

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOLGU TIPLI BARAJLARDA DÜŞEY DEĞİŞİMLERİN  
HASSAS TRİGONOMETRİK NİVELMAN YÖNTEMİYLE  
BELİRLENMESİ ÜZERİNE BİR İNCELEME**

**Jeodezi ve Fotogrametri Müh. Filiz TURAN**

**FBE Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Anabilim Dalı Geomatik Programında  
Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. R. Gürsel HOŞBAŞ**

**İSTANBUL, 2007**

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	iv
KISALTIMA LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
ÖNSÖZ.....	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. BARAJLAR.....	2
2.1 Genel Tanımlar.....	2
2.2 Baraj Tipleri.....	2
2.2.1 Gövde Yapısına Göre Barajlar.....	2
2.2.1.1 Beton Barajlar.....	2
2.2.1.2 Dolgu Barajlar.....	4
3. DEFORMASYON ÖLÇMELERİ.....	7
3.1 Deformasyon Ölçmelerinde Genel Tanımlar.....	7
3.2 Deformasyon Ölçmelerinin Uygulama Alanları.....	7
3.3 Deformasyon Ölçmelerinin Gelişim Süreci.....	8
3.4 Deformasyon Modelleri.....	10
3.4.1 Statik Model.....	10
3.4.2 Kinematik Model.....	10
3.4.3 Dinamik Model.....	11
3.5 Jeodezik Yöntemlerle Deformasyon Ölçmeleri.....	12
3.5.1 Yatay Yöndeki Deformasyonların Belirlenmesinde Uygulanan Yöntemler.....	13
3.5.1.1 Hassas Poligon Yöntemi.....	13
3.5.1.2 Jeodezik Kontrol Ağları Yöntemi.....	13
3.5.1.3 Aliynman Yöntemi.....	17
3.5.2 Düşey Yöndeki Deformasyonların Belirlenmesinde Uygulanan Yöntemler.....	18
3.5.2.1 Hassas Geometrik Nivelman Yöntemi.....	18
3.5.2.2 Hassas Trigonometrik Nivelman Yöntemi.....	21
3.5.2.3 Hidrostatik Nivelman Yöntemi.....	29
4. DEFORMASYON ÖLÇÜLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	33

4.1	Dolaylı Ölçüler Dengelemesi .....	33
4.2	Serbest Ağ Dengelemesi .....	34
4.2.1	Tüm İz Minimum Çözümü .....	35
4.2.2	Kısmi İz Minimum Çözümü .....	36
4.2.3	Klasik Dengeleme .....	37
4.2.4	S – Dönüşümü .....	37
4.3	Nivelman Ağlarında Duyarlık ve Güven Ölçütleri .....	38
4.3.1	Nivelman Ağlarında Duyarlık Ölçütleri .....	38
4.3.1.1	Model Hipotezinin Testi .....	39
4.3.1.2	Genişletilmiş Modelin Testi .....	40
4.3.1.3	Dengeli Yükseklik Farklarının Bağlı Hataları .....	42
4.3.2	Nivelman Ağlarında Güven Ölçütleri .....	43
4.3.2.1	İç Güven Ölçütü .....	43
4.3.2.2	Dış Güven Ölçütü .....	45
5.	DEFORMASYON ÖLÇÜLERİNİN ANALİZİ .....	47
5.1	Deformasyon Analizinde Kullanılan Değerlendirme Yöntemleri .....	47
5.1.1	Analitik Yöntem ile Deformasyon Analizi .....	47
5.1.2	Bağlı Güven Elipsleri (Karlsruhe Yaklaşımı) ile Deformasyon Analizi .....	47
5.1.2.1	Matematiksel Modelin Kurulması .....	48
5.1.2.2	Referans Noktalarının Belirlenmesi .....	48
5.1.2.3	Deformasyonların Yerelleştirilmesi .....	49
5.1.2.4	Deformasyonların Grafik Yorumu .....	51
5.1.3	Ortalama Aykırılıklar Yöntemi (Hannover Yaklaşımı) ile Deformasyon Analizi .....	52
5.1.3.1	Matematiksel Modelin Kurulması .....	52
5.1.3.2	Test İstatistiğinin Oluşturulması .....	53
5.1.3.3	Referans Noktalarının Belirlenmesi .....	55
6.	UYGULAMA .....	57
6.1	Pabuçdere Barajı'nın Tanıtılması .....	57
6.2	Pabuçdere Barajı Jeodezik Kontrol Ağının Tanıtılması .....	59
6.3	Jeodezik Kontrol Ağındaki Ölçmeler .....	60
6.4	Yükseklik Verilerinin Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi .....	61
6.4.1	Yükseklik Verilerinin Değerlendirilmesi .....	61
6.4.1.1	Hassas Geometrik Nivelman Verilerinin Dengelenmesi .....	62
6.4.1.2	Hassas Trigonometrik Nivelman Verilerinin Dengelenmesi .....	63
6.4.2	Dengeleme Sonuçlarının Analizi .....	65
6.4.2.1	Hassas Geometrik Nivelman Dengelemesi Sonuçlarının Analizi .....	65
6.4.2.2	Hassas Trigonometrik Nivelman Dengelemesi Sonuçlarının Analizi .....	71
6.5	Sonuçların Grafik Gösterimi .....	77
7.	SONUÇLAR .....	91
	KAYNAKLAR .....	94
	ÖZGEÇMİŞ .....	96

## SİMGE LİSTESİ

A	Katsayılar Matrisi
$A_y$	Bozucu parametrelerin katsayılar matrisi
$c_i$	Sıfır noktası düzeltmesi
d	Fark vektörü
E	Birim matris
f	Serbestlik derecesi
hk	Yerin küreselliğinin etkisi
hr	Refraksiyon etkisi
H	Yükseklik
$H_0$	Sıfır Hipotezi
k	Kırılma katsayısı
$K_{yy}$	Bozucu parametrelerinin varyans-kovaryans matrisi
$l_i$	Skalada okunan yükseklik
$m_0$	Birim ağırlıklı ölçünün karesel ortalama hatası
n	Ölçü sayısı
N	Normal denklem katsayılar matrisi
$P^{-1}$	Ölçülerin ters ağırlık matrisi
r	Fazla ölçü sayısı (redundanz)
R	Dünyanın yarıçapı
$R'$	Işın yayının yarıçapı
S	Uzunluk
Q	Dengelenmiş ölçülerin ağırlık katsayıları matrisi
$Q_{yy}$	Bozucu parametrelerin ters ağırlık matrisi
T	Test büyüklüğü
u	Bilinmeyen sayısı
$W_i$	Sıvı yüzeyi yüksekliği
$x_g$	Koordinat bilinmeyenleri vektörü
x	Küçültülmüş koordinat bilinmeyenleri
v	Düzeltilme
Y	Bozucu parametreler
Z	İşaret tepesine indirgenmiş zenit açısı
$Z'$	Ölçülen zenit açısı
$\Delta H$	Yükseklik farkı
$\Delta l$	Sistematik ölçü hataları vektörü
$u_g$	Bozucu parametre sayısı
$\sigma_T$	Nokta konum hatası
$1-\alpha_0$	İstatistik güven
$\alpha$	Yanılma olasılığı
$\theta$	Ortalama aykırılık
$\delta_{0i}^2$	Dış güven ölçütü

## **KISALTMA LİSTESİ**

GAP Güneydoğu Anadolu Projesi

ICOLD International Commision on Large Dams (Uluslararası Büyük Barajlar Komitesi)

## ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	Beton ağırlık barajı örneği.....	3
Şekil 2.2	Beton kemer baraj örneği .....	4
Şekil 2.3	Kaya dolgu baraj örneği .....	5
Şekil 3.1	Jeodezik kontrol ağı örneği .....	14
Şekil 3.2	Pilye olarak tesis edilmiş kontrol noktaları .....	15
Şekil 3.3	Barajlarda kullanılan hedef işareti.....	16
Şekil 3.4	Hassas geometrik nivelmanda ölçme düzeni .....	19
Şekil 3.5	Tek taraflı ölçmelerle trigonometrik nivelman .....	22
Şekil 3.6	Sıçramalı ölçmelerle trigonometrik nivelman.....	25
Şekil 3.7	Üzerine reflektör yerleştirilmiş elektronik takeometre .....	26
Şekil 3.8	Karşılıklı gözlemlerle iki nokta arasındaki yükseklik farkının belirlenmesi .....	26
Şekil 3.9	Açık ve kapalı su düzeyleri .....	30
Şekil 3.10	Hidrostatik nivelman prensibi .....	31
Şekil 6.1	Pabuçdere Barajı'nın konumu.....	57
Şekil 6.2	Pabuçdere Barajı.....	58
Şekil 6.3	Pabuçdere Barajı yatay konum ağı ve ölçü planı .....	59
Şekil 6.4	Pabuçdere Barajı düşey konum ağı ve ölçü planı.....	59
Şekil 6.5	TC2002 elektronik takeometresi .....	60
Şekil 6.6	WILD NAK2 otomatik nivosu .....	60
Şekil 6.7	Pabuçdere Barajı düşey kontrol ağı.....	78
Şekil 6.8	Haziran 2003-Eylül 2003 geometrik nivelman tek nokta hareketleri .....	79
Şekil 6.9	Eylül 2003-Eylül 2004 geometrik nivelman tek nokta hareketleri .....	80
Şekil 6.10	Haziran 2003-Eylül 2004 geometrik nivelman tek nokta hareketleri .....	81
Şekil 6.11	Haziran 2003-Eylül 2003 trigonometrik nivelman tek nokta hareketleri.....	82
Şekil 6.12	Eylül 2003-Eylül 2004 trigonometrik nivelman tek nokta hareketleri .....	83
Şekil 6.13	Haziran 2003-Eylül 2004 trigonometrik nivelman tek nokta hareketleri.....	84
Şekil 6.14 (a)	Haziran 2003-Eylül 2003 geometrik-trigonometrik nivelman yükseklik farkları85	
Şekil 6.14 (b)	Haziran 2003-Eylül 2003 geometrik-trigonometrik nivelman yükseklik farkları86	

- Şekil 6.15 (a) Eylül 2003-Eylül 2004 geometrik-trigonometrik nivelman yükseklik farkları.. 87
- Şekil 6.15 (b) Eylül 2003-Eylül 2004 geometrik-trigonometrik nivelman yükseklik farkları.. 88
- Şekil 6.16 (a) Haziran 2003-Eylül 2004 geometrik-trigonometrik nivelman yükseklik farkları89
- Şekil 6.16 (b) Haziran 2003-Eylül 2004 geometrik-trigonometrik nivelman yükseklik farkları90

## ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1	Trigonometrik nivelmanda uzaklığa bağlı olarak yükseklik faklarının ortalama hataları.....	21
Çizelge 3.2	Yerin küreselliğinin ve ışığın kırılmasının etkisi .....	24
Çizelge 4.1	Jeodezik ağlarda datum parametreleri.....	35
Çizelge 6.1	Pabuçdere Barajı'na ait özellikler .....	58
Çizelge 6.2	Yatay ve düşey konum ağı ölçü bilgileri.....	61
Çizelge 6.3	Pabuçdere Barajı geometrik nivelman ağı serbest dengeleme sonuçları .....	62
Çizelge 6.4	Stokastik model testi .....	63
Çizelge 6.5	Geometrik nivelman dengelemesi sonrası nokta yükseklikleri.....	63
Çizelge 6.6	Pabuçdere Barajı trigonometrik nivelman ağı serbest dengeleme sonuçları.....	64
Çizelge 6.7	Stokastik model testi .....	64
Çizelge 6.8	Trigonometrik nivelman dengelemesi sonrası nokta yükseklikleri.....	64
Çizelge 6.9	Geometrik nivelman (I-II) ölçme dönemleri arası deformasyon analizi.....	66
Çizelge 6.10	Geometrik nivelman (I-II) ölçme dönemleri arası deformasyon vektörleri tablosu.....	67
Çizelge 6.11	Geometrik nivelman (II-III) ölçme dönemleri arası deformasyon analizi .....	68
Çizelge 6.12	Geometrik nivelman (II-III) ölçme dönemleri arası deformasyon vektörleri tablosu.....	69
Çizelge 6.13	Geometrik nivelman (I-III) ölçme dönemleri arası deformasyon analizi.....	70
Çizelge 6.14	Geometrik nivelman (I-III) ölçme dönemleri arası deformasyon vektörleri tablosu.....	71
Çizelge 6.15	Trigonometrik nivelman (I-II) ölçme dönemleri arası deformasyon analizi.....	72
Çizelge 6.16	Trigonometrik nivelman (I-II) ölçme dönemleri arası deformasyon vektörleri tablosu.....	73
Çizelge 6.17	Trigonometrik nivelman (II-III) ölçme dönemleri arası deformasyon analizi ..	74
Çizelge 6.18	Trigonometrik nivelman (II-III) ölçme dönemleri arası deformasyon vektörleri tablosu.....	75
Çizelge 6.19	Trigonometrik nivelman (I-III) ölçme dönemleri arası deformasyon analizi ...	76
Çizelge 6.20	Trigonometrik nivelman (I-III) ölçme dönemleri arası deformasyon vektörleri tablosu.....	77



## ÖNSÖZ

Öncelikle, çalışmamın her aşamasında bilgi ve deneyimlerini paylaşan, yönlendiren, yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım değerli hocam, Yrd. Doç. Dr. R.Gürsel HOŞBAŞ olmak üzere, Doç. Dr. Halil ERKAYA'ya, Arş. Gör. Nedim Onur AYKUT, Arş Gör. Nursu TUNALIOĞLU, Arş. Gör. Taylan ÖCALAN ve Arş Gör. Kutalmış GÜMÜŞ'e, Pabuçdere Barajı'ndaki deformasyon ölçmelerini gerçekleştiren ve değerlendirmemize olanak sağlayan Harita Müh. Sayın Bünyamin İLTER ile Harita Müh. Sayın Hüseyin PALA'ya ve yaşamım boyunca beni her konuda destekleyen aileme teşekkürlerimi sunar, bu çalışmanın tamamlanma aşamasında yaşamını yitiren Hasan PALA'yı şükranla anarım.

Ayrıca, çalışmalarım boyunca kitap ve makalelerinden yararlandığım değerli bilim adamlarına saygılarımı sunarım.

## ÖZET

Başlangıçta su ihtiyacını karşılamak ve taşkınlardan korunmak amacıyla inşa edilen barajlar, özellikle hızlı nüfus artışı, teknolojik ve kültürel gelişmelere paralel olarak artan enerji gereksinimini karşılamak için elektrik enerjisi üretmeye yönelik tasarlanmaya başlanmış ve bu da daha yüksek barajların yapımını zorunlu kılmıştır.

Barajlar gibi büyük yapılar, sürekli yük altında olduklarından zamanla, yapı ve çevresinde değişimler ortaya çıkmaktadır. Bu değişimler genel olarak deformasyon şeklinde adlandırılırlar. Belirli bir limit değerini aşan deformasyonlar, büyük can ve mal kaybı doğuracak facialara neden olabilmektedir. Bu nedenle, barajların çevresindeki değişimlerin izlenmesi ve gerekli önlemlerin alınması büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, dolgu barajlarda düşey değişimlerin hassas trigonometrik nivelman yöntemi ile belirlenebilirliği araştırılmıştır. Uygulama alanı olarak seçilen Pabuçdere Barajı'nda, Haziran 2003, Eylül 2003 ve Eylül 2004 dönemlerinde elde edilen jeodezik veriler, üç ölçme dönemi için ayrı ayrı dengelenmiş ve analiz edilmiştir. Hassas geometrik nivelman ve hassas trigonometrik nivelman yöntemleriyle elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Hassas geometrik nivelman ölçülerinin değerlendirilmesi sonucunda; 100 m uzunluğundaki nivelman yolu için ortalama 0.15 mm ölçü doğruluğuna ulaşılmıştır. Aynı ölçme dönemlerinde gerçekleştirilen trigonometrik nivelman ölçülerinin değerlendirilmesi sonucunda ise aynı nivelman yolu uzunluğu için ortalama 3.22 mm doğruluk değeri elde edilmiştir.

Tüm bu araştırma, karşılaştırma ve irdelemeler sonucunda; günümüzde elektronik takeometrelerle yüksek doğruluklu gözlem yapma olanağı ile, ölçme dönemleri arasında beklenen düşey değişimlerin milimetreler boyutlarında olması durumunda, hassas trigonometrik nivelman yönteminin dolgu barajlarda uygulanabileceği kanısına varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Barajlarda deformasyon ölçmeleri, hassas trigonometrik nivelman, hassas geometrik nivelman

## **ABSTRACT**

At the beginning, the dams had been built in order to meet the demands and water flood control. Later on they were designed as electricity production oriented in order to meet the increasing energy requirement, especially as a result of the rapid increase in population and technological and cultural developments. That situation came with the result that larger dams must have been built.

Since the big buildings like dams are under burden there exists exchanges in structure and environment. These kind of changes are called as deformation. Some deformations which are over the limits may cause great tragedies with loss of life and property. Therefore, it is very important to observe the changes in the environment of dams and take precautions.

In this study, the possibility of estimation of vertical changes by using precise trigonometric levelling method for the fill dams has been researched. Thus, at the Pabuçdere dam, which is chosen as application field, the geodetic results that have been taken during June 2003, September 2003 and September 2004 periods are separately adjusted and analysed. Precise geometric levelling and precise trigonometric levelling results have been compared.

As a result of evaluations of precise geometric levelling measurements, for a 100 m long leveling path, an average of 0.15 mm accuracy has been reached. On the other hand, at the results of trigonometric levelling measurements, that are made in the same periods, an average of 3.22 mm accuracy has been reached for the same levelling path.

To conclude at the end of all these research, comparisons and examinations, with the facility of high accurate electronic tachometer measuring, precise trigonometric levelling method can applied for fill dams in the case of vertical changes between different measuring periods are in a few milimeters.

**Keywords :** Deformation measurements on dams, precise trigonometric levelling, precise geometric levelling

## 1. GİRİŞ

Barajlar gibi büyük yapılar, sürekli yük altında olduklarından zamanla yapı ve çevresinde değişimler ortaya çıkmaktadır. Bu değişimler genel olarak deformasyon şeklinde adlandırılırlar. Deformasyonların belirli bir limit değerini aşması durumunda, büyük can ve mal kaybına neden olacak facialar ortaya çıkabilir. Bu nedenle, baraj çevresindeki değişimlerin izlenmesi ilk dolum esnasında başlamalı ve ömrü boyunca sürdürülmelidir.

Mühendislik yapılarında noktalar arasındaki yükseklik farklarının hassas olarak belirlenmesinde, hassas geometrik nivelman yöntemi en yüksek doğrulukla sonuç veren yöntemdir. Yöntemin uygulanmasında uygun donanım kullanılarak ve ölçme koşulları için öngörülere uyularak istenen sonuçlara ulaşılmaktadır.

Geometrik nivelman yöntemi yüksek hassasiyete sahip olmasına karşın, uygulama bakımından her zaman ekonomik ve kolay olmayabilir. Özellikle topografik yapının bozuk olduğu yerlerde ve dağlık bölgelerde uygulanabilirlik bakımından zayıf kalmakta ve doğruluk kaybına uğramaktadır. Böyle durumlarda kullanılabilir alternatif yöntemler arasında en önemlisi, trigonometrik nivelmanın kısa uzunluklarda karşılıklı olarak uygulandığı hassas trigonometrik nivelman yöntemidir (Soycan, 2002).

Bu çalışmada, dolgu tipli barajlarda düşey değişimlerin hassas trigonometrik nivelman yöntemi ile belirlenebilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Uygulama alanı olarak seçilen Pabuçdere Barajı'nda Haziran 2003, Eylül 2003 ve Eylül 2004 dönemlerinde elde edilen jeodezik veriler, ayrı ayrı dengelenmiş ve analiz edilmiştir. Hassas geometrik nivelman ve hassas trigonometrik nivelman yöntemleriyle elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çalışma yedi ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde giriş, çalışmanın amaç ve içeriğinden söz edilmiştir. İkinci bölümde, barajlar hakkında bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde, deformasyon ölçmelerinde genel tanımlar, deformasyon modelleri ve deformasyon belirleme yöntemleri üzerinde durulmuştur. Dördüncü bölümde, deformasyon ölçülerinin değerlendirilmesi ile duyarlık ve güven ölçütleri, beşinci bölümde ise deformasyon analizi yöntemleri açıklanmıştır. Altıncı bölümde, Pabuçdere Barajı hakkında genel bilgiler ile hassas geometrik ve hassas trigonometrik nivelman yöntemleriyle elde edilen sonuçlar ve grafikler verilmiştir. Yedinci bölüm ise sonuçlardan oluşmaktadır.

## 2. BARAJLAR

### 2.1 Genel Tanımlar

Düzensiz akışlı suların düzenli debiye dönüştürülmesini, yer ve zaman açısından faydalarını artırmak için büyük miktarlarda depolanmasını temin etmek üzere vadileri kapatan yapılardan, 15 m'den daha yüksek olanlarına baraj denilmektedir (Hoşbaş, 2004).

Başlangıçta taşkınlardan korunmak, içme ve sulama suyu elde etmek için inşa edilen barajlar, 1900'lü yıllardan sonra özellikle hızlı nüfus artışı, teknolojik ve kültürel gelişmelere koşut olarak artan enerji gereksinimini karşılamak için, elektrik enerjisi üretmek için tasarlanmaya başlanmış ve bu da daha yüksek barajların yapımını zorunlu kılmıştır (Hoşbaş, 2004).

### 2.2 Baraj Tipleri

Barajlar, kullanım amacına göre ve gövde yapısına göre iki sınıfa ayrılabilir.

a) Kullanım amacına göre barajlar:

- Sulama amaçlı barajlar
- İçme, kullanma ve endüstri suyu amaçlı barajlar
- Enerji üretimi amaçlı barajlar
- Taşkın önleme amaçlı barajlar

b) Gövde yapısına göre barajlar

- Beton barajlar
- Dolgu barajlar

Bir baraj, yukarıda belirtilen yapım amaçlarından sadece biri için yapıldığı gibi, amaçlardan birkaçını veya hepsini kapsayabilir (Boyacı, 2005 ).

#### 2.2.1 Gövde Yapısına Göre Barajlar

##### 2.2.1.1 Beton Barajlar

**A- Beton Ağırlık Barajları:** Biriktirdiği suyun gövdeye yaptığı basınç ve diğer etkileri gövdenin ağırlığı ile karşılayan masif yapılı barajlar beton ağırlık barajları olarak adlandırılır. Bu tür barajların inşa edildikleri vadilerin temelini sağlam kaya olması, agrega malzemelerinin yeterli miktarda bulunması, çimento naklinin olanaklı olması ve biriktirilecek

suyun betona zararlı olmaması gerekir (Hoşbaş, 2004).

Şekil 2.1’de Dünya’nın ikinci, Asya’nın en büyük beton ağırlık barajı olan, Bhakra Barajı görülmektedir.



Şekil 2.1 Beton ağırlık barajı örneği (Hoşbaş, 2004)

**B- Beton Kemer Barajları:** Kemer barajlar, etki altında kaldıkları yükün büyük bir kısmını yatay yönde vadi yamaçlarına ileten eğri planlı barajlardır. İnşa edildikleri vadide yamaçların, barajın kemer gibi çalışmasından doğan normal gerilmelere dayanabilecek sağlamlıkta olması gerekir. İdeal olarak, bir kemer barajın bütün su yükünü basınç halinde yamaçlara iletmesi ve betonun her noktada emniyet gerilmesinde çalışması sağlanmalıdır. Fakat arazi şartlarının ve inşa güçlüklerinin doğurduğu kısıtlamalar, bu hedeflerin tam olarak gerçekleştirilmesine imkan vermeyebilir. Şekil 2.2’de Türkiye’nin birinci, Dünya’nın onaltıncı beton kemer barajı olan Berke Barajı görülmektedir.

Ağırlık barajlarında kesit taban genişliklerinin yüksekliklerine oranı (rölatif genişlikleri) çoğunlukla 0.75-0.85 arasında olduğu halde, kemer barajların rölatif genişlikleri 0.20 ile 0.60 arasında değişmektedir. Bir kemer baraj, alternatif bir ağırlık barajı için gerekli olan betonun yaklaşık %30’u ile yapılabilir. Kemer barajlar, ağırlık barajlarına ve payandalı barajlara göre sadece daha ekonomik olmayıp, aynı zamanda daha da emniyetlidir.



Şekil 2.2 Beton kemer baraj örneği (<http://www.suvakfi.org.tr/makale-berke.htm>)

**C- Payandalı Beton Barajlar:** Suyun biriktirilmesini sağlayan plak veya kemerlerin yüklerinin, orta ayaklara taşıtılmasını sağlayan beton baraj tiplerine payandalı beton barajlar denilmektedir. Bu baraj tipi, dolu gövdeli ağırlık barajlarına karşın malzemedeki ekonomi sağlamak amacıyla tercih edilirler. Bu tip gövdeler, beton ağırlık barajların özel şekli olarak da düşünülebilirler. Memba yüzleri eğimli olup, 150 m'ye kadar olan yüksekliklerde uygulanmışlardır (Hoşbaş, 2004).

#### 2.2.1.2 Dolgu Barajlar

Doğada bulunan malzemelerin çok az işlemle geçirilmesinden sonra kullanılmaları ile inşa edilen barajlar, dolgu barajlar olarak adlandırılır. Homojen tip dolgu barajların gövdesi tek tip malzemedeki oluşur. Zonlu dolgulu tiplerde ise baraj gövdesi düşey zonlar şeklinde inşa edilir (Hoşbaş, 2004).

**A- Toprak dolgu barajlar:** Toprak dolgu barajlar, eski medeniyetlerden beri sulama amacıyla kullanılmaktadır. Bugün de, geçmişte olduğu gibi en yaygın baraj çeşididir. Bunun en önemli nedenlerinden biri inşasında, kazıdan elde edilen doğal materyallerin, küçük bir işlemle sonra kullanılmasıdır. Toprak dolgu barajların tesisi ve topografik gereksinimlerinin diğer barajlara göre daha esnek olması, büyük bir ekonomik avantajdır. Ayrıca, beton yapılar için elverişli mevkilerin sayısı gün geçtikçe azalmaktadır. Bu da toprak



dolgu barajların, en yaygın baraj çeşidi olmaya devam edeceğini göstermektedir. Bugüne değin uygun baraj yerlerinin önemli bir bölümünün kullanılmış olması ve bundan sonra daha karmaşık alanlarda baraj yapma zorunluluğunun ortaya çıkması, baraj yeri ve göl alanlarında daha yoğun araştırmaların yapılmasını gerektirmektedir (McDaniel ve Blair, 1987).

**B- Kaya dolgu barajlar:** ICOLD (Uluslararası Büyük Barajlar Komitesi), kaya dolgu barajları “dengesini öncelikle kayaya bağlı olarak oluşturan dolgu barajlar” olarak tanımlamıştır .

Kaya dolgu barajların avantajları;

- Ucuz yerel materyallerle inşa edildiğinden, ekonomiktir.
- Temel durumunun iyi olmadığı, özellikle de hidrostatik yükselmenin muhtemel olduğu yerler için uygun bir dizayndır.
- Yapımı kısa sürede tamamlanabilmektedir.

Kaya dolgu barajlar özellikle, yeterli toprak bulunmadığı ve bol kaya stoğunun bulunduğu yerlerde tercih edilmektedir. Hava koşullarının toprak dolgu veya beton baraj yapımı için uygun olmadığı yağışlı ve soğuk iklimlerde, kaya dolgu barajlar tercih edilmektedir. Kaya dolgu baraj tipinin seçiminde, bölgedeki kaya kalitesi çok önemli bir faktördür. Kayanın yapım için uygun olup olmadığı mutlaka kapsamlı testlerle incelenmelidir (McDaniel, 1987).



Şekil 2.3 Kaya dolgu baraj örneği



Şekil 2.3'te görülen Atatürk Barajı; Türkiye'de inşa edilmiş en büyük baraj olup, baraj tipi zonlu ve eğri çekirdekli kaya dolgudur. Dünyanın en büyük su kaynakları geliştirme projelerinden biri olan GAP (Güneydoğu Anadolu Projesi) kapsamında; Fırat Nehri üzerinde inşa edilmiştir. Atatürk Barajı, dünyada dolgu tipindeki barajlar arasında yükseklik bakımından yirmibeşinci, gövde dolgusu bakımından beşinci, göl hacmi bakımından yirmibirinci sırada yer almaktadır (<http://www.dsi.gov.tr/kalkinmaicinsu/teknikgezi.htm>).

Baraj dolgusunun hangi malzeme ile yapılacağı, baraj aks yerinin topografik ve jeolojik yapısına, malzeme sahalarının baraj sahasına yakınlık – uzaklığına, dolayısıyla ekonomisine bağlıdır. Yükseklikleri ise, depolayacakları su hacmine bağlıdır (Boyacı, 2005).

### 3. DEFORMASYON ÖLÇMELERİ

#### 3.1 Deformasyon Ölçmelerinde Genel Tanımlar

Yeryüzündeki bazı bölgeler ve büyük mühendislik yapıları (barajlar, gökdelenler ve köprüler gibi) ile bunların yakın çevreleri geçici ya da kalıcı değişik faktörlerin etkisi altında bulunurlar. Bu faktörleri;

- Zeminin fiziksel özellikleri,
- Bölgedeki yer kabuğu hareketleri,
- Yapının ağırlığı ve kullanılan malzeme türü,
- Yapıyı etkileyen hareketli dış yükler,
- Çeşitli jeolojik ve atmosferik etmenler,
- Suyun dinamik basıncı

olarak sıralamak mümkündür. Bu faktörlerden dolayı bölgede, yapıda veya çevresinde oluşan şekil değişikliklerine genel anlamda deformasyon denilmektedir (Hoşbaş, 2004).

Jeodezide; bölgede veya yapı üzerinde seçilen karakteristik bir  $P_i$  noktasının  $t_1$  ve  $t_2$  gibi iki farklı zamanda yapılan ölçmeler sonucu konumu  $P_i(t_1)$  ve  $P_i(t_2)$  olarak belirlenebiliyorsa ve bu iki değer arasındaki fark olan  $d_i$ 'nin istatistik olarak sıfırdan farklı olduğu kanıtlanabiliyorsa, deformasyon olarak tanımlanır (Hoşbaş, 2004).

Bir bölge, yapı ya da çevresindeki geometrik şekil değişimlerini belirlemek için yapılan ölçmelere deformasyon ölçmeleri denir. Değişik zaman aralıkları ile yapılan ölçmelerin değerlendirilerek yer, zaman ve büyüklük parametrelerine bağlı olarak değişimlerinin belirlenmesi ve yorumlanmasına da deformasyon analizi denilmektedir (Hoşbaş, 2004).

#### 3.2 Deformasyon Ölçmelerinin Uygulama Alanları

Deformasyon ölçmeleri mühendislik yapıları ve doğal objeler dahil çok farklı disiplinlerde gündeme gelebilir. Bunların kapsamlı olanlarından bazıları şunlardır:

Mühendislik yapılarının inşaatındaki ölçmeler : Köprü, baraj, tünel ve gökdelen gibi yapılardaki şekil değişikliklerinin araştırılmasına yönelik ölçmelerdir. Bu araştırmalar daha çok yapının yapım özellikleri ile malzeme kontrolüne olanak sağlar. Ayrıca işletme zararlarını ve çevre için tehlikelerini önlemek amacıyla şekil bozukluklarının önceden fark edilmesini de sağlar.

Makine ve tesislerinin inşaatındaki ölçmeler : Makine ve sanayi tesislerinin geometrik durumlarının belirlenmesi ve kontrolü için yapılan ölçmelerdir. Vinç rayları ve büyük türbinler gibi tesislerin hasarsız çalışması, yalnız tesisin içindeki geometrik koşullara uyulması ile sağlanır.

Zemin ve kaya mekaniği, mühendislik jeolojisi ölçmeleri : Yeryüzünün şekil bozukluklarının ve yerel hareketlerin araştırılmasına yönelik ölçmelerdir. Örneğin; zemin oturmaları, heyelanlar ve tektonik hareketler vb. Yeraltından kütle çıkarmaları sonucu oluşan zemin hareketleri de bu çerçeveye girer.

Dar anlamda jeodezik deformasyon ölçmelerinin ödevi; bir araştırma objesinin çevresine göre yatay ve düşey konum değişikliklerini veya bozukluklarını zamanın fonksiyonu olarak araştırmaktır. Temel prensip olarak, objenin her detay noktasının sürekli gözlenmesi gereklidir. Ancak bu işlem çoğunlukla teknik olarak gerçekleştirilemez veya ekonomik değildir. Bu nedenle ölçü tasarımı mekansal ve zamansal olarak dikkate alınmalıdır.

Objeyi temsil edebilecek bazı noktalar seçilir ve bunların koordinatları belirli zaman aralıklarıyla belirlenir. Noktaların obje üzerindeki dağılımı ve ölçülerin zaman aralığı beklenen deformasyonları belirlemeye olanak verecek şekilde seçilmelidir (Hoşbaş, 2004).

### **3.3 Deformasyon Ölçmelerinin Gelişim Süreci**

İlk deformasyon ölçmeleri 1860'da ABD'nin California Eyaletinde San-Andreas fay kuşağında yapılmış ve 1876- 1906 yıllarında yatay açı gözlemleri yinelenmiştir.

Mühendislik yapılarındaki en büyük deformasyonlar barajlarda meydana geldiğinden, bu yönde yapılan deformasyon ölçmeleri oldukça geliştirilmiş ve literatüre geçen ilk deformasyon ölçmesi bir baraj hakkında olmuştur.

