

3. BÖLÜM

DEFORMASYON ÖLÇME YÖNTEMLERİ

3.1. Giriş

Bir bölgenin, mühendislik yapısının ve yakın çevresinin kısaca bir objedeki şekil değişimlerini belirlemek için, çeşitli faktörlerin etkilerinin göz önünde tutulduğu ve ölçüldüğü yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemleri fiziksel ve mekanik olarak iki gruba ayırmak olanaklıdır. Uygulamada her iki yöntemde de fiziksel büyüklükler ölçülmektedir. Bundan dolayı yöntemleri dolaylı ve doğrudan yöntemler olarak sınıflandırmak daha uygundur (Algül E. 1983).

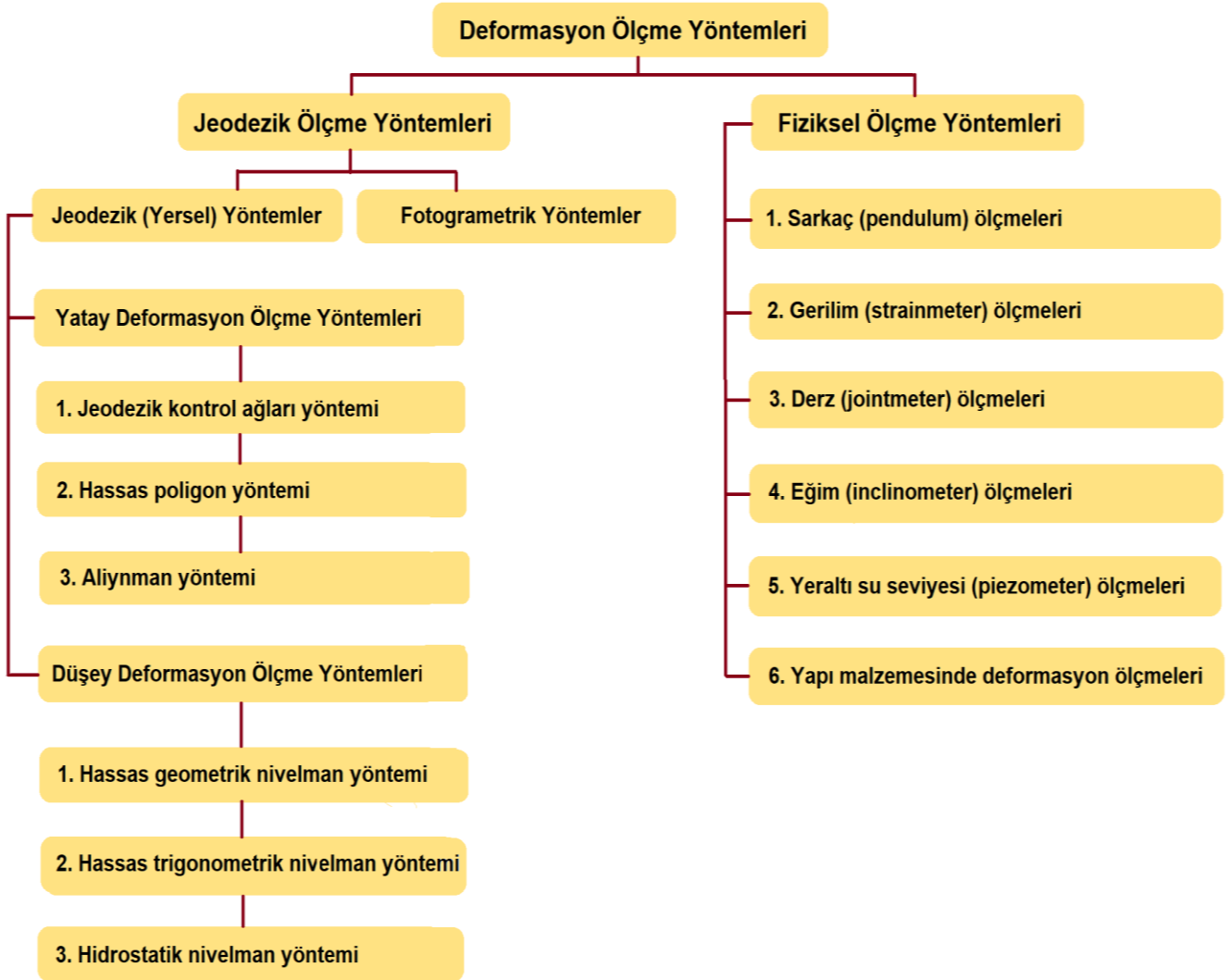
Dolaylı yöntemlerde yapıda deformasyona neden olan değişik faktörlerin büyüklükleri ölçülür. Bunlar; yapıya etkiyen yükler, su basıncı, beton hava ve suyun sıcaklığı, taban suyu seviyesindeki değişimler ve gerilmelerdir. Doğrudan yöntemlerde ise deformasyon araştırması yapılan objenin karakteristik noktalarının hareketleri izlenerek doğrudan deformasyonlar belirlenir.

Bağıl hareketlerin ölçülmesi durumunda bağıl ve fiziksel yöntemlerden, mutlak hareketlerin belirlenmesi durumunda jeodezik yöntemlerden söz edilir. Esasen tüm ölçüler bağıl olduğundan deformasyon ölçme yöntemlerinin jeodezik ve fiziksel yöntemler olarak sınıflandırılması daha anlamlıdır (Algül E. 1983).

Jeodezik yöntemler ise kendi içinde iki kısma ayrılır. Bunların bir kısmı yatay düzlemdeki deformasyonların, diğer kısmı ise düşey düzlemdeki deformasyonların belirlenmesinde uygulanır. Ayrıca her iki düzlemdeki deformasyonları, aynı anda belirlemeye olanak veren fotogrametrik yöntemler de vardır (Tablo 2.01).

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

Tablo-2.01 Deformasyon ölçme yöntemleri



3.2. Jeodezik yöntemlerle deformasyon ölçmeleri

Jeodezik yöntemlerle deformasyon ölçmeleri yapı ve yakın çevresinde oluşan şekil değişimlerinin belirlenmesine olanak sağlaması ve güvenilir olması nedeniyle yaygın uygulama alanı bulmaktadır (Algül E. 1983). Bu yöntemler ölçme zamanına göre iki gruba ayrılabilir. Bunlar;

- 1- Sürekli ölçme yöntemleri,
- 2- Ayrık ölçme yöntemleridir.

Sürekli ölçme yönteminde, değişim göstermesi beklenen yapının belirli karakteristik bölgesi ya da noktaları sürekli gözlenir. Ayrık yöntemde ise, seçilen dönemlere göre belirli zaman aralıkları ile ölçmeler yinelenir, (Atasoy V. 1984).

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

Jeodezik deformasyon ölçme yöntemleri;

- 1-** Yatay yöndeki deformasyonların belirlenmesinde uygulanan yöntemler,
 - a-** Jeodezik kontrol ağları yöntemi,
 - b-** Hassas poligon yöntemi,
 - c-** Aliynman yöntemi,
- 2-** Düşey yöndeki deformasyonların belirlenmesinde uygulanan yöntemler,
 - a-** Hassas geometrik nivelman yöntemi,
 - b-** Hassas trigonometrik nivelman yöntemi,
 - c-** Hidrostatik nivelman yöntemi

olarak sınıflandırılabilir.

Deformasyonların üç boyutlu olarak belirlenmesinde büyük yararlar görüldüğünden, pratikte koşullara ve seçeneklere göre bu yöntemlerin kombinasyonları uygulanır, (Algül E. 1983). Genelde, klasik jeodezik ölçme yöntemlerinde yatay ve düşey hareketler ayrı ayrı izlenmektedir. Günümüzde gelişen uzay ve uydu sistemleri (GPS, GLONASS, GALILEO ve COMPASS veya günümüzde genel adı ile GNSS gibi) yardımı ile deformasyonlar üç boyutlu olarak izlenebilmekte ve istenen doğruluğa ulaşılabilir, (Cross P.A., Şahin M. 1997).

3.2.1. Jeodezik kontrol ağları yöntemi

Jeodezik ağlar birbirlerine jeodezik elemanlarla bağlanmış ve koordinatları ortak bir koordinat sisteminde belirlenmiş noktalar kümesini içerir. Deformasyon ölçmelerinde noktaları iki ana gruba ayrılan kontrol ağlarından yararlanılmaktadır (Şekil 2.01). Bir jeodezik kontrol ağı birçok sabit nokta ve obje noktalarından oluşur.

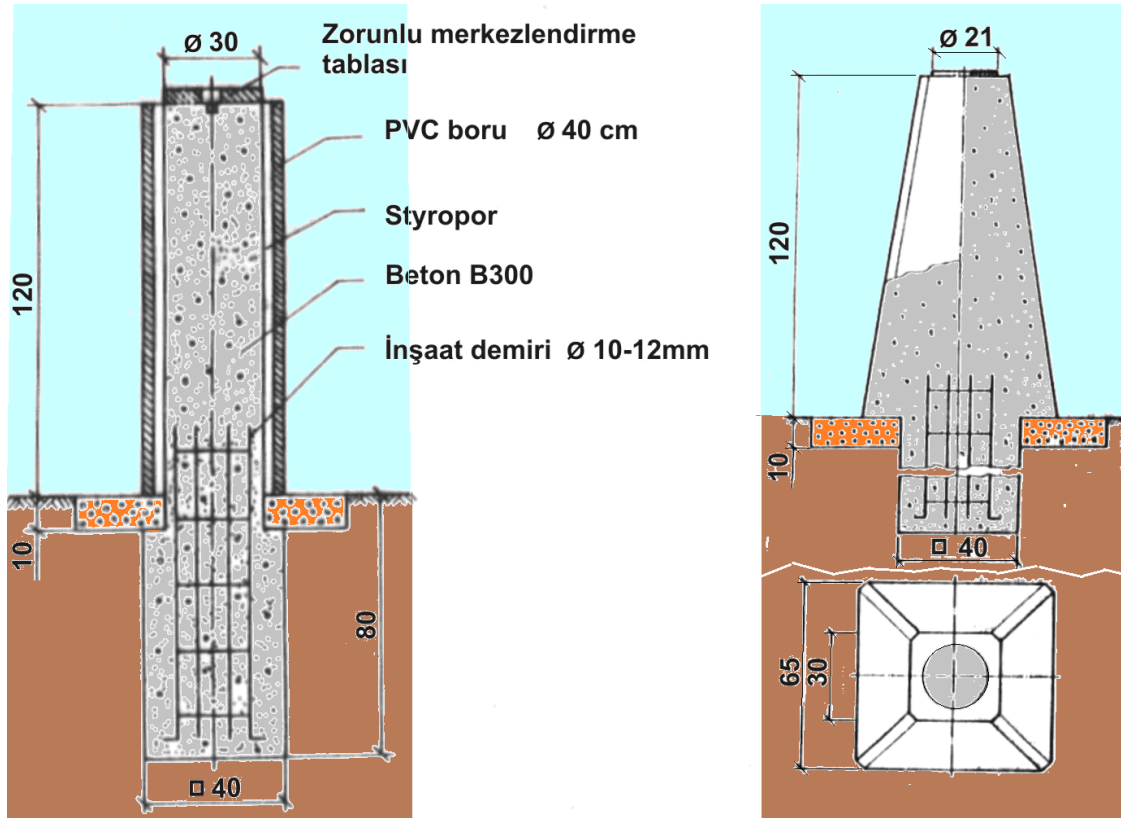
Genel olarak bir kontrol ağında dört değişik nokta grubu vardır. Bunlar;

- 1-** Ölçme (Kontrol) noktaları,
- 2-** Obje (Deformasyon) noktaları,
- 3-** Yöneltilme noktaları ve
- 4-** Sigorta noktalarıdır.

Normal olarak deformasyon araştırması yapılacak obje geometrik şekle sahiptir. Bu nedenle şekil değişimleri uzayda obje nokta hareketleri olarak tanımlanabilir. Bunun içinse üç boyutlu bir kontrol ağı gereklidir. Özel durumlarda genellikle yalnız yatay ve düşey hareketlerle ilgilenilir. Bu durumda iki veya tek boyutlu bir kontrol ağı yeterli olmaktadır.

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

edilirler (Şekil 2.02). Şekil 2.01'de R_1 , R_2 , R_3 , ... kontrol noktalarıdır. Bu noktalar referans noktası olarak da adlandırılır.



Şekil 2.02 Pilye olarak tesis edilmiş kontrol noktaları

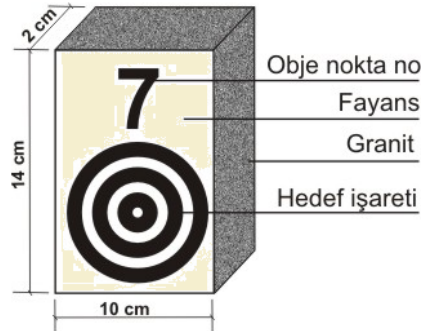
Obje (deformasyon) noktaları: Bu noktalar deformasyon araştırması yapılacak objeyi temsil eden noktalardır. Barajlarda, gövdenin hava tarafını oluşturan mansap yüzeyine, deformasyon eğrilerinin oluşturulması için farklı yüksekliklerde paralel sıralar halinde hedef markaları şeklinde tesis edilir, (Şekil 2.03). Bazı barajlarda gövdedeki galerilerden mansap tarafına açılan balkonlarda tesis edilen obje noktaları ile yerkabuğu hareketlerinin araştırılmasında kullanılan obje noktaları pilye olarak tesis edilirler, (Hoşbaş R.G. 1992). Şekil 2.01'deki O_1 , O_2 , O_3 , ... obje noktalarıdır.

Obje noktalarının seçimi ve tesisinde;

- Obje noktalarının uzaydaki hareketlerinin obje deformasyonunun temsili bir şeklini göstermesine (bu nedenle obje noktalarının uzaysal dağılımı inşaat mühendisi, makine mühendisi ve jeolog gibi ilgili disiplinlerin üyeleri ile birlikte belirlenmelidir.),
- Dayanıklı ve sağlam olarak işaretlenmesine ve objenin yaşamı boyunca kullanıma hazır olmasına,

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

- Birkaç noktanın kaybolması durumunda araştırmayı uzun süre tehlikeye sokmayacak uygun bir sayıda olmalarına dikkat edilmelidir.



a- Barajda obje işareti



b- Tünelde obje işareti



c- Tarihi yapıda obje işareti

Şekil 2.03 Obje noktalarında kullanılan hedef işaretleri

Yöneltme noktaları: Ölçme ve obje noktalarından oluşan ağ kısmının tümünden hareketlerini belirlemede kullanılırlar. Deformasyon araştırması yapılan bölgenin dışında ve konumlarının sağlam kalma olasılığı fazla olan zeminlerde seçilir. Ölçme noktalarından bu noktalara yapılan ölçülerle kontrol noktalarının hareket edip etmediği araştırılır. Yöneltme noktalarının seçimine jeoloji mühendisleri ve inşaat mühendisleri gibi ilgili meslek elemanları ile karar verilmelidir. Son yıllarda oluşturulan jeodezik kontrol ağları bu grup noktaları içermemektedir, (Algül E. 1983, Erkaya H. 1986). Şekil 2.01'deki $Y_1, Y_2, Y_3, \dots$ yöneltme noktalarıdır.

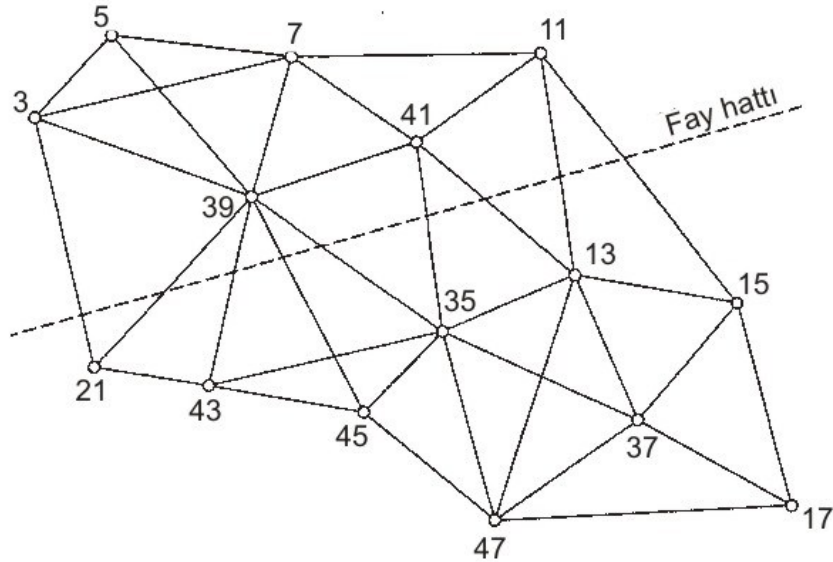
Sigorta noktaları: Yerel pilye hareketlerinin kontrolü ölçme noktalarının hemen yakınındaki sigorta noktaları ile sağlanır. Sağlam kaya ya da dip zemine yerleştirilen taşlar üzerine özel çivilerle belirlenirler. Kontrol ağının noktalarından sayılmazlar. Şekil 2.01'deki R_7 referans noktasının çevresindeki $s_1, s_2, s_3, \dots$ sigorta noktalarıdır.

3.2.1.2. Jeodezik kontrol ağlarının sınıflandırılması

Jeodezik kontrol ağları *Bölüm 2.2.1.1.*'de ayrıntılı olarak açıklanan nokta gruplarının bütününe kapsamayabilir. Örneğin Şekil 2.04'de verilen bir fay

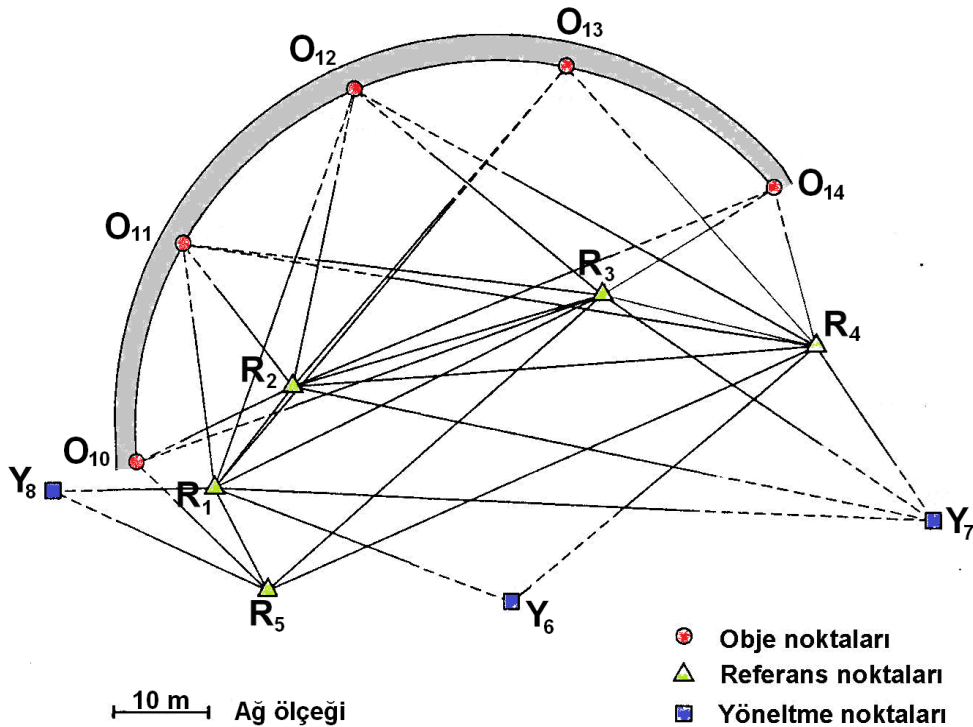
2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

hattı boyunca yer kabuğu hareketlerinin belirlenmesi amacıyla kurulmuş kontrol ağı ile Şekil 2.05'deki bir barajdaki kontrol ağı aynı nokta gruplarını içermez.



Şekil 2.04. Bir fay hattı boyunca oluşturulmuş bağıl kontrol ağı

Bu ağda bütün noktalar yer kabuğu hareketleriyle bağlantılı olduğundan hiçbir referans noktası olmayan bir ağ söz konusudur. Diğer bir deyişle noktaların bağıl hareketleri analiz edilir. Bu nedenle bu tür gözlem ağları **bağıl ağlar** olarak tanımlanır.



Şekil-2.05. Bir barajda oluşturulmuş mutlak kontrol ağı

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

Baraj gövdesinin hareketleri hareketsiz olduğu varsayılan referans noktalarının oluşturduğu bir ağdan gözlenir. Bu ağ obje noktalarının değişimlerini mutlak hareketler olarak tanımlayan bir referans sistemi oluşturur. Bu nedenle bu şekildeki kontrol ağları **mutlak ağlar** olarak adlandırılır.

3.2.1.3. Jeodezik kontrol ağını ölçme dönemleri

Ölçme işlemine başlamadan önce, beklenen deformasyonların büyüklüğüne uygun ölçme planı ve ölçme aletleri seçilir. Ölçme aletleri laboratuvarlarda kontrol edilerek kalibrasyonları yapılır. Ölçme işlemi belirlenen plana göre atmosferik etkilerin en az olduğu saatlerde deneyimli elemanlar tarafından yapılır. Eğer statik davranışlı model uygulanacaksa ölçmeler en kısa zaman aralığında tamamlanmalıdır.

