu bağıl sonuçlar da bize sadece obje noktalarının birbirlerine göre olan durumlarının değişip değişmediğini söyleyecektir.

Bir deformasyon bölgesinde oluşturulan sistem bağıl da olsa mutlak da olsa bir koordinat sistemi içinde var olacaktır. Bu sistem orada oluşan deformasyon hareketinin niteliklerine göre tek boyutlu (yükseklik), iki boyutlu (yatay düzlem) veya üç boyutlu (yatay düzlem ve yükseklik boyutu) olabilir. Deformasyon bölgesinde oluşturduğumuz modelde hareket etmediğini varsaydığımız nokta ile ilgili teoremimiz ortadan kalkmadıkça (nokta veya noktaların hareket ettiği tespit edilmedikçe) bu noktalar referans alınarak diğer noktaların analizleri yapılabilir. Bu noktalardan obje noktalarına yapılan gözlemler sonucu, değişken olarak adlandırılabilen obje noktalarının hareket ettiği tespit edilirse, bu bölgede obje deformasyonu olduğu ortaya koyulacaktır. İstatistiksel testler sonucu uygun sonuçlar bulunduğu seçilen bölgede anlamlı bir deformasyon olduğu, bu anlamlı deformasyonun hangi noktalarda olduğu söylenebilir.

1.4. Jeodezik Yöntemlerle Deformasyon Ölçme Yöntemleri

Jeodezik yöntemler, yeryüzünde oluşan şekil değişikliklerinin tespit edilmesi ve bu bölgeler için deformasyon analizi yapılması için güvenilir bir yöntem olduğundan yaygın olarak kullanılmaktadır (Algül, 1983). Yapılan ölçümlerin süresi ve zaman aralıklarına

göre incelendiğinde iki gruba ayrıldığı görülmektedir:

- Sürekli ölçme yöntemleri,
- Ayrık ölçme yöntemleri,

Yukarıda bahsedilen yöntem isimlerinden de anlaşılacağı gibi deformasyon bölgelerinde bulunan, yer değiştireceği ön görülen noktalardan bazılarında sürekli gözlemler yapılır. Diğer yöntemde de belirlenen zamanlarda belirli aralıklarla gözlemler yapılır (Atasoy, 1984).

Deformasyon analizi amaçlı yapılan jeodezik ölçmeler, ölçme tekniğine göre incelendiğinde aşağıdaki gibi kategorize edilebilir:

1-Yatay düzlemdeki deformasyon analizlerine yönelik ölçme yöntemleri:

- a-Jeodezik kontrol ağları yöntemi
- b-Hassas poligon yöntemi
- c-Aliynman Yöntemi

2-Düşey eksenindeki deformasyon analizlerine yönelik ölçme yöntemleri :

- a-Hassas geometrik nivelman yöntemi,
- b-Hassas trigonometrik nivelman yöntemi,
- c-Hidrostatik nivelman yöntemi olarak kategorize edilebilir.

Daha önce de bahsedildiği üzere deformasyonların analizleri yatay düzlemde, düşey ekseninde veya bu yöntemlerin eşleştirmeleri daha efektif sonuçlar verdiğinden üç boyutlu olarak yapılabilir (Algül, 1983). Genel olarak geleneksel jeodezik ölçme yöntemlerinde düşey ve yatay yöndeki değişimler ayrı ayrı incelenmekte olup, gelişen teknoloji ile beraber uydu sistemleri vasıtasıyla konum belirleme yöntemleri kullanılarak üç boyutta birden deformasyon analizi, gereken doğrulukta yapılabilmektedir (Cross ve Şahin, 1997).

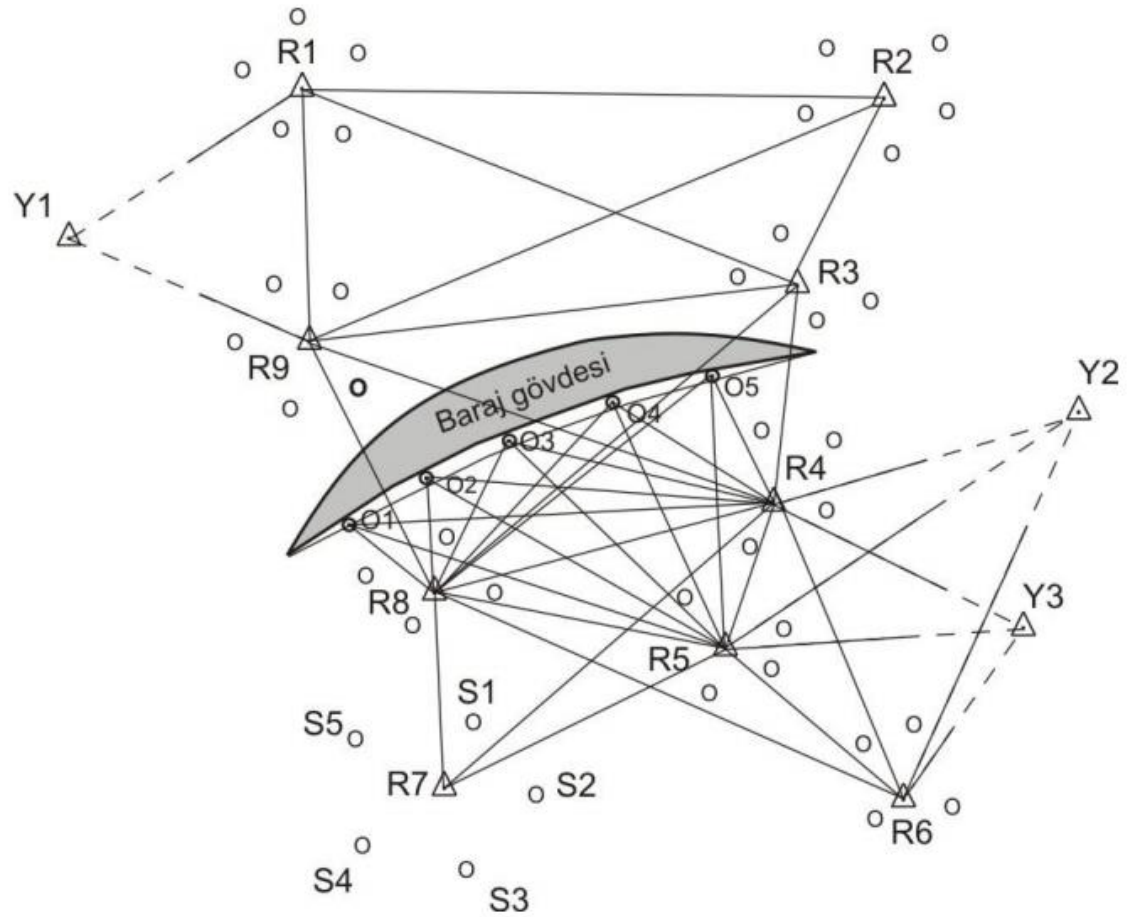
Bu çalışmada incelenecek olan bölge heyelan bölgesidir. Bu heyelan bölgesinde de kullanılacak yöntem Hassas Geometrik Nivelman Yöntemidir.

1.4.1.Jeodezik Kontrol Ağları Yöntemi

Jeodezik kontrol ağları yöntemi, hiyerarşik bir sistem olup referans noktalar açısından güvenilir bir yapı olduğundan irdelenmesi yararlı bir sistemdir. Bu sistemde dört çeşit nokta grubundan oluşur. Bu gruplar kendi içerisinde birbirleriyle jeodezik elemanlarla bağlıdır. Aynı şekilde kontrol nokta grupları bir üst hiyerarşik gruptaki noktalarda aynı jeodezik elemanlar ile bağlı bulunmaktadır. Jeodezik ağda bulunan bütün noktalar aynı koordinat sisteminde olmak durumundadır:

- 1 - Ölçme (Kontrol) noktaları,
- 2 - Obje (Deformasyon) noktaları,
- 3 - Yönelme noktaları
- 4 - Sigorta noktaları

Bir deformasyon bölgesini temsil eden noktalar kümesi incelenirken aralarındaki mesafeler ve birbirlerine göre açısal durumları yapılacak tanımlamalar için önemlidir. Noktaların uzayda nasıl hareket ettiğini tanımlamak için bazen tek boyut veya bir düzlem yetmez. Bu durumda seçilen bölgenin meydana getirdiği hareketi tanımlamak için noktaların yer değiştirmelerini üç boyutlu olarak tanımlamak gerekir. Bu durumda tasarlanacak jeodezik kontrol ağı üç boyutlu olacaktır.



Şekil 1.2. Mühendislik yapısında referans, obje ve sigorta noktalarının dağılımı

Bir deformasyon bölgesinde tasarlanacak jeodezik kontrol ağının nasıl olacağı, deformasyon analizine konu olacak bölgenin jeolojik yapısına, eğimine, hareket ettiği öngörülen alanın genişliğine ve topoğrafik yapısına göre değişir. Şekil 1.2'de gösterilen deformasyon analiz bölgesindeki jeodezik kontrol ağı aşağıda tanımlanan kontrol

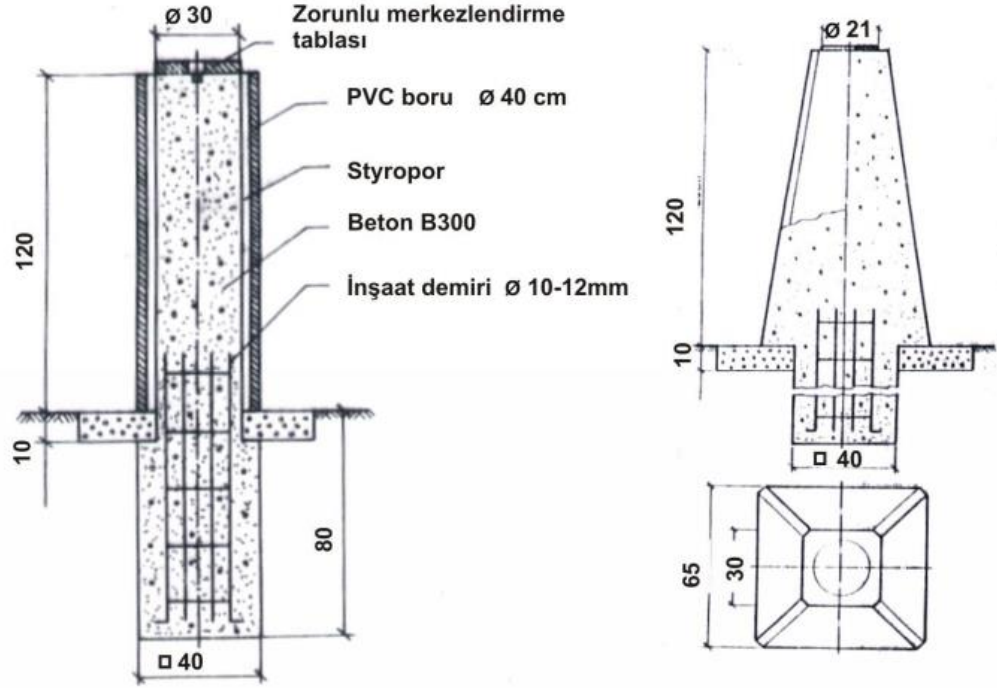
noktalarından oluşmaktadır.

1.4.1.1.Obje (Deformasyon) Noktaları

Jeodezik kontrol ağının hareket beklenen bölgeye en yakın ve\veya hareket öngörülen bölgenin içinde bulunan noktalardır. Başka bir deyişle hareket olacağı öngörülen bölgeyi temsil eden nokta tesisleridir. Heyelan bölgelerinde heyelanlı olduğunu tahmin edilen bölgeye heyelan olmasını öngördüğümüz yoğunlukta, beton tesis veya demir boru olarak tesis edilir. Bu noktaların yer tayininde deformasyon olacak bölgeyi iyi temsil etmesi, deformasyonu en iyi şekilde ortaya koyması açısından inşaat mühendisliği, makine mühendisliği, jeoloji ve jeofizik mühendisliği disiplinlerinden de fikir almak faydalı olacaktır. Obje noktaları tesislerinin uzun ömürlü olması için sağlam bir şekilde yerleştirilirken bölgede meydana gelecek değişimleri üst düzeyde gösterebilecek kabiliyette olmasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Ayrıca bölgede meydana gelecek hareketin büyüklüğünden veya dış etkenlerden dolayı tesislerin bazılarının ortadan kalkması göz önünde bulundurulmalı ve tesis sayısı yapılacak deformasyon analiz çalışmasını tehlikeye sokmayacak yeterlilikte olmalıdır.

1.4.1.2.Ölçme (Kontrol) noktaları

Heyelan olması öngörülen bölgede obje noktalarının etrafına tesis edilen noktalardır. Kontrol noktaları, üzerine alet kurulup obje noktalarına doğru ölçmeler yapılabilecek kabiliyette olmalıdır. Bu noktalar tesis edilirken jeolojik olarak bazı tespitlerin yapılması gerekmektedir. Çünkü kontrol noktalarının hareketsiz olması gerekmektedir. Deformasyon analizi ölçümleri esnasında kontrol noktalarından yapılacak ölçümlerden önce bu noktaların hareketsiz olduklarının bilimsel olarak kanıtlanması gerekmektedir. Bölgeye uygulanacak tesisler, genelde içi dış etkilere karşı demir ile güçlendirilmiş kare veya yuvarlak şekilli pilyeler olarak yere uygulanır (Şekil 1.2 ve Şekil 1.3).



Şekil 1.3. İzleme noktalarında kullanılan tesis inşaatı

1.4.1.3.Yöneltme Noktaları

Heyelan olması öngörülen bölgede kontrol noktalarının etrafına tesis edilmesi gereken noktalardır. Yöneltme noktaları, üzerine alet kurulup kontrol noktalarına ve gerekirse obje noktalarına doğru ölçmeler yapılabilecek kabiliyette olmalıdır. Bu noktalar tesis edilirken jeolojik olarak bazı tespitlerin yapılması gerekmektedir. Çünkü yöneltme noktalarının hareketsiz olması gerekmektedir. Deformasyon analizi ölçümleri esnasında yöneltme noktalarından yapılacak ölçümlerden önce bu noktaların hareketsiz olduklarının bilimsel olarak kanıtlanması gerekmektedir (Algül , 1983)

1.4.1.4.Sigorta Noktaları

Heyelan olması öngörülen bölgede yöneltme noktalarının etrafına tesis edilmesi gereken noktalardır. Röper sistemi oluşturacak şekilde yöneltme noktalarının etrafına yeterli sayıda tesis edilmelidir. Yöneltme noktalarının etrafında varsa kaya diplerine veya yapılabiliyorsa kaya üstlerine özel beton çivileriyle belirlenmelidir. Sigorta noktaları tesis edilirken geri çıkması mümkün olmayacak şekilde tasarlanmalıdır. Jeodezik kontrol ağı noktalarından sayılmasa da yöneltme noktalarının kontrolü açısından önemlidir (Şekil 1.2).

Jeodezik kontrol ağlarında ölçme yapılacak noktaların tasarlanması, tesis edilmesi, tesislerde hangi malzemelerin kullanıldığı, heyelan öngörülen bölge karakteristiğinin obje

noktaları ile nasıl tasvir edildiği, obje noktalarının dayandırılacağı noktaların ve obje noktalarını kontrol edecek noktaların nasıl dağılım gösterdiği önemli konulardır. Çünkü deformasyon analizleri uzun soluklu çalışmalar olmak zorundadır. Bu çalışmaların etki alanı bir insan ömrüyle kısıtlı değildir. Bilim, insanlık tarihiyle paralel bir şekilde yaşamaya devam etmektedir ve edecektir.

Yukarıda bahsedildiği üzere iyi harmanlanmış, iyi tasarlanmış ve yere uygulanmış bir jeodezik kontrol ağını doğru gözlemlemek de çok önemlidir. Bunun için öngörülen deformasyonun büyüklüğüne göre ölçme planı ve kullanılan aletler de yapılacak uygulamanın amacına hizmet etmek için dikkatle seçilir. Ölçme planı dikkatlice ayarlanır, oluşturulan plana harfiyen riayet edilir. Bütün bunların yanında ölçme işleminden önce aletlerin kalibrasyonları bu işin uzmanlarınca yapılır. Ölçme işlemi de deneyimli elemanlar tarafından ölçme planına bağlı kalarak atmosferik etkilerin en az olduğu dönemlerde yapılır. Eğer statik davranışlı bir model üzerinde çalışıyorsak gözlem zamanını mümkün olduğunca kısa tutmamız gerekmektedir. Jeodezik kontrol ağında yapılan ilk ölçüye sıfır ölçüsü ya da referans ölçüsü denir. Bu ölçümden sonra yapılacak her ölçüm, ardışık rakamların kullanıldığı rakamlarla ölçüm sayısı olarak ya da tarihle isimlendirilebilir.

1.5. Deformasyonların Sınıflandırılması

Deformasyonların doğaya şekil değişikliği olarak yansıdığından bahsetmiştik. Deformasyon diye adlandırılan olgu bir maddeye (objeye) bir kuvvetin etki etmesinden dolayı maddenin şekil değiştirmesi olarak da görülebilir. Doğada karşılaşılabilecek etkilerin doğa olaylarından veya insan kaynaklı suni kuvvetlerden kaynaklandığı bir gerçektir. Doğa olaylarının ve/veya suni kuvvetlerin büyüklüğüne göre de objenin karşılaşılabileceği deformasyon değişmektedir (Demirel, 1993).

1.5.1.Kuvvetin Büyüklüğü Doğrultusunda Objede Oluşacak Tepkinin Türüne Göre Deformasyonlar

1.5.1.1.Büyük Deformasyonlar

Objeye veya belirli bir alana etki eden kuvvetin büyüklüğü doğrultusunda bazı deformasyonlar gözle dahi ayırt edilebilecek durumdadır. Büyük deformasyonların etki süresi de uzun olacağı öngörüldüğünde yapılara (objelere) veya bu alanlara etki süresi de uzun olacağından objenin veya bu alanların bu deformasyondan sürekli olarak etkileneceği öngörülür.

1.5.1.2.Küçük Deformasyonlar

Objeye veya belirli bir alana etki eden kuvvetin büyüklüğü doğrultusunda bu alanların veya objelerin karşılaşacağı deformasyonlar gözle ayırt edilemeyecek durumdadır. Bu deformasyonlar ancak duyarlılığı yüksek aletlerle yapılan hassas ölçümler sonucunda yakalanabilirler.

Herhangi bir kuvvet herhangi bir objeye etki ettiğinde objenin şeklinde bazı değişiklikler meydana gelir. Doğada kuvvetlerin bir enerji ile sonucunda oluştuğunu düşünürsek her kuvvet bir süre sonra azalır veya ortadan kalkar. Kuvvet ortadan kalktığında deformasyona uğrayan obje de çoğu zaman bu kuvvet değişimine kayıtsız kalmaz eski haline dönmek için tepki verir.

1.5.2.Kuvvetin Büyüklüğüne Göre Deformasyon Türleri

- a- Geçici (Elastik) Deformasyonlar: Objeye eski haline döner.
- b- Elastoplastik Deformasyonlar: Objeye eski haline dönmeye çalışır, fakat; tam olarak eski haline dönmez.
- c- Kalıcı (Plastik)Deformasyonlar: Objeye eski haline dönmez.

1.6. Deformasyon Modelleri

Deformasyonların, analiz yapılırken modellerle ifade edilmesi gerektiğinden bahsedilmişti. Doğada bulunan herhangi bir objeyi veya bir hareketi matematiksel olarak ifade edebilmek için objenin veya hareketin içinde barındırdığı parametreleri bilmek gerekir. Parametrelerin söz konusu obje veya harekete nasıl, ne kadar süreyle, ne kadar kuvvetle gibi şekillerde etki ettiği de önemlidir.

Deformasyonların kendi içlerinde ne kadar parametre barındırdıkları, yapacağımız analizlerin ölçme planlarını ve ölçme yöntemlerini, dolayısıyla ortaya çıkacak deformasyon modelini etkileyecektir. Buradan hareketle Deformasyon Modellerini üç başlıkta inceleyebilir:

- Statik davranışlı model (Quasi-statik model),
- Kinematik model
- Dinamik model

1.6.1. Statik Davranışlı Model

Heyelan bölgesindeki noktalar ağırlıkla matematiksel ifadeyle tanımlamak gerekirse:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^T &= [x_1 \ y_1 \ x_2 \ y_2 \ \dots \ x_p \ y_p] \\ \mathbf{x}^T &= \text{sabit} \end{aligned} \quad (1.1)$$

olarak ifade edilebilir.

Heyelan olabileceğini öngörerek tanımladığımız deformasyon bölgesi için her noktanın t_0 anındaki konumu ($\mathbf{x}_0$) ile t_i anındaki konum ($\mathbf{x}_i$) ları arasındaki farkı matematiksel bir fonksiyon olarak tanımlarsak $\underline{d}_x = \underline{x}_i - \underline{x}_0$ sonucuna ulaşırız. Bu fonksiyonun her nokta için ortaya koyduğu rakamsal ifadenin sıfırdan farkı bize deformasyon miktarını verecektir. Matematiksel ifadeden de anlaşılacağı üzere statik modelde, deformasyona etkiyen kuvvet ve zamandan bağımsız olarak analiz yapılır. Statik modelde yapılan gözlem süreleri de bir anmış gibi kabul edilir. Ya da gözlem süresince hareketsiz kaldıkları varsayılır.

Statik davranışlı modelde:

- Heyelan olduğu varsayılan bölge temsil edilecek şekilde noktasal olarak düzenlendikten ve yere uygulandıktan sonra belirli zaman aralıklarıyla gözlemlenir.
- Gözlemlerden elde edilen veriler hatalı bilgilerden ayıklandıktan sonra ortaya çıkan sonuçların anlamlı olup olmadığı bilimsel olarak test edilir.
- Heyelan bölgesindeki hareketliliğin başlangıç ve bitiş anı, ne kadar zamanda oluştuğu, etkiyen kuvvetin büyüklüğü göz ardı edilir.
- Bu hareketliliğin nedenleri statik davranışlı deformasyon modellerinin konusu olmaz.

Statik davranışlı deformasyon modelleri en çok uygulama alanı bulan deformasyon analiz modelidir.

1.6.2. Kinematik Model

Bu modelde heyelan bölgesindeki noktalar ağını tek başına ifade etmek yeterli olmamaktadır. Zamansal bir fonksiyon kullanıp nokta koordinatlarını zaman fonksiyonu içinde tanımlamak gerekmektedir. Yani heyelan bölgesi ya da objenin ne kadar zamanda ne kadar deformasyona uğradığı, hangi zaman aralıklarında ne kadar hızlı deformasyona uğradığı önemlidir. Koordinatları ve zamanı matematiksel bir fonksiyon olarak ifade edilirse:

$$\underline{x}_i = \underline{x}(t_i) = \underline{x}_0 + \Phi(\underline{x}, t_i - t_0) \quad (1.2)$$

sonucuna ulaşılır. Burada

$\underline{x}_i$: t_i anındaki nokta koordinatları,

$\underline{x}_0$: t_0 ilk ölçümden elde edilen nokta koordinatları,

Φ : Kinematik model fonksiyonudur.

Kinematik modelde zaman fonksiyonu önemlidir. Objenin ya da heyelan bölgesinin değişim hızı, hareketlerle beraber analiz edilir. Genelde heyelan bölgesi ya da objenin özellikli ya da çok büyük olduğu durumlarda tercih edilen bir modeldir. Ülkelerin, kıtaların ya da dünyanın yer kabuğu hareketleri analizlerinde tercih edilmektedir. Analiz yapılacak alan çok büyük olduğunda analiz yapılacak noktalar ağının gözlemleri bitirildiğinde uzun zaman geçmektedir. Bu durumda son nokta gözlemi bitirildiğinde, ilk nokta ölçüm yapıldığı konumunu korumuyor olmaktadır. Böyle durumlarda epok ölçüleri yapılırken jeodezik kontrol ağının hareketsiz olduğunu varsaymak analizi yanlış sonuçlara ulaştırmaktadır. Bu durumda yukarıda bahsedildiği gibi analizin temeline nokta yükseklikleri veya koordinatları arasındaki farkı değil, bu parametrelerin değişim hızlarını koymak gerekmektedir.

Kinematik Modelde:

- Heyelan ya da hareket olmasını öngörülen bölge ya da objenin belirli aralıklarla ya da sürekli olarak gözlemlenmesi gerekmektedir,
- Hareketin sürekliliği ya da hangi zaman aralıklarında ne kadar hızla gerçekleştiği göz önünde bulundurularak fonksiyonlarda hız ve ivme gibi kinematik parametrelere yer evrilir,
- Hareket olacağı öngörülen bölge ya da objeye hangi tür kuvvetlerin ne kadar etki ettiği ile ilgili parametrelerin kinematik modelde yeri yoktur.

1.6.3. Dinamik Model

Gelişen teknolojiyle beraber olasılık ve eşleştirmelerin yazılım diliyle ifade edilmesi, doğada görülen ve hissedilen her olgunun sayısallaştırılabilmesi, gerçekleşebilir bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır. Teknoloji ve yazılım dili bütün bilim dünyasının bir argümanı olduğu gibi jeodezik modellemelerin de yardımcısı olmuştur.

Bu doğrultuda hız olgusu matematiksel bir fonksiyona dönüşmüş, yatay koordinat ve kot parametreleri de bu fonksiyonun birer unsuru olmuştur. Kinematik model ile yer kabuğu hareketleri incelenmiş, ülke koordinat ve nivelman gözlemlerinden elde edilen verilerle analizler yapıp belirli bir hız kazanıldıktan sonra kuvvet parametresi üzerinde durulmaya başlanmış ve dinamik model ortaya atılmıştır.

Dinamik modelde ise kot ve koordinat değişimleri ile kuvvet parametresi ilişkilendirilir. Yerküre üzerinde hiçbir değişim kendiliğinden gerçekleşmez. Ancak bir kuvvet, bir bölge veya objenin değişmesini sağlayabilir. Kinematik modelin temelinde koordinat ve kot değişimlerinin yanı sıra bu değişimlerin hangi zaman aralıklarında ne kadar hızla gerçekleştiği üzerinde duruluyordu. Dinamik modelde ise belirlenen bölge ya da objeye etki eden kuvvetin büyüklüğü üzerinde durulmaktadır. Bu kuvvetin şiddetinin sürekli arttığı ya da azaldığı durumlar da olabilmektedir. Bu kuvvetin zaman ve dış etkenlerle olan etkileşimleri de dinamik modelin konusu olabilmektedir. Bütün bu ilişkiler ağının fonksiyonlar halinde belirlenmesi ve bu fonksiyonların araştırılması, dinamik modelin çözüm yolu olacaktır.

Genel olarak dinamik bir model fonksiyonu oluşturulmak istenirse:

$$\underline{x}_i = x(f_i) = \underline{x}_0 + \Phi(\underline{x}, f_i - f_0) \quad (1.3)$$

eşitlikleri çok genel bir bakış açısı sunabilir.

$\underline{x}_i$: f_i kuvvetinin etkisindeki nokta koordinatları,

$\underline{x}_0$: f_0 kuvvetinin etkisindeki nokta koordinatları,

Φ : Dinamik model fonksiyonudur.

Dinamik fonksiyonla analiz yapılabilecek bazı yapılar düşünülürse, Pizza Kulesi, Eyfel Kulesi, Özgürlük Anıtı, barajlar gibi örneklerle karşılaşılabilir. Pizza kulesinin dik durmamasından kaynaklı ağırlık merkezi kaymasının getirdiği fazladan yük, rüzgarlar, iklimsel doğa olayları, Özgürlük anıtı ve Eyfel Kulesi için rüzgarlar, iklimsel olaylar kuvvet parametreler olarak kabul edilebilir. Barajlar için ise, suyun basıncı ile barajların yeri ve etrafına etki eden kuvvetler parametreler olarak kabul edilebilir. Bu parametreler doğrultusunda oluşturulacak fonksiyonlarla araştırma ve analizler gerçekleştirilebilir.

Dinamik modelde:

- Heyelan olduğu varsayılan bölge noktasal olarak tasarlandıktan ve yere uygulandıktan sonra belirli zaman aralıklarıyla gözlemlenir,
- Heyelan bölgesine ya da objeye etkiyen büyüklükler gözlemlenir,
- Hareket miktarı ve etki eden kuvvetle birlikte fonksiyon olarak tanımlanır (Ayan, 1982).

BÖLÜM 2

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1 Heyelanlar, Deformasyonlar ve Mühendislik Bilimi

Yeryüzü incelediğinde her geçen gün doğal ilerleyişe paralel olmayan yapılaşmanın daha da arttığı görülmektedir. Bu da doğanın dengesini değiştirmektedir. Hızla artan dünya nüfusunun doğal bir getirisi olan “az alanlara daha fazla obje sığdırma” felsefesi, mühendislik olgusu ve mühendislik yapılarının gelişmesi sonucunu doğurmuştur. Sürekli gelişen ve hacim olarak büyüyen yapılar, doğanın doğal ilerleyiş sürecini etkilerken, doğanın bu etkiye verdiği tepkiye maruz kalmaktan kendini koruyamamaktadır. Mühendislik sektörü de yine doğanın verdiği tepkiye esnek cevap verebilecek mekanizmalar üzerinde yeni tezlerini oluşturmaya devam etmektedir. Doğanın mühendislik yapılarına verdiği tepkiler, doğanın içinde barındırdığı özelliklere, yani doğanın sahip olduğu parametrelere göre değişiklik göstermektedir. Mühendislik yapılarının bulunduğu yerlerin fiziksel özellikleri, o bölgedeki yer kabuğu hareketleri, yapıların ağırlıkları, yapıları oluşturan malzemelerin nitelikleri, yapılara etkiyen doğal veya doğal olmayan dış kuvvetler (Trafik, rüzgar,...v.b.), jeolojik, jeofiziksel ve atmosferik etkenler, suyun dinamik basıncı,...v.b. etmenler bu parametrelere örnek olarak gösterilebilirler.