Bu söz konusu ölçmeler, 1908 yılında Almanya'nın Thusingen Eyaletinde bulunan Gotheard Barajı'nda yapılmış olan ölçmelerdir. Burada baraj kretinin ortasında seçilen iki noktanın yatay hareketleri, aliyman yöntemi ile izlenmiştir. Bu konuda ikinci önemli bir uygulama da

yine bir kemer baraj olan Pfafensprung'da 1928 yılında yapılmıştır. Bütün bu çalışmalar yapılırken basit sayısal çözümler veya grafik tespitler kullanılmıştır. Zamanla, gelişen dünyanın enerji sorununa çare olması amacıyla süratli bir şekilde barajlar inşa edilmeye başlanmıştır. Ancak bunların sayısı olarak büyük çoğunluğu, deformasyonlar iyi incelenmediğinden dolayı ya yıkılmış ya da yıkılma tehlikesi bulunduğu için kullanıma açılmamışlardır (Özhan, 1994).

1923 yılında Gleneau, 1924'te Rampen ve 1928'de 50 m yüksekliğindeki SanFrancisco Barajı'nın çökmesi sonucu 436 kişinin ölümüyle sonuçlanan faciadan sonra, jeodezik kontrol ağlarının kullanımı büyük önem kazanmıştır (Hoşbaş, 1992).

Bu zamana kadar yıkılan baraj sayısı 250'yi bulunca 1929 yılında düzenlenen bir sempozyumda konu ele alınmış ve hemen ardından aynı yılda bu konuda ilk yazılı kitap W. Lang tarafından yayımlanmıştır. W. Lang'ın kitabı ve getirdiği öneriler ışığında, alinyman ve önden kestirme yöntemlerine ek olarak hassas poligon yöntemi de kullanılmaya başlanmıştır. 1960'lı yıllara kadar jeodezik deformasyon ölçmelerinde ulaşılmak istenen hedef, hesapların kolaylaştırılması olmuştur. Poligonların baraj duvarı üzerinden her iki tarafa kayalara uzatılması ve alet teknolojisinin gelişmesi ile triangülasyon (nirengi ağları) gündeme gelmiştir. İstatistiksel analiz bilimi ve gelişmiş bilgisayarların kullanıma girmesiyle, hesaplarda jeodezik ağ dengelemesi ve jeodezik deformasyon analizi hakim olmuş; deformasyona uğramış noktanın tespiti ve sonuçların hassasiyetinin yüksek olması yönünde güvenilir veriler elde edilmiştir. Tüm bu gelişmelere Aschlimann, Baumann, Löschner, Milev, Pelzer, Welsch, Niemeier ve diğerlerinin önemli katkıları olmuştur (Özhan,1994).

Ülkemizde ise deformasyon ölçmeleri konusu 1960'lı yıllardan sonra gündeme gelmiştir. Ancak tam anlamıyla ciddi boyutlarda çalışmalar yapılmamıştır. Örneğin; Kemer-Bozdoğan Barajı'nda ölçüm tesisleri kurulmuş fakat ölçümler yıllarca yapılamamıştır. Yine Sarıyar Barajı'nda ilk ölçüm değerleri elde edilmiş fakat daha sonra bunların nasıl değerlendirileceği bilinmediğinden dolayı ölçümler tekrarlanmamıştır. Daha sonra yapılmış olan Keban, Gökçekaya Barajları ile Kuzey Anadolu fay kuşağında yapılan ölçmeler ise ilk akademik nitelikteki çalışmalardır.

Daha sonra bu çalışmalara Prof.Dr. Türkay TÜDEŞ yürütücülüğünde KTÜ çalışma ekibince Keban Barajı'nda (1975) ve Prof.Dr. Turgut UZEL yürütücülüğünde YTÜ çalışma ekibince Oymapınar Barajı'nda (1985) sürdürülen çalışmalarla devam edilmiştir.

### 3.4 Deformasyon Modelleri

Deformasyonlar; problemin şekline, kapsamına, uygulanan ölçme planına ve yöntemine göre farklı modeller içinde incelenebilirler. Bunlar; statik, kinematik ve dinamik modellerdir (Hoşbaş, 2004).

#### 3.4.1 Statik Model

Nokta alanı için;

$$x^T = [x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_p, y_p] \quad (3.1)$$

$$x^T = \text{sabit} \quad (3.2)$$

tanımlanır. Noktanın  $t_0$  ve  $t_i$  zamanlarındaki konumları  $x_0$  ve  $x_i$  ise;  $dx = x_i - x_0$  analiz edilerek yorum yapılmaktadır. Deformasyon incelemesine konu olan bölge veya yapının karakteristik noktalarının zamandan ve etkiyen kuvvetlerden bağımsız olarak belirlenmesi, statik modelin temelini oluşturmaktadır. Bu modelde, sistemin bir kez ölçülmesi sırasında geçen zaman içinde noktaların sabit kaldığı varsayılmaktadır. Bu anlamda statik model, jeodezik yöntemlerin en çok uygulama alanı bulduğu deformasyon analizi yoludur (Hoşbaş, 2004).

Bu modelin özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Obje periyodik olarak ölçülür,
- Ölçülen nokta hareketlerinin anlamlılığı istatistiksel olarak araştırılır,
- Hareket süreci göz ardı edilir,
- Harekete neden olan kuvvetler dikkate alınmaz (Hoşbaş, 2004).

#### 3.4.2 Kinematik Model

Bu modelde nokta koordinatları zamanın fonksiyonu şeklinde tanımlanır.  $t_i$  zamanındaki nokta koordinatı;

$$x_i = x(t_i) = x_0 + \Phi(x, t_i - t_0) \quad (3.3)$$

şeklindedir. Burada;

$x_i$  :  $t_i$  zamanındaki nokta koordinatı

$x_0$  :  $t_0$  referans zamanındaki nokta koordinatı

$\Phi$  : Kinematik model fonksiyonudur.

Bu model türünde, deformasyon incelemesine konu olan bölge veya yapının karakteristik noktalarının hareketleri ve bunların hızları araştırılır. Örneğin; bir ülkedeki veya bölgedeki yerkabuğu hareketlerinin araştırılması amacıyla yapılan nivelman ölçümlerinin periyotları 20-25 yıl olmakta ve her yineleme ölçüsü 4-5 yıl gibi uzun sürede tamamlanabilmektedir. Bu süre içinde nivelman noktalarının yüksekliklerinin sabit kaldığı düşünülemez. Bu durumda parametre olarak nokta yükseklikleri değil, yükseklik değişimleri zamanın fonksiyonu olarak ifade edilerek, düşey hareketlerin hızları araştırılır.

Modelin özellikleri;

- Obje periyodik ya da sürekli olarak ölçülebilir,
- Hareketin akışı, hız ve ivme gibi kinematik parametrelerle ifade edilir,
- Harekete neden olan kuvvetler dikkate alınmaz.

şeklinde özetlenebilir (Hoşbaş, 2004).

### 3.4.3 Dinamik Model

Çok karmaşık olmayan kinematik modellerin, yeni ölçme ve bilgisayar tekniklerinin sağladığı olanaklarla desteklendiklerinde, deformasyonların jeodezik yaklaşımla belirlenmesinde uygulama alanlarının genişlemesi sonucunda dinamik model kavramı oluşmuştur.

Bu modelde geometrik değişimlerin yanında deformasyona neden olan kuvvetlerin zamana ve dış etkenlere bağlı olarak değişimi, birbirleri ile ilişkileri ve bu kuvvetlerin oluşmasına neden olan dönüşüm fonksiyonu araştırılır. Genel olarak model;

$$x_i = x(f_i) = x_0 + \Phi(x, f_i - f_0) \quad (3.4)$$

şeklindedir. Burada;

$x_i$  :  $f_i$  kuvvetinin etkisindeki noktaların koordinatı

$x_0$  :  $f_0$  kuvvetinin etkisindeki noktaların koordinatı

$\Phi$  : dinamik model fonksiyonudur.

Örneğin; bir barajın rezervuarında toplanan suyun hem yapı, hem de yakın çevresi üzerindeki etkileri bilinmektedir. Basınç kuvveti olarak ortaya çıkan bu etki, su seviyesinin değişimine göre yapıda iç gerilmelere ve çevresinde yer kabuğu hareketlerine neden olmakta, bu ise deformasyonları oluşturmaktadır. Burada, yapıya etki eden kuvvetler ile yapı karakteristikleri arasındaki dönüşüm fonksiyonu araştırılır.

Dinamik modelin özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Obje periyodik ya da sürekli olarak ölçülür,
- Objeye etki eden büyüklükler ölçülür,
- Hareketler, etki büyüklüklerinin fonksiyonu olarak analiz edilir (Hoşbaş, 2004).

### 3.5 Jeodezik Yöntemlerle Deformasyon Ölçmeleri

Jeodezik yöntemler ölçme periyotlarına göre ikiye ayrılırlar.

- Sürekli Ölçme Yöntemi: Değişim göstermesi beklenen yapının belirli karakteristik bölgesi ya da noktaları sürekli olarak gözlenir.
- Ayrık Ölçme Yöntemi: Bu yöntemde karakteristik noktalar belli periyotlara göre ölçülür.

Jeodezik deformasyon ölçme yöntemleri;

- Yatay yöndeki deformasyonların belirlenmesinde uygulanan yöntemler;
  - Hassas Poligon Yöntemi
  - Jeodezik Kontrol Ağları Yöntemi
  - Aliynman Yöntemi
- Düşey yöndeki deformasyonların belirlenmesinde uygulanan yöntemler;
  - Hassas Geometrik Nivelman Yöntemi
  - Hassas Trigonometrik Nivelman Yöntemi
  - Hidrostatik Nivelman Yöntemi

şeklinde sınıflandırılabilir.

### 3.5.1 Yatay Yöndeki Deformasyonların Belirlenmesinde Uygulanan Yöntemler

#### 3.5.1.1 Hassas Poligon Yöntemi

Hassas poligon; kırılma açıları ve kenarları yüksek doğruluklu olarak ölçülmüş poligon demektir. Bu yöntem ile deformasyonların belirlenmesi genellikle barajlarda olup, kret üzerinde ve varsa kontrol galerileri üzerinde poligon dizileri oluşturulur. Poligon noktalarının zemin işareti olarak özel bronz çiviler kullanılır ya da pilye olarak inşa edilir. Poligon dizilerininin başlangıç ve bitiş noktaları, barajın basınç etkisinin dışında, deformasyon etkilerinin olmadığı sağlam zemin üzerinde tesis edilmelidir. Poligon kenarları mümkün olduğunca eşit uzunluklarda (20m-50m arasında) seçilmeli ve 1/1000 oransal duyarlığı sağlayacak biçimde ölçülmelidir. Kırılma açıları saniye hassasiyetinde, en az dört tam silsile ölçülmelidir.

#### 3.5.1.2 Jeodezik Kontrol Ağları Yöntemi

Jeodezik bir ağ denilince, birbirine jeodezik elemanlarla bağlanan ve koordinatları tek bir koordinat sisteminde hesaplanabilen noktalar kümesi anlaşılır (Erdoğan, 1998).

Bir ağın kalitesi, o ağdan beklenenlere göre değişen bir kavramdır. Başka bir deyişle ağın işlevinin ne olduğuna ve bu işlevi hangi ölçüde yerine getirdiğine bağlıdır.

Genel amaçlı bir ülke ağının her yerinde iyi bir duyarlığa sahip olması önemli bir kalite ölçütüdür. Buna karşılık özel amaçlı jeodezik kontrol ağları için ağın bir noktası, bir bölgesi veya herhangi bir doğrultu için özel duyarlık amaçlanabilir.

Jeodezik kontrol ağlarının kuruluş amaçları, deformasyonların oluşup oluşmadığı konusunda karar vermeye yöneliktir. Tasarımdaki herhangi bir terslik, ölçünün duyarlığı üzerinde olumsuz etki yapar.

İlke olarak bir ağdan beklenenler kullanım amacına yönelik olarak saptanır. Jeodezik kontrol ağlarında da değer yargıları olarak genellikle tüm ağlarda kullanılan ölçütler geçerlidir.

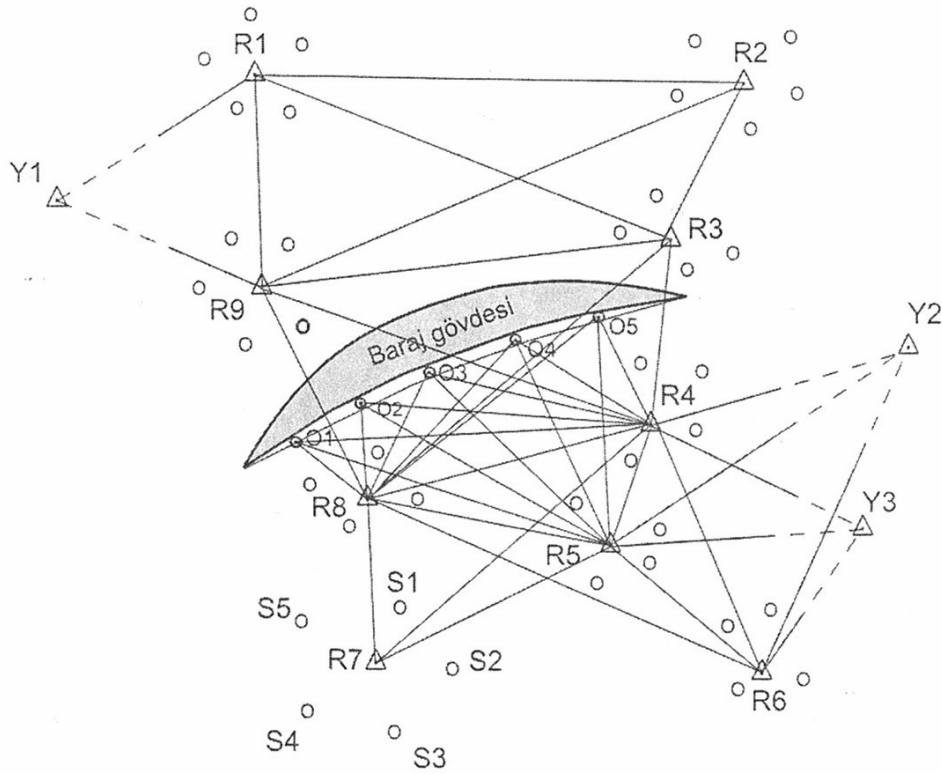
Bunlar;

- Duyarlık,
- Güvenirlik,
- Ekonomik olması şeklindedir (Hoşbaş, 1992).



### 3.5.1.2.1 Jeodezik Kontrol Ağlarının Yapısı

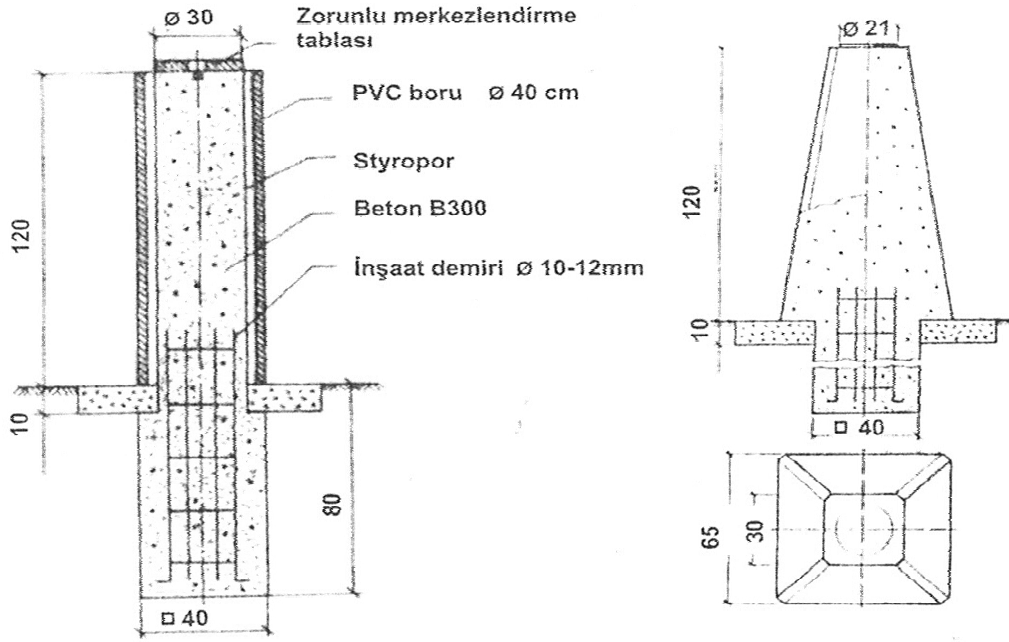
Bir jeodezik kontrol ağında Şekil 3.1'deki örnekten de görüldüğü gibi, dört değişik nokta grubu söz konusudur. Bunlar; ölçme (kontrol) noktaları, obje (deformasyon) noktaları, yöneltme noktaları ve sigorta noktalarıdır.



Şekil 3.1 Jeodezik kontrol ağı örneği (Hoşbaş, 2004)

**a) Ölçme (Kontrol) Noktaları:** Deformasyon bölgesindeki obje noktalarının gözlenmesi amacıyla, bu noktalara yakın yerlere tesis edilen ve üzerine alet kurulabilen noktalardır (Özhan, 1994).

Genel olarak barajın mansap tarafında ve sağlam zeminlerde tesis edilirler. Mutlak değişimlerin belirlenebilmesi için hareketsiz yani sabit olduklarının istatistik olarak kanıtlanmış olması gerekir. Genellikle içine demir etriye döşenmiş betondan kare ya da daire kesitli pilye olarak tesis edilirler. Referans noktası olarakta adlandırılırlar (Hoşbaş, 2004). Şekil 3.2'de pilye olarak tesis edilmiş kontrol noktaları görülmektedir.

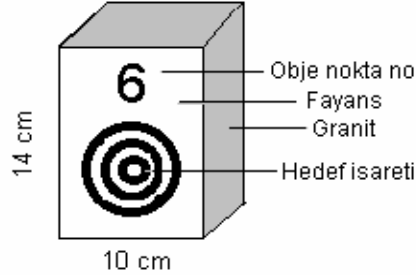


Şekil 3.2 Pilye olarak tesis edilmiş kontrol noktaları (Hoşbaş, 2004)

**b) Obje (Deformasyon) Noktaları:** Deformasyon araştırması yapılan objeyi temsil eden noktalar. Barajlarda, gövdenin hava tarafını oluşturan mansap yüzeyine, deformasyon eğrilerinin oluşturulması için farklı yüksekliklerde paralel sıralar halinde hedef markaları şeklinde tesis edilirler. Bazı barajlarda gövdedeki galerilerden mansap tarafına açılan balkonlarda tesis edilen obje noktaları ile yerkabuğu hareketlerinin araştırılmasında kullanılan obje noktaları pilye olarak tesis edilirler. Şekil 3.3'te barajlarda kullanılan hedef işareti görülmektedir.

Obje noktalarının seçimi ve tesisinde;

- Obje noktalarının uzaydaki hareketlerinin obje deformasyonunun temsili bir şeklini göstermesine,
- Dayanıklı ve sağlam olarak işaretlenmesine ve objenin yaşamı boyunca kullanıma hazır olmasına,
- Birkaç noktanın kaybolması durumunda araştırmayı uzun süre tehlikeye sokmayacak uygun bir sayıda olmalarına dikkat edilmelidir (Hoşbaş, 2004).



Şekil 3.3 Barajlarda kullanılan hedef işareti

**c) Yönelme Noktaları:** Ağın tümünden hareketini belirlemek ve ölçme duyarlılığını artırmak amacıyla, hareketsiz olarak kabul edilen veya hareketsiz olduğu kesinlikle kanıtlanan noktalardır. Bu noktaların üzerine alet kurulmaz, sadece yönelme için kullanılırlar. Bu nedenle de pilye olarak tesis edilmelerine gerek kalmaz. Üzerlerine yerleştirilecek birer hedef levhası ölçüm için yeterli olur. Hedef levhası olarak, iç-içe kırmızı beyaz veya siyah-beyaz daireleri içeren metal hedef levhaları kullanılır. Ölçme noktalarından, yönelme noktalarına olan doğrular ölçülür. Geriden kestirme hesabı yapılarak, gözlem noktalarının deformasyona uğrayıp, uğramadıkları araştırılır. İlk aşamada deformasyonun nedenleri ve nasıl etki ettiği tam olarak bilinmediğinden, yönelme noktaları seçilirken jeoloji mühendisleri ile birlikte çalışılmalıdır. Ölçme noktaları ve yönelme noktaları, deformasyon ölçmelerinde kullanılan sabit noktalardır (Özhan, 1994).

**d) Sigorta Noktaları:** Sabit noktalardaki olası deformasyonların büyüklüğünü ve yönünü belirlemek için 10m-20m gibi yakın çevrede, homojen dağılmış şekilde tesis edilen noktalardır. Bu noktalar sağlam kaya ya da sağlam dip zemine yerleştirilen taşlar üzerine özel çivilerle belirlenirler. Kontrol ağının noktalarından sayılmazlar.

### 3.5.1.2.2 Jeodezik Kontrol Ağlarının Ölçülmesi

Jeodezik kontrol ağında ölçme işlemine başlamadan önce, beklenen deformasyonların büyüklüğüne uygun bir ölçme yöntemi belirlenerek ölçme planı yapılır ve ölçüm için gereksinilen doğruluğu sağlayacak aletler belirlenir. Her ölçmeden önce aletlerin kontrolleri ve kalibrasyonları yapılır.

Deformasyon ölçmelerinde kullanılacak aletlerin, hem doğrultu hem de uzunluk ölçme doğruluklarının yüksek olması gerekir. Günümüzde elektronik takeometrelerle uzunluklar 1+1 ppm doğrulukla ölçülebilmektedir. Leica Geosystems AG'nin bu tür uygulamalar için özel olarak geliştirdiği TCA2003 (otomatik hareketli) ve TC2003 (manuel – elle hareketli) olmak üzere iki farklı modeli mevcuttur. Bu aletlerle doğrultular 0.15 mgon doğrulukla

ölçülebilmektedir (<http://www.sistemas.com.tr/page.php?ID=36>).

Ölçme işlemi önceden belirlenen plana göre ve atmosferik etkilerin en az olduğu saatlerde yapılmalıdır. Jeodezik kontrol ağının ölçülmesi sırasında, deformasyonların oluşmadığı varsayıldığından, ölçmelerin en kısa zaman aralığında tamamlanması zorunludur. Bu ölçmeler eğer bir beton barajda yapılıyorsa, ölçüm anındaki hava ve beton sıcaklıkları ile rezervuardaki su seviyesi gibi diğer yardımcı bilgilerde toplanarak, oluşabilecek deformasyonların yorumlanmasında yararlanır.

Ağın ilk konumunu belirlemek için yapılan ölçmeler, referans ölçümü ya da sıfır ölçümü olarak adlandırılır. Bu ölçümün zamanı önemlidir. Bir baraj deformasyon araştırmasında bu işlem barajda su toplanmaya başlamadan önce yapılmalıdır. Ağ noktalarındaki geçici ya da kalıcı deformasyonların belirlenmesi için, daha sonra farklı zaman aralıklarında ölçümler tekrar edilir (Hoşbaş, 1992).

### 3.5.1.3 Aliynman Yöntemi

İlk deformasyon ölçmeleri, İsviçre’de bir kemer baraj olan Montsalvens Barajı’nda aliynman yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Özhan, 1994).

Aliynman yöntemi, ölçme noktalarının bir referans doğrultusu boyunca yatay ve düşey değişimlerinin belirlenmesinde kullanılan bir yöntemdir. Yöntem; iki nokta arasında mutlak konum belirleme (aralık ölçmeleri), ölçme noktalarındaki konum değişimlerinin belirlenmesi ve iki sabit aliynman noktası yardımıyla yatay ve düşey düzlemdeki değişimlerin belirlenmesi şeklinde uygulanmaktadır (Hoşbaş, 2004).

Aliynman doğrultusu belirlenirken dikkat edilmesi gereken hususlar:

- Aliynman doğrultusunun iki ucu, hareketsizliği belirlenen sağlam zemin üzerine, pilye şeklinde tesis edilmelidir.
- Obje noktalarının aliynman doğrultusuna uzaklıkları mümkün olduğu kadar eşit tutulmalı ve obje noktaları zemine özel zemin işaretleri ile monte edilmelidir.
- Aliynman doğrultusu, umulan hareket yönüne dik doğrultuda seçilmelidir.
- Tesis edilen pilyeler mümkün olduğunca obje noktalarına yakın olmalıdır. Çünkü ölçülecek noktadan uzaklaştıkça hassasiyet azalmaktadır.
- Işığın kırılma etkisinden korunmak amacıyla aliynman doğrultusu, kretin 70 cm kadar yukarısından geçirilmelidir (Özhan, 1994).

### 3.5.2 Düşey Yöndeki Deformasyonların Belirlenmesinde Uygulanan Yöntemler

#### 3.5.2.1 Hassas Geometrik Nivelman Yöntemi

I.ve II. derece ülke nivelman ağlarının ölçülmesinde, yeryuvarının şeklinin belirlenmesinde, yer kabuğunun düşey yöndeki hareketlerinin tesbitinde, bina, köprü, baraj gibi büyük mühendislik yapılarında meydana gelebilecek düşey hareketlerin belirlenmesinde hassas nivelman yöntemi kullanılır (Özhan, 1994).

Hassas geometrik nivelmanda ölçme donanımını; hassas nivolar, invar miralar, payandaları ve mira çarıkları oluşturur (Hoşbaş, 2004).

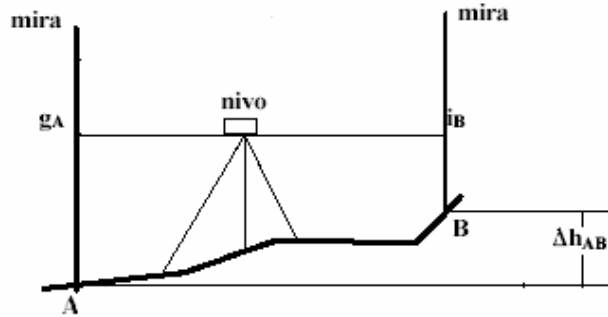
Kompensatörlü nivoların dürbünlerinde gözlem doğrultusunu otomatik olarak yatay duruma getiren düzenler bulunmaktadır. Bu aletlerde gözlem ekseninin otomatik olarak yataylanmasını sağlayan düzen; düzeç ve kompensatör sisteminden oluşmaktadır. Küresel düzeç değişik tip aletlerde 8'-15' arasında bir yataylama inceliğine sahipse kompensatör otomatik olarak faaliyete geçer. Kompensatör yatay doğrultuyu sağlayan mekanik bir düzendir (Erkaya, 2006).

Sayısal nivolarda insan gözünün görevini, sıralı dedektörler üstlenmiştir. WILD NA2000, ilk sayısal nivo olup, 1990 yılında Leica Firması tarafından üretilmiştir. Bu aletle, özel olarak yapılmış barkodlu bir miranın görüntüsü, sayısal görüntü işleme ve korelasyon yöntemine göre değerlendirilmektedir. Sayısal nivo ile yapılan nivelman ölçümü, verileri işleyen, depolayan programlar ve kontrol hesaplamaları ile desteklenmiştir (Erkaya, 2006).

Yüksek incelikli nivelman aletlerinde gözle yapılan mm tahminleri yeterli değildir. Bu amaçla kullanılan nivolar, ek bir düzenle donatılmışlardır. Optik mikrometreli nivolarda objektif önüne takılan paralel yüzlü cam plakanın hareket ettirilmesi ile hedef (gözlem) noktasından gelen ışınlar, bir mira bölümünün tamamı (genellikle 1 cm) kadar kendisine paralel olarak kayabilmektedir. Düzeç kabarcığı ortalanmış bir aletle, gözlem çizgileri ile miranın bir sonraki bölümü arasında kalan parçayı ölçmek mümkün olmaktadır. Gözlem doğrultusunun mira bölüm çizgisine kadar kaydırılması bir mikrometre vidasının döndürülmesi ile sağlanmaktadır. Mikrometre vidasının dönme miktarı, cam bir skala üzerine aktarılmakta ve skala üzerinde milimetreler, milimetrenin onda birleri doğrudan doğruya okunabilmekte, milimetrenin yüzde birleri de tahmin edilmektedir (Erkaya, 2006).

### 3.5.2.1.2 Hassas Geometrik Nivelmanda Ölçüm İşlemi

Nivelman güzergahları, arazinin eğimine bağlı olarak 200 – 800 m'lik gruplara ayrılarak nivelman noktaları inşa edilir. Bunun amacı, hataların birikerek artmasını önlemektir. Şekil 3.4'te hassas geometrik nivelmanda ölçme düzeni görülmektedir. Öncelikle, gerideki mirada sol bölüm ( $g_i$ ), sonra ilerideki mirada sol bölüm ( $i_i$ ), daha sonra yine ilerideki mirada sağ bölüm ( $i_{ii}$ ) ve son olarak gerideki mirada sağ bölüm ( $g_{ii}$ ) okunur.



Şekil 3.4 Hassas geometrik nivelmanda ölçme düzeni

Hassas nivelmanda hesap aşağıdaki formüllere göre yapılır.

$$\left. \begin{array}{l} g_i - i_1 = h_1 \\ g_{ii} - i_{ii} = h_{ii} \end{array} \right\} H_B - H_A = \frac{[h_1] + [h_{ii}]}{2} \quad (3.5)$$

Kontroller ise aşağıdaki gibidir.

$$[g_i] - [i_1] = [h_1] \quad (3.6)$$

$$[g_{ii}] - [i_{ii}] = [h_{ii}] \quad (3.7)$$

$$[h_1] - [h_{ii}] = [h_1 - h_{ii}] \quad (3.8)$$

Mira 0.5 cm bölümlü ise bulunan yükseklik değeri ikiye bölünür. Bir gidiş - dönüş ölçüsünün normal koşullarda karesel ortalama hatası  $\pm 0.2\text{mm}$  kadardır (Özhan,1994).

Gidiş- dönüş ölçüsünün karesel ortalama hatası;

$$m = \pm \sqrt{\frac{[dd]}{2n}} \quad (3.9)$$

formülüyle belirlenir. Bir yükseklik farkının karesel ortalama hatası ise;

$$M = \pm \frac{m}{2} = \pm \frac{1}{2} \sqrt{\frac{[dd]}{n}} \quad (3.10)$$

ile bulunur. Burada;

[dd] : Gidiş-dönüş ölçüler farkının kareleri toplamı

n : Çift ölçü farklarının sayısıdır.

Genel olarak hassas nivelman ölçümlerinde dikkat edilmesi gereken hususlar:

- Yükseklik noktalarının tesisleri, başlangıç ölçmelerinin yapılmasından 3 – 6 ay önce tamamlanmalıdır.
- Barajlardaki yükseklik ağırları varsa hidrostatik nivelman düzeneği ile bağlantılı olmalıdır.
- Yüksek duyarlıklı nivelman için çift nivelman geri-ileri/ileri-geri okuması şeklinde yapılmalıdır.
- Gözlemleri aynı gözlemci, aynı nivo ve miraları kullanarak aynı atmosferik koşullar altında yapılmalıdır.
- Gidiş ve dönüş nivelmanı aynı ekip tarafından, aynı aletlerle yapılmalıdır.
- Niveloların temel koşulları test edilmelidir.
- Alet ve mira kurulan yerler mümkün olduğunca sert zeminler üzerinde seçilmelidir. Miralar için ağır mira altlıkları kullanılmalıdır.
- Mira-alet uzaklığı geri-ileri okumalar için eşit olmalıdır. Eğimin fazla olduğu yerlerde ise mira-alet uzaklığı biraz daha kısaltılabilir. Eğer alet iki mira arasına eşit uzaklıkta kurulmazsa küreselliğin ve kırılmanın etkileri düzeltme olarak getirilmelidir.
- Alette gözlem eksen hatası varsa giderilmelidir.
- Mira düzeç yardımıyla tam düşey konumda tutulmalıdır.
- Mira bölüm başlangıç hatasını önlemek için ölçüme hangi mira ile başlanmışsa, aynı mira ile devam edilmelidir.
- Kompansatörlü nivelalarda küresel düzeç hep aynı miraya yöneltme yapılarak ayarlanmalı ve ilk okuma hep aynı mirada yapılmalıdır.
- Mira çiftleri kontrol edilmelidir. Her bir miranın sıfır noktası belirlenmelidir. Miraların sıfır noktası hatası farkı belirlenmelidir.

### 3.5.2.2 Hassas Trigonometrik Nivelman Yöntemi

Hassas geometrik nivelmanın yanında günümüzde, elektronik uzunluk ölçerler kullanılarak uzunluk ölçülerinin yüksek doğrulukta elde edilmesi sonucunda, hassas trigonometrik nivelman yöntemi de deformasyon ölçmelerinde yükseklik farklarının belirlenmesinde kullanılmaktadır (Hoşbaş, 2004).

Geometrik nivelman yöntemi, yüksek hassasiyete sahip olmasına karşın, uygulama bakımından her zaman ekonomik ve kolay olmayabilir. Özellikle topografik yapının bozuk olduğu yerlerde ve dağlık bölgelerde uygulanabilirlik bakımından zayıf kalmakta ve doğruluk kaybına uğramaktadır. Böyle durumlarda kullanılacak alternatif yöntemler arasında en önemlisi, trigonometrik nivelmanın kısa uzunluklarda karşılıklı olarak uygulandığı hassas trigonometrik nivelman yöntemidir (Soycan, 2002).