Jeodezik kontrol ağının ilk konumunu belirlemek için yapılan ölçmeler referans ölçüsü ya da sıfır ölçüsü olarak adlandırılır. Baraj deformasyonlarını belirlemek üzere oluşturulmuş bir kontrol ağında bu işlem su toplamaya başlamadan önce yapılır. Ardından ağdaki olası deformasyonları belirlemek üzere rezervuarın dolumu sırasında farklı su seviyelerinde ölçmeler yapılır. Rezervuarın dolmasından sonra yıllık su rejimine bağlı olarak su seviyesinin en fazla ve en az olduğu dönemlerde belirli zaman aralıklarında ölçmeler tekrarlanır. Bu ölçmeler 1.yineleme, 2.yineleme, ... ya da 1.ölçme dönemi, 2.ölçme dönemi, ... veya yapılan zamanı belirtmek için Şubat 94 ölçüleri, Mayıs 95 ölçüleri, ... olarak adlandırılır. Ölçme dönemlerinin zaman aralığı, oluşan deformasyonların büyüklüğüne ve objeye etkileyen faktörlerin değişimine bağlı olarak belirlenir.

3.2.1.4. Jeodezik kontrol ağının ölçülmesinde kullanılan aletler

Jeodezik deformasyon ölçmelerinde kullanılacak aletlerin seçiminde;

- Objenin yapısına göre deformasyon ve deplasmanların ileriye dönük geçici ve mekansal davranışı,
- Deformasyon sürecinin hareket hızı ile ölçme programı için gereken zaman boyutu arasındaki oran,
- Beklenen deformasyonların büyüklüğü ile istenen duyarlılık,
- Alet ve insan gücünün maliyeti göz önünde tutulur, (Uzel T. 1991).

Jeodezik kontrol ağında yapılan gözlemlerde kullanılan ölçme aletleri ölçü özelliklerine göre;

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

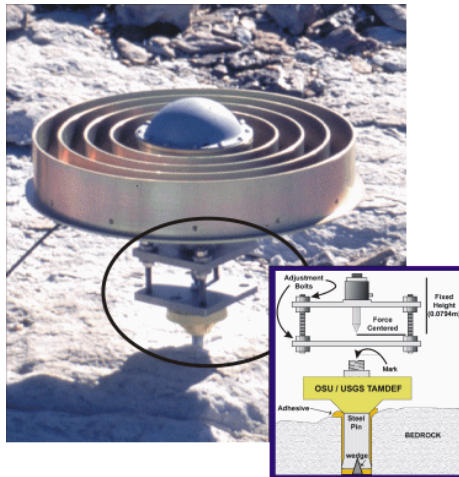
- Doğrultu (açı) ölçen aletler (teodolitler),
- Uzunluk ölçen aletler (elektronik uzunluk ölçme aletleri),
- Yükseklik farklarını ölçen aletler (nivolar) ve
- Üç boyutlu konum farkı ölçen aletler (birleşik ölçme aletleri, uydu alıcıları ve laser tarayıcılar) olarak dört gruba ayırabiliriz. Bu aletlerle yapılacak ölçü sayıları 1.derece nirengi ağlarındaki ölçü sayıları ile aynı olmalıdır.



Şekil-2.06 Leica TCRM 1200 robotik hassas elektronik takeometresi



Şekil-2.07 Leica DNA03/DNA10 sayısal hassas nivosu



Şekil-2.08 Çok kanallı GPS alıcısı

Barajlarda Deformasyon Ölçmeleri

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

Doğrultu ölçümünde kullanılan aletler, 1^{cc} okuma duyarlıklı ve dürbün büyütmesi 30-40 arasında olan teodolitlerdir. Günümüzde elektronik uzunluk ölçerler $\sigma_s = (0,5 + 1.S^{km})$ mm ölçü doğruluğuna ulaşmıştır. Bir yansıtıcı ile ölçü uzaklığının mümkün ölçüde uzun olması istenen bu aletler deformasyon ölçmelerinde rahatlıkla kullanılmaktadır. Elektronik olarak doğrultu ve uzunluk ölçümü yapan birleşik ölçü aletlerinin (elektronik takeometreler) günümüzde ulaştıkları ölçü doğruluğu göz önüne alındığında bu çalışmalarda rahatlıkla kullanılabilirler. Yükseklik farklarının ölçülmesinde ölçü duyarlığı 0.5 mm/km ve dürbün büyütmesi 30-40 olan nivolar kullanılır. Bunların yanında çift frekanslı uydu alıcıları (receiver) kullanılarak ve bağıl ölçme yöntemi uygulanarak jeodezik kontrol ağının noktaları arasındaki üç boyutlu konum farkları mm doğrulukla rahatlıkla belirlenebilmektedir.

3.2.1.5. Aletlerin kullanılmasında dikkat edilecek hususlar

Ölçme aletlerinin kullanılmasında aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir.

- Doğrultu ve uzunluk ölçme aletlerinin (teodolit ve uzunluk ölçme aletleri) merkezlenmesi ve hedeflenmesine sıklıkla özen gösterilmez. Sehpa üzerinde yapılan ölçmelerde, özen gösterilmesine ve optik çekül kullanılmasına rağmen merkezlendirme doğruluğu hiçbir zaman 1 mm'nin altına indirilememiştir. Ölçü aletlerinin zorunlu merkezlendirmeli sabit pilyeler üzerine kurulması ve benzer donanımların hedef noktasında da olması durumunda çok daha uygun sonuçlar elde edildiği görülmüştür.
- Uzunluk ölçerlerin kalibrasyonları titizlikle yapılmalı, sıfır noktası düzeltmesi ve ölçek hatası belirlenmelidir.
- Teodolitlerle yapılacak eğik gözlemlerde özellikle asal eksenin dikliğine dikkat edilmelidir. Elektronik teodolitlerde asal eksen eğikliği otomatik olarak ölçülerek okumalara düzeltme olarak getirilir. Böyle bir teodolit yoksa asal eksen eğikliği ayrıca ölçülür ve ölçüler düzeltilir, (Pelzer H. vd, 1988).

3.2.1.6. Jeodezik kontrol ağının ölçülmesi

Bir jeodezik kontrol ağındaki noktalar arasındaki geometrik büyüklükler en duyarlı biçimde gözlenmelidir. Ölçüler ve bunlara bağlı olarak belirlenecek parametreler arasındaki ilişki doğru olarak kurulmalıdır. Bu aşamada yapılacak bir hata analiz sonuçlarının irdelenmesinde karşımıza deformasyon olarak çıkabilir. Bu nedenle önce gözlemler ölçü doğruluğu yüksek aletlerle ve uygun koşullarda yapılmalı, sonra hesaplama için gözlemler arasındaki ilişkiyi kurmak için yapılan düzenlemeler doğru olmalıdır.

3.2.1.6.1. Doğrultu ölçülerinin yapılması ve indirgenmesi

Kontrol ağındaki doğrultu ölçüleri gün içinde yatay kırılmanın en az olduğu saatler olan sabah ve akşam saatlerinde yapılmalıdır. Kırılmanın en çok olduğu öğle saatlerinde yatay doğrultu gözlemi yapılmamalıdır. Ölçüler, silsile yöntemine göre ve birinci derece ülke nirengi ağı noktaları için öngörülen sayıda yapılır. Silsile yöntemine göre yapılmış yatay doğrultu ölçülerinin indirgenmesi istasyon dengelemesi şeklinde yapılır. Bir ölçme noktasında indirgeme hesabı

- s : gözlenen doğrultu sayısı, ($k = 1, 2, 3, \dots, s$)
 n : silsile sayısı, ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)
 r_k : k 'inci doğrultunun silsileler ortalaması,
 r_{ik} : i 'inci silsiledeki k 'inci doğrultu,
 d_{ik} : i 'inci silsiledeki k 'inci doğrultunun silsileler ortalamasından olan ölçü farkı
 d_i : i 'inci silsiledeki k sayıda doğrultunun ölçü farklarının ortalaması
 v_{ik} : i 'inci silsiledeki k 'inci doğrultunun hatası,
 $s(r)$: bir doğrultunun bir silsiledeki standart sapması ve
 $S(r)$: bir doğrultunun silsileler ortalamasının standart sapması

olmak üzere

$$\begin{aligned}
 d_{ik} &= r_k - r_{ik} \\
 d_i &= [d_{ik} d_{ik}] / s \\
 v_{ik} &= d_{ik} - d_i \\
 [vv]_i &= [v_{ik} v_{ik}] \\
 [vv] &= [[vv]_i] \\
 s(r) &= \sqrt{\frac{[vv]}{(n-1)(s-1)}} \\
 S(r) &= \frac{s(r)}{\sqrt{n}}
 \end{aligned} \tag{2.01}$$

bağıntıları ile yapılır.

Uygulama 2.01: Bir ölçme noktasında obje noktalarına iki silsile yatay doğrultu gözlemi yapılarak aşağıdaki tablonun **3.** ve **4.** sütunlarındaki ölçü değerleri elde edilmiştir.

a- İndirgenmiş doğrultu değerlerini,

b- Bir silsiledeki her bir doğrultunun standart sapmasını ($s(r)$, ortalama hatasını) ve silsileler ortalamasından hesaplanan bir doğrultunun standart sapmasını ($S(r)$, ortalama hatasını) hesaplayınız.

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

DN	BN	DÜRBÜN		SIFIRLAMA		ORT.	SİLSİLE	d	v	vv
		I.DURUM	II.DURUM	I.DURUM	II.DURUM		ORT.	cc	cc	cc ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
201	203	0.00215	200.00020	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.0	-2.4	5.8
	504	50.35244	250.35360	50.35029	50.35340	50.35185	50.35160	-2.5	-4.9	24.0
	505	72.64668	272.64454	72.64453	72.64434	72.64444	72.64365	-7.9	-10.3	106.1
	506	90.80622	290.80476	90.80407	90.80456	90.80432	90.80321	-11.1	-13.5	182.3
	511	51.19762	251.19952	51.19547	51.19932	51.19740	51.19755	1.5	-0.9	0.8
	512	72.74552	272.74812	72.74337	72.74792	72.74565	72.74634	6.9	4.5	20.3
	513	90.53140	290.53346	90.52925	90.53326	90.53125	90.53145	2.0	-0.4	0.2
	517	51.07100	251.07612	51.06885	51.07592	51.07238	51.07344	10.6	8.2	67.2
	518	72.94052	272.94488	72.93837	72.94468	72.94152	72.94217	6.5	4.1	16.8
	519	90.78684	290.79072	90.78469	90.79052	90.78760	90.78771	1.1	-1.3	1.7
	522	73.07520	273.08104	73.07305	73.08084	73.07694	73.07780	8.6	6.2	38.4
	201	115.83660	315.83762	115.83445	115.83742	115.83594	115.83722	12.8	10.4	108.2
		99219	1458	96639	1218	98929	99214	28.5	-0.3	571.8
				12x215=2580	12x20=240		d ₁ =	2.4		
				99219	1458					
201	203	100.00121	300.00022	0.00000	0.00000	0.00000		0.0	2.3	5.3
	504	150.35310	350.35102	50.35189	50.35080	50.35135		2.5	4.8	23.0
	505	172.64506	372.64208	72.64385	72.64186	72.64286		7.9	10.2	104.0
	506	190.80422	390.80140	90.80301	90.80118	90.80210		11.1	13.4	179.6
	511	151.19830	351.19850	51.19709	51.19828	51.19769		-1.4	0.9	0.8
	512	172.74650	372.74896	72.74529	72.74874	72.74702		-6.8	-4.5	20.3
	513	190.53064	390.53410	90.52943	90.53388	90.53165		-2.0	0.3	0.1
	517	151.07318	351.07724	51.07197	51.07702	51.07449		-10.5	-8.2	67.2
	518	172.94124	372.94582	72.94003	72.94560	72.94281		-6.4	-4.1	16.8
	519	190.78684	390.79022	90.78563	90.79000	90.78781		-1.0	1.3	1.7
	522	173.07582	373.08290	73.07461	73.08268	73.07865		-8.5	-6.2	38.4
	201	215.84026	15.83816	115.83905	115.83794	115.83849		-12.7	-10.4	108.2
		99637	1062	98185	798	99492	Σ=	-27.8	-0.2	565.4
				12x121=1452	12x22=264		d ₂ =	-2.3		
				99637	1062				[vv] =	1137

Tablonun 11. sütununda (2.01) eşitlikleri ile hesaplanan [vv] değerinden,

Bir silsiledeki her bir doğrultunun standart sapması:

$$s(r) = \sqrt{\frac{1137}{(2-1)(12-1)}} = 10.2^{cc}$$

Silsileler ortalamasından hesaplanan bir doğrultunun standart sapması:

$$S(r) = \frac{10.2}{\sqrt{2}} = 7.2^{cc} \text{ olarak elde edilir.}$$

Not: Statik davranışlı modelin uygulandığı çalışmalarda obje noktalarına yatay doğrultu ölçmeleri yapılırken, öncelikle aynı düşey doğrultudaki noktalara gözlem yapılması ölçü zamanının kısılmasını sağlar.

3.2.1.6.2. Uzunluk ölçülerinin yapılması ve indirgenmesi

Elektronik uzunluk ölçme aletleri kullanılarak yapılan ölçmeler sonucu elde edilen kenar ölçü değerleri ham değerlerdir. Bu ölçülerin jeodezik amaçlarla kullanılması için işlenmesi gerekir. Bu nedenle bir dizi düzeltme ve indirgeme işlemi yapılır. Durulan ve bakılan noktalarda basınç ve hava sıcaklığı ölçüleri yapılmalıdır. Ölçü anında uzunluk ölçme aleti ile yansıtıcının bulunduğu noktalarda alet ve yansıtıcı yükseklikleri mm doğrulukla ölçülmelidir. Uzunluk ölçülerinin indirgenmesi aşağıdaki işlem sırasında yapılır.

$$T_A \text{ ve } T_B : A \text{ ve } B \text{ noktalarındaki hava sıcaklığı}$$

$$T = \frac{1}{2}(T_A + T_B) \text{ } ^\circ K \quad (2.02a)$$

$$P_A \text{ ve } P_B : A \text{ ve } B \text{ noktalarındaki atmosferik basınç}$$

$$P = \frac{1}{2}(P_A + P_B) \text{ mbar} \quad (2.02b)$$

$$H_A \text{ ve } H_B : A \text{ ve } B \text{ noktalarının yüksekliği}$$

$$i_A \text{ ve } i_B : A \text{ ve } B \text{ noktalarındaki alet yüksekliği olarak}$$

$$h_A = H_A + i_A, \quad h_B = H_B + i_B \quad (2.02c)$$

laser ışını kullanan bir elektronik uzunluk ölçme aleti için grup hızı ve grup kırılma indisi (λ : alette kullanılan ışının dalga boyu)

$$(n_{go} - 1) \times 10^6 = 287.604 + \frac{4.8864}{\lambda^2} + \frac{0.0680}{\lambda^4} \quad (2.03a)$$

$$(n_g - 1) = 0.2696 (n_{go} - 1) \frac{P}{T} \quad (2.03b)$$

bağıntıları ile hesaplanır. Buna göre ölçülen s_0 eğik kenar uzunluğu,

a- Hız düzeltmesi

$$ds_v = s_0 \left(\frac{n_{alet}}{n_g} - 1 \right), \quad s_1 = s_0 + ds_v \quad (2.04a)$$

b- Eğrilik düzeltmesi

(r : ölçü yapılan bölgenin ortalama yeryuvarı yarıçapı)

$$ds_{E1} = \frac{s_1^3}{32 r^2}, \quad s_2 = s_1 + ds_{E1} \quad (2.04b)$$

c- Eğim düzeltmesi

$$\Delta h = h_B - h_A$$

$$ds_{E2} = -\frac{1}{2} \frac{\Delta h^2}{s_2} + \frac{1}{8} \frac{\Delta h^4}{s_2^3}, \quad s_3 = s_2 + ds_{E2} \quad (2.04c)$$

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

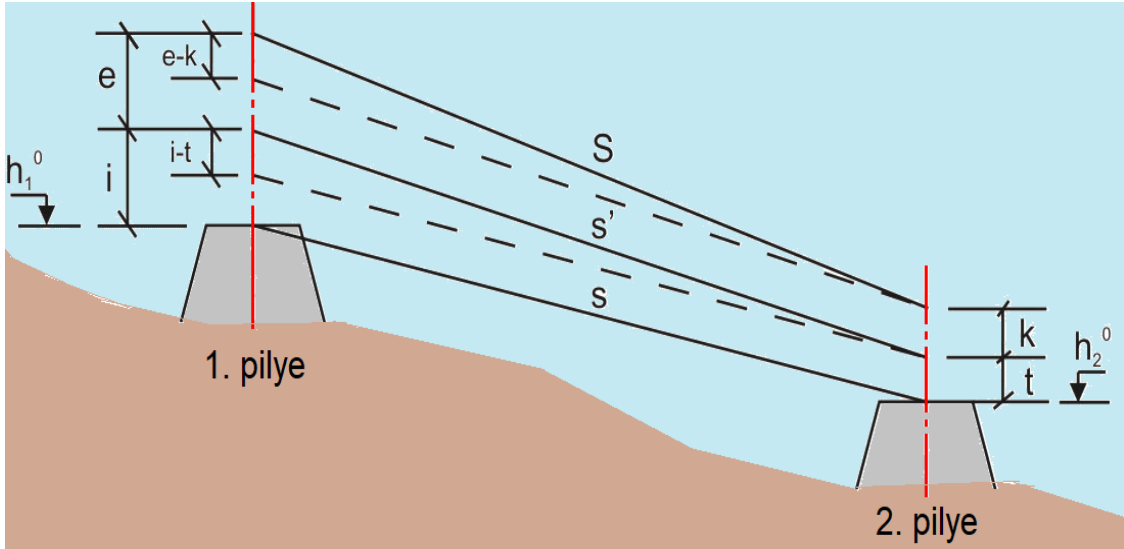
Düşey açı ölçülerek de eğim düzeltmesi yapılabilir. Ancak kırılmanın gün boyunca değişmesi nedeniyle düşey açı ölçümünde önemli etkiler oluşmaktadır. Bu nedenle yükseklik farklarına göre eğim indirgemesi yapılması tercih edilir.

d- Deniz yüzeyine indirgeme düzeltmesi

$$h = \frac{1}{2}(h_B + h_A)$$

$$ds_D = -\frac{h}{r} s_3 + \frac{h}{r^2} s_3^2 \quad , \quad s_4 = s_3 + ds_D \quad (2.04d)$$

bağıntıları ile deniz yüzeyine indirgenmiş kenar uzunluğu hesaplanır, (Uzel T., 1984). Ölçülen eğik uzunluğun pilye üzerine indirgenmesi, hız ve eğrilik düzeltmesi getirildikten sonra yapılır.



Şekil 2.06. Eğik uzunluğun pilye üzerine indirgenmesi

- S : ölçülen eğik kenar uzunluğu,
- s^I : teodolit gözlem ekseni üzerine indirgenmiş uzunluk,
- s : pilye üzerine indirgenmiş uzunluk,
- i : teodolit gözlem ekseni yüksekliği,
- e : teodolit gözlem ekseni ile elektronik uzunluk ölçerin gözlem ekseni arası uzaklığı,
- t : işaret yüksekliği,
- k : yansıtıcı ile hedef işareti arasındaki uzaklık
- h_1^0, h_2^0 : uzunluk ölçer ve yansıtıcının bulunduğu noktaların geometrik nivelman ile bulunan yaklaşık yükseklikleri ve
- s_{12}^0 : yaklaşık koordinatlardan bulunan yatay uzunluk

olmak üzere

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

$$z^{01} = 100^g - \arctan \frac{h_2^0 + t + k - h_1^0 - i - e}{s_{12}^0} \quad (2.05a)$$

$$z^{02} = 100^g - \arctan \frac{h_2^0 + t + k - h_1^0 - i}{s_{12}^0}$$

$$ds_1 = (e - k) \cos z^{01} \quad , \quad s' = S + ds_1$$

$$ds_2 = (i - t) \cos z^{02} \quad , \quad s = s' + ds_2 \quad (2.05b)$$

bağıntıları ile pilye üzerine indirgenmiş eğik uzunluk bulunur.

Uygulama 2.02: Bir jeodezik kontrol ağında iki referans noktası arasında kenar uzunluğu ölçülerek $S_{13}=86.5577\text{m}$ olarak ölçülüyor. Ölçmede kullanılan EUÖ aletindeki ışık ışınının dalga boyu $\lambda=860$ mikrondur. Ölçü anındaki hava sıcaklığı 11.2°C , noktalardaki açık hava basıncı $P_1=992.63$ mbar ve $P_3=993.99$ mbar olarak belirlenmiştir. Nokta yükseklikleri $H_1=172.1383$ m, $H_3=160.4970$ m ve ortalama yeryuvarı yarıçapı $R=6372366$ m olarak verilmiştir.

a- Deniz yüzeyine indirgenmiş kenar uzunluğunu,

b- $\dot{I}=0.24$ m, $e=0.19$ m ve $k=0.05$ m olarak ölçüldüğüne göre pilye üzerine indirgenmiş kenar uzunluğunu hesaplayınız.