Heyelanları da kısaca bütün bu etkileşimler sonucu bölgesel olarak, yer kabuğunu oluşturan her türlü doğal ya da dolgu malzemenin yer çekimi doğrultusunda aşağı veya yana doğru hareket etmesi olarak tanımlayabiliriz (Erenoğlu ve ark., 2015). İnsanlık açısından düşünüldüğünde, boyutları çok farklılaşabilen, kayıplara neden olabilen doğal ya da insan kaynaklı yer hareketleridir. Depremler, homojen olmayan zaman aralıkları ve/veya homojen olmayan yoğunluklarda meydana gelen yağışlar, dere yataklarının hızla değişmesi ya da erozyona uğraması, su seviyesi değişiklikleri ve su kütlesi ani yer değişiklikleri yer kabuğu içerisindeki jeolojik yoğunluk farklarının bu yağışlara veya su seviyesi değişikliklerine karşı tepkileri heyelanların ortaya çıkmasındaki en genel sebeplerdendir (Burchfiel, 2012; Önalp, 1991; Alkan, 1995; Brunner, 1997; Zezere ve ark., 1999). Yağışların heyelan üzerindeki etkisi oldukça fazladır. Yağışlarla paralel heyelan hareketlerinin incelenmesinde dair çalışmalar da çokça yapılmaktadır (Dağ, S. Ve Bulut, F., 2012). Heyelanların insan hayatına doğrudan ya da dolaylı olarak etkisi bulunduğu insan oğlu yaşayacağı çevreyi düzenlerken jeolojik ve jeofiziksel disiplinlerle jeodeziyi de birleştirerek analizler yapma ihtiyacı hissetmektedir. Yerel duyarsızlıkların incelenmesiyle

başlayan araştırmalar, daha büyük alanlarda yapılan analizler şeklinde genişleyerek artmıştır. Geçmiřten günümüze bu araştırmalar artarak devam etmektedir. (Gökçeoğlu ve Aksoy, 1996; Baeza ve Corominas, 2001; Lee vd. 2001; Donati ve Turruni, 2002; Ercanoğlu ve Gökçeoğlu, 2002; Yeşilnacar ve Topal, 2005; Çan vd., 2005; Dağ vd. 2006; Dağ, 2007; Akgün ve Bulut, 2007; Yalçın ve Bulut, 2007; Akgün vd. 2008; Nefeslioğlu vd., 2008; Yalçın, 2008; Yılmaz, 2009; Akgün ve Türk, 2010a,b).



BÖLÜM 3

MATERYAL VE METOT

3.1 Parametre Kestirim Yöntemleri ve Dengeleme Türleri

Herhangi bir bölgede tasarlanan bir geometrik ağda yapılan gözlemleri birer ölçü olarak kabul edersek, bu gözlemlerden elde edilen değerler istatistik bilimi açısından rastgele olarak kabul edilir. Gözlemlerden elde edilen değerler kullanılarak, deformasyon olduğunu öngördüğümüz bölgede bilimsel olarak anlamlı bir hareket olup olmadığı kanıtlanmaktadır.

Kanıtlama işlemi için bazı parametreler ortaya konur, beklenen değerler ve bilinmeyen parametreler kullanılarak doğrusal fonksiyonlar ve\veya denklemler tanımlanır, bu tanımlamalar da parametrelerin kestirilmesine yönelik doğrusal modelleri oluşturur. Fonksiyonların çözümünde yardımcı olacak, bilinen ve değişmeyecek olan unsurlar katsayılardır. Gözlemlerden elde edilen ölçüler ile kestirilecek parametreler arasındaki doğrusal ilişki, fiziksel, matematiksel ve geometrik tanımlamalar ile doğrusallaştırılarak sağlanır (Koch, 1987). Örnek olarak nivelman ağlarında temel araçlarımız olan yükseklik farklarının beklenen değerleri, kestirilecek olan yükseklikler için bilinmeyen katsayıları belli olan birer doğrusal fonksiyonlardır. Bir noktanın yatay koordinatları olan x, ve y, koordinatı bilinen başka noktalarla bu nokta arasındaki uzunluklarla kestirilecekse, uzunluk ölçülerinin beklenen değerleri, koordinatları bilinmeyen noktanın x ve y koordinatlarının doğrusal olmayan fonksiyonlarıyla tanımlanır : $S_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}$ (i = 1, 2, ...,n). Doğrusal olmayan bu fonksiyonlar doğrusallaştırılırken Taylor açılımı kullanılır.

Bilinmeyen parametrelerin genelde sabit büyüklükler olduğundan bahsedilmişti; fakat doğrusal modellerdeki bilinmeyen hesaplamaları ve dengeleme hesapları yardımıyla bu parametrelerin rastgele değişkenler olabileceği sonucuna da ulaşılabilir.

Bilinmeyenlerin hesaplanması için gerekli olan ölçü sayısı bellidir. Bu sayıdan fazla ölçü yapıldığında bilinmeyenler için birden fazla sayıda sonuç bulunacaktır. Çünkü her ölçü değişik sebeplerden dolayı farklı miktarda hatalar barındırır. Bu hatalarda her seferinde farklı sonuçlar ortaya koyar. Bilinmeyen hesaplamaları için ortaya koyulan bilinmeyen sayısından fazla sayıdaki ölçüler bazı çelişkilere yol açmaktadır. Bu durumda dengeleme olgusu devreye girmektedir. Dengelemenin görevi istatistik bilimi doğrultusunda bilinmeyenler, dengeli ölçüler ve bu unsurları içinde barındıran fonksiyonların en büyük olasılıklı değerlerini ortaya koymaktır. Bu durum, yapılan

ölçülerin ve ölçülerin içinde bulunan hataların homojen bir şekilde dağılım gösterdiği koşullarda yapılan gözlemlerde ortaya çıkar. Ölçülerde bulunan hatalar genelde normal dağılımdan farklı miktar ve yoğunlukta olduğu için, bu fazla sayıdaki ölçülerden seçilen maksimum homojen dağılımlı hata barındıran, yeter sayıdaki ölçü düzenlemeleri ile yapılan dengelemelerle en uygun dengeleme sonuçlarına ulaşılabilmektedir. Bu sonuçlar da karşımıza en uygun değerler olarak çıkmaktadır. Bilinmeyenlerin bu şekilde hesaplandığı durumlarda ulaşılan sonuçlardan elde ettiğimiz düzeltmeler de en uygun düzeltmeler olarak isimlendirilebilir.

Dengeleme hesabının bir başka konusu da ölçüler, düzeltilmiş (dengelenmiş) ölçüler, bilinmeyenler ve bu unsurları içinde barındıran fonksiyonlar için doğruluk kısıtları (genelde standart sapmalar kullanılır) ortaya koymaktır.

3.1.1 Beklenen Değere Sadık En Uygun Kestirim Yöntemi

Gözlemlerden elde edilen ölçülerden yola çıkılarak beklenen değerlere en uygun kestirimi ortaya koymak için aşağıdaki koşulları sağlamak gerekmektedir:

$\tilde{x}$: Bilinmeyen parametre,

$a^T \tilde{x}$: $\tilde{x}$ (bilinmeyen parametre)'nin doğrusal fonksiyonunun kestirim değeri,

l : ölçüler

$b^T l$: l ölçülerinin doğrusal fonksiyonu

a : $u \times 1$ boyutlu katsayılar vektörü,

b : $n \times 1$ boyutlu katsayılar vektörü olduğu düşünüldüğünde tüm bilinmeyenler için;

$b^T l$ fonksiyonunun beklenen değerinin tamamının $a^T \tilde{x}$ fonksiyonuna eşit olması koşulunun $E(b^T l) = a^T \tilde{x}$ ve aynı anda

$b^T l$ fonksiyonunun varyansının minimum olması koşulunun $[b^T l = x \text{ için : } \sigma_x^2 = \sigma^2 b^T b = \min.]$ sağlandığı durumlarda $b^T l$ fonksiyonu beklenen değeri sağlayan en uygun kestirimdir.

3.1.2 En Küçük Kareler Yöntemi

Bu yöntemde,

$E(a)$: Bilinmeyen parametrelerin doğrusal fonksiyonu olacak ölçülerden beklenen değerler,

$\tilde{l}$: Beklenen değerlerin kestirim değerleri,

l : Ölçüler ve

$P = E$ (birim matris) ise

$$v = \tilde{l} - 1 ; v^T v = \text{en küçük} \quad (3.1)$$

olduğu varsayılır.

Bu eşitlikler doğrultusunda ağırlık katsayıları matrisi Q ($P=Q^{-1}$) olan birbirinden bağımsız ya da birbiriyle ilişkisi olan (korelasyonlu) ölçüler için, Gauss-Markoff Düzeltme Denklemleri Modeli sonucunda oluşan homojenleştirmeyle alakalı dönüştürme eşitliklerinin uygulanmasıyla:

$$v^T P v = \text{en küçük} \quad (3.2)$$

Parametre kestirimi için beklenen değerlerin kestirim değerleri ile ölçüler arasındaki farkların karesi şeklindeki eşitliğin en küçük olması felsefesiyle çalışan bu yöntem En Küçük Kareler Yöntemi denir.

3.1.3 Maksimum Likelihood Yöntemi

İki kestirim yönteminde yapılan parametre kestirimlerinde I ölçülerinin dağılımının bilinmekte olduğu kabul edilir. Maksimum Likelihood yönteminde ölçülerin dağılımı değil de bilinmeyen parametrelere bağlı olarak değişen olasılık yoğunluk fonksiyonlarına ihtiyaç duyulmaktadır. I ölçülerinin normal dağılımlı olduğu kabul edildiğine göre bilinmeyen parametrelere bağlı olarak değişen olasılık yoğunluk fonksiyonları $L(I; \tilde{x}) = f(\tilde{x})$ Likelihood fonksiyonu olarak tanımlanır. Bu fonksiyondaki x' bilinmeyen parametrelerinde kestirim değerleri (x) yerlerine konduğunda ortaya çıkan değer maksimum olması gerekmektedir.

$E(I)$: Bilinmeyen parametrelerin fonksiyonları (Beklenen değerler),

$\tilde{l}$: Kestirim değerleri,

l ve $L_{(1 \rightarrow n)}$: Ölçüler,

$v_{(1 \rightarrow n)}$: $L_{(1 \rightarrow n)}$ ölçülerinin düzeltmelerinin olasılıkları olmak üzere,

Maksimum Likelihood yönteminde $v_{(1 \rightarrow n)}$ olasılıkları da maksimum çıkar. Normal dağılımlı kabul edilen l ölçüleri birim ağırlıklı olarak kabul edilirse ve $j = v^T v / 2s^2$ eşitliği göz önünde bulundurulursa;

$f(v) = (2\pi s^2)^{-n/2} e^{-j} = \text{maksimum olmalıdır}$. Bu eşitliklerden parametre kestirimi için (2.1) ve (2.2) ilkeleri elde edilir.

Beklenen değere bağlı olarak en uygun ve birbirine eşit kestirim değerleri, en küçük kareler yöntemi ve maksimum likelihood yöntemleri ile elde edilir.

Buradan $v^T P v$ 'nin en küçük olduğu ilkesi temelli dengelemeyle,

-Bilinmeyenler ve dengeli ölçüler olarak en uygun ya da en büyük olasılıklı değerlere ulaşılır,

- Bilinmeyenler ve dengeli ölçüler ya da bu unsurların fonksiyonları, en küçük varyanslı ya da en büyük ağırlıklı olarak ortaya konur.

Yukarıda bahsedilen problemlere bağlı olarak aşağıdaki dengelemelerden bahsedilebilir:

-Dolaylı (Direk) ölçüler dengelemesi,

-Dolaysız (Endirek) ölçüler dengelemesi,

-Koşullu (Şartlı) ölçüler dengelemesi,

-Bilinmeyenleri birbiriyle koşul denklemleri ile ilişkilendirilmiş dolaylı ölçüler dengelemesi,

-Bilinmeyenleri olan koşullu ölçüler dengelemesi.

En genel bir biçimde dengelemeleri incelediğimizde karşımıza en çok, içinde bilinmeyenleri olan koşullu ölçülerin konu olduğu dengelemeler çıkmaktadır. Dolaylı ölçüler ve koşullu ölçülerin içinde bulunduğu dengelemeler ayrı ayrı bu türün özel biçimleridir. Bu iki tür dengeleme işlemlerinde bir türden diğer tür dengelemeye geçiş yapılabilir. Karşı karşıya kalınan herhangi bir problemde iki tür çözümde de ortak sonuca ulaşılabilir. Koşul denklemleri ile arasında ilişki bulunan dolaylı ölçüler dengelemeleri, sadece dolaylı ölçüler dengelemeleri biçimine dönüştürülebilir. Dolaysız ölçüler dengelemesi ise içinde birden çok bilinmeyen barındıran dolaylı ölçüler dengelemesinin tek bilinmeyenli spesifik bir biçimidir.

3.2. Dolaysız Ölçüler Dengelemesi

Belirlenmek istenen büyüklüğün niteliği tek ise dolaysız ölçüler dengelemesinin konusu olacaktır. Örneğin konumuz sadece uzunluk ölçüleri ise ya da sadece açı ölçülerinden yola çıkılarak hesaplamalar yapılacaksa dolaysız ölçüler dengelemesi seçilir.

$L_{(1 \rightarrow n)}$: Ölçüler,

P : Ölçülerin ağırlık matrisi olmak üzere, belirlenmesi istenen x (Bilinmeyen (Ölçülen büyüklüğün kestirim değeri), birim ağırlıklı bir ölçünün standart sapması, bilinmeyen ve her bir ölçünün standart sapması olsun.

Dengeleme yapabilmek için $f = n - 1 > 0$ koşulu sağlanmalıdır. Bu denklikteki f , serbestlik derecesi ya da fazla ölçü sayısı olarak adlandırılır.

Bilinmeyenin Hesabı:

$$\bar{L}_i = L_i + v_i: \text{Ölçüler,}$$

x: Kestirilmek istenen büyüklüğün en uygun değeri olmak üzere, her ölçü için bir düzeltme denklemi yazılır:

$$x = L_1 + v_1 \quad (3.3)$$

$$x = L_2 + v_2$$

.....

$$x = L_i + v_i$$

Hesaplama yapılırken sayısal değerlerin küçük olması hesaplama yapılırken kolaylık sağladığından en küçük ölçü değeri civarında yuvarlatılmış bir sayısal değer yaklaşık değer olarak seçilir.

L_0 yuvarlatılmış yaklaşık değer, x_0 ise yaklaşık bilinmeyen ise $L_0 = x_0$ olarak kabul edildiğinde, $x = x_0 + \delta_x$ ve $l_i = L_i - x_0$ eşitlikleriyle,

$$v_1 = \delta_x - l_1 \quad (3.4)$$

$$v_2 = \delta_x - l_2$$

.....

$$v_n = \delta_x - l_n$$

ya da vektörel olarak,

$$v = a\delta_x - l, \quad (3.5)$$

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ v_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & A_{1k} \\ A_{21} & A_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & A_{2k} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ A_{k1} & A_{k2} & \cdot & \cdot & \cdot & A_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \hat{x}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ l_k \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

biçimlerinde ifade edilir.

Buradan küçültülmüş ölçüler (l_i) ve küçültülmüş bilinmeyenler (δ_x) türetilir :

$$\delta_x = x - x_0 \quad / \quad l_i = L_i - x_0 \quad (3.7)$$

Burada δ_x , $v^T P v = \text{minimum}$ ilkesini sağlamalıdır.

v yerine yazılırsa,

$$v^T P v = (a^T \delta_x - l^T) P (a \delta_x - l) = a^T P a \delta_x^2 - a^T P l \delta_x - l^T P a \delta_x + l^T P l \quad (3.8)$$

elde edilir. $a^T P l = (a^T P l)^T = l^T P a$ 'dır. $v^T P v$ karesel ifadesini minimum yapacak olan δ_x değerini bulmak için türev matematiksel işlemi kullanılarak $v^T P v$ ifadesinin δ_x e göre türevi sıfıra eşitlenir:

$$\frac{d(v^T P v)}{d(\delta_x)} = a^T P a \delta_x - a^T P l = 0 \quad (3.9)$$

Buradan

$$\delta_x = (a^T P a)^{-1} a^T P l \text{ olduğu görülür.} \quad (3.10)$$

Birbirine bağımlı olmayan ölçüler için ağırlık vektörü,

$$P = \begin{bmatrix} \underline{P}_1 & 0 & . & . & . & 0 \\ 0 & \underline{P}_2 & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ 0 & . & . & . & . & 0 \\ 0 & 0 & . & & 0 & \underline{P}_n \end{bmatrix} = \text{diag} (P_1 P_2, \dots, P_n) \quad (3.11)$$

eşitliğinde yerine konulursa $\delta_x = [P l] / [P]$ genel aritmetik ortalaması elde edilir. (2.4) ve (2.5) eşitliklerinden v_i düzeltmeleri bulunur. (2.5) eşitliği sol taraftan $a^T P$ ile çarpıldığında (2.09) eşitliği yardımıyla $a^T P v = a^T P a \delta_x - a^T P l$ eşitliğinde ölçülerin birbiriyle bağımlı olmaması sebebiyle $[P v]$ 'nin sayısal değeri sıfıra eşit olduğundan:

$$a^T P v = 0 \quad (3.12)$$

eşitliği sağlanır. Bu eşitlik, dengeleme işlemlerinde “ δ_x ” bilinmeyen ve “ v ” düzeltmeleri için dengelemenin denetimine olanak sağlar.

Birim ağırlıklı ölçünün standart sapması için gözlemlerden elde edilen büyüklüklerin birden fazla sayıda ölçülerden elde edildiği, gözlemlerden elde edilen ölçülerin eşit ağırlıklı olduğu, ölçüler arasında sabit bir korelasyon olmadığı durumlarda bir ölçünün varyansı,

$$s^2 = \frac{v^T v}{n-1} \quad (3.13)$$

eşitliği ile bulunur. Bu eşitliğe Gauss-Markoff Düzeltme Denklemleri Modeli sonucunda oluşan homojenleştirmeyle alakalı dönüştürmelerin uygulanması sonucu şu hali alır :

$$s_0 = \sqrt{\frac{v^T P v}{n-1}} \quad (3.14)$$

Gözlem sonuçlarından elde edilen ölçüler yardımıyla yapılan hesaplamalar yardımıyla elde edilen düzeltmeler ile belirlenen $v^T P v$, farklı hesaplama yöntemleriyle tekrar hesaplanarak denetim yapılır. (2.8) eşitliğinin sağ tarafındaki ilk iki ifade için δ_x terimi ortak çarpan olarak alınır ve (2.9) eşitliği göz önünde bulundurulursa,

$$v^T P v = (a^T P a \delta_x - a^T P l) \delta_x - l^T P a \delta_x + l^T P l \quad (3.15)$$

$$v^T P v = l^T P l - l^T P a \delta_x \quad (\text{Ölçüler birbiriyle bağımlı olmadığından } \{[P v v] = [P l l] - [P l] \delta_x\})$$

eşitliklerine ulaşılır.

Ölçülerin standart sapmalarını hesaplayabilmek için gözlem yapılan bir bölgede,

L_i : Ölçüler,

P_i : Ölçülerin ağırlıkları

s_i : bir ölçünün standart sapması ise,

$$s_i = \frac{s_0}{\sqrt{P_i}} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3.16)$$

Genel aritmetik ortalamanın standart sapması (2.10) ve (2.11) eşitliklerindeki ağırlıklar ölçülerin tamamına yayılırsa,

Q_{xx} : x bilinmeyeninin ağırlık katsayısı,

P_x : x bilinmeyeninin ağırlığı olduğuna göre,

$$Q_{xx} = \frac{1}{P_x} = \left(\frac{a^T P}{a^T P a} \right) P^{-1} \left(\frac{a^T P}{a^T P a} \right)^T = \frac{a^T P a}{(a^T P a)(a^T P a)} = \frac{1}{a^T P a} \quad (3.17)$$

Burada birbirine bağlı olmayan ölçüler için $Q_{xx} = 1/P_x = 1/[P]$ biçimindedir.

x bilinmeyeninin standart sapması ise:

$$s_x = s_0 \sqrt{Q_{xx}} \quad \text{'dir.} \quad (3.18)$$

Deformasyon analizinin sonraki aşamalarında kullanılacak olan eşitlikler sırasıyla; (2.10) ve (2.11) eşitliğinden $\delta_x = \frac{a^T l}{a^T a} = \frac{[l]}{n}$ (aritmetik ortalama), (2.12) eşitliğinden $a^T v = [v] = 0$, (2.14) eşitliğinden $s = \sqrt{\frac{v^T v}{n-1}} = \sqrt{\frac{[vv]}{n-1}}$, (2.15) eşitliğinden $v^T v = l^T l - l^T a \delta_x = [ll] - [l] \delta_x$, (2.17) eşitliğinden $Q_{xx} = \frac{1}{P_x} = \frac{1}{n}$, (2.18) eşitliğinden $s_x = \frac{s}{\sqrt{n}}$ biçiminde elde edilir..

3.3. Dolaylı Ölçüler Dengelemesi

Gözlemlerden elde edilen ölçüler doğrudan ilgilenilen büyüklükler değilse, bu ölçüler ilgilenilen büyüklüklerin hesaplanmasında birer parametre olacaksa, bilinmeyen çok sayıda büyüklük varsa ve bilinmeyen sayısından fazla sayıda ölçü varsa dolaylı ölçüler dengelemesi uygulanır. Örnek olarak bir nivelman ağında noktaların yüksekliklerinin belirlenmesi için yükseklik farkları ölçülür. Yatay bir jeodezik ağın koordinat (konum) bilgilerine ulaşmak için doğrultu, açı ve uzunluk parametreleri yardımıyla dolaylı olarak hesaplanır.

L_i : Ölçüler,

P_i : Ölçülerin ağırlıkları (ölçülerin ağırlıkları önsel (apriori) varyanslara dayanır).

$\bar{L}_i = L_i + v_i$: Düzeltilmiş ölçü fonksiyonları ($i = 1, 2, \dots, n$),

- f : serbestlik derecesi (fazla ölçü sayısı),
n : ölçü sayısı,
u : bilinmeyen sayısı ise,

Bir problemin dolaylı ölçüler dengelemesiyle çözüm için en az bilinmeyen (x, y, z) sayısı kadar ölçü sayısına ihtiyaç vardır: $f = n - u > 0$

Dolaylı ölçüler dengelemesi işlemi için gözlemlerden elde edilen bütün ölçüler kullanılır. Bilinmeyenler, dengelenmiş ölçüler, bilinmeyenlerin çözümüne yönelik oluşturulan fonksiyonlar ve büyüklüklerin standart sapmaları (ortalama hatalar), gözlemlerden elde edilen bütün ölçülerin kullanılmasıyla belirlenir.

3.3.1. Gauss – Markoff Modeli Düzeltme Denklemleri

Gauss-Markoff Modelinde bilinmeyenlerin analizi önemlidir. Bilinmeyen sayısı ve hangi büyüklüklerin bilinmeyen olacağı analizinin iyi yapılması gerekir. Ölçülerden elde edilen büyüklüklerin sayısı bilinmeyen sayısına eşit olduğu gibi bilinmeyenlerin birbirine bağımlı büyüklükler olmaması gerekmektedir. Bilinmeyen büyüklüklerin seçimi esnasında karşımıza problemin niteliğine göre çeşitli varyasyonlar çıkabilir. Bir nivelman ağında yapılacak gözlem sonuçları örnek olarak alınırsa bilinmeyen olarak nokta yüksekliklerinin alınabileceği gibi noktalar arası yapılacak olan yükseklik farkı ölçü sonuçlarının da alınabileceği gerçeği seçenekler arasında olacaktır. Yatay konum ağlarında genel olarak bilinmeyen olarak noktaların x ve y koordinatlarının alınması önerilmektedir. Çözüm için daha kolay hesaplamalar yapılabilmektedir.

Düzeltme denklemleri genel olarak,

$$L_i + v_i = f_i (x, y, z, \dots) \quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (3.19)$$

şeklinde ifade edilir. Buradan hareketle ilk yazılan düzeltme denklemleri Taylor açılımı ile doğrusallaştırılmaktadır. Doğrusallaştırma işlemi için bilinmeyenlerin yaklaşık değerleri ($x_0, y_0, z_0, \dots$) hesaplanmaktadır. Bu hesaplamalar için Problemin durumuna göre değişik yöntemler kullanılabilir. Örneğin u sayıda ölçü yapılan bir gözlemin dengeleme hesabında (2.19) eşitliği ile oluşturulan u sayıda doğrusal düzeltme denklem sisteminin, düzeltmeler yerine sıfır yazılarak çözülmesi sonucunda bilinmeyenler için birer yaklaşık değere ulaşılabilmektedir. (2.19) eşitliği ile verilen düzeltme denklemlerinde bilinmeyenler yerine, “ $x = x_0 + \delta_x$, $y = y_0 + \delta_y$, $z = z_0 + \delta_z$, ...” denklemleri yazılarak Taylor açılımı ile çözülmek istenirse,

u = 3 için,

$$\begin{aligned} L_i + v_i &= f_i (x_0 + \delta_x, y = y_0 + \delta_y, z = z_0 + \delta_z) \\ &= f_i (x_0, y_0, z_0) + \left(\frac{\partial f_i}{\partial x}\right)_0 \delta_x + \left(\frac{\partial f_i}{\partial y}\right)_0 \delta_y + \left(\frac{\partial f_i}{\partial z}\right)_0 \delta_z + \dots \end{aligned} \quad (3.20)$$

sonucuna ulaşılır. Bilinmeyenler için seçilecek yaklaşık değerler uygun ise δ_x , δ_y ve δ_z minimum sayısal değerde çıkacağından, Taylor açılımı uygulanırken bu değerlerin iki veya daha yüksek dereceden terimleri toplandığında dengeleme sonuçlarını etkilemeyecek kadar sıfıra yakın çıkar. Bu sebepten dolayı Taylor açılımında bu değerler göz ardı edilir. (2.20) eşitliği,

$$\left(\frac{\partial f_i}{\partial x}\right)_0 = a_i, \left(\frac{\partial f_i}{\partial y}\right)_0 = b_i, \left(\frac{\partial f_i}{\partial z}\right)_0 = c_i, L_i - f_i (x_0, y_0, z_0) = l_i \quad (3.21)$$

olacak şekilde düzenlenirse v_i düzeltmeleri için aşağıdaki doğrusallaştırılmış veya dönüştürülmüş düzeltme denklemleri elde edilir:

$$v_i = a_i \delta_x + b_i \delta_y + c_i \delta_z - l_i \quad (i=1,2,3,\dots,n) \quad (3.22)$$

(2.19) eşitliğindeki ilk düzeltme denklemlerinin tamamı doğrusal denklemler de olsa hesaplama kolaylığı açısından (2.22) eşitliğine dönüştürülmek suretiyle işlemlere devam edilir. Bu denklemlerde bulunan a_i , b_i ve c_i katsayılarını hesaplanması için yapılan işlemlerde bilinmeyenler bulunuyorsa bu bilinmeyenler yerine yaklaşık değerleri kullanılır. Bu hesaplamalarda geçen l_i değerleri *küçültülmüş ölçüleri*, δ_x , δ_y ve δ_z değerleri de *küçültülmüş bilinmeyenleri* temsil eder. Düzeltme denklemlerinde matrisler kullanılıyorsa dolaylı ölçüler dengelemesinin matematiksel modeli aşağıdaki gibidir:

$$v = Ax - l ; P \quad (3.23)$$

Aralarında ilişki bulmayan ölçülerin ağırlık matrisinin (P) köşegeni üzerinde ölçülerin ağırlıkları bulunmaktadır. (2.22) eşitliğinde gösterilen düzeltme denklemleri dikkate alındığında (2.23) eşitliğinde bulunan vektörlerin ve matrislerin aşağıdaki gibi olması gerekmektedir:

$$v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_k \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_n & b_n & c_n \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{bmatrix}, \quad l = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \vdots \\ l_n \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Denklemlerde bulunan bilinmeyenler ($\delta_x, \delta_y, \delta_z$) ve düzeltmeler (v_i), ölçülerden beklenen değerlerin, bir doğrusal fonksiyon olan $E(l) = l + e = A\tilde{x}$ fonksiyonunda bulunan $\delta\tilde{x}, \delta\tilde{y}, \delta\tilde{z}$ bilinmeyenlerinin ve e_i düzeltmelerinin dengeleme hesaplamaları sonucunda elde edilen kestirim değerleri anlamını taşır. (3.23) eşitliği ile tanımlanan model aynı zamanda Gauss-Markoff modelidir, (Koch, 1987).

Ölçüler birbiriyle ilişkili ve doğrusal model olarak (3.23) modeli, $\tilde{l} + \tilde{v} = \tilde{A}x$ ve P kullanılıyor olsun. Hesaplamalarda kullanılacak ağırlık matrisi artı tanımlı olduğu için D düzenli üst üçgen matris olarak kabul edilmek üzere. $P = D^T D$ şeklinde Cholesky çarpanlarına ayrılabilir. Bu durumda $P = D^T D$, $A = D\tilde{A}$, $l = D\tilde{l}$ ve $v = D\tilde{v}$ dönüşüm modelleriyle, $l + v = Ax$ ve $P = E$ (E birim matris) eşitlikleri elde edilir. Buradan anlaşılacağı üzere birbiriyle ilişkili ölçülerle alakalı düzenlenen Gauss-Markoff modeli, birbiriyle ilişkisi bulunmayan ve eşit varyanslı veya birim ağırlıklı bir modele dönüşebilmektedir. Bu basit model parametre kestirimi için kolay hesaplanabilir bir modeldir. $\tilde{l} + \tilde{v} = \tilde{A}x$ ve P yerine, az önce bahsedilen şekilde $l + v = Ax$ ve $P = E$ dönüştürülmüş modeli kullanılacağı zaman ilk oluşturulacak model için kestirilecek değerler bahsedilen dönüşüm eşitlikleri yardımı ile elde edilecektir. Ölçüler arasında ilişki yoksa $D = \text{diag}(\sqrt{P_1}, \sqrt{P_2}, \dots, \sqrt{P_n})$ modeli ortaya çıkacaktır. Bu durumda $\tilde{l} + \tilde{v} = \tilde{A}x$ düzeltme denklemlerinin $D\tilde{l} + D\tilde{v} = D\tilde{A}x \Rightarrow l + v = Ax$ denkleminin dönüşümünün sağlanması, modelde bulunan bütün denklemlerin, ait oldukları ölçüler ağırlığının karekökü ile çarpılması anlamını taşımaktadır. Bu işleme homojenleştirme denilmektedir.

3.3.2. Normal Denklemler

Düzeltilme denklemlerinde bulunan bilinmeyenler vektörü x 'i en küçük kareler ilkesini sağlayacak ($v^T P v = \text{en küçük}$) şekilde düzenlersek ve v düzeltmeler vektörü yerine (2.23) eşitliği yazılırsa,

$v^T P v = (x^T A^T - l^T) P (Ax - l) = x^T A^T P A x - x^T A^T P l - l^T P A x + l^T P l$ denklemi elde edilir. $x^T A^T P l = (x^T A^T P l)^T$ ve $P = P^T$ sebebiyle $x^T A^T P l = l^T P A x$ olduğundan dolayı

$$v^T P v = x^T A^T P A x - 2 l^T P A x + l^T P l = \min \quad (3.25)$$

olur.

$v^T P v$ karesel toplamının en küçük değeri için yukarıdaki eşitliğin x vektörüne göre türevi sıfıra eşit olduğu kabul edilmelidir. Bu durumda $\frac{\partial(v^T v)}{\partial x} = 2x^T A^T P A - 2 l^T P A = 0^T$ eşitliği elde edilir. Bu eşitlik ikiye bölünüp devrik hale getirilirse,

$$A^T P A x - A^T P l = 0 \quad (3.26)$$

veya $N = A^T P A$ ve $n = A^T P l$ olduğundan $Nx - n = 0$ normal denklemlerine ulaşılmaktadır.