Kenar ölçüsü hatası, düşey açı ölçüsü hatası, kırılmanın etkisi, pilye yüksekliği, hedefleme hatası ve alet yüksekliği hatası dikkate alındığında iki nokta arasındaki uzaklığa bağlı olarak yükseklik farklarının ortalama hataları için uygulamalar sonucunda Çizelge 3.1’de verilen değerler elde edilmiştir (Witte ve Schmidt, 1995).

Çizelge 3.1 Trigonometrik nivelmanda uzaklığa bağlı olarak yükseklik farklarının ortalama hataları (Witte ve Schmidt, 1995)

Noktalar arasındaki uzaklık	$\sigma_{\Delta h}$
50 m	0.6 mm – 0.8 mm
100m	0.8 mm – 1.6mm
200m	1.4 mm – 2.5 mm

500 m' den kısa uzunluklarda çekül sapmasının yükseklik üzerindeki etkisinin çok küçük olduğu kabul edilebilir. Yeryuvarı eğriliği ise eşit uzunluklarda giderilmektedir. Bu durumda geriye kalan en önemli etki kırılma etkisi olup, bu etki, noktalar arası uzunluklar kısa seçilip, sıçramalı trigonometrik nivelman yöntemi veya uygun meteorolojik koşullarda karşılıklı düşey açı gözlemleri yapılarak büyük ölçüde indirgenebilmektedir.

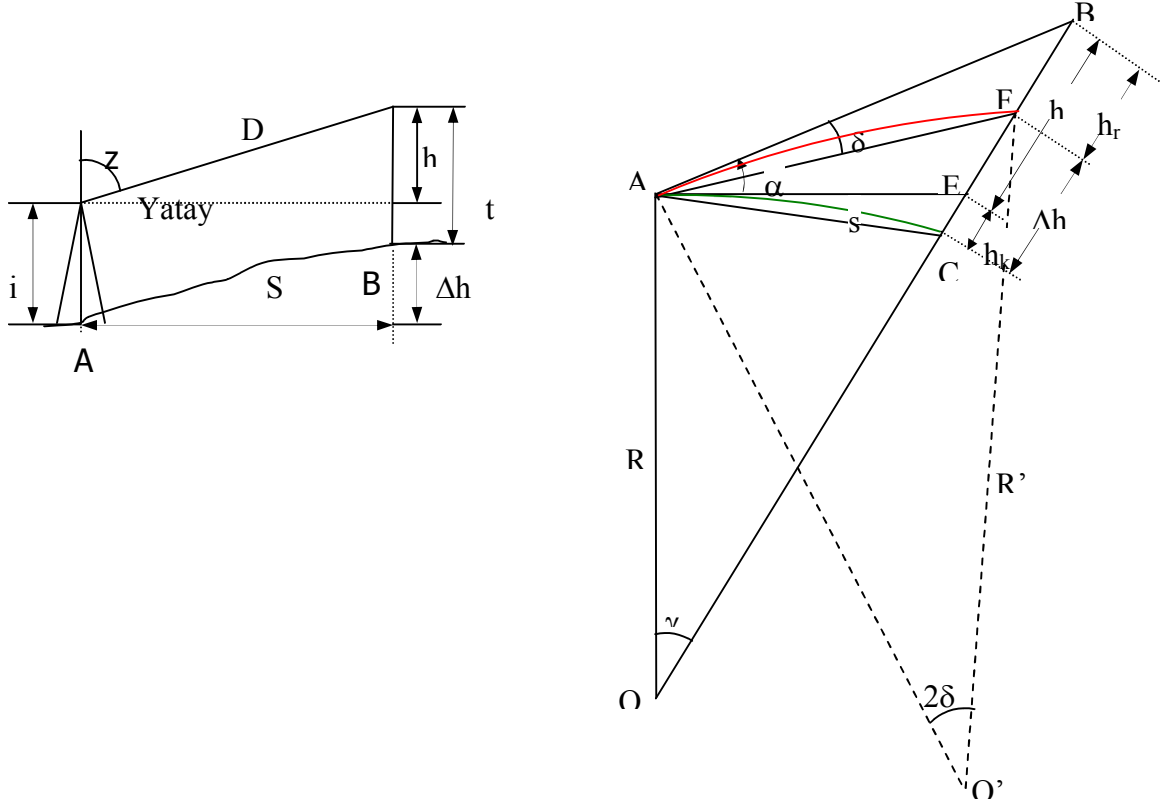
Pratikte trigonometrik nivelman üç şekilde uygulanmaktadır;

- Tek taraflı ölçmeler ile,
- Sıçramalı ölçmeler ile,
- Karşılıklı veya eş zamanlı karşılıklı ölçmeler ile (Soycan, 2002).



### a) Tek Taraflı Ölçmelerle Trigonometrik Nivelman

Tek taraflı ölçmelerle trigonometrik nivelman yönteminde, ölçme aleti, Şekil 3.5'te görüldüğü gibi yükseklik farkı belirlenecek noktalardan sadece birine kurulmakta ve ölçmeler tek taraftan yapılmaktadır (Soycan, 2002).



Şekil 3.5 Tek taraflı ölçmelerle trigonometrik nivelman (Erkaya, 2006)

$R = 6373394$  m (Dünyanın yarıçapı),

$R' = R/k$  (Işın yayının yarıçapı),

$k$  = Kırılma (refraksiyon) katsayısı,

$h_k$  = Yerin küreselliğinin etkisi,

$h_r$  = Refraksiyonun (ışığın kırılmasının) etkisi,

$\Delta H$  = A ve B noktaları arasındaki yükseklik farkı,

$$Z = 100^\circ - \alpha \quad (3.11)$$

$$h = s * \tan \alpha = s * \cot Z \quad (3.12)$$

Şekil 3.5'ten,

$$H_B = H_A + i + h - t \quad (3.13)$$

$$h = S \cot Z \quad \text{Yatay uzunluğa göre,} \quad (3.14)$$

$$h = D \cos Z \quad \text{Eğik uzunluğa göre} \quad (3.15)$$

yazılabilir.  $h$ 'ın değeri yukarıdaki (3.13) eşitliğinde yerine konursa,

$$H_B = H_A + i + S \cot Z - t \quad (3.16)$$

$$H_B = H_A + i + D \cos Z - t \quad (3.17)$$

eşitlikleri elde edilir. İki nokta arasındaki yükseklik farkının trigonometrik olarak hesaplanabilmesi için, bu noktalardan birine teodolit kurularak, diğer noktadaki işarete bakılır ve düşey açı ile birlikte yatay ya da eğik uzunluk ölçülür. Ayrıca durulan noktada alet yüksekliği (yatay eksene kadar), bakılan noktada da işaret yüksekliği ölçülür.

$$h_k = \frac{s^2}{2R} \quad (3.18)$$

Işın yayı, bir daire yayı olarak alınabilir ve yarıçapı  $R'$  ile gösterilirse, ışığın kırılmasının etkisi de, yerin küreselliğinin etkisine benzetilerek

$$h_r = \frac{s^2}{2R'} = \frac{s^2}{2 \frac{R}{k}} = \frac{s^2 \cdot k}{2R} \quad (3.19)$$

yazılabilir. Şekil 3.5'ten görüldüğü gibi, küreselliğin etkisi daima (+), ışığın kırılmasının etkisi ise eksi daima (-) dir. Refraksiyon (kırılma) katsayısı verilmezse ya da bilinmiyorsa, ülkemizde  $k = 0.13$  ortalama değeri kullanılır.

$$\Delta H = h + h_k - h_r \quad (3.20)$$

$$\Delta H = s \cdot \cot Z + \frac{s^2}{2R} - \frac{s^2 \cdot k}{2R} \quad (3.21)$$

$$\Delta H = s \cdot \cot Z + \frac{(1-k) \cdot s^2}{2R} \quad (3.22)$$

Alet ve işaret yükseklikleri de dikkate alınır,

$$\Delta H = s \cdot \cot Z + \frac{(1-k)}{2R} \cdot s^2 + i - t \quad (3.23)$$

olarak elde edilir. Alet kurulan noktanın yüksekliği biliniyorsa, bakılan noktanın yüksekliği aşağıdaki eşitlik ile bulunur.

$$H_B = H_A + \Delta H = H_A + s \cdot \cot Z + \frac{(1-k)}{2R} \cdot s^2 + i - t \quad (3.24)$$

Yerin küreselliğinin ve ışığın kırılmasının etkisi  $k = 0.13$ ,  $R = 6373394$  m alınarak, belirli uzunluklar için hesaplanmış ve Çizelge 3.2’de verilmiştir.

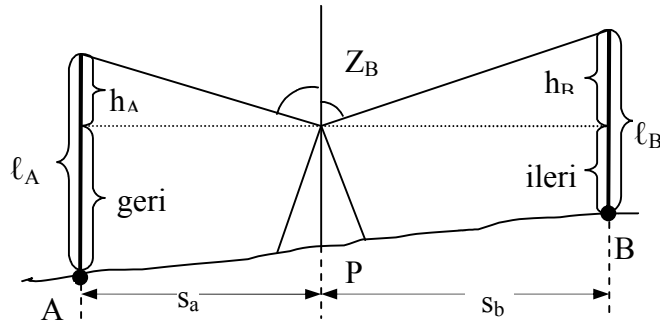
Çizelge 3.2 Yerin küreselliğinin ve ışığın kırılmasının etkisi (Erkaya, 2006)

$s_i$	50 m	100 m	250 m	500 m	1 km
$h_k$	0.20 mm	0.78 mm	4.90 mm	19.61 mm	78,45 mm
$h_r$	-0,03 mm	-0.10 mm	-0.64 mm	-2.54 mm	-10.20 mm
$H_k+h_r$	0.17 mm	0.68 mm	4.26 mm	17.07 mm	68.25 mm

Farklı atmosferik koşullarda, farklı zamanlarda, her iki noktada yapılacak ölçmelerden bulunacak yükseklik farklarının ortalaması, tek taraflı ölçmelerle trigonometrik nivelman doğruluğunu artırabilir (Soycan, 2002).

### b) Sıçramalı Ölçmelerle Trigonometrik Nivelman

Geometrik nivelmana benzer şekilde, Şekil 3.6’da görüldüğü gibi ölçme aleti, yükseklik farkı belirlenecek iki nokta arasına yerleştirilerek yapılan düşey açı ve uzunluk ölçmeleriyle noktalar arasındaki yükseklik farkı, tek taraflı iki gözlem eşitliğinin farkı alınmak suretiyle belirlenmektedir (Soycan, 2002).



Şekil 3.6 Sıçramalı ölçmelerle trigonometrik nivelman (Erkaya, 2006)

Trigonometrik nivelmanla iki nokta arasındaki yükseklik farkının bulunmasında, geometrik nivelmandaki geri - ileri bağıntısından yararlanır (Erkaya, 2006).

$$\Delta H_{AB} = H_B - H_A = \text{geri} - \text{ileri} = (\ell_A - h_A) - (\ell_B - h_B) \quad (3.25)$$

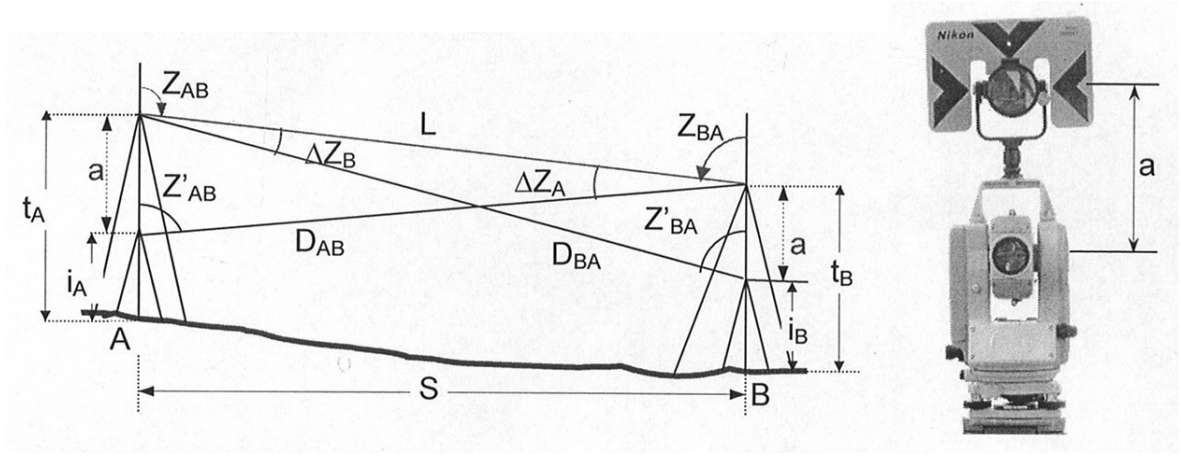
$$H_B - H_A = \ell_A - s_a \cdot \cot Z_A - \ell_B + s_b \cdot \cot Z_B \quad (3.26)$$

$$H_B = H_A + s_b \cdot \cot Z_B - s_a \cdot \cot Z_A + \ell_A - \ell_B \quad (3.27)$$

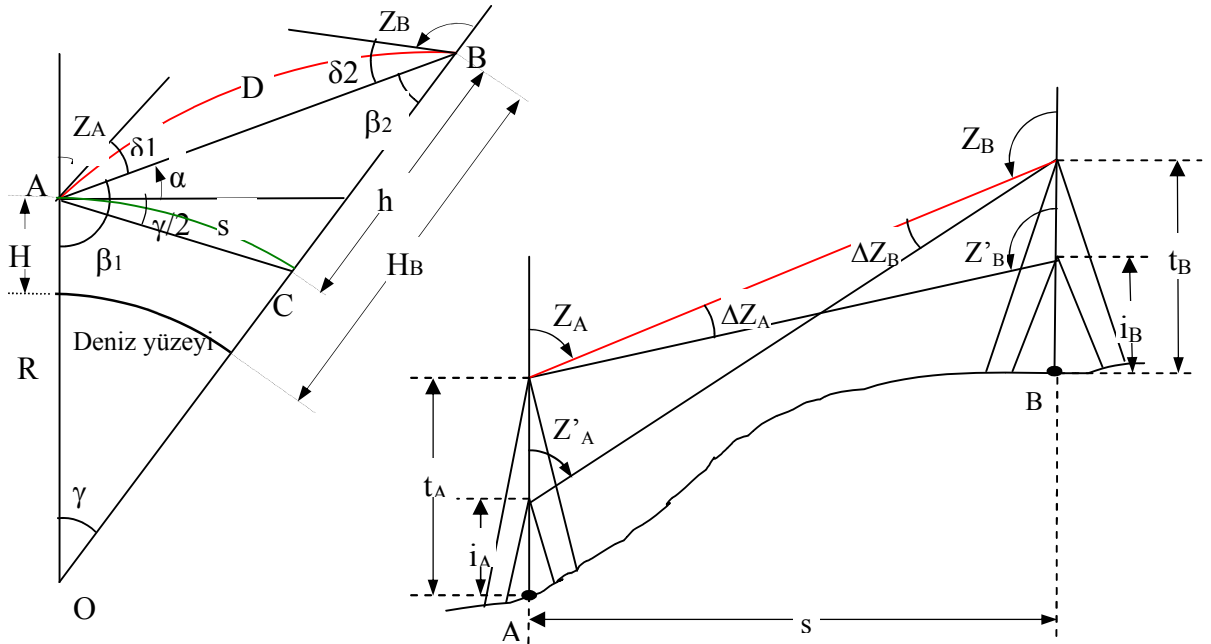
### c) Karşılıklı ölçmelerle trigonometrik nivelman

En hassas yöntem olmasına karşın, uzun zaman ve özel bir ölçme donanımı gerektiren bir yöntemdir. Ölçmelerin yapılabilmesi için, minimum iki elektronik takeometre veya iki teodolit ile bir uzaklık ölçer gerekmektedir. Düşey açıların karşılıklı olarak ölçülmesi ile kırılma etkisi minimuma indirgenmektedir (Soycan, 2002).

Aralarındaki yükseklik farkı belirlenecek iki noktada da Şekil 3.7’de görüldüğü gibi üzerine reflektör yerleştirilmiş elektronik takeometre (total station) olmalıdır. Bu iki noktada eş zamanlı karşılıklı gözlemlerle düşey açı ve eğik uzunluklar ölçülürse, iki nokta arasındaki yükseklik farkı hesaplanabilir. Elektronik takeometrenin yatay eksenini ile üzerindeki reflektör arasındaki a mesafesinin her alet için, bir kez incelikli olarak ölçülmesi yeterlidir. Daha sonra ölçüm anında, yalnızca elektronik takeometrelerin yatay ekseninin zemindeki noktadan olan mesafesinin ölçülmesi yeterli olur. Düşey açı ölçümünde, yatay gözlem çizgisinin hedef levhasındaki < > işaretlerinin ortasına tatbik edilmesi yerinde olur (Erkaya, 2006).



Şekil 3.7 Üzerine reflektör yerleştirilmiş elektronik takeometre (total station) (Erkaya, 2006)



Şekil 3.8 Karşılıklı gözlemlerle iki nokta arasındaki yükseklik farkının belirlenmesi

(Erkaya, 2006)

$Z'$  : Ölçülen zenit açısı

$Z$  : İşaret tepesine indirgenmiş zenit açısı

$$\Delta Z_A = \frac{t_A - i_A}{s} \cdot \rho \quad Z_A = Z'_A + \Delta Z_A \quad (3.28)$$

$$\Delta Z_B = \frac{t_B - i_B}{s} \cdot \rho \quad Z_B = Z'_B + \Delta Z_B \quad (3.29)$$

Tanjant teoremine göre Şekil 3.8'deki OAB üçgeninden;

$$\frac{(R + H_B) - (R + H_A)}{(R + H_B) + (R + H_A)} = \frac{\tan \frac{\beta_1 - \beta_2}{2}}{\tan \frac{\beta_1 + \beta_2}{2}} \quad (3.30)$$

yazılabilir.

$$\frac{\beta_1 + \beta_2}{2} = \frac{200^\circ - \gamma}{2} = \frac{\pi}{2} - \frac{\gamma}{2} \quad (3.31)$$

$$\tan \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} = \tan\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\gamma}{2}\right) = \cot \frac{\gamma}{2} \quad (3.32)$$

$$\beta_1 = 200^\circ - (Z_A + \delta_1) \quad (3.33)$$

$$\beta_2 = 200^\circ - (Z_B + \delta_2) \quad (3.34)$$

$$\beta_1 - \beta_2 = 200 - Z_A - \delta_1 - 200 + Z_B + \delta_2 = Z_B + \delta_2 - Z_A - \delta_1 \quad (3.35)$$

$$\tan \frac{\beta_1 - \beta_2}{2} = \tan \frac{Z_B + \delta_2 - Z_A - \delta_1}{2} \quad (3.36)$$

$\tan \frac{\beta_1 + \beta_2}{2}$  ve  $\tan \frac{\beta_1 - \beta_2}{2}$  değerleri, yukarıda (3.31) eşitliğinde yerlerine konulursa,

$$\frac{H_B - H_A}{2R + H_B + H_A} = \frac{\tan \frac{Z_B + \delta_2 - Z_A - \delta_1}{2}}{\cot \frac{\gamma}{2}} \quad (3.37)$$

olur.  $\Delta h_{AB} = H_B - H_A$  çekilirse,

$$\Delta H_{AB} = H_B - H_A = 2R \cdot \left(1 + \frac{H_A + H_B}{2R}\right) \cdot \frac{\tan \frac{Z_B + \delta_2 - Z_A - \delta_1}{2}}{\cot \frac{\gamma}{2}} \quad (3.38)$$

$$\Delta H_{AB} = H_B - H_A = 2R \cdot \tan \frac{\gamma}{2} \cdot \left(1 + \frac{H_A + H_B}{2R}\right) \cdot \tan \frac{Z_B + \delta_2 - Z_A - \delta_1}{2} \quad (3.39)$$

$\gamma$  küçük açı olduğundan

$$\tan \frac{\gamma}{2} = \frac{\frac{s}{2}}{R} = \frac{s}{2R} \Rightarrow 2R \cdot \tan \frac{\gamma}{2} = s \quad (3.40)$$

yazılabilir. AB ışın yayı bir daire yayı olarak kabul edilirse  $\delta_1 = \delta_2$  olur. Ayrıca,

$$\frac{H_A + H_B}{2} = H_m \quad (3.41)$$

denilir ve A ile B noktalarındaki işaret yükseklikleri de dikkate alınırsa,

$$\Delta H_{AB} = H_B - H_A = s \cdot \left(1 + \frac{H_m}{R}\right) \cdot \tan \frac{Z_B - Z_A}{2} + t_A - t_B \quad (3.42)$$

şeklini alır. Noktalar arasındaki s uzaklığı ya da ortalama yükseklik  $H_m$  küçük ise parantez içindeki terim ihmal edilebilir. Bu durumda,

$$\Delta H_{AB} = H_B - H_A = s \tan \frac{Z_B - Z_A}{2} + t_A - t_B \quad (3.43)$$

olur. Formüldeki  $Z_A$  ve  $Z_B$  açıları işaret tepesine indirgenmiş zenit açılarıdır. A noktasının yüksekliği biliniyorsa, B noktasının yüksekliği;

$$H_B = H_A + \Delta H_{AB} = H_A + s \left(1 + \frac{H_m}{R}\right) \tan \frac{Z_B - Z_A}{2} + t_A - t_B \quad (3.44)$$

şeklinde yazılabilir.  $\Delta H_{AB}$  yükseklik farkı aşağıdaki formülle de hesaplanabilir:

İşaret yükseklikleri dikkate alınmadan A ve B noktaları arasındaki yükseklik farkları;

$$\Delta H_{AB} = s \cdot \cot Z_A \quad (3.45)$$

$$\Delta H_{BA} = s \cdot \cot Z_B \quad (3.46)$$

biçiminde yazılabilir. Bu iki değer ortalama alınarak,

$$\Delta H_{AB} = \frac{\Delta H_{AB} + (-\Delta H_{BA})}{2} = \frac{\Delta H_{AB} - \Delta H_{BA}}{2} = \frac{s \cdot \cot Z_A - s \cdot \cot Z_B}{2} = s \cdot \frac{\cot Z_A - \cot Z_B}{2} \quad (3.47)$$

elde edilir. İşaret yükseklikleri de dikkate alınırsa,

$$\Delta H_{AB} = H_B - H_A = S \frac{\cot Z_A - \cot Z_B}{2} + t_A - t_B \quad \text{olur} \quad (3.48)$$

Yatay uzunluk yerine eğik uzunluk kullanılırsa (3.48) numaralı eşitlik yerine,

$$\Delta H_{AB} = H_B - H_A = D \frac{\cos Z_A - \cos Z_B}{2} + t_A - t_B \quad (3.49)$$

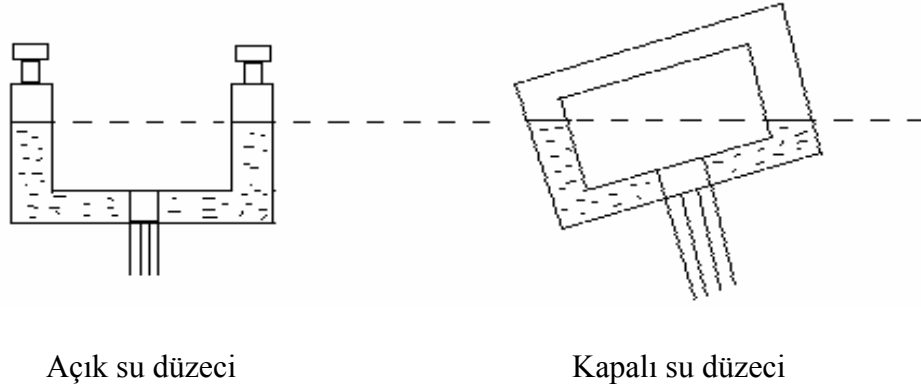
olur. (3.48) numaralı eşitlikten elde edilen sonuçla, (3.43) numaralı eşitlikten elde edilen sonuçlar aynıdır. İki nokta arasındaki yükseklik farkı hesaplanırken, önce (3.43) veya (3.48) numaralı eşitliklerden birine göre aranan nokta yüksekliği hesaplanır, sonra (3.44) numaralı eşitlikten noktanın kesin yüksekliği elde edilir (Erkaya, 2006).

### 3.5.2.3 Hidrostatik Nivelman Yöntemi

Hidrostatik nivelman, birleşik kaplar prensibine göre çalışan bir yöntemdir. Noktalar arasındaki yükseklik farklarını belirlemede kullanılan bu yöntem, antik çağda Mısır'daki piramitlerin zemin yüksekliklerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Günümüzde hortumlu terazi çoğu kez inşaat alanlarında kullanılmaktadır. Bunun yanında hidrostatik nivelman, özel uygulamalar için yüksek duyarlılıklı bir ölçme yöntemi olarak geliştirilmiştir. Küçük alanlarda makine tesislerinin kurulmasında ve mühendislik yapılarının kontrolünde yüksek duyarlılıklı bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Arazi ölçmelerinde uzun mesafelerde örneğin; vadi geçişlerinde ya da ada ile ana kara arasındaki yükseklik farklarının belirlenmesinde kullanılmaktadır (Hoşbaş, 2004).

Hidrostatik kanunlara göre yapılan bu nivelman aslında bir çeşit geometrik nivelmandır. Su yüzeyinin yatay olması nedeniyle yatay gözlem eksenini yerine su yüzeyi kullanılmıştır. Su düzeyleri hidrostatik aletlerin en basiti olup; Şekil 3.9'da görüldüğü gibi açık su düzeyi ve kapalı su düzeyi olmak üzere iki çeşittir. Birleştirme borusunun ortasına takılan bir kovan ile sistem kullanılır. Sıvının üst yüzeyi yatay bir doğrultu teşkil eder. Bu üst yüzler ile miraya çıplak gözle bakılır ve okuma yapılır. Geri ve ileri okuma farkı iki nokta arasındaki yüksekliği verir (Özhan, 1994).

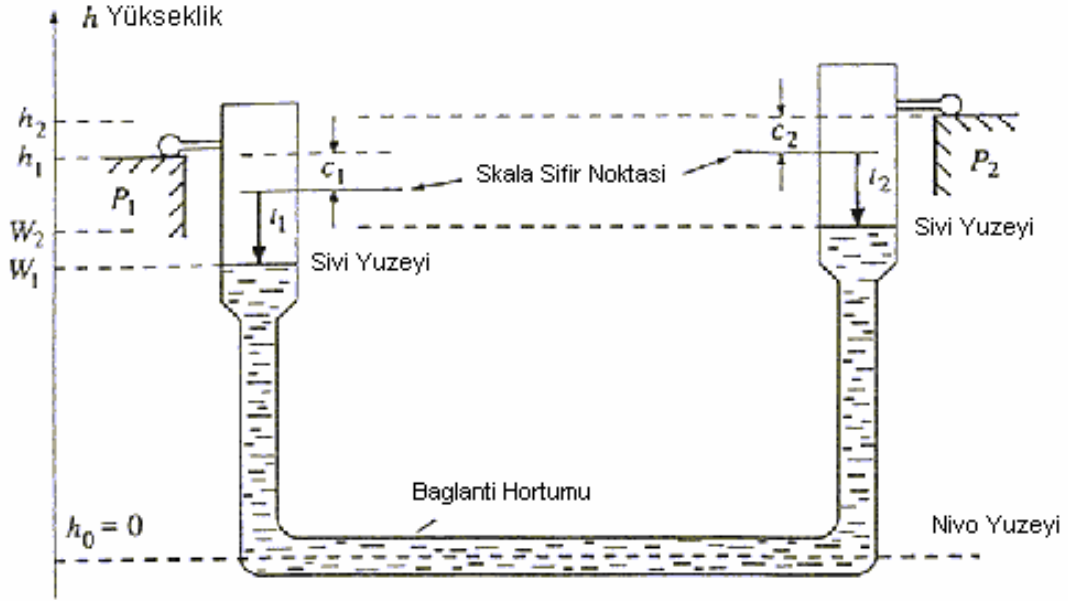




Şekil 3.9 Açık ve kapalı su düzeçleri

Bunlardan başka bir de hortumlu su düzeçleri vardır. Bunların hassasiyeti basit su düzeçlerine kıyasla daha yüksektir. Bu tür aletler iki cam şişenin 20-40m uzunluğunda plastik bir hortum ile birleştirilmesinden elde edilirler. İki nokta arasındaki yükseklik farkı, şişelerin üzerindeki bölümlerden geri ve ileri okuma farkları ile bulunur. Burada iki ölçme noktasının birbirini görmesinin zorunlu olmaması, önemli bir avantajdır (Özhan,1994).

Hassas hortumlu su düzeçlerinde okumalar, mikrometre vidası yardımıyla yapılır. Bir iğne ucu sıvı yüzeyine temas ettirilir. Mikroskop düzeneği aracılığıyla bu ayarlamaların inceliği sağlanır. Cam şişeler ise pirinç veya çelik kap içerisine, sadece milimetre bölümleri görünecek şekilde yerleştirilirler. Hortumun şişeye bağlandığı yerdeki musluk aracılığıyla da sıvı serbest bırakılır ya da kapatılır. Bazı tiplerinde ise kapların düşeyliğini sağlamak için kabın tabanına birbirine dik iki düzeç konur. Daha sonra iki kap ölçme noktaları üzerine düşey olarak yerleştirilir, musluklar açılır, sıvı denge sağladıktan sonra okuma yapılır. Sistemin hassas olabilmesi için aletin her yerinde eşit sıcaklık koşullarının sağlanması gereklidir. Aksi halde sıvı değişik sıcaklıklarda değişik genleşmeler gösterir ve iki kaptaki su seviyesi aynı olmaz. Hortumun içindeki hava kabarcıkları da hassasiyeti etkileyeceğinden okumalara başlamadan önce hortumu iyice sallamak suretiyle olası hava kabarcıkları eritilmelidir. Eşit hava koşullarının oluşması ve suyun denge konumuna gelmesi için 10-15 dakika beklenir ve okumalar yapılır. Mesafe arttıkça bu hassasiyet yarıya düşer. Bu düzenele 25 metreye kadar hassas nivelman yapılır. Fakat mesafe arttıkça bu hassasiyet yarıya düşer. Bununla beraber, izole edilmiş donanım ile kullanılan hortumlu su düzeçlerinin hassasiyeti uzaklıkla değişmez. 100 metrede bile hassas nivelman yapılabilir (Özhan,1994).



Şekil 3.10 Hidrostatik nivelman prensibi (Kahmen, 2006)

Şekil 3.10'da görülen hidrostatik nivelman prensibinden;

$$h_i = W_i + l_i + c_i \quad (3.50)$$

$W_i$  : Başlangıç yüzeyindeki sıvı yüzeyi yüksekliği

$l_i$  : Skalada okunan yükseklik

$c_i$  : Sıfır noktası düzeltmesi

$P_1$  ve  $P_2$  arasındaki yükseklik farkı için;

$$\Delta h_{12} = h_2 - h_1 = (l_2 - l_1) + (c_2 - c_1) + (W_2 - W_1) \quad (3.51)$$

ifadesi geçerlidir.

Yüksek duyarlık istemlerinde sıfır noktası düzeltmesi ve borulardaki seviye farkına özen gösterilmelidir (Kahmen, 2006).

$$\Delta c = c_2 - c_1 \quad (3.52)$$

$$\Delta W = W_2 - W_1 \quad (3.53)$$

Daha az duyarlık istemlerinde, borulardaki skaladan okunması ve karşılaştırılması yeterlidir (Kahmen, 2006).

Hidrostatik nivelman yöntemi, mühendislik ölçmeleri alanında aşağıdaki durumlarda düşünülebilir:

- Hassas nivelman aletleriyle elde edilenden çok daha fazla bir hassasiyet beklendiğinde,
- Kuvvetli yer hareketlerinin bulunduğu ya da refraksiyonun etkili olduğu bölgelerdeki ölçmelerde,
- Ulaşılması güç noktaların yükseklik belirlenmesinde,
- Yerçekimi değişimlerinin ya da yer hareketlerinin belirlenmesinde,
- Yükseklik noktalarının, özellikle büyük mühendislik yapılarının ve makine tesislerinin yüksekliklerinin kesintisiz ve sürekli kontrolünde (Erkaya, 1987).

#### 4. DEFORMASYON ÖLÇÜLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Jeodezik deformasyon araştırmasına önce her ölçme dönemine ait ölçülerin ayrı ayrı dengelenmesi ile başlanır (Hoşbaş,1992). Dengeleme hesabının amacı, gereğinden fazla sayıda yapılmış ölçülerden hiç birini seçip ayıklamaksızın, bilinmeyenlerin en uygun değerlerini belirlemek, ölçülerin, kesin değerlerini ya da bunların fonksiyonlarının duyarlıklarını ve güvenilirliklerini saptamaktır. Bu amaca ulaşabilmek için uygulanan ilke, Gauss'un ( $v^T P v = \min$ ) "En küçük kareler ilkesi"dir (Öztürk ve Şerbetçi, 1995).

##### 4.1 Dolaylı Ölçüler Dengelemesi

Jeodezik ağın dolaylı olarak dengelenmesi durumunda en az iki noktanın koordinatları sabit alınır. Barajlarda kurulan jeodezik ağlarda bu yöntem kullanılacaksa, barajın basınç alanı dışında ve sağlam zeminde tesis edilen iki noktadan yararlanılır (Hoşbaş, 1992).