Çözüm a:

- (2.02a)'dan Kelvin derecesi olarak hava sıcaklığı, (2.02b)'den ortalama basınç değeri ve (2.02c)'den nokta yükseklikleri hesaplanır

$$T = 273.2 + 11.2 = 284.4^\circ \text{K}$$

$$P = \frac{992.63 + 993.99}{2} = 993.31 \text{ mbar}$$

$$h_1 = 172.1383 + 0.24 + 0.19 = 172.5683 \text{ m}$$

$$h_3 = 160.4970 + 0.00 + 0.05 = 160.5470 \text{ m}$$

- (2.03a)'dan grup hızı, (2.03b)'den grup kırılma indisi bulunur.

$$(n_{g_0} - 1) \times 10^{-6} = 287.604 + \frac{4.8864}{0.86^2} + \frac{0.0680}{0.86^4} = 294.335127$$

$$(n_g - 1) = 0.2696 \times 0.000294335127 \times \frac{993.31}{284.4} = 0.000277151$$

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

- (2.04a)'dan hız düzeltmesi getirilmiş kenar hesaplanır.

$$S_v = 86.5577 \times \left(\frac{1.000309}{1.000277151} - 1 \right) = 0.00276 \text{ m}$$

$$S_1 = 86.5577 + 0.00276 = 86.56046 \text{ m}$$

- (2.04b)'den eğrilik düzeltmesi getirilmiş kenar belirlenir.

$$S_{E1} = \frac{86.56046^3}{32 \times 6372366^2} = 0.00000 \text{ m}$$

$$S_2 = 86.56046 + 0.00000 = 86.56046 \text{ m}$$

- (2.04c)'den eğim düzeltmesi yapılır ve düzeltilmiş kenar hesaplanır.

$$\Delta h = 160.5470 - 172.5683 = -12.0213 \text{ m}$$

$$S_{E2} = -\frac{1}{2} \times \frac{12.0213^2}{86.56046} + \frac{1}{8} \times \frac{12.0213^4}{86.56046^3} = -0.83072 \text{ m}$$

$$S_3 = 86.56046 - 0.83072 = 85.72974 \text{ m}$$

- (2.04d)'den deniz yüzeyine indirgenmiş kenar bulunur.

$$h = \frac{172.5680 + 160.5470}{2} = 166.55765 \text{ m}$$

$$S_D = -\frac{166.55765^2}{6372366} + \frac{166.55765^3}{6372366^2} = -0.00435 \text{ m}$$

$$S_4 = 85.72974 - 0.00435 = 85.7254 \text{ m}$$

Çözüm b:

- (2.05a)'dan karşılıklı yaklaşık düşey açı değerleri belirlenir.

$$z^{01} = 100^\circ - \arctan\left(\frac{160.5470 - 172.5683}{85.7254}\right) = 108.8695^\circ$$

$$z^{03} = 100^\circ - \arctan\left(\frac{160.5470 - 172.3783}{85.7254}\right) = 108.7311^\circ$$

- (2.05b)'den pilye üzerine indirgenmiş kenar uzunluğu hesaplanır.

$$ds_1 = (0.19 - 0.05) \times \cos 108.8695 = -0.0194 \text{ m}$$

$$S' = 86.56046 - 0.0194 = 86.54102 \text{ m}$$

$$ds_2 = (0.24 - 0.00) \times \cos 108.7311 = -0.0328 \text{ m}$$

$$S_{13} = 86.54102 - 0.0328 = 86.5082 \text{ m}$$

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

Bu durumda, S mesafesi D yatay mesafesine indirildiğinde α yükseklik açısı pozitif olduğunda $AF=h.\sin\alpha$ daha uzun ve α açısı negatif olduğunda daha kısa olacaktır.

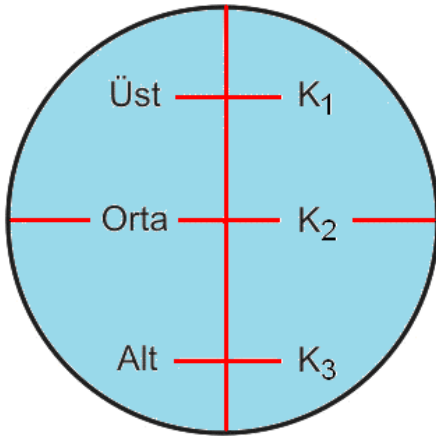
$h=115$ mm olduğu varsayılırsa D yatay mesafesindeki hatanın, $\alpha=5^\circ$ olduğunda 10 mm, $\alpha=10^\circ$ olduğunda 20 mm ve $\alpha=30^\circ$ olduğunda 58 mm olduğu görülmektedir. Bu değerlerin üzerindeki düşey açılar için $\Delta H'$ 'daki hatalar sırasıyla 1 mm, 14 mm ve 33 mm olmaktadır.

3- EUÖ aletinde, gözlem çizgisi dürbünle aynı ekseninde ve gözlemler yansıtıcının merkezine yönlendirildiğinde, dış merkezlik hatası yoktur.

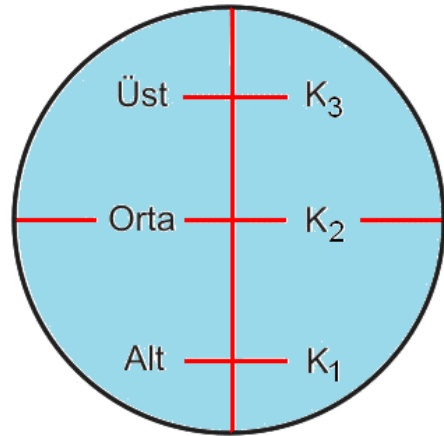
Görüldüğü gibi elektronik kenar ölçümünde eğilemeyen bir yansıtıcı kullanılması ya da yansıtıcıdaki prizmanın EUÖ aletine uygun olarak eğilmemesi durumunda iki nokta arasındaki yatay kenar uzunluğu ve yükseklik farkının hatalı olarak belirlenmesi söz konusu olmaktadır. Bu durum ise sonraki süreçte deformasyon olarak karşımıza çıkarak yanlış yorumlara neden olabilecektir. Ölçme işlemi sürecinde bu ve benzeri hatalardan sakınılması gerekmektedir.

3.2.1.6.3. Düşey açı Ölçülerinin Yapılması ve İndirgenmesi

Düşey açı ölçümü günün 1. ve 3. dörtte bir bölümünde yapılır. Düşey kırılmanın hızlı değişmesinden dolayı düşey açı ölçülerinin hassasiyeti çok değişebilmektedir.



I. dürbün durumu



II. dürbün durumu

Şekil 2.09 Dürbünün I. ve II. durumunda gözlem çizgileri

Düşey açı ölçüleri bilindiği gibi dürbünün gözlem çizgilerinin orta kılı hedefe tatbik edilerek düşey açı dairesinde dürbünün I. ve II. durumunda yapılan okumalarla belirlenmektedir. Z açısı ölçümünün hassasiyetini artırmak için ölçü

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

sayısını artırmak gerekir. Bunun için teodolit dürbününün üst, orta ve alt gözlem çizgileri hedefe ayrı ayrı tatbik edilir. Dürbünün I. durumunda K_1 , K_2 ve K_3 üst, orta ve alt gözlem çizgilerini göstermektedir. K_3 , K_2 ve K_1 dürbünün II. durumunda ise üst, orta ve alt gözlem çizgilerini gösterir, (Şekil 2.09).

Gözlem çizgileri dürbünün her iki durumunda

Dürbünün I. durumu			Dürbünün II. durumu		
1	K_1	üst kıl	4	K_3	üst kıl
2	K_2	orta kıl	5	K_2	orta kıl
3	K_3	alt kıl	6	K_1	alt kıl

sırasında tatbik edilir. Bu okumalar gözlem karnesine

Dürbünün I. durumu			Dürbünün II. durumu		
1	$K_1 = z_1^I$		6	$K_1 = z_2^I$	
2	$K_2 = z_1^{II}$		5	$K_2 = z_2^{II}$	
3	$K_3 = z_1^{III}$		4	$K_3 = z_2^{III}$	

şeklinde yazılır. Bu şekilde yapılan bir silsile düşey açı ölçüsünün hesabı

$$\begin{aligned}
 z_1 &= \frac{1}{2}(z_1' - z_2' + 400^g) \\
 z_2 &= \frac{1}{2}(z_1'' - z_2'' + 400^g) \\
 z_3 &= \frac{1}{2}(z_1''' - z_2''' + 400^g) \\
 z &= \frac{1}{3}(z_1 + z_2 + z_3)
 \end{aligned} \tag{2.06}$$

bağıntıları ile yapılır, (Barışkaner A. 1989).

Ölçülen düşey açının standart sapmasının hesabında

- n : silsile sayısı
- z_i : her bir gözlem çizgisinde okunan indirgenmiş düşey açı
- Z : indirgenmiş düşey açıların ortalaması
- v_i : indirgenmiş düşey açıların hatası
- $s(z)$: her indirgenmiş düşey açının standart sapması
- $S(z)$: silsileler ortalaması olan indirgenmiş düşey açının standart sapması olarak

$$\begin{aligned}
 v_i &= Z - z_i \\
 s(z) &= \sqrt{\frac{[vv]}{n-1}} \\
 S(z) &= \frac{s(z)}{\sqrt{n}}
 \end{aligned} \tag{2.07}$$

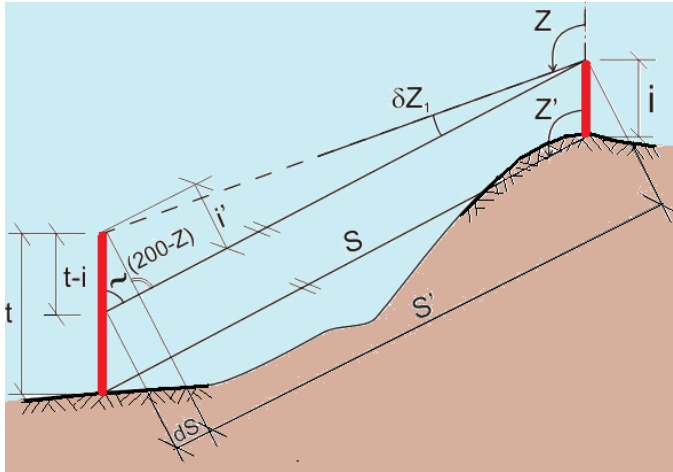
2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

bağıntıları kullanılarak ölçülen bir düşey açının deneysel (öncül) standart sapması belirlenir. Ancak durulan istasyon noktasındaki ölçülen tüm düşey açılar için $S(z)$ tek bir standart sapma değeri olarak belirlenmek istenirse s , bir istasyonda gözlenen düşey açı sayısı olmak üzere

$$S(z) = \sqrt{\frac{[vv]}{ns-1}} \quad (2.08)$$

bağıntısı kullanılır.

Deformasyon ölçmeleri ile referans ve obje noktalarının uzaysal konumlarının belirlenmesi amaçlanır. Daha açık bir ifade ile noktaların üç boyutlu konum değişimleri belirlenmeye çalışıldığından ölçülen düşey açılarının da geometrik modeli kurmak için pilye üzerine indirgenmesi gerekir. İndirgeme işlemi, geometrik düzeltme ve atmosferik koşulların etkisi nedeniyle oluşan ışın yolu eğriliği düzeltmesi olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilir.



Şekil 2.10a $Z > 100$ gon ve $i < t$ olması durumu.

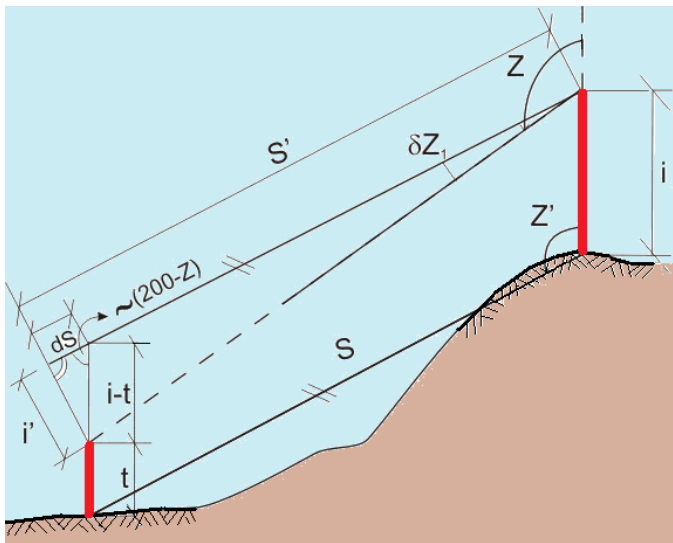
$$dS = - (i - t) \cos (200 - Z) \\ = (i - t) \cos Z$$

$$S' = S - dS \\ = S - (i - t) \cos Z$$

$$i' = - (i - t) \sin (200 - Z) \\ = - (i - t) \sin Z$$

$$\delta Z_1 = \arctan \left(- \frac{i'}{S'} \right)$$

$$Z' = Z - (-\delta Z_1) = Z + \delta Z_1$$



Şekil 2.10b $Z > 100$ gon ve $i > t$ olması durumu.

$$dS = (i - t) \cos (200 - Z) \\ = - (i - t) \cos Z$$

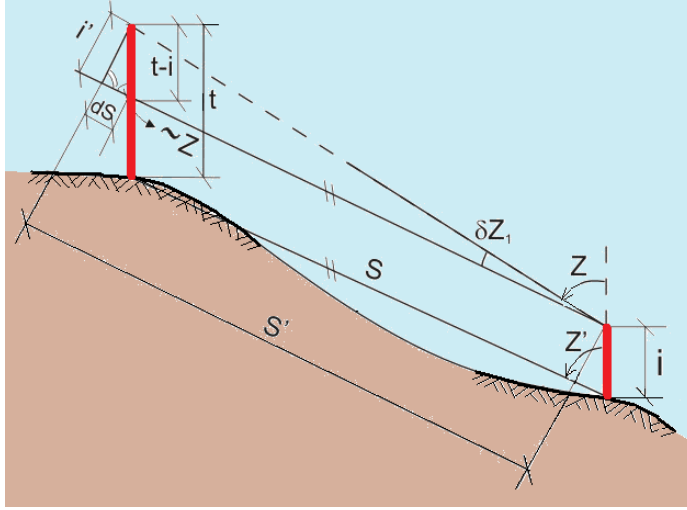
$$S' = S + dS \\ = S - (i - t) \cos Z$$

$$i' = (i - t) \sin (200 - Z) \\ = (i - t) \sin Z$$

$$\delta Z_1 = \arctan \left(\frac{i'}{S'} \right)$$

$$Z' = Z - \delta Z_1$$

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri



Şekil 2.10c Z < 100 gon ve i < t olması durumu.

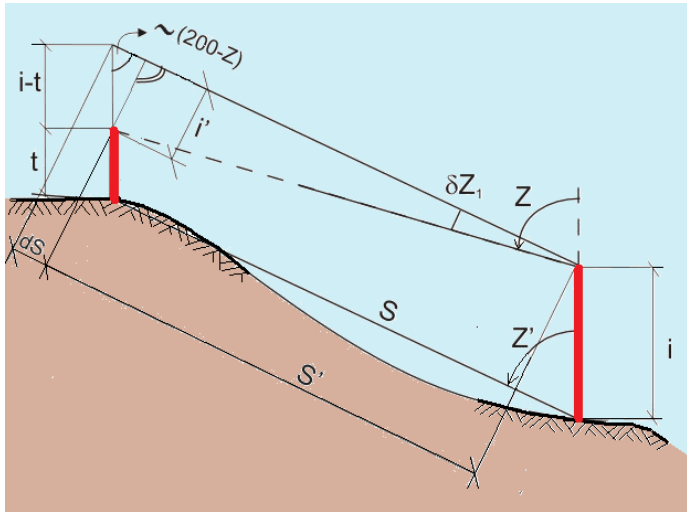
$$dS = - (i - t) \cos Z$$

$$\begin{aligned} S' &= S + dS \\ &= S - (i - t) \cos Z \end{aligned}$$

$$i' = - (i - t) \sin Z$$

$$\delta Z_1 = \arctan \left(-\frac{i'}{S'} \right)$$

$$Z' = Z - (-\delta Z_1) = Z + \delta Z_1$$



Şekil 2.10d Z < 100 gon ve i > t olması durumu.

$$\begin{aligned} dS &= (i - t) \cos (200 - Z) \\ &= - (i - t) \cos Z \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S' &= S + dS \\ &= S - (i - t) \cos Z \end{aligned}$$

$$i' = (i - t) \sin Z$$

$$\delta Z_1 = \arctan \left(\frac{i'}{S'} \right)$$

$$Z' = Z - \delta Z_1$$

Şekil 2.10 Ölçülen düşey açının pilye üzerine indirgenmesi

a- Geometrik indirgeme

- z : ölçülen düşey açı,
- i : teodolitin gözlem eksenini yüksekliği,
- t : gözlem yapılan noktada işaret yüksekliği ve
- s : durulan ve bakılan noktalar arasındaki eğik uzunluk

olmak üzere düşey açının 100^g 'dan küçük ve büyük olması durumları için Şekil-2.108 'de verilen indirgeme düzeltmelerinin hesabında kullanılacak genel bağıntı

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

$$\begin{aligned}
 s' &= s - (i - t) \cos z \\
 i' &= (i - t) \sin z \\
 \delta z_1 &= \arctan \frac{i'}{s'}
 \end{aligned} \tag{2.09}$$

şeklinde elde edilir.

b- Işın yolu eğriliği düzeltilmesi

r : Ölçü yapılan bölgenin ortalama yeryuvarı yarıçapı olarak

$$\delta z_2 = \left(\frac{s'}{2r} (1 - k) + \frac{s}{2r} k \right) \rho \tag{2.10}$$

bağıntısı ile pilye üzerine indirgenmiş düşey açı değeri

$$Z = z - \delta z_1 - \delta z_2 \tag{2.11}$$

elde edilir.

Uygulama 2.03: Bir jeodezik kontrol ağındaki referans noktasından diğer bir referans noktasına iki silsile düşey açı ölçüsü yapılarak aşağıda verilen tablodaki ölçü değerleri elde ediliyor.

DN	BN	SN	Gözlem Çizgileri	Z ₁ 1.durum Z ₂ 2.durum	Z _i = 0.5(Z ₁ -Z ₂ +400)	Silsileler Ortalaması	V _i = Z-z _i	V _i V _i
1	2	3	4	5	6	7	8	9
201	203	1	K1 Üst	108.44650				
			Alt	290.89914				
			Z ₁ -Z ₂ +400=	217.54736	108.77368	108.77336	-3.2	10.2
			K2 Orta	108.76556				
			Orta	291.21704				
			Z ₁ -Z ₂ +400=	217.54852	108.77426		-9.0	81.0
			K3 Alt	109.08576				
			Üst	291.53515				
			Z ₁ -Z ₂ +400=	217.55061	108.77531		-19.5	380.3
	203	2	K1 Üst	108.44280				
			Alt	290.89914				
			Z ₁ -Z ₂ +400=	217.54366	108.77183		15.3	234.1
			K2 Orta	108.76365				
			Orta	291.21942				
			Z ₁ -Z ₂ +400=	217.54423	108.77212		12.4	153.8
			K3 Alt	109.08185				
			Üst	291.53590				
			Z ₁ -Z ₂ +400=	217.54595	108.77298		3.8	14.4
							Σ=	873.8

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

a- Kesin ölçü değeri ile ortalama hatasını,

b- Noktalar arasında ölçülen düzeltilmiş eğik uzunluk $s_{13}=86.5082m$, alet yüksekliği $i=0.24m$, işaret yüksekliği $t=0.01m$ olduğuna ve kırılma katsayısı $k=0.13$, $r=6372366m$ olarak verildiğine göre pilye üzerine indirgenmiş düşey açı değerini hesaplayınız.

Çözüm a: Ölçülen düşey açılar indirgemeleri (2.06) bağıntılarına göre yapılır. Tablonun **5.** sütununda koyu tonda verilen değerler ölçülerdir.

(2.07) bağıntılarına göre indirgenmiş her bir düşey açı değeri ile kesin değer in standart sapmaları bulunur.

$$s(z) = \sqrt{\frac{873.8}{6-1}} = 13.2^{cc}$$

$$S(z) = \frac{13.2}{\sqrt{2}} = 9.3^{cc} \text{ 'dir.}$$

Çözüm b: (2.09) ve (2.10)'a göre pilye üzerine indirgenmiş düşey açı ölçü değeri hesaplanır.

$$s' = 86.5082 - (0.24 - 0.01)\cos 108.77336 = 86.5398 \text{ m}$$

$$i' = (0.24 - 0.01)\sin 108.77336 = 0.2278 \text{ m}$$

$$\delta z_1 = \arctan \frac{0.2278}{86.5398} = 0.16758^g$$

Uygulama-2.02'de deniz yüzeyine indirgenmiş kenar uzunluğu $s=85.7254 \text{ m}$ olarak hesaplanmış olup

$$\delta z_2 = \left(\frac{86.5398}{2 \times 6372366} (1 - 0.13) + \frac{85.7254}{2 \times 6372366} 0.13 \right) \times 63.6619 = 0.00043^g$$

$$z_{13} = 108.77336 - 0.16758 - 0.00043 = 108.60535^g \text{ olarak belirlenir.}$$

3.2.2. Hassas poligon yöntemi

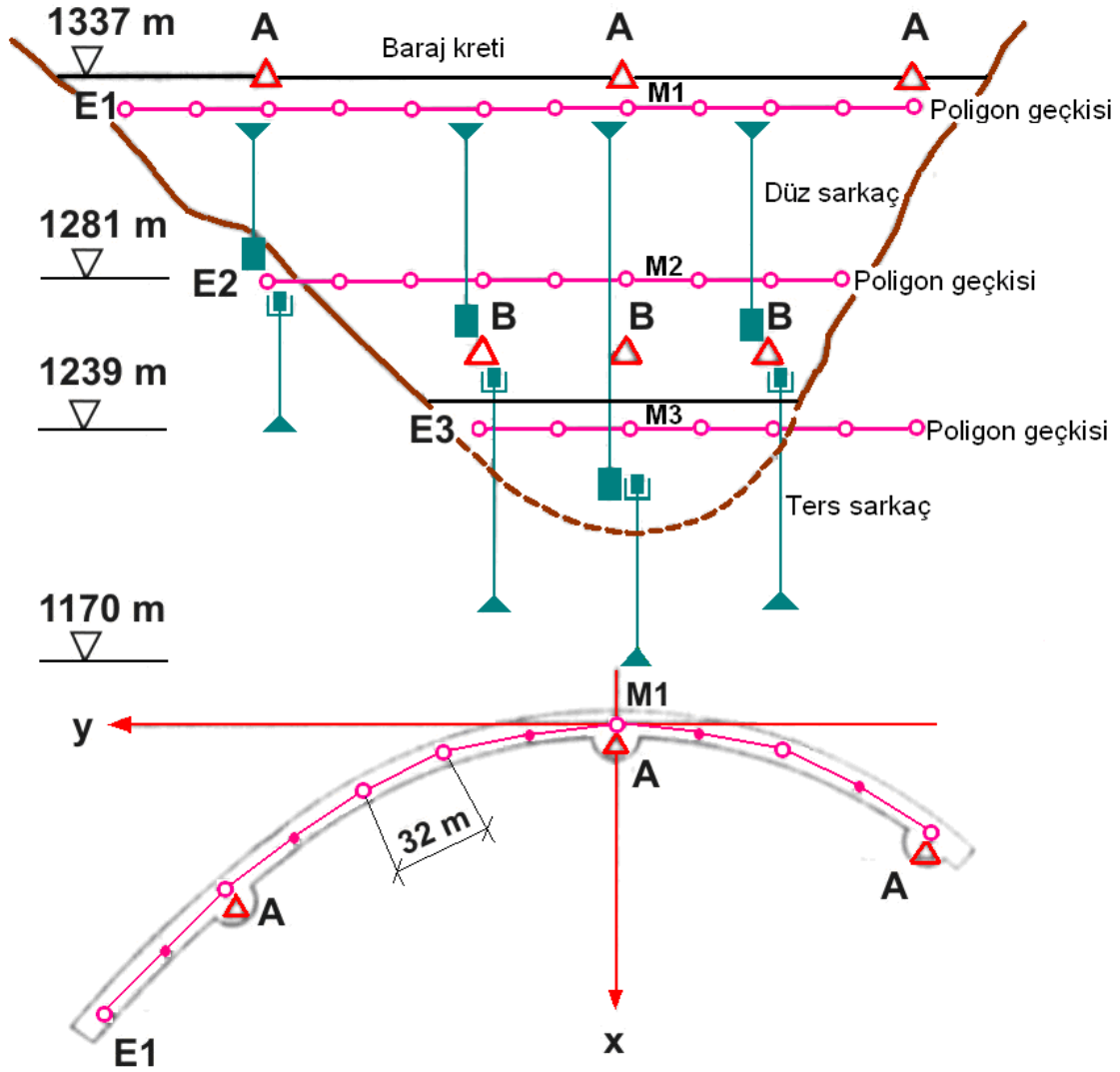
Hassas poligon, kırılma açıları ve kenar uzunlukları hassas olarak ölçülmüş poligon demektir. Bu yöntem ile deformasyonların belirlenmesi genellikle barajlarda olup kret üzerinde ve varsa galerilerde poligon dizileri oluşturulur. Poligon noktalarının zemin işareti olarak özel bronz çiviler kullanılır ya da pilye olarak inşa edilir. Ölçme şekli diğer poligon dizilerinde olduğu gibi olup kırılma açıları saniye teodolitleri ile en az dört tam silsile, kenar uzunlukları ise 1/1000 oransal duyarlılığı sağlayacak doğrulukta ölçülmelidir.