(3.24) matris eşitliği düşünüldüğünde birbiriyle bağımlılığı olmayan ölçülerin ağırlıkları $P = \text{diag} (P_1, P_2, P_3, \dots P_n)$ ve bilinmeyen sayısı 3 olarak kabul edilirse normal denklem katsayılar matrisi,

$$N = A^T P A = \begin{bmatrix} [Paa] & [Pab] & [Pac] \\ [Pab] & [Pbb] & [Pbc] \\ [Pac] & [Pbc] & [Pcc] \end{bmatrix} \quad (\text{simetrik matris}) \quad (3.27)$$

yalın terimler vektörü, $n = A^T P l = [[Pal] [Pbl] [Pcl]]^T$ olarak elde edilir. Örnek olarak katsayılar ve yalın terimler aşağıdaki gibi olabilir:

$$\begin{aligned} [Paa] &= P_1 a_1^2 + P_2 a_2^2 + \dots + P_n a_n^2 \\ [Pab] &= P_1 a_1 b_1 + P_2 a_2 b_2 + \dots + P_n a_n b_n \\ -[Pcl] &= -P_1 c_1 l_1 + P_2 c_2 l_2 + \dots + P_n c_n l_n \end{aligned} \quad (3.28)$$

N ve $-n$ matrisinin son iki eşitliklerdeki açılımları ile normal denklemlerin son hali aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$\begin{aligned} [Paa]\delta_x + [Pab]\delta_y + [Pac]\delta_z - [Pal] &= 0 \\ [Pab]\delta_x + [Pbb]\delta_y + [Pbc]\delta_z - [Pbl] &= 0 \\ [Pac]\delta_x + [Pbc]\delta_y + [Pcc]\delta_z - [Pcl] &= 0 \end{aligned} \quad (3.29)$$

Normal denklem katsayılarının denetiminde düzeltme denklemlerinde bulunan A

katsayılar matrisinin sütunları kullanılmak suretiyle $-I$ yalın terimler vektörünün toplamının t vektörünü oluşturduğu varsayılırsa $t=As-I$ ($s=[11...1]^T$) t vektörünün i . elemanı, $t_i = a_i + b_i + c_i - I_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$) olarak ifade edilebilir.

(3.29) eşitliği soldan $A^T P$ ile çarpılırsa,

$$A^T P t = A^T P a s - A^T P I \quad (3.30)$$

veya $A^T P t = N s - n$ ortaya çıkmaktadır. Buradan hareketle normal denklem katsayılar matrisinin sütunları ile yalın terimler vektörü toplanırsa ortaya çıkan sonuç, $A^T P t$ vektörüne eşit olmalıdır. Birbirine bağımlı olmayan ölçüler için yazılacak denklem aşağıdaki gibi olacaktır:

$$A^T P t = [[Pat] [Pbt] [Pct]]^T \quad (3.31)$$

(3.31) eşitliği bağımsız ölçüler için açıkça yazılmak istendiğinde ortaya ,

$$\begin{aligned} [Pat] &= [Paa] + [Pab] + [Pac] - [Pal] \\ [Pbt] &= [Pab] + [Pbb] + [Pbc] - [Pbl] \\ [Pct] &= [Pac] + [Pbc] + [Pcc] - [Pcl] \end{aligned} \quad (2.32)$$

denklemleri çıkar. Yukarıda (3.32) eşitliği ile gösterilen denetim denklemleri yardımıyla uygulanacak denetimler, yuvarlatma hataları inceliğinde sonuç vermelidir.

3.3.3. Normal Denklemlerin Çözümü

Bilinmeyenlerin hesaplanması ve normal denklemlerin çözümü için Gauss Yöntemi temeli çeşitli yöntemler literatürde yer almaktadır. Teknolojinin dili olan yazılım için de uygun yöntemler olan Gauss ve Cholesky yöntemleri ile bağımsız ölçülerden oluşan problemlerin çözümü işlemleri ile ilgili aşağıda bazı bilgiler verilmektedir. Bu iki yöntemle simetrik matrislerin terslerinin nasıl alınacağına dair açıklamalar aşağıda bulunmaktadır.

Gauss Yöntemi ve bilinmeyenlerin hesabının temelinde bilinmeyenlerin normal denklemlerden sıra ile ortadan kaldırılması veya normal denklemlerin indirgenmesi yatmaktadır. Diğer bir deyişle, normal denklemlerin sondan başa doğru indirgenmesiyle bilinmeyenlerin hesaplanması esastır. Örneğin (3.32) eşitlikleri düşünülürse,

$$\begin{aligned}
\text{I} : [\text{Paa}]\delta_x + [\text{Pab}]\delta_y + [\text{Pac}]\delta_z - [\text{Pal}] &= 0 & [\text{Pat}] \\
\text{II} : [\text{Pab}]\delta_x + [\text{Pbb}]\delta_y + [\text{Pbc}]\delta_z - [\text{Pbl}] &= 0 & [\text{Pbt}] \\
\text{III} : [\text{Pac}]\delta_x + [\text{Pbc}]\delta_y + [\text{Pcc}]\delta_z - [\text{Pcl}] &= 0 & [\text{Pct}]
\end{aligned} \tag{3.33}$$

I denklemi $-[\text{Paa}]$ ile bölünürse,

$$-\delta_x - \frac{[\text{Pab}]}{[\text{Paa}]} \delta_y - \frac{[\text{Pac}]}{[\text{Paa}]} \delta_z + \frac{[\text{Pal}]}{[\text{Paa}]} = 0 \quad - \frac{[\text{Pat}]}{[\text{Paa}]} \tag{3.34}$$

ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan bu denklem $[\text{Pab}]$ ile çarpıldıktan sonra II denklemine eklenip, ardından $[\text{Pac}]$ ile çarpıldıktan sonra III denklemine eklendiğinde ortaya bir defa indirgenmiş denklem çıkmaktadır. Bu indirgeme sonucunda δ_x bilinmeyeni ortadan kaldırılmış olmaktadır. İndirgemenin denetimi amacıyla aynı işlemler $[\text{Pat}]$, $[\text{Pbt}]$ ve $[\text{Pct}]$ değerleri için de gerçekleştirilebilir. Buradan hareketle aşağıdaki indirgenmiş denklemler elde edilir:

$$\begin{aligned}
\text{II.1} : [\text{Pbb.1}]\delta_y + [\text{Pbc.1}]\delta_z - [\text{Pbl.1}] &= 0 & [\text{Pbt.1}] \\
\text{III.1} : [\text{Pbc.1}]\delta_y + [\text{Pcc.1}]\delta_z - [\text{Pcl.1}] &= 0 & [\text{Pct.1}]
\end{aligned} \tag{3.35}$$

İndirgeme sonucunda; $[\text{Pbb.1}] + [\text{Pbc.1}] - [\text{Pbl.1}] = [\text{Pbt.1}]$ ve $[\text{Pbc.1}] + [\text{Pcc.1}] - [\text{Pcl.1}] = [\text{Pct.1}]$ denetimi uygulanabilir. Bu denetim sonucunda yuvarlatma hataları inceliğinde sonuçlara ulaşılmalıdır. Bu denetimler ile ilgili bağıntılar çizelge 3.1 de gösterilmektedir. II.1 denklemi $-[\text{Pbb.1}]$ değerine bölündüğünde,

$$-\delta_y - \frac{[\text{Pbc.1}]}{[\text{Pbb.1}]} \delta_z - \frac{[\text{Pbl.1}]}{[\text{Pbb.1}]} = 0 \quad - \frac{[\text{Pbt.1}]}{[\text{Pbb.1}]} \tag{3.36}$$

sonucuna ulaşılır. Bu denklem $[\text{Pbc.1}]$ ile çarpılıp III.1 denklemi ile toplanırsa iki defa indirgenmiş yani iki bilinmeyeni ortadan kaldırılmış:

$$\text{III.2: } [\text{Pcc.2}]\delta_z - [\text{Pcl.2}] = [\text{Pcl.2}] = 0 \quad [\text{Pct.2}] \tag{3.37}$$

normal denkleme ulaşılır. Bu indirgeme $[\text{Pcc.2}] - [\text{Pcl.2}] = [\text{Pct.2}]$ eşitliği ile denetlenebilir. III.2 denklemi $-[\text{Pcc.2}]$ denkleme bölündüğünde ortaya çıkan,

$$-\delta_z + \frac{[Pcl.2]}{[Pcc.2]} = 0 \quad - \frac{[Pct.2]}{[Pcc.2]} \quad (3.38)$$

Denkleminde bulunan yalın terim, δ_z bilinmeyenine eşit olmaktadır: $-\delta_z = \frac{[Pcl.2]}{[Pcc.2]}$

Çizelge 3.1 Bilinmeyenlerin Gauss Yöntemi ile hesaplanması

δ_x	δ_y	δ_z	-n	Σ
1 = [Paa]	2 = [Pab]	3 = [Pac]	4 = - [Pal]	5 = [Pat]
-1	6 = -2/1	7 = -3/1	8 = -4/1	9 = -5/1
	10 = [Pbb]	11 = [Pbc]	12 = - [Pbl]	13 = [Pbt]
	14 = 10 + 2*6	15 = 11 + 2*7	16 = 12 + 2*8	17 = 13 + 2*9
	-1	18 = -15/14	19 = -16/14	20 = -17/14
		21 = [Pcc]	22 = - [Pcl]	23 = [Pct]
		24 = 21 + 3*7 + 15*18	25 = 22 + 3*8 + 15*19	26 = 23 + 3*9 + 15*20
		-1	27 = -25/24	28 = -26/24
$\delta_x =$ 31 = 6*30 + 7*29 + 8	$\delta_y =$ 18*29 + 19	$\delta_z =$ 29 = 27		

İki defa indirgenen III.2 denklemi, (3.34) eşitliği ile [Pac] değerinin çarpılması, (3.36) eşitliği ile [Pbc.1] değerinin çarpılması sonucunda elde edilen iki sayısal ifadelerin III denkleme eklenmesi ile bulunmaktadır. Buradan hareketle III.2 denkleme ulaşmak için III.1 denkleme ihtiyaç olmadığı söylenebilir. Bunun yanında indirgeme sırasında [Pbb] ile [Pcc] terimlerinin solundaki değerler ortadan kalktığı için işlemlere sokulmamaktadırlar. Yukarıdaki işlemler ve bilinmeyenlerin hesabı çizelge 3.1 de anlatılmaktadır.

Bilinmeyenler vektörü x ve ağırlık katsayıları matrisi Q_{xx} 'nin hesabında (3.26) eşitlikleri (Normal denklemler) sol taraftan, normal bir denklem olan katsayılar matrisinin tersi (N^{-1}) ile çarpılırsa, birim matris ($N^{-1}N = E$) eşitliği sebebiyle,

$$x = N^{-1}n \quad (3.39)$$

eşitliği ortaya çıkar. Bulunan eşitlikte n matrisi ($n = A^T P l$) yerine yazılıp ağırlık katsayıları yayılma kuralı uygulandığında bilinmeyenler vektörünün ağırlık katsayıları matrisi (Q_{xx}),

$$x = N^{-1}A^T P l \quad (3.40)$$

$$Q_{xx} = (N^{-1}A^T P)P^{-1}(N^{-1}A^T P)^T \quad (P^T = P, (N^{-1})^T = N^{-1}, PP^{-1} = E, N^{-1}N = E)$$

$$Q_{xx} = N^{-1}$$

şeklinde oluşur. Yukarıda gösterilen eşitlikler sonrasında bilinmeyenlerin ağırlık katsayıları matrisinin, normal denklem katsayılar matrisinin tersine eşit olduğu görülmektedir. Bilinmeyenlerin ağırlık katsayıları matrisinin köşegeni üzerinde bilinmeyenlerin ağırlık katsayıları bulunmakta olup, köşegen dışındaki elemanlar bilinmeyenler arasındaki ilişkileri temsil etmektedir.

$$Q_{xx} = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xz} \\ Q_{xy} & Q_{yy} & Q_{yz} \\ Q_{xz} & Q_{yz} & Q_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Q_{xx} matrisinin elemanlarına, (3.40) eşitlikleri kullanılarak oluşturulan,

$$Q_{xx} N = E \quad (3.42)$$

denklemini çözülmek suretiyle ulaşılır. Bu denklem sistemi birbirine bağlı olmayan ölçülerin dengelemesi için açık bir şekilde yazılmak istenirse, ağırlık katsayıları için $u^2 = 9$ denklem ortaya çıkar:

$$\begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xz} \\ Q_{xy} & Q_{yy} & Q_{yz} \\ Q_{xz} & Q_{yz} & Q_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [Paa] & [Pab] & [Pac] \\ [Pab] & [Pbb] & [Pbc] \\ [Pac] & [Pbc] & [Pcc] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

Bilinmeyenlere denklemi çözülmek suretiyle ulaşılır. Bu denklem sistemi birbirine bağlı olmayan ölçülerin dengelemesi için açık bir şekilde yazılmak istenirse, ağırlık katsayıları için $u^2 = 9$ denklem ortaya çıkar. Bilinmeyenler,

$$\begin{aligned}
[Paa]Q_{xx} + [Pab] Q_{xy} + [Pac] Q_{xz} &= 1 \\
[Pab]Q_{xx} + [Pbb] Q_{xy} + [Pbc] Q_{xz} &= 0 & Q_{xx}, Q_{xy}, Q_{xz} \\
[Pac]Q_{xx} + [Pbc] Q_{xy} + [Pcc] Q_{xz} &= 0 \\
[Paa]Q_{xy} + [Pab] Q_{yy} + [Pac] Q_{yz} &= 0 \\
[Pab]Q_{xy} + [Pbb] Q_{yy} + [Pbc] Q_{yz} &= 1 & Q_{xy}, Q_{yy}, Q_{yz} \\
[Pac]Q_{xy} + [Pbc] Q_{yy} + [Pcc] Q_{yz} &= 0 \\
[Paa]Q_{xz} + [Pab] Q_{yz} + [Pac] Q_{zz} &= 0 \\
[Pab]Q_{xz} + [Pbb] Q_{yz} + [Pbc] Q_{zz} &= 0 & Q_{xz}, Q_{yz}, Q_{zz} \\
[Pac]Q_{xz} + [Pbc] Q_{yz} + [Pcc] Q_{zz} &= 1
\end{aligned} \tag{3.44}$$

u sayıda denklemden oluşan bir sistemi bir önceki bilinmeyenlerin hesabı konusunda anlatıldığı gibi Gauss Yöntemi yoluyla çözülerek ağırlık katsayıları matrisinin elemanları belirlenebilmektedir. Çözüm için oluşturulan katsayılar aynı ve normal denklemleri katsayılarına eşit olduğu için normal denklemlerin katsayılar matrisinin yanına birim matris yazılmak suretiyle denklem sistemleri birlikte çözülür:

Çizelge 3.2 Bilinmeyenler ve ağırlık katsayılarının Gauss Yöntemi ile çözümü

δ_x	δ_y	δ_z	Q_{xj}	Q_{yj}	Q_{zj}
[Paa]	[Pab]	[Pac]	1	0	0
	[Pbb]	[Pbc]	0	1	0
		[Pcc]	0	0	1

Bilinmeyenlerin ağırlık katsayıları matrisi, iki kez indirgeme sonucunda bulunur. Q_{xx} , Q_{xy} , Q_{xz} elemanları, Q_{xj} sütunundaki elemanlar yardımıyla, Q_{xy} , Q_{yy} , Q_{yz} elemanları, Q_{yj} sütunundaki elemanlarla, Q_{xz} , Q_{yz} , Q_{zz} elemanları da Q_{zj} sütunundaki elemanlar yardımıyla bulunur. $Q_{xx} = N^{-1}$ matris eşitliği çözümlendikten sonra bilinmeyenler,

$x = N^{-1} n$ denklemini yardımıyla:

$$x = Q_{xx} n \tag{3.45}$$

eşitliği ya da

$$n = A^T P l \quad \text{ile} \quad Q_{xx} = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xz} \\ Q_{xy} & Q_{yy} & Q_{yz} \\ Q_{xz} & Q_{yz} & Q_{zz} \end{bmatrix} \quad \text{denklemleri ile;}$$

$$\delta_x = [Pal]Q_{xx} + [Pbl] Q_{xy} + [Pcl] Q_{xz}$$

$$\delta_y = [Pal]Q_{xy} + [Pbl] Q_{yy} + [Pcl] Q_{yz} \quad (3.46)$$

$$\delta_z = [Pal]Q_{xz} + [Pbl] Q_{yz} + [Pcl] Q_{zz}$$

hesaplanabilir. Yapılan hesaplamaların doğruluk denetimini $s^T x = s^T Q_{xx} n$ ya da $\delta_x + \delta_y + \delta_z = [Pal][Q_{xj}] + [Pbl][Q_{yj}] + [Pcl][Q_{zj}]$ bağıntılarıyla gerçekleştirilir.

Bu yöntemde, Gauss yönteminde bahsedilen I, II.1 ve III.2 isimleri ile isimlendirilen denklemlerin karesel katsayıların kareköklerine bölünmesi yolu tercih edilir. Bu yolla direk olarak bilinmeyenler ve/veya ağırlık katsayıları hesaplanır. Cholesky Yöntemi, Gauss yöntemi gibi gözlemlerden elde edilen veriler doğrultusunda oluşturulan denklemlerin ağırlık katsayıları ve bilinmeyenlerin çözümüne giden bir diğer yoldur. Bilinmeyenler ve ağırlık katsayılarının hesabı ayrı ayrı tablolar halinde aşağıdaki çizelgelerde gösterilmektedir.

Çizelge 3.3 Bilinmeyenler ve ağırlık katsayılarının çözüm alroritması

δ_x	δ_y	δ_z	Q_{xj}	Q_{yj}	Q_{zj}	Σ
1=[Paa]	2=[Pab]	3=[Pac]	4 = 1	0	0	5= 1+2+3+4
-1	6=-/1	7 = -3/1	8 = -4/1	0	0	9 = -5/1
	10 = [Pbb]	11=[Pbc]	0	12 = 1	0	13=2+10+11+12
	14=10+2*6	15=1+2*7	16 = 2*8	12	0	17 = 13 + 2*9
	-1	18=-5/14	19= -16/14	20 = -12/14	0	21 = -17/14
		22= [Pcc]	0	0	23 = 1	24 = 3+11+22+23
		25=22+3	26 = 3*8 + *7+15*18	27 = 15*20	23	28 = 24 + 3*9 + 15*21
		-1	29= -26/25	30 = -27/25	31=23/25	32 = -28/25
			33=4*8+ 16*19+26* 29=-Q _{xx}	34 = 16*20 + 26*30 = -Q _{xy}	35 = 26*31 -Q _{xz}	36 = 1 + 4*9 + 16*21 + 26*32 = - [Q _{xj}]
			37=12*1+7 *29=-Q _{xy}	38 = 12*20 + 27*30 = -Q _{yy}	39=27*31 = -Q _{yz}	40 = 1 + 12*21 + 27*32 = -[Q _{yj}]
			41=23*29= -Q _{xz}	42 = 23*30 = -Q _{yz}	43=23*31= -Q _{zz}	44 = 1 + 23*32 = - [Q _{zj}]
			45 = -[Pal]	46 = -[Pbl]	47= -[Pcl]	
			$\delta_x = 33*45$ + 34*46 + 35*47	$\delta_y = 37*45 +$ 38*46 + 39*47	$\delta_z = 41*45$ + 42*46 + 43*47	

Çizelge 3.4 Bilinmeyenlerin Cholesky Yöntemi ile çözümü

δ_x	δ_y	δ_z	-n	Σ
1 =	2 = [Pab]	3 = [Pac]	4 = -[Pal]	5 = [Pas]
[Paa]	6 = [Pbb]	7 = [Pbc]	8 = -[Pbl]	9 = [Pbs]
		10 = [Pcc]	11 = - [Pcl]	12 = [Pcs]
13 = $\sqrt{1}$	14 = 2/13	15 = 3/13	16 = 4/13	17 = 5/13
	18 = $\sqrt{6 - 14^2}$	19 = (7- 14*15)/18	20 = (8- 14*6)/18	21 = (9- 14*17)/18
		22 = $\sqrt{10 - 15^2 - 19^2}$	23 = (11- 15*16- 19*20)/22	24 = (12-15*17- 19*21)/22
$\delta_x = -$ (14*26 15*25 16)/13	$\delta_y = -$ (19*25 20)/18	$\delta_z = -23/22$		

Çizelge 3.5 Bilinmeyenlerin ve ağırlık katsayılarının Cholesky Yöntemi ile hesaplanması

δ_x	δ_y	δ_z	Q_{xj}	Q_{yj}	Q_{zj}	Σ
1 = [Paa]	2 = [Pab]	3 = [Pac]	4 = 1	0	0	5 = 1+2+3+4
	6 = [Pbb]	7 = [Pbc]	0	8 = 1	0	9 = 2+6+7+8
		10 = [Pcc]	0	0	1 1 = 1	12 = 3+7+10+11
13 = $\sqrt{1}$	14 = 2/13	15 = 3/13	16 = 4/13	0	0	17 = 5/13
	18 = $\sqrt{6 - 14^2}$	19 = (7- 14*15)/18	20 = (14*6)/18	21 = 8/18	0	22 = (9- 14*17)/18
		23 = $\sqrt{10 - 15^2}$	24 = (- 15*16- 19*20)/23	25 = (- 19*21)/23	26 = 11/23	27 = (12- 15*17- 19*21)/23
			28 = 16 ² +20 ² + 24 ² = Q_{xx}	29 = 20*21+ 24*25 = Q_{xy}	30 = 24*26 = Q_{xz}	
				31 = 21 ² +25 ² = Q_{yy}	32 = 25*26 = Q_{yz}	
					33 = 26 ² = Q_{zz}	
			34 = [Pal]	35=[Pbl]	36=[Pcl]	
			δ_x = 34*28+3 5*29 +36*30	δ_y = 34*29+ 35*31 +36*32	δ_z = 34*30+ 35*32 +36*33	

3.3.4. Düzeltmeler, Bilinmeyenler, Dengeli Ölçüler ve Denetim İşlemleri

$V=Ax-l$ düzeltme denklemlerinden elde edilen matematiksel model doğrultusunda oluşturulan normal denklemler yukarıda açıklanan yöntemlerle çözüldükten sonra aşağıda verilen eşitliklerle v düzeltmeleri elde edilmektedir. Düzeltme eşitliği sol taraftan A^TP ile çarpılırsa, $A^TPv = A^TPAx - A^TP l$ ortaya çıkar. Bu eşitliğin bir yanı normal denklem olduğu için,

$$A^TPv = 0 \quad (3.47)$$

olur. Düzeltmelerin hesaplanacak olan sayısal değerleri, ortaya öngörülen incelikte bağıntılar çıkarmalıdır.

Bilinmeyenlerin hesaplanmasında, normal denklemlerin çözümlerinden elde edilen küçültülmüş bilinmeyenler, bilinmeyenlerin yaklaşık değerlerine eklenerek asıl değerlerin bulunmasına yardımcı olur:

$$x = x_0 + \delta_x, y = y_0 + \delta_y, z = z_0 + \delta_z \quad (3.48)$$

Dengeli ölçüler ve dengelemenin denetiminde jeodezik ölçmelerden sonra yapılan ölçmelere düzeltmeler getirerek dengeli ölçüleri bulmak jeodezinin ödevlerindendir. Ölçülere düzeltmeler eklemek bizi dengeli ölçülere ulaştıracaktır: $\bar{L}_i = L_i + v_i$. Ayrıca, $i = 1,2,3,\dots,n$ için $L_i + v_i = f_i(x,y,z,\dots)$ denkleminde bilinmeyenler yerine sayısal değerleri koyularak $\bar{L}_i = \varphi_i(x,y,z)$ bulunur.

Yukarıda bahsedilen ve farklı yollardan bulunan sonuçlar tahmin edilen hesaplama inceliğinde olmalıdır. Aynı zamanda birbirine eşit olmalıdır:

$$\bar{L}_i = L_i + v_i = \varphi_i(x,y,z) \quad (i = 1,2,3,\dots,n) \quad (3.49)$$

(3.48) eşitlikleri ile ilk oluşturulan düzeltme denklemlerinin doğrusallaştırılması veya dönüştürülmesi işlemleri denetlenir. Bu denetleme işlememi temel denetim işlemidir. Bunun yanında düzeltme değerlerinin ağırlıklarıyla beraber ortaya koyduğu karesel bağıntı,

$$v^TPv \quad (3.50)$$

$$(\text{Bağımsız ölçüler için } [P_{vv}] = P_1 v_1^2 + P_2 v_2^2 + \dots + P_n v_n^2)$$

(3.26) eşitliklerinden $A^T P A x - A^T P l = 0$ normal denklemleri sebebiyle bilinmeyenleri tanımlayan fonksiyonlar biçiminde elde edilen aşağıdaki bağıntılara eşit olmak durumundadır:

$$v^T P v = l^T P A x - l^T P l \quad (3.51)$$

(Ölçülerin birbiriyle bağımlı olmadığı durumlar için: $[P_{vv}] = [P_{ll}] - [P_{al}]\delta_x - [P_{bl}]\delta_y - [P_{cl}]\delta_z$). (2.51) eşitliğiyle $v^T P v$ değeri, v_i düzeltmeleri ile bu eşitliğin farklı yansımaları ile δ_x , δ_y , δ_z bilinmeyenleri denetlenir. (3.49), (3.50), (3.51) eşitlikleri vasıtasıyla yaptığımız hesaplamalardan bulduğumuz $v^T P v$ değerlerinin belirli bir incelik içerisinde birbirine eşit çıkması, dengeleme hesaplarını yaparken bir işlem hatası yapılmadığını gösterir. Bu durumda dengeleme işlemleri doğrudur.

3.3.5. Standart Sapmalar

Birim Ağırlıklı Ölçünün Standart Sapması:

$$s_0 = \sqrt{\frac{v^T P v}{f}} \quad (f = n - u) \quad (3.52)$$

f : serbestlik derecesi (fazla ölçü sayısı),

n : ölçü sayısı,

u : bilinmeyen sayısı ise,

Ölçülerin Standart Sapmaları:

$$s_i = \frac{s_0}{\sqrt{P_i}} = s_0 \sqrt{Q_{ii}} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3.53)$$

s_i : L_i ölçüsünün standart sapması,

Q_{ii} : L_i ölçüsünün ağırlık katsayısı.

Bilinmeyenlerin Standart Sapmaları:

$$S_x = S_0 \sqrt{Q_{xx}}, S_y = S_0 \sqrt{Q_{yy}}, S_z = S_0 \sqrt{Q_{zz}} \quad (3.54)$$

Q_{xx}, Q_{yy}, Q_{zz} : Q_{xx} ağırlık katsayıları matrisinin köşegen elemanlarıdır.

Bilinmeyenlerin Bir Fonksiyonunun Standart Sapması:

$$F = F(x, y, z) \quad (3.55)$$

bilinmeyenlerin bir fonksiyonu ise, standart sapması,

$$S_F = S_0 \sqrt{Q_{FF}} \quad (3.56)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Yukarıdaki (3.55) eşitliğine ağırlık katsayısı yayılma kuralı uygulanırsa (3.56) eşitliğinde görülen Q_{FF} elde edilir. Fonksiyonda,

$x = x_0 + \delta_x, y = y_0 + \delta_y, z = z_0 + \delta_z, F_0 = F(x, y, z), f_x = \frac{\partial F}{\partial x}, f_y = \frac{\partial F}{\partial y}, f_z = \frac{\partial F}{\partial z}, f = [f_x \ f_y \ f_z]^T$, $x = [\delta_x \ \delta_y \ \delta_z]^T$ olarak kabul edilip Taylor serisi yardımıyla doğrusallaştırma uygulanırsa,

$$F = F_0 + f_x \delta_x + f_y \delta_y + f_z \delta_z = F_0 + f^T x \quad (3.57)$$

eşitliklerine ulaşılır. Elde edilen (3.57) eşitliğine yine ağırlık katsayısı yayılma kuralı uygulandıktan sonra,

$$Q_{FF} = f^T Q_{xx} f = f_x^2 Q_{xx} + f_y^2 Q_{yy} + f_z^2 Q_{zz} + 2f_x f_y Q_{xy} + 2f_x f_z Q_{xz} + 2f_y f_z Q_{yz} \quad (3.58)$$

sonuçları elde edilir.

Dengeli ölçülerin standart sapmalarında bilinmeyenlerin bir fonksiyonu olan dengeli $\bar{L}_i$ ölçüsü ($\bar{L}_i = L_i + v_i = \varphi_i(x, y, z)$) ve bu fonksiyonun doğrusallaştırılmış hali; $l_i = L_i - \varphi_i(x_0, y_0, z_0)$, $a_i = \frac{\partial \varphi_i}{\partial x}$, $b_i = \frac{\partial \varphi_i}{\partial y}$, $c_i = \frac{\partial \varphi_i}{\partial z}$, $f_i = [a_i \ b_i \ c_i]^T$ eşitliklerinden,

$$\bar{L}_i = l_i + v_i = a_i \delta_x + b_i \delta_y + c_i \delta_z = f_i^T x \quad (3.59)$$

olur. Bu bağıntılardan $\bar{L}_i$ dengeli ölçüsünün ağırlık katsayısı şu şekilde ortaya çıkar:

$$\bar{Q}_{ii} = f_i^T Q_{xx} f_i = a_i^2 Q_{xx} + b_i^2 Q_{yy} + c_i^2 Q_{zz} + 2a_i b_i Q_{xy} + 2a_i c_i Q_{xz} + 2b_i c_i Q_{yz} \quad (3.60)$$

Yukarıdaki eşitliği ölçülerin ağırlıkları (P_i) ile çarpılıp toplama işlemi gerçekleştirilirse,

$$\begin{aligned} [P\bar{Q}] &= [Paa]Q_{xx} + [Pab] Q_{xy} + [Pac] Q_{xz} + [Pab]Q_{xy} \\ &+ [Pbb] Q_{yy} + [Pbc] Q_{yz} + [Pac]Q_{xz} + [Pbc] Q_{yz} + [Pcc] Q_{zz} \end{aligned} \quad (3.61)$$

eşitliği ortaya çıkar. (3.43) eşitlikleri göz önünde bulundurulduğunda ve yukarıdaki eşitlikte dokuz parametrenin toplandığı gerçeği ortaya konduğunda her üç parametrenin toplamı sonucunun “1” olduğu görülmektedir. Bu realite bizi $[P\bar{Q}] = 3$ sonucuna götürür. Buradan dengeli ölçülerin ağırlık katsayıları için genel olarak,

$$[P\bar{Q}] = P_1 \bar{Q}_{11} + P_2 \bar{Q}_{22} + \dots + P_n \bar{Q}_{nn} = u \quad (3.62)$$

eşitliğine ulaşılır ki bu eşitlik denetim işlemlerinde faydalanılacaktır.