Fonksiyonel model için;

$$v = Ax - l \quad (4.1)$$

stokastik model için ise;

$$P = Q_{ll}^{-1} \quad (4.2)$$

eşitlikleri geçerlidir. Normal denklem katsayılar matrisi;

$$N = A^T P A \quad (4.3)$$

sabit terimler matrisi;

$$n = A^T P l \quad (4.4)$$

olmak üzere  $Nx - n = 0$  denkleminin çözümünden küçültülmüş bilinmeyenler vektörü;

$$x = (A^T P A)^{-1} n = Q_{xx} n \quad (4.5)$$

elde edilir. Dengelenmiş ölçüler ve koordinatlar;

$$\bar{l} = l + v \quad (4.6)$$

$$x = x_0 + \delta x \quad (4.7)$$

eşitlikleriyle elde edilir. Dengelenmiş ölçülerin ağırlık katsayıları matrisi;

$$\bar{Q}_{ll} = A Q_{xx} A^T \quad (4.8)$$

düzeltilmelerin ağırlık katsayıları matrisi;

$$Q_{vv} = P^{-1} - A Q_{xx} A^T = Q_{ll} - \bar{Q}_{ll} \quad (4.9)$$

şeklinde yazılabilir. Dengeleme sonunda birim ağırlıklı ölçünün karesel ortalama hatası;

$$m_0^2 = \frac{v^T P v}{n - u} \quad (4.10)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada n ölçü sayısını, u ise bilinmeyenlerin sayısını ifade etmektedir.

## 4.2 Serbest Ağ Dengelemesi

Ağın konumu, ölçeği, yönlendirilmesi ile ilgili zorlamaları ortadan kaldıran ve nokta duyarlıklarını gerçekçi biçimde yansıtan serbest ağ dengelemesi deformasyon analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Gülal, 1992).

Doğrultular yanında uzunluklarında ölçüldüğü iki ya da üç boyutlu bir ağda, ölçek belli olduğundan ağın bir koordinat sisteminde tanımı için gerekli bilgi sayısı bir azalır. Böyle ağlara “serbest ağlar” adı verilir. Serbest ağlarda tüm noktalar bilinmeyendir. Normal denklem katsayılar matrisi tekil, determinantı sıfıra eşittir. Rank bozukluğu ya da defekt sayısı, serbest datum parametrelerinin sayısına eşittir. Bilinmeyen sayısı u, rank bozukluğu d ile gösterildiğinde normal denklem katsayılar matrisinin rangı  $r = u - d$  olur. Normal denklem katsayılar matrisinin tekil olması, açık çözüm için gerekli ölçü sayısından daha çok bilinmeyen öngörülmesinden kaynaklanır (Demirel, 2001).

Joedezik ağlarda datum parametreleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Jeodezik ağlarda datum parametreleri (Gülal, 1992)

Ağ Tipi	Datum Defekti	Datum Parametreleri		
		Öteleme	Dönüklük	Ölçek
Yükseklik Ağı	1	1	-	-
Kenar Ağı	3	2	1	-
Doğrultu Ağı	4	2	1	1
Üç Boyutlu Ağ	7	3	3	1

#### 4.2.1 Tüm İz Minimum Çözümü

Tüm iz minimum çözümü, ağın tüm noktalarının datum tanımına katkıda bulunmasını öngören bir serbest dengelemedir. Buna göre, koordinat bilinmeyenleri vektörünün normu ve bunların kofaktörler matrisinin izi minimum olur.

Bu çözümün doğrusallaştırılmış fonksiyonel modeli, düzeltme denklemleriyle koordinat bilinmeyenleri arasındaki koşul denklemlerinden oluşur (Demirel, 2001).

$$v = A x_g - l \text{ (Düzeltilme Denklemleri)} \quad (4.11)$$

$$G^T x_g = 0 \text{ (Koşul Denklemleri)} \quad (4.12)$$

$x_g \rightarrow$  Koordinat bilinmeyenleri vektörü, ağın tüm noktalarını içerir.

$G \rightarrow$  Ağın datumunu tanımlar. Tüm noktalar datum tanımına katılır.

Koşul denklemleri sayısı, datum parametrelerinin sayısına eşittir. Nivelman ağları için normlandırılmış  $G^T$  matrisi;

$$G^T = \frac{1}{\sqrt{p}} [1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1] \text{ şeklindedir.} \quad (4.13)$$

Bilinmeyenlerin kareleri toplamının minimum olması koşulunu sağlayan tek anlamlı çözüm, normal denklem katsayılar matrisi  $N$ 'in tersi Moore Penrose yöntemine göre;

$$N^+ = (N + GG^T)^{-1} - G(G^T GG^T G)^{-1} G^T \quad (4.14)$$

bağıntısı ile hesaplanır.

Normal denklem katsayılar matrisinin Pseudo tersini alma işlemi için diğer bir çözüm  $N^+ = S D^{-1} S^T$  dir. N matrisinin sıfırdan farklı özdeğerlerinden oluşan köşegen matris D ve buna karşılık gelen normlandırılmış özdeğerler matrisi S ile işlem yapılır. Buna göre;

$$Q_g = N^+ \quad (4.15)$$

yazılabilir. Küçültülmüş bilinmeyenler,

$$x_g = N^+ n = Q_g n \quad (4.16)$$

şeklinde hesaplanır (Gülal, 1992).

#### 4.2.2 Kısmi İz Minimum Çözümü

Bu çözüm, ağıın tüm noktalarını içeren küçültülmüş koordinat bilinmeyenleri vektörünün bir bölümünün normunun ve ağırlık katsayıları matrisinin buna karşılık alt matrisinin izinin en küçük olmasını, yani ağıın noktalarından yalnızca bir bölümünün datum tanımına katılmasını öngören serbest dengelemedir. En uygun konumlandırma, ağıın yalnızca datum tanımına sokulan noktalar bölümünde gerçekleştirilmektedir (Demirel, 2001).

Kısmi iz minimum çözümünün fonksiyonel modeli oluşturulurken, tüm iz minimum yönteminin fonksiyonel modelindeki G yerine, G matrisinden datum tanımına katılmayan noktalara karşılık tüm elemanlar için "0" yazılarak elde edilen bir B matrisi geçmektedir. Bu durumda fonksiyonel model;

$$v = A x_i - l \text{ (Düzeltilme denklemleri)} \quad (4.17)$$

$$B_i^T x_i = 0 \text{ (Koşul denklemleri)} \quad (4.18)$$

biçimindedir.

Koordinat bilinmeyenlerinin  $Q_i$  ağırlık katsayıları matrisi, N normal denklem katsayıları matrisinin genel inversidir. Küçültülmüş bilinmeyenler;

$$Q_i = N^- \quad (4.19)$$

$$x_i = Q_i n \quad (4.20)$$

$$Q_i = (N + B_i B_i^T)^{-1} - G(G^T B_i B_i^T G)^{-1} G^T \quad (4.21)$$

şeklinde elde edilir.

### 4.2.3 Klasik Dengeleme

Datum tanımı için defekt sayısı kadar koordinat bilinmeyeninin seçildiği kısmi iz minimum çözümdür. E matrisinin köşegeni üzerinde datum noktalarına karşılık 1, diğerleri için 0 değeri yazılır.  $x$  küçültülmüş bilinmeyenleri vektörü içinde datum noktaları ilk sırada  $x_1$ 'i, diğerleri  $x_2$ 'yi oluştursun. Çözüm sonucu  $x_1 = 0$  ve  $Q_i$  matrisinin  $x_1$  alt vektörüne karşılık satır ve sütun elemanları 0 çıkar. Buna göre;

$$Q_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & Q_{x_2 x_2} \end{bmatrix}, \quad x_2 = Q_{x_2 x_2}^{-1} n_2 \text{ olur.} \quad (4.22)$$

A matrisinin  $x_2$  bilinmeyenlerine karşılık bölümü  $A_2$  ile gösterilirse, ağırlık katsayılar matrisi ve sabit terimler;

$$Q_{x_2 x_2} = (A_2^T P A_2)^{-1}, \quad n_2 = A_2^T P l \quad (4.23)$$

olur. Küçültülmüş koordinat bilinmeyenleri;

$$x_2 = Q_{x_2 x_2}^{-1} n_2 \quad (4.24)$$

şeklinde hesaplanır (Gülal, 1992).

### 4.2.4 S – Dönüşümü

Yeni bir dengeleme yapmaksızın, tüm serbest ağ dengelemelerinin sonuçları arasında bir S matrisiyle yapılan dönüşümlere S- dönüşümü adı verilir. Bu dönüşüm deformasyon analizinde büyük kolaylık sağlar.

Zorlamasız klasik dengeleme sonuçları,  $S_g$  ve  $S_i$  matrisleriyle tüm iz minimum ve kısmi iz minimum sonuçlarına dönüştürülebilir. Bu matrisler,

$$S_g = E - G(G^T G)^{-1} G^T \quad (4.25)$$



$$S_i = E - G(B_i^T G)^{-1} B_i^T \quad (4.26)$$

şeklindedir. Bu eşitliklerde E matrisi birim matristir.

Örneğin, zorlamasız klasik dengeleme sonuçları  $x_k$  ve  $Q_k$  ise tüm iz minimum sonuçları,

$$x_g = S_g x_k \quad (4.27)$$

$$Q_g = S_g Q_k S_g^T \quad (4.28)$$

ve kısmi iz minimum sonuçları,

$$x_i = S_i x_k \quad (4.29)$$

$$Q_i = S_i Q_k S_i^T \quad (4.30)$$

eşitlikleriyle elde edilir (Aydın, 2001).

### 4.3 Nivelman Ağlarında Duyarlık ve Güven Ölçütleri

Çeşitli nedenlerle kurulan nivelman ağlarının, amaçları için yeterli olup olmadıklarının denetlenmesi duyarlık ölçütleri ile yapılmaktadır. Duyarlık ölçütleri, geçerli bir dengeleme modeli ile yapılan hesaplama sonucu elde edilen büyüklüklerdir. Dengeleme modelinin geçerli olup olmadığı ya da ölçülerin değerlendirilmesi aşamasında model hataları oluşup oluşmadığı da güven ölçütleri ile denetlenir (Yalçınkaya, 1996).

#### 4.3.1 Nivelman Ağlarında Duyarlık Ölçütleri

Geçerli bir dengeleme modeli kullanılarak elde edilebilen duyarlık ölçütleri, ağın kalitesini denetleyen ölçütlerdir.

Dengelemenin matematik modeli, fonksiyonel model ile stokastik modelden oluşmaktadır.

Nivelman ağlarında matematik model;

$$\Delta h_{ij} + v_{ij} = H_j - H_i \quad (4.31)$$

şeklinde kurulur.

Burada ;

$H_i, H_j$  : i ve j noktalarının yükseklikleri,

$\Delta h_{ij}$  : i ve j noktaları arasında ölçülen yükseklik farkı,

$v_{ij}$  : Ölçüye eklenecek düzeltmedir.

Dengelemenin fonksiyonel modeli ve stokastik modeli aşağıdaki şekilde oluşturulur.

$$l + v = A x \quad (4.32)$$

$$K_{ll} = s_0^2 Q_{ll} \quad (4.33)$$

Model en küçük kareler ilkesine göre  $v^T P v = \min$  koşulunu sağlayacak biçimde çözümlerse;

$$x = (A^T P A)^{-1} A^T P l \quad (4.34)$$

$$Q_{xx} = (A^T P A)^{-1} \quad (4.35)$$

$$Q_{vv} = P^{-1} - A Q_{xx} A^T \quad (4.36)$$

$$v = -Q_{vv} P l \quad \text{olmak üzere birim ölçünün varyansı;} \quad (4.37)$$

$$m_0^2 = \frac{v^T P v}{n - u} \quad \text{şeklinde bulunur.} \quad (4.38)$$

#### 4.3.1.1 Model Hipotezinin Testi

Birim ölçünün ortalama hatası  $s_0$ , bu büyüklüğün dengelemeden sonra elde edilen soncul değeri  $m_0$  ile gösterilirse;

$$H_0 = E \{ s_0^2 \} = E \{ m_0^2 \} = \sigma_0^2 \quad (4.39)$$

biçiminde kurulur.

Gerek öncül değer  $s_0$  ve gerekse soncul değer  $m_0$  aynı bir kuramsal standart sapma  $\sigma_0$ 'ın

uygulamada elde değerleri olduklarından, umut değeri koruyan büyüklüklerdir (Öztürk ve Şerbetçi, 1995).

Test büyüklüğü T hesaplanır.

$$T = \frac{m_0^2}{s_0^2} \quad (4.40)$$

$T < F_{(f, f_0, 1-\alpha/2)}$  ise dengeleme modeli geçerlidir. Fonksiyonel model ve stokastik model yeterlidir.

$T > F_{(f, f_0, 1-\alpha/2)}$  ise dengeleme modeli geçersizdir. Kaba hatalı ölçü ya da ölçüler bulunabilir. Ağırlıkların doğru tahmin edilip edilmedikleri kontrol edilmelidir. Aletlerin ayar hataları denetlenmelidir. Fonksiyonel modelin yeterliliği incelenmelidir.

#### 4.3.1.2 Genişletilmiş Modelin Testi

Eğer gözlemlerde sistematik ölçü hataları varsa, dengelemenin stokastik modelinde hata yapıldığı kabul edilir. Bu durumda stokastik model gerçeğe uygun olarak belirlenir veya bu etki bozucu parametre ile temsil edilecek şekilde fonksiyonel modele eklenerek genişletilmiş fonksiyonel model elde edilir. Nivelman ağlarında bu bozucu etki refraksiyon olabilir. Bu durumda fonksiyonel model aşağıdaki gibi olur (Yalçınkaya, 1996):

$$\Delta h_{ij} + v_{ij} = H_j - H_i + \Sigma(r^2 \Delta Z) \quad (4.41)$$

Bu eşitlikte r mira uzaklığını,  $\Delta Z$  her alet kurmada belirlenen yükseklik farkını gösterir.

Başka bir bozucu etki, jeomağnetik etki olabilir. Bu durumda fonksiyonel model,

$$\Delta h_{ij} + v_{ij} = H_j - H_i + \varphi_{ij} a_1 \quad (4.42)$$

$a_1$  : jeomağnetik etki

$\varphi_{ij}$  : i ve j noktaları arasındaki enlem farkları olmak üzere oluşturulur.

Yukarıdaki gibi bozucu parametreler eklenerek genişletilmiş fonksiyonel model elde edilir (Yalçınkaya, 1996).

Bu durum aşağıdaki gibi genelleştirilebilir.

$$v + l + \Delta l = Ax + A_2 y \rightarrow \text{Genişletilmiş fonksiyonel model} \quad (4.43)$$

$\Delta l$  : Sistemik ölçü hataları vektörü

Y: Bozucu parametreler

$A_y$  : Bozucu parametrelerin katsayılar matrisi

$$K_{yy} = s_0^2 Q_{yy} \rightarrow \text{Bozucu parametrelerin varyans-kovaryans matrisi} \quad (4.44)$$

$Q_{yy}$  : Bozucu parametrelerin ters ağırlık matrisi

Genellikle bozucu parametrelerin varyans-kovaryans matrisinin belirlenmesi zordur. Bozucu parametrelerin katsayılar matrisi biliniyor, buna karşın stokastik özellikleri hakkında bilgi edinilemiyorsa özel bir durum ortaya çıkar (Yalçınkaya, 1996).

Bu durumda bozucu parametrelerin ağırlık matrisi  $P_{yy} = 0$  olur.

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 \\ 0 & K_{yy} \end{bmatrix} = \sigma_0^2 \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & P \end{bmatrix}^{-1} \quad (4.45)$$

Genişletilmiş model en küçük kareler yöntemine göre çözümlenerek,

$$x = Q_{xx} n_x + Q_{xy} n_y \quad (4.46)$$

$$y = Q_{yx} n_x + Q_{yy} n_y \quad (4.47)$$

elde edilir. Buradan düzeltmeler ve birim ölçünün ortalama hatası,

$$v = Ax + A_y y - l \quad (4.48)$$

$$m_g^2 = \frac{v^T P v}{n - u} \quad (4.49)$$

eşitlikleri ile hesaplanır.

Genişletilmiş dengeleme modelinin stokastik modelinde  $P_{yy} = 0$  alınırsa, sadece fonksiyonel model genişletilmiş olmaktadır. Bu durumda genişletilmiş fonksiyonel modelin testi, bozucu parametrelerin (y) ölçü vektöründe (I) sistematik hataya ( $\Delta$ ) neden olup olmadığının denetlenmesiyle aynı anlama gelmektedir. Başka bir deyişle, fonksiyonel modelin genişletilmesinin anlamlı olup olmadığı, bozucu parametrelerin (y) anlamlılık testiyle belirlenebilmektedir (Yalçınkaya, 1996).

$H_0: y = 0$  Sıfır Hipotezi

$H_s: y \neq 0$  Seçenek Hipotezi

Sıfır hipotezi geçerli ise; test büyüklüğü,

$$T_g = \frac{y^T Q_{yy}^{-1} y}{u_g m_g^2} \text{ olur.} \quad (4.50)$$

Payın serbestlik derecesi bozucu parametre sayısı olan  $u_g$ , paydanın serbestlik derecesi f olan Fisher dağılımındadır.

$T_g > F_{(u_g, f, 1-\alpha)}$  ise sıfır hipotezi geçersiz sayılır. Fonksiyonel modelin genişletilmesi anlamlıdır yorumu yapılır.

$T_g < F_{(u_g, f, 1-\alpha)}$  ise sıfır hipotezi geçersiz sayılamaz. Fonksiyonel modelin genişletilmesi anlamlı değildir yorumu yapılır.

#### 4.3.1.3 Dengeli Yükseklik Farklarının Bağlı Hataları

Dengeli yükseklik farklarının bağlı hataları, bir duyarlık ölçütüdür. Bu değerler, dengeli yüksekliklerden hesaplanan yükseklik farklarının ortalama hatalarının dengeli yüksekliklerin farklarına bölünmeleriyle hesaplanabilir (Yalçınkaya, 1996).

Dengeleme hesabı sonucunda bulunan dengeli yüksekliklerden hesaplanan yükseklik farkları;

$$\Delta h_{ij} = H_j - H_i \quad (4.51)$$

dengeli yüksekliklerin ters ağırlık matrisi ve birim ölçünün ortalama hatası,

$$Q_{hh} = (A^T P A)^{-1} \quad (4.52)$$

$$m_0^2 = \frac{v^T P v}{n - u} \quad (4.53)$$

hesaplanır. Dengeli yüksekliklerin farklarının ortalama hatası,

$$m_{ij} = m_0 \sqrt{q_{ii} - 2q_{ij} + q_{jj}} \quad (4.54)$$

eşitliği ile bulunur. Bu bağıntıda;  $q_{ii}$ ,  $q_{ij}$ ,  $q_{jj}$  dengeli yüksekliklerin ters ağırlık matrisindeki ilgili değerlerdir. Böylece dengeli yükseklik farklarının bağıl hataları  $m_{Bij}$ , dengeli yükseklik farklarının ortalama hatalarının ( $m_{ij}$ ), dengeli yükseklik farklarına ( $\Delta h_{ij}$ ) bölünmesiyle hesaplanır.

$$m_{Bij} = \frac{m_{ij}}{\Delta h_{ij}} \quad (4.55)$$

$m_{Bij}$  değerleri; dengeli yükseklik farklarının duyarlılıkları (komşuluk duyarlılıkları) hakkında bilgi veren, ağın datumundan bağımsız (invariant) ölçütlerdir (Yalçınkaya, 1996).

### 4.3.2 Nivelman Ağlarında Güven Ölçütleri

Jeodezik ağlarda güven, ağın geometrik yapısının olası model hatalarına karşı duyarlılığı olarak tanımlanmakta ve model hatalarının ortaya çıkartılabildiği ağlar, güvenilir ağlar olarak adlandırılmaktadır. Güven ölçütleri, ortaya çıkartılamayan model hataları için sınır değerler vermektedir (Gülal, 1992).

#### 4.3.2.1 İç Güven Ölçütü

Bir jeodezik ağı iç güvenirliliği, ölçülerdeki hataların kontrol edilebilirliği anlamına gelmekte ve model hataları için belli bir test gücü ile açığa çıkarılabilecek en küçük sınır değeri olarak tanımlanmaktadır.

$l_i$  ölçüsünde yapılan  $\Delta l_i$  kaba hatasının geçerli bir model ile yapılan dengeleme sonucunda bulunan düzeltmelere etkisi aşağıdaki şekilde hesaplanabilir. Geçerli bir dengeleme işleminde matematik model;

$$l + v = A x \quad (4.56)$$

$$v = -Q_{vv} P l \quad (4.57)$$

eşitliğiyle hesaplanır.

Geçersiz bir dengeleme modelinde genişletilmiş fonksiyonel model,

$$l + v = l' - \Delta l + v = A x \quad \text{şeklinde olur.} \quad (4.58)$$

Düzeltilmeler;

$$v = v + \Delta v \quad (4.59)$$

$$\Delta v = -Q_{vv} P \Delta l \quad \text{şeklindedir.} \quad (4.60)$$

Herhangi bir hatanın, o ölçünün düzeltilmesine olan etkisi, hatanın  $v_i$  düzeltilmesine olan etkisi;

$$\Delta v_i = -(Q_{vv} P)_{ii} \Delta l_i = -r_i \Delta l_i \quad (4.61)$$

bağıntısından hesaplanır.

Fazla ölçü sayısı (redundanz);

$\text{Iz}(Q_{vv} P) = \sum r = r = n - u$  olduğu düşünülürse, serbestlik ölçütü  $r_i$ , fazla ölçü sayısı  $r$  içinde  $i$ . ölçünün payı anlamına gelir.  $r_i$  büyüklüğü, ağın geometrisini tanımlar ve ölçüdeki sistematik ya da kaba hataların  $v_i$  düzeltilmesi içindeki payını verir.

Serbestlik ölçütleri önemli birer güven ölçütüdürler. Bunlar herhangi bir ölçüde yapılacak kaba hatanın yüzde kaçının, bu ölçüye ilişkin düzeltmeye yansıtacağını gösterirler. Ölçülerin birbirini karşılıklı kontrol edebilmesi için redundanz paylarının %100'e yakın olmaları istenir (Yalçinkaya, 1996).

İyi bir ağda, aşağıda verilen değerler sağlanmalıdır (Demirel, 2001).

Redundanz Payları :  $r_i > 0.3 - 0.5$

Hata Sınır Değerleri :  $\Delta l_i = (6 - 8) m_i$

İç güven ölçütü, bir ölçüdeki kaba hatanın model hipotezinin testi ya da model hatalarının

genel testi yöntemlerinin biriyle açığa çıkarılabilmesi için en az ne büyüklükte bir değere ulaşması gerektiğini gösterir.  $l_i$  ölçüsünde yapılan  $\Delta l_i$  kadar bir hatanın Baarda test büyüklüğüne etkisi;

$$\Delta W_i = \frac{\Delta v_i}{\sigma \sqrt{q_{v_i v_i}}} = \sqrt{r_i} \frac{\Delta l_i}{\sigma_{l_i}} \quad (4.62)$$

eşitliği ile hesaplanır.  $\sigma_{l_i} = \sigma / \sqrt{P_i}$ ,  $l_i$  ölçüsünün ortalama hatasıdır. Bir  $\Delta l_i$  hatasının büyüklüğü bilinmediğinden öngörülen istatistik güven  $S = 1 - \alpha_0$  için hangi büyüklükte bir hatanın  $\gamma_0$  test gücü ile ortaya çıkarılabileceği sorusuna yanıt aranır. Yanılma olasılığı  $\alpha_0$  ve test gücü  $\gamma_0$ 'a bağlı olarak dış merkezlik parametresi  $W_0 = \Delta_0 W_i$  belirlenir. Hatanın alt sınır değeri,

$$\Delta_{0i} = \sigma_{l_i} \sqrt{\frac{W_0}{r_i}} \quad (4.63)$$

hesaplanır. İyi kontrol edilebilir bir ağda iç güven ölçütleri birbirine yakın ve küçük sayısal değerler olmalıdır.  $\Delta_{0i}$  hata sınır değerleri; ölçülerin ortalama hatalarına,  $r_i$  serbestlik ölçütleri ile tanımlanan ağ geometrisine,  $1 - \alpha_0$  istatistik güveni ile  $\gamma_0$  test gücüne göre belirlenen  $W_0$  parametresine bağlıdır (Yalçınkaya, 1996).

#### 4.3.2.2 Dış Güven Ölçütü

Ağın dış güvenirliliği, ortaya çıkartılmayan model hatalarının dengeleme sonuçlarına etkileriyle açıklanır. Herhangi bir  $l_i$  ölçüsünde yapılan  $\Delta_{0i}$  hatasının dengeleme sonuçlarına etkisi önemsiz ise dış güvenirlilik sağlanmış olur (Gülal, 1992 ).

Bir  $l_i$  ölçüsüne ait  $\Delta_{0i}$  hatasının  $x$  bilinmeyenler vektörüne  $\Delta_{xi}$  etkisini bulabilmek için, ölçüler arasında korelasyon olmadığı kabul edilir ve  $\Delta_{0i}$ 'nin (4.63) eşitliği göz önünde bulundurulursa,



$$\Delta_{xi} = Q_{xx} A^T P \begin{bmatrix} 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta_{0i} \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.64)$$

elde edilir. Bu eşitlikten herhangi bir  $l_i$  ölçüsünde yapılan  $\Delta_{0i}$  kadar hatanın ağdaki bilinmeyenlerin tümünü etkilediği görülmektedir. Koordinat hataları  $\Delta_{xi}$  datuma bağlıdır. Ağın dış güveni için datuma bağlı olmayan bir ölçüt elde etmek istenirse,

$$\delta_{0i}^2 = \Delta_{0xi}^T K_{xx}^{-1} \Delta_{0xi} = \frac{1}{m_0^2} \Delta x^T Q_{xx}^{-1} \Delta x \quad (4.65)$$

buradan dış güven ölçütü,

$$\delta_{0i}^2 = m_0^2 \frac{W_0}{p_i r_i} = \frac{1-r_i}{r_i} W_0 \quad (4.66)$$

şeklinde elde edilir. Bilinmeyenlerin herhangi bir fonksiyonu  $\varphi = \Phi(x)$  maksimum hatası  $\Delta_{0\varphi}$  ile gösterilirse,

$$\delta_{0i}^2 \geq \frac{\Delta_{0\varphi}}{m_{\varphi}} \quad (4.67)$$

bağıntısı geçerli olur ve  $\Delta_{0\varphi}$  hatası  $\Delta_{0i}$  ve  $\delta_{0i}$  yardımıyla hesaplanabilir.  $\delta_{0i}$  değeri, datumdan bağımsız bir dış güvenilirlik ölçütüdür ve bilinmeyenlerin bir fonksiyonunun  $i$ . ölçüye ilişkin  $\Delta_{0i}$  sınır hatasından ne ölçüde etkilenebileceğini gösterir. Bu etkilenme, fonksiyonun ortalama hatasının 3 – 4 katını aşmamalıdır. İyi bir ağda  $\delta_{0i}$  değerinin olabildiğince küçük olması istenir (Yalçınkaya, 1996).

Sonuç olarak, hangi büyüklükteki ölçü hatalarının öngörülen test gücüne bağlı olarak tanınabileceği iç güvenilirlik ölçütü ile, tanınamayan hataların dengeleme sonuçlarını ne ölçüde etkileyebilecekleri dış güvenilirlik ölçütü ile belirlenir. İyi bir iç güvenilirlik, bütün ölçülerin dengeleme ile aynı ölçüde kontrol edilebilmesi, iyi bir dış güvenilirlik ise ortaya çıkartılmayan hataların dengeleme sonuçlarına etkilerinin küçük olması ile sağlanır (Gülal, 1992).

## 5. DEFORMASYON ÖLÇÜLERİNİN ANALİZİ

### 5.1 Deformasyon Analizinde Kullanılan Değerlendirme Yöntemleri

Jeodezik ağlarda yapılan deformasyon analizinde birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu bölümde, uygulamalarda sıklıkla tercih edilen birkaç yöntem açıklanmıştır.

#### 5.1.1 Analitik Yöntem ile Deformasyon Analizi

Bu yöntemle, önce ağı ölçü periyotları arasında geçen zaman içinde konumu (veya yüksekliği) değişmeyen noktalar aranır. Önce, farklı periyotlardan bulunan sonuçlar bir transformasyonla benzerlik dönüşümüne tabi tutulur. Daha sonra, bir ön test işlemi ile iki veya daha fazla stabil nokta belirlenir. Bundan sonra ağı iki periyodu birlikte dengelenerek sabit noktalar dışındaki noktalarda yeniden test işlemi uygulanır ve

$$Td_j = \frac{d_j^T Q_{d_j}^{-1} d_j}{2m_0^2} \quad (5.1)$$

eşitliğinden test büyüklüğü hesaplanır. Burada  $m_0^2$ , birim ağırlıklı ölçünün örnekleme varyansdır (Kalkan ve Alkan, 2005).

Testin karşılaştırma kriteri,  $1-\alpha$  istatistik güven  $2, f = n-u + r$  serbestlik dereceleri ile F-Fisher dağılım çizelgesinden alınır. Bu değer  $Td_j$ 'den büyük olması durumunda sıfır hipotezi geçerlidir. Yani  $P_j$  noktasında  $t_{i+1} - t_i$  zaman aralığında,  $\alpha$  yanılma olasılığı ile konum değişikliği yoktur. Ters durumda ise,  $P_j$  noktasında bir deformasyon oluştuğuna karar verilir. Bu test işlemi tüm obje noktaları için tek tek uygulanır. Elde edilen sonuçlara göre noktalarda anlamlı konum değişikliklerinin olup olmadığı istatistiksel olarak denetlenir (Akdoğan, 1998).

#### 5.1.2 Bağlı Güven Elipsleri (Karlsruhe Yaklaşımı) ile Deformasyon Analizi

Almanya'da Karlsruhe Üniversitesi Jeodezi Enstitüsü'nden Prof. B. Heck yürütücülüğünde 1975 – 1976 yıllarında geliştirilen bu yöntem, özellikle obje noktalarındaki değişimlerin grafik gösterimi ile görsel zenginlik içeren bir yöntemdir. Bu nedenle iki boyutlu ağlar için uygulanması durumunda, konum değişimlerinin güven alanının elipsle gösterilmesi nedeniyle "Bağlı Güven Elipsleri" veya geliştirildiği üniversitenin adıyla "Karlsruhe Yaklaşımı" olarak

adlandırılmaktadır.

Bu yöntemle deformasyon analizinde iki boyutlu ağlar için her bir nokta çiftinde bağıl güven elipslerinin elemanları hesaplanır ve uygun bir ölçekte çizilir. Aynı şekilde bu noktalara ait hareket vektörleri de bir ucu elips merkezinde olmak üzere aynı ölçekte çizilir. Vektörün elipsi taşıdığı noktalarda, deformasyonun varlığından söz edilebilir. Bu yöntem, doğrudan doğruya analitik yöntemin geometrik bir yorumudur (Kalkan ve Alkan, 2005).

### 5.1.2.1 Matematiksel Modelin Kurulması

Öncelikle her ölçme dönemine ait ölçüler serbest ağ olarak dengelenir. Matematiksel model;

$$l_i + v_i = A_i x_i \quad (5.2)$$

$$K_{l_{ii}} = \sigma_o^2 Q_{l_{ii}} \quad (5.3)$$

$$\text{cov}(l_i, l_j) = 0 \quad i \neq j \quad (5.4)$$

şeklinde kurulur. Burada i ve j indisleri,  $t_i$  ve  $t_j$  ölçme dönemlerini ifade etmektedir.

Ölçme dönemlerine ait  $\Omega_i$  karesel formlarından ve  $f_i$  serbestlik derecelerinden tüm düzeltmelerin ağırlıklı toplamı  $\Omega$  ve toplam serbestlik derecesi  $f$  bulunur (Hoşbaş, 1992).

$$\Omega = \Sigma \Omega_i \quad (5.5)$$

$$f = \Sigma f_i \quad (5.6)$$

### 5.1.2.2 Referans Noktalarının Belirlenmesi

Jeodezik kontrol ağı referans noktaları ve obje noktaları olarak gruplandırılır. Ağ bölümlerinin uygunluğunu kontrol etmek için tüm ölçme dönemlerine ait ölçüler birlikte dengelenir. İki dönemin birlikte değerlendirilmesi durumunda fonksiyonel model;

$$\begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{R1} & A_{01} & 0 \\ A_{R2} & 0 & A_{02} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_R \\ x_{01} \\ x_{02} \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

olur. Burada;

$x_R$  = Referans noktaları koordinat bilinmeyenleri vektörü

$x_{01}$  = Objeye noktaları koordinat bilinmeyenleri vektörü ( $t_1$  ölçme dönemi için)

$x_{02}$  = Objeye noktaları koordinat bilinmeyenleri vektörüdür ( $t_2$  ölçme dönemi için)

Nivelman ağlarında  $h$  koşullarının sayısı;  $h = 1$  (Referans noktaları sayısı) –  $d$  olur.

$$T_{Ref} = \frac{R_{Ref}}{h_{Ref} m_0^2} \quad (5.8)$$

$T$  test büyüklüğü,  $\alpha$  yanılma olasılığı için  $F_{\{h,f,\alpha\}}$  test büyüklüğü değerinden küçükse, ağın tüm referans noktalarının hareketsiz olduğu sonucuna varılır. Aksi takdirde referans noktalarındaki hareketli noktaların adım adım araştırılması gerekmektedir. Bunun için sırayla her defasında bir nokta değişken olarak alınır.