3.2.2.1. Kemer barajların kontrolünde hassas poligon yöntemi

Kemer barajlarda hassas poligon ile sarkaçların bağlantısı, alıynman yöntemi ile sarkaçların kombinasyonu gibi büyük önem taşımaktadır.

- Kret ve galerilerdeki poligon dizilerinin bağlantıları ve kontrolü,
- Bağımsız olarak çalışan düz sarkaçların kontrolü,
- Hassas poligon dizisinin her iki sahildeki sağlam zeminlere bağlantısı, aynı zamanda baraj gövdesinin oturduğu zemine göre davranışlarını gösteren ters sarkaçlar ile de bağlantısını sağlamak,

Dış sistemler (jeodezik kontrol ağı) ile bağlantılar (bağlantı noktalarının hareketsizliğinin kontrolü) yöntemin çözülmesi gereken problemleridir.



Şekil-2.09 Bir kemer barajda poligon ve alıynman noktaları, düz ve ters sarkaçlar ve bağlantı noktaları

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

Yöntemin avantajları:

- Kontrol ağırları yöntemine göre bir ölçme dönemi için geçen sürecin daha az olması,
- Poligon noktaları arasındaki uzunlukların kısa (20-50 m arasında) olması ve ölçülmesi nedeni ile komşu nokta duyarlılığının artmasından dolayı yüksek konum doğruluğu elde edilmesi,
- Aynı çevre koşullarından dolayı gözlemlerin dış etkilerden arınmış olması (Örneğin galerilerde bulunan poligon dizilerinin kırılma, sıcaklık vb dış koşullardan etkilenmemesi gibi),

Dizilerdeki kenar uzunluklarının yaklaşık aynı olması ve sarkaç sistemleri ile bağlantılı olması şeklinde sıralanabilir.

Ölçmeler ve ölçü doğruluğu:

Ölçülerin doğruluğu pilyelerin üzerine yerleştirilen zorunlu merkezleştirme altlıklarının tesisinde gösterilen özen ile ölçmede kullanılan saniye teodolitleri, invar çelik şerit metreler ve elektronik uzunluk ölçerler gibi ölçü aletlerinin duyarlılığına bağlıdır.

Poligon dizilerinde yapılan ölçülerin doğruluğunu gösteren büyüklükler f_Q enine ve f_L boyuna kapanma hatalarıdır. Yapılan çeşitli uygulamalar sonucunda görülmüştür ki

$$\text{galeri uzunluğu } L < 200 \text{ m ise } f_Q = f_L = \pm 1.2 \text{ mm}$$

$$\text{galeri uzunluğu } L > 200 \text{ m ise } f_Q = f_L = \pm 6 L^{\text{km}} 10^{-6} \text{ mm}$$

olmaktadır. Örneğin her bir kenar uzunluğu yaklaşık 20 m olan 500 m uzunluğundaki bir poligon dizisinde kırılma açılarının $\sigma(\beta)=20''$ ve kenarların $\sigma(s)=0.15\text{mm}$ doğrulukla ölçülmesi durumunda enine ve boyuna kapanma hataları için Tablo 2.02'de verilen değerlerin gerçekleştiği görülmüştür.

Tablo 2.02 Hassas poligon dizisinde kapanma hataları

Enine ve boyuna hata	Galerilerde	Kret üzerinde
F_Q	1.1 mm	0.6 mm
F_L	0.4 mm	0.4 mm

3.2.2.2. Düz kretli barajların kontrolünde hassas poligon yöntemi

Uzun düz kretli barajlarda hassas poligon yöntemi uygulamalarında başlangıç dışındaki ölçme dönemlerinde kenar ölçüleri yapılmaz. Bunun nedeni:

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

- Yalnız membadan mansap yönüne olan hareketlerle ilgilenilmesi,
- Başlangıçta kenar uzunluklarının $\sigma_s/s = 1/1000$ oransal duyarlık ile belirlenmesi ve
- β kırılma açılarının çok hassas olarak belirlenmiş olmasıdır.

3.2.2.3. Düz toprak dolgu barajların kontrolünde hassas poligon yöntemi

Çeşitli uygulamalar göstermiştir ki

Kret uzunluğu $L < 400$ m ise $f_Q = f_L = \pm 2.4$ mm

Kret uzunluğu $L > 400$ m ise $f_Q = f_L = \pm 6 L^{km} 10^{-6}$ mm

olmaktadır. Kenar uzunluğu $s=100$ m olan $L=1$ km uzunluğundaki bir poligon dizisinde kırılma açıları $\sigma(\beta)=18''$ ve $\sigma(s)=3.9$ mm doğrulukla ölçülmelidir.

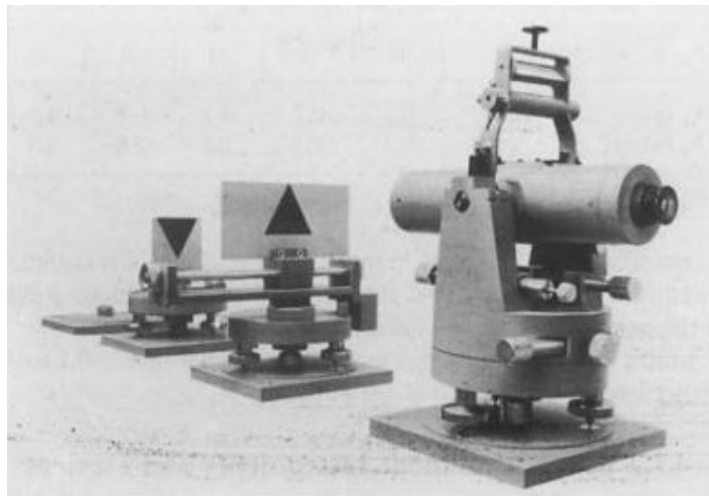
Elektronik uzunluk ölçerlerin kullanımı ile hassas poligon yöntemi yamaç kaymalarının ve zemin oturmalarının belirlenmesinde rahatlıkla uygulanabilen bir yöntem özelliği kazanmıştır.

3.2.3. Aliynman yöntemi

Aliynman yöntemi, ölçü noktalarının bir referans doğrultusu boyunca yatay ve düşey değişimlerinin belirlenmesinde kullanılan bir yöntemdir.

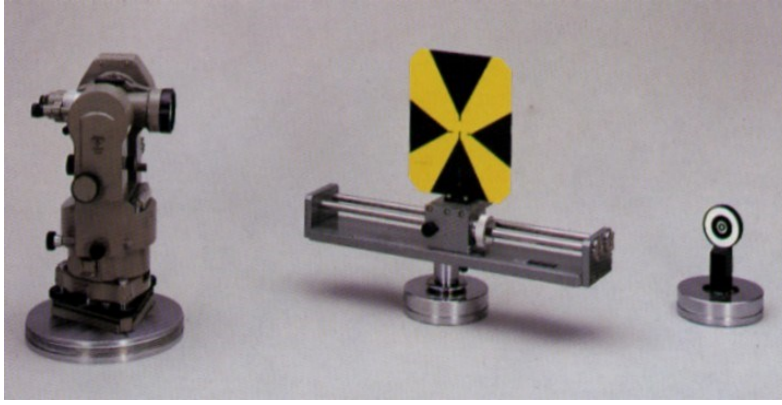
Yöntem:

- Aralık ölçmeleri: iki nokta arasında mutlak konum belirleme,
- Ölçme noktalarındaki konum değişimlerinin belirlenmesi ve
- İki sabit aliynman noktası yardımıyla yatay ve düşey düzlemdeki değişimlerin belirlenmesi şeklinde uygulanmaktadır.



Şekil-2.10a Barajlardaki kontrol ölçmeleri için Breithaupt Firmasının ölçme aleti NITAL, (sabit ve hareketli hedef işareti ile teodolit)

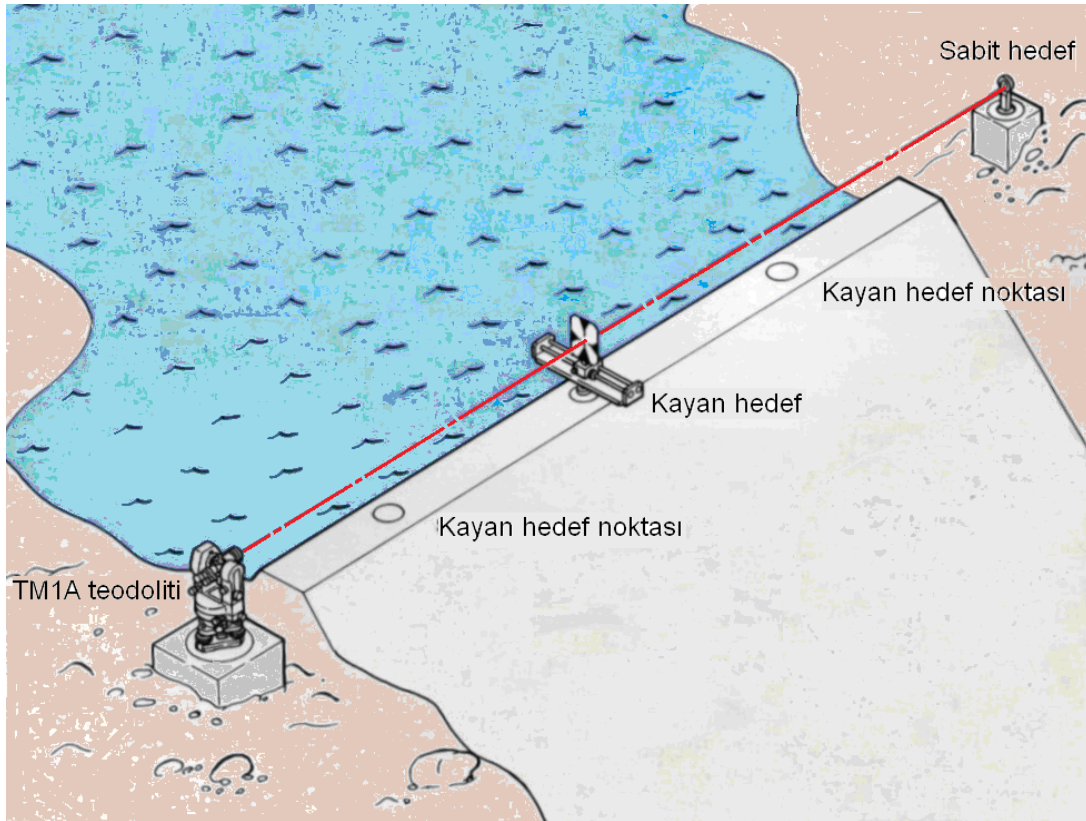
2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri



Şekil 2.10b Sokkisha Firmasının alinyman ölçme seti
(teodolit ile hareketli ve sabit hedef işaretleri)

3.2.3.1. Geometrik alinyman yöntemi

Bir doğru boyunca oluşan değişimlerin izlenmesinde sıkça uygulanan bir yöntemdir. Genellikle düz kretli barajlarda uygulanmaktadır.



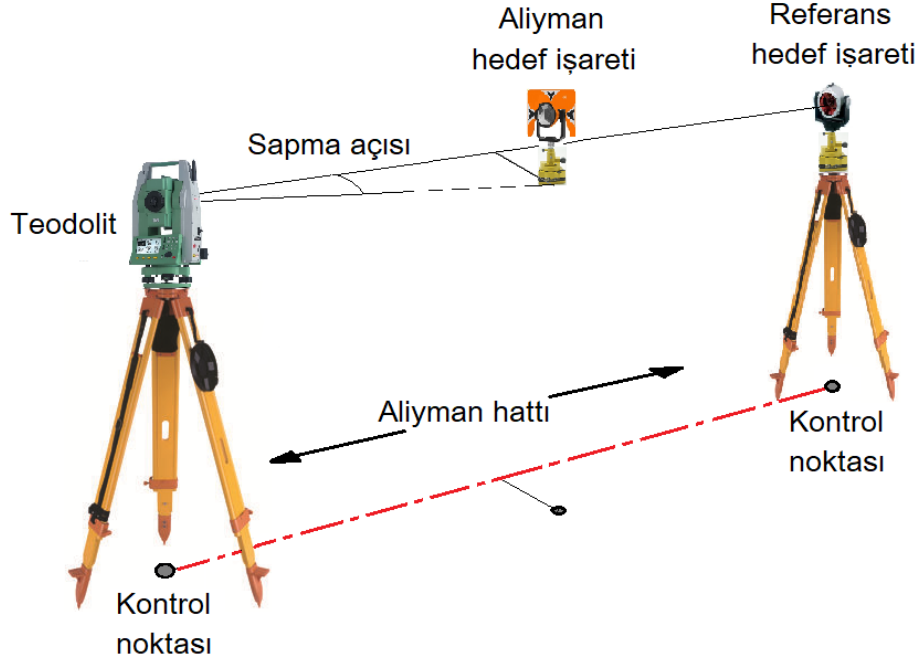
Şekil 2.11 Geometrik alinyman ölçü düzeni

Geometrik alinymanda ölçme düzeneği: Şekil 2.11’de görüldüğü gibi

- Objenin etki alanı dışında pilye olarak tesis edilmiş referans noktaları,
- Ölçü aleti (saniye teodoliti veya hassas nivo),
- Alinyman noktaları hedef işareti,
- Yükseklik belirlemek için hedef işaretleri ve

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

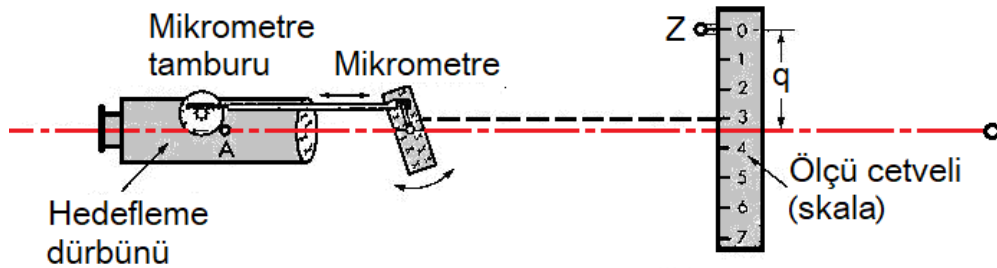
Ölçüler üzerinde kırılmanın etkisini azaltmak için hedef işareti sehpasından oluşmaktadır (1.4 m boyunda).



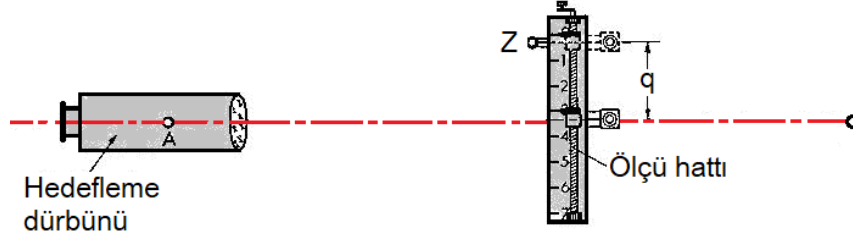
Şekil-2.00 Aliyman ölçü düzeni

Ölçme sırasında dikkat edilecek hususlar:

- Ölçü aletinin ortam sıcaklığına uyması için bir süre beklenmeli,
- Küresel düzeç ile alet kabaca yataylanmalı,
- Hedef işareti aliyman doğrultusunun bir ucuna kurularak yataylanmalı ve diğer uç noktasına yönlendirilmeli,
- Ölçüler kontrollü olarak yapılmalıdır.



2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri



Aliynman uç noktalarının kontrolü:

- Bu noktalar mevcut jeodezik kontrol ağına dahil edilmeli,
- Kontrol ağının referans noktalarına uç noktalardan gözlem yapılmalı,
- Referans noktalarının varsa aliynman düzlemine göre eğiklikleri belirlenmelidir.

Hata etkileri ve doğruluk:

- Hedefleme hatası : σ_{Z0}
- Aliynman noktasının hatası : σ_{Zi} olmak üzere
- Nokta konum hatası : $\sigma_T = \sqrt{\sigma_{Z0}^2 + \sigma_{Zi}^2}$ dir.
- Bir barajda 5-600 m arasında uzaklıktaki noktalarda yapılan 1000 gözlem sonucunda nokta konum hatasına uzaklığın etkisinin olmadığı görülmüştür.
- Bağıl ölçülerin iç doğruluğu : $\sigma_E = \sigma_Z \sqrt{2}$ 'dir.
- $\sigma_{Z0} \approx \sigma_{Zi} \approx \sigma_Z$ olarak kabul edilir ve eğer uzunluk dikkate alınırsa,
- $\sigma_E^I = \sigma_E s / \rho$ (s: uzunluk)
- Mutlak ölçülerin dış güvenilirliği : Mutlak ölçülerin dış güvenilirliğinde bazı hata etkilerinin kestirilmesi gerekir. Kırılma tam olarak belirlenemediği için etkisinin çok az olduğu varsayılır. Yanal kırılma ise aliynman doğrultusunun ortasında en büyük değerine ulaşır.
- Aliynman noktalarının standart sapması uygun koşullarda $\sigma \approx 0.5$ mm'dir.
- Aliynman ölçüleri sırasında (en çok 2 saat) kısa süreli kret hareketleri $\sigma_T \approx 0.1$ mm – 0.2 mm kadardır.
- Zorunlu merkezleştirme doğruluğu $\sigma_{ZM} \approx 0.1$ mm'dir.
- Bir mutlak nivelman ölçümünde X doğrultusu boyunca standart sapma, $\sigma_X = \sqrt{\sigma_E^I^2 + \sigma_F^2 + \sigma_T^2 + \sigma_{ZM}^2}$ dir.
- Sıfır ölçüsüne dayanan aliynman noktalarının kayıklığının doğruluğu ise $\sigma_{\Delta X} = \sigma_X \sqrt{2}$ 'dir.