Dengeli ölçülerin ($\bar{L}_i$) standart sapmaları ($\bar{s}_i$) aşağıdaki bağıntı yardımı ile bulunur:

$$\bar{s}_i = s_0 \sqrt{\bar{Q}_{ii}} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3.63)$$

Bilinmeyenlerin fonksiyonlarının ağırlık katsayıları ve kovaryans matrisleri hesabı için bilinmeyenlerin birden fazla sayıda fonksiyonu ($g_i = g_i(x, y, z)$) olduğunu varsayılp, bu fonksiyonlar Taylor dizisi kullanılarak doğrusallaştırılırsa,

$$g = g_0 + G_x \quad (3.64)$$

eşitliği karşımıza çıkar. Bu eşitlikte $g = [g_1 \ g_2 \ \dots \ g_r]^T$, $g_0 = [g_{10} \ g_{20} \ \dots \ g_{r0}]^T$,

$$g_{i0} = g_i(x_0, y_0, z_0), \quad G = \begin{bmatrix} g_{1x} & g_{1y} & g_{1z} \\ g_{2x} & g_{2y} & g_{2z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{rx} & g_{ry} & g_{rz} \end{bmatrix}, \quad g_{ix} = \frac{\partial g_i}{\partial x}, \quad g_{iy} = \frac{\partial g_i}{\partial y}, \quad g_{iz} = \frac{\partial g_i}{\partial z}$$

olduğundan

$$x = [\delta_x \ \delta_y \ \delta_z] \quad (3.65)$$

biçimindedir. (3.64) eşitliği kabul edilip ağırlık katsayıları yayılma kuralı

uygulandığında verilen fonksiyonlar için ağırlık katsayıları matrisi aşağıdaki gibi olur:

$$Q_{gg} = GQ_{xx}G^T \quad (3.66)$$

Bu matris s_0^2 ile çarpıldığı vakit fonksiyonların kovaryans matrisi ortaya çıkar :

$$C_{gg} = s_0^2 Q_{gg} \quad (3.67)$$

Fonksiyonların varyansları C_{gg} kovaryans matrisinin köşegen elemanları ile $s_{gi}^2 = s_0^2 Q_{gigi}$ biçiminde temsil edilir.

Dengeli ölçülerin ağırlık katsayıları ve kovaryans matrisleri için (3.23) eşitliği göz önüne alındığında dengeli ölçülerin düzeltme denklemlerinden şu bağıntıya ulaşılır: $\bar{l} = 1 + v = Ax$. Bu bağıntıya ağırlık katsayıları yayılma kuralı uygulandığında ağırlık katsayıları matrisi ortaya çıkar:

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \cdot & \cdot & \bar{Q}_{1n} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \cdot & \cdot & \bar{Q}_{2n} \\ \bar{Q}_{n1} & \bar{Q}_{n2} & \cdot & \cdot & \bar{Q}_{nn} \end{bmatrix} = A Q_{xx} A^T \quad (3.68)$$

Bu bağıntıdan da dengeli ölçülerin kovaryans matrisi,

$$\bar{C} = \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & \cdot & \cdot & \bar{C}_{1n} \\ \bar{C}_{21} & \bar{C}_{22} & \cdot & \cdot & \bar{C}_{2n} \\ \bar{C}_{n1} & \bar{C}_{n2} & \cdot & \cdot & \bar{C}_{nn} \end{bmatrix} = s_0^2 \bar{Q} \quad (3.69)$$

Düzeltilmelerin ağırlık katsayıları ve kovaryans matrisleri için dengeli ölçülerin düzeltme denklemleri olan $v = Ax - l$ bağıntısında x yerine $Q_{xx}A^TPl$ yazılırsa sadece ölçü fonksiyonları şeklinde,

$$v = (A Q_{xx} A^T P - E) l \quad (3.70)$$

bağıntısına ulaşılır. Buradan düzeltilmelerin ağırlık katsayıları matrisi;

$$Q_{vv} = (A Q_{xx} A^T P - E) P^{-1} (A Q_{xx} A^T P - E)^T = (A Q_{xx} A^T - P^{-1}) (P A Q_{xx} A^T - E)$$

$$= A Q_{xx} A^T P A Q_{xx} A^T - A Q_{xx} A^T - A Q_{xx} A^T + P^{-1} \quad \text{ve } Q_{xx} = (A^T P A)^{-1}, Q_{xx} A^T P A = E, \\ (3.67) \text{ eşitliğine göre } A Q_{xx} A^T = \bar{Q} \text{ olduğundan,}$$

$$Q_{vv} = P^{-1} - \bar{Q} = Q - \bar{Q} \quad (3.71)$$

bağıntısına ulaşılır. Yukarıdaki son bağıntıların:

Düzeltilmelerin Ağırlık Matrisi = Ölçülerin Ağırlık Katsayıları Matrisi – Dengeli Ölçülerin Ağırlık Katsayıları Matrisi.

(3.71) bağıntısı sağ taraftan P ağırlık matrisi ile çarpılırsa,

$$Q_{vv} P = E - \bar{Q} P \quad (3.72)$$

(3.68) ve (3.72) bağıntıları dikkate alındığında (3.70) bağıntısından şu sonuç ortaya çıkar:

$$v = -Q_{vv} P l \quad (3.73)$$

Düzeltilmelerin Kovaryans Matrisi de (3.71) bağıntısından yola çıkılarak aşağıdaki şekilde ortaya konur:

$$C_{vv} = s_0^2 Q_{vv} = \begin{bmatrix} s_{v_1}^2 & s_{v_1 v_2} & \cdot & \cdot & s_{v_1 v_n} \\ s_{v_1 v_2} & s_{v_2}^2 & \cdot & \cdot & s_{v_2 v_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ s_{v_1 v_n} & s_{v_2 v_n} & \cdot & \cdot & s_{v_n}^2 \end{bmatrix} \quad (3.74)$$

Gözlemlerden elde ettiğimiz kaba hata içeren veya diğer ölçülerle uyumsuzluk gösteren ölçülerin yok edilmesine yönelik kaba hatalı veya uyumsuz ölçüler kuramı, ölçülere getirilecek düzeltilmelerin yorumlanmasına dayanır. Uyumsuz ölçülerin araştırılması işlemlerinin temeli, düzeltilmelerle ilgili yukarıda anlatılan bilgilere dayanır.

3.4. Bir Jeodezik Ağın Datumu

Jeodezik kontrol ağlarında ağın bilinmeyenlerinin niteliğine göre yapılacak ölçü yöntemleri değişir. Örneğin düşey kontrol ağlarında (nivelman ağları) yükseklik farkı ölçüleri, gravite ağlarında gravite farkı ölçüleri, yatay kontrol ağlarında (nirenge ağları)

doğrultu ve uzunluk ölçüleri, üç boyutlu ağlarda ise yatay ve düşey doğrultular ile uzunluk ölçüleri kullanılarak hesaplamalar yapılmaktadır. Elde edilen bu ölçüler, ait oldukları jeodezik ağların konumları ile ilgili herhangi bir bilgi içermezler. Yani, bir nivelman ya da gravite ağında herhangi bir noktanın yüksekliği bilinmiyorsa bu nivelman ağının konumu hakkında net bir şey söylenemez. Bu ağ herhangi bir datuma yerleştirilemez.

Eğer bir yatay kontrol ağında en az bir noktanın iki koordinatı, bir kenar uzunluğu ve bir açıklık açısı biliniyorsa veya en az iki noktasının koordinatları biliniyorsa sadece doğrultu açıları ölçülerek, üç boyutlu bir ağda en az iki noktasının altı koordinatı ve ölçeği biliniyorsa yalnızca doğrultu ve düşey açıları ölçülerek bir koordinat sistemindeki yeri, dönüklüğü ve büyüklüğü belirlenebilir. İki ya da üç boyutlu bir ağda doğrultu ve uzunluklar bilindiğinde ölçek faktörü de biliniyor demektir. Bu durumda koordinat sisteminin tanımı için gereken parametre sayısı bir azalır. Bu tip ağlar *serbest ağlardır*.

Düşey bir jeodezik ağın yüksekliği veya bir gravite ağının düşey yönde ötelemesi, iki boyutlu ağlarda x, y eksen doğrultularında iki öteleme, bir dönüklük ve bir ölçek katsayısı, o jeodezik ağın datum parametreleri olarak adlandırılır. Üç boyutlu jeodezik ağlarda datum parametre sayısı yedidir (üç eksen doğrultusunda üç öteleme, üç dönüklük ve bir ölçek katsayısı). Jeodezik ağların dengelemesinde bu parametrelerden bazıları kullanıldığından ve hangi parametrelerin seçileceği problemi çözene bağlı olduğundan bu parametrelere *serbest datum parametreleri* veya *dış parametreler* adı verilir.

Datum parametreleri, jeodezik ağ dengelemesindeki yeni noktaları ve doğrulukları etkileyen unsurlardır. Datumu oluşturacak parametrelerin seçimindeki esneklik dengeleme sonuçlarını da etkiler. Ölçü hataları, bilinmeyen olarak kabul edilen noktaların koordinatlarına dağıtılır. Bu doğrultuda bilinen (sabit) noktalardan uzaklaştıkça noktaların konum hatalarının artması doğal bir sonuçtur. Deformasyon analizi amaçlı ölçülerde bölgenin hareketinin doğru belirlenmesi için nokta seçimi yukarıda bahsedilen sebeplerden dolayı önemlidir.

Jeodezik ağların dengelemesi birkaç adımdan oluşan yoğun işlemlerden meydana gelmektedir. Bu sebepten dolayı sayısal ortamlardan yararlanmak işlem süremizi kısaltmaktadır. Kaba hatalı ölçülerin ayıklanması, istatistiksel testlerle ölçülerin uyumluluğunun analizi, periyotlar arası ölçü ilişkileri, matematiksel ve stokastik modelin oluşturulması, deformasyonların araştırılması gibi işlemler serbest dengeleme hesaplamaları ile gerçekleştirilmektedir. Bu uzun işlemlerden doğru sonucu almak için datum seçiminin iyi yapılması gerekmektedir.

3.5.Serbest Ağ Dengelemesi

Bütün noktaların bilinmeyen olarak kabul edildiği jeodezik ağ dengelemelerine serbest ağ dengelemeleri denir. Serbest ağlarda normal denklem katsayılar matrisi tekildir. Ayrıca tekil olan normal denklem katsayılar matrisinin determinanı sıfıra eşittir.

r : Normal denklem katsayılar matrisi rangı,

u : Bilinmeyen sayısı,

d : rank bozukluğu ise, $r = u - d$ olmaktadır.

Serbest ağlarda, açık çözüm için bilinmeyen sayısından daha çok bilinmeyen öngörülmesinden dolayı, normal denklemler katsayısı tekil olmaktadır.

Serbest ağ dengelemeleri üç farklı yöntemle yapılabildiği gibi üç farklı yöntemin sonuçları birbirine dönüştürülebilmektedir. Bu yöntemler aşağıda anlatılmaktadır:

3.5.1.Zorlamasız Klasik Dengeleme

Zorlamasız klasik dengelemede datum, defekt sayısı kadar sabit koordinat ile tanımlanır. Bu dengeleme türünde normal denklem katsayılar matrisinin determinantının sıfırdan farklı bir değer olduğu kabul edilir.

Zorlamasız klasik dengelemede bütün noktalar bilinmeyen olarak kabul edilir. $v = Ax - l$ düzeltme denklemlerinde bulunan A katsayılar matrisi oluşturulurken ya defekt sayısı kadar sütun kullanılır ya da defekt sayısı kadar koordinat bilinmeyeni sabit kabul edilir. Bu iki yolla, $N = A^T P A$ katsayılar matrisi determinant sıfırdan farklı, düzenli bir matrise dönüştürülmeye çalışılır. Zorlamasız klasik dengelemenin çalışma prensibi bu şekildedir. Normal denklem katsayılar matrisinden defekt sayısı kadar sütunun ve normal denklemlerden bu sütunlara karşılık satırların çizilmesiyle de aynı sonuca ulaşılır.

Yukarıda bahsedildiği üzere defekt sayısı kadar bilinmeyen sabit kabul edildiğinden sabit kabul edilen nokta veya koordinatların jeodezik ağda bulunan konumları, dengeleme sonuçlarında etkili olmaktadır. Doğal olarak sabit kabul edilen noktalardan uzaklaştıkça konum hataları da artmaktadır. Bu durum da zorlamasız klasik dengelemenin olumsuz yönüdür.

3.5.2.Tüm İz Minimum Yöntemine Göre Dengeleme

Tüm iz minimum yönteminde jeodezik ağın bütün noktaları datum tanımına yardımcı olmaktadır. Bu yöntemde temel felsefe jeodezik ağın bütün noktalarını kapsayan küçültülmüş koordinat bilinmeyenleri vektörünün normunun yani bilinmeyenlerin karelerinin toplamının ve ağırlık katsayıları matrisi köşegen elemanları toplamının yani

ağırlık katsayıları matrisi izinin minimum olmasıdır.

Tüm iz minimum yönteminde dengeleme hesabı için oluşturulacak doğrusallaştırılmış fonksiyonel model, düzeltme denklemleri ve koordinat bilinmeyenleri arasındaki ilişkiyi temsil eden denklemlerinden oluşur:

$$\mathbf{v} = \mathbf{A} \mathbf{x}_g - \mathbf{l} \quad (\text{düzeltme denklemleri}) \quad (3.75)$$

$$\mathbf{G}^T \mathbf{x}_g = \mathbf{0} \quad (\text{koşul denklemleri})$$

Yukarıda gösterilen koşul denklemlerinde bulunan x_g koordinat bilinmeyenleri vektörü, jeodezik ağın bütün noktalarını içinde barındırır. Öncelikle yöneltme ve benzer bilinmeyenlerin düzeltme denklemlerinden yok edildiği varsayılmaktadır. Problemin çözümü için tanımlanacak datum G matrisiyle temsil edilmekte, datum tanımına bütün noktalar katılmaktadır.

“Koşul denklemlerinin sayısı = Datum parametrelerinin sayısı” dır. Buradan hareketle,

p : nokta sayısı,

u : Bilinmeyen sayısı ise,

bir boyutlu ağlarda $u = p$, iki boyutlu ağlarda $u = 2p$ ve üç boyutlu ağlarda $u = 3p$ olmakta, buradan da G matrisinin boyutları $u \times d$ olarak karşımıza çıkmaktadır.

Yükseklik ve gravite ağları gibi bir boyutlu ağlarda G^T matrisi:

$$G^T = \frac{1}{\sqrt{p}} [1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1] \quad (G^T G = 1) \quad (3.76)$$

olmaktadır. Yatay kontrol ağları gibi iki boyutlu ağlarda G^T matrisi,

$$G^T = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{p}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{p}} & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \frac{1}{\sqrt{p}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{p}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{p}} & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & \frac{1}{\sqrt{p}} \\ -y'_{10} & x'_{10} & -y'_{20} & x'_{20} & \cdot & \cdot & \cdot & -y'_{p0} & x'_{p0} \\ x'_{10} & y'_{10} & x'_{20} & y'_{20} & \cdot & \cdot & \cdot & x'_{p0} & y'_{p0} \end{bmatrix} \quad (3.77)$$

şeklinde oluşmaktadır (Koch, 1987). G^T matrisinin satır vektörleri ortogonaldır ve normlandırılmıştır ($G^T G = E$). x'_{i0} , y'_{i0} büyüklükleri normlaştırılmış yaklaşık koordinatlar

olup, ağırlık merkezine göre tanımlanmış bulunmaktadır:

$$x'_{i0} = \frac{x_{i0} - x_s}{\sqrt{[(x_{i0} - x_s)^2 + (y_{i0} - y_s)^2]}}, \quad y'_{i0} = \frac{y_{i0} - y_s}{\sqrt{[(x_{i0} - x_s)^2 + (y_{i0} - y_s)^2]}} \quad (3.78)$$

Burada $x_s = \frac{[x_0]}{p}$, $y_s = \frac{[y_0]}{p}$ ağırlık merkezinin koordinatlarıdır.

Koordinat sisteminin x ve y eksen doğrultularındaki öteleme, G^T matrisinde bulunan ilk iki satır ile, koordinat sisteminin dönüklüğü aynı matrisin üçüncü satırı ile, ölçek parametreleri ise son satırı ile tanımlanır. Eğer bir doğrultu-kenar ağında yatay doğrultular yanında uzunluklar ölçülüyorsa bu ağıda ölçek belli olduğundan G^T matrisinin son satırı ortadan kalkar.

Üç boyutlu ağırlık için G^T matrisi,

$$G^T = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{p} & 0 & 0 & 1/\sqrt{p} & 0 & 0 & \dots & 1/\sqrt{p} & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{p} & 0 & 0 & 1/\sqrt{p} & 0 & \dots & 0 & 1/\sqrt{p} & 0 \\ 0 & 0 & 1/\sqrt{p} & 0 & 0 & 1/\sqrt{p} & \dots & 0 & 0 & 1/\sqrt{p} \\ 0 & -z'_{10} & y'_{10} & 0 & -z'_{20} & y'_{20} & \dots & 0 & -z'_{p0} & y'_{p0} \\ z'_{10} & 0 & -x'_{10} & z'_{20} & 0 & -x'_{20} & \dots & z'_{p0} & 0 & -x'_{p0} \\ -y'_{10} & x'_{10} & 0 & -y'_{20} & x'_{20} & 0 & \dots & -y'_{p0} & x'_{p0} & 0 \\ x'_{10} & y'_{10} & z'_{10} & x'_{20} & y'_{20} & z'_{20} & \dots & x'_{p0} & y'_{p0} & z'_{p0} \end{bmatrix} \quad (3.79)$$

şeklinde ifade edilir. Yukarıdaki ifadede $G^T G \neq E$ 'dir. Bu da bu matrisin sütun vektörlerinin ortogonal ve ortonormal olmadığı anlamını taşır. Yukarıdaki ifadede bulunan x'_{i0} , y'_{i0} , z'_{i0} büyüklükleri, G^T matrisinin koşul denklemi olduğu ağırlık merkezine indirgenmiş ve küçültülmüş yaklaşık koordinatlardır:

$$\begin{aligned}
x'_{i0} &= \frac{x_{i0} - x_s}{\sqrt{[(x_{i0} - x_s)^2 + (y_{i0} - y_s)^2 + (z_{i0} - z_s)^2]}} \\
y'_{i0} &= \frac{y_{i0} - y_s}{\sqrt{[(x_{i0} - x_s)^2 + (y_{i0} - y_s)^2 + (z_{i0} - z_s)^2]}} \\
z'_{i0} &= \frac{z_{i0} - z_s}{\sqrt{[(x_{i0} - x_s)^2 + (y_{i0} - y_s)^2 + (z_{i0} - z_s)^2]}}
\end{aligned} \tag{3.80}$$

$$x_s = \frac{[x_0]}{p}, \quad y_s = \frac{[y_0]}{p}, \quad z_s = \frac{[z_0]}{p} \quad (\text{Ağın ağırlık merkezinin koordinatları})$$

Koordinat sisteminin x, y, z eksen doğrultularındaki öteleme G^T matrisinin ilk üç satırı ile, koordinat sisteminin üç eksene göre dönüklüğü üç, dört ve beşinci satırlar ile ve koordinat sisteminin ölçek parametreleri son satır ile tanımlanır. Eğer yatay doğrultular yanında uzunluklar ölçülüyorsa bu aşda ölçek belli olduğundan G^T matrisinin son satırı ortadan kalkar.

G matrisi,

$$A G = 0 \quad \text{ve} \quad N G = 0 \tag{3.81}$$

koşullarını sağlar.

(3.1) eşitliğindeki fonksiyonel modelde düzeltme denklemleri yanında bilinmeyenler arasında koşullar da bulunmaktadır. Koşullu bir dolaylı ölçüler dengelemesi modeli olan bu fonksiyonel modelde parametre kestirimi için Lagrange fonksiyonu,

$$\begin{aligned}
\Omega &= v^T P v + 2 k^T G^T x_g = \min \\
\Omega &= (x_g^T A^T - l^T) P (A x_g - l) + 2 k^T G^T x_g = \min
\end{aligned} \tag{3.82}$$

oluşturulur. Bu eşitliklerde geçen k vektörü korelat vektörüdür. Korelat vektörü, koşul sayısı kadar korelat bilinmeyeni içermektedir. (3.8) eşitliğinden;

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \mathbf{x}_g} = \mathbf{N} \mathbf{x}_g + \mathbf{G} \mathbf{k} - \mathbf{n} = \mathbf{0} \quad \text{ve} \quad \mathbf{G}^T \mathbf{x}_g = \mathbf{0} \quad \text{ile}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{N} & \mathbf{G} \\ \mathbf{G}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_g \\ \mathbf{k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{n} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (3.83)$$

normal denklemlerine ulaşılır. Burada $\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A}$ ve $\mathbf{n} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}$ dir. Normal denklem katsayılar matrisinin tersi,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{N} & \mathbf{G} \\ \mathbf{G}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_g & \mathbf{G}(\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \\ (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (3.84)$$

olarak ortaya çıkar. Burada $\mathbf{N}$ matrisinin Moore-Penrose ya da Pseudo tersi $\mathbf{N}^+$ olarak ifade edilir. Bu ifade, $\mathbf{x}_g$ koordinat bilinmeyenlerinin ağırlık katsayıları matrisine eşittir:

$$\mathbf{Q}_g = \mathbf{N}^+ = (\mathbf{N} + \mathbf{G} \mathbf{G}^T)^{-1} - \mathbf{G}(\mathbf{G}^T \mathbf{G} \mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \quad (3.85)$$

(3.14) eşitliğinde gösterilen ifadeler nedeniyle $\mathbf{G}^T \mathbf{A}^T = \mathbf{0}$ olduğundan (3.83) ve (3.84) eşitlikleri doğrultusunda $\mathbf{x}_g$ koordinat bilinmeyenleri,

$$\mathbf{x}_g = \mathbf{Q}_g \mathbf{n} = (\mathbf{N} + \mathbf{G} \mathbf{G}^T)^{-1} \mathbf{n} \quad (3.86)$$

ve $\mathbf{k}$ korelat bilinmeyenleri,

$$\mathbf{k} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{n} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} = \mathbf{0} \quad (3.87)$$

şeklinde ortaya çıkar.

Çeşitli yollarla yapılabilen $\mathbf{N}$ matrisinin tersini alma işlemlerine göre $\mathbf{Q}_g = \mathbf{N}^+$ matrisinin izi ile $\mathbf{x}_g$ vektörünün normu tüm çözümler karşısında minimumdur (tüm iz minimum):

$$\text{iz} \mathbf{Q}_g = \min, \quad \mathbf{x}_g^T \mathbf{x}_g = \min \quad (3.88)$$

(3.88) eşitliğinde görülen ifadenin sonucu olarak koordinat varyanslarının toplamı da minimum olur ve nokta konum hataları homojen dağılımlıdır. (3.83) eşitliğinde bulunan normal denklemlerinin katsayılar matrisi ile (3.84) eşitliğindeki tersi çarpıldığında sonuç birim matris olmaktadır. N ve Q_g matrislerinin simetrik olduğu ve (3.81) eşitliğindeki ifadeler göz önüne alındığında:

$$Q_g N = E - G(G^T G)^{-1} G^T \quad (3.89)$$

$$Q_g G = 0$$

$$N Q_g N = N$$

$$Q_g N Q_g = Q_g$$

ifadeleri ortaya çıkmaktadır.

$G^T x_g = 0$ koşulları, G^T matrisinin (3.77) eşitliğindeki karşılığı göz önüne alınarak iki boyutlu ağırlar için açık yazılırsa,

$$[\delta x] = 0, [\delta y] = 0, [-y'_0 \delta x + x'_0 \delta y] = 0, [x'_0 \delta x + y'_0 \delta y] = 0 \quad (3.90)$$

olduğu görülmektedir. Yukarıdaki ifadeler benzerlik (Helmert) dönüşümü için geçerlidir. Bu da tüm iz minimum yöntemiyle yapılan dengelemelerde yaklaşık koordinatlar ile dengeleme sonunda bulunan koordinatların birbirine dönüştüğü anlamına da gelebilir. δx , δy küçültülmüş bilinmeyenleri benzerlik dönüşümündeki v_x , v_y düzeltmelerine karşılık gelmektedir.

$G^T x_g = 0$ koşulları, G^T matrisinin (3.77) eşitliğindeki karşılığı göz önüne alınarak yükseklik ağırları için açık yazılırsa,

$$[\delta H] = 0 \quad (3.91)$$

ifadesi ortaya çıkar. Buna göre dengeleme sonunda elde edilecek ve küçültülmüş bilinmeyenlere karşılık gelen sayısal değerler toplamı sifıra eşit olmalıdır.

İki boyutlu bir ağırlar koşul denkleminin G^T matrisinde bulunan ve yaklaşık koordinatları ifade eden terimler ağırlar ağırlık merkezine göre tanımlanmıştır. Ayrıca bu koşul denkleminin satır elemanları işlemlerde kolaylık sağlanması sebebiyle normlandırılmıştır ($G^T G = E$; birim matris). Normlandırma için ihtiyacı olan katsayılar,

$$\frac{1}{\sqrt{p}} \text{ ve } \frac{1}{\sqrt{[(x_{i0} - x_s)^2 + (y_{i0} - y_s)^2]}} \quad (3.92)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Normlandırma katsayısı yükseklik ve gravite ağırları için $1/\sqrt{p}$ dir. Bu durumda $G^T G = 1$ olur. Normlandırmadan dolayı (3.85) eşitliğinde bulunan $(G^T G G^T G)^{-1}$ ifadesi E matrisine eşit olur. Bu durumda çözüm kolaylaşmaktadır. Üç boyutlu ağırlar için $G^T G$ ifadesinin E matrisine eşit olmadığı göz önüne alınmalıdır. (3.77) ve (3.79) eşitliklerinde verilen G^T matrislerinde ağırlar herhangi bir noktasının sabit alınması yerine ağırlık merkezi sabit alınmaktadır. Bu durumda datum parametreleri yaklaşık koordinatlara dayandırılmış olmaktadır.

Tüm iz minimum yöntemine göre dengeleme işlemlerinde, bilinmeyen koordinatlar ve bilinmeyen noktalarla alakalı doğruluk ölçütlerinin, sabit parametre seçiminden etkilenmesini çözümün dışında bırakan, bu ölçütlerin homojen dağılımlı olmasını sağlayan bir çözümdür.

3.5.3. Kısmi İz Minimum Yöntemine Göre Dengeleme

Kısmi iz minimum yönteminde jeodezik ağırların bütün noktalarının yalnızca bir bölümü datum tanımına yardımcı olmaktadır. Bu yöntemde temel felsefe jeodezik ağırların bütün noktalarını kapsayan küçültülmüş koordinat bilinmeyenleri vektörünün bir bölümünün normunun, yani bilinmeyenlerin bir bölümünün karelerinin toplamı ile ağırlık katsayıları matrisinin buna karşılık alt matrisinin köşegen elemanları toplamının yani ağırlık katsayıları matrisi izinin minimum olmasıdır.

Tüm iz minimum yönteminde, bir önceki konuda belirtildiği üzere, jeodezik ağırların bütün noktaları ağırlar tanımına katılmaktadır. Böylece ağırlar tümünde en uygun konumlandırma oluşturulmaktadır. Kısmi iz minimum yönteminde ise ağırlar datumuna en çok katkı yapan, ağırlar datum tanımlamasına katkıda bulunan noktalar üzerine yoğunlaşmaktadır. Yani en uygun konumlandırma bu noktalar üzerinden gerçekleştirilmektedir.

Kısmi iz minimum yönteminde dengelemenin doğrusallaştırılmış fonksiyonel modelinin (3.75) eşitliğindeki fonksiyonel modelden farkı, bu modelde G koşul denklemi yerine G koşul denkleminin türetilmiş B matrisinin kullanılıyor olmasıdır.

Mantıksal olarak bir jeodezik ağda çok sayıda kısmi iz minimum çözümü ortaya

konabilmektedir. Bu durumda ortaya koyacağımız herhangi bir datumu “i” indisi ile ifade edelim. “i” indisi ile tanımlanan datumun çözümünde, G matrisinde ağı datumuna katılmayan elemanlar yerine sıfır (0) yazılarak oluşturulan matris B_i matrisi olmaktadır. x_i vektörü de bütü noktaları içinde bulunduran koordinat bilinmeyenleri vektörü olmak üzere dengelemenin doğrusallaştırılmış modeli,

$$v = A x_i - l \quad (3.93)$$

$$B_i^T x_i = 0$$

veya x_1 datumu tanımlayan nokta koordinatları, x_2 datum tanımına girmeyen nokta koordinatları vb. bilinmeyenler, G_1 matrisi G’nin datum noktalarına karşılık alt matrisi olmak üzere,

$$x_i = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \quad B_i = \begin{bmatrix} G_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \end{bmatrix} \quad (3.94)$$

ile

$$v = A_1 x_1 + A_2 x_2 - l \quad (3.95)$$

$$G_1^T x_1 = 0$$

şeklinde yazılabilir. (3.82)’deki Lagrange fonksiyonu (3.93) fonksiyonel modeli için uygulanırsa,

$$\begin{bmatrix} N & B_i \\ B_i^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n \\ o \end{bmatrix} \quad (3.96)$$

normal denklemleri ortaya çıkar. ($N = A^T P A$, $n = A^T P l$). (3.96) eşitliğindeki normal denklemlerinin çözümünden,

$$\begin{bmatrix} x_i \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & B_i \\ B_i^T & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} n \\ o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_i & G(B_i^T G)^{-1} \\ (G^T B_i)^{-1} G^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n \\ o \end{bmatrix} \quad (3.97)$$

ortaya çıkar. N matrisinin genel tersi (inversi) olarak adlandırılan $\mathbf{N}^-$ matrisi $\mathbf{Q}_i$ matrisine eşit olur ($\mathbf{Q}_i = \mathbf{N}^-$), x_i bilinmeyenlerinin ağırlık katsayıları matrisidir:

$$\mathbf{Q}_i = (\mathbf{N} + \mathbf{B}_i \mathbf{B}_i^T)^{-1} - \mathbf{G}(\mathbf{G}^T \mathbf{B}_i \mathbf{B}_i^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \quad (3.98)$$

(3.7) eşitliğindeki ifadeler sebebiyle $\mathbf{G}^T \mathbf{A}^T = 0$ olduğundan (3.97) eşitliğinden x_i ve k bilinmeyenleri,

$$\begin{aligned} x_i &= \mathbf{Q}_i \mathbf{n} = (\mathbf{N} + \mathbf{B}_i \mathbf{B}_i^T)^{-1} \mathbf{n} \\ k &= (\mathbf{G}^T \mathbf{B}_i)^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{n} = 0 \\ \mathbf{n} &= \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}, \quad \mathbf{G}^T \mathbf{A}^T = 0 \end{aligned} \quad (3.99)$$

şeklinde ortaya çıkar.