Fonksiyonel modelin yeni şekli;

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{R1} & A_{R1i} & 0 & A_{01} & 0 \\ A_{R2} & 0 & A_{R2i} & 0 & A_{02} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_R \\ X_{R1i} \\ X_{R2i} \\ X_{01} \\ X_{02} \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

olur. Referans noktaları kümesinden çıkarılması durumunda en küçük  $\Omega_H$ , yani  $R$  değerini veren noktanın hareketli olduğuna karar verilir. Test büyüklüğü;

$$T(i) = [R(i)_{min} / (h-1)] (f/\Omega) \quad (5.10)$$

olur. Bu referans noktası sonraki adımda objeye noktası gibi değerlendirilir. Eğer  $T(i)$  değeri hala  $F_{\{h-1,f,\alpha\}}$  değerinden büyükse kalan referans noktaları arasında işlem tekrar edilir. Böylece deformasyon belirlenmesine dayanak olacak hareketsiz referans noktaları belirlenmiş olur (Heck, 1983).

### 5.1.2.3 Deformasyonların Yerelleştirilmesi

Bu aşamada, kontrol ağının hareketsiz bölümünden faydalanılarak tek nokta hareketleri araştırılır. İki ölçme döneminin birlikte dengelenmesinde bilinmeyenler vektörü (5.7)

modeline göre;

$$\mathbf{x}^T = [\mathbf{x}_R \quad \mathbf{x}_{01} \quad \mathbf{x}_{02}] \quad (5.11)$$

şeklindedir.  $\mathbf{B}\mathbf{x} = \mathbf{w}$  koşul denklemlerinde geçen  $\mathbf{B}$  matrisi ve  $\mathbf{w}$  vektörü;

$$\mathbf{B} = [0_R \quad 0 \quad \dots \quad -I \quad \dots \quad 0 \quad \dots \quad I \quad \dots \quad 0], \quad \mathbf{w} = 0 \quad (5.12)$$

şeklinde alınarak sıfır ve seçenek hipotezleri;

$$H_0: \mathbf{x}_{02} - \mathbf{x}_{01} = 0 \quad (5.13)$$

$$H_a: \mathbf{x}_{02} - \mathbf{x}_{01} = \mathbf{d} \neq 0 \quad (5.14)$$

olarak öngörülür. Her obje noktası için  $d_i$  fark vektörü;

$$d_i = \mathbf{B}d \quad (5.15)$$

$$d_i = [dh]_i = [h_{02} - h_{01}]_i \quad (5.16)$$

şeklinde yazılır. Ağırlık katsayıları matrisi;

$$Q_{hh} = \begin{bmatrix} Q_{RR} & Q_{R01} & Q_{R02} \\ Q_{01R} & Q_{0101} & Q_{0102} \\ Q_{02R} & Q_{0201} & Q_{0202} \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

biçiminde alt matrislerden oluşur. Her obje noktası için fark vektörünün ağırlık katsayıları alt matrisi;

$$Q_{di} = \mathbf{B}Q_{xx}\mathbf{B}^T \quad (5.18)$$

$$Q_{di} = [Q_{hhd}]_i \quad (5.19)$$

$$Q_{hhd} = Q_{h1} + Q_{h2} - 2Q_{h12} \quad (5.20)$$

şeklinde olur. Her obje noktası için  $H_a$  seçenek hipotezince olanak tanınan  $d_i$  fark vektörünün deformasyon olup olmadığına kanaat getirebilmek için T test büyüklüğü;

$$T = \frac{\mathbf{d}_i^T \mathbf{Q}_{d_i}^{-1} \mathbf{d}_i}{m_0^2} \quad (5.21)$$

şeklinde oluşturulur. Test büyüklüğü;  $f_1=2$  ve  $f_2= f$  serbestlik dereceleri ve  $\alpha$  yanılma olasılığı ile F dağılımının buna ait sınır değerinden büyükse, o obje noktasının  $t_1$  ve  $t_2$  ölçme dönemleri arasında hareketli olduğu kanısına varılır. Deformasyon vektörünün büyüklüğü ve yönü;

$$\mathbf{d}_i = d\mathbf{h}_i \quad (5.22)$$

bağıntılarından bulunur (Hoşbaş, 1992).

Eğer T test büyüklüğü F sınır değerinden küçükse,  $\mathbf{d}_i$  fark vektörünün  $\alpha$  yanılma olasılığı ile istatistiksel olarak anlamlı olmadığı,  $\mathbf{d}_i$  fark vektörünün kaçınılmaz ölçü hatalarından kaynaklandığı yorumu yapılır.

#### 5.1.2.4 Deformasyonların Grafik Yorumu

$O_i$  obje noktasına ait  $\mathbf{d}_i$  fark vektörünün varyans-kovaryans matrisinin tersi;

$$\mathbf{K}_{d_i}^{-1} = \frac{\mathbf{Q}_{d_i}^{-1}}{m_0^2} \quad (5.23)$$

şeklindedir. Bu eşitlik test büyüklüğünde yerine konular ve  $T_i = F_{\{2, f, \alpha\}}$  alınır;

$$\mathbf{d}_i^T \mathbf{K}_{d_i}^{-1} \mathbf{d}_i = 2 F_{\{2, f, \alpha\}} \quad (5.24)$$

elde edilir. Bu eşitlik bir elips denklemdir ve dengeleme sonucunda bulunan  $O_{i1}$  ve  $O_{i2}$  nokta çiftine ait güven elipsini vermektedir. Dengeleme sonuçlarından  $\mathbf{d}_i$  fark vektörü ve  $\mathbf{Q}_{d_i}$  ağırlık katsayıları matrisi hesaplandıktan sonra aşağıdaki bağıntılarla Helmert bağıl hata elipsinin eksen uzunlukları belirlenir.

$$A_H = m_0 \sqrt{\lambda_A} \quad (5.25)$$

$$\lambda_A = 0.5 Q_{hhd} \quad (5.26)$$

Bu uzunluklarda  $\sqrt{2 F_{\{2, f, \alpha\}}}$  ile büyütülerek seçilen  $\alpha$  istatistiksel yanılma olasılığı ile  $O_i$  nokta çifti için güven aralığı bulunmuş olur. Eğer,

$$d_i > \sqrt{2 F_{\{2, f, \alpha\}}} m_{d_i} \quad (5.27)$$

ise  $d_i$  vektörünün deformasyon olduğuna karar verilir (Benning, 1983).

Bu bağıntıda  $\sqrt{2 F_{\{2, f, \alpha\}}}$  ifadesi,  $f$  serbestlik derecesinin büyük değerlerde olması durumunda 3 değerine yaklaşmaktadır. Dolayısıyla bu durum, fark vektörünün standart sapmanın 3 katından büyük olması halinde, deformasyon olarak yorumlanacağı sonucuna götürmektedir. (5.27) eşitliği üzerinde ağ geometrisin de etkili olacağı düşünüldüğünde, bağlı güven elipslerinde eksen uzunluklarının hesabına benzer şekilde;

$$d_i > \sqrt{2 F_{\{2, f, \alpha\}}} m_{d_i} \sqrt{\lambda_A} \quad (5.28)$$

bağıntısı yazılabilir.

Deformasyonların grafik yorumunda dengeleme sonuçlarına göre nokta çiftleri ölçekli biçimde çizildikten sonra, elemanları hesaplanmış bağlı güven aralıkları bu noktalardan biri üzerine yerleştirilir. Nokta çiftinin diğeri bu aralığın dışında kalıyorsa,  $(t_2 - t_1)$  aralığında düşey yönde konum değişikliği vardır yorumu yapılır (Hoşbaş, 1992).

### 5.1.3 Ortalama Aykırılıklar Yöntemi (Hannover Yaklaşımı) ile Deformasyon Analizi

Hannover Üniversitesi Jeodezi Enstitüsünde Prof. H. Pelzer yürütücülüğünde bir ekip tarafından geliştirilen bu yöntem, obje noktalarındaki değişimleri sabitliği istatistiksel olarak kanıtlanmış referans noktalarına dayalı olarak yine istatistiksel anlamda irdeleyen bir ölçüte göre incelemektedir. Bu ölçüte bağlı olarak “Ortalama Aykırılıklar Yöntemi,  $\theta^2$  - Ölçütü” veya üniversitenin adına istinaden “Hannover Yaklaşımı” olarak adlandırılmaktadır.

#### 5.1.3.1 Matematiksel Modelin Kurulması

Ağ noktalarının konumlarının belirlenmesi için, öncelikle farklı dönemlerde yapılan ölçüler ayrı ayrı serbest ağ yöntemi ile dengelenir (Demirkaya vd., 2005). Bu aşamada farklı dönemlerdeki ölçüler arasında korelasyon olmadığı kabul edilerek, iki ölçme dönemi için dengeleme modeli;

$$l_1 + v_1 = A_1 x_1 \quad (5.29)$$

$$A_1 P_1 A_1 x_1 - A_1^T P_1 l_1 = 0 \quad \rightarrow \quad N_1 x_1 - n_1 = 0, \quad x_1 = N_1^+ n_1 \quad (5.30)$$

$$N_1^+ = Q_1 = (N_1 + G G^T)^{-1} G (G^T G G^T G)^{-1} G^T \quad (5.31)$$

$$m_{01}^2 = \frac{v_1^T P_1 v_1}{f_1}, \quad f_1 = n_1 - u_1 \quad (5.32)$$

$$l_2 + v_2 = A_2 x_2 \quad (5.33)$$

$$A_2 P_2 A_2 x_2 - A_2^T P_2 l_2 = 0 \quad \rightarrow \quad N_2 x_2 - n_2 = 0, \quad x_2 = N_2^+ n_2 \quad (5.34)$$

$$N_2^+ = Q_2 = (N_2 + G G^T)^{-1} G (G^T G G^T G)^{-1} G^T \quad (5.35)$$

$$m_{02}^2 = \frac{v_2^T P_2 v_2}{f_2}, \quad f_2 = n_2 - u_2 \quad (5.36)$$

şeklinde kurulur. Bu eşitliklerde geçen  $G$  matrisi ağ noktalarının ağırlık merkezine indirgenmiş yaklaşık koordinatları ile kurulan bir matristir. Eğer iki ölçme dönemine ilişkin birim ağırlıklı ölçülerin standart sapmaları  $m_{01}$  ve  $m_{02}$  uyumlu ise, bunların ağırlıklı ortalaması;

$$m_0 = \sqrt{\frac{v_1^T P_1 v_1 + v_2^T P_2 v_2}{f_1 + f_2}} \quad (5.37)$$

$$m_0^2 = \frac{f_1 m_{01}^2 + f_2 m_{02}^2}{f}, \quad f = f_1 + f_2 \quad (5.38)$$

hesaplanır.

### 5.1.3.2 Test İstatistiğinin Oluşturulması

İki ölçme dönemi arasındaki hareketlerin belirlenmesi amacıyla sıfır hipotezi  $Bx - w = 0$  koşulu ile



$$H_0 = |-EE| \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = 0 \quad (5.39)$$

olarak öngörülür. Hipotez gerçekleşiyorsa ağda hareket olmadığı sonucuna varılır. Aksi durumda ise PELZER (1971) tarafından aykırılık vektörü olarak adlandırılan

$$d = x_2 - x_1 \quad (5.40)$$

fark vektörü oluşturulur (Demirkaya vd., 2005).

Bu vektöre ait tekil ağırlık katsayıları matrisi,

$$Q_{dd} = Q_{11} + Q_{22} \text{ şeklinde ifade edilir.} \quad (5.41)$$

Eğer sıfır hipotezi geçerli ise, d fark vektörünün ölçü hatalarından kaynaklandığı yorumu yapılabilir.  $Q_{dd}$ 'nin genelleştirilmiş inversi olan ağırlık matrisi (5.31) ve (5.35) eşitliklerindeki  $N_1$  ve  $N_2$ 'nin inversine benzer biçimde,

$$P_{dd} = Q_{dd}^+ = (Q_{dd} + GG^T)^{-1} G(G^T GG^T G)^{-1} G^T \quad (5.42)$$

şeklinde hesaplanır.

$Bx - w = 0$  koşulunun düzeltmelerin ağırlıklı kareleri toplamına etkisi,

$$\Omega_H = v_H^T P v_H = v^T P v + R \quad (5.43)$$

olmak üzere;

$$R = |x_2 - x_1|^T \begin{bmatrix} |-EE| \begin{bmatrix} A_1^T P_1 A_1 & 0 \\ 0 & A_2^T P_2 A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -E \\ E \end{bmatrix} \end{bmatrix} |x_2 - x_1| = d^T Q_{dd} d \quad (5.44)$$

olmaktadır. Burada önemli olan  $x_1$  ve  $x_2$  vektörlerinin aynı datumda olmasıdır (Demirkaya vd., 2005). Eğer jeodezik datumun irdelenmesi söz konusu ise;

$$h = \text{rang}\{Q_{11}\} = \text{rang}\{Q_{22}\} = \text{rang}\{Q_{11} + Q_{22}\} = \text{rang}\{Q_{dd}\} = u - d \quad (5.45)$$

olarak PELZER (1971) tarafından hesaplanan,

$$\theta = \sqrt{\frac{R}{h}} \quad (5.46)$$

değeri; ortalama aykırılık olarak adlandırılmıştır.

Eğer eşdeğerlik testinin test büyüklüğü

$$T = \frac{\theta^2}{m_0^2} = \frac{d^T P_{dd} d}{m_0^2 h} > F \{h, f, \alpha\} \quad (5.47)$$

ise,  $\alpha$  yanılma olasılığıyla ağ noktalarının birinin hareketli olduğu kanısına varılır (Demirkaya vd., 2005).

### 5.1.3.3 Referans Noktalarının Belirlenmesi

Hareketli noktaları belirleyebilmek için  $d$  fark vektörü ve onun  $P_{dd}$  ağırlık katsayıları matrisi  $S$  hareketsiz nokta grubunu,  $O$  hareketli nokta grubunu gösteren indisler olarak,

$$d = \begin{bmatrix} d_s \\ d_o \end{bmatrix}, \quad P_{dd} = \begin{bmatrix} P_{ss} & P_{so} \\ P_{os} & P_{oo} \end{bmatrix} \quad (5.48)$$

biçiminde alt matrislere ayrılır.

$$\bar{d}_o = d_o - P_{oo}^{-1} P_{os} d_s \quad (5.49)$$

$$\bar{P}_{ss} = P_{ss} - P_{so} P_{oo}^{-1} P_{os} \quad (5.50)$$

kısa gösterimleri ile  $Bx - w = 0$  koşulunun düzeltmelerin ağırlıklı kareleri toplamına etkisi

$$R = d^T P_{dd} d = d_s^T \bar{P}_{ss} d_s + \bar{d}_o^T P_{oo} \bar{d}_o \quad (5.51)$$

şeklinde stokastik olarak iki bağımsız bileşene ayrılır. Ağdaki nokta sayısı kadar  $R_i = (\bar{d}_o^T P_{oo} \bar{d}_o)_i$  aykırılık hesaplanır. Toplam aykırılık  $R$ 'deki payı en büyük olan,  $R_{maks} = \max(R_i)$  olan noktanın  $\alpha$  yanılma olasılığıyla hareketli olduğuna karar verilir.

Ağda başka hareketli nokta bulunup bulunmadığını sorgulamak için fark vektörü  $d$  ve bunun ağırlık katsayıları matrisi  $Q_{dd}$  bir  $S$  dönüşümü ile kalan noktaların datumuna dönüştürülür (Demirkaya vd., 2005).

Dönüşüm matrisi;

$$S_i = E - G(B_i^T G)^{-1} B_i^T \quad (5.52)$$

$$d_i = S_i d \quad (5.53)$$

$$Q_{didi} = S_i Q_{dd} S_i^T \quad (5.54)$$

şeklindedir.  $B_i$  matrisi,  $G$  matrisinin hareketli olup olmadığı sorgulanan noktasına karşılık gelen satır elemanları sıfırlanarak elde edilen matristir.  $i$ . Datum dönüşümünden sonra fark vektörü;

$$d_i = \begin{bmatrix} d_D \\ d_N \end{bmatrix} = S_i \begin{bmatrix} d_S \\ d_o \end{bmatrix} = S_i d \quad (5.55)$$

biçiminde alt matrislerden oluşur. Burada  $d_D$  datum dönüşümüne katılan noktaları,  $d_N$  ise dönüşüme katılmayan noktaları göstermektedir.  $d_S$  ve  $d_o$  alt vektörlerine ayırma işlemi, toplam aykırılıktaki payları en büyük olan  $R_{maks}$  noktalarının tümü  $d_o$  'da kalacak biçimde olursa  $i$ 'inci adımdan sonra,

$$R_{kalan} = d_D^T P_{DD} d_D \quad (5.56)$$

eşitliği ile hesaplanır. Kalan aykırılık için  $R_{kalan}$  'ın serbestlik derecesi

$$h_D = h - m \quad (m : \text{Bir boyutlu ağlarda bir, iki boyutlu ağlarda ise ikidir.}) \quad (5.57)$$

ile hesaplanan test büyüklüğü;

$$T_D = \frac{R_{kalan}}{m_0^2 h_D} \quad (5.58)$$

F-testinin  $F_{\{h_D, f, \alpha\}}$  olasılık değerinden büyükse  $i+1$ 'inci adıma geçilir. Bu aşamada, kalan kararlı noktalar arasında yine her defasında bir noktanın hareketli olduğu öngörülerek, işlem hareketli nokta kalmayınca kadar sürdürülür. Yeni bir S-dönüşümü ile yeni datum verilip, matrisler alt matrislere ayrılır (Demirkaya vd., 2005).

## 6. UYGULAMA

### 6.1 Pabuçdere Barajı'nın Tanıtılması

Pabuçdere Barajı, Kırklareli İli'nin doğusunda, Karadeniz kıyısında, Kıyıköy Beldesi'ne 4 km mesafede bulunan, batıdan doğu istikametinde akan, Yıldız dağlarından doğarak Karadeniz'e dökülen Pabuçdere üzerinde kurulmuş bir barajdır. Şekil 6.1'de konumu görülen Pabuçdere Barajı, Istranca Dereleri (Yıldız Dereleri) projesinin 7'nci barajıdır. Hizmete alınan diğer 6 baraj ile birlikte İstanbul'a yılda 235 milyon m<sup>3</sup> içme suyu temin edilerek hizmete sunulmuştur. Yıllık verimi 60 milyon m<sup>3</sup> olan baraj, yaklaşık 1.030.000 kişinin su ihtiyacını karşılamaktadır. Çizelge 6.1'de Pabuçdere Barajı'na ait özellikler verilmiştir.



Şekil 6.1 Pabuçdere Barajı'nın konumu (<http://earth.google.com>)

Çizelge 6.1 Pabuçdere Barajı'na ait özellikler

Baraj Tipi	Zonlu Kaya Dolgu
Baraj Kret Boyu	347 m.
Baraj Kret Genişliği	10 m.
Barajın Temelden Yüksekliği	52 m.
Barajın Yıllık Verimi	60 milyon m <sup>3</sup>
Terfi Hattı Uzunluğu	5428 m.
Terfi Hattı Çapı	1820 mm.
Boru Cinsi	Çelik

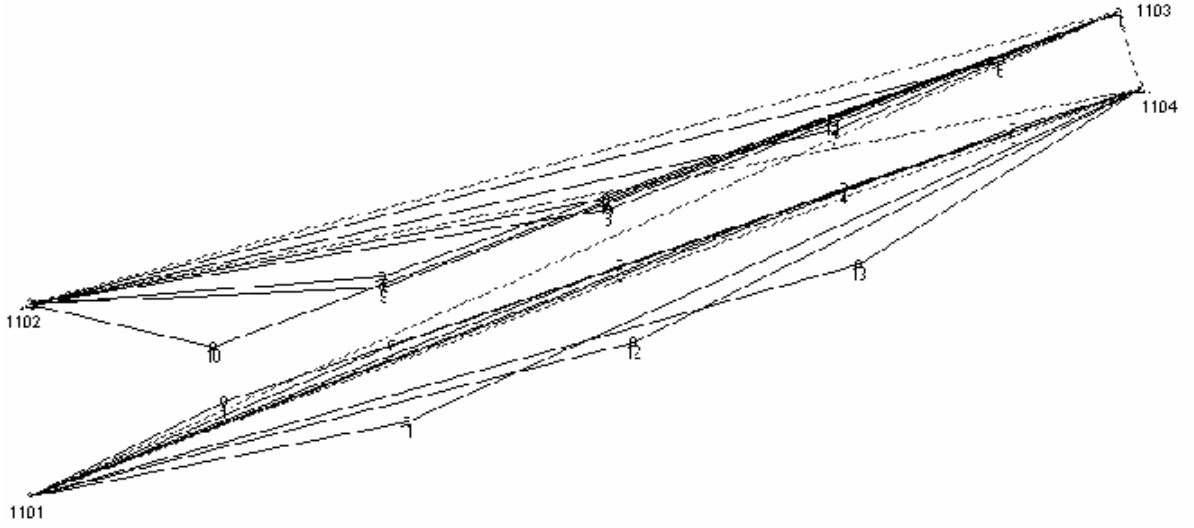
Kazandere ile Pabuçdere arasında 4.5 m. çapında irtibat tüneli açmak suretiyle Kazandere' ye gelen feyzan (taşkın) suyunun, biriktirme hacminin müsait olması sebebiyle, Pabuçdere Barajı rezervuarında toplanması sağlanmıştır. Pabuçdere Barajı zemininin killi ve siltli, taşıma gücünün zayıf olması sebebiyle, ana kayaca kadar bu zemin tamamen kazılarak atılmıştır. Ayrıca suyun geçirimsizliği için kesişen beton kazık sistemi uygulanmış, kontak, konsolidasyon ve perde enjeksiyonu yapılmıştır. Dolu savak yapımı için 150.000 m<sup>3</sup> kazı ve 16.000 m<sup>3</sup> beton imalat yapılmıştır. Dolu savak üzerinde üç adet radyel kapak mevcut olup her biri ortalama 80 ton civarındadır. Şekil 6.2'de görülen Pabuçdere Barajı, deprem ve sel baskınlarına karşı da yüksek drenajda inşa edilmiştir.



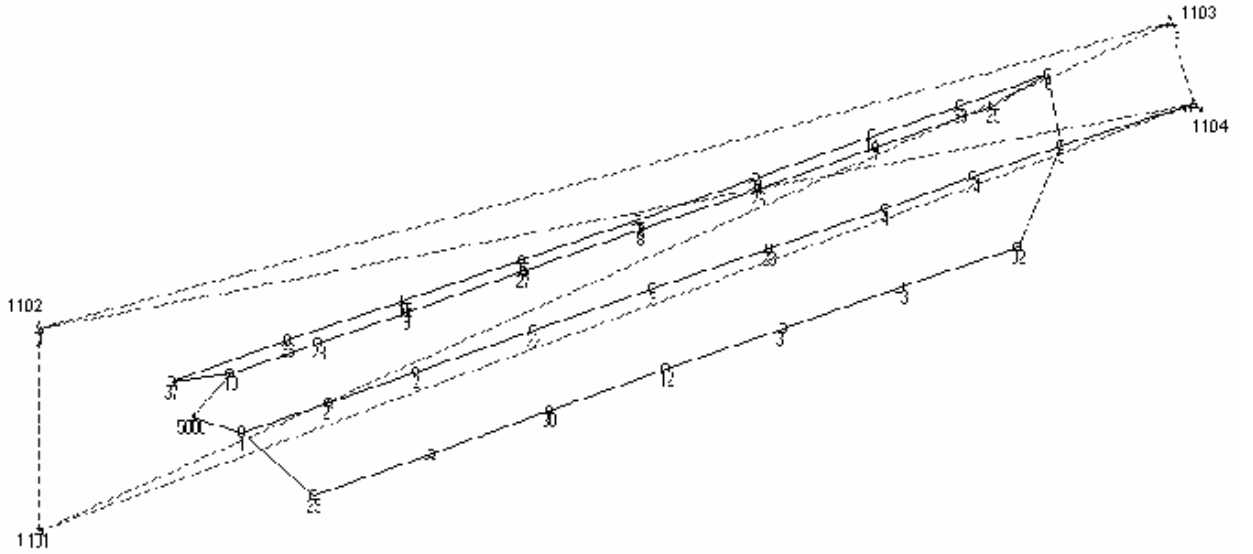
Şekil 6.2 Pabuçdere Barajı

## 6.2 Pabuçdere Barajı Jeodezik Kontrol Ağının Tanıtılması

Pabuçdere Barajı'nda yatay deformasyonları izlemek amacı ile oluşturulan yatay konum ağı, dört referans noktası ( 1101, 1102, 1103 ve 1104 ) ile 16 obje noktasından oluşmuştur. Obje noktaları 8'i memba diğer 8'i de mansap tarafında olmak üzere ikişer sıra halinde dizilmiştir. Referans noktaları normal pilye boyutlarında, obje noktaları ise kısa boylu pilye şeklinde tesis edilmiştir. Yatay konum ağının noktaları aynı zamanda düşey konum ağı noktaları olarak da tasarlanmıştır. Ancak yatay konum ağı iki obje noktası arasına ilave edilen 1'i bölgedeki RS olmak üzere toplam 18 nokta ile sıklaştırılmıştır. Dolayısıyla düşey konum ağı 1 RS ve 33 obje noktasından oluşmuştur (Aydın vd., 2004). Şekil 6.3'te barajın yatay konum ağı ve ölçü planı, Şekil 6.4'te ise düşey konum ağı ve ölçü planı görülmektedir.



Şekil 6.3 Pabuçdere Barajı yatay konum ağı ve ölçü planı



Şekil 6.4 Pabuçdere Barajı düşey konum ağı ve ölçü planı

### 6.3 Jeodezik Kontrol Ağındaki Ölçmeler

Pabuçdere Barajı'nda; Haziran 2003 (I. dönem), Eylül 2003 (II. dönem) ve Eylül 2004 (III. dönem) ölçme dönemlerinde; doğrultu ve kenar uzunluklarının ölçümünde kullanılan, Şekil 6.5'te görülen Leica TC2002 elektronik takeometresinin uzunluk ölçme doğruluğu 1+1 ppm, açı ölçme doğruluğu 0.15 mgon'dur (uygun atmosferik koşullarda, ATR sistemi ile özel prizmalar kullanılarak) (Henriques ve Casaca, 2006; [http://www.cartesiostrumenti.it/catalogo\\_prodotto.php/Leica%20Geosystems](http://www.cartesiostrumenti.it/catalogo_prodotto.php/Leica%20Geosystems)).

Yükseklik farklarının ölçümünde kullanılan Şekil 6.6'da görülen Wild Nak2 hassas nivelosunun; hassasiyeti 0.3mm (paralel-düzlem mikrometre ile), dürbün büyütmesi 32x, kompensatör ayar aralığı 0.3"dir (<http://www.sistemas.com.tr/page.php?ID=26>).



Şekil 6.5 TC2002 elektronik takeometresi

([http://www.cartesiostrumenti.it/catalogo\\_prodotto.php/Leica%20Geosystems](http://www.cartesiostrumenti.it/catalogo_prodotto.php/Leica%20Geosystems))



Şekil 6.6 WILD NAK2 otomatik nivelosu

(<http://www.mohaveinstrument.com/NewFiles/NAK2.html>)

Yatay doğrultular; Haziran 2003 ölçme döneminde üç silsile, Eylül 2003 ve Eylül 2004 ölçme dönemlerinde ise 2 silsile olarak ölçülmüştür. Yükseklik farklarının ölçümü, gidiş-dönüş olarak yapılmıştır. Yatay ve düşey konum ağı ölçü bilgileri Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2 Yatay ve düşey konum ağı ölçü bilgileri

Ölçme Dönemleri	Haziran 2003	Eylül 2003	Eylül 2004
Doğrultu sayısı	52	56	56
Kenar sayısı	52	56	56
Düşey açı sayısı	52	56	56
Yükseklik farkı sayısı	76	72	72

Yapılan istasyon dengelemeleri, üçgen kapanmaları ve tanı dengelemelerinden elde edilen doğrultu ölçmelerinin standart sapmalarının ağırlıklı ortalaması  $s_0 = 0.5$  mgon değerinin, doğrultu ölçüleri için öncül standart sapma değeri olarak alınması uygun bulunmuştur. Ölçmelerde kullanılan Leica TC2000 serisi aletlerde doğrultu ölçüleri için ortalama 0.3 mgon doğruluk değeri verilmektedir (Henriques ve Casaca, 2006; [http://www.cartesiostrumenti.it/catalogo\\_prodotto.php/Leica%20Geosystems](http://www.cartesiostrumenti.it/catalogo_prodotto.php/Leica%20Geosystems)).

Ölçmede kullanılan Leica TC2002 elektronik takeometre aletinin kenar ölçme doğruluğu için  $\sigma_s = 1 + 1 \text{ppm}$  bağıntısı verilmektedir. Bu durumda doğrultuların ağırlıkları ile kenar uzunlukların ağırlıkları arasında büyük farklar oluşmaktadır. Kaldı ki, bu ölçü doğruluğu ATR sistemi sayesinde ve özel prizmalar kullanılarak, uygun atmosferik koşullarda elde edilebilmektedir (Henriques ve Casaca, 2006). Uygulamada, doğrultu ölçüleri için verilen doğruluk değerinin yaklaşık iki katı bir değere ulaşılabilmesi nedeniyle, kenar ölçülerinin ağırlıklarının belirlenmesinde de alet için verilen nominal doğruluk bağıntısının iki katı alınarak,  $\sigma_s = 2 + 2 \text{ppm}$  seçilmesi uygun görülmüştür.

## 6.4 Yükseklik Verilerinin Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

### 6.4.1 Yükseklik Verilerinin Değerlendirilmesi

Geometrik ve trigonometrik nivelman ağlarında yükseklik farkları, dolaylı ölçüler yöntemi ile tüm iz minimum ilkesine göre, serbest ağ olarak dengelenmiştir. Pabuçdere Barajı düşey konum ağının noktaları arasındaki nivelman yolu uzunlukları 1 km’nin altında olup, 50 m ile 400 m arasında değişmektedir. Bu nedenle yükseklik farklarının dengelenmesinde, birim ağırlıklı ölçünün standart sapmasının hesabı için birim uzunluk olarak  $S_0 = 100$  m’lik nivelman yolu uzunluğu seçilmiştir.



#### 6.4.1.1 Hassas Geometrik Nivelman Verilerinin Dengelenmesi

Asıl nivelman ağının 33 noktadan oluşmasına karşın, trigonometrik nivelman ağında ölçülerin bunlardan 16 adetine yapılması nedeniyle, karşılaştırmayı kolaylaştırmak amacıyla aradaki diğer noktalar ağdan çıkarılmıştır. Bu durumda geometrik nivelman ağı; biri bölgedeki Rs (1000 numaralı nokta) noktası ile sekizi barajın memba kısmında, diğer sekizi ise mansap tarafındaki noktalar olmak üzere, 16 nivelman noktasından oluşmaktadır.

Geometrik nivelman verilerinin öncül duyarlıklarının belirlenmesi amacıyla, her bir ölçme dönemi için ölçü farklarının öncül standart sapma değerleri, gidiş-dönüş ölçü çiftlerinin farklarından hesaplanmıştır. Haziran 2003 ölçme dönemi için 0.20 mm, Eylül 2003 ölçme dönemi için 0.12 mm, Eylül 2004 ölçme dönemi için ise 0.15 mm değerleri elde edilmiştir. Ortalama değer olarak geometrik nivelman ağının dengelenmesi için, birim ağırlıklı ölçünün standart sapmasının  $s_0 = 0.15$  mm olarak alınması uygun görülmüştür.

Geometrik nivelman ağının dengelenmesi sonucunda; Haziran 2003 ölçme döneminde ölçülen üç yükseklik farkının, oluşturulan stokastik modele göre uyumsuz olduğu belirlenmiştir. Bu ölçü değerlerinin ağırlıkları düşürülmüş ve dengeleme sonrası birim ölçünün standart sapması  $m_0 = 0.16$  mm olarak bulunmuştur. Eylül 2003 ölçülerinin dengelenmesi sonucu birim ağırlıklı ölçünün standart sapması  $m_0 = 0.15$  mm ve Eylül 2004 ölçülerinin dengelenmesi sonucu birim ağırlıklı ölçünün standart sapması  $m_0 = 0.15$  mm olarak elde edilmiştir. Dengeleme hesabına ilişkin veriler ile dengeleme sonuçları Çizelge 6.3'te verilmiştir.

Çizelge 6.3 Pabuçdere Barajı geometrik nivelman ağı serbest dengeleme sonuçları

Ölçme Dönemi	Ölçülen Yükseklik Farkı Sayısı (n)	Bilinmeyen Sayısı (u)	Serbestlik Derecesi (f)	$\Omega$ [Pvv]
Haziran 2003	36	17	20	0,4841181
Eylül 2003	38	17	22	0,4962620
Eylül 2004	38	17	22	0,4888603

Dengeleme sonrası bulunan soncul standart sapma değerleri,  $s_0 = 0.15$  olarak öngörülen öncül standart sapma değeri ile karşılaştırılarak, (4.40) eşitliğine göre hesaplanmış ve her ölçme dönemi için oluşturulan stokastik modelin geçerli olduğu kanıtlanmıştır. Sonuçlar, Çizelge 6.4'te verilmiştir.