3.2.3.2. Trigonometrik aliynman yöntemi

Geometrik aliynman yöntemine göre uygulama alanı daha azdır. Özellikle kreti eğrilikli olan barajlarda ve eğrilikli objelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yöntemin temelini sağlam zemine tesis edilmiş en az iki noktaya dayalı

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

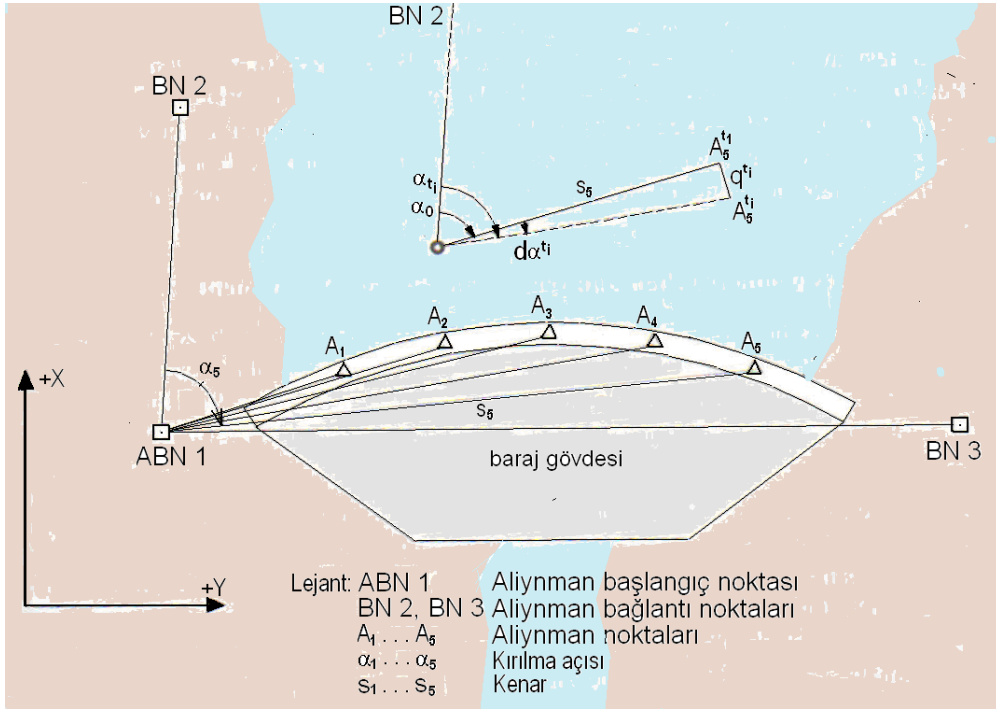
referans doğrultusu oluşturur, (ABN 1 ile BN 2 noktası). Sonra noktalardan birinden diğer hareketsiz nokta/noktalara (BN 3 noktası gibi) silsile yöntemi ile doğrultu ölçüleri yapılır, (Şekil 2.12). Ölçülen kırılma açıları, sıfır ölçme dönemindeki gözlem değerleri ile karşılaştırılır. Buna göre:

$\alpha_J^{t_1}$: j inci noktanın başlangıç (t_1) ölçme dönemindeki kırılma açısı,

$\alpha_J^{t_i}$: noktanın i'inci (t_i) ölçme dönemindeki kırılma açısı olarak

$d\alpha_J = \alpha_J^{t_i} - \alpha_J^{t_1}$ olmak üzere enine kayma miktarı

$$X_J^{t_i} = s_J \sin d\alpha_J^{t_i}, \quad q_J^{t_i} = s_J \frac{d\alpha_J^{t_i}}{\rho}, \quad \rho = \frac{200^g}{\pi} \text{ 'dir.} \quad (2.12)$$



Şekil 2.12 Trigonometrik aliyman yöntemi

Hata etkileri ve doğruluk: Yöntemin doğruluğu kırılma açılarının ölçü doğruluğu ile belirlenir.

- Açı okuma hatası : $\sigma_N \approx 12''$ 'dir.
- Bir bağıl ölçünün hedefleme hatası : $\sigma_{E2}^I = \sigma_{\Delta\alpha} s / \rho$ 'dur.
- $\sigma_{\Delta\alpha}$: referans noktasına olan doğrultu farkının standart sapmasıdır.
- $\sigma_{\Delta\alpha} = \sqrt{\sigma_{\alpha 0}^2 + \sigma_{\alpha i}^2}$: $\sigma_{\alpha 0}^2 \approx \sigma_{\alpha i}^2$ alınırsa
- $\sigma_{\Delta\alpha} = \sigma_{\alpha} \sqrt{2}$: $\sigma_{\alpha} = \sqrt{\sigma_Z^2 + \sigma_a^2}$ 'dır.
- Kontrol için referans doğrultusu yerine n kullanılırsa bir aliyman noktasının X doğrultusu boyunca standart sapması
- $\sigma_{En}^{II} = \sigma_E^{II} / \sqrt{n}$: n : referans noktalarının sayısıdır.
- $\sigma_{AT} = \sqrt{\sigma_{En}^{II} + n \sigma_F^2 + \sigma_T^2 + n \sigma_{ZM}^2}$

3.2.3.3. Aliynman yönteminin avantajları

Geometrik aliynman yönteminin avantajları: Mutlak deformasyonların belirlenmesinde kullanılan yöntemin avantajları olarak,

- Kısa sürede tamamlanabilmesi,
- Basit ölçü teknolojisi ve kullanılan ölçü aletine bağlı olarak yüksek duyarlık,
- Hassas aliynmanda yaklaşık 400m'de $\pm 1\text{mm}$ doğruluk,
- Sarkaç ölçüleri ile doğrudan bağlantı sağlanması sayılabilir.

Trigonometrik aliynman yönteminin avantajı: Eğrilikli objelerde (örneğin kemer barajlarda) daha avantajlıdır. Düz kretli barajlarda ise sarkaç ölçülerinin kombinasyonu ile deformasyonların belirlenmesinde en hızlı ve doğru yöntemdir.

3.2.4. Hassas geometrik nivelman yöntemi

Hassas geometrik nivelman, bir ülkede nivelman ağı kurulurken yükseklik sisteminin belirlenmesinde kullanılan ölçme yöntemidir. Bunun yanı sıra yeryuvarının şeklinin belirlenmesi ve ölçülerin yinelenmesi ile yer kabuğu hareketlerinin belirlenmesi çalışmalarında ve çeşitli mühendislik yapılarında zamanla oluşabilecek çökme, kayma, eğilme, bükülme ve yer değiştirme vb hareketlerin belirlenmesinde uygulanır.

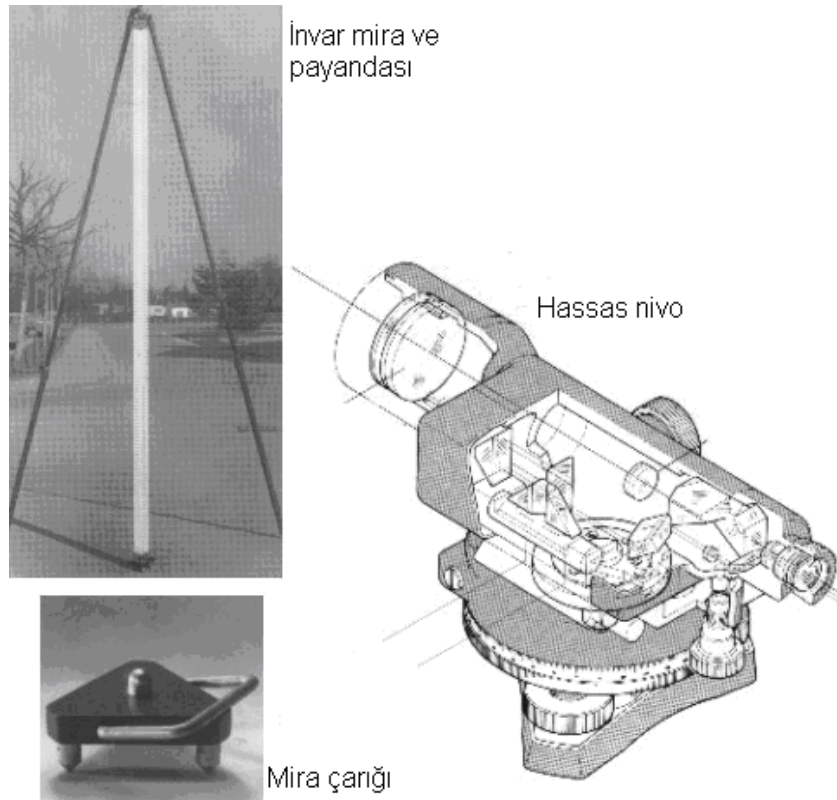
Hassas geometrik nivelmanda ölçme donanımını hassas nivolar ve tek parça halindeki invar miralar, payandaları ile mira çarıkları oluşturur, (Şekil-13a). Hassas nivoları diğer nivolardan ayıran en önemli özellik objektifte gelen ışınları 1 cm'ye kadar kaydırabilen paralel yüzlü cam levha bulunmasıdır. Hassas nivelmanda mira okumalarında gözlem ekseninin mirayı kestiği yer ile bir önceki cm bölüm çizgisi arası diğer nivolarda olduğu gibi tahmin edilmez. Bunun yerine hassas nivoda gözlem çizgisi mikrometre tamburu kullanılarak paralel yüzlü cam döndürülür ve gözlem çizgisi bir önceki cm çizgisi ile çakıştırılır. Kayma miktarı mikrometreden okunur, (Şekil 2.13b).

Hassas geometrik nivelman ölçülerinin yapılmasında dikkat edilmesi gereken hususlar :

- Yükseklik noktalarının tesisleri başlangıç ölçülerinin yapılmasından 3-6 ay önce tamamlanmış olmalıdır.
- Barajlardaki yükseklik ağıları birçok yatay düzlemde (kret, galeri girişleri ve baraj zemini gibi) ve hidrostatik nivelman ile bağlantılı olmalıdır.

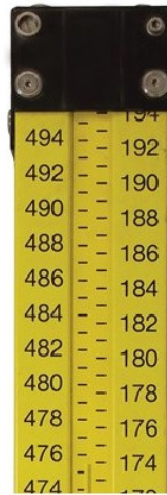
2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

- Yüksek duyarlıklı nivelman için çift nivelman geri-ileri / ileri-geri okuması şeklinde yapılmalıdır.
- Bir objede gözlemleri aynı gözlemci, aynı nivo ve miraları kullanarak aynı atmosferik koşullar altında yapılmalıdır.
- Gidiş ve dönüş nivelmanı da aynı ekip tarafından aynı aletlerle yapılmalıdır.
- Nivoların temel koşulları test edilmelidir.
- Nivo ve mira arasındaki uzaklığın geri ve ileri okumalarda eşit olmadığı durumlarda küreselliğin ve kırılmanın etkisi düzeltme olarak getirilmelidir.
- Mira çiftleri kontrol edilmelidir. Bunun için
Her bir miranın sıfır noktası belirlenmelidir.
Her iki miranın sıfır noktası hatası farkı belirlenmelidir.
Mira uzunluğu tam olarak belirlenmelidir.
- Gidiş ve dönüş ölçüleri sırasında olanaklı ise nivoların aynı yere kurulmasına, miraların ise aynı yerde tutulmasına özen gösterilmelidir.



Şekil 2.13a Hassas nivo, invar mira ve payandaları ile mira çarığı
Hassas nivelman ölçülerinin yapılması sırasında ortaya çıkan hatalar ve bunların giderilmesine ilişkin düzenlemeler Tablo 2.03'de verilmiştir.

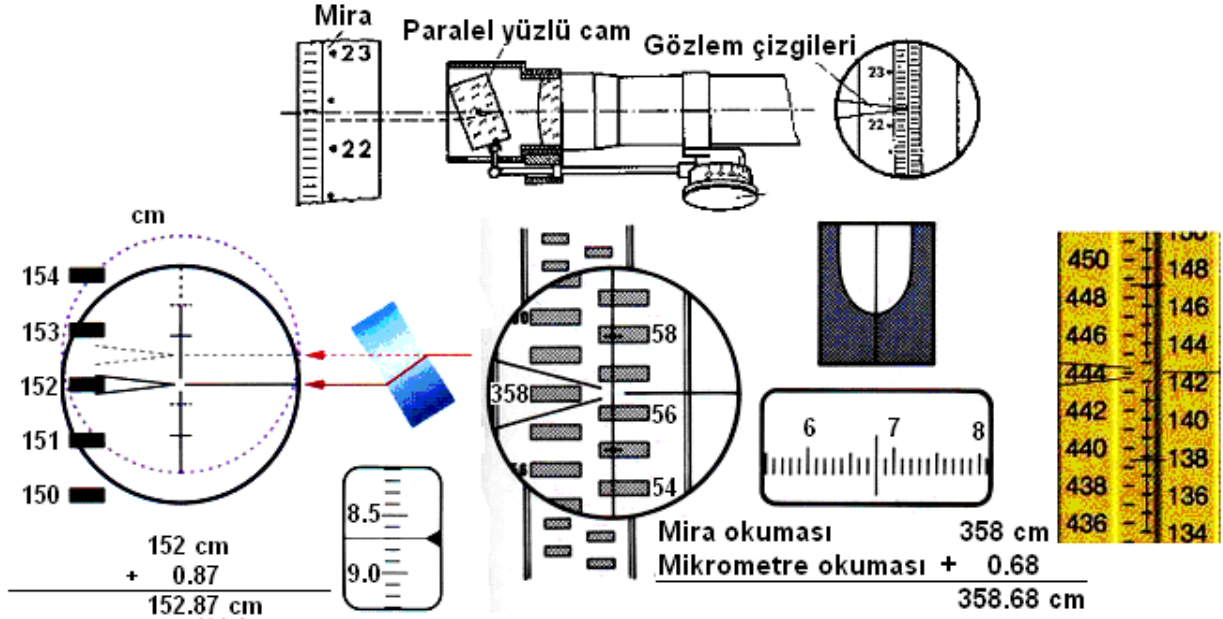
2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri



Leica GPLE2N 2m invar mirası

Leica GPCL2 sayısal invar mirası

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri



Tablo 2.03 Hassas geometrik nivelmanda hata kaynakları ve giderilmeleri

Hata kaynakları	Hatanın giderilmesi
Küresellik nedeni ile oluşan gözlem Doğrultusu hatası	Geri ve ileri okumalarda nivo ile mira arasındaki uzaklıkların yaklaşık eşit alınması ile
Kompensatörlü nivolarda gözlem çizgisinin eğik olması	Geri-ileri / ileri-geri şeklinde okuma yaparak ve her okumada küresel düzeğin kontrolü ile.
Gözlem doğrultusuna sıcaklığın etkisi	İki kompensatör durumunda ölçü yaparak
Sistemik ve miranın raslantısal dağılım hatası	Miraların kalibrasyonu ve miranın genleşme katsayısının belirlenmesi ile
Miraların batma hatası	Nivelman çarıkları kullanılarak
Miraların eğikliği	Miralardaki küresel düzeğin ayarlanması ile
Miranın düşey hareketleri	Gözlem süresinin kısa tutulması ile
Simetrik olmayan düşey kırılma	Gözlem süresinin kısa tutulması ve gidiş-dönüş ölçülerinin farklı zamanlarda yapılması ile
Raslantısal gözlemci hataları	Mikrometre tamburunun çok iyi ayarlanması ve ölçülerin çok kez yinelenmesi veya sayısal nivoların kullanımı ile
Kaba hatalar	Çift nivelman ile
Rüzgar etkileri	Mira payandaları kullanılarak ve miranın sarsılmadığı durumlarda ölçü yapmakla

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

İki nokta arasındaki uzaklığın kısa olması durumunda çekül sapmalarının etkisi gözardı edilebilir. 500 m'ye kadar uzunluklarda

- Işın yolu daire yayı olarak,
- İki nokta arasındaki normal kesitin eşit eğrilikte olduğu ve

Yeryuvarının elipsoit yerine R yarıçaplı yer küresi ile temsili kabulleri yapılabilir.

Şekil-2.14'de

- S_R : eğik uzunluk,
- s : yatay uzunluk,
- r_E : eğrilik düzeltmesi,
- k_r : kırılma düzeltmesi,
- R : yer küresinin yarıçapı ve
- z : düşey açıdır.

Trigonometrik yükseklik belirlemede elektronik uzunluk ölçer ile ölçülen eğik uzunluk ve düşey açı kullanılarak eğrilik düzeltmesi getirilmemiş yükseklik farkı

$$\Delta h = S_R \cos z \quad (2.13)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Eğrilik düzeltmesi için

$$r_E = \frac{s^2}{2R} \approx \frac{s^2}{12750 \text{ km}} \quad (2.14)$$

bağıntısı geçerlidir. Yer küreselliği nedeni ile iki nokta arasındaki yükseklik farkına getirilecek düzeltme miktarı uzunluğa bağlı olarak (2.14) bağıntısına göre hesaplanmış ve Tablo 2.04'te verilmiştir.

Tablo 2.04 Yükseklik farkına getirilecek eğrilik düzeltmesi

s (m)	100	200	500	1000
r_E (mm)	0.8	3.1	19.6	78.4

Kırılma için ölçüt olarak yer küresinin yarıçapının ışın yolu eğrilik yarıçapına oranı kırılma katsayısı k olarak tanımlanır. Buna göre,

$$k = \frac{R}{r_L} \quad (2.15)$$

dir. Kırılma katsayısı $1/r_L$ ile doğru orantılıdır. Yani r_L büyüdükçe kırılma katsayısı azalır. Şekil 2.10'da görüldüğü gibi küçük kırılma açıları, ışın yolu eğriliğinin merkez açısının yarısına eşittir. Kırılma düzeltmesi

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

$$k_r = \frac{s^2}{2r_L} \quad (2.16)$$

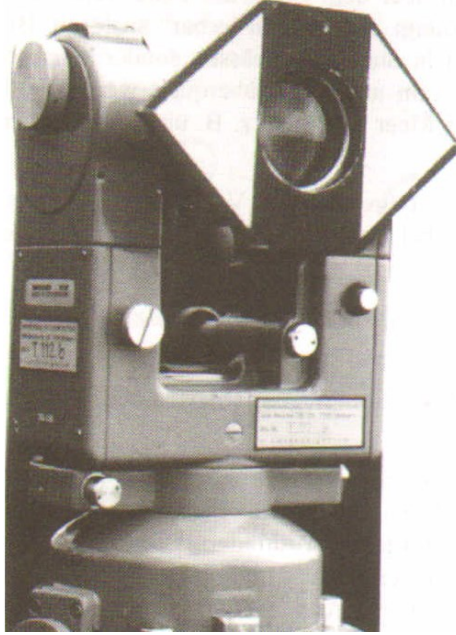
dir. (2.14)'de verilen eğrilik ve (2.16)'da verilen kırılma düzeltmelerinin birleştirilmesi yükseklik farkına getirilecek düzeltme

$$k_{r,E} = \frac{1-k}{2R} \frac{S_R^2}{\sin^2 z} \quad (2.17)$$

bağıntısı elde edilir.

Kırılmanın yükseklik farkının belirlenmesi üzerindeki etkisini en aza indirebilmek için düşey açı ölçüleri

- Isı değişiminin az olması nedeniyle Güneş doğduktan iki saat sonraki ve batmadan iki saat önceki zaman aralığında yapılmalıdır.
- İki teodolitle aynı anda karşılıklı olarak yapılmalıdır.



Şekil 2.15 Karşılıklı düşey açı ölçümü için özel aparat takılmış teodolit
(Yeni tip Wild T2 teodoliti)

- Deformasyon ölçmeleri için geliştirilmiş ölçme yöntemleri uygulanarak yapılmalıdır.
- Eğer karşılıklı gözlem yapmak olanaklı değilse (baraj gövdesindeki obje noktalarında olduğu gibi) kısa uzunluklardan kaçınılmalı,
- Havanın kapalı ve rüzgarlı olmadığı zamanlarda yapılmalı,
- Gözlem çizgisi yerden en az 1 m yukarıdan gitmelidir.
- Yineleme ölçüleri aynı meteorolojik koşullar altında yapılmalıdır. Yani ölçü aralıkları belirlenirken ve değerlendirme yapılırken meteorolojik koşullar dikkate alınmalıdır.

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

Tek taraflı gözlemlerle yükseklik farkı belirleme:

$$\Delta h = s \cot z + \frac{1-k}{2R} \frac{s^2}{\sin^2 z} + i - t \quad (2.18)$$

Çift taraflı gözlemlerle yükseklik farkı belirleme:

$$\Delta h = \frac{1}{2} s (\cot z_{12} - \cot z_{21}) + \frac{(1-k)s^2}{4R} \left(\frac{1}{\sin^2 z_{12}} - \frac{1}{\sin^2 z_{21}} \right) + (i_2 - i_1) + (t_1 - t_2) \quad (2.19)$$

(2.19) bağıntısının ikinci terimi çok küçük olduğundan ihmal edilirse

$$\Delta h = \frac{1}{2} s (\cot z_{12} - \cot z_{21}) + (i_2 - i_1) + (t_1 - t_2) \quad (2.20)$$

şeklini alır.

Tablo 2.05 Düşey açı ölçü doğruluğunun yükseklik farkına etkisi

s (m)	Düşey açı ölçüsünün standart sapması	
	3 cc	10 cc
100	0.5 mm	1.6 mm
200	0.9 mm	3.1 mm
300	1.4 mm	4.7 mm
400	1.9 mm	6.3 mm
500	2.4 mm	7.9 mm

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 Tablo 2.06'da verilen değerler elde edilmiştir.

Tablo 2.06 Hassas trigonometrik nivelmanda yükseklik farkı doğruluğu

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

3.2.6. Hidrostatik nivelman yöntemi

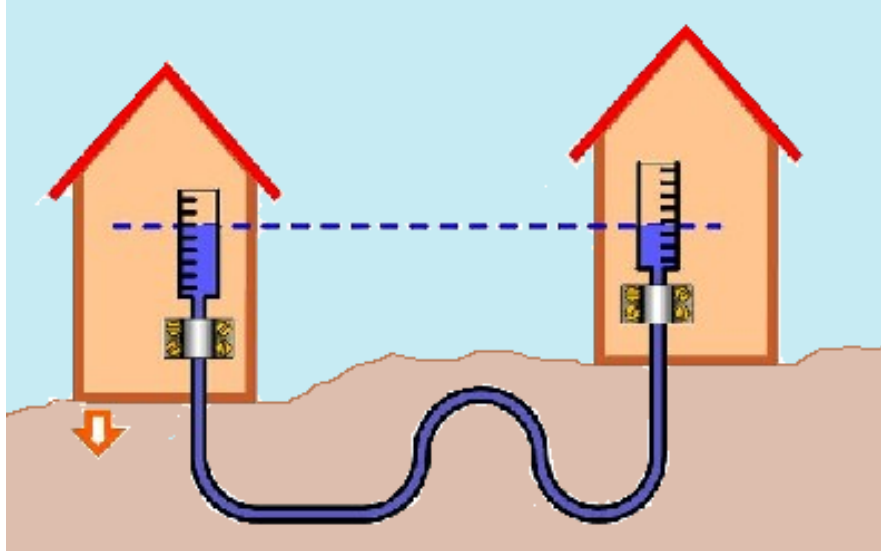
Hidrostatik nivelman bileşik kaplar prensibine göre çalışan bir yöntemdir. Noktalar arasındaki yükseklik farklarını belirlemede kullanılan bu yöntem antik çağda Mısır'daki piramitlerin zemin yüksekliklerinin belirlenmesinde

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

kullanılmıştır. Günümüzde hortumlu terazi çoğu kez inşaat alanlarında kullanılmaktadır. Bunun yanında hidrostatik nivelman özel uygulamalar için yüksek duyarlıklı bir ölçü yöntemi olarak geliştirilmiştir. Küçük alanlarda makine tesislerinin ve mühendislik yapılarının gözlemlerinde yüksek duyarlıklı bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Arazi ölçmelerinde uzun mesafelerde örneğin vadi geçişlerinde ya da ada ile ana kara arasındaki yükseklik farklarının belirlenmesinde kullanılmaktadır.