Bilinmeyenler vektörü $x_i = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$ ise, bilinmeyenler vektörünün datum tanımına giren noktalar x_1 ile ifade edilir. Ağırlık katsayıları vektörü de $\mathbf{Q}_i = \mathbf{N}^- = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{21} & Q_{22} \end{bmatrix}$ ise x_1 alt vektörünün normuna karşılık Q_{11} alt matrisinin izi minimumdur:

$$x_1^T x_1 = \min, \quad \text{iz } Q_{11} = \min \quad (3.100)$$

Bu ifadelerden yola çıkılarak datum noktaları koordinatlarının (x_1) varyansları toplamı en küçüktür ve datum noktalarının konum hataları homojen dağılımlıdır. (3.96) eşitliğindeki normal denklemlerinin katsayılar matrisi, (3.97) eşitliğindeki tersiyle çarpımı sonucu birim matrise eşittir. Simetrik olan N ve $\mathbf{Q}_i$ matrislerinin çarpımı, (3.81) eşitliğindeki ifadeler göz önüne alındığında,

$$\mathbf{Q}_i \mathbf{N} = \mathbf{E} - \mathbf{G}(\mathbf{B}_i^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{B}_i^T \quad (3.101)$$

$$\mathbf{Q}_i \mathbf{B}_i = 0$$

$$\mathbf{N} \mathbf{Q}_i \mathbf{N} = \mathbf{N}$$

$$\mathbf{Q}_i \mathbf{N} \mathbf{Q}_i = \mathbf{Q}_i$$

şeklinde dönüşümlere konu olur.

Tüm iz minimum ve kısmi iz minimum yöntemleri karşılaştırıldığında dengeleme sonuçları arasında aşağıdaki ilişkiler olduğu görülür:

$$\text{iz } Q_g < \text{iz } Q_i, \quad \mathbf{x}_g^T \mathbf{x}_g < \mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_i \quad (3.102)$$

Bu bölümde kısmi iz minimum yöntemi ile dengeleme işlemlerini ve Kısmi iz minimum yöntemine göre dengeleme işlemlerinin özel birer biçimi olan Tüm iz minimum yöntemine göre dengeleme ve zorlamasız klasik dengeleme işlemleri anlatılmaktadır. B_i ve G matrislerinin birbirine eşit olduğu varsayılan kısmi iz minimum dengeleme yöntemi, bir çeşit tüm iz minimum dengeleme yöntemine dönüşmektedir. (3.94) eşitliğinde verilen $B_i^T = [G_1^T \quad 0^T]$ matrisinde, datum noktalarının koşul alt matrisi G_1^T , 'nin sütun sayısının serbest datum parametrelerinin sayısına eşit olduğu durumlarda kısmi iz minimum yöntemine göre dengeleme, zorlamasız klasik dengeleme olarak kabul edilebilir (Demirel, 2005).

3.6.Periyot Ölçülerinin Dengelenmesi

Periyot sayısı: k olmak üzere, dengelemenin fonksiyonel modeli genel olarak,

$$\begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \vdots \\ l_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & A_{1k} \\ A_{21} & A_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & A_{2k} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ A_{k1} & A_{k2} & \cdot & \cdot & \cdot & A_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \hat{x}_k \end{bmatrix} \quad (3.103)$$

şeklinde ifade edilebilir. Yukarıdaki eşitlikte,

$l_i (n_i, 1)$:Küçültülmüş ölçüler vektörü

$v_i (n_i, 1)$: Düzeltmeler vektörü

$A_{ij} (n_i, v_j)$: Katsayılar matrisi

$\hat{x}_i (v_i, 1)$: Nokta koordinatları vektörü

Koordinat bilinmeyenleri her periyot için vektörel olarak gösterilir. Dengeleme hesabı için oluşturulacak ağ düzenlemesi değişik şekillerde ortaya çıkabileceğinden aynı dengelemeyi ortaya çıkan v_i vektörleri ile çözümleyebiliriz. Bunun yanında ölçü sayıları

(n_i) ve ölçülerin türü de farklı olabilir. Buradan ağ teorisi olarak anlatırsak birinci ve ikinci fonksiyonel model düzenlemesinde değişim kabul edilebilir. Yukarıdaki eşitlikte verilen dengeleme modelinin farklı şekillerde düzenlenebileceği anlaşılmaktadır.

Yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi katsayılar matrisinin köşegenlerini A_{ii} konfigürasyon matrisleri oluşturmaktadır. Bu tasarım matrislerinin her biri bir ölçü ile bilinmeyenler arasındaki fonksiyonel ilişkileri temsil eder. Eşitlikte görülen A_{ij} matrisleri ($i \neq j$) ise farklı periyotlarda kullanılan parametreler arasındaki fonksiyonel ilişkileri ifade eder. Deformasyon analizi yapılırken A_{ij} ($i \neq j$) matrislerinin sayısal sonucu sıfır (0) olarak kabul edilir. Buradan hareketle fonksiyonel model,

$$\begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \vdots \\ l_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & A_{22} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & A_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \\ \vdots \\ \hat{x}_k \end{bmatrix} \quad (3.104)$$

şeklini alır.

$$r_g(A_{ii}) = r_i = u_i - d_i : A_{ii} \quad \text{matrislerinin rangı,} \quad (3.105)$$

u_i : i. Periyottaki bilinmeyen sayısı,

d_i : i. Periyottaki datum defekti olarak ifade edilir. A_{ii} matrisleri tekildir. Periyot sayısı k olmak üzere stokastik model genel olarak,

$$\underline{\Sigma}_{ll} = \sigma_o^2 \underline{Q}_{ll} = \sigma_o^2 \begin{bmatrix} \underline{Q}_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \underline{Q}_{1k} \\ \underline{Q}_{21} & \underline{Q}_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \underline{Q}_{k1} & \underline{Q}_{k2} & \underline{Q}_{k3} & \cdot & \cdot & \underline{Q}_{kk} \end{bmatrix} \quad (3.106)$$

şeklinde ifade edilir.

$\underline{\Sigma}_{ll}$: Bütün periyotlardaki ölçüler için oluşturulan kovaryans matrisi

$\underline{Q}_{11}$: Bütün periyotlardaki ölçülerin kofaktör (ağırlık katsayıları) matrisi

$\underline{Q}_{ii}$: i. Periyottaki ölçülerin ağırlık katsayıları

$\underline{Q}_{ij}$ ($i \neq j$) : Farklı periyotlardaki ölçülerin birbiriyle stokastik ilişkisini gösteren ağırlık katsayıları matrisi

$\underline{Q}_{ij} = 0$ kabul edilir. ($i \neq j$)

Farklı periyotlarda yapılan ölçüler arasında kurulan ilişkiye korelasyon denir. Yapılan ölçüler esnasındaki atmosferik benzerlikler ya da farklı dış etkilere dolayı oluşabilecek benzerlikler ölçüler arasındaki korelasyonların kaynağı olabilir. Fakat bu ilişkileri ifade edecek $\underline{Q}_{ij}$ matrislerini oluşturmak genelde kolay değildir. Bahsedilen bu ölçü ilişkileri yaklaşımları ile basit olarak oluşturulmuş bir stokastik model aşağıdaki gibi olabilir:

$$\underline{\Sigma}_{11} = \sigma_o^2 \underline{Q}_{11} = \sigma_o^2 \begin{bmatrix} \underline{Q}_{11} & 0 & . & . & . & 0 \\ 0 & \underline{Q}_{22} & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ 0 & . & . & . & . & 0 \\ 0 & 0 & . & . & 0 & \underline{Q}_{kk} \end{bmatrix} \quad (3.107)$$

Ölçü duyarlılıkları farklı periyotlarda farklı şekilde oluşabilir. Bu farklılıkları minimuma indirip hesap kolaylığı sağlaması için periyotlar arasında homojenleştirme yapılarak σ_o^2 varyans faktörü alınmaktadır. $\underline{Q}_{ii}$ matrislerinin rangı:

$$r_g(\underline{Q}_{ii}) = r_{li} = n_i \text{ şeklinde ifade edilebilir.} \quad (3.108)$$

3.6.1. Periyot Ölçülerinin Ayrı Ayrı Dengelenmesi

Matematiksel Model = Stokastik Model + Fonksiyonel Model ise yukarıda ortaya konan matematiksel model, aşağıdaki birbirinden bağımsız olan ve her periyot için kullanılabilir,

$$\underline{l}_i + \underline{v}_i = \underline{A}_{ii} \hat{\underline{x}}_i \quad (3.109)$$

eşitliğinin kullanılmasına izin verir. Buradan $\underline{\Sigma}_{ii} = \sigma_o^2 \underline{Q}_{ii}$ dengeleme modeline ulaşılır.

$P_i = Q_{ii}^{-1}$ ile kurulacak normal denklemlerin çözümü ile,

$$\hat{x}_i = Q_{xi} A_i^T P_i l_i \quad ; \quad Q_{xi} = (A_i^T P_i A_i)^+ \quad \text{çıkar.} \quad (3.110)$$

eşitliklerine ulaşılır. (+) Moore-Penrose (Pseudo İnvrs) anlamındadır.

$x = N^- n$ Genel olarak küçültülmüş bilinmeyen vektörü,

$x = N^{-1} n$ Geleneksel (defekt sayısı=bilinen sayısı),

$x = N^+ n$ N tekil olmak üzere Serbest ağ dengelemesi,

dengeleme sonunda elde edilen birim ağırlıklı ölçünün σ_o^2 varyansı,

$$s_{oi}^2 = \frac{v_i^T P_i v_i}{n_i - r_i} = \frac{\Omega_i}{f_i} \quad (3.111)$$

n_i : i. Periyottaki ölçü sayısı

$r_i = u_i - d_i$: i. Periyottaki A_{ii} matrisinin rangı

Ağırlık matrisi olan $P_i = Q_{ii}^{-1}$ bütün periyotlar için aynı σ_o^2 varyansına sahip olmalıdır. Bu durumda oluşturduğumuz modellerin,

$$H_B : E(\sigma_{o1}^2) = E(\sigma_{o2}^2) = \dots \dots \dots E(\sigma_{ok}^2) = \sigma_o^2 \quad (3.112)$$

hipotezini sağlaması gerekmektedir. Her bir ölçü periyodu için elde etmeyi öngördüğümüz duyarlılık bilgileri doğrultusunda Σ_{ii} kovaryans matrisleri ortaya konur. Yapılan dengelemeler sonunda elde edilen sonuçlar stokastik modelle farklılıklar gösterirse varyans kestirim yöntemi kullanılarak kovaryans matrisi (Σ_{ii}) tekrar oluşturulur. Oluşturulan modeller doğruysa ve periyotlar arasındaki ağırlıklandırmalar olması gerektiği gibi oluşturulmuşsa yani ortaya çıkan varyans (s_{oi}^2) değerleri arasındaki farklılıklar ölçü hatalarından dolayı oluşuyorsa ölçü sayısı (k) kadar varyans (s_{oi}^2) değeri tek s_o^2 tahmin değerinin dönüştürülmesi,

$$s_0^2 = \frac{\sum \Omega_i}{\sum f_i} \quad (3.113)$$

uygun olacaktır.

Buradan hareketle gelineen noktadan sonar yapılacak analizler küçültülmüş koordinat bilinmeyenleri doğrultusunda yapılacağından, bütün periyotlarda, yapılacak doğrusallaştırma işlemlerinde referans olarak aynı koordinat değerleri kullanılması gerekmektedir. Eğer bir bölgede yer hareketleri varsa ve hareket büyük ise, bu anlatılan durum (aynı koordinat noktasından hareket etme şartı) uygun olmayabilir. Yapılacak hataları minimum indirmek için, deformasyon analizinde, dengeleme sonucunda elde edilecek kordinatların kullanılması uygun olacaktır.

3.7.İstatistiksel Testler

3.7.1.Model Hipotezinin Testi

Model hipotezi testi için sıfır hipotezi ortaya konmalıdır,

$$H_0 : E \{m_0^2\} = E \{s_0^2\} \quad (3.114)$$

eşitliğinin analizi problemin çözümü için ortaya konan modelin test edilmesi için ihtiyaç duyulan testtir. Yukarıdaki eşitlik model testi için ortaya konan hipotezdir. Hipotez testinin türüne göre üzerinde duracağımız denklem değişmektedir. Hipotez denklemleri tek yönlü testlerde,

$$H_{s1} : E \{m_0^2\} > E \{s_0^2\} \quad (3.115)$$

şeklinde, çift yönlü testlerde ise

$$H_{s2} : E \{m_0^2\} \neq E \{s_0^2\} \quad (3.116)$$

biçiminde oluşturulmaktadır. Test büyüklüğünün sayısal değeri aşağıdaki bağıntı ile:

$$T = \frac{m_0^2}{s_0^2} ; m_0 > s_0 \quad (3.117)$$

hesaplandıktan sonra,

$$q_1 = F_{f,f,1-a} \quad \text{veya} \quad q_2 = F_{f,f,1-\frac{a}{2}} \quad (3.118)$$

değerleri ile karşılaştırılır. Bu değerlere göre analiz edilen sonuçlar sonunda hipotez kabul veya ret edilir. (3.115) hipotez eşitliğine göre ulaşılan test büyüklüğü q_1 sonucu ile, (3.116) hipotez eşitliğine göre ulaşılan test büyüklüğü q_2 sonucu ile karşılaştırılır.

3.7.2.Uyuşumsuz Ölçüler Testi

Deformasyon analizi amaçlı tesis edilen jeodezik ağlarda sürekli olarak veya belirli aralıklarla gözlemler yapılmaktadır. Gözlemlerden elde edilen ölçümler içinde her periyot ölçüsünde uyuşumsuz ölçüler elde edilmesi olasıdır. Yapılacak analizlere bu uyuşumsuz ölçülerin girmemesi gerekmektedir.

Kaba hatalı bu ölçülerin saptanması amacıyla geliştirilmiş pekçok test yöntemi mevcuttur (Öztürk ve Şerbetçi, 1992; Şimşek, 1992). Bu çeşitli test yöntemlerinin farkı kullanılan varyans faktörlerinden kaynaklanmaktadır. Aşağıda bahsedilen test yöntemlerinden Baarda testi için (data-snooping) önsel (apriori) varyans (Baarda, 1968), Pope testi için sonsal (Aposteriori) varyans (Koch, 1987) ve t-testi için (Demirel, 1987) uyuşumsuz ölçü testi yapılacak ölçü dışında gözlemlerden elde edilen diğer ölçülerin dengeleme işlemlerinin sonunda elde edilen sonsal varyans kullanılmaktadır.

Baarda testi için test değeri,

$$T_{i,B} = \frac{V_i}{s_0 \sqrt{q_{v_i} v_i}} \sim N(0,1) \quad \text{Standart normal dağılımlı} \quad (3.119)$$

Pope testi için test değeri,

$$T_{i,P} = \frac{V_i}{m_0 \sqrt{q_{v_i} v_i}} \sim \tau_f \quad \text{Tau dağılımlı} \quad (3.120)$$

t-testi için sınır değeri,

$$T_{i,t} = \frac{V_i}{m_0 \sqrt{Q_{v_i} v_i}} \sim t_{f-1} \quad \text{t-dağılımlı} \quad (3.121)$$

$$m_0^2 = \frac{[p.v.v] - \frac{v_i^2}{q_v v_i}}{f-1} \quad (3.122)$$

(3.119), (3.120) ya da (3.121) test büyüklüğü sınır değerini aşarsa ilgili ölçü uyumsuzdur.

3.7.3.Varyans Testi

3.7.3.1.Bir Varyansın Test Edilmesi

Bir periyot gözlemlerinden elde edilen ölçülerin dengelenmesi ile elde edilen sonsal varyans $s^2 = v^T P v / f$ olarak kabul edilsin (denklemdede “f” ile ifade edilen parametre, bilinmeyen sayısından fazla sayıda olan ölçü sayısı yani serbestlik derecesidir).

Herhangi bir bölgede bulunan bir topluluğun bilinmeyen σ^2 varyansı belli bir σ_0^2 varyansına eşit olup olmadığı sorusu sorulduğunda,

$$\text{Sıfır Hipotezi} : H_0 : \sigma^2 = \sigma_0^2 \quad (3.123)$$

$$\text{Örnekleme Fonksiyonu} : \chi^2 = f S^2 / \sigma_0^2 \quad (3.124)$$

$$\text{Test Büyüklüğü} : \hat{\chi}^2 = f s^2 / \sigma_0^2 \quad \text{veya} \quad \hat{q} = \sqrt{\frac{f}{\chi^2}} = \frac{\sigma_0}{s} \quad (3.125)$$

Sıfır hipotezinin hangi hipoteze göre test edileceğine karar vermek gerekmektedir. $H_K : \sigma^2 > \sigma_0^2$ tek yanlı sorusu ya da $H_K : \sigma^2 \neq \sigma_0^2$ iki yanlı sorusuyla teste devam edilebilir. Güven sınırları, f (serbestlik derecesi) ve α (yanılma olasılığı) ya bağlı olarak tek yanlı soru için $\chi_{f,1-\alpha}^2$ ve iki yanlı soru için $\chi_{f,\alpha/2}^2$, $\chi_{f,1-\alpha/2}^2$ ‘dir.

Tek yanlı sorunun analizi için $\hat{\chi}^2 < \chi_{f,1-\alpha}^2$ ise sıfır hipotezi kabul olur, tersi durumda red olur. İki yanlı soru için $q_1 < \hat{q} < q_2$ olduğu durumda sıfır hipotezi kabul olur, $\hat{q} \leq q_1$ veya $\hat{q} \geq q_2$ olduğu durumlarda sıfır hipotezi red olur.

3.7.3.2. İki Varyansın Test Edilmesi

Birbiri ile ilişkili olmayan ve normal dağılımlı olan iki ölçü grubunun dengelenmesi ile birim ağırlıklı ölçülerin sonsal varyanslarının aşağıdaki gibi olduğu varsayılın (serbestlik dereceleri; $f_1 = n_1 - u_1$, $f_2 = n_2 - u_2$),

$$s_1^2 = v_1^T P_1 v_1 / f_1, \quad s_2^2 = v_2^T P_2 v_2 / f_2 \quad (3.126)$$

her iki grup ölçünün varyansının eşit olup olmadığının analizi yapılacaktır.

$$\text{Sıfır Hipotezi} \quad : H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 \quad (3.127)$$

$$\text{Örnekleme Fonksiyonu} : F = S_1^2 / S_2^2 \quad (3.128)$$

$$\text{Test Büyüklüğü} \quad : \hat{F} = s_1^2 / s_2^2 \quad (3.129)$$

Test büyüklüğü hesaplanırken rakamsal olarak büyük olan varyans paya yazılmalıdır. Güven sınırları, f_1 (1. Periyot serbestlik derecesi), f_2 (2. Periyot serbestlik derecesi) ve $1-\alpha$ (güven düzeyi) ya bağlı olarak $F_{f_1, f_2, 1-\alpha}$ güven sınırları olarak hesaplanarak bulunur. $\hat{F} < F_{f_1, f_2, 1-\alpha}$ için sıfır hipotezi kabul olur, tersi durumda sıfır hipotezi red olur.

$f_2 \rightarrow \infty$ için, $s_2^2 \rightarrow \sigma_2^2$ olur. Böyle bir durumda F-dağılımı χ^2 dağılımına dönüşür. Bir varyans test edilirken ortaya koyulan test büyüklüğü bağıntısı ($\hat{\chi}^2 = fs^2 / \sigma_0^2$ veya $\hat{q} = \sqrt{\frac{f}{\chi^2}} = \frac{\sigma_0}{s}$) ile iki varyans test edilirken ortaya koyulan test büyüklüğü bağıntısı ($\hat{F}=s_1^2/s_2^2$) karşılaştırıldığında aşağıdaki ilişki ortaya çıkmaktadır:

$$\hat{\chi}^2 = fs_1^2 / \sigma_2^2 = f\hat{F} \quad (3.130)$$

3.8.Doğrusal Hipotez Testi

Serbest ağ dengelemelerinin matematiksel modeli,

$$l + v = A x, \quad C_{11} = \sigma_o^2 Q_{11} = \sigma_o^2 P^{-1} \quad (3.131)$$

şeklinde olduğundan daha önce bahsetmiştik. Bu durumda x bilinmeyenleri ya da dengeleme türüne göre bir bölümü arasında bazı ilişkilerin var olup olmadığının test edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla,

$$H_o : Bx = W \quad (3.132)$$

hipotezi öne sürülür. Yukarıdaki denklem bir sıfır hipotezidir. Bir bölgede bulunan ve değişik periyotlarda gözlemlenen, jeodezik ağ olarak tasarlanmış belirli sayıda noktalar topluluğundan, bir ortak noktalar kümesinin farklı periyotlarda yapılan gözlem sonuçlarına göre hareketsiz olduklarını varsayan koşul denklemleri, genel anlamda sıfır hipotezi olarak karşımıza çıkmaktadır ((3.105) doğrusal hipotezi). Jeodezik ağ dengeleme modelinin sözkonusu doğrusal hipotez ile uyumlu olup olmadığı, F testinin konusudur. Sıfır hipotezinin geçerli olduğu durumlarda, dengeleme modeli bilinmeyenleri arasında koşul denklemleri bulunan denklemler, (3.131) eşitliklerinin yerini alır:

$$l + v_H = A x_H \quad , \quad C_{11} = \sigma_0^2 Q_{11} \quad (3.133)$$

$$B x_H = W$$

(3.131) dengeleme modeli eşitliğinde x , bilinmeyen parametreler ve Ω ise düzeltmelerin kareleri toplamı olmak üzere,

$$x = N^{-1} A^T P l \quad , \quad N = A^T P A \quad (3.134)$$

$$\Omega = (l - A x)^T P (l - A x) = v^T P v \quad (3.135)$$

eşitliklerine ulaşılır.

Dolaylı ölçüler dengelemesinin parametreleri ve bilinmeyenleri arasında koşul denklemleri bulunduğundan bahsedilmişti. Koşul denklemleri bulunan dolaylı ölçüler dengeleme modellerinin çözüm yollarından gidilerek, (3.133) eşitliklerinin yardımıyla x_H ve Ω_H parametreleri hesaplanır.

(3.134) ve (3.135) eşitlikleri de hesaplamalara katılırsa, H_0 hipotezinin etkisiyle de aşağıdaki üç eşitliğe ulaşılır:

$$x_H = x - N^{-1} B^T (B N^{-1} B^T)^{-1} (B x - w) \quad (3.136)$$

$$R = (B x - w)^T (B N^{-1} B^T)^{-1} (B x - w) \quad (3.137)$$

$$\Omega_H = \Omega + R \quad (3.138)$$

R büyüklüğü teknik ifadeyle, sıfır hipotezinin etkisiyle (3.131) eşitliğindeki ifadeler doğrultusunda bulunan Ω fonksiyonunda görülen değişim veya artım miktarıdır.

D : Datum defekti,

n : ölçü sayısı,

u : bilinmeyen sayısı,

f = n – u : serbestlik derecesi,

λ : dışmerkezlik parametresi olmak üzere,

(3.1) eşitliğinden elde edilecek Ω için χ^2 - dağılımı,

$$\frac{\Omega}{\sigma_o^2} = \frac{\Omega}{\sigma_o^2} \sim \chi^2(f, \lambda) \quad (3.139)$$

şeklinde oluşmaktadır. (3.131) modelinin doğru oluşturulduğu ve ölçülerin de normal dağılımlı olduğu durumlarda dış merkezlik parametresi sıfıra eşit olmaktadır ($\lambda=0$).

(3.137) eşitliğine göre değerlendirildiğinde R büyüklüğü için serbestlik derecesi h,

$$h = r_g (B N^{-1} B^T) \quad (3.140)$$

şeklinde ifade edilir. $E(Bx - w) = 0$, yani sıfır hipotezinin geçerli olduğu durumlarda R büyüklüğüne ilişkin dış merkezlik parametresi λ_H sıfıra eşit olmaktadır ($\lambda_H=0$). R büyüklüğü için χ^2 – dağılımı genel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\frac{\Omega_H}{\sigma_o^2} \sim \chi^2(f, \lambda_H) , \quad \frac{R}{\sigma_o^2} \sim \chi^2(h, \lambda_H) \quad (3.141)$$

Sıfır hipotezinin sağlanıp sağlanmadığını test etmek için birbirinden bağımsız χ^2 – dağılımlı (3.139) ve (3.141) eşitliklerinin sayısal büyüklüklerinin F-dağılımlı oranı test büyüklüğü olarak kullanılmaktadır:

$$F = \frac{R/h}{\Omega/f} \sim F(h, f, \lambda_H) \quad (3.142)$$

α yanılma olasılığı ise H_0 hipotezi için geçerli olan olasılık eşitliği aşağıdaki gibidir:

$$P(F > F_{h,f,1-\alpha}) = \alpha \quad (3.143)$$

F-dağılımı oranları, $1-\alpha$ istatistik güveni, h ve f serbestlik dereceleri için olması gereken sınır değerinden daha küçük çıktığı sürece doğrusal hipotez testi kabul edilir, aksi durumda doğrusal hipotez testi reddedilir.

3.8.1. Deformasyon Analizinde Doğrusal Hipotez Testi (Global Test)

Serbest dengeleme yapılan, birden fazla periyotta geometrisinin aynı kaldığı kabul edilen ve bilinmeyenlerinin arasında bir fonksiyonel ilişki olmadığı varsayılan bir jeodezik ağda,

t_1, t_2 : gözlemlerin yapıldığı zamanlar,

l_1, l_2 : t_1 ve t_2 anlarında yapılan gözlemlerden elde edilen ölçüler,

v_1, v_2 : t_1 ve t_2 anlarında yapılan gözlemlerden elde edilen ölçülere getirilecek düzeltmeler,

A_1, A_2 : t_1 ve t_2 anlarında yapılan gözlemlerden elde edilen ölçüler için oluşturulan fonksiyonel modeldeki katsayılar matrisleri,

x_1, x_2 : t_1 ve t_2 anlarında yapılan gözlemlerden elde edilen ölçülerin yapıldığı nokta koordinat bilinmeyenlerinin tahmini değerleri ise dengeleme modeli,

$$\begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (3.144.a)$$

Farklı periyot ölçüleri ile düzeltme denklemleri arasında korelasyon yoksa varyans-kovaryans matrisleri aşağıdaki şekilde ifade edilir,

$$C_{11} = \sigma_o^2 \begin{bmatrix} Q_{11} & 0 \\ 0 & Q_{22} \end{bmatrix} \quad (3.144.b)$$

“İki periyot arasında anlamlı nokta hareketi var mı?” sorusunu yanıtlamak, yapılan

global testin temel amacıdır. Bunun için iki periyotta da eşlenik noktaların koordinatlarının sabit kaldığını varsayan “ $H_0 : Bx = W$ ” doğrusal hipotezi aşağıdaki gibi şekillenir:

$$H_0 : \begin{bmatrix} -I & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E(x_1) \\ E(x_2) \end{bmatrix} = 0 \quad (3.145)$$

$B = \begin{bmatrix} -I & I \end{bmatrix}$, $w = 0$ eşitliklerine göre iki periyot için birbirinden bağımsız iki dengeleme yapılacaktır. Bu dengelemeler sonunda,

$$x_1 = Q_{x_1 x_1} A_1^T P_1 l_1 \quad , \quad Q_{x_1 x_1} = N_{11}^+ = (A_1^T P_1 A_1)^+ \quad (3.146)$$

$$x_2 = Q_{x_2 x_2} A_2^T P_2 l_2 \quad , \quad Q_{x_2 x_2} = N_{22}^+ = (A_2^T P_2 A_2)^+ \quad (3.147)$$

$$\Omega = v_1^T P_1 v_1 + v_2^T P_2 v_2 \quad , \quad (\text{kosul} : \sigma_{01}^2 = \sigma_{02}^2 = \sigma_0^2) \quad (3.148)$$

$$m_0^2 = \frac{\Omega}{f} \quad , \quad f = n_1 + n_2 - 2u + 2d \quad (3.149)$$

eşitlikleri elde edilir.

İki periyot arasındaki koordinat farkları, (3.145) doğrusal hipotezi ve (3.146) modelleri ile birlikte değerlendirildiğinde,

$$d = x_1 - x_2 \quad (3.150)$$

eşitliği ile ifade edilmekle birlikte iki periyot için ortak ağırlık katsayılar matrisi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$Q_{dd} = Q_{x_1 x_1} + Q_{x_2 x_2} \quad (3.151)$$

Bu ifadelerden sonra iki periyot arasındaki düzeltmelerin karesel toplamında oluşan artım miktarı,

$$R = d^T Q_{dd}^+ d \quad (3.152)$$

Serbest datum parametre sayısı ile ağ geometrisi iki periyot için de aynı olduğunda R'nin serbestlik derecesi,

$$h = r_g(Q_{x_1 x_1}) = r_g(Q_{x_2 x_2}) = u - d \quad (3.153)$$

olmaktadır. Buradan $H_0 : [-I \quad I] \begin{bmatrix} E(x_1) \\ E(x_2) \end{bmatrix} = 0$ doğrusal hipotezini test etmek için

$F = \frac{R/h}{\Omega/f} \sim F(h, f, \lambda_H)$ test büyüklüğü,

$$F = \frac{R/h}{\Omega/f} = \frac{d^T Q_{dd}^+ d}{m_o^2 h} \quad (3.154)$$

ifadeleriyle elde edilir. Elde edilen sayısal değer $P(F > F_{h,f,1-\alpha}) = \alpha$ olasılık eşitliği ile test edilir. (4.52) eşitliğinden çıkan sayısal sonuç (F), $F_{h,f,1-\alpha}$ test değerinden büyük çıkarsa ağda deformasyon olduğu anlaşılır.

$$\lambda_H = E \left[(Bx - w)^T (B N^{-1} B^T)^{-1} (Bx - w) / 2 \sigma_o^2 \right] \quad (3.155)$$

Dışmerkezlilik: Öngörülenden sapmadır.