Çizelge 6.4 Stokastik model testi

Ölçme Dönemi	$s_0$	$m_0$	T	$F_{(f_1=\infty, f_2=f, \alpha=0.05)}$	Sonuç	Karar
Haziran 2003	0.15	0.16	1.2475	1.5815	T<F	Uyuşumlu
Eylül 2003	0.15	0.15	1.1864	1.5579	T<F	Uyuşumlu
Eylül 2004	0.15	0.15	1.0373	1.5579	T<F	Uyuşumlu

Geometrik nivelman ölçülerinin dengelenmesi sonrasında, her dönem için hesaplanan nokta yükseklikleri Çizelge 6.5'te görülmektedir.

Çizelge 6.5 Geometrik nivelman dengelemesi sonrası nokta yükseklikleri

Nokta No	$H_1$ (m)	$H_2$ (m)	$H_3$ (m)
1000	50.000359	50.005466	50.026161
1	48.627815	48.632103	48.649231
5	48.454746	48.459766	48.477608
6	49.808193	49.812237	49.823570
10	50.233871	50.237572	50.246445
2	48.395679	48.396133	48.400414
3	48.327904	48.327900	48.329742
4	48.237350	48.238945	48.245644
7	50.199234	50.197929	50.185158
8	50.312420	50.306969	50.282223
9	50.233898	50.229252	50.220051
11	37.255085	37.253345	37.254383
12	37.316650	37.314194	37.312103
13	37.295990	37.296150	37.302643
14	49.158546	49.157982	49.149632
15	49.362938	49.357990	49.335983
16	49.126324	49.123062	49.106018

#### 6.4.1.2 Hassas Trigonometrik Nivelman Verilerinin Dengelenmesi

Trigonometrik nivelman ağındaki ölçmeler; yatay kontrol ağının 4 referans noktası ile geometrik nivelman ağında da gözlenen, 16 nivelman noktasına yapılmıştır. Dolayısıyla trigonometrik nivelman ağı, 20 noktadan oluşmuştur. Trigonometrik nivelman ağı da yükseklik farklarına göre dengelenmiştir. Trigonometrik nivelman verilerinin öncül standart sapma değerinin belirlenmesi için, her üç ölçme dönemine ilişkin verilerle ayrı ayrı eşit duyarlıklı olarak tanı dengelemesi yapılmıştır. Hesaplanan öncül standart sapma değerlerinden, ortalama değer olarak  $s_0 = 3.00$  mm alınması uygun görülmüştür.

Üç ölçme dönemi için, trigonometrik yükseklik farklarının serbest dengelenmesine ilişkin veriler ve soncul standart sapma değerleri çizelge 6.6'da verilmiştir.

Çizelge 6.6 Pabuçdere Barajı trigonometrik nivelman ağı serbest dengeleme sonuçları

Ölçme Dönemi	Ölçülen Düşey Açı Sayısı (n)	Bilinmeyen Sayısı (u)	Serbestlik Derecesi (f)	$\Omega$ [Pvv]	$m_0$ (mm)
Haziran 2003	52	20	33	370,5164013	3,35
Eylül 2003	54	20	35	373,7086182	3,27
Eylül 2004	54	20	35	326,7338446	3,06

Dengeleme sonrası bulunan soncul standart sapma değerleri, öngörülen öncül standart sapma değeri ile karşılaştırılarak, (4.40) eşitliğine göre hesaplanmış ve her ölçme dönemi için oluşturulan stokastik modelin geçerli olduğu kanıtlanmıştır. Sonuçlar Çizelge 6.7’de verilmiştir. Trigonometrik nivelman ölçülerinin dengelenmesi sonrasında her dönem için hesaplanan nokta yükseklikleri Çizelge 6.8’de görülmektedir.

Çizelge 6.7 Stokastik model testi

Ölçme Dönemi	$s_0$	$m_0$	T	$F_{(f_1=\infty, f_2=f, \alpha=0.05)}$	Sonuç	Karar
Haziran 2003	3.00	3.35	1.2475	1.5815	T<F	Uyuşumlu
Eylül 2003	3.00	3.27	1.1864	1.5579	T<F	Uyuşumlu
Eylül 2004	3.00	3.06	1.0373	1.5579	T<F	Uyuşumlu

Çizelge 6.8 Trigonometrik nivelman dengelemesi sonrası nokta yükseklikleri

Nokta No	$h_1$ (m)	$h_2$ (m)	$h_3$ (m)
1101	49.193346	49.197351	49.220709
1102	50.854568	50.855951	50.876269
1103	53.116641	53.111898	53.131388
1104	53.000730	52.988304	53.012444
1	48.637014	48.639395	48.650690
2	48.394787	48.397318	48.398404
3	48.331052	48.326849	48.327432
4	48.238007	48.236881	48.242012
5	48.455948	48.458308	48.474554
6	49.809189	49.815365	49.823585
7	50.198956	50.199524	50.178748
8	50.309387	50.306179	50.276405
9	50.229228	50.225486	50.199714
10	50.230741	50.239301	50.240053
11	37.251693	37.253137	37.253832
12	37.318624	37.317803	37.310313
13	37.292405	37.294601	37.297812
14	49.158530	49.161377	49.145837
15	49.359533	49.357997	49.340812
16	49.123620	49.120974	49.102988

## 6.4.2 Dengeleme Sonuçlarının Analizi

Bu çalışmada, düşey konum ağındaki değişimlerin jeodezik istatistik analizinde daha kesin sonuç vermesi göz önünde bulundurularak “Ortalama Aykırılıklar Yöntemi” kullanılmıştır. Görsel açıdan daha anlaşılır olması nedeniyle grafik sonuçlar ise (yükseklik farkları ve güven aralıkları) “Bağıl Güven Elipsleri Yöntemi”ne göre elde edilmiştir.

### 6.4.2.1 Hassas Geometrik Nivelman Dengelemesi Sonuçlarının Analizi

Geometrik nivelman ağı verilerinin analizinde, ağın iki nokta grubuna ayrılması öngörülmüştür. Ağı oluşturan 17 noktadan barajın etki alanı dışında bulunması nedeniyle hareketsiz olması gerektiği varsayılarak, 5 nivelman noktası referans noktası olarak seçilmiştir. Bu noktalar; Rs noktası, sağ sahildeki 1 ve 10 numaralı noktalar ile sol sahildeki 5 ve 6 numaralı noktalardır. Geri kalan 12 nivelman noktası ise, obje noktası olarak değerlendirilmiştir. Karşılaştırmada kolaylık sağlamak amacıyla ölçme dönemleri ikişer ikişer ele alınarak irdelenmiştir.

- (I – II) Ölçme dönemleri arası deformasyon analizi:

Önce düşey kontrol ağının herhangi bir yerinde anlamlı hareket olup olmadığını irdelemek üzere global test büyüklüğü;

$$R_{G12} = d_{G12}^T \bar{P}_{dd} d_{G12} = 438.9031$$

$$\theta_{G12}^2 = \frac{R_{G12}}{h_{G12}} = \frac{438.9031}{17-1} = 27.4314$$

$$T = \frac{\theta_{G12}^2}{m_0^2} = \frac{27.4314}{0.0233} = 1175.1775 \quad \text{olarak hesaplanmıştır.}$$

F (h=16, f=42,  $\alpha=0.05$ ) = 1,8903 olarak bulunmuş ve  $F < T$  olduğundan, kontrol ağının herhangi bir yerinde anlamlı yer değiştirme olduğu sonucuna varılmıştır. Ardından, değişimin referans noktaları kümesinden kaynaklanıp kaynaklanmadığını irdelemek üzere aynı test referans noktalarından oluşan ağa uygulanmıştır.

$$R_{R12} = d_{R12}^T \bar{P}_{dd} d_{R12} = 14.2878$$

$$\theta_{R12}^2 = \frac{R_{R12}}{h_{R12}} = \frac{14.2878}{5-1} = 3.5719$$

$$T = \frac{\theta_{R12}^2}{m_0^2} = \frac{3.5719}{0.0233} = 153.0237 \text{ olarak bulunmuştur.}$$

F (h=4, f=42,  $\alpha=0.05$ ) = 2,5864 < T olduğundan, referans noktalarından en az birinin hareketli olduğu sonucuna varılarak, hangi referans noktasında anlamlı düşey değişim olduğunun belirlenmesi amacıyla, tek nokta hareketlerinin irdelenmesine geçilmiştir. İrdelenmeye hareketsiz referans noktaları belirleninceye kadar devam edilmiş ve ardından hareketli olduğu varsayılan obje noktalarının belirlenmesi aşamasına geçilmiştir. Noktalardaki hareketlerin belirlenmesine ilişkin büyüklükler ve sonuçlar hareket sırasıyla Çizelge 6.9'da görülmektedir.

Analiz sonrası hareketli noktalardaki düşey değişim farkları ve güven aralıkları Çizelge 6.10'da verilmiştir. Grafik gösterimleri ise Şekil 6.8'de görülmektedir.

Çizelge 6.9 Geometrik nivelman (I-II) ölçme dönemleri arası deformasyon analizi

Sıra No	Nokta No	$R_i$	$\theta_i$	$R_{kalan}$	T	F	(h,f)	Noktalardan Biri Hareketli mi?
Referans Noktalarının Sabitliği Testi								
1	1000	8.0239	2.8326	6.2639	89.4490	2.8140	4,42	Evet
2	5	5.6155	2.3697	0.6484	13.8890	3.1920	3,42	Evet
3	10	0.5860	0.7655	0.0624	2.6720	3.9760	2,42	Hayır
Obje Noktalarının Sabitliği Testi								
1	9	57.1028	7.5566	381.8003	1090.4350	1.9110	15,42	Evet
2	8	69.9237	8.3620	311.8766	954.3540	1.9340	14,42	Evet
3	7	59.0352	7.6834	252.8415	833.2200	1.9600	13,42	Evet
4	5	33.3558	5.7754	219.4857	783.5730	1.9900	12,42	Evet
5	15	23.8401	4.8826	195.6456	761.9600	2.0240	11,42	Evet
6	16	44.2813	6.6544	151.3642	648.4520	2.0630	10,42	Evet
7	14	36.8435	6.0699	114.5207	545.1250	2.1100	9,42	Evet
8	11	20.8390	4.5650	93.6817	501.6710	2.1660	8,42	Evet
9	12	30.8530	5.5545	62.8287	384.5160	2.2340	7,42	Evet
10	13	17.9899	4.2415	44.8388	320.1530	2.3200	6,42	Evet
11	2	11.9046	3.4503	32.9342	282.1830	2.4320	5,42	Evet
12	3	13.0939	3.6185	19.8403	212.4920	2.5860	4,42	Evet
13	4	11.1680	3.3419	8.6723	123.8420	2.8140	3,42	Evet
14	1000	8.0239	2.8326	0.6484	13.8880	3.1920	2,42	Evet
15	10	0.5860	0.7655	0.0624	2.6720	3.9760	1,42	Hayır

Çizelge 6.10 Geometrik nivelman (I-II) ölçme dönemleri arası deformasyon vektörleri tablosu

Hareketsiz Referans Noktaları		
1		
6		
Objekt Noktaları		
Nokta No	Yükseklik Farkı (mm)	Güven Aralığı (mm)
2	-3.788	0.210
3	-4.183	0.262
4	-2.522	0.230
7	-5.386	0.214
8	-9.582	0.275
9	-8.826	0.264
11	-5.978	0.230
12	-6.640	0.279
13	-3.969	0.259
14	-4.641	0.231
15	-9.063	0.298
16	-7.432	0.303
Hareketli Referans Noktaları		
1000	0.856	0.163
5	0.950	0.122
10	-0.517	0.206

• (II – III) Ölçme dönemleri arası deformasyon analizi :

Düşey kontrol ağının herhangi bir yerinde anlamlı hareket olup olmadığını belirlemek amacıyla global test büyüklüğü aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$R_{G23} = d_{G23}^T \bar{P}_{dd} d_{G23} = 5203.3571$$

$$\theta_{G23}^2 = \frac{R_{G23}}{h_{G23}} = \frac{5203.3571}{17-1} = 325.2098$$

$$T = \frac{\theta_{G23}^2}{m_0^2} = \frac{325.2098}{0.0224} = 14525.3357$$

$$F(h=16, f=44, \alpha=0,05) = 1,8787$$

$F < T$  olduğundan kontrol ağının herhangi bir yerinde anlamlı yer değiştirme olduğu kanaatine varılmıştır. Aynı testin referans noktalarından oluşan ağa uygulanması sonucunda;

$$R_{R23} = d_{R23}^T \bar{P}_{dd} d_{R23} = 741.6430$$

$$\theta_{R23}^2 = \frac{R_{R23}}{h_{R23}} = \frac{741.6430}{5-1} = 185.4107$$

$$T = \frac{\theta_{R23}^2}{m_0^2} = \frac{185.4107}{0.0224} = 8281.2790 \text{ olarak bulunmuştur.}$$

$$F(h=4, f=44, \alpha=0,05) = 2,5757$$

$F < T$  olduğundan, referans noktalarından en az birinin hareketli olduğu sonucuna varılmış ve hangi referans noktasında anlamlı düşey değişim olduğunun belirlenmesi amacıyla tek nokta hareketleri irdelenmiştir. Ardından, hareketli obje noktalarının belirlenmesine geçilmiştir. Çizelge 6.11’de noktalardaki hareketlerin belirlenmesine ilişkin büyüklükler ve elde edilen sonuçlar görülmektedir. Çizelge 6.12’de analiz sonrası hareketli noktalardaki düşey değişim farkları ve güven aralıkları, Şekil 6.9’da ise grafik gösterimleri görülmektedir.

Çizelge 6.11 Geometrik nivelman (II-III) ölçme dönemleri arası deformasyon analizi

Sıra No	Nokta No	$R_i$	$\theta_i$	$R_{kalan}$	T	F	(h,f)	Noktalardan Biri Hareketli mi?
Referans Noktalarının Sabitliği Testi								
1	10	431.8048	20.7799	309.8382	4612.9230	2.8030	4,44	Evet
2	6	268.9516	16.3997	40.8866	913.0900	3.1820	3,44	Evet
3	1000	40.5221	6.3657	0.3645	16.2780	3.9650	2,44	Evet
Obje Noktalarının Sabitliği Testi								
1	1000	396.8108	19.9201	4806.5464	14312.1340	1.8990	15,44	Evet
2	10	631.8454	25.1365	4174.6997	13318.6350	1.9230	14,44	Evet
3	8	244.9508	15.6509	3929.7489	13501.5610	1.9490	13,44	Evet
4	7	933.3367	30.5506	2996.4122	11152.7720	1.9790	12,44	Evet
5	15	216.6899	14.7204	2779.7223	11286.8110	2.0130	11,44	Evet
6	16	412.6720	20.3143	2367.0502	10572.3130	2.0520	10,44	Evet
7	14	595.6191	24.4053	1771.4312	8791.1220	2.0990	9,44	Evet
8	9	602.7968	24.5519	1168.6344	6524.5590	2.1550	8,44	Evet
9	6	252.8424	15.9010	915.7920	5843.3420	2.2230	7,44	Evet
10	11	126.5958	11.2515	789.1962	5874.8430	2.3090	6,44	Evet
11	12	252.8830	15.9023	536.3132	4790.8330	2.4220	5,44	Evet
12	13	192.3445	13.8688	343.9687	3840.7980	2.5760	4,44	Evet
13	2	118.9229	10.9052	225.0458	3350.520	2.8030	3,44	Evet
14	3	147.3146	12.1373	77.7312	1735.9140	3.1820	2,44	Evet
15	4	77.3668	8.7958	0.3645	16.2780	3.9650	1,44	Evet

Çizelge 6.12 Geometrik nivelman (II-III) ölçme dönemleri arası deformasyon vektörleri tablosu

Hareketsiz Referans Noktaları		
1		
5		
Objekt Noktaları		
Nokta No	Yükseklik Farkı (mm)	Güven Aralığı (mm)
2	-12.901	0.219
3	-15.413	0.312
4	-10.628	0.360
7	-30.540	0.249
8	-42.473	0.335
9	-26.507	0.294
11	-16.231	0.227
12	-19.515	0.279
13	-11.181	0.242
14	-26.029	0.244
15	-39.545	0.288
16	-34.442	0.275
Hareketli Referans Noktaları		
10	-8.401	0.211
6	-6.468	0.122
1000	3.489	0.163

• **(I – III) Ölçme dönemleri arası deformasyon analizi :**

I-II ve II-III ölçme dönemlerinde olduğu gibi, düşey kontrol ağının tümü için global test büyüklüğü hesaplanmıştır.

$$R_{G13} = d_{G13}^T \bar{P}_{dd} d_{G13} = 8010.7167$$

$$\theta_{G13}^2 = \frac{R_{G13}}{h_{G13}} = \frac{8010.7167}{17-1} = 500.6698$$

$$T = \frac{\theta_{G13}^2}{m_o^2} = \frac{500.6698}{0.0232} = 21612.1301$$

F (h=16, f=42,  $\alpha=0,05$ ) = 1,8903 < T olduğundan ağın herhangi bir yerinde anlamlı yer değiştirme olduğuna karar verilmiştir. Aynı testin referans noktalarından oluşan ağa uygulanması sonucunda;

$$R_{R13} = d_{R13}^T \bar{P}_{dd} d_{R13} = 955.2334$$



$$\theta_{R13}^2 = \frac{R_{R13}}{h_{R13}} = \frac{955.2334}{5-1} = 238.8084$$

$$T = \frac{\theta_{R13}^2}{m_0^2} = \frac{238.8084}{0.0232} = 10308.5055 \text{ olarak bulunmuştur.}$$

F (h=4, f=42,  $\alpha=0,05$ ) = 2.5864 < T sonucundan, referans noktalarından en az birinin hareketli olduğu kanaatine varılmıştır. Referans noktalarından hangilerinde anlamlı düşey değişim olduğunun belirlenmesi amacıyla tek nokta hareketlerinin irdelenmesine geçilmiştir. Hareketli referans noktalarının belirlenmesinin ardından, hareketli obje noktalarının belirlenmesi aşamasına geçilmiş, noktalardaki hareketlerin belirlenmesine ilişkin büyüklükler ve sonuçlar hareket sırasıyla Çizelge 6.13'te verilmiştir.

Analiz sonrası hareketli noktalardaki düşey değişim farkları ve güven aralıkları Çizelge 6.14'te, grafik gösterimleri ise Şekil 6.10'da verilmiştir.

Çizelge 6.13 Geometrik nivelman (I-III) ölçme dönemleri arası deformasyon analizi

Sıra No	Nokta No	R <sub>i</sub>	$\theta_i$	R <sub>kalan</sub>	T	F	(h,f)	Noktalardan Biri Hareketli mi?
Referans Noktalarının Sabitliği Testi								
1	10	543.8393	23.3204	411.3941	5919.4730	2.8140	4,42	Evet
2	6	350.6538	18.7258	60.7403	1310.9710	3.1920	3,42	Evet
3	1000	59.2615	7.6982	1.4787	63.8310	3.9760	2,42	Evet
Obje Noktalarının Sabitliği Testi								
1	9	802.2188	28.3235	7208.4981	20744.3440	1.9110	15,42	Evet
2	8	614.6753	24.7926	6593.8228	20330.8450	1.9340	14,42	Evet
3	7	1653.6450	40.6650	4940.1780	16403.8360	1.9600	13,42	Evet
4	1000	517.6890	22.7528	4422.4890	15908.5900	1.9900	12,42	Evet
5	15	385.3478	19.6303	4037.1411	15842.6350	2.0240	11,42	Evet
6	16	942.9418	30.7074	3094.1993	13356.5550	2.0630	10,42	Evet
7	14	991.5468	31.4888	2102.6525	10084.8900	2.1100	9,42	Evet
8	6	278.5860	16.6909	1824.0665	9842.3060	2.1660	8,42	Evet
9	11	250.1602	15.8165	1573.9063	9705.7030	2.2340	7,42	Evet
10	12	447.1129	21.1450	1126.7934	8106.6090	2.3200	6,42	Evet
11	13	388.3672	19.7070	738.4262	6375.0450	2.4320	5,42	Evet
12	2	206.0799	14.3555	532.3462	5744.8720	2.5860	4,42	Evet
13	3	248.2475	15.7559	284.0987	4087.8430	2.8140	3,42	Evet
14	10	157.5670	12.5526	126.5317	2730.9610	3.1920	2,42	Evet
15	4	125.0529	11.1827	1.4787	63.8310	3.9760	1,42	Evet

Çizelge 6.14 Geometrik nivelman (I-III) ölçme dönemleri arası deformasyon vektörleri tablosu

Hareketsiz Referans Noktaları		
1		
5		
Objekt Noktaları		
Nokta No	Yükseklik Farkı (mm)	Güven Aralığı (mm)
2	-16.793	0.223
3	-19.842	0.319
4	-13.536	0.367
7	-36.788	0.254
8	-52.816	0.342
9	-35.616	0.300
11	-22.404	0.231
12	-26.565	0.284
13	-15.868	0.246
14	-31.471	0.254
15	-49.251	0.311
16	-42.284	0.311
Hareketli Referans Noktaları		
10	-9.125	0.216
6	-7.405	0.125
1000	4.236	0.167

#### 6.4.2.2 Hassas Trigonometrik Nivelman Dengelemesi Sonuçlarının Analizi

Trigonometrik nivelman ağının analizinde de geometrik nivelman ağında olduğu gibi ağın iki nokta grubundan oluşması esas alınmıştır. Ölçülerin yapıldığı yatay kontrol ağının 4 referans noktasının, trigonometrik nivelman ağı için analizde hareketsiz noktalar kümesini oluşturması öngörülmüştür. Geometrik nivelman ağındaki bütün noktalar, bu ağ yapısında objekt noktaları olarak ele alınmıştır.

Her iki yöntemle elde edilen sonuçların karşılaştırılması amacıyla geometrik nivelmanda olduğu gibi, ölçme dönemleri ikişer ikişer ele alınarak irdelenmiştir.

- **(I – II) Ölçme dönemleri arası deformasyon analizi:**

Trigonometrik olarak gözlenen düşey kontrol ağının tümünde deformasyon analizi için global test büyüklüğü;

$$R_{G12} = d_{G12}^T \bar{P}_{dd} d_{G12} = 3115.2689$$

$$\theta_{G12}^2 = \frac{R_{G12}}{h_{G12}} = \frac{3115.2689}{20-1} = 163.9615$$

$$T = \frac{\theta_{G12}^2}{m_0^2} = \frac{163.9615}{10.9445} = 14.9812 \quad \text{olarak hesaplanmıştır.}$$

$F(h=19, f=68, \alpha=0,05) = 1,7410 < T$  sebebiyle, ağın herhangi bir yerinde anlamlı yer değiştirme olduğu kanaatine varılmıştır.

Tüm ağa uygulanan global teste göre ağda hareketli nokta olduğunun belirlenmesinin ardından, global testin referans noktalarından oluşan ağa uygulanması sonucunda;

$$R_{R12} = d_{R12}^T \bar{P}_{dd} d_{R12} = 1993.2427$$

$$\theta_{R12}^2 = \frac{R_{R12}}{h_{R12}} = \frac{1993.2427}{4-1} = 664.4142$$

$$T = \frac{\theta_{R12}^2}{m_0^2} = \frac{664.4142}{10.9445} = 60.7077 \quad \text{olarak bulunmuştur.}$$

$F(h=3, f=68, \alpha=0,05) = 2.7260 < T$  olduğundan referans noktalarından oluşan ağın herhangi bir yerinde anlamlı yer değiştirme olduğu belirlenmiştir. Hangi referans nokta veya noktalarında anlamlı düşey değişim olduğunun belirlenmesi amacıyla, tek nokta hareketlerinin irdelenmesine geçilmiştir. Daha sonra, hareketli olduğu varsayılan obje noktalarının belirlenmesi aşamasına geçilmiş, noktalardaki hareketlerin belirlenmesine ilişkin büyüklükler ve sonuçlar hareket sırasıyla, Çizelge 6.15'te verilmiştir. Analiz sonrası hareketli noktalardaki düşey değişim farkları ve güven aralıkları Çizelge 6.16'da görülmektedir. Çizelge 6.16'daki değerlerin grafik gösterimleri, Şekil 6.11'de verilmiştir.

Çizelge 6.15 Trigonometrik nivelman (I-II) ölçme dönemleri arası deformasyon analizi

Sıra No	Nokta No	$R_i$	$\theta_i$	$R_{kalan}$	T	F	(h,f)	Noktalardan Biri Hareketli mi?
Referans Noktalarının Sabitliği Testi								
1	1104	1861.7435	43.1479	131.4992	6.008	3.104	3,68	Evet
2	1101	82.9845	9.1096	48.5146	4.443	3.885	2,68	Evet
Obje Noktalarının Sabitliği Testi								
1	1104	2398.6812	48.9763	716.5877	3.637	1.757	18,68	Evet
2	6	338.6774	18.4032	377.9103	2.031	1.774	17,68	Evet
3	5	104.6189	10.2283	273.2914	1.561	1.794	16,68	Hayır

Çizelge 6.16 Trigonometrik nivelman (I-II) ölçme dönemleri arası deformasyon vektörleri tablosu

Hareketsiz Referans Noktaları		
1102		
1103		
Objekt Noktaları		
Nokta No	Yükseklik Farkı (mm)	Güven Aralığı (mm)
1	1.702	6.753
2	2.677	10.926
3	-1.991	12.846
4	2.851	9.152
5	6.887	4.268
6	10.827	3.836
7	4.596	8.808
8	-1.236	12.398
9	-4.042	10.142
10	7.411	5.798
11	1.594	10.971
12	1.370	12.898
13	6.154	9.286
14	6.871	8.812
15	0.430	12.387
16	-2.947	10.122
Hareketli Referans Noktaları		
1104	-7.809	1.189
1101	3.070	2.198

• (II – III) Ölçme dönemleri arası deformasyon analizi:

Düşey kontrol ağının herhangi bir yerinde anlamlı hareket olup olmadığını belirlemek amacıyla global test büyüklüğü aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$R_{G23} = d_{G23}^T \bar{P}_{dd} d_{G23} = 7124.9361$$

$$\theta_{G23}^2 = \frac{R_{G23}}{h_{G23}} = \frac{7124.9361}{20-1} = 374.9966$$

$$T = \frac{\theta_{G23}^2}{m_0^2} = \frac{374.9966}{10.0063} = 37.4760$$

$F(h=19, f=70, \alpha=0,05) = 1,7365 < T$  sonucu ile ağın herhangi bir yerinde anlamlı yer değiştirme olduğu belirlenmiştir.

Global testin referans noktalarından oluşan ağa uygulanması sonucunda;

$$R_{R23} = d_{R23}^T \bar{P}_{dd} d_{R23} = 692.0523$$

$$\theta_{R23}^2 = \frac{R_{R23}}{h_{R23}} = \frac{692.0523}{4-1} = 230.6841$$

$$T = \frac{\theta_{R23}^2}{m_0^2} = \frac{230.6841}{10.0063} = 23.0538 \text{ olarak elde edilmiştir.}$$

F (h=3, f=70,  $\alpha=0,05$ ) = 2.7220 < T olduğundan, referans noktalarından en az birinin hareketli olduğu kanaatine varılmıştır. Referans noktalarından hangilerinde anlamlı düşey değişim olduğunun belirlenmesi amacıyla tek nokta hareketlerinin irdelenmesine geçilmiştir. Hareketli referans noktalarının belirlenmesinin ardından, hareketli obje noktalarının belirlenmesi aşamasına geçilmiştir.

Noktalardaki hareketlerin belirlenmesine ilişkin büyüklükler ve sonuçlar hareket sırasıyla Çizelge 6.17’de verilmiştir. Analiz sonrası hareketli noktalardaki düşey değişim farkları ve güven aralıkları Çizelge 6.18’de, grafik gösterimleri ise Şekil 6.12’de görülmektedir.

Çizelge 6.17 Trigonometrik nivelman (II-III) ölçme dönemleri arası deformasyon analizi

Sıra No	Nokta No	$R_i$	$\theta_i$	$R_{kalan}$	T	F	(h,f)	Noktalardan Biri Hareketli mi?
<b>Referans Noktalarının Sabitliği Testi</b>								
1	1104	630.7748	25.1152	61.2775	3.0620	3.1000	3, 70	Hayır
<b>Obje Noktalarının Sabitliği Testi</b>								
1	1104	1042.0288	32.2805	6082.9074	33.7730	1.7530	18,70	Evet
2	7	892.9018	29.8815	5190.0059	30.5100	1.7700	17,70	Evet
3	9	872.6210	29.5402	4317.3849	26.9670	1.7890	16,70	Evet
4	8	681.6688	26.1088	3635.7161	24.2230	1.811	15,70	Evet
5	14	675.6257	25.9928	2960.0904	21.1300	1.835	14,70	Evet
6	16	604.3155	24.5828	2355.7749	18.1100	1.862	13,70	Evet
7	10	482.6929	21.9703	1873.0820	15.5990	1.892	12,70	Evet
8	15	380.4276	19.5046	1492.6544	13.5610	1.927	11,70	Evet
9	6	367.7501	19.1768	1124.9044	11.2420	1.967	10,70	Evet
10	12	204.7901	14.3105	920.1143	10.2170	2.015	9,70	Evet
11	11	171.7899	13.1069	748.3244	9.3480	2.071	8,70	Evet
12	2	167.2650	12.9331	581.0594	8.2960	2.140	7,70	Evet
13	1	144.9947	12.0414	436.0647	7.2630	2.227	6,70	Evet
14	13	131.5657	11.4702	304.4989	6.0860	2.340	5,70	Evet
15	4	107.8518	10.3852	196.6471	4.9130	2.495	4,70	Evet
16	3	108.7112	10.4265	87.9359	2.9290	2.722	3,70	Evet
17	5	26.6584	5.1632	61.2775	3.0620	3.100	2,70	Hayır

Çizelge 6.18 Trigonometrik nivelman (II-III) ölçme dönemleri arası deformasyon vektörleri tablosu

Hareketsiz Referans Noktaları		
1101		
1102		
1103		
Objekt Noktaları		
Nokta No	Yükseklik Farkı (mm)	Güven Aralığı (mm)
1	-11.888	6.134
2	-21.533	10.303
3	-20.624	12.241
4	-14.870	8.742
5	-3.379	4.078
6	-11.282	3.667
7	-40.363	8.418
8	-49.638	11.848
9	-45.944	9.693
10	-19.534	5.541
11	-21.921	10.346
12	-28.711	12.290
13	-16.802	8.870
14	-35.127	8.422
15	-37.050	11.838
16	-38.158	9.673
Hareketli Referans Noktaları		
1104	4.577	1.136

• **(I – III) Ölçme dönemleri arası deformasyon analizi:**

Diğer dönemlerdeki gibi öncelikle düşey kontrol ağının herhangi bir yerinde anlamlı hareket olup olmadığını belirlemek amacıyla global test büyüklüğü hesaplanmıştır.

$$R_{G13} = d_{G13}^T \bar{P}_{dd} d_{G13} = 5932.1467$$

$$\theta_{G13}^2 = \frac{R_{G13}}{h_{G13}} = \frac{5932.1467}{20-1} = 312.2183$$

$$T = \frac{\theta_{G13}^2}{m_0^2} = \frac{312.2183}{10.2537} = 30.4494$$

$F(h=19, f=68, \alpha=0,05) = 1,7410 < T$  olduğundan kontrol ağının herhangi bir yerinde anlamlı yer değiştirme olduğu sonucuna varılmıştır. Aynı testin referans noktalarından oluşan ağa uygulanması sonucunda;

$$R_{R13} = d_{R13}^T \bar{P}_{dd} d_{R13} = 772.4749$$

$$\theta_{R13}^2 = \frac{R_{R13}}{h_{R13}} = \frac{772.4749}{4-1} = 257.4916$$

$$T = \frac{\theta_{R13}^2}{m_0^2} = \frac{257.4916}{10.2537} = 25.1121 \text{ olarak bulunmuştur.}$$

$F(h=3, f=68, \alpha=0,05) = 2.7260 < T$  olduğundan, referans noktalarından en az birinin hareketli olduğu sonucuna varılarak, hangi referans noktasında anlamlı düşey değişim olduğunun belirlenmesi amacıyla tek nokta hareketlerinin irdelenmesine geçilmiştir. İrdelenmeye, hareketsiz referans noktaları belirleninceye kadar devam edilmiş ve ardından hareketli olduğu varsayılan obje noktalarının belirlenmesi aşamasına geçilmiştir. Noktalardaki hareketlerin belirlenmesine ilişkin büyüklükler ve sonuçlar hareket sırasıyla Çizelge 6.19'da görülmektedir. Analiz sonrası hareketli noktalardaki düşey değişim farkları ve güven aralıkları Çizelge 6.20'de, bu değerlerin grafik gösterimleri ise Şekil 6.13'te verilmiştir.