3.2.6.1. Basit hortum terazi

Basit bir hortum terazi Şekil 2.15'de görüldüğü gibi 20-30 m uzunluğundaki bir hortumun mm dağılımlı bir silindirle birleştirilmesi ile oluşturulabilir. Bu hortum terazi caddelerin, köprülerin, kanalların vb mühendislik yapılarının inşaatında rahatlıkla kullanılmaktadır. Hortumun hareket ettirilmesi ile hava kabarcığının yok edilmesinden sonra her iki yandaki cam haznede su seviyesi birbirine dik ve aynı yüksekliktedir. Sonra bu cam hazneler ölçü yerlerine götürülür. Hortumun içindeki suyun durulması için birkaç dakika beklenir. Ve hortumun her iki yanındaki ölçü skalalarında birkaç kez okuma yapılır, ortalama değerler alınır ve sıfır düzeltilmesi getirilir. Bu yöntemle yükseklik belirlemede standart sapma 1-3 mm kadardır.



Şekil 2.16 Hidrostatik nivelmanın temel prensibi

3.2.6.2. Hassas hortum terazi

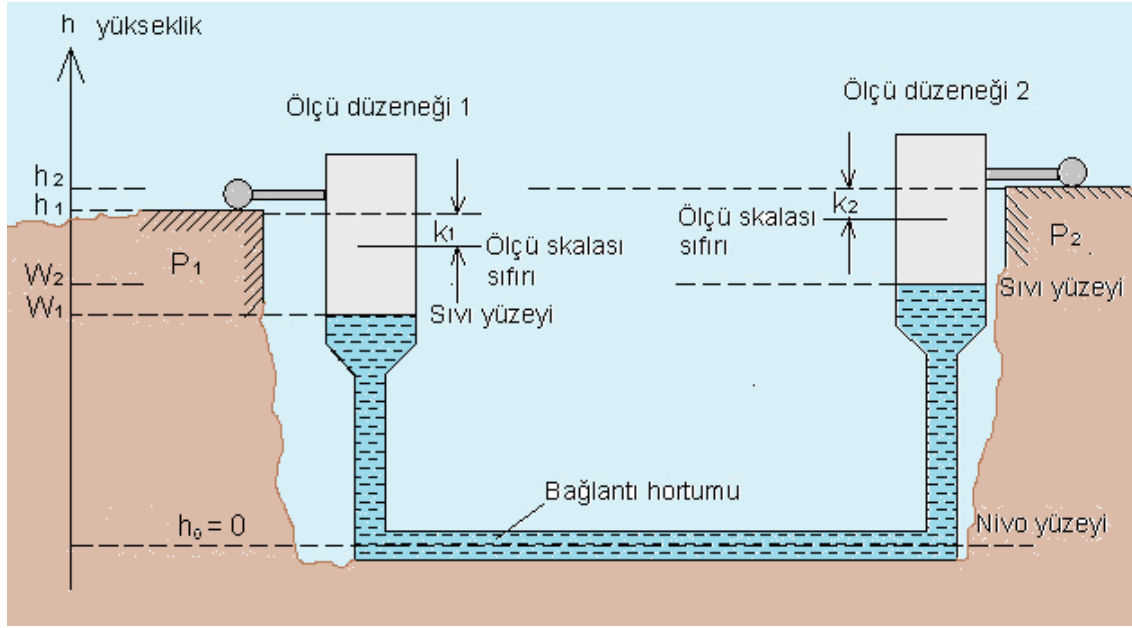
3.2.6.2.1. Temel çalışma prensibi

Basit hortum teraziden hassas ölçü aletine geçiş için ek çalışmalar gerekmiştir. Sıvı yüzeyinden yükseklik ölçüsü yapılacak noktaya kadar yükseklik taşımak için hassas ölçü aleti kurulur. Sıvı yüzeyindeki düzensizlikler fiziksel model

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

oluşturma ve düzeltmelerle giderilir. Hidrostatik nivelmanın temel prensibi Şekil 2.16'da açıklanmıştır. İdeal durumda sıvı seviyesi hidrostatik bağlantının son noktasında bulunmakta ve nivo yüzeyleri sapmaları şöyle oluşmaktadır.

- 1- Dış kuvvetlerin etkisi ile (sıcaklık değişimleri, hava basıncı farkı, çekim değişimleri gibi),
- 2- İç kuvvetler ile,
- 3- Dinamik yük etkisi ile (sıvı titreşimleri),
- 4- Hortumun düzensiz olarak doldurulması (sıvının içine hava kabarcığı karışması gibi).



Şekil 2.17 Hidrostatik nivelmanın temel prensibi

Referans yüzeyi üzerindeki bir noktanın h_i yüksekliği için

$$h_i = w_i + \ell_i + k_i \quad (2.21)$$

geçerlidir. Burada ;

- w_i : referans yüzeyi üzerindeki sıvı yüzeyinin yüksekliği,
- ℓ_i : ölçü skalasında okunan değer ve
- k_i : sıfır noktası düzeltmesidir.

P_1 ve P_2 noktaları arasındaki yükseklik farkı ise Δh_{12}

$$\Delta h_{12} = h_2 - h_1 = (\ell_2 - \ell_1) + (k_2 - k_1) + (w_2 - w_1) \quad (2.22)$$

şeklinde dir. Duyarlıklı bir yükseklik belirlemek için sıfır noktası düzeltmesi $\Delta k = k_2 - k_1$ ve sıvı durumunun nivo yüzeyi farkı $\Delta w = w_2 - w_1$ özellikle göz önünde bulundurulmalıdır. Çok duyarlık gerektirmeyen işlerde genel olarak ℓ_i skala değerleri okunur ve karşılaştırılır.

3.2.6.2.2. Sıvı yüzeylerinin seviye (nivo) farkı

Sıvı yüzeylerinin seviye farkı Bernouli Denklemi ile yazılır.

$$p_i + \rho_i g_i h_i = \text{sabit} \quad (2.23)$$

Burada ;

- p : hava basıncı,
- ρ : sıvının yoğunluğu,
- g : yerçekimi ivmesi ve
- h : sıvının yüksekliğidir.

Bu hidrostatik bağlantı sisteminde (Şekil 2.17) eğer farklı çekim ivmesi ve homojen olmayan sıvı düşünülürse aşağıdaki eşitlik geçerlidir.

$$p_1 + \int_{h_0}^{w_1} g \rho \, dh = p_2 + \int_{h_0}^{w_2} g \rho \, dh \quad (2.24)$$

Bu bağıntıda dh yükseklik diferansiyelini tanımlamaktadır. Çekim ivmesi için genel olarak bir g ortalama değeri kullanılır. Bunun yanında;

$$\rho(t) = \rho_0(t_0) + \Delta\rho(\Delta t) \quad (2.25)$$

dir. Burada ;

- t : sıcaklık,
- t_0 : ortalama sıcaklık,
- Δt : ortalama sıcaklık değerinden sapmalar,
- ρ_0 : ortalama yoğunluk ve
- $\Delta\rho$: ortalama yoğunluk değerinden sapmalar

olmak üzere

$$\begin{aligned} p_1 + g_0 \int_{h_0}^{w_1} (\rho_0 + \Delta\rho) \, dh &= p_2 + g_0 \int_{h_0}^{w_2} (\rho_0 + \Delta\rho) \, dh \\ p_1 + g_0 \rho_0 (w_1 - h_0) + g_0 \int_{h_0}^{w_1} \Delta\rho \, dh &= p_2 + g_0 \rho_0 (w_2 - h_0) + g_0 \int_{h_0}^{w_2} \Delta\rho \, dh \\ \Delta w = w_2 - w_1 &= (p_1 - p_2) / g_0 \rho_0 + (1/\rho_0) \left(\int_{h_0}^{w_1} \Delta\rho \, dh - \int_{h_0}^{w_2} \Delta\rho \, dh \right) \end{aligned} \quad (2.26)$$

geçerlidir.

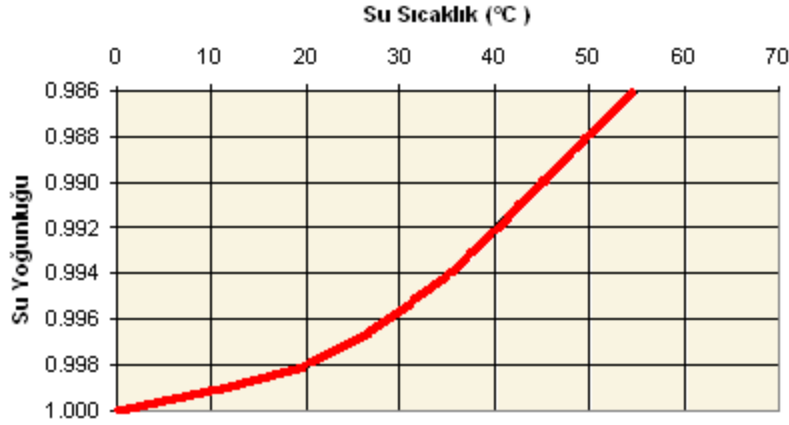
2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

İlk toplam farklı hava basıncının etkisini ve ikinci toplam farklı sıvı sıcaklığının etkisini tanımlamaktadır. 0.1 torluk bir basınç farkı her iki ölçü noktasında yaklaşık 1.4 mm'lik yükseklik hatasına sebep olmaktadır.

Bu hatayı yok etmek için hemen hemen bütün yeni aletlerde bir basınç hortumu bulunmaktadır. Bir ölçü noktasındaki sıcaklık farkının etkisini pratik olarak hesaplayabilmek için su sütunu sonlu bir Δh_i yüksekliğine ayrılır. (2.26) numaralı bağıntı yerine basit olarak,

$$\Delta w = \left(\frac{1}{g_0} \right) \left\{ \sum_{0}^{W_1} (\Delta \rho_{1i} \Delta h_{1i}) - \sum_{0}^{W_2} (\Delta \rho_{2i} \Delta h_{2i}) \right\} \quad (2.27)$$

yazılabilir.



Şekil 2.18 Su yoğunluğunun sıcaklıkla ilişkisi

$\Delta \rho_{1i}$ ve $\Delta \rho_{2i}$ bağlantı sisteminin sağ ve sol kısımlarındaki ortalama yoğunluktan sapmaları ifade etmektedir. Ayrıca (2.27) bağıntısında basınç farkı etkisinin elemine edildiği kabul edilmektedir. Bağlantı sistemindeki sıcaklık farkının ölçü sonuçlarına etkisi ölçülen mutlak sıcaklığa bağlıdır (Şekil 2.18).

Yoğunluk, 4° C'a kadar az olarak yüksek sıcaklıklarda daha fazla değişmektedir. Ortalama dış sıcaklıkla bağlantılı olarak seviye farkı Δw üzerinde farklı etkiler oluşmaktadır. Sıcaklığın bir ölçü noktasında 4° (20° C), ikinci ölçü noktasında 7° (23° C) olduğu varsayılırsa 1 m'lik düşey bir su sütununda $\Delta w = 0.07$ mm (0.67 mm) olmaktadır. Farklı çekim değerlerinin etkisi normal olarak göz ardı edilebilir. Belirlenecek yükseklik farkları çok küçük ve ölçü noktaları arasındaki uzaklığın 100 m'den kısa olması durumunda çekim değerlerinin etkisi göz ardı edilebilir. Eğer ölçüler normal deniz seviyesinden çok yüksekte yapılıyorsa uzun mesafeli yükseklik taşımada çekim farkı göz önünde bulunmalıdır.

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

$$\bullet \quad (dw)_1 = \frac{g_1 - g_2}{g_1} \cdot H_1 \quad (2.28)$$

H_1 : P_1 noktasının deniz seviyesinden olan yüksekliği,

g_1, g_2 : P_1 ve P_2 noktalarında ölçülen çekim değerleridir.

İnce boru kuvvetinin etkisi aşağıdaki nedenlerle oluşur.

- Cam borunun dar olması,
- Cam boruların yarıçaplarının farklı olması,
- Sıvı yüzeyinin kirlenmesi.

İlk üç etki cam borunun yarıçapının 40 mm'den küçük olmayacak şekilde seçilmesi ile giderilebilir. Su sütunlarının titreşim zamanı aşağıdaki bağıntı ile giderilebilir.

$$T = \pi \sqrt{\frac{a_1 a_2 L}{(a_1 + a_2) Ag}} \quad (2.29)$$

Bu bağıntıda ;

a_1, a_2 : cam borunun kesiti,

A : hortumun kesiti,

L : su sütununun uzunluğu ve

g : çekim ivmesidir.

3.2.6.2.3. Sıfır noktası düzeltmesi

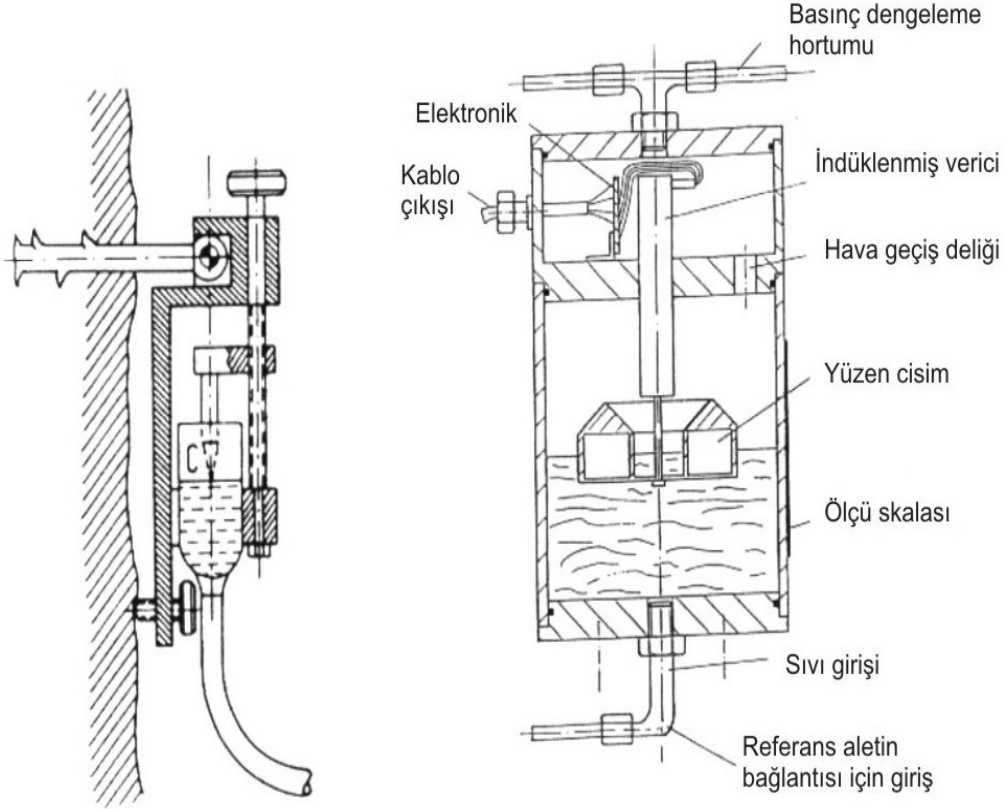
Ölçü skalasının başlangıç noktasının yüksekliği asılan noktanın yüksekliği ile aynı değilse sıfır noktası hatası oluşur. Sıfır noktası düzeltmesi yükseklikleri bilinen noktalardaki kalibrasyon ölçüleri ile belirlenebilir. Bu aynı zamanda cam ölçü kablalarının yer değiştirilerek ölçünün tekrarlanması ile de belirlenebilir. Bu şekilde iki durumda yapılan ölçü için (2.22) eşitliğinin yerine (2.30) eşitlikleri geçerli olur.

$$\Delta h_I = (\ell_2 - \ell_1)_I + k_2 - k_1 + (w_2 - w_1)_I \quad (2.30a)$$

$$\Delta h_{II} = (\ell_2 - \ell_1)_{II} + k_1 - k_2 + (w_2 - w_1)_{II} \quad (2.30b)$$

$$\Delta h = \frac{1}{2} [(\ell_2 - \ell_1)_I + (w_2 - w_1)_{II}] \quad (2.30c)$$

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri



Şekil 2.19 İğneli ve algılayıcı hortum terazi

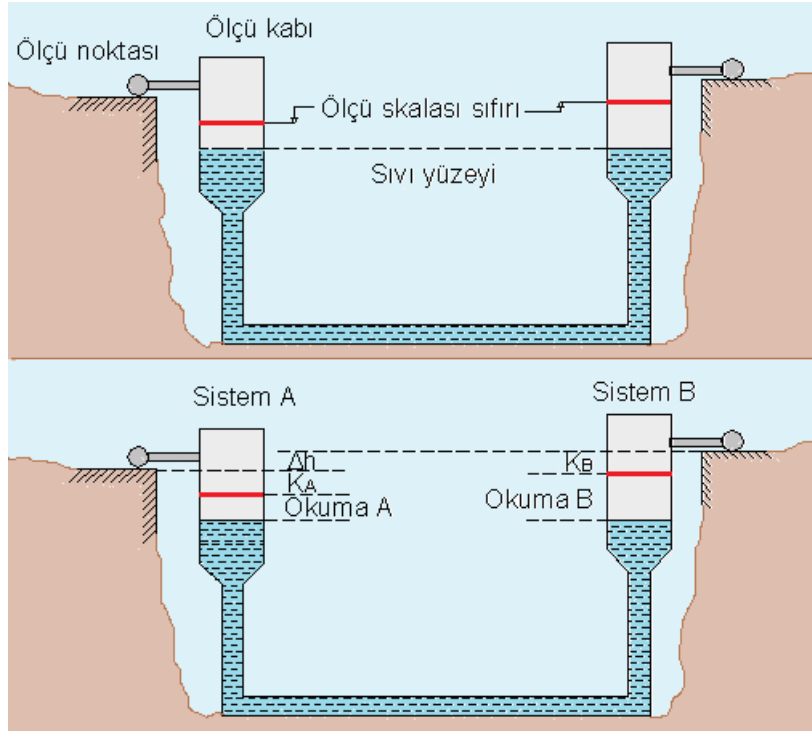
3.2.6.2.4. Analog ve dijital göstergeli alıcılar

Alıcıların görevi sıvı yüzeyi ile yükseklik markası arasındaki düşey mesafeyi sıfır noktası hatasını da göz önünde tutarak belirlemektir. Bu mesafe ölçümü farklı prensiplere göre yapılır. Bazı duyarlıklı hortum terazilerde ince bir iğne sıvı yüzeyi üzerine yerleştirilir (Şekil 2.19). Bu ölçü aletlerinde ölçü noktası ve ölçü iğnesi aynı düşey düzlemde olmalıdır. Ölçü iğnesinin çıkış yüksekliği genel olarak 1 mm'dir.

3.2.6.2.5. Hidrostatik nivelmanın ölçme prensibi

Gerek hortum terazinin yapımında, gerekse ölçü noktalarının tesisinde paslanmayan malzemeler kullanılmalıdır. Ölçü noktalarının tesisinde aralarındaki yükseklik farkının birkaç desimetreyi geçmemesine dikkat edilmelidir. Çünkü hortum terazinin ölçü aralığı 100 mm ile sınırlıdır. Her iki hortum terazi şeffaf malzemeden yapılmış bir hortum ile birleştirilir. Aralarındaki yükseklik farkı belirlenecek A ve B noktalarına hortum terazi asılır ve sistem su ile doldurulur. Hortum terazilerin içinde bulunan ölçü iğneleri yardımı ile iki nokta arasındaki yükseklik farkı belirlenir.

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri



Şekil 2.17 Hidrostatik nivelmanın temel prensibi

İlk ölçü düzeninde hortum terazi A noktasındaki bronz asılmış ve n 'inci ölçü ve B noktasındaki bronz asılmış $n+1$ 'inci ölçü yapılmış ise yükseklik farkı

$$\Delta h = B_{n+1} + K_B - (A_n + K_A) = \Delta H_1 + K \quad (2.31)$$

dır. Burada :

- A_n : A noktasındaki n 'inci okuma,
- B_{n+1} : B noktasındaki $n+1$ 'inci okuma,
- ΔH_1 : sıfır noktası hatasını da içeren hatalı yükseklik farkıdır.

K_B ve K_A sabit olarak K ile gösterilebilir. Hortum terazinin yer değiştirmesi ile ikinci ölçü düzeneği elde edilir. Bu durumda yükseklik farkı

$$\Delta h = A_{n+1} + K_A - (B_n + K_B) = \Delta H_2 - K \quad (2.32)$$

olacaktır. (2.31) ve (2.32) 'nin aritmetik ortalaması alınarak

$$\Delta h = \frac{\Delta H_1 + \Delta H_2}{2} = \frac{1}{2} (B_{n+1} - A_n + A_{n+1} - B_n) \quad (2.33)$$

yükseklik farkı belirlenir. Böylece sıfır noktası hatası elemine edilmiş olur. Sıfır noktası hatası K ise

$$K = \frac{\Delta H_2 - \Delta H_1}{2} \quad (2.34)$$

bağıntısı ile hesaplanır.