3.8.2. Kapalı (İmplicit) Hipotez Testi

Dengeleme modeli içinde $H_0 : Bx = w$ değerlendirilmek istenirse, bu hipotezi de içeren dengeleme modeli aşağıdaki şekilde oluşur:

$$I + v_H = A_H x_H \quad (3.156)$$

Ölçülerin stokastik modeli de,

$$\Sigma_{II} = \sigma_o^2 Q_{II} \quad (3.157)$$

eşitliği ile gösterilebilir. Düzeltmelerin ağırlıklı karesel toplamı dengeleme sonucunda aşağıdaki şekli alır:

$$\Omega_H = (I - A x_H)^T P (I - A x_H) \quad ; \quad P = Q_{II}^{-1} \quad (3.158)$$

sıfır hipotezi içeren dengeleme modeli ile elde edilen düzeltmelerin ağırlıklı karesel toplamı ile geleneksel dengelemeden elde edilen düzeltmelerin ağırlıklı karesel toplamı arasındaki fark aşağıdaki gibi bulunur:

$$R = \Omega_H - \Omega \quad (3.159)$$

R'nin serbestlik derecesi,

f : ilk dengeleme modeli için serbestlik derecesi,

f_h : sıfır hipotezi ile harmanlanan dengeleme modeli için serbestlik derecesi ise,

$$h = f_h - f \quad (3.160)$$

3.8.3. İmplicit Hipotez Testinin Deformasyon Analizine Uygulanması (Kapalı Test)

Serbest dengeleme yapılan, birden fazla periyotta geometrisinin aynı kaldığı kabul edilen ve bilinmeyenlerinin arasında bir fonksiyonel ilişki olmadığı varsayılan bir jeodezik ağda,

t_1, t_2 : gözlemlerin yapıldığı zamanlar,

l_1, l_2 : t_1 ve t_2 anlarında yapılan gözlemlerden elde edilen ölçüler,

H_0 hipotezi : Ağda deformasyon olmadığını varsayan hipotez,

x_H : İki periyot için ortak nokta koordinat bilinmeyenlerinin tahmini değeri,

v_1, v_2 : t_1 ve t_2 anlarında yapılan gözlemlerden elde edilen ölçülere getirilecek düzeltmeler,

A_1, A_2 : t_1 ve t_2 anlarında yapılan gözlemlerden elde edilen ölçüler için oluşturulan fonksiyonel modeldeki katsayılar matrisleri ise iki periyot ölçüleri için dengelemenin fonksiyonel modeli aşağıdaki gibi olur:

$$\begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} x_H \quad (3.161)$$

Ω_H bu model için doğrudan Ω_H elde edilir.

İki periyot için dengeleme hesaplarına göre (3.144.a) eşitliği yardımı ile Ω_1 ve Ω_2 değerleri elde edilir. Buradan R büyüklüğü

$$R = \Omega_H - \Omega_1 - \Omega_2 \quad (3.162)$$

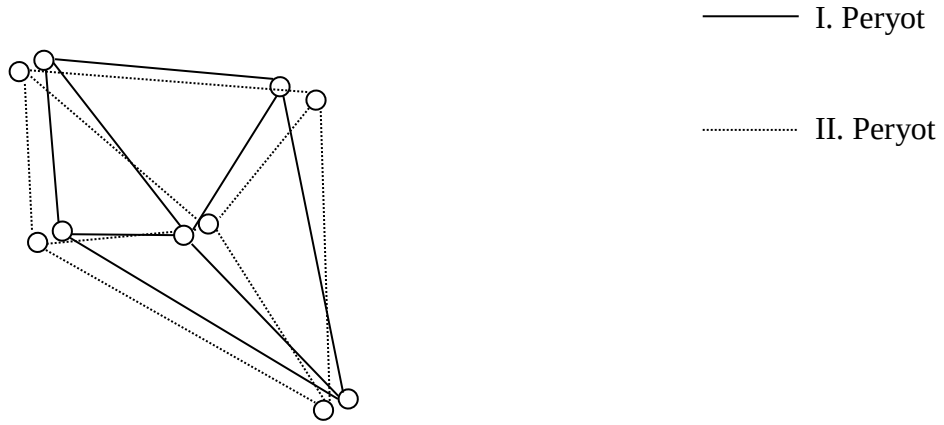
hesaplamalarda ihtiyaç duyulacak serbestlik dereceleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} f_H &= n_1 + n_2 - u + d \\ f_1 &= n_1 - u + d \\ f_2 &= n_2 - u + d \\ h &= f_H - f_1 - f_2 = u - d = r \end{aligned} \quad (3.163)$$

Bu hesaplamalardan elde edilen değerler yardımıyla (3.126) eşitliğinde bulunan test büyüklüğü yardımıyla deformasyon analizi tamamlanabilir. İmplist hipotez tezinde R büyüklüğü hesabı basit dengeleme programlarıyla yapılabildiğinden, bu hesaplama için özel hesaplama programlarına gerek yoktur. Fonksiyonel model defekt sayısı kadar sütun ile oluşturularak düzenli bir normal denklem katsayılar matrisi oluşturulur. Dengeleme sonucu Ω değişmez.

$$\begin{aligned} f &= n - r = n - (u - d) = n - u + d \\ u &\Rightarrow u - d \quad \rightarrow \quad f = u - d \end{aligned} \quad (3.164)$$

Yukarıda verilen eşitlikler ve anlatılanlar, ağ tasarımının iki periyot için de değişmediği varsayımı üzerine kurgulanmıştır.

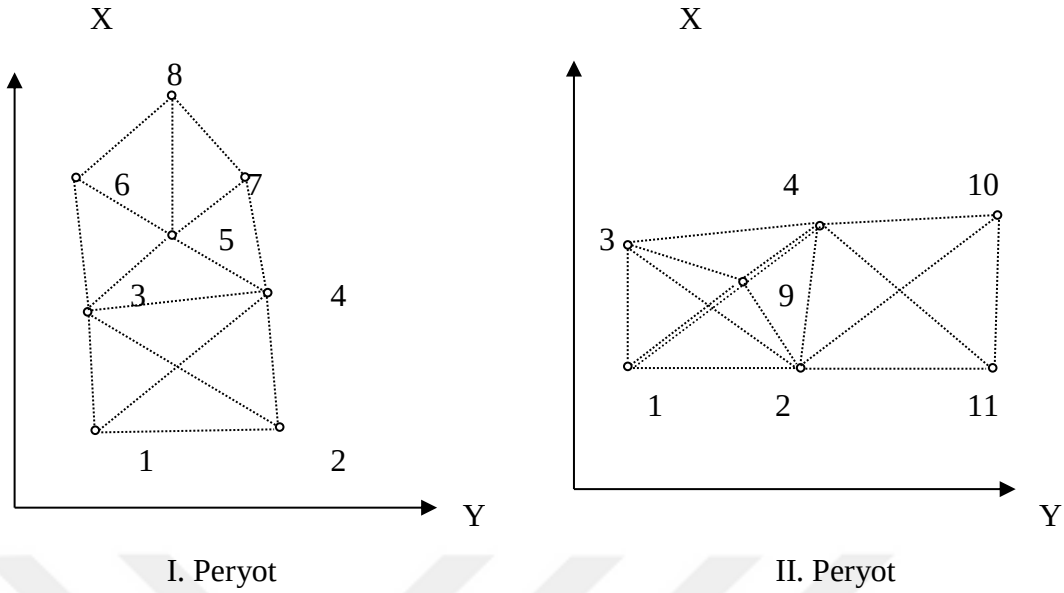


Şekil 3.1. İki periyotta eşlenik ağ konfigürasyonu

Eşlenik ağların zaman içerisinde herhangi bir değişikliğe uğrayıp uğramadığının analiz edilmesi global test ile ortaya çıkmaktadır. Global test yapıldıktan sonra jeodezik ağın herhangi bir yerinde bir anlamlı bir değişim olduğu sonucuna ulaşıldığında, bu aşamadan sonra sorulacak sorular, hangi noktanın hareket ettiğine yönelik olacaktır. Hangi noktanın anlamlı bir deformasyon içerdiği konusu da deformasyonların yerleştirilmesi (Lokalizasyon) adıyla isimlendirilecek işlemler topluluğu ile analiz edilecektir.

3.8.4. Ağ Konfigürasyonu Her İki Peryotta Eşlenik Değilse Global Test

Global test konusunda buraya kadar iki periyotta da jeodezik ağ tasarımının değişmediği varsayılararak anlatımlar yapılmıştır. Önceki bölümde ağ tasarımının her iki periyotta değişmediği varsayılmıştı. Fakat, uygulamada her zaman jeodezik ağın, deformasyon analizi süreci boyunca, bütün noktalarıyla varolması sağlanamamaktadır. Uygulamada bazı noktaların değişik sebeplerden dolayı ortadan kalkmasının yanında jeodezik ağın genişletilmesi ihtiyacı da hasıl olabilmektedir. Bu durumda ağ tasarımı otomatik olarak ortadan kalkmakta, iki periyottaki jeodezik ağlar tam anlamıyla eşlenik olmaktan çıkmaktadır. Böyle bir durumda eşlenik olmayan noktalar deformasyon analizi gözlemlerinden çıkarılmamakta, bütün noktalarda gözlem yapılmakta, ölçüler elde edilmektedir. Eşlenik olmayan noktalar hesaplama aşamasında değişik kurgularla dengeleme modelinden indirgeme işlemleri yardımıyla yok edilmektedir. Böylece dengeleme işlemlerinde sadece her iki periyot esnasında da var olan noktalar üzerinden hesaplamalar yapılmaktadır. Elde edilen indirgenmiş normal denklem sisteminde yalnızca bu eşlenik noktalar bulunmaktadır. Bu da otomatik olarak yapılan işlemi kısmi iz minimum dengeleme yöntemiyle eşdeğer yapmaktadır.



Şekil 3.2. Her iki epokta 1, 2, 3 ve 4 no'lu eşlenik noktalar

1, 2, 3, 4 noktaları datum noktası olmak üzere birinci periyot ölçüleri serbest dengelenir. Aynı şekilde ortak noktalar datum noktaları olmak kaydıyla ikinci periyot ölçüleri de serbest dengelenir. O halde her iki periyot dengelemeleri sonucunda küçültülmüş koordinat bilinmeyenleri vektörünün normu yani bilinmeyenlerin karelerinin toplamı ve ağırlık katsayıları matrisi köşegen elemanları toplamı yani ağırlık katsayıları matrisi izi minimum yapılmaktadır.

Ortak olmayan noktaların koordinat bilinmeyenlerinin iki periyot normal denklemlerinden de blok olarak yok edilmesi suretiyle, yalnızca ortak noktaların koordinat bilinmeyenlerinin oluşturduğu indirgenmiş normal denklemler yardımıyla ve tüm iz minimum dengeleme çözüm yöntemi kullanılarak da aynı sonuçlara ulaşılabilir.

x_D : Datuma giren koordinat bilinmeyenleri,

Q_{DD} : x_D bilinmeyenlerine karşılık ağırlık katsayıları matrisi olmak üzere,

Ağın eşlenik noktalarına global test uygulanabilmesi için aynı datumda tanımlanmış iki periyot ölçülerinin ayrı ayrı, kısmi iz minimum dengeleme yöntemiyle serbest dengelemesinin yapılmış olması gerekmektedir.

$x_{D_1}, (Q_{DD})_1$; $x_{D_2}, (Q_{DD})_2$: İki periyot için datum noktaları veya ortak noktalara ilişkin dengeleme sonuçları olmak üzere,

$$d_D = x_{D_1} - x_{D_2} \quad (3.165)$$

$$(Q_{dd})_D = (Q_{DD})_1 + (Q_{DD})_2 = (N_{DD}^+)_1 + (N_{DD}^+)_2 \quad (3.166)$$

eşitlikleri ortaya çıkar. Global test için artım miktarı aşağıdaki gibi ifade edilir :

$$R_D = d_D^T (Q_{dd})_D^+ d_D \quad (3.167)$$

d ağın defekt sayısı olmak üzere R_D 'nin serbestlik derecesi :

$$h_D = u_D - d \quad (3.168)$$

Test büyüklüğü :

$$F = R_D / m_0^2 h_D \quad (3.169)$$

olarak ortaya çıkar. Buradan deformasyon olduğu yönünde bir sonuç çıkarsa hangi noktanın deformasyonlu olduğu analizine geçilir.

3.9. S- Dönüşümü ile Yerelleştirme

Serbest dengeleme yöntemlerinden Zorlamasız (Klasik) yöntem, Kısmi iz minimum yöntemi ve Tüm iz minimum yöntemi ile yapılan dengelemelerde ağ geometrisinin değişmediği varsayılır. Üç farklı yöntemle ulaşılan sonuçlar bir S (similarity) matrisi ile birbirine dönüştürülebilir. Örnek olarak zorlamasız klasik dengeleme yöntemiyle yapılacak bir dengeleme için oluşturulan koordinat bilinmeyenleri vektörü ve bu vektöre ilişkin ağırlık katsayıları matrisi, tüm iz minimum veya kısmi iz minimum sonuçlarına, belirlenen bir datuma göre oluşturulacak S_g veya S_i matrisiyle dönüştürülebilir. Bu dönüşüm deformasyon analizlerinde kolaylık sağlayacaktır:

$$S_g = Q_g N = E - G(G^T G)^{-1} G^T \quad (3.170)$$

$$S_i = Q_i N = E - G(B_i^T G)^{-1} B_i^T \quad (3.171)$$

Herhangi bir datum (k datumu) için kısmi iz minimum sonuçlarına göre

küçültülmüş bilinmeyenler vektörünün x_k , ağırlık katsayıları matrisinin ise Q_k olduğunu varsayarak bu sonuçların tüm iz minimum yöntemine dönüştürülecek dengeleme sonuçları,

$$x_g = S_g x_k, Q_g = S_g Q_k S_g^T \quad (S_g = S_g^T) \quad (3.172)$$

eşitlikleri yardımıyla, k datumunda bulunan kısmi iz minimum dengeleme sonuçlarını i datumuna dönüştürmek gerekirse,

$$x_i = S_i x_k, Q_i = S_i Q_k S_i^T \quad (3.173)$$

eşitlikleri yardımıyla dönüştürülebilir. Bu dönüşümler, $S_g = Q_g N$, $S_i = Q_i N$, $N_{x_k} = n$ eşitlikleri, $N Q_g N = N$, $Q_g N Q_g = Q_g$, $N Q_i N = N$, $Q_i N Q_i = Q_i$, eşitlikleri dikkate alınarak doğrulanabilir.

S-Dönüşümünde datumu, eşlenik noktalar tanımlamaktadır. S-Dönüşümü ile yerelleştirmede ilke olarak her noktanın hareket edebileceği gerçeği üzerinden hareket edilir. İki periyot ölçümlerinde farklı sayıda nokta kullanılabilir, fakat; s-dönüşümleri dengeleme ve deformasyon analizi uygulamaları iki periyottaki ortak noktalar üzerinden yürütülür. S-dönüşümü uygulamalarında hesaplama işlemleri ortak nokta sayısı kadar, her nokta için tekrarlanır.

X_B : S-dönüşümünde, döngüde incelenen noktanın kordinatları,

X_F : S-dönüşümünde, döngüde incelenen noktanın haricindeki, sabit olduğu varsayılan diğer eşlenik noktaların kordinatları,

X_N : Eşlenik olmayan nokta koordinatları ve modeldeki diğer bilinmeyenler vektörü,

j : Serbest dengeleme sonucunda ortaya çıkan bilinmeyenler vektörü ise,

$$X^j = \begin{bmatrix} X_F^j \\ X_B^j \\ X_N^j \end{bmatrix} \quad \text{şeklinde ifade edilir.} \quad (3.174)$$

Her iki periyot için yapılması gereken s-dönüşümü aşağıdaki gibi olacaktır:

$$\begin{bmatrix} X_F^j \\ X_B \\ X_N \end{bmatrix} = s_i \begin{bmatrix} X_F^j \\ X_B^j \\ X_N^j \end{bmatrix} \quad (3.175)$$

$$s_i = I - G^T (B G^T)^{-1} B^T \quad (3.170), (3.171)$$

$$\begin{bmatrix} Q_{FF}^i & Q_{FB} & Q_{FN} \\ Q_{BF} & Q_{BB} & Q_{BN} \\ Q_{NF} & Q_{NB} & Q_{NN} \end{bmatrix} = s_i \begin{bmatrix} Q_{FF}^j & Q_{FB}^j & Q_{FN} \\ Q_{BF}^j & Q_{BB}^j & Q_{BN} \\ Q_{NF} & Q_{NB} & Q_{NN} \end{bmatrix} s_i^T \quad (3.176)$$

Yukarıdaki eşitliklerde bütün eşlenik noktaların katıldığı j datumu ile, hareketsiz kaldığı kabul edilen noktaları ifade eden i datumu arası geçiş dönüşümü anlatılmaktadır.

S-dönüşümü, yukarıda bahsedildiği üzere ilk önce datumu ifade eden eşlenik noktalardan birine sonra diğerine sırayla bütün noktalara uygulanır. Bu uygulama yapılırken her defasında deformasyon analizi yapılan noktanın ağırlığı sıfıra “0” eşitlenir. Bu uygulama il önce birinci periyot ölçülerine sonra ikinci periyot ölçülerine uygulanır. Jeodezik ağda hareketsiz kaldığı kabul edilen noktalara ilişkin fark vektörü d_F ,

$$d_F = (X_F^i)_2 - (X_F^i)_1 \quad (3.177)$$

sonuç matrisin ağırlık katsayıları matrisi,

$$Q_{FF} = (Q_{FF}^i)_1 + (Q_{FF}^i)_2 \quad (3.178)$$

elde edilir.

Sıfır hipotezi

$$H_o : E[(X_F^i)_1] = E[(X_F^i)_2] \quad (3.179)$$

Şeklinde varsayılırken, R büyüklüğü

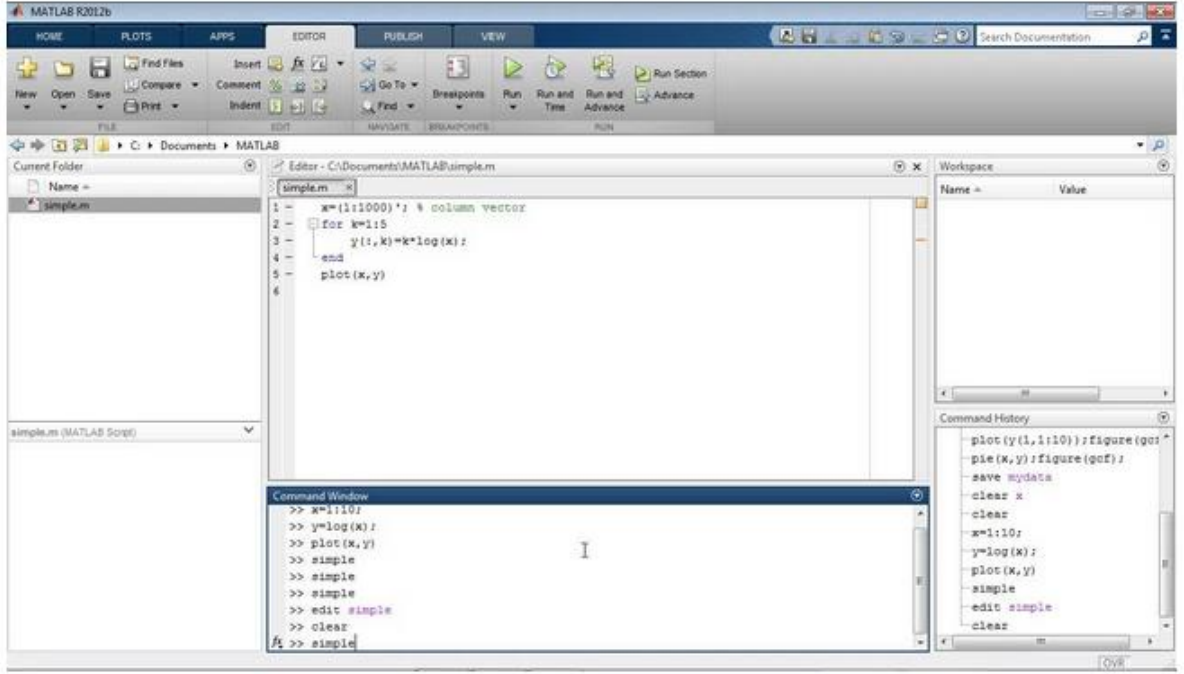
$$R_F = d_F^T Q_{FF}^+ d_F \quad (3.180)$$

olarak ortaya çıkar. Bu işlemler gözlem yapılan jeodezik ağdaki eşlenik nokta sayısı kadar tekrarlanır. Böylece ağdaki eşlenik nokta sayısı kadar R_F değeri elde edilir. Yukarıda bahsedildiği üzere her döngüde bir noktanın ağırlığının sıfır kabul edildiği, ağırlığı sıfır Kabul edilen noktanın o döngüde hareket edip edilmediğinin analizinin yapıldığından bahsedilmişti. Bu durumda ağırlığı sıfıra eşitlendiğinde en küçük R_F değeri elde edilen noktanın hareket ettiği kabul edilir. Bu test yapıp hareketli nokta tespit edildiğinde hareketli nokta dengeleme hesabından çıkartılmak suretiyle tekrar dengeleme hesabı yapılır. Tekrar anlamlı bir deformasyon olduğu sonucuna varılırsa S-dönüşümü tekrarlanır. Aynı şekilde diğer hareket eden nokta da tespit edilir.

3.10. Matlab Teknik Programlama Dili

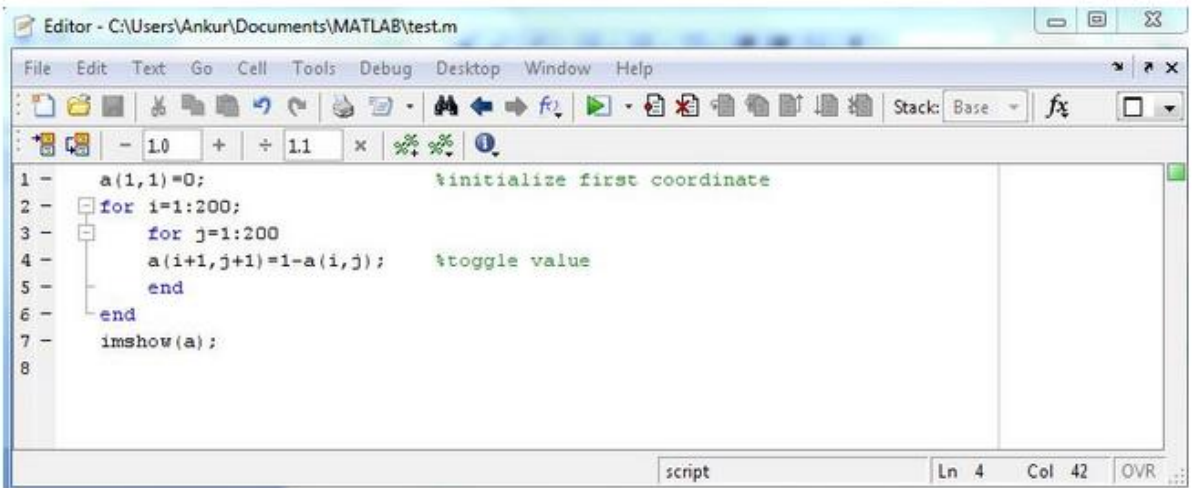
Matlab, teknolojinin ilerlemesi, pozitif bilimin bir çok işi bir arada ve çok kısa zamanda yapabilme kabiliyetine erişmesiyle, mühendislik biliminin teknolojiye verdiği tepkinin ürünü olan, pozitif bilim ve mühendislik hesaplamaları için kullanılan bir yazılım programıdır. Bu programın geliştiricisi, merkezi Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan Mathworks firmasıdır. İsmi İngilizce Matris (Matrix) ve Laboratuvar (Laboratory) kelimelerinden alan, matris temelli çalışma prensibine sahip bir program ve aynı zamanda programlama dilidir.

Matlab programında bir çok matematiksel işlemin kısa sürede tamamlanmasına olanak sağlayacak bir komut ekranı bulunmaktadır. Bu ekran aracılığıyla oluşturulacak programlama motorunun bütün komutlarının kullanıcı tarafından yazılacağı gibi program içinde tasarlanmış hazır komutlar da kullanılabilir.



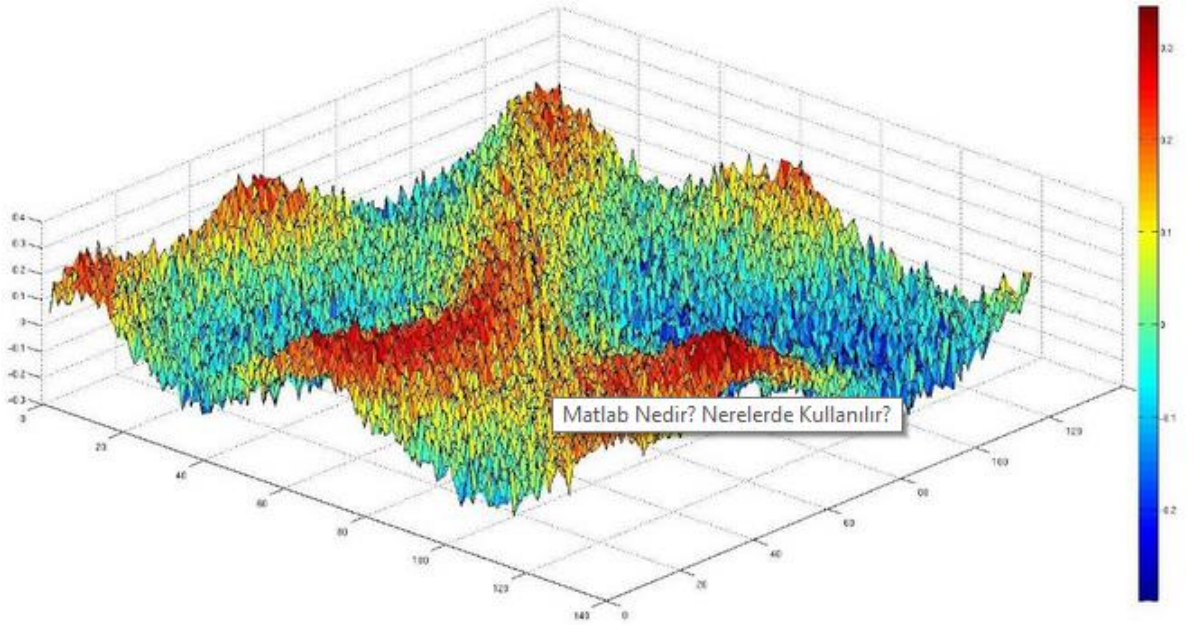
Şekil 3.3. Matlab yazılımı ana komut penceresi

Gerçek hayatta bir insan diğer bir insandan “...hava sıcaklığı 26 derecenin üstüne çıktığında klimayı 26 derecede çalıştır, hava sıcaklığı 26 derecenin altına indiğinde klimayı durdur...” isteğinde bulunur ve klimanın istediği koşullarda çalışmasını sağlayabilir. Bu durum teknoloji sayesinde klima dediğimiz sisteme kodlanmıştır ve bir tuşla bu işlev görülmektedir. Matlab programı da bu mantıkla düşünülürse daha rahat anlaşılabilir. Buradan hareketle Matlab programı ile çok basit dört işlemler yapılabileceği gibi daha karmaşık koşullu denklemler ile de çalışılabilir:



Şekil 3.4. Matlab yazılımını komut penceresi

Matlab programı temelde C ve Java dillerine benzese de bu program ile iki veya daha fazla boyutlarda matris çözümlerine olanak bulunmaktadır. Lineer cebir, istatistik, optimizasyon, nümerik analiz, fourier analizi ... vb. matematiksel hesaplamaların hızlı, etkili ve etkileşimli bir şekilde kullanılmasına olanak veren Matlab, iki ve üç boyutlu grafikler oluşturmak için de çok kullanışlıdır.

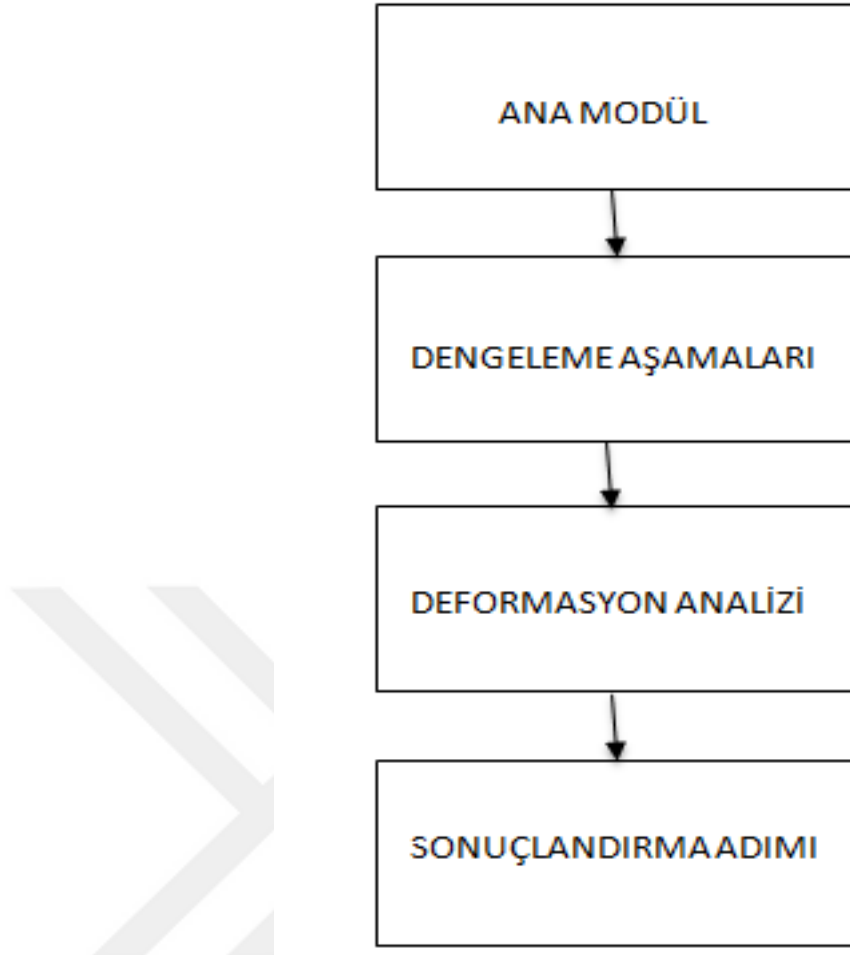


Şekil 3.5. Matlab yazılımı grafik çizim penceresi

3.11. Deformasyon Analizi Yapılacak Alan ile Ölçülerin Matlab Programına Tanıtılması ve İlişkilendirilmesi

Matlabın bir programlama dili olduğundan bahsetmiştik. Bu programlama dili, konumuzla alakalı olarak bir bölgede yapılacak deformasyon analizi hesaplamalarını robotlaştıracak ve birkaç saniye içinde bu bölgede anlamlı bir deformasyon olup olmadığını, var ise hangi noktada deformasyon olduğunu tespit edecektir. Robotlaştırma kelimesinden de her ne kadar bir makine refleksi anlaşılrsa da bu makinanın nasıl hareket edeceğini insanın yazacağı kodlar belirleyecektir.