Çizelge 6.19 Trigonometrik nivelman (I-III) ölçme dönemleri arası deformasyon analizi

Sıra No	Nokta No	$R_i$	$\theta_i$	$R_{kalan}$	T	F	(h,f)	Noktalardan Biri Hareketli mi?
Referans Noktalarının Sabitliği Testi								
1	1104	459.7459	21.4417	312.7290	15.2500	3.1040	3, 68	Evet
2	1101	251.0147	15.8434	61.7143	6.0190	3.8850	2,68	Evet
Obje Noktalarının Sabitliği Testi								
1	9	1032.9197	32.1391	4899.2271	26.5450	1.7570	18,68	Evet
2	8	716.0384	26.7589	4183.1889	23.9980	1.7740	17, 68	Evet
3	16	701.2656	26.4814	3481.9233	21.2240	1.7940	16, 68	Evet
4	7	701.1790	26.4798	2780.7443	18.0800	1.8150	15, 68	Evet
5	1101	688.5051	26.2394	2092.2392	14.5750	1.8390	14, 68	Evet
6	14	437.1734	20.9087	1655.0659	12.4160	1.8660	13, 68	Evet
7	1104	406.8706	20.1710	1248.1952	10.1440	1.8960	12, 68	Evet
8	15	371.6493	19.2782	876.5459	7.7710	1.9310	11, 68	Evet
9	10	185.9063	13.6347	690.6396	6.7360	1.9710	10, 68	Evet
10	12	154.4776	12.4289	536.1619	5.8100	2.0190	9, 68	Evet
11	3	103.5105	10.1740	432.6514	5.2740	2.0750	8, 68	Evet
12	11	92.4209	9.6136	340.2305	4.7400	2.1450	7, 68	Evet
13	2	82.2097	9.0670	258.0209	4.1940	2.2310	6, 68	Evet
14	4	67.4040	8.2100	190.6168	3.7180	2.3440	5, 68	Evet
15	13	51.5745	7.1815	139.0423	3.3900	2.4990	4, 68	Evet
16	1	44.5560	6.6750	94.4863	3.0720	2.7260	3, 68	Evet
17	5	32.1714	5.6720	62.3148	3.0390	3.1040	2, 68	Hayır

Çizelge 6.20 Trigonometrik nivelman (I-III) ölçme dönemleri arası deformasyon vektörleri tablosu

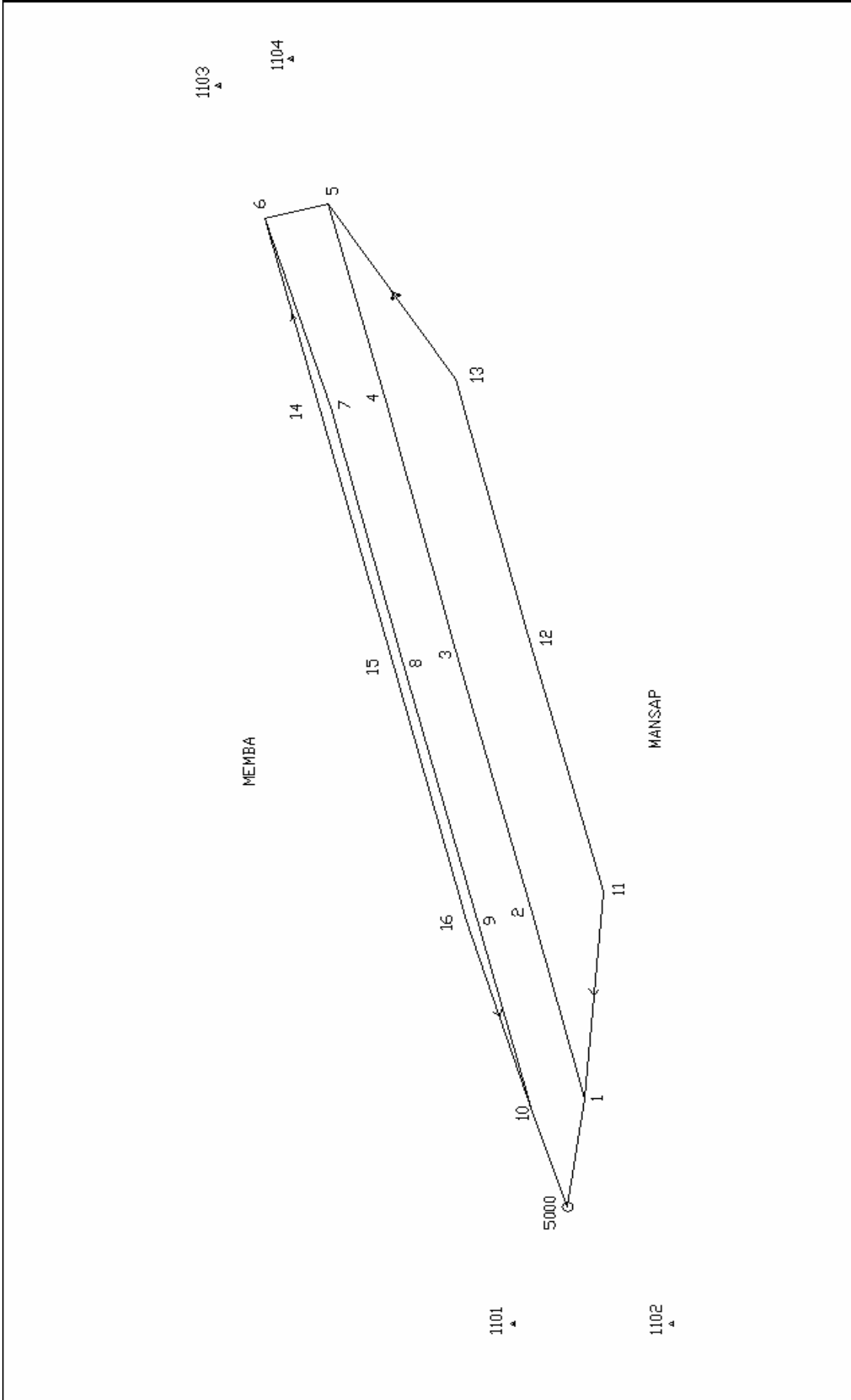
Hareketsiz Referans Noktaları		
1102		
1103		
Obje Noktaları		
Nokta No	Yükseklik Farkı (mm)	Güven Aralığı (mm)
1	-7.008	6.672
2	-16.156	10.635
3	-21.114	12.443
4	-11.542	8.841
5	3.666	4.080
6	-0.456	3.713
7	-35.767	8.526
8	-50.874	12.000
9	-49.985	9.817
10	-12.123	5.612
11	-17.631	10.678
12	-25.828	12.494
13	-10.160	8.971
14	-28.256	8.530
15	-36.620	11.990
16	-41.104	9.797
Hareketli Referans Noktaları		
1104	-3.126	0.944
1101	6.396	2.548

### 6.5 Sonuçların Grafik Gösterimi

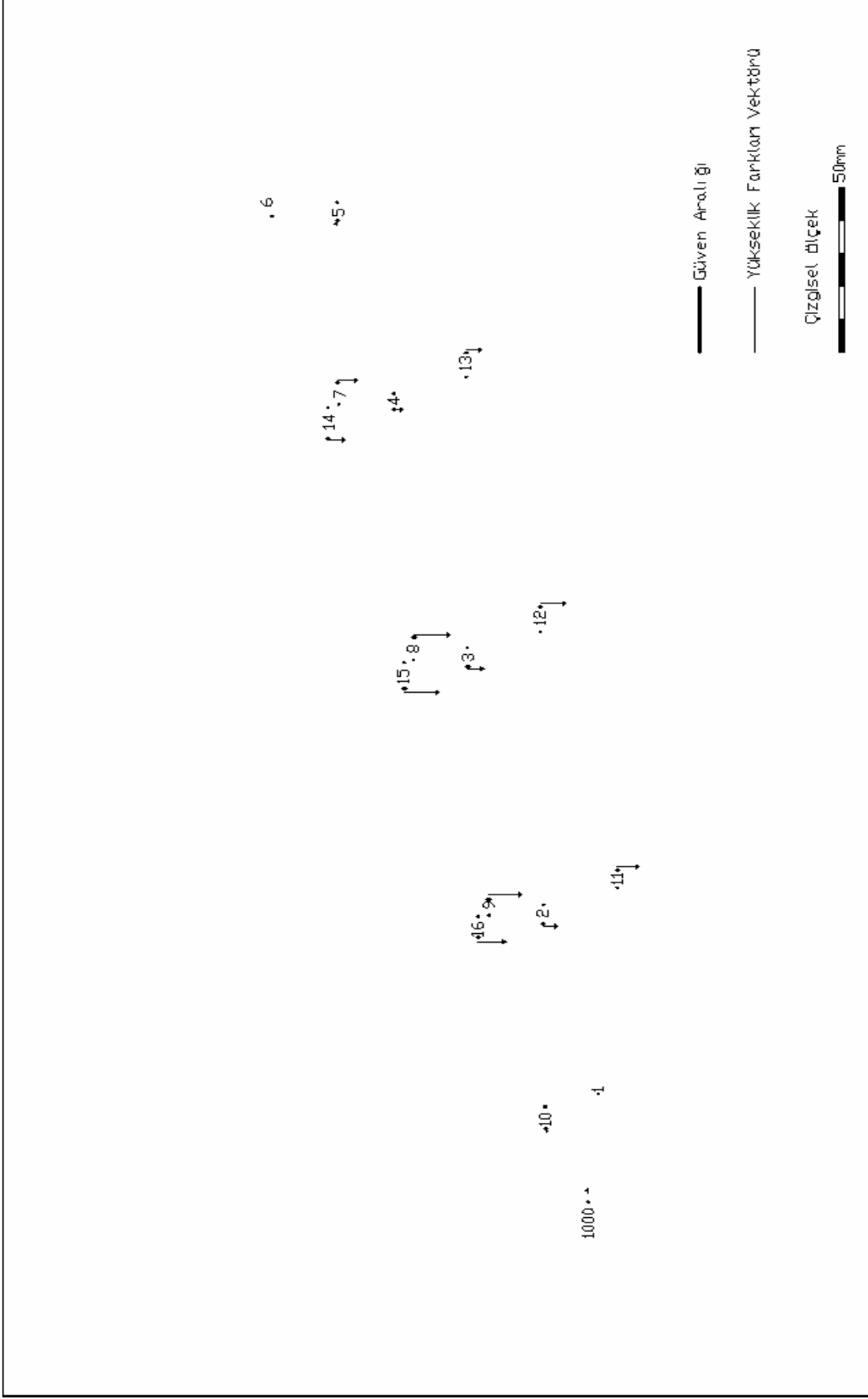
Tek nokta hareketlerinin ve güven aralıklarının sayısal büyüklüklerinin hesaplanmasının ardından, düşey değişimlerin daha rahat kavranmalarını sağlamak amacıyla, grafikleri ölçekli bir kanava üzerine çizilmiştir. Şekil 6.8, Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'da geometrik nivelman verilerinin değerlendirilmesi sonucunda, Şekil 6.11, Şekil 6.12 ve Şekil 6.13'te ise trigonometrik nivelman verilerinin değerlendirilmesi sonucunda elde edilen grafikler görülmektedir.

Ayrıca; ölçme dönemlerinden her iki yöntemle elde edilen sonuçların daha rahat karşılaştırılmasını sağlamak amacıyla, yine ölçekli bir kanava üzerinde aynı ölçme dönemlerindeki her iki yönteme göre belirlenen yükseklik farklarını birlikte gösteren grafikler çizilerek; Şekil 6.14, Şekil 6.15 ve Şekil 6.16'da verilmiştir.

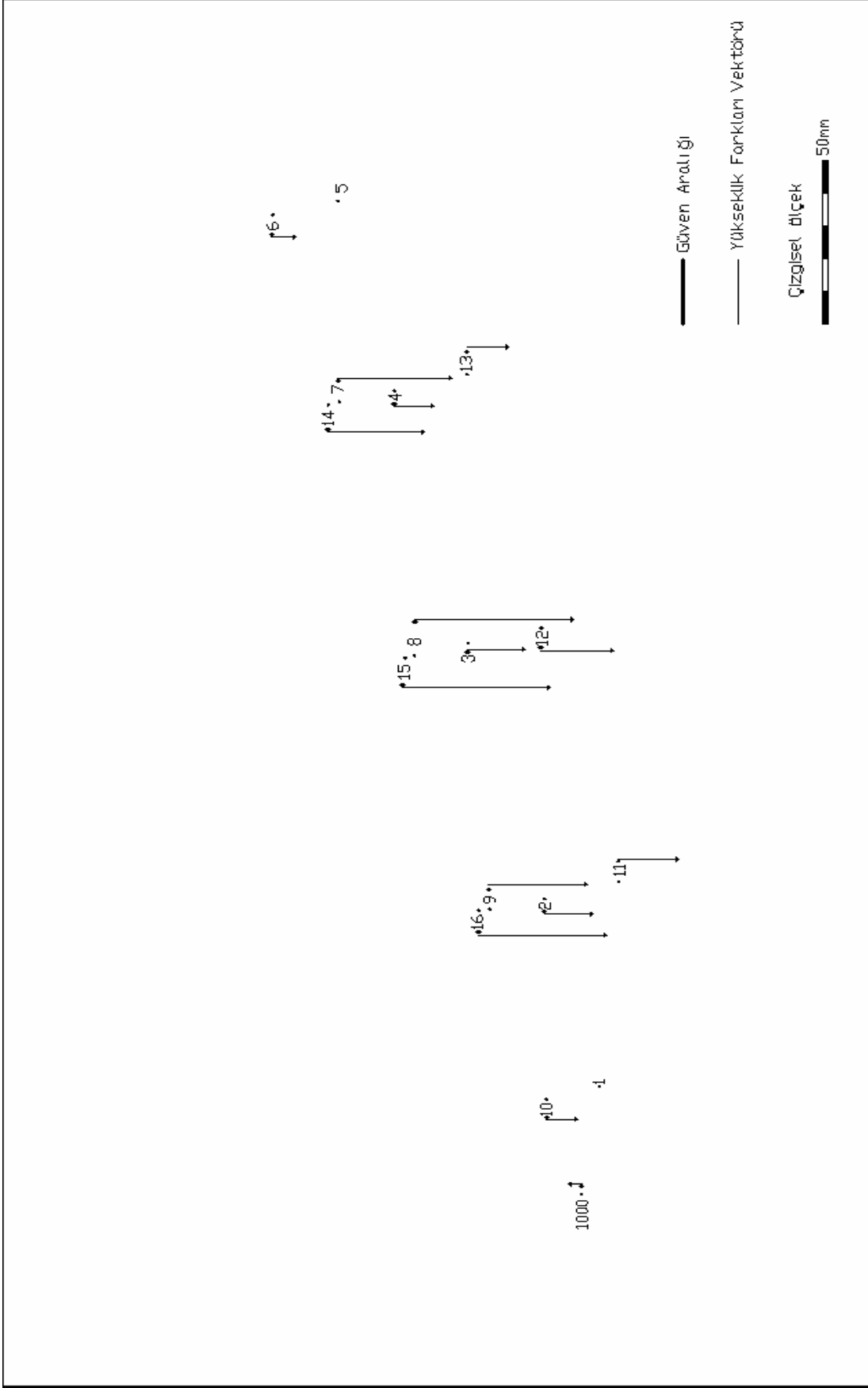




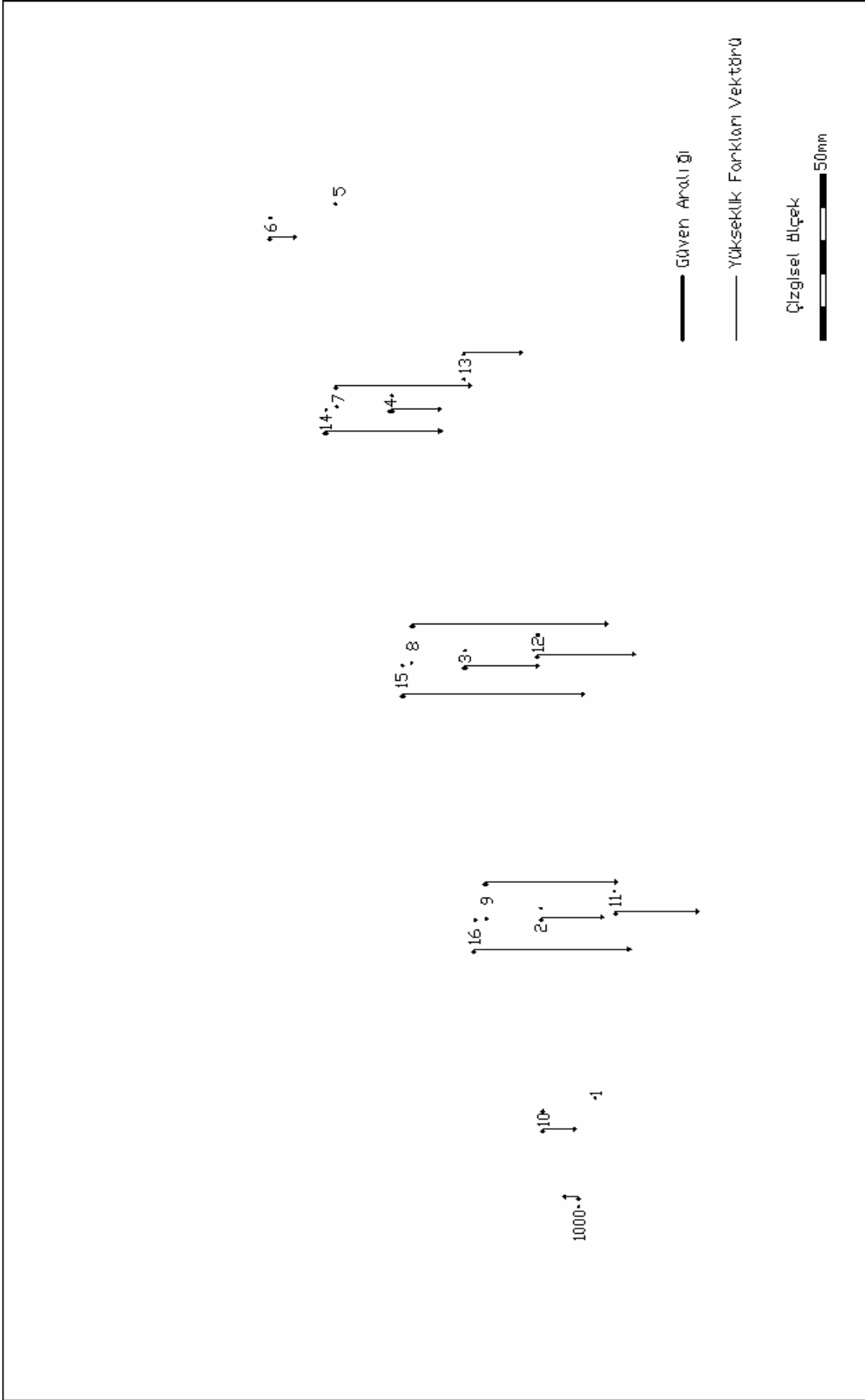
Şekil 6.7 Pabuçdere Barajı düşey kontrol ağı



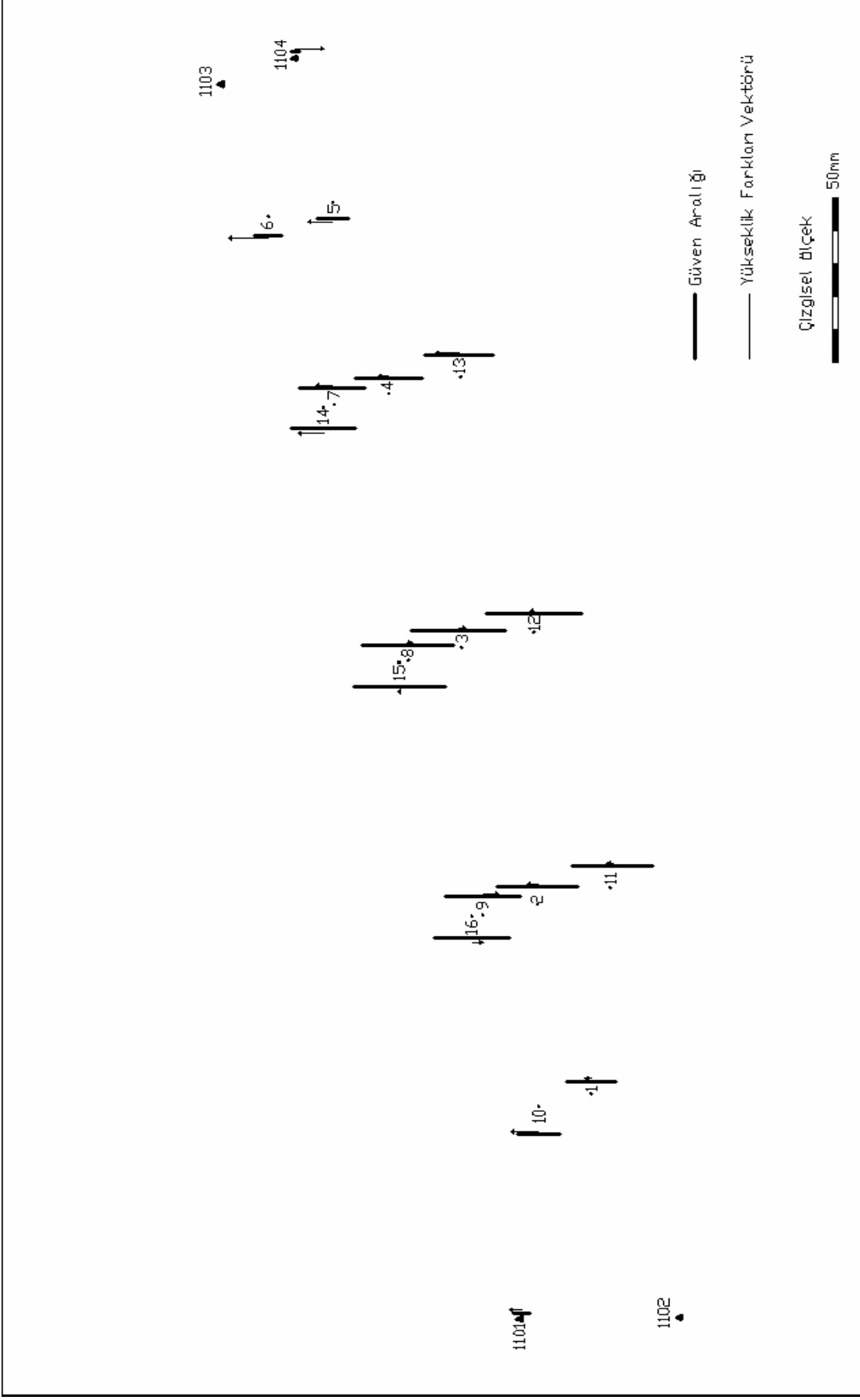
Şekil 6.8 Haziran 2003-Eylül 2003 geometrik nivelman tek nokta hareketleri



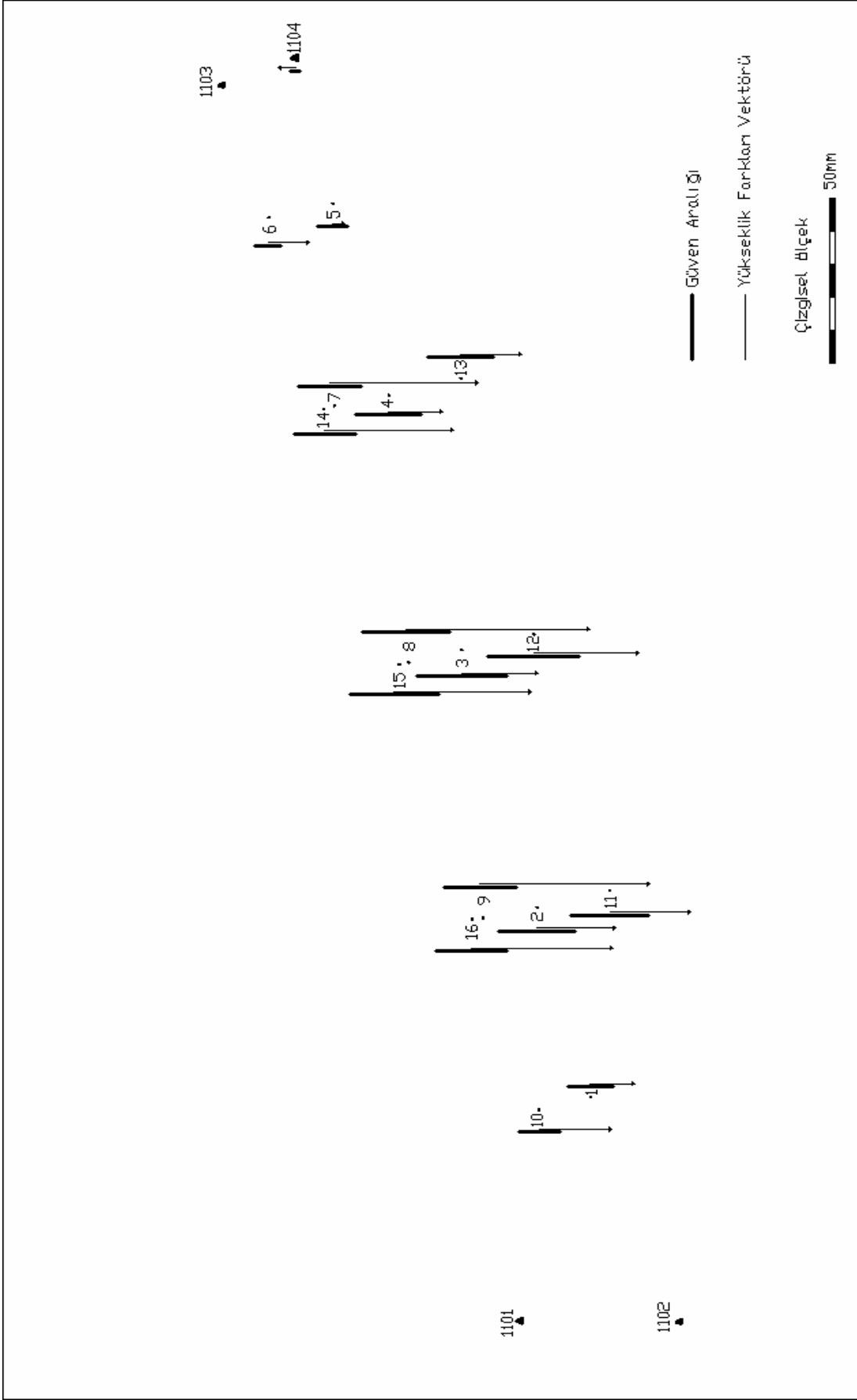
Şekil 6.9 Eylül 2003-Eylül 2004 geometrik nivelman tek nokta hareketleri



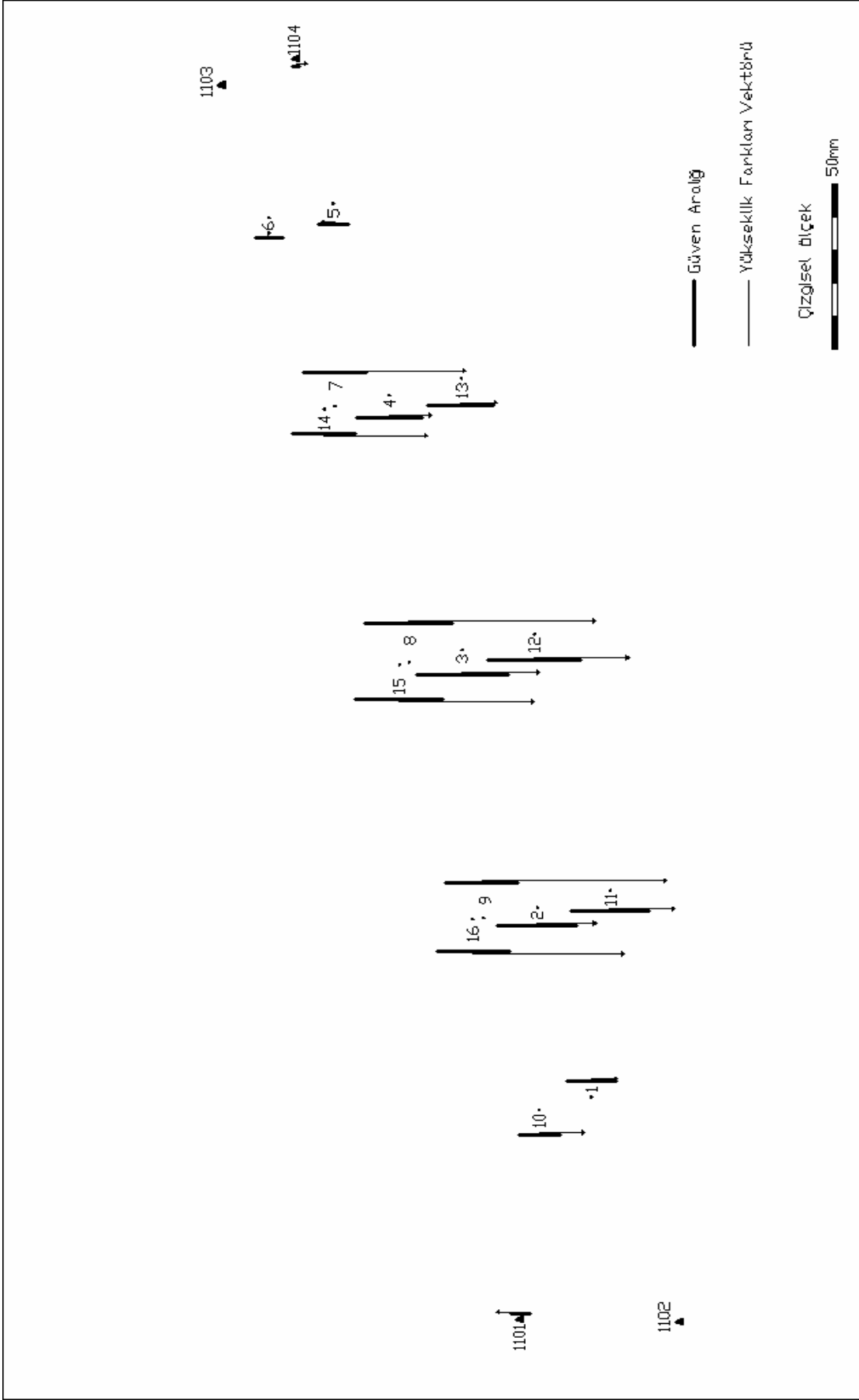
Şekil 6.10 Haziran 2003-Eylül 2004 geometrik nivelman tek nokta hareketleri



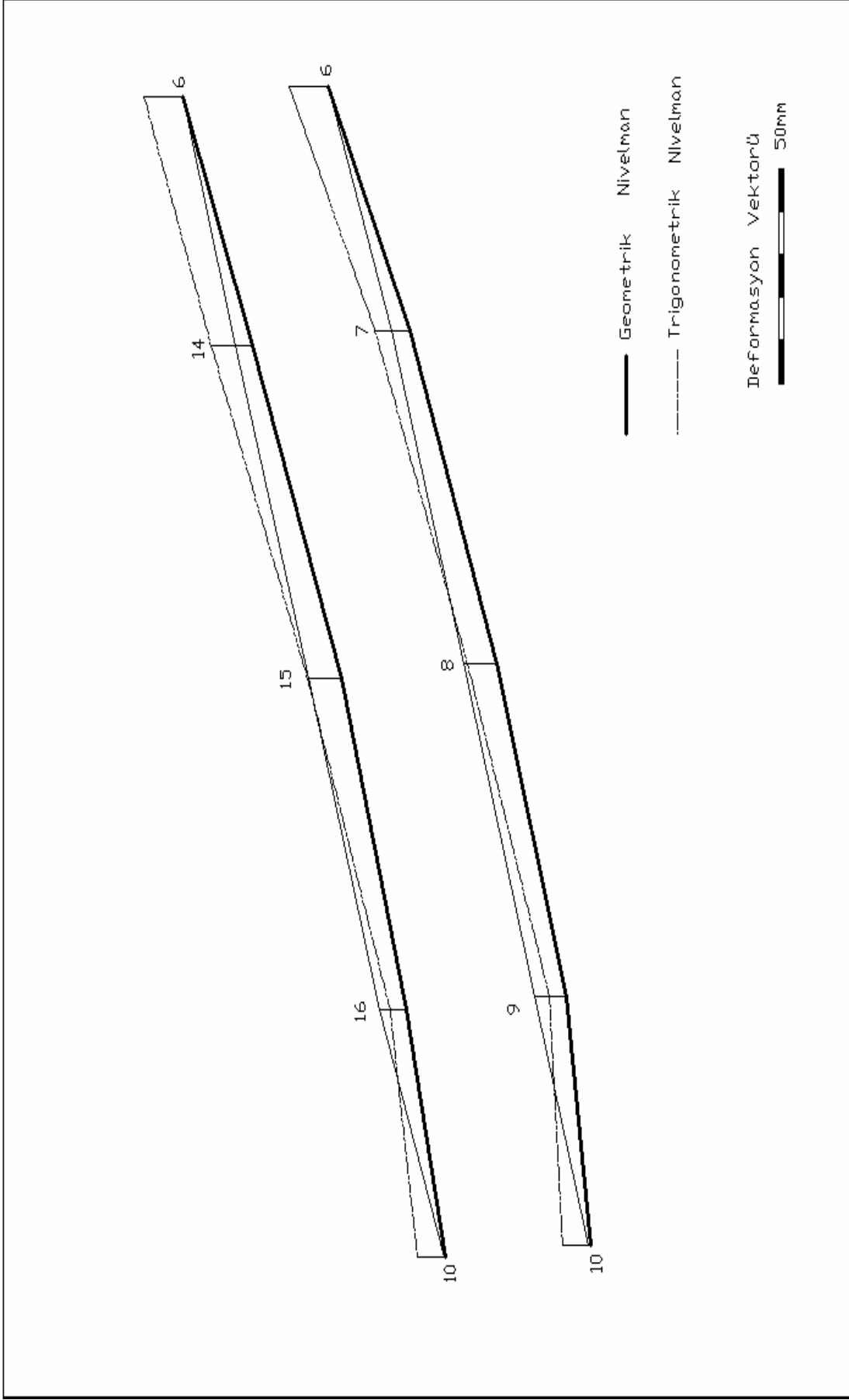
Şekil 6.11 Haziran 2003-Eylül 2003 trigonometrik nivelman tek nokta hareketleri