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

Tablo 2.07 Hidrostatik nivelmanda hata kaynakları ve giderilmeleri

Hata kaynakları	Hatanın giderilmesi
Sıfır noktası hatası	Ölçü sistemlerinin yerlerinin değiştirilmesi ile
Seviye ve eğim hatası	Ölçü aletinin merkezden asılması ile
Sıvı yüzeyinin titreşimi	Ölçüye başlamadan önce bir süre bekleyerek
Hava basıncının etkisi	Basınç dengeleyici hortumlar kullanılarak
Yerçekimi ivmesi farkı	Yükseklik farkının 10 cm'den az olması ile
Sıcaklığın etkisi	Isı düzeltmesi getirilerek ve noktalar arası uzaklığın ve ölçü süresinin kısa tutulması ile
Ölçü hatası	Rastlantısal olup okuyucunun dikkati ile
Sıvı azalması	Herhangi bir etkisi yoktur
Sistemi kurma hatası	Azami özen gösterilerek

3.3. Fiziksel deformasyon ölçme yöntemleri

Bu ölçme yönteminde elde edilen sonuçlar bağıl özellikte olduğundan ölçüler uzaktan ölçme tekniğine göre yapılır. Ölçüler deformasyon araştırması yapılan objeden uzakta, güvenli bir ortamdan izlenebilir. Ölçü aletleri zemine veya yapıların içine ya da dışına yerleştirilir, kablolarla ölçü merkezlerine bağlanır. Günümüzde oldukça gelişmiş bu yöntemlerden bazıları aşağıda kısaca açıklanmıştır.

3.3.1. Sarkaç (pendulum) ölçmeleri

Kule, baraj ve gökdelen gibi mühendislik yapılarının bir düşey doğrultu boyunca değişimlerinin belirlenmesi amacıyla uygulanan bağıl ölçme yöntemidir. Sarkaçlar

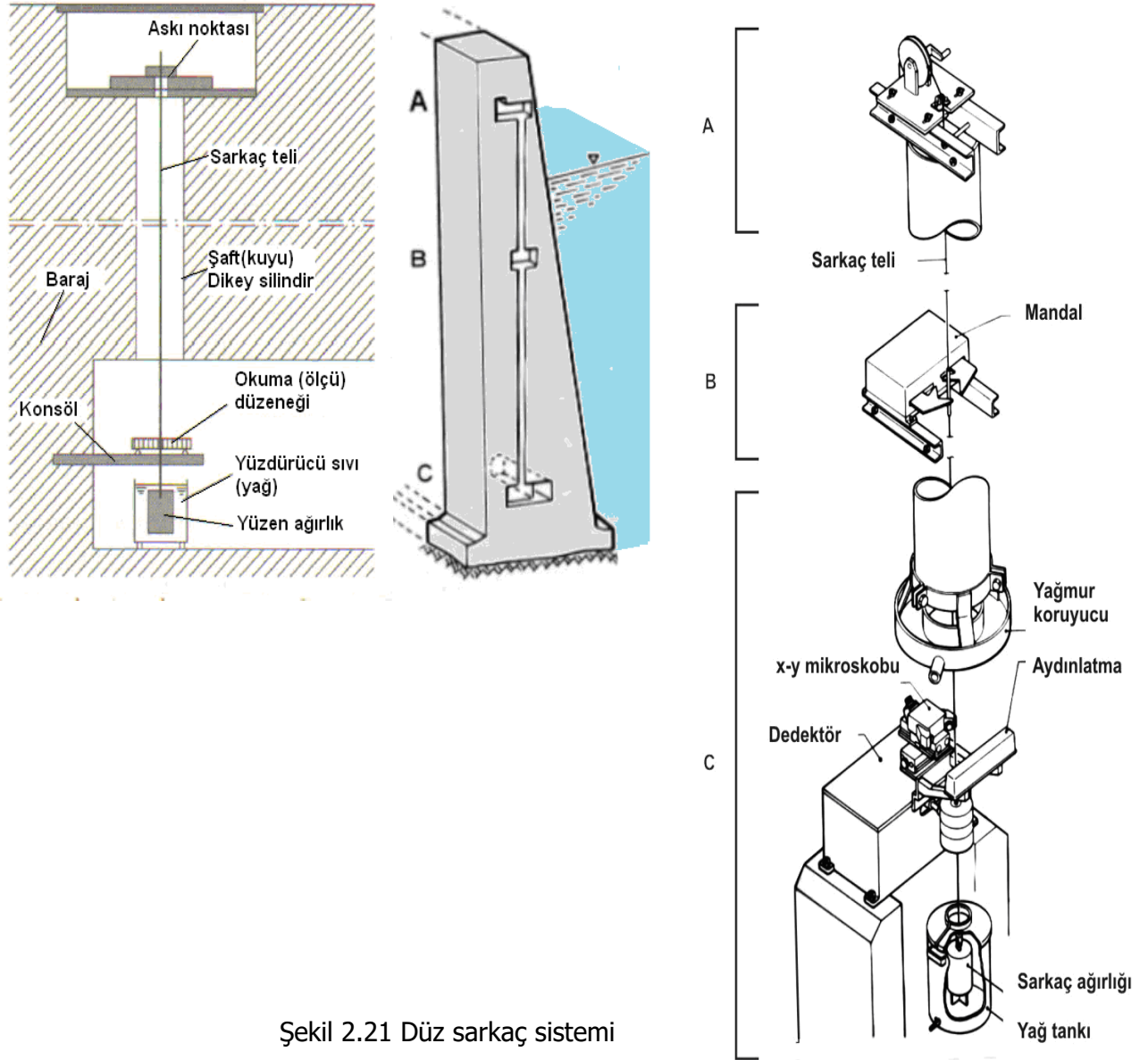
- Düz sarkaçlar ve
- Ters sarkaçlar

olmak üzere iki çeşittir.

3.3.1.1. Optik okumalı mekanik düz sarkaçlar

Genellikle 0.6 mm çapında 180 kp/mm² çekme dayanımı olan üst tarafı yapının üstüne sabitlenmiş, alt ucunda 5-20 kg arasında bir ağırlık ile gerilmiş çekül sistemidir, (Şekil 2.21). Telin titreşimlerini önlemek için ağırlık sıvı veya yağ dolu bir kaba batırılır.

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri



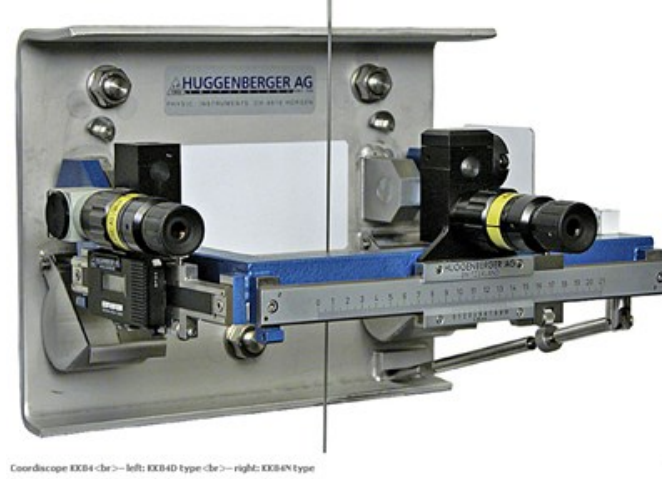
Şekil 2.21 Düz sarkaç sistemi

Sarkaç telinin doğrultudan sapmalarının ölçümünde optik koordinat ölçerler kullanılır, (Şekil-2.22). Birbirine dik olarak monte edilmiş dürbünlerden sarkaç telinin x-y doğrultusundaki ötelenmeleri ölçülür. Bunun için her iki dürbün 160 mm uzunluğunda bir cetvel üzerinde kayabilecek şekilde yerleştirilmiştir. Ölçüye başlamadan önce ağırlığın sıvı dolu kap içinde serbestçe hareket edip etmediği kontrol edilmelidir.

Ölçü doğruluğunu etkileyen faktörler:

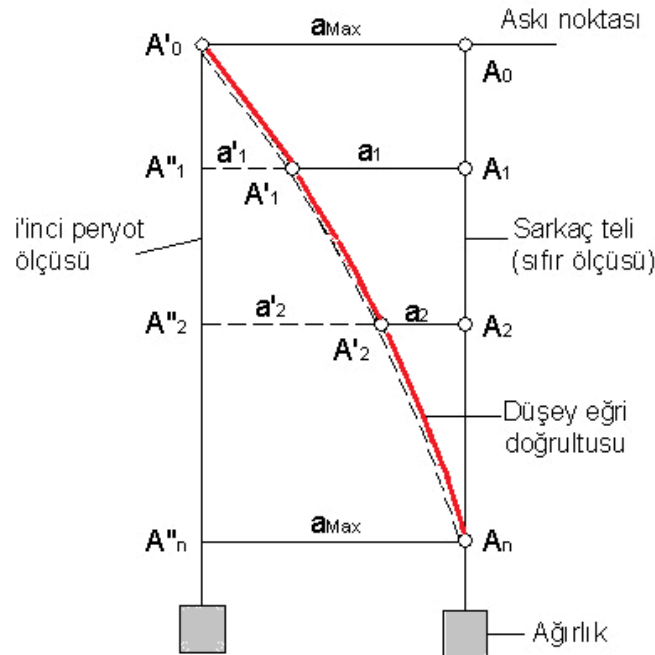
- Sarkaç telinin sürekliliği,
- Optik dürbünlerin yerleştirilmesi ve
- Okuma hassasiyetidir.

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri



Şekil-2.22 Optik koordinat ölçer

Başlangıç konumunda sarkaç telinin doğrultusu $A_0, A_1, \dots, A_n$ olarak kabul edilir. Bu durum yapının başlangıç durumunu temsil eder. Etkiyen kuvvetler sonucunda yapı deformasyona uğrar ve sarkacın üst bağlantı noktası A_0^I 'ne ötelenir. Yapıya konsollarla bağlı olan ara ölçme noktaları da $A_1^I, \dots, A_n^I$ noktalarına ulaşır. Bu durumda sarkaç doğrultusunun yer değiştirme eğrisi $A_0^I, A_1^I, \dots, A_n^I$ noktalarının oluşturduğu eğridir, (Şekil-2.23).



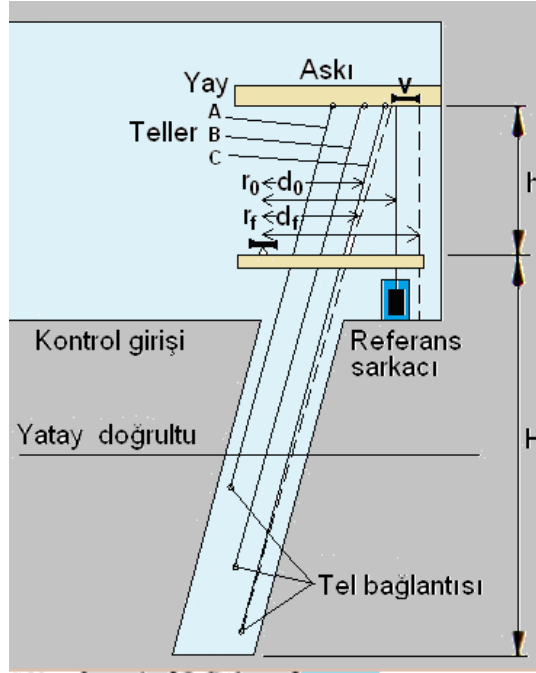
Şekil 2.23 Düz sarkaçların ölçü prensibi

Mekanik sarkaçların en çok kullanıldığı yer olan barajlarda sarkaç teli su seviyesindeki değişimlerden dolayı farklı çekme kuvvetlerinin etkisi altında kalır. Suyun yüksekliği ile değişen bağıl kütle çekimleri ölçülen büyüklükleri sistematik olarak ve farklı büyüklüklerde etkiler.

Barajlarda Deformasyon Ölçmeleri

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

Referans sarkacı: İsviçre'deki Albigna Barajı'nda uygulanmış bir sarkaç yöntemidir. Baraj tabanı ile tabanın oturduğu zemin arasındaki yatay yer değiştirmeleri belirlemek için geliştirilmiştir. Baraj tabanında yüksek bir yere paralel olarak bağlanmış dört sarkaçtan oluşmuştur. Bunlardan biri baraj tabanına yöneltilmiş düz sarkaç olup referans sarkacı olarak adlandırılmıştır, (Şekil-2.24). Diğer üçü ise barajın oturduğu zeminde açılan bir kuyu içine sarkıtılmıştır. Bu sarkaç tellerinin yatay hareketleri referans sarkacına göre belirlenmiştir.



Şekil 2.24 Referans sarkacı

Şekil 2.24'e göre :

$$r_0 + v = \Delta + r_f$$

$$\frac{\Delta + d_f - d_0}{H} = \frac{v}{H+h} \quad (2.35)$$

içler dışlar çarpımı yapılır ve

$$Q = \frac{H}{h}$$

ile gösterilirse

$$\Delta = (r_f - r_0) Q - (d_f - d_0) (Q+1) \quad (2.36)$$

bağıntısı elde edilir.

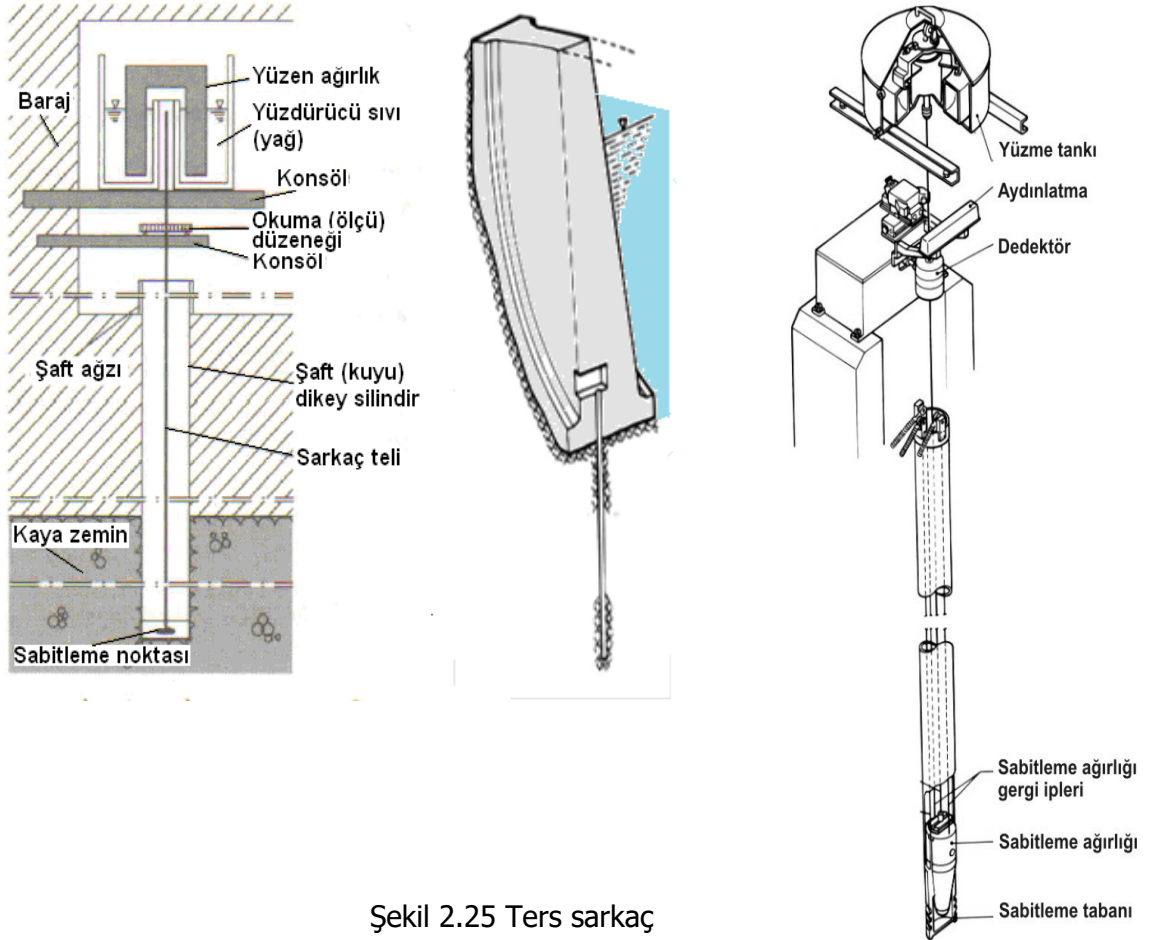
Şekil-2.24'deki d_0 , d_f referans sarkacındaki okumalar, r_0 , r_f zemin sarkaçlarındaki okumalardır. Zemine açılan kuyunun boyutları 15-30 cm çapında ve 50-70 m derinliğindedir. Baraj tabanı ile zemin arasındaki yatay yer

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

değiştirme miktarı Δ 'nın doğruluğunun uygulamalar sonucu en fazla 0.5 mm olduğu belirlenmiştir.

3.3.1.2. Ters sarkaçlar

Ters sarkaçlar günümüzde mühendislik yapılarının gözlenmesinde vazgeçilmez yöntemlerden biridir. Ters sarkaç ile sabit yani zemindeki hareketsiz noktanın stabilitesi üst tarafa taşınır. Sarkaç doğrultusunun alt tarafı 30-50 m derinliğinde kayaya sabitlenir.



Şekil 2.25 Ters sarkaç

Sarkaç telinin üst tarafı dairesel bir yüzen cisim ile bağlantılıdır. Yüzen kısım su dolu bir kabın içinde Archimedis prensibine göre hareket eder (Şekil 2.25). Yani sistemin dış etkiler nedeni ile düşeyliği bozulursa, ters dönüş kuvveti ile aynı düşey doğrultuya gelmek için ters yönde hareket edecektir. Ölçü noktasının aranan yatay kayma miktarı referans noktasının doğrultusuna göre koordinat ölçer ile belirlenebilir. Bu arada yüzen cisim ve telin dış etmenlerden etkilenmemesine dikkat edilmelidir. Ters sarkaçların ölçü doğruluğu düz sarkaçlarla hemen hemen aynı olup $\sigma_{\Delta l} = 0.1$ mm olarak verilebilir. Şekil-2.26'ya göre;

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

F_A = etkiyen kuvvet,

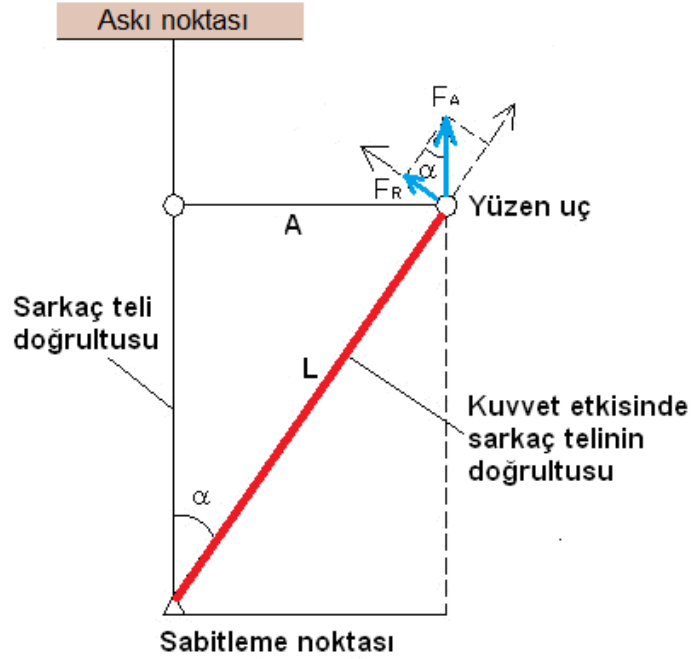
F_R = ters dönüş kuvvet,

$$F_R = F_A \sin \alpha$$

$$F_R \text{ 'nin momenti } M = F_R L = F_A L \sin \alpha$$

$$\sin \alpha = \frac{A}{L} \quad \text{olmak üzere}$$

$$F_R = F_A \frac{A}{L} \quad \text{'dir.} \quad (2.37)$$



Şekil 2.26 Kuvvet etkisinde ters sarkacın davranışı

Sarkaç ölçmelerinin özellikleri ve avantajları:

- Okuma aleti hafif ve kullanışlıdır.
- Okuma aletleri her kuyuda kullanılabilir.
- Yatay konum değişimleri sarkacın sıfır ölçüsüne dayalı olarak belirlenir.
- 160 mm'ye kadar yatay hareketler sarkaçlarla belirlenebilir.
- Optik koordinat ölçümü: duvarda konsol üzerine tespit edilmiş zorunlu merkezleştirme altlığı bulunan iki ölçü noktasına yerleştirilen optik ölçme aleti ile x - y doğrultularında yapılır.
- Çekül doğrultusunun okumaları x - y yönlerinde aynı anda yapılmalıdır.
- Sonuçların yorumunda alınyman yönteminde noktaların bir doğrultudan sapmalarının belirlenmesinde olduğu gibi burada da düşey doğrultuyu gösteren bir noktadan olan sapmalar belirlenmiş olur.
- Ölçüler kısa zamanda bitirilebilir.

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

- Kapalı ortamda yapılması neden ile ölçü sonuçları kırılma ve sıcaklık gibi dış etkilerden bağımsızdır.
- En fazla açılma kretteki ölçü noktasında gözlenir.
- Sonuçlar zeminde bulunan ölçü noktasına göre bağıl olarak belirlenir.
- Otomasyona uygun bir ölçü yöntemidir.
- Mutlak ölçü yöntemleri ile bağlantı sağlanabilir.