İşlemlerin robotlaştırılması için matematiksel modellerin Matlab programına tanıtılması gerekmektedir. Programın çalışma prensibi çok genel olarak aşağıdaki gibidir:



Şekil 3.6. Deformasyon analizi iş-akış şeması

3.11.1.Ana Modül

Dengeleme işleminin yapılabilmesi için arazide yapılan çalışmalar sonrasında elde edilen yükseklik farkı ölçülerini programa tanıtılmalıdır yani kodlanmalıdır. Örneğin altı adet yükseklik farkının kodlanması.

$$h_1=[20.013;5.001;15.014;10.007;5.013;10.003]; \quad (3.181)$$

şeklinde yazılır. Dengeleme Tüm iz minimum yöntemiyle yapılacağı için bir noktanın yükseklik bilgisi sabit kabul edilmektedir.

$$x_{10}=100; \quad (3.182)$$

Ağ tasarlanır. Ölçü yolları belirlenir. Ölçü yollarına göre Ağ matrisi oluşturulur:

$$A_1=[-1 \ 1 \ 0 \ 0; 0 \ 1 \ -1 \ 0; -1 \ 0 \ 1 \ 0; 0 \ 1 \ 0 \ -1; 0 \ 0 \ 1 \ -1; -1 \ 0 \ 0 \ 1]; \quad (3.183)$$

Buradan hareketle sabit nokta ve ölçüler yardımıyla, yukarıdaki üç eşitlikte verilen örnek kodlamalar şeklinde dengeleme hesabı için kullanacağımız eşitliklerde bulunan bütün unsurların tanımlanması gerekmektedir.

Yukarıda bahsedilen kodlamalar bilinmeyenler, ölçüler, ölçü yolu uzunlukları ve birim uzunluk, ağ matrisi,...vb. unsurların belirlendiği alanlar, ana modül olarak değerlendirilebilir.

3.11.2.Dengeleme Aşamaları

Dengeleme aşaması, araziden elde edilen ölçülerin tüm iz minimum yöntemine göre dengelendiği alan olarak değerlendirilebilir. Bu bölümde normal denklemler, ağırlık katsayıları matrisi, dengeli ölçüler, küçültülmüş bilinmeyenler, düzeltme denklemlerinin kodlandığı ve sayısal sonuçlarının elde edildiği bölüm olarak tanımlanabilir:

$$N_1=A_1'*P_1*A_1; \quad (3.184)$$

$$n_1=A_1'*P_1*l_1; \quad (3.185)$$

$$G_1=[1/\sqrt{P}; 1/\sqrt{P}; 1/\sqrt{P}; 1/\sqrt{P}]; \quad (3.186)$$

$$Q_1=inv(N_1+G_1*G_1^T)-G_1*G_1^T; \quad (3.187)$$

$$xg_1=Q_1*n_1; \quad (3.188)$$

$$dy_1=x_1+xg_1/1000; \quad (3.189)$$

$$v_1=A_1*xg_1-l_1; \quad (3.190)$$

gibi ana eşitliklerle dengeleme hesapları bu bölümde yapılmaktadır. İstatistiksel testler de bu bölümde gerçekleştirilmektedir. İlk etapta her periyodun kendi içinde tüm iz minimum yöntemiyle dengeleme hesaplamalarını yapacak kodlar yazılır. Ardından uyuşumsuz ölçüler testi için gereken tanımlamalar MATLAB kodları şeklinde yazılır. İlk periyot ve sonrasındaki periyotların dengeleme hesaplarını ve uyuşumsuz ölçü testlerini

yapacak kodlamalar bitirildikten sonra periyotların birbiriyle istatistiksel anlamda eş olup olmadığını test edecek kodlar belirlenerek yazılır. Bu test varyans testidir.

Varyans testinin sonuna kadar olan bölümü dengeleme aşaması olarak tanımlayabiliriz. Buraya kadar yazılan kodlar dengeleme işlemlerinin tamamlanmasını sağlayacaktır.

3.11.3.Deformasyon Analizi Aşaması

Deformasyon analizi aşamasında, üzerinde çalışılan ağda anlamlı bir deformasyon olup olmadığını tespit edecek kodlamalar yapılır. Teknik olarak bu kodlar global test uygulamasını yürütmektedir. Bu aşamanın sonunda program ağda deformasyon vardır ya da yoktur demektedir.

$$F=RD/(soD*hD) \quad \%global \text{ test değeri} \quad (3.191)$$

$$FK=finv(0.95,3,6) \quad \%global \text{ test sınır değeri} \quad (3.192)$$

3.11.4.Sonuçlandırma Adımı

Diyagramdaki sonuçlandırma adımı teknik olarak s-dönüşümü yöntemi ile yerleştirme işlemine karşılık gelmektedir. Bu adımda birer birer noktaların ağırlıklarının sıfırlanarak ağdaki deformasyon değişim miktarının analizini yapacak kodlamalar yapılır. Her noktanın ağırlığı sıfırlandığında ağdaki deformasyon miktarı değişimini gözlemleyecek, diğer noktaların oluşturduğu ağın deformasyon miktarına göre ağırlığı sıfırlanılan noktanın deformasyonlu nokta olup olmadığını tespit edecek kodlamalar bu bölümde yazılır.

Uygulamada kullanılan kodlamalarla ilgili birkaç matlab görüntüsü aşağıda gösterilmektedir:

```

Editor - C:\Users\Deniz\Downloads\butunleme_2017_bahar.m

EDITOR PUBLISH VIEW
New Open Save Find Files Compare EDIT NAVIGATE Breakpoints Run Run and Time Run and Advance Run Section Advance
FILE BREAKPOINTS RUN

Unt.m x butunleme_2017_bahar.m x
5 %1. peryot dengelemesi
6 h1=[20.013;5.001;15.014;10.007;5.013;10.003];
7 x10=100;
8 x1=[x10;(x10+h1(1));(x10+h1(3));(x10+h1(6))];
9 hv1=[x1(2)-x1(1);x1(2)-x1(3);x1(3)-x1(1);x1(2)-x1(4);x1(3)-x1(4);x1(4)-x1(1)];
10 l1o=(h1-hv1);
11 l1=l1o*1000;
12 A1=[-1 1 0 0;0 1 -1 0;-1 0 1 0;0 1 0 -1;0 0 1 -1;-1 0 0 1];
13 So=1000;
14 S1=[1300;1310;1320;1600;1315;1330];
15 P1=zeros(6,6);
16 for i=1:length(S1);
17     P1(i,i)=So/S1(i);
18 end
Ln 1 Col 1

```

Şekil 3.7. Birinci periyot ölçülerinin matematiksel modeli

```

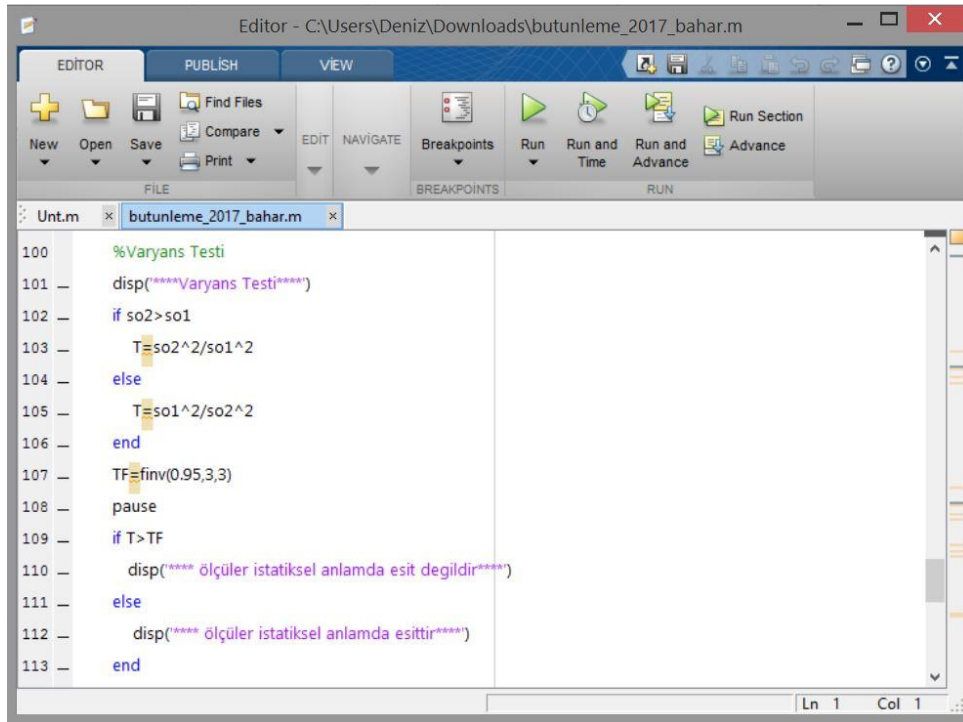
Editor - C:\Users\Deniz\Downloads\butunleme_2017_bahar.m

EDITOR PUBLISH VIEW
New Open Save Find Files Compare EDIT NAVIGATE Breakpoints Run Run and Time Run and Advance Run Section Advance
FILE BREAKPOINTS RUN

Unt.m x butunleme_2017_bahar.m x
115 % %Global Test
116 disp('*****')
117 disp('**** Global Test ****')
118 xd1=xg1;
119 xd2=xg2;
120 dD=xd1-xd2;
121 QD1=Q1;
122 QD2=Q2;
123 QdD=QD1+QD2;
124 RD=dD*pinv(QdD)*dD;
125 uD=4;def=1;hD=uD-def;
126 soD=((v1*P1*v1)+(v2*P2*v2))/(f1+f2);
127 F=RD/(soD*hD) %global test test deDeri
128 FK=finv(0.95,3,6) %global test sınır deDeri
Ln 1 Col 1

```

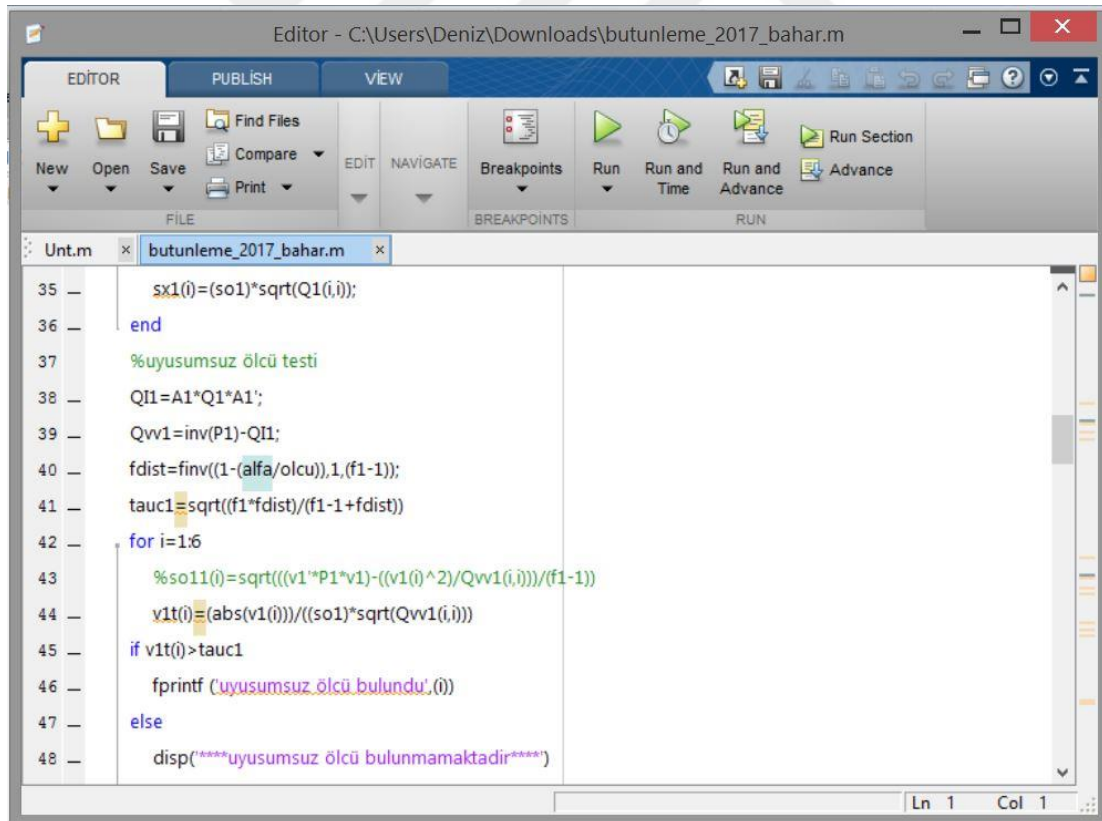
Şekil 3.8. Global test modeli



The screenshot shows the MATLAB Editor window with the file 'butunleme_2017_bahar.m' open. The code is as follows:

```
100 %Varyans Testi
101 disp('****Varyans Testi****')
102 if so2>so1
103     T=so2^2/so1^2
104 else
105     T=so1^2/so2^2
106 end
107 TF=finv(0.95,3,3)
108 pause
109 if T>TF
110     disp('**** ölçüler istatistiksel anlamda esit degildir****')
111 else
112     disp('**** ölçüler istatistiksel anlamda esittir****')
113 end
```

Şekil 3.9. Varyans test modeli



The screenshot shows the MATLAB Editor window with the file 'butunleme_2017_bahar.m' open. The code is as follows:

```
35 sx1(i)=(so1)*sqrt(Q1(i,i));
36 end
37 %uyusumsuz ölçü testi
38 QI1=A1*Q1*A1';
39 Qvv1=inv(P1)-QI1;
40 fdist=finv((1-(alfa/olcu)),1,(f1-1));
41 tauc1=sqrt((f1*fdist)/(f1-1+fdist))
42 for i=1:6
43     %so11(i)=sqrt(((v1'*P1*v1)-((v1(i)^2)/Qvv1(i,i)))/(f1-1))
44     v1t(i)=(abs(v1(i)))/((so1)*sqrt(Qvv1(i,i)))
45     if v1t(i)>tauc1
46         fprintf('uyusumsuz ölçü bulundu'.(i))
47     else
48         disp('****uyusumsuz ölçü bulunmamaktadır****')
```

Şekil 3.10. Uyuşumsuz ölçü testi

BÖLÜM 4

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Çanakkale Bölgesi ve Heyelanlar

4.1.1. Çanakkale Bölgesinin Genel Jeolojik Durumu

Çanakkale ili ve bazı ilçelerinde yer altı jeolojik yapısı hareketsiz kalma anlamında, bir süreklilik arz etmemektedir. Bu durum heyelan olasılığını arttırmakla beraber insanların yaşadığı kırsal ve kentsel alanlar ile bu alanların ulaşımını sağlayan karayolları gibi sürekli hareketli objelerin bulunduğu güzergâhlarda risk unsurlarını arttırmaktadır. Bu bağlamda Çanakkale İli heyelanlar açısından hareketli bir bölgedir. Bu hareketliliğin istatistiklere yansımamasının sebebi son yıllara kadar antropojenik etkilerin ortaya çıkmamış olmasıdır. Son birkaç yıla kadar inşaat anlamında ve sanayileşme anlamında sakin bir kent olmakla beraber, köprü planlamasıyla beraber Çanakkale'nin bu anlamda hareketlenmesi beklenmektedir. Son yıllarda meydana gelen şiddetli yağışların da bu artan hareketlilikte bir payı bulunmaktadır.

Çanakkale İlinde görülen heyelanların yüzeysel olmadığı bir gerçektir. Özellikle Biga yarımadası, deniz yüzeyine dik bir sondaj sütunu olarak incelendiğinde, heyelanların derin ve kapsamlı bir yapısı olduğu görülmektedir. Biga yarımadasının kaya sütununu iki önemli parçaya ayırabiliriz:

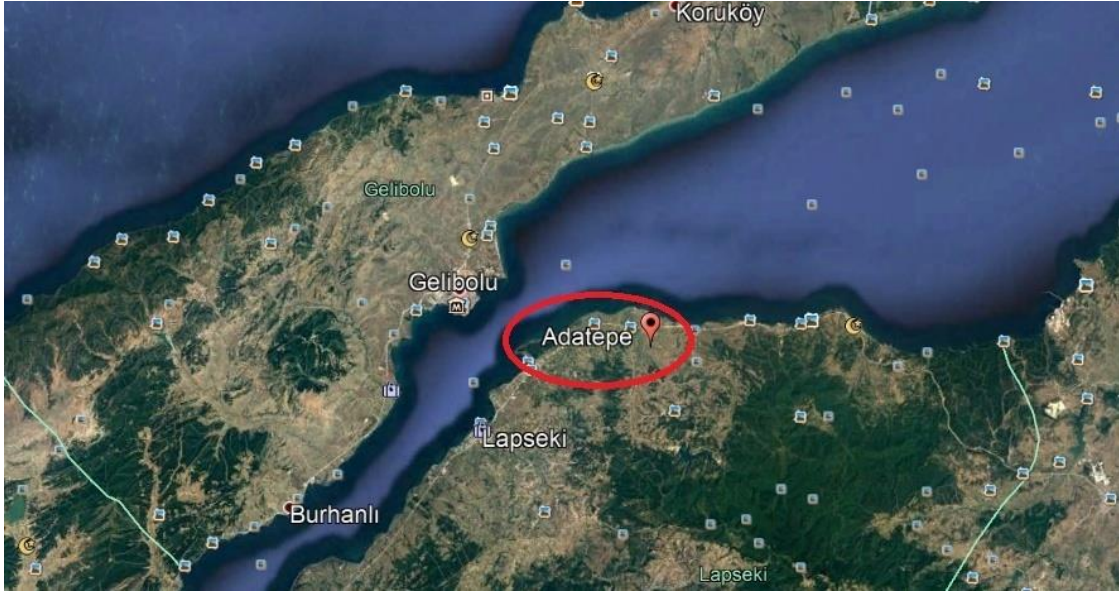
İlk zaman sonu, birinci zaman başı dönemde olduğu varsayılan bir temel,

Bu temelin üzerine miyosen devrinin başında olduğu varsayılan kaya örtüleri,

Yukarıda bahsedilen birinci grup kayalar katı bir temel oluştururken ikinci grup kayalar heyelana meyilli alanları meydana getirmektedir. Çok yavaş ve sürekli olduğu varsayılan bu hareketlilik miyosen kütlesinin en altından itibaren oluşmaktadır. 300-350 metre derinde olduğu kabul edilen miyosen kütlesinin en alt katmanında başlayan bu hareketliliğin durdurulmasının imkansız olduğu varsayımına göre yukarıdaki heyelan oluşumlarının durdurulması da mümkün görülmemektedir (Erenoglu ve ark., 2015) Bahsedilen geniş kapsamlı jeolojik sebepler, tarihsel jeomorfolojik oluşumların zamana bağlı gelişimine dayandırılmaktadır. Morfolojik gelişmelerin analizine dayanarak risk faktörünü dengelemeye çalışan bilim, insan eli ile uygulanan inşaat ve sanayi oluşumları karşısında çaresiz kalmakta, ancak oluşan hareketliliğin nasıl ilerleyeceği ve bu süreçte minimum kayıp için analizler yapabilmektedir. Çanakkale'nin ön görülen endüstriyel gelişimi, tarihsel ve bilimsel geçmişi olan Çanakkale heyelanlarının istatistiksel olarak gelişeceğinin de habercisidir.

4.1.2. Adatepe Heyelan Bölgesinin Tanımı

Adatepe Köyü, Biga yarımadasının kuzeyinde bulunmaktadır. Çanakkale İli, Lapseki İlçesinin bir Köyü olmakla beraber, Lapseki İlçesinden Biga İlçesi istikametinde 19. Kilometrede yer almaktadır. Biraz daha detaylı olarak, Çanakkale Bursa karayolu üzerinde, Çanakkale-Bursa İstikametinde, Lapseki İlçesi, Adatepe Köyü ile Şevketiye Köyü arasında, Adatepe Köyü'nü yaklaşık 2 km geçince yolun sağ tarafında bulunan, yaklaşık 150 metre ile 300 metrelik uzunlukların oluşturduğu, güneybatı kuzey doğu yönünde uzanan dikdörtgen bir alanda gerçekleştirilmiştir (Erenoglu ve ark., 2013) (Şekil 6.01).

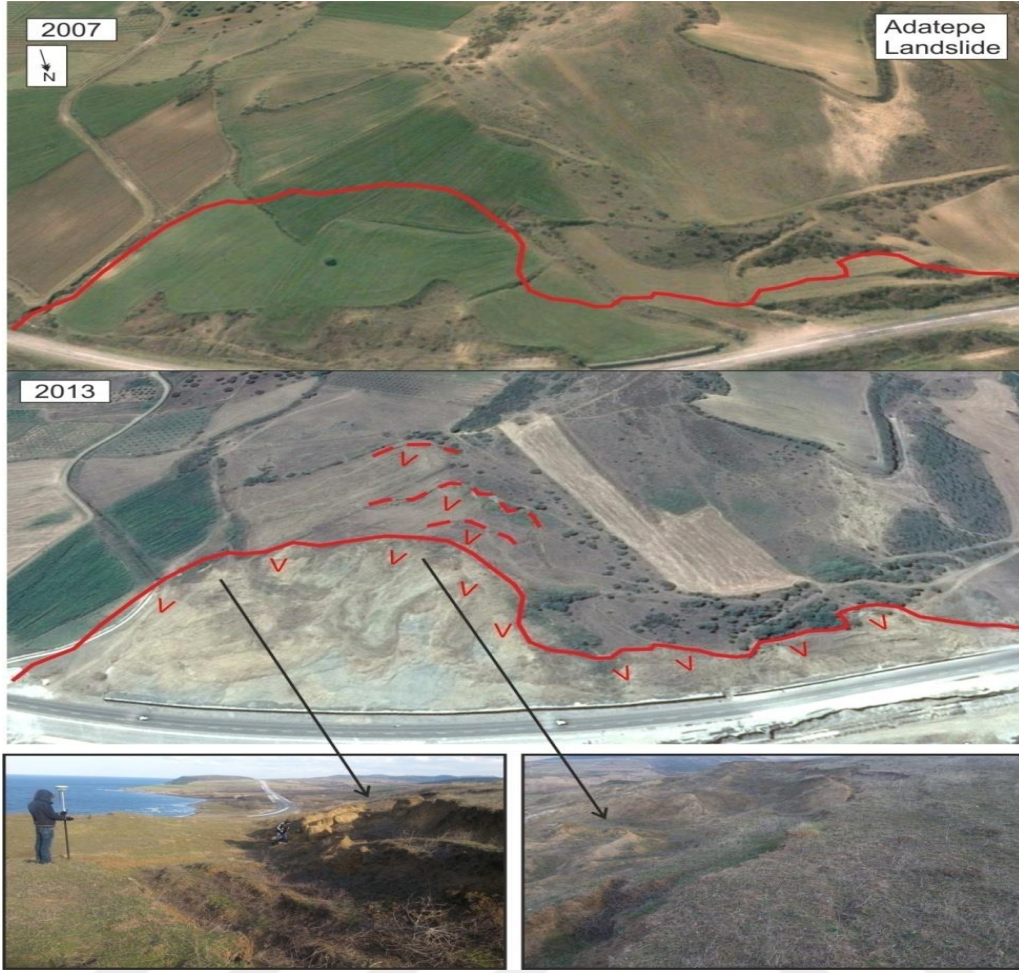


Şekil 4.1. Çalışma alanı

Heyelan bölgesi yaklaşık olarak $40^{\circ} 23' 43''$ Kuzey Paraleli ile $26^{\circ} 48' 50''$ Doğu Meridyeninin kesiştiği bölgede bulunmaktadır.

4.1.3. Adatepe Heyelan Bölgesinin Jeolojik Durumu

Jeolojik olarak genel olarak paleojen devrinin eosen serisinde oluşmuş kalıntılardan meydana gelmektedir. Bu sedimanlar genel olarak fıçı tepe formasyonu olarak adlandırılmaktadır. Bu formasyonların içinde bulunan kumtaşı ve çakıltası oluşumlarını 6-7 senelik bir zaman diliminde hareketlendiği gözlemlenmektedir (Şekil 6.02).



Şekil 4.2. Çalışma alanının uydu görüntüsü ve yersel fotoğraflardaki zamansal değişimi

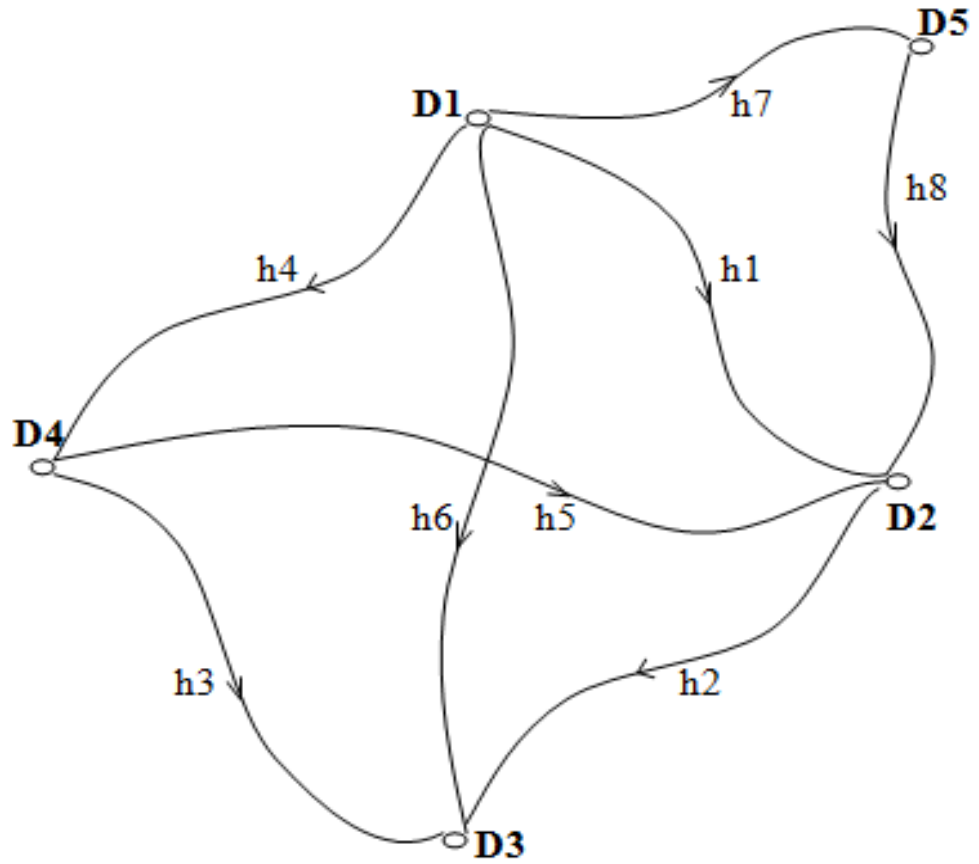
Şekil 4.2’de de görüldüğü gibi hareketlilik gözle görülebilmekte ve metre birimiyle tanımlanabilecek boyutlara ulaşmıştır. Heyelan hareketlerinin bulunduğu alanda fıçı tepe formasyonuna ait olan unsurların genelde mikalı ve fosilli kumtaşları ile çakıl taşlarını içerdiği gözlemlenmektedir. Alanda bulunan çakıl taşlarının jeolojik yapısını incelemeye yönelik yapılan kesi çalışmalarında çakıl taşlarının iyi çimentolanmamış olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumdan dolayı çakıl taşlarının ince kesitleri elde edilememiştir.

Kumtaşları üzerinde yapılan analizlerde, küçük ve orta boyutlardaki tanelerden oluşan kuvars minerallerinin, kumtaşlarının ana bileşenlerini oluşturduğu tespit edilmiştir. Bu kalıntıların ince kesitlerinde Ayrıca kuvars mineralleri ve mika minerallerinden elde edilen ince kesitlerin büyük bir kısmında pateojen devrinin eosen serisinin izlerine rastlanmıştır. Bu kayaçlar arasındaki zayıf çimento görevi gören kalsit, su ile çabuk etkileşerek kayaların kolay ayrışmasını ve hareket etmeleri kolaylaştırmaktadır

4.2. Uygulama

Yukarıda tanımı yapılan uygulama bölgesi için uygulamanın ilk safhasında bir istikşaf gerçekleştirilmiştir. Bu istikşafta tesis edilecek noktaların yer tayininde jeofiziksel testlerdende faydalanılmıştır. Elektrik öz direnç yöntemi ile yerin altındaki boşluklar ve sıvı seviyesi ile ilgili analizler gerçekleştirilmiştir. Bu sayede olası heyelan hareketlerini yansıtarak heyelan alanının karakteristik modellenmesine imkan sağlayacak nokta tesisi yapılacak yerlere karar verilmiştir.