Şekil 6.12 Eylül 2003-Eylül 2004 trigonometrik nivelman tek nokta hareketleri

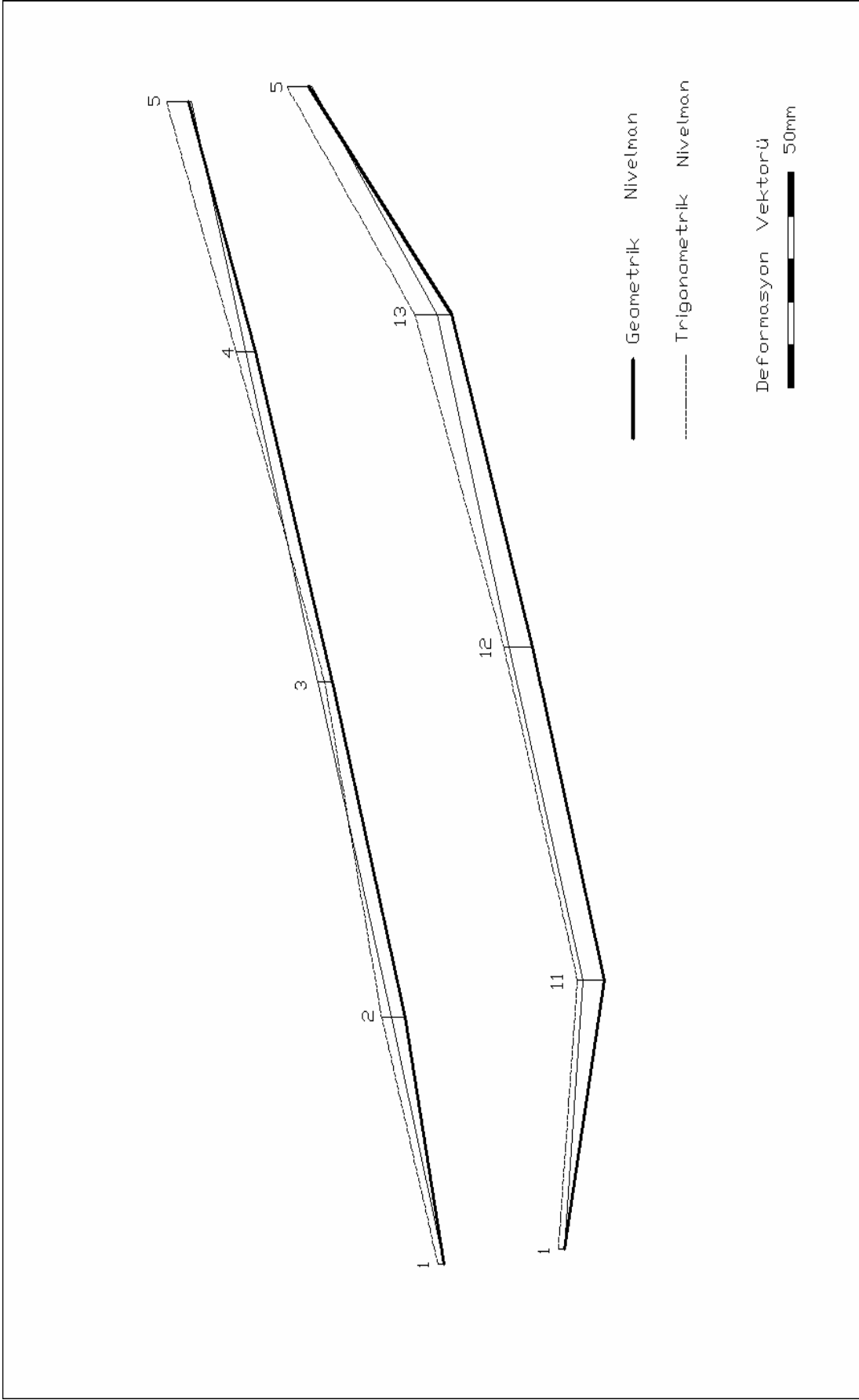


Şekil 6.13 Haziran 2003-Eylül 2004 trigonometrik nivelman tek nokta hareketleri

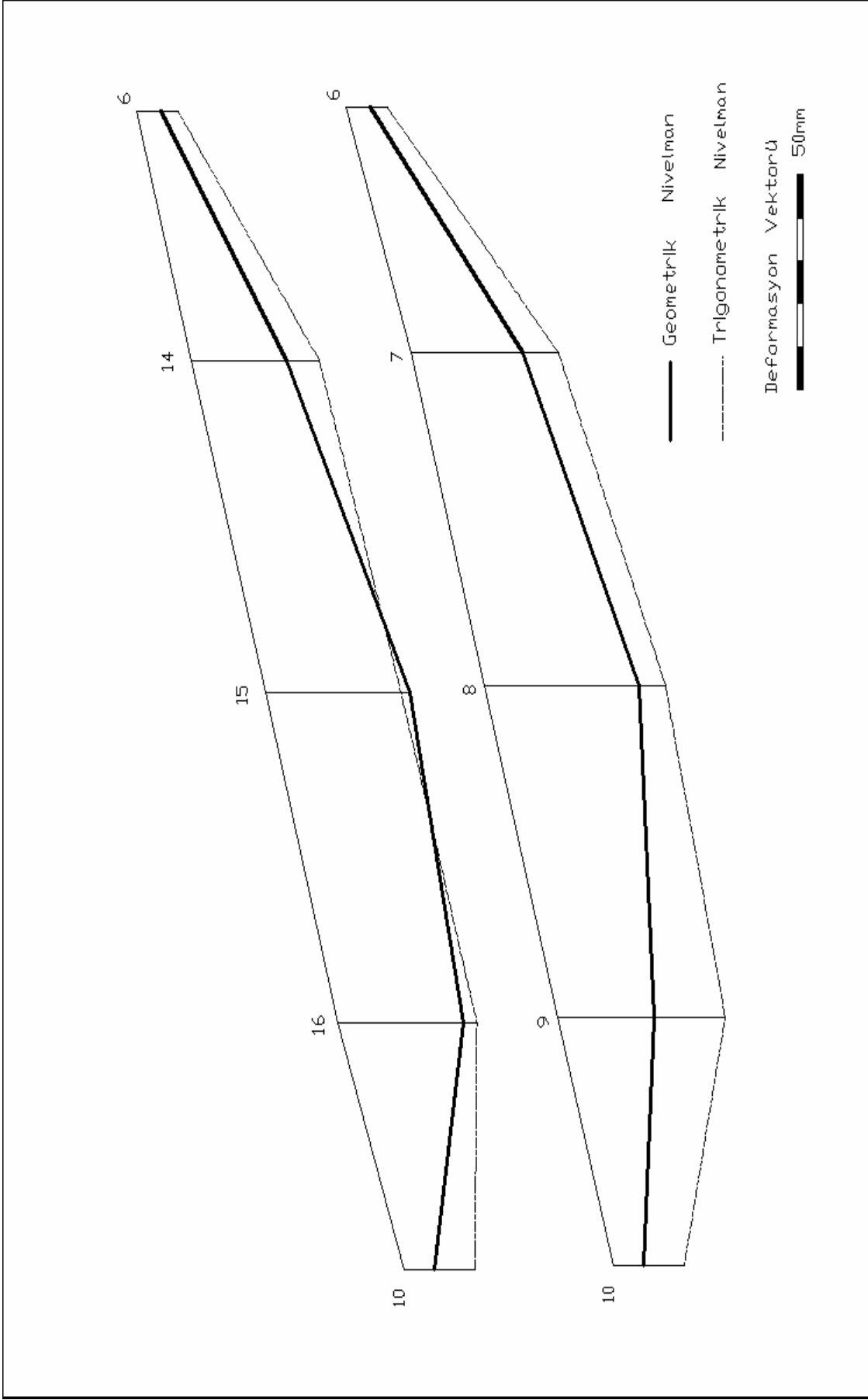


Şekil 6.14 (a) Haziran 2003-Eylül 2003 geometrik-trigonometrik nivelman yükseklik farkları

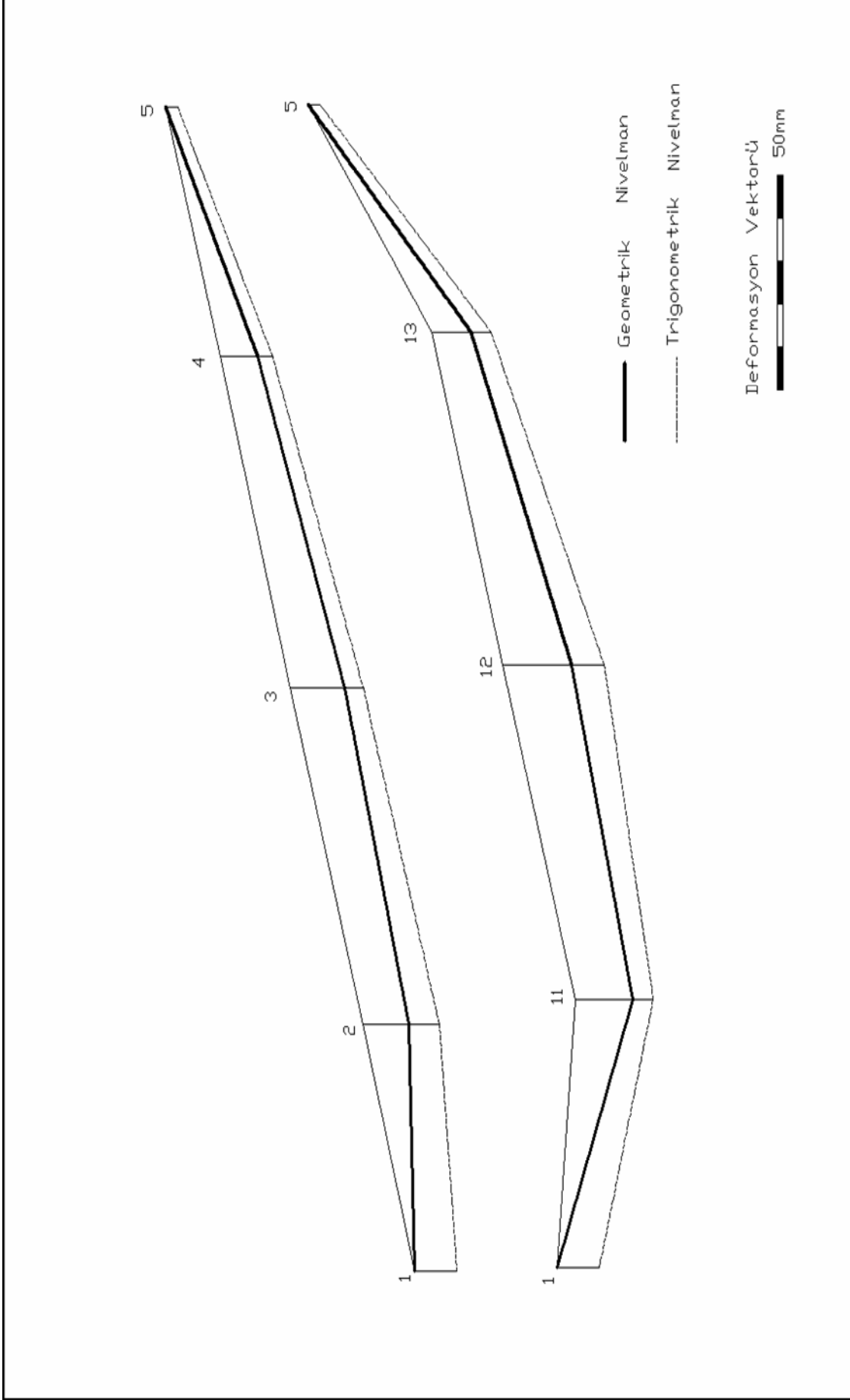




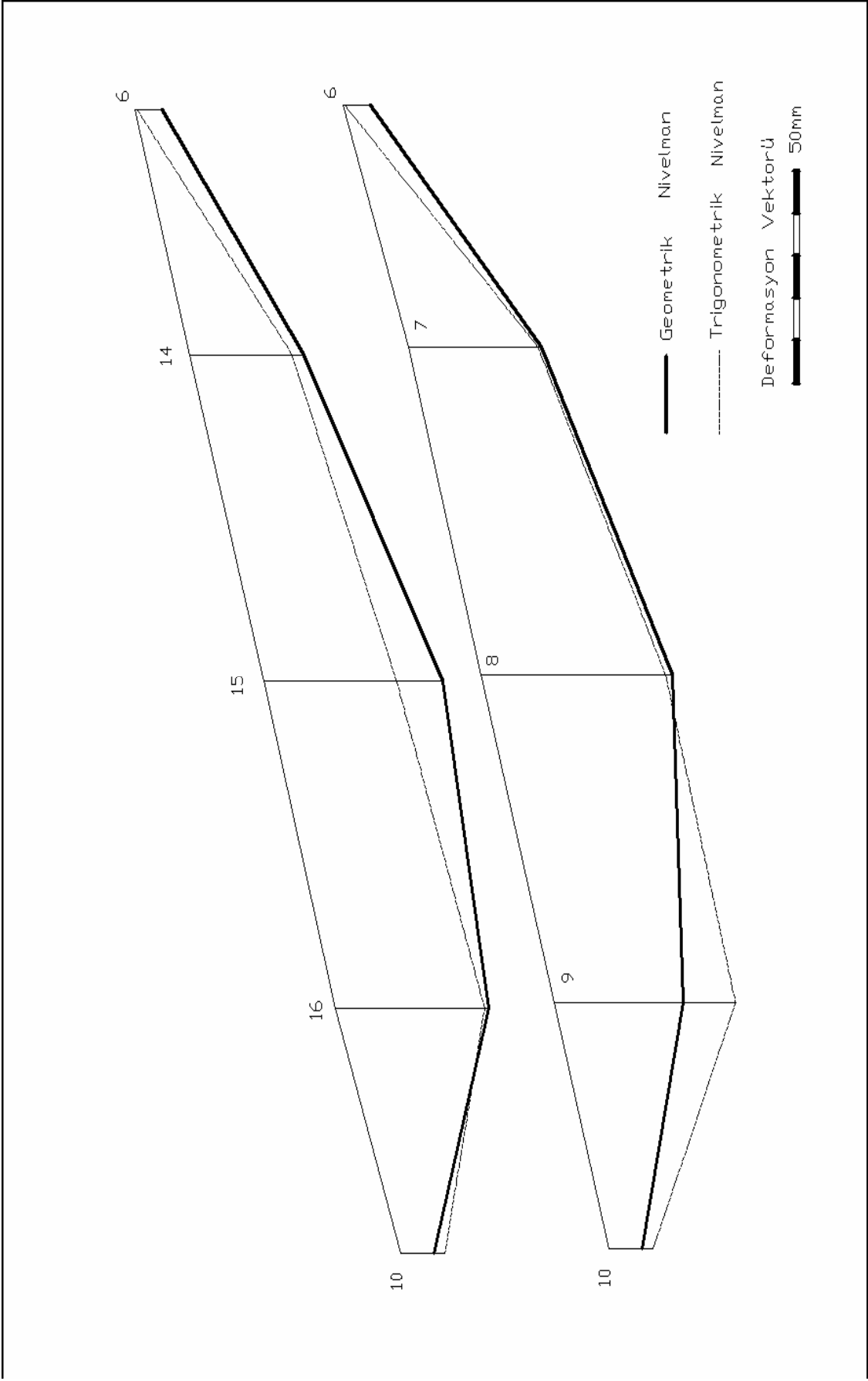
Şekil 6.14 (b) Haziran 2003-Eylül 2003 geometrik-trigonometrik nivelman yükseklik farkları



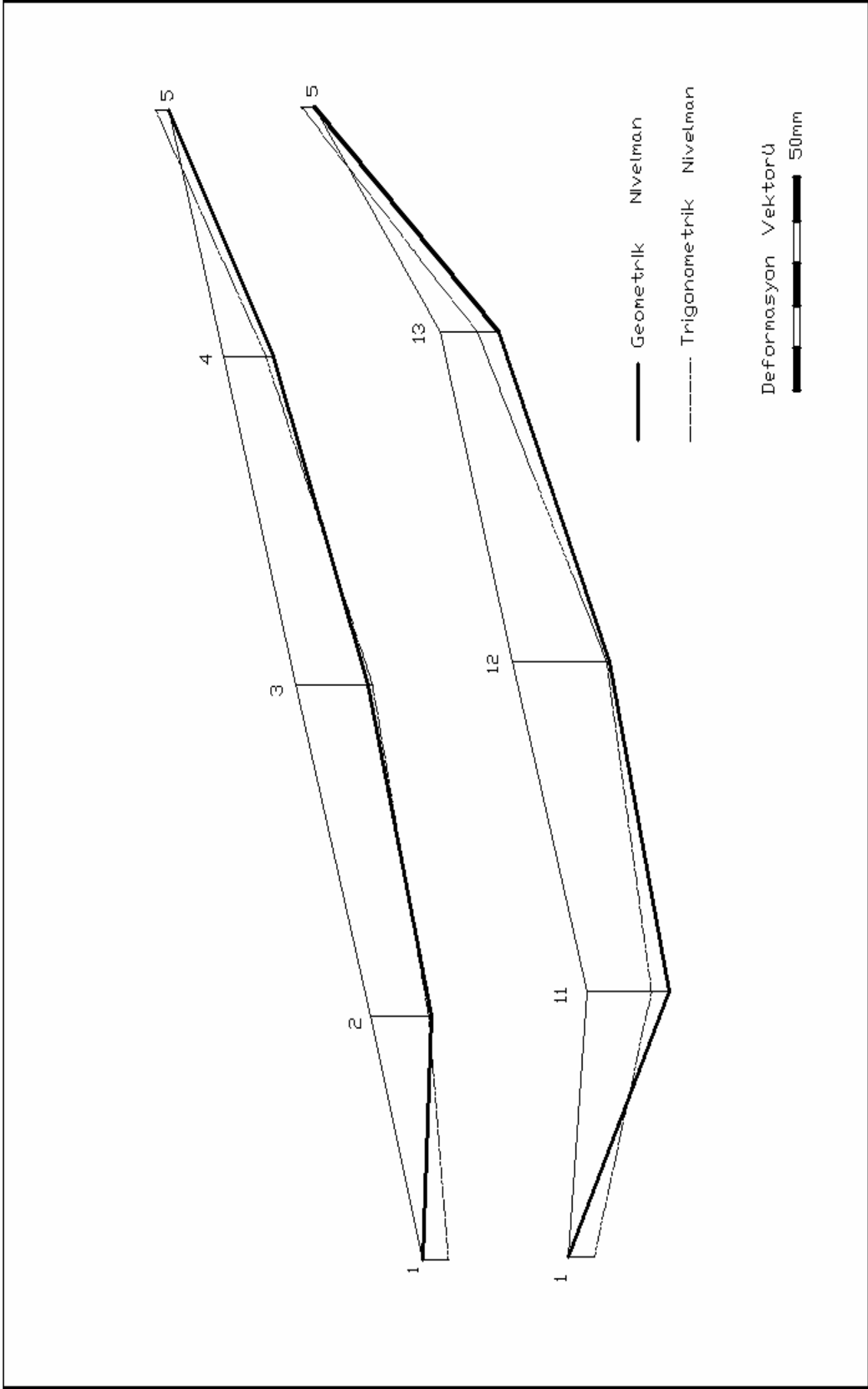
Şekil 6.15 (a) Eylül 2003-Eylül 2004 geometrik-trigonometrik nivelman yükseklik farkları



Şekil 6.15 (b) Eylül 2003-Eylül 2004 geometrik-trigonometrik nivelman yükseklik farkları



Şekil 6.16 (a) Haziran 2003-Eylül 2004 geometrik-trigonometrik nivelman yükseklik farkları



Şekil 6.16 (b) Haziran 2003-Eylül 2004 geometrik-trigonometrik nivelman yükseklik farkları

## 7. SONUÇLAR

Mühendislik yapılarında noktalar arasındaki yükseklik farklarının hassas olarak belirlenmesinde, hassas geometrik nivelman yöntemi en yüksek doğrulukla sonuç veren yöntemdir. Yöntemin uygulanmasında uygun donanım kullanılarak ve ölçme koşulları için öngörülere uyularak istenen sonuçlara ulaşılmaktadır.

Günümüzde elektronik takeometrelerle uzunluklar 1+1 ppm doğrulukla ölçülebilmektedir. Düşey açı ölçümünde de özel ölçme yöntemleri uygulanarak yüksek doğruluklara ulaşılmaktadır. Bunun neticesinde, yükseklik farklarının trigonometrik nivelman yöntemiyle hassas olarak belirlenmesi mümkün olmaktadır.

Uygulama alanı olarak seçilen Pabuçdere Barajı'nda düşey değişimlerin belirlenmesine yönelik olarak gerçekleştirilen hassas geometrik nivelman ölçülerinin değerlendirilmesi sonucunda; 100 m uzunluğundaki nivelman yolu için ortalama 0.15 mm ölçü doğruluğuna ulaşılmıştır. Aynı ölçme dönemlerinde gerçekleştirilen trigonometrik nivelman ölçülerinin değerlendirilmesi sonucunda ise aynı nivelman yolu uzunluğu için 3.22 mm doğruluk değeri elde edilmiştir.

I. ölçme dönemi tarihi Haziran 2003, II. ölçme dönemi tarihi Eylül 2003 olup; iki dönem arasında 3 ay gibi kısa bir süre bulunmaktadır. III. ölçme dönemi tarihi ise Eylül 2004 olup; II. ölçme dönemiyle aralarında 1 yıllık bir süreç vardır. Ölçülerin analizinde dönemler; I-II, II-III, I-III şeklinde ele alınmıştır.

- I-II ölçme dönemleri arasında düşey değişimlerin belirlenmesinde, hassas geometrik nivelman yöntemiyle deformasyonların irdelenmesinde, iki referans (1 ve 6 numaralı noktalar) noktası hariç bütün obje noktalarında anlamlı düşey değişim olduğu belirlenmiştir. Aynı ölçme dönemleri arasında hassas trigonometrik nivelman yönteminin uygulanması neticesinde, iki referans noktası (1101 ve 1104 numaralı noktalar) ile iki obje noktası (5 ve 6 numaralı noktalar) dışında diğer noktalarda anlamlı düşey değişim görülmemektedir.
- II-III ölçme dönemleri arasındaki düşey değişimlerin geometrik nivelman yöntemiyle belirlenmesinde yine iki referans noktası (1 ve 5 numaralı noktalar) hariç diğer bütün noktalarda anlamlı değişimler saptanmıştır. Aynı ölçme dönemlerindeki düşey değişimlerin hassas trigonometrik nivelman yöntemiyle belirlenmesinde ise, 3 referans

noktası (1101, 1102 ve 1003 numaralı noktalar) hariç diğer tüm noktalarda anlamlı düşey değişim olduğu belirlenmiştir.

- I-III ölçme dönemleri arasında düşey değişimlerin belirlenmesinde de yine II-III ölçme dönemleri arasında olduğu gibi 1 ve 5 numaralı referans noktaları dışındaki tüm ağ noktalarında hassas geometrik nivelman yönteminde, anlamlı düşey değişimler olduğu sonucuna varılmıştır. Yine aynı ölçme dönemleri arasında hassas trigonometrik nivelman yöntemiyle yapılan değerlendirme sonucunda; 2 referans noktası (1102 ve 1103 numaralı noktalar) dışında, diğer referans noktaları ile obje noktalarının tümünde anlamlı düşey değişimler belirlenmiştir.

Yukarıda karşılaştırılan ölçme dönemleri arasında hassas geometrik ve hassas trigonometrik nivelman yöntemleriyle elde edilen yükseklik farklarının karşılaştırılması neticesinde;

- I-II ölçme dönemleri arasında, hassas geometrik nivelman yöntemiyle minimum düşey değişim 10 numaralı referans noktasında -0.517 mm ve maksimum düşey değişim 8 numaralı obje noktasında -9,582 mm olarak elde edilmiştir. Aynı dönem için hassas trigonometrik nivelman yöntemiyle minimum düşey değişim 15 numaralı obje noktasında 0,430 mm ve maksimum düşey değişim 6 numaralı obje noktasında 10.827 mm olarak elde edilmiştir.
- II-III ölçme dönemleri arasında, hassas geometrik nivelman yöntemiyle minimum düşey değişim bölgedeki Rs noktasında 3.489 mm ve maksimum düşey değişim 8 numaralı obje noktasında -42,473 mm olarak elde edilmiştir. Aynı dönem için hassas trigonometrik nivelman yöntemiyle minimum düşey değişim 5 numaralı obje noktasında -3,379 mm ve maksimum düşey değişim 8 numaralı obje noktasında -49,638 mm olarak elde edilmiştir.
- I-III ölçme dönemleri arasında, hassas geometrik nivelman yöntemiyle minimum düşey değişim Rs noktasında 4.236 mm ve maksimum düşey değişim 8 numaralı obje noktasında -52,816 mm olarak elde edilmiştir. Aynı dönem için hassas trigonometrik nivelman yöntemiyle minimum düşey değişim 6 numaralı obje noktasında -0,456 mm ve maksimum düşey değişim 8 numaralı obje noktasında -50,874 mm olarak elde edilmiştir.

Yukarıdaki incelemeden anlaşılacağı gibi, düşey değişimlerin belirlenmesinde her iki yöntemden elde edilen sonuçlarda I. ve II. ölçme dönemi arası dışında ortak noktalarda

yorumlama açısından herhangi bir fark görülmemektedir. I. ve II. ölçme dönemleri arasında 3 ay gibi kısa bir süre bulunmaktadır. Birim uzunluk olarak seçilen  $S_0 = 100$  m nivelman yolu uzunluğu için yükseklik farkı doğruluğu, literatürde (Çizelge 3.1) 0.8 mm – 1.6 mm değerleri verilmektedir. Bu uygulamada elde edilen standart sapma değeri ise 3.22 mm'dir. Bu değerler bir ölçme dönemindeki herhangi bir noktanın mutlak konum doğruluğuna ilişkin ölçütlerdir. Karşılaştırılacak iki konum değeri arasındaki bağıl doğruluk ölçütüne çevrilmeleri durumunda, 3.4mm – 6.8mm arasında (5.27 numaralı eşitlik) bir büyüklük elde edilmektedir. Uygulamada ise bu değer 13.6 mm büyüklüğündedir. Hassas geometrik nivelman sonuçlarına göre I-II ölçme dönemleri arasındaki maksimum değişim ise 9.582 mm'dir. Dolayısıyla bu çalışmada bu aralıkta yalnızca 5 ve 6 numaralı obje noktalarındaki değişimlerin anlamlı olduğu sonucuna varılması, güven aralıklarının ölçü doğruluğu ve ağ geometrisi bilgilerini de içeren (5.28) eşitliğine göre hesaplanmış olmasıyla açıklanabilir. Eğer literatürde verilen ölçü doğruluğuna ulaşılabilmiş olsaydı, bu aralıkta da pek çok noktadaki değişimlerin belirlenmesi mümkün olabilirdi.

II-III ölçme dönemleri arasındaki süre bir yıl ve I-III ölçme dönemleri arasındaki süre ise bir yılın üzerindedir. Bu aralıklarda baraj gövdesindeki düşey değişimlerin büyüklükleri 50 mm boyutlarına varmaktadır. Bu büyüklük, yukarıda açıklanan ölçü doğruluklarına ilişkin büyüklüklerin çok üzerindedir. Dolayısıyla değişimler rahatlıkla belirlenebilmiştir.

Yapılan tüm incelemeler neticesinde, günümüzde elektronik takeometrelerle yüksek doğruluklu gözlem yapma olanağı sonucunda, ölçme dönemleri arasında beklenen deformasyonların boyutunun, 3 mm – 7 mm civarında olması durumunda, 1 mm – 2 mm ölçü doğruluğuna ulaşılması halinde dolgu barajlarda, düşey değişimlerin, hassas trigonometrik nivelman yöntemi ile belirlenebileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca; hassas geometrik nivelman yönteminin uygulanmasındaki zorluklar ve uygulanması için gereken uzun süreçte (hassas trigonometrik nivelmana göre) hassas trigonometrik nivelman açısından bir avantaj olarak görülmektedir.



## KAYNAKLAR

- Akdoğan, N., (1998), “Deformasyon Analizinde Kullanılan Değerlendirme Yöntemleri”, Harita ve Kadastro Mühendisliği Dergisi, 85:110-122
- Kalkan, Y. ve Alkan, R.M., (2005), “Mühendislik Yapılarında Deformasyon Ölçmeleri”, 2. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, 23-25 Kasım 2005, İstanbul
- Aydın, C., (2001), Yerkabuğundaki Düşey Deformasyonların Analizinde Statik Modelin Güvenirliği Üzerine Bir İnceleme, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Aydın, Ö., Erkaya, H., Hoşbaş, R.G., Gülal V.E. ve Soycan, M., (2004), “Pabuçdere Barajı Deformasyon Ölçmeleri Araştırma Raporu”, İstanbul
- Benning, W., (1983), Deformationsanalyse Mittels Fingierter Stiecken, Deformationsanalysen’83, Geometrische Analyse und Interpretation von Deformationen Geodaetischer Netze, HSBC, Heft 9, München
- Boyacı, T., (2005), “Barajlarda Mühendislik Ölçmeleri”, 2. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, 23-25 Kasım 2005, İstanbul
- Demirkaya, S., Hoşbaş, R.G. ve Erkaya, H., (2005), “Hannover Yaklaşımı ile Geometrik Analiz Sürecine Bir Kısayol Önerisi”, 2. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, 23-25 Kasım 2005, İstanbul
- Demirel, H., (2001), Dengeleme Hesabı, YTÜ Lisans Ders Notları, İstanbul
- Erdoğan, H. (1998), Yapı Çevresinde Deformasyon Ölçmeleri ve Bir Model Üzerine Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul
- Erkaya, H., (1987), Mühendislik Yapılarında Deformasyonların Jeodezik Yöntemlerle Saptanması ve Bir Model Üzerine Uygulanması, Doktora Tezi, İstanbul
- Erkaya, H., (2006), Yükseklik Sistemleri, YTÜ Lisans Ders Notları, İstanbul
- Gülal, V.E., (1992), Mühendislik Yapılarındaki Deformasyonların Belirlenmesinde Üç Boyutlu Jeodezik Yaklaşım, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul
- Heck, B., (1983), Das Verfahren des Analysis von Geodasisches Institut der Universtat Karlsruhe, Schriftenreihe Wiss.Studiengang Wermessungswesen, HSBW Heft 9, München
- Henriques, M.J. ve Casaca, J., (2006), “Uncertainty In Tacheometric Measurement of Convergences In Tunnels”, 12th FIG Symposium, May 22 – 24, Baden
- Hoşbaş, R.G., (1992), Baraj Deformasyonlarının Belirlenmesinde Jeodezik Yaklaşımların İrdelenmesi ve Bir Öneri, Doktora Tezi, İstanbul
- Hoşbaş, R.G., (2004), Barajlarda Deformasyon Ölçmeleri, YTÜ Lisansüstü Ders Notları, İstanbul
- Kahmen, H., (2006), Angewandte Godäsie Vermessungs-kunde, Berlin
- McDaniel, T.N. ve Blair, H.K., (1987), Design of Small Dams, Chapter 4 - Chapter 7, A Water Resources Technical Publication, United States Department of the Interior Bureau of Reclamation

Özhan, N.N., (1994), Deformasyon Ölçü Yöntemleri ve İstanbul Metrosunda Yapılan Deformasyon Ölçmeleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul

Öztürk, E. ve Şerbetçi, M., (1995), Dengeleme Hesabı Cilt II, Trabzon

Soycan, M., (2002), Jeoit yüksekliklerinin GPS ve Hassas Trigonometrik Nivelman Ölçmeleri ile Belirlenmesi, Doktora Tezi, İstanbul

Witte B., Schmidt H., (1995), Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen , Stuttgart

Yalçınkaya, M., (1996), “Nivelman Ağlarında Duyarlık ve Güven Ölçütleri”, Harita ve Kadastro Mühendisliği Dergisi, 80:73-85

### **İNTERNET KAYNAKLARI**

[1] [http://www.cartesiostrumenti.it/catalogo\\_prodotto.php/Leica%20Geosystems](http://www.cartesiostrumenti.it/catalogo_prodotto.php/Leica%20Geosystems)

[2] <http://www.dsi.gov.tr/kalkinmaicinsu/teknikgezi.htm>

[3] <http://earth.google.com>

[4] <http://www.mohaveinstrument.com/NewFiles/NAK2.html>

[5] <http://www.sistemas.com.tr/page.php?ID=26>

[6] <http://www.sistemas.com.tr/page.php?ID=36>

[7] <http://www.suvakfi.org.tr/makale-berke.htm>

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi	25.07.1979	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1993-1996	Bahçelievler Kemal Hasođlu Lisesi
Lisans	1998-2003	Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2003- 2007	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Anabilim Dalı Geomatik Programı

**Çalıştığı kurumlar**

2004-2005	Vakıf Gayrimenkul Ekspertiz A.Ş.
2005-2006	Yükselen Yapı Grup
2006-Devam Ediyor	İBB BİMTAŞ