Uygulama bölgesi toplam 5 deformasyon noktasından oluşmaktadır. Bu beş noktadan birisi birinci periyot ölçümleri tamamlandıktan sonra tesis edilmiş olup, ikinci epok gözlemlerinde ölçülere dahil olmuştur. Uygulama alanının şematik bir görünümü şekil 7.01’de gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Heyelan alanında tesis edilen nivelman ağı

Şekil 7.1’de Yukarıda nivelman yollarıyla beraber geometrisi verilen ağda D₁, D₂, D₃, D₄, D₅, deformasyon noktalarını, h₁, h₂, h₃, h₄, h₅, h₆, h₇, h₈, ise deformasyon ağda yapılan nivelman ölçülerini temsil etmektedir. Nivelman ağında iki epok ölçü yapılmış olup, ilk epokta D₁, D₂, D₃ ve D₄ deformasyon noktaları ölçüye katılmış, h₁=7.425 m, h₂=6.312 m,

$h_3=10.410$ m, $h_4=3.322$ m, $h_5=4.094$ m, $h_6=13.726$ m sonuçları, ikinci epokta ise D_1 , D_2 , D_3 , D_4 ve D_5 deformasyon noktaları ölçüye katılmış, $h_1=7.280$ m, $h_2=6.508$ m, $h_3=10.455$ m, $h_4=3.334$ m, $h_5=3.936$ m, $h_6=13.782$ m, $h_7= 2.018$ m, $h_8= 5.264$ m sonuçları elde edilmiştir. Ölçü yolu uzunlukları birinci ve ikinci epokta aşağıdaki gibi tespit edilmiştir:

$$S_1=S'_1=520 \text{ m}, S_2=S'_2=370 \text{ m}, S_3=S'_3=770 \text{ m}, S_4=S'_4=680 \text{ m}, S_5=S'_5=820 \text{ m}, S_6=S'_6=620 \text{ m}, S_7=S'_7=470 \text{ m}, S_8=S'_8=380 \text{ m}.$$

4.2.1. Periyot Dengelemeleri

Ağda D_1 deformasyon noktasının yaklaşık yüksekliği, $H_1=100$ m alınmıştır. İlk epokta 4 nokta arasında yapılan 6 ölçü olmasına rağmen, nivelman ağıma ikinci epokta bir nokta ve iki ölçü daha eklenmiştir. Bu durumda,

$$\begin{aligned} n_1 (\text{ölçü sayısı}) &= 6, \\ n_2 (\text{ölçü sayısı}) &= 8, \\ u_1 (\text{bilinmeyen sayısı}) &= 4, \\ u_2 (\text{bilinmeyen sayısı}) &= 5, \\ d (\text{her iki epok için datum defekti sayısı}) &= 1 \text{ olmak üzere,} \\ f_1 (\text{ağın serbestlik derecesi}) &= 3, \\ f_2 (\text{ağın serbestlik derecesi}) &= 4 \text{ 'dür.} \end{aligned}$$

Tüm iz minimum serbest dengeleme çözüm yönteminde nokta yüksekliklerinin tamamı bilinmeyen olarak kabul edilerek hazırlanan ve her iki epok tanımlamalarını içinde barındıran ikinci epok düzeltme denklemleri ile ağ matrisi aşağıdaki tabloda verilmiştir:

Çizelge 4.1 Dengelemenin katsayılar matrisi ve düzeltme denklemleri

Katsayılar matrisi	Düzeltilme denklemleri
$\begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$	$v_1 = -\delta_{x1} + \delta_{x2} + (x_{2,0} - x_{1,0} - h_1)$
	$v_2 = -\delta_{x2} + \delta_{x3} + (x_{3,0} - x_{2,0} - h_2)$
	$v_3 = \delta_{x3} - \delta_{x4} + (x_{3,0} - x_{4,0} - h_3)$
	$v_4 = -\delta_{x1} + \delta_{x4} + (x_{4,0} - x_{1,0} - h_4)$
	$v_5 = \delta_{x2} - \delta_{x4} + (x_{2,0} - x_{4,0} - h_5)$
	$v_6 = -\delta_{x1} + \delta_{x3} + (x_{3,0} - x_{1,0} - h_6)$
	$v_7 = -\delta_{x1} + \delta_{x5} + (x_{5,0} - x_{1,0} - h_7)$
	$v_8 = \delta_{x2} - \delta_{x5} + (x_{2,0} - x_{5,0} - h_8)$

Çizelge 4.2 Birinci ve ikinci ölçme epoklarına ilişkin bilinmeyenlerin ağırlık katsayıları ve küçültülmüş bilinmeyenler vektörleri

E pok no	Bilinmeyenlerin ağırlık matrisi	Küçültülmüş bilinmeyenler vektörü
1	$Q_1 =$ $\begin{bmatrix} 0.113 & -0.032 & -0.038 & -0.043 \\ \dots & 0.099 & -0.017 & -0.050 \\ \dots & \dots & 0.103 & -0.048 \\ \dots & \dots & \dots & 0.141 \end{bmatrix}$	$x_1 =$ $\begin{bmatrix} 4.758 \\ 0.144 \\ -1.569 \\ -3.333 \end{bmatrix}$
2	$Q_2 =$ $\begin{bmatrix} 0.094 & -0.015 & -0.035 & -0.044 & 0.034 \\ . & 0.084 & -0.020 & -0.049 & 0.040 \\ . & . & 0.103 & -0.048 & -0.027 \\ . & . & . & 0.141 & -0.047 \\ . & . & . & . & 0.247 \end{bmatrix}$	$x_2 =$ $\begin{bmatrix} 23.402 \\ -123.556 \\ 72.302 \\ 27.852 \\ -121.787 \end{bmatrix}$

Birinci periyot dengelemesi sonunda hesaplanan birim ağırlıklı ölçünün standart sapması $s_{01} = 5.9594$, ikinci periyot dengelemesi sonunda hesaplanan birim ağırlıklı ölçünün standart sapması $s_{02} = 5.7741$ olarak hesaplanmıştır.

4.2.2. İstatistiksel Testler

İki periyot ölçülerinin içinde uyumsuz ölçü olup olmadığının tespiti için pope testi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki tabloda gösterilmektedir:

Çizelge 4.3 Birinci ve ikinci ölçme epoklarına ilişkin uyumsuz ölçü testleri

Birinci Periyot			İkinci Periyot		
r	Ölçüle	Test Sınır Değeri	r	Ölçüle	Test Sınır Değeri
1	1.568	1.718	1	0.608	1.940
2	0.790		2	0.065	
3	0.573		3	1.202	
4	0.262		4	0.420	
5	0.842		5	1.620	
6	1.367		6	1.137	
			7	0.856	
			8	0.856	

Yukarıdaki tablodan da anlaşıldığı gibi yapılan gözlemlerden elde edilen ölçüler içinde uyumsuz ölçü bulunmamaktadır. Bu aşamadan sonra birinci periyot ve ikinci periyot gözlemlerinden elde edilen ölçülerinin standart sapmalarının istatistiksel anlamda eş olup olmadığı test edilir. Bu işlem teknik olarak varyans testi olarak isimlendirilir. Her iki epok için de birim ağırlıklı ölçülerin standart sapmalarından ulaşılan varyansların oranlanmasıyla elde edilecek olan varyans test büyüklüğünün varyans test değerine göre olan durumu iki periyottan elde elden iki standart sapmanın istatistiksel anlamda eşit olup olmadığını ortaya koymaktadır:

Birinci ve ikinci epok serbestlik dereceleri ve standart sapmaları doğrultusunda, $T=1.0652$ ve varyans testi sınır değeri $F = 6.5913$ olduğundan iki epok standart sapmaları istatistiksel anlamda eşit olarak kabul edilmektedir.

4.2.3. Global Test

Bu aşamada Uygulama alanında istatistiksel olarak anlamlı bir deformasyon olup olmadığı test edilmektedir. Yapılan hesaplamalar sonucu d matrisi,

$$d = \begin{bmatrix} -18.644 \\ 123.700 \\ -73.872 \\ -31.184 \end{bmatrix} \text{ olarak bulunmuştur. Ayrıca bu bölümde elde edilen global test değeri}$$

(F) 934.522 olarak elde edilmiş, global test sınır değeri (K) ise 4.347 olduğundan jeodezik

ağda iki periyot gözlemlerinden elde edilen ölçüler doğrultusunda istatistiksel olarak anlamlı bir deformasyon olduğu tespit edilmiştir.

4.2.4. S-Dönüşüm

S-Dönüşüm döngülerinde elde edilen matrislerden bazıları ve her döngü için global test sınır değerleri aşağıdaki gibidir:

S matrisi : Tüm iz minimum serbest dengeleme yöntemiyle elde edilen bilinmeyenler vektörü ve ağırlık katsayıları matrisini kısmi iz minimum serbest dengeleme yöntemi sonuçlarına dönüştürülmesini sağlayan dönüşüm matrisi,

Q matrisi : ağırlık katsayıları matrisini,

Q_D matrisi : S-Dönüşümünde ağırlığı sıfırlandırılan noktaları temsil eden satır ve sütunları sıfırlandırılmış birinci ve ikinci periyot ağırlık katsayıları matrislerinin toplamını,

X matrisi : Küçültülmüş bilinmeyenler matrisini,

D matrisi : İki periyottan elde edilen küçültülmüş bilinmeyenler vektörlerinin farkını temsil eden matris ise,

S-Dönüşümünün birinci döngüsünde ilk noktanın ve birinci epokta olmayan beşinci noktanın ağırlığı, yani jeodezik ağa etkisi sıfır kabul edilir ise birinci epok ve ikinci epok dönüşüm matrisleri, ağırlık katsayıları matrisleri ve fark matrisi aşağıdaki gibi düzenlenir:

$$SS1 = \begin{bmatrix} 1 & -0,333 & -0,333 & -0,333 \\ 0 & 0,667 & -0,333 & -0,333 \\ 0 & -0,333 & 0,667 & -0,333 \\ 0 & -0,333 & -0,333 & 0,667 \end{bmatrix}$$

$$QS1 = \begin{bmatrix} 0,177 & 0,021 & -0,022 & 0,001 \\ 0,021 & 0,103 & -0,060 & -0,043 \\ -0,022 & -0,060 & 0,119 & -0,059 \\ 0,001 & -0,043 & -0,059 & 0,102 \end{bmatrix}$$

$$SS2 = \begin{bmatrix} 1 & -0,333 & -0,333 & -0,333 & 0 \\ 0 & 0,667 & -0,333 & -0,333 & 0 \\ 0 & -0,333 & 0,667 & -0,333 & 0 \\ 0 & -0,333 & -0,333 & 0,667 & 0 \\ 0 & -0,333 & -0,333 & -0,333 & 1 \end{bmatrix}$$

$$QS2 = \begin{bmatrix} 0.149 & 0.011 & -0.028 & 0.017 & 0.090 \\ 0.011 & 0.099 & -0.062 & -0.037 & -0.011 \\ -0.028 & -0.062 & 0.118 & -0.056 & -0.041 \\ 0.017 & -0.037 & -0.056 & 0.093 & 0.051 \\ 0.090 & -0.011 & -0.041 & 0.051 & 0.283 \end{bmatrix}$$

Yine birinci döngüsünde ağırlığı, yani jeodezik ağa etkisi sıfır kabul edilen ilk ve birinci epokta olmayan beşinci noktaları temsil eden sütun ve satırlar yok edildiğinde iki periyot için ağırlık katsayıları matrisleri ve toplamı, küçültülmüş bilinmeyenler vektörleri ve farkları aşağıdaki gibi olur:

$$QSF1 = \begin{bmatrix} 0.177 & 0.021 & -0.022 \\ 0.021 & 0.103 & -0.060 \\ -0.022 & -0.060 & 0.119 \end{bmatrix}$$

$$QSF2 = \begin{bmatrix} 0.149 & 0.011 & -0.028 \\ 0.011 & 0.099 & -0.062 \\ -0.028 & -0.062 & 0.118 \end{bmatrix}$$

$$QDF = \begin{bmatrix} 0.326 & 0.032 & -0.050 \\ 0.032 & 0.202 & -0.121 \\ -0.050 & -0.121 & 0.237 \end{bmatrix}$$

$$XF1 = \begin{bmatrix} 0.192 \\ -1.521 \\ -3.285 \end{bmatrix}$$

$$XF2 = \begin{bmatrix} -164.741 \\ 31.117 \\ -13.334 \end{bmatrix}$$

$$DF = \begin{bmatrix} -164.934 \\ 32.638 \\ -10.049 \end{bmatrix}$$

S-Dönüşümünün ikinci döngüsünde ikinci noktanın ve birinci epokta olmayan beşinci noktanın ağırlığı, yani jeodezik ağa etkisi sıfır kabul edilir ise birinci epok ve ikinci epok dönüşüm matrisleri, ağırlık katsayıları matrisleri ve fark matrisi aşağıdaki gibi düzenlenir:

$$SS1 = \begin{bmatrix} 0.667 & 0 & -0.333 & -0.333 \\ -0.333 & 1 & -0.333 & -0.333 \\ -0.333 & 0 & 0.667 & -0.333 \\ -0.333 & 0 & -0.333 & 0.667 \end{bmatrix}$$

$$QS1 = \begin{bmatrix} 0.099 & -0.004 & -0.060 & -0.039 \\ -0.004 & 0.183 & -0.018 & 0.023 \\ -0.060 & -0.018 & 0.120 & 0.060 \\ -0.039 & 0.023 & 0.060 & 0.099 \end{bmatrix}$$

$$SS2 = \begin{bmatrix} 0.667 & 0 & -0.333 & -0.333 & 0 \\ -0.333 & 1 & -0.333 & -0.333 & 0 \\ -0.333 & 0 & 0.667 & -0.333 & 0 \\ -0.333 & 0 & -0.333 & 0.667 & 0 \\ -0.333 & 0 & -0.333 & -0.333 & 1 \end{bmatrix}$$

$$QS2 = \begin{bmatrix} 0.082 & -0.001 & -0.060 & -0.022 & 0.025 \\ 0.082 & 0.183 & -0.018 & 0.019 & 0.010 \\ -0.060 & -0.018 & 0.120 & -0.060 & -0.060 \\ -0.022 & 0.019 & -0.060 & 0.082 & 0.036 \\ 0.025 & 0.010 & -0.060 & 0.036 & 0.241 \end{bmatrix}$$

İkinci döngüde ağırlığı, yani jeodezik ağı etkisi sıfır kabul edilen ilk ve birinci epokta olmayan beşinci noktaları temsil eden sütun ve satırlar yok edildiğinde iki periyot için ağırlık katsayıları matrisleri ve toplamı, küçültülmüş bilinmeyenler vektörleri ve farkları aşağıdaki gibi olur:

$$XF1 = \begin{bmatrix} 4.235 \\ -2.093 \\ -3.856 \end{bmatrix}$$

$$XF2 = \begin{bmatrix} 47.503 \\ 96.403 \\ 51.952 \end{bmatrix}$$

$$DF = \begin{bmatrix} 43.268 \\ 98.496 \\ 55.809 \end{bmatrix}$$

$$QSF1 = \begin{bmatrix} 0.099 & -0.004 & -0.060 \\ -0.004 & 0.184 & -0.0184 \\ -0.060 & -0.0184 & 0.120 \end{bmatrix}$$

$$QSF2 = \begin{bmatrix} 0.082 & 0.001 & -0.060 \\ 0.001 & 0.183 & -0.018 \\ -0.060 & -0.018 & 0.120 \end{bmatrix}$$

$$QDF = \begin{bmatrix} 0.181 & -0.005 & -0.121 \\ -0.005 & 0.366 & -0.037 \\ -0.121 & -0.037 & 0.241 \end{bmatrix}$$

S-Dönüşümünün üçüncü döngüsünde üçüncü noktanın ve birinci epokta olmayan beşinci noktanın ağırlığı, yani jeodezik ağı etkisi sıfır kabul edilir ise birinci epok ve ikinci epok dönüşüm matrisleri, ağırlık katsayıları matrisleri ve fark matrisi aşağıdaki gibi düzenlenir:

$$SS1 = \begin{bmatrix} 0.667 & -0.333 & 0 & -0.333 \\ -0.333 & 0.667 & 0 & -0.333 \\ -0.333 & -0.333 & 1 & -0.333 \\ -0.333 & -0.333 & 0 & 0.667 \end{bmatrix}$$

$$QS1 = \begin{bmatrix} 0.0997 & -0.047 & 0.005 & -0.052 \\ -0.047 & 0.082 & -0.004 & -0.034 \\ 0.005 & -0.004 & 0.251 & -0.002 \\ -0.052 & -0.034 & -0.002 & 0.087 \end{bmatrix}$$

$$SS2 = \begin{bmatrix} 0.667 & -0.333 & 0 & -0.333 & 0 \\ -0.333 & 0.667 & 0 & -0.333 & 0 \\ -0.333 & -0.333 & 1 & -0.333 & 0 \\ -0.333 & -0.333 & 0 & 0.667 & 0 \\ -0.333 & -0.333 & 0 & -0.333 & 1 \end{bmatrix}$$

$$QS2 = \begin{bmatrix} 0.080 & -0.030 & 0.004 & -0.050 & 0.019 \\ -0.030 & 0.067 & -0.003 & -0.036 & 0.023 \\ 0.004 & -0.003 & 0.251 & -0.001 & 0.0004 \\ -0.050 & -0.036 & -0.001 & 0.086 & -0.043 \\ 0.019 & 0.023 & 0.0004 & -0.043 & 0.232 \end{bmatrix}$$

Üçüncü döngüde ağırlığı, yani jeodezik ağı etkisi sıfır kabul edilen üçüncü ve birinci epokta olmayan beşinci noktaları temsil eden sütun ve satırlar yok edildiğinde iki periyot

için ağırlık katsayıları matrisleri ve toplamı, küçültülmüş bilinmeyenler vektörleri ve farkları aşağıdaki gibi olur:

$$XF1 = \begin{bmatrix} 3.647 \\ -0.967 \\ -4.444 \end{bmatrix}$$

$$XF2 = \begin{bmatrix} 32.686 \\ -114.272 \\ 37.135 \end{bmatrix}$$

$$DF = \begin{bmatrix} 29.039 \\ -113.306 \\ 41.580 \end{bmatrix}$$

$$QSF1 = \begin{bmatrix} 0.0997 & -0.047 & 0.005 \\ -0.047 & 0.0818 & -0.004 \\ 0.005 & -0.004 & 0.251 \end{bmatrix}$$

$$QSF2 = \begin{bmatrix} 0.080 & -0.030 & 0.004 \\ -0.030 & 0.067 & -0.003 \\ 0.004 & -0.003 & 0.251 \end{bmatrix}$$

$$QDF = \begin{bmatrix} 0.180 & -0.078 & 0.009 \\ -0.078 & 0.149 & -0.006 \\ 0.009 & -0.006 & 0.502 \end{bmatrix}$$

S-Dönüşümünün dördüncü döngüsünde dördüncü noktanın ve birinci epokta olmayan beşinci noktanın ağırlığı, yani jeodezik ağa etkisi sıfır kabul edilir ise birinci epok ve ikinci epok dönüşüm matrisleri, ağırlık katsayıları matrisleri ve fark matrisi aşağıdaki gibi düzenlenir:

$$SS1 = \begin{bmatrix} 0.667 & -0.333 & -0.333 & 0 \\ -0.333 & 0.667 & -0.333 & 0 \\ -0.333 & -0.333 & 0.667 & 0 \\ -0.333 & -0.333 & -0.333 & 1 \end{bmatrix}$$

$$QS1 = \begin{bmatrix} 0.0997 & -0.047 & -0.052 & 0.005 \\ -0.047 & 0.082 & -0.034 & -0.004 \\ 0.005 & -0.034 & 0.087 & -0.002 \\ -0.005 & -0.004 & -0.002 & 0.251 \end{bmatrix}$$

$$SS2 = \begin{bmatrix} 0.667 & -0.333 & -0.333 & 0 & 0 \\ -0.333 & 0.667 & -0.333 & 0 & 0 \\ -0.333 & -0.333 & 0.667 & 0 & 0 \\ -0.333 & -0.333 & -0.333 & 1 & 0 \\ -0.333 & -0.333 & -0.333 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$QS2 = \begin{bmatrix} 0.080 & -0.030 & -0.050 & 0.004 & 0.019 \\ -0.030 & 0.067 & -0.036 & -0.003 & 0.023 \\ -0.050 & -0.036 & 0.086 & -0.001 & -0.043 \\ -0.004 & -0.003 & -0.001 & 0.251 & 0.0004 \\ 0.019 & 0.023 & -0.043 & 0.0004 & 0.232 \end{bmatrix}$$

Yine dördüncü döngüde ağırlığı, yani jeodezik ağı etkisi sıfır kabul edilen dördüncü ve birinci epokta olmayan beşinci noktaları temsil eden sütun ve satırlar yok edildiğinde iki periyot için ağırlık katsayıları matrisleri ve toplamı, küçültülmüş bilinmeyenler vektörleri ve farkları aşağıdaki gibi olur:

$$XF1 = \begin{bmatrix} 3.647 \\ -0.967 \\ -2.680 \end{bmatrix}$$

$$XF2 = \begin{bmatrix} 32.686 \\ -114.272 \\ 81.586 \end{bmatrix}$$

$$DF = \begin{bmatrix} 29.039 \\ -113.306 \\ 84.267 \end{bmatrix}$$

$$QSF1 = \begin{bmatrix} 0.0997 & -0.047 & -0.052 \\ -0.047 & 0.0818 & -0.034 \\ -0.052 & -0.034 & 0.087 \end{bmatrix}$$

$$QSF2 = \begin{bmatrix} 0.080 & -0.030 & -0.050 \\ -0.030 & 0.067 & -0.036 \\ -0.050 & -0.036 & 0.087 \end{bmatrix}$$

$$QDF = \begin{bmatrix} 0.180 & -0.078 & -0.102 \\ -0.078 & 0.149 & -0.071 \\ -0.102 & -0.071 & 0.173 \end{bmatrix}$$

Çizelge 4.4 S-Dönüşüm döngülerinin F global test değerleri ve F sınır değerleri sonuçları

S-Dönüşüm Döngü Sırası	F Test Değeri	F Sınır Değeri	Sonuç
1	881.1514	4.3468	Deformasyon vardır.
2	1.6586		Deformasyon yoktur.
3	27.1368		Deformasyon vardır.
4	27.1716		Deformasyon vardır.

S-Dönüşüm döngüleri sonunda elde edilen global test F değerleri sonuçlarından, ikinci döngüde deformasyon olmadığı anlaşılmaktadır. İkinci döngüde deformasyon olmadığı sonucu, ikinci döngüde deformasyonlu noktanın global test dışında kaldığını göstermektedir. İkinci döngüde dışarıda kalan nokta D_2 noktası hesaplamalara katılmadığına göre deformasyonlu nokta D_2 noktasıdır.

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER

Zamansal olarak kütle hareketinin sürekli olduğu aktif heyelanlarda hareketin büyüklüğü ve yönünün belirlenmesi önem arz etmektedir. Özellikle heyelan alanının taç bölgesinden topuk bölgesine kadar süregelen aktivitenin izlenerek yatay ve/veya düşey hızların kestirilmesi heyelan alanı ve çevresinin etkisi altına alabilecek tehditlerin belirlenmesini sağlamaktadır. Heyelanların izlenmesi için geliştirilen çok sayıda yöntem vardır. Bu yöntemlerin bazıları yersel yöntemle bazıları ise uydu tabanlı yöntemlerdir.

Heyelanların izlenmesi kapsamında sürekli veya kampanya tipi ölçmeler gerçekleştirilmektedir. Herbirinin kendine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Ancak deformasyonların yorumlanabilmesi için belirli zaman periyotlarında dikkate alınan ölçüler yardımıyla deformasyon analizlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada heyelan tipinin tanımlanması, bölgeyi kapsayan düşey kontrol ağı ölçümlerinin planlanması ve yapılması, bilimsel yazılımda deformasyon analiz modelinin oluşturulması ve sonuç olarak heyelan hakkında yorum yapılması hedeflenmiştir. Bu kapsamda, Çanakkale İli Adatepe Heyelanının yersel nivelman tekniği kullanarak izlenmesi ve deformasyon analizinin gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Çalışma alanında 5 noktada 2 periyotta gerçekleştirilen nivelman ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Nivelman ölçmeleri MATLAB yazılımı ile değerlendirilmiştir. Elde edilen bilinmeyenler vektörleri ve onların kofaktör matrisleri kullanılarak deformasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde periyotlar için yapılan noktasal anlamlı deformasyonlar elde edilmiştir.

Çalışma sonucunda;

Adatepe Heyelanındaki istatistiksel olarak anlamlı olan noktasal çökme ve yükselmelerin zamansal olarak izlenmesi için nivelman tekniği kullanılmıştır.

Tesis edilen mikro deformasyon nivelman izleme ağı iki epok gözlenmiştir (Kampanya tipi).

Söz konusu periyot tipi epoklardan bulunan nokta yükseklikleriyle elde edilen deformasyon analizi sonuçlarıyla heyelandaki anlamlı deformasyonlar saptanmıştır.

Ayrıca; bu tip çalışma alanlarında uzun zaman aralıklarını kapsayan mevsimsel etkinin heyelan kitle hareketi üzerindeki etkisinin giderilebilmesi için bir kaç yıllık periyot tipi ölçmelerin planlanması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Akgün A., Bulut F., 2007. GIS-based landslide susceptibility for Arsin-Yomra (Trabzon, North Turkey) region. *Environmental Geology*, 51, 1377-1387.
- Akgün A., Dağ S., Bulut F., 2008. Landslide susceptibility mapping for a landslide-prone area (Findikli, NE of Turkey) by likelihood frequency ratio and weighted linear combination models. *Environmental Geology*, 54, 1127-1143.
- Algül Emirhan "Gökçekaya Barajı'nda deformasyon araştırması / Emirhan Algül.
Ankara, 1983.
- Alkan M., 1995, Heyelan Ağaç İlişkisi Tartışmasında Geline Aşama, Türkiye İkinci Ulusal Heyelan Sempozyumu, Adapazarı, Bildiriler Kitabı, 35-44.
- Atasoy V., "Jeodezik Deformasyon Ölçmeleri ve Sonuçların Yorumu", Harita ve Kadastro Mühendisliği, ss.27-40, 1984
- AYAN T. "Jeodezik Ağlarda Deformasyon Analizine Genel Bakış", İTÜ Dergisi, Cilt 40, 1982.
- Baarda W., (1968). "A Testing Procedure for Use in Geodetic Networks", Publication on Geodesy, New series 2, No. 5, Netherlands Geodetic Commission, Delft.
- Baeza C., Corominas J., 2001. Assessment of Shallow Landslide Susceptibility by Means of Multivariate Statistical Techniques. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 1251-1263.
- Bayrak T. (2003) Heyelanlar İçin Bir Dinamik Deformasyon ve Bir Dinamik Hareket Yüzeyi Modelinin Oluşturulması.
- Brunner F. K., 1997, Continuous Monitoring of Deformation Using The Global Positioning System, *AvH Magazine*, 69, 29-38.
- Burchfiel B. C., Foster R. J., Keller E. A., 1982, *Physical Geology*, 43216, A Bell and Hovell Company, Colombus, Ohio,
- CROSS P.A., ŞAHİN M (1997). Applications of GPS in Modern Surveying, IV. Chamber of Surveying Congress, Conference Saloon of State Water Department, Ankara.

- Çan T., Nefeslioğlu H.A., Gökçeoğlu C., Sönmez H., Duman T.Y., 2005. Susceptibility Assessments of Shallow Earthflows Triggered by Heavy Rainfall at Three Catchments by Logistic Regression Analyses. *Geomorphology*, 72, 250-271.
- Dağ S. ve Bulut F (2012). Coğrafi Bilgi Sistemleri Tabanlı Heyelan Duyarlılık Haritalarının Hazırlanmasına Bir Örnek: Çayeli (Rize, KD Türkiye).
- Dağ S., Bulut F., Akgün, A., 2006. İki Değişkenli İstatistiksel Analiz Yöntemi ile Çayeli (Rize) ve Çevresindeki Heyelanların Değerlendirilmesi. 1. Heyelan Sempozyumu, Trabzon, Bildiriler Kitabı, 84.
- Dağ S., 2007. Çayeli (Rize) ve Çevresinin İstatistiksel Yöntemlerle Heyelan Duyarlılık Analizi. (Doktora Tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.
- Demirel H., 1993, Deformasyon Ölçülerinin Analizi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Lisansüstü Ders Notu, İstanbul
- Demirel H., 2005, Dengeleme Hesabı, Y.T.Ü. Basım – Yayın Merkezi, 2. Baskı.
- Donati L., Turrini M.C., 2002. An Objective Method to Rank the Importance of the Factors Predisposing to Landslides with the GIS Methodology: Application to an Area of the Apennines (Valnerina; Perugia, Italy). *Engineering Geology*, 63, 277-289.
- Ercanoğlu M., Gökçeoğlu C., 2002. Assessment of Landslide Susceptibility for a Landslide-Prone Area (North of Yenice, NW Turkey) by Fuzzy Approach. *Environmental Geology*, 41, 720-730.
- Erdoğan B (2011). Deformasyon Analizi Güvenilirliğinin Farklı Yöntemler için Araştırılması (Doktora Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Erenoğlu R.C., Akçay Ö., Şengül E., Komut T., Erenoğlu O., 2013. Monitoring of Landslides using Geomatics and Geophysical Methods: The First Findings from Sevketiye Landslide, Canakkale, NW Turkey. *International Symposium on Modern Technologies, Education and Professional Practice in Geodesy and Related Fields*, Sofia, Bulgaristan, 8-9 Kasım.
- Erenoğlu O., Erenoğlu R.C., Akçay Ö., 2015. Geological and Geomorphological Characterizations of Landslides on The Coast of The Biga Peninsula (Çanakkale,

- Nw Turkey). European Geosciences Union General Assembly 2015, Viyana, Avusturya, 12-17 Nisan
- Gökçeoğlu C., Aksoy H., 1996. Landslide Susceptibility Mapping of the Slopes in the Residual Soils of the Mengen Region (Turkey) by Deterministic Stability Analyses and Image Processing Techniques. *Engineering Geology*, 44, 147-161.
- Lee C.F., Ye H., Yeung M.R., Shan X., Chen G., 2001. A GIS-Based Methodology for Natural Terrain Landslide Susceptibility Mapping in Hong Kong. *Episodes*, 24 (3),150-159.
- Nefeslioğlu H.A., Gökçeoğlu C., Sönmez H., 2008. An Assessment on the Use of Logistic Regression and Artificial Neural Networks with Different Sampling Strategies for the Preparation of Landslide Susceptibility Maps. *Engineering Geology*, 97, 171-191.
- Önalp A., 1991, Doğu Karadeniz Bölgesi Heyelanları – Nedenleri, Analizi ve Kontrolü,
- Pope A.J., (1976). *The Statistics of Residuals and the Outlier Detection*, J. & Sons, N. Y.
- Yalçın A., Bulut F., 2007. Landslide Susceptibility Mapping using GIS and Digital Photogrametric Techniques; a Case Study from Ardeşen (NETurkey). *Natural Hazard*, 41, 201-226.
- Yalçın A., 2008. GIS-based Landslide Susceptibility Mapping using Analytical Hierarchy Process and Bivariate Statistics in Ardesen (Turkey): Comparisons of Results and Confirmations. *Catena*, 72, 1-12.
- Yeşilnacar E., Topal T., 2005. Landslide Susceptibility Mapping: A Comparison of Logistic Regression and Neural Networks Methods in a Medium Scale Study, Hendek Region (Turkey). *Engineering Geology*, 79, 251-266.
- Yılmaz I., 2009. A Case Study from Koyulhisar (Sivas-Turkey) for Landslide susceptibility mapping by Artificial Neural Networks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 68 (3), 297-306.
- Zezere J. L., Ferreira A. B., Rodrigues M. L., 1999/1, Landslides in the North of Lisbon Region (Portugal): Conditioning and Triggering Factors, *Phys. Cem. Earth (A)*, Vol 24, No. 10, 925-934.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Deniz TAYFUR

Doğum Yeri : ÇANAKKALE

Doğum Tarihi : 19.02.1981

EĞİTİM DURUMU

Lisans Öğrenimi : Yıldız Teknik Üniversitesi / İnşaat Fakültesi / Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği

Yüksek Lisans Öğrenimi : Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi / FBE

Coğrafi Bilgi Teknolojileri Anabilim Dalı

Bildiği Yabancı Diller : İngilizce

BİLİMSEL FAALİYETLERİ

Bildiriler -Ulusal : Tayfur D., Erenoğlu R.C., "Heyelanların Zamansal Olarak İzlenebilmesi İçin MATLAB Tabanlı Jeodezik Deformasyon Analizi Yazılımı Geliştirilmesi", 16. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara, Türkiye, 03-06 Nisan 2017.

İŞ DENEYİMİ

Çalıştığı Kurumlar ve Yıl :

HARKAP Harita Planlama - 2003-2005

Açı Harita Planlama - 2006-2008

Harkap Harita Planlama – 2008-2009

Çanakkale İl Özel İdaresi - 2009- Halen

İLETİŞİM

E-posta Adresi : deniz.tayfur@gmail.com