Hata etkileri :

- Gözlem noktalarındaki dönüklük hatasının 0.1 mm,
- Okuma hatasının 0.1 mm,
- Aletin merkezleştirme hatasının 0.1 mm olmasına bağlı olarak
- Bir ölçünün standart sapması 0.2 mm dir.



Şekil-2.27 invar telli ekstensometer

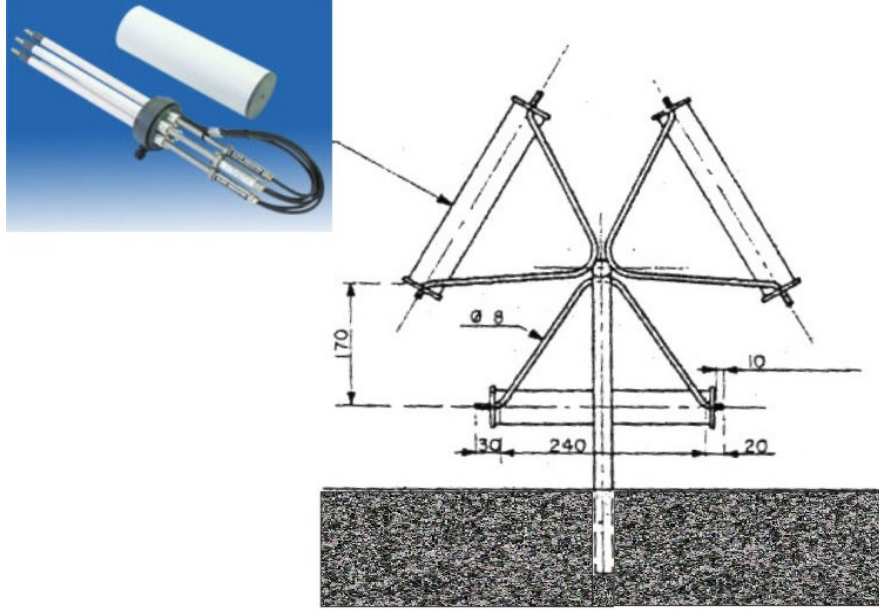
3.3.2. Gerilim (strainmeter veya extensometer) ölçmeleri

Strainmeter veya extensometerlar jeofizik alanında yeryüzü üzerindeki bağıl hareketlerin belirlenmesinde uzun zamandır kullanılmaktadır. Yaklaşık 20 yıldan bu yana barajlar ve tüneller gibi mühendislik yapılarının gözlenmesinde giderek artan oranda kullanım alanı bulmuştur. Ekstensometerler bir yapının noktaları arasındaki zamanla oluşan uzama/kısalma şeklindeki deplasmanların ölçülmesi amacıyla tasarlanmıştır. Buna göre bir extensometer ile iki noktanın birbirine karşı hareketi belirlenebilmektedir. Bu noktalar arasındaki uzunluğun belli olmasına gerek yoktur. Çünkü yalnız noktalar arasındaki uzunluk değişimleri ile ilgilenilmektedir. Mühendislik yapılarındaki kaya ölçümleri için geliştirilmiş 120 m uzunluğa kadar $5 \cdot 10^{-6}$ S ile $5 \cdot 10^{-5}$ S arasında uzunluğa bağlı ölçü doğruluğu olan çeşitli tipte extensometerler vardır. Buna göre 80 m uzunluğundaki bir mesafede 0.4 mm ile 4 mm arasında bir ölçü doğruluğuna ulaşılabilir. İki çeşit gerilimölçer vardır. Bunlar

- Gerilmiş teller (invar teller, Şekil2.27) ve
- Sert çubuklardır.

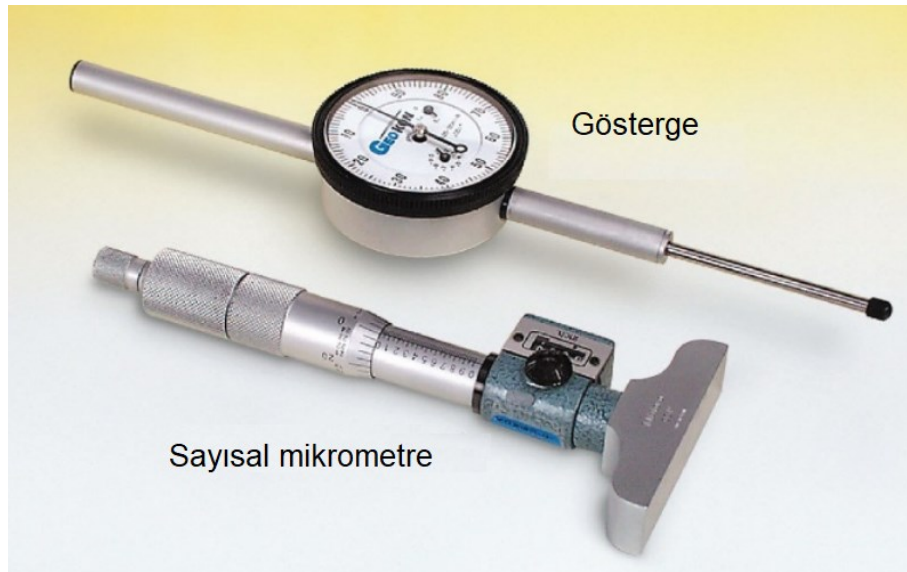
2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

Gözlenen objenin deformasyon davranışları hakkındaki bilgiyi artırmak için tekrarlı örneğin 3 tekrarlı ekstensometerler kullanılmaktadır, (Şekil-2.28).



Şekil-2.28 Ekstensometer ve uygulama şekli

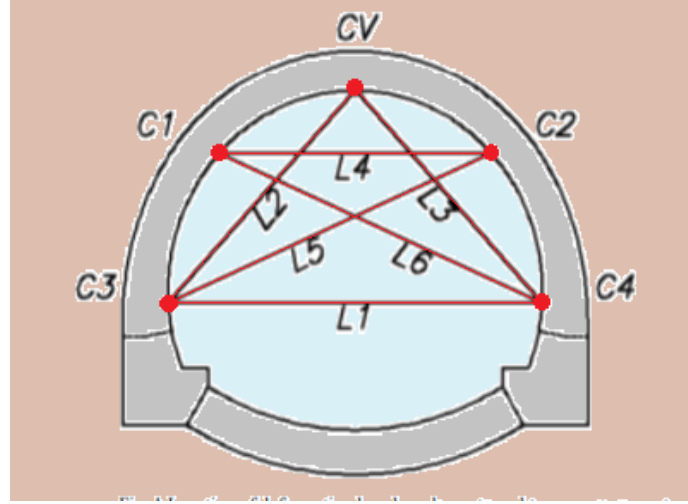
Burada aynı boru içinde farklı ölçü noktalarına ankre edilmiş 3 tel bulunmaktadır. Böylece tel sayısı kadar değişim miktarı belirlenmektedir. Ekstensometerler yatay, düşey veya eğik mesafelerde o yöne doğru uzatılabilir. Bu durum objenin konumuna bağlı olarak jeologlar ve inşaat mühendisleri gibi ortak disiplinlerle yapılacak görüşmeler sonucunda belirlenmelidir. Ölçü aleti dış etkilerden özellikle ısı etkisinden korunmalıdır. Ve ölçü yapılan yere ısı düzeltmesini hesaplayabilmek için termometreler yerleştirilmelidir.



Şekil-2.29 Çubuk ekstensometer ölçmeleri için iki mekanik alet

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

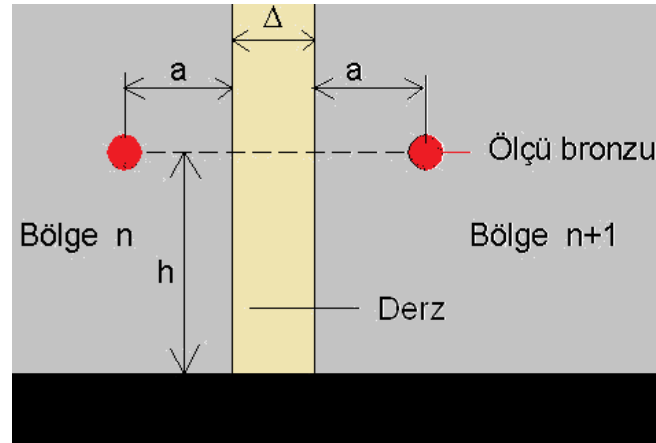
Geoteknik hizmetlerden alet donanımı olarak hareketlerin ölçülmesi için en sık kullanılan iki mekanik alet dial indicator (gösterge) ve depth micrometer (sayısal mikrometre) 'dir, (Şekil-2.29). Göstergenin 50 mm'den 300 mm'ye kadar olan ölçme aralığında okuma duyarlılığı 0.0025 mm ile 0.025 mm aralığındadır. Göstergeden okunan değerin kalan kısmı bir mikrometre yardımı ile okunarak deplasmanlar ölçülür, (Ogundare J.O., 2015)



Şekil-2.00 Bir tünel kesitindeki geçici desteklerdeki obje deformasyon noktaları C1, C2, C3, C4 ve C5 ile noktalar arasında ölçülen L1, L2, L3, L4, L5 ve L6 mesafeleri

3.3.3. Derz (jointmeter) ölçmeleri

Birbirinden ayrık yapı aralıklarındaki değişimlerin belirlenmesi için kullanılan bağıl ölçme yöntemidir (Şekil-2.30).

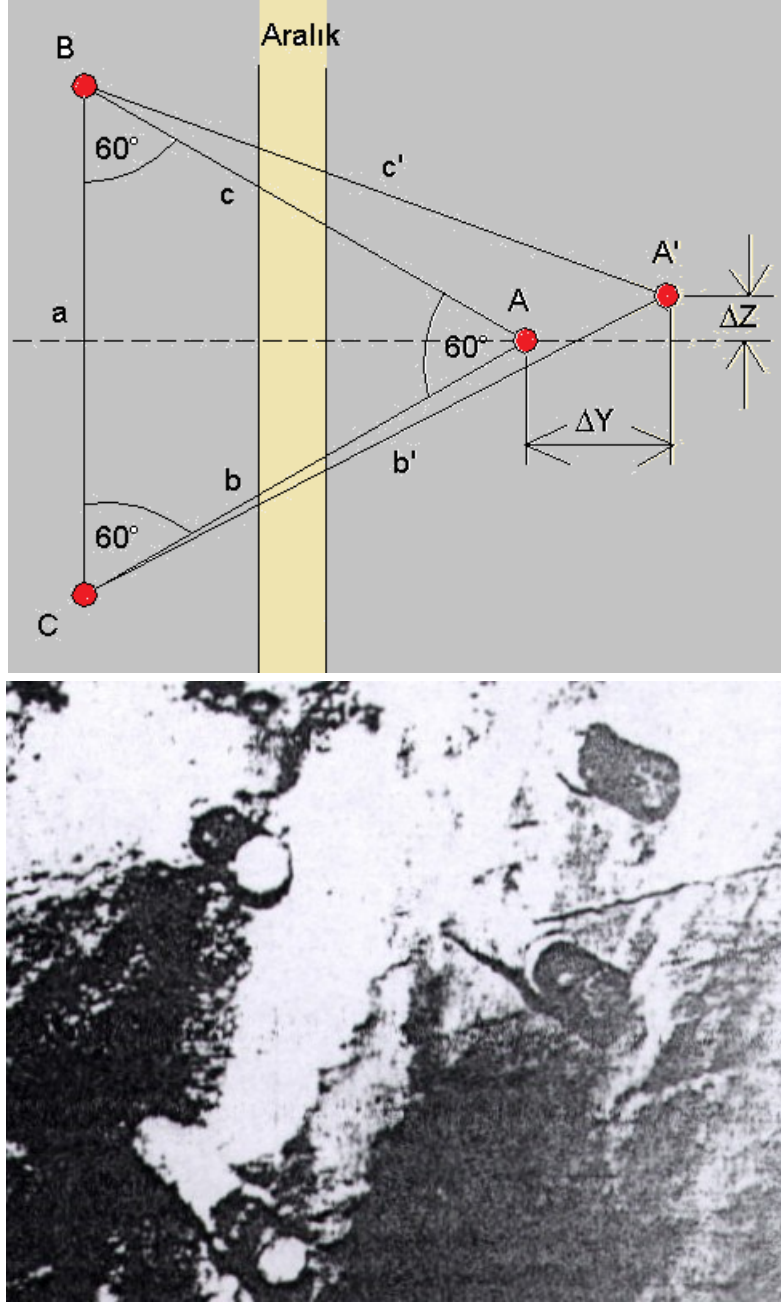


Şekil-2.30 Derz ölçmelerinin temel prensibi

Aynı yükseklikte ve aralıkta a kadar mesafede ölçü noktaları işaretlenir. Bu noktaların hidrostatik nivelman noktaları ile aynı karakterde olması tercih edilir. a aralıkları 20 cm -30 cm olarak seçilir. Beklenen şekil değişimleri yaklaşık olarak mm mertebesindeir. Ölçü aleti olarak kumpas veya okuma

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

doğruluğu 0.01 mm – 0.1 mm olan ölçü saatleri kullanılmaktadır. Ölçü aletleri her ölçüden önce bilinen bir uzunlukta kontrol edilmelidir. Kombinasyonlu derz ölçmeleri ile bağıl hareketlere ilave olarak yapı aralığına dik ve paralel hareketlerde belirlenebilir, (Şekil-2.31).



Şekil-2.31 Kombinasyonlu derz ölçmeleri

Burada koşul ölçü noktalarının bir eşkenar üçgen oluşturmalarıdır. Ölçü uzunlukları b ve c kenarlarıdır. Aranılan büyüklükler ise Δy ve Δz 'dir. Ölçü noktalarının aralıkları yaklaşık 30 cm ile sınırlı olduğundan ve bu mesafelerdeki değişim miktarları da mm'yi aşmayacağından b ve c kenarlarındaki şekil değişimleri Δb ve Δc değişim miktarları ile tanımlanabilir. Buna göre :

Barajlarda Deformasyon Ölçmeleri

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

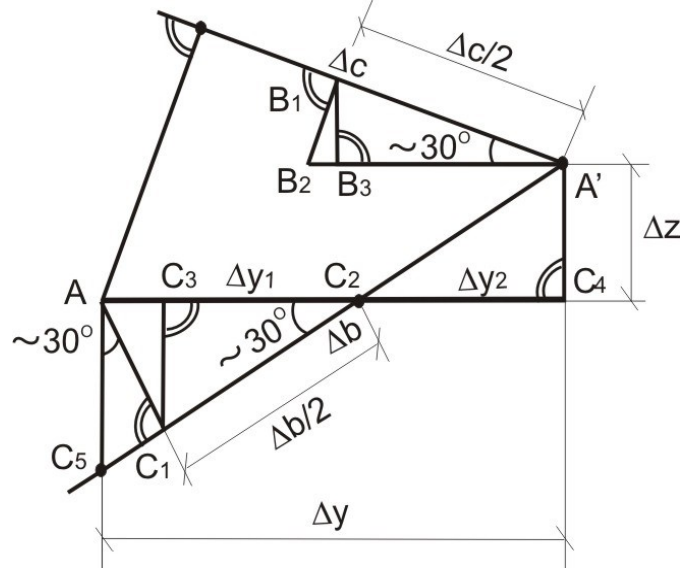
$$\Delta b = b^I - b \quad \Delta c = c^I - c \quad (2.38)$$

ile gösterilir.

Şekil-2.31'e göre Δy değişim miktarı Δy_1 ve Δy_2 'nin toplamıdır. Şekilden

$$\Delta y = \Delta y_1 + \Delta y_2, \quad \Delta y_1 = AC_3 + C_3C_2, \quad \Delta y_2 = B_1B_3 + B_3A^I \quad (2.39a)$$

olarak yazılabileceği görülmektedir.



Şekil-2.32 Değişim büyüklüklerinin belirlenmesi

Şekil-2.32'ye göre Δy değişim miktarı Δy_1 ve Δy_2 'nin toplamıdır. Şekilden

$$\Delta y = \Delta y_1 + \Delta y_2, \quad \Delta y_1 = AC_3 + C_3C_2, \quad \Delta y_2 = B_1B_3 + B_3A^I \quad (2.39a)$$

olarak yazılabileceği görülmektedir.

Buna göre

$$\begin{aligned} C_3C_2 &= \frac{\Delta b}{2} \cos 30^\circ = \frac{\Delta b}{2} \times \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{\sqrt{3}}{4} \Delta b \\ C_1C_3 &= \frac{\Delta b}{2} \sin 30^\circ = \frac{\Delta b}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4} \Delta b \\ AC_1 \cos 30^\circ &= C_1C_3 \rightarrow AC_1 = \frac{1}{4} \Delta b \times \frac{2}{\sqrt{3}} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \Delta b \\ AC_3 &= AC_1 \sin 30^\circ = \frac{1}{2\sqrt{3}} \Delta b \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4\sqrt{3}} \Delta b \\ \Delta y_1 &= \frac{1}{4\sqrt{3}} \Delta b + \frac{\sqrt{3}}{4} \Delta b = \frac{1}{\sqrt{3}} \Delta b \end{aligned} \quad (2.39b)$$

olarak elde edilir.

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

$$\begin{aligned}
 B_3A^I &= \frac{\Delta c}{2} \cos 30^\circ = \frac{\Delta c}{2} \times \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{\sqrt{3}}{4} \Delta c \\
 B_1B_3 &= \frac{\Delta c}{2} \sin 30^\circ = \frac{\Delta c}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4} \Delta c \\
 B_1B_2 \cos 30^\circ &= B_1B_3 \rightarrow B_1B_2 = \frac{1}{4} \Delta c \times \frac{2}{\sqrt{3}} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \Delta c \quad (2.39c) \\
 B_2B_3 &= B_1B_2 \sin 30^\circ = \frac{1}{2\sqrt{3}} \Delta c \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4\sqrt{3}} \Delta c \\
 \Delta y_2 &= \frac{1}{4\sqrt{3}} \Delta c + \frac{\sqrt{3}}{4} \Delta c = \frac{1}{\sqrt{3}} \Delta c
 \end{aligned}$$

olur. Buradan (2.39a)'ya göre

$$\Delta y = \frac{\Delta b + \Delta c}{\sqrt{3}} \quad (2.40)$$

olarak bulunur.

Benzer şekilde Δz 'de belirlenebilir. Bunun için $A^IC_2C_4$ dik üçgeninden yararlanılır. A^IC_2 kenarının hesabı için önce C_5A^I kenarına düzeltme getirilerek Δb hesaplanır.

$$\begin{aligned}
 AC_5 &= \frac{\Delta b}{2} \sin 30^\circ = \frac{\Delta b}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4} \Delta b \\
 C_5C_1 &= AC_5 \sin 30^\circ = \frac{1}{4} \Delta b \times \frac{1}{2} = \frac{1}{8} \Delta b
 \end{aligned} \quad (2.41a)$$

şeklinde Δb değişim miktarına getirilecek düzeltme bulunur. Buradan hareketle A^IC_2 kenarı

$$A^IC_2 = \frac{\Delta b - \Delta b/8}{2} = \frac{7}{16} \Delta b \quad (2.41b)$$

olarak bulunur. $C_2C_4 = B_3A^I$ olarak

$$C_2C_4 = \frac{\Delta c}{2} \cos 30^\circ = \frac{\Delta c}{2} \times \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{\sqrt{3}}{4} \Delta c \quad (2.41c)$$

olmak üzere $A^IC_2C_4$ dik üçgeninde

$$\begin{aligned}
 (A^IC_2)^2 &= (C_2C_4)^2 + (\Delta z)^2 \rightarrow \left(\frac{7}{16} \Delta b\right)^2 = \left(\frac{\sqrt{3}}{4} \Delta c\right)^2 + (\Delta z)^2 \\
 (\Delta z)^2 &= \frac{49}{256} (\Delta b)^2 - \frac{3}{16} (\Delta c)^2 \approx \frac{1}{5} (\Delta b)^2 - \frac{1}{5} (\Delta c)^2 \quad (2.41d) \\
 (\Delta z)^2 &= (\Delta b - \Delta c) \times \left(\frac{1}{5} \Delta b + \frac{1}{5} \Delta c\right) = \Delta z \times \Delta z
 \end{aligned}$$

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

olup kısa olması nedeni ile

$$\Delta z = \Delta b - \Delta c \quad (2.42)$$

eşitliği kenar ölçüsü farklarından Δz 'in hesabı için kullanılır. (2.39) ile (2.41) arası bağıntılardaki sonuçlar eşitliklerin tamamı yaklaşık değerler olduğu öngörülerek elde edilmiştir.



Şekil-2.33 Bir barajdaki duvar çatlağının belirlenmesinde derz ölçümü
(Dam Deformation Surveying, 8th FIG Regional Conference,
Surveying towards Sustainable Development, Montevideo/Uruguay,
26-29 Nov.2012, John Hamilton/USA)

3.3.4. Eğim (inclinometer) ölçmeleri

En basit olarak borsal düzeç olarak tanımlanabilecek inclinometerler eğim ölçmede kullanılan aletlerdir. Uygulamada elektronik sarkaçlı eğim ölçerler sıkça kullanılmaktadır. Genellikle sabit olarak yerleştirilir ve otomatik olarak çalışırlar. Seçilen doğrultu boyunca eğim çizgisinin ve bu çizgide oluşacak değişimlerin belirlenmesi amacıyla kullanılırlar.

Balkon, payanda veya bir düzlem zemin gibi yapı elemanlarının eğim çizgileri Şekil-2.34'deki gibi yaklaşık daire şeklinde gösterilebilir. Burada eğim çizgisinin P_i ve P_{i+1} noktalarındaki teğetlerinin eğimleri α_i ve α_{i+1} olmak üzere bu iki nokta arasındaki kirişin eğim açısı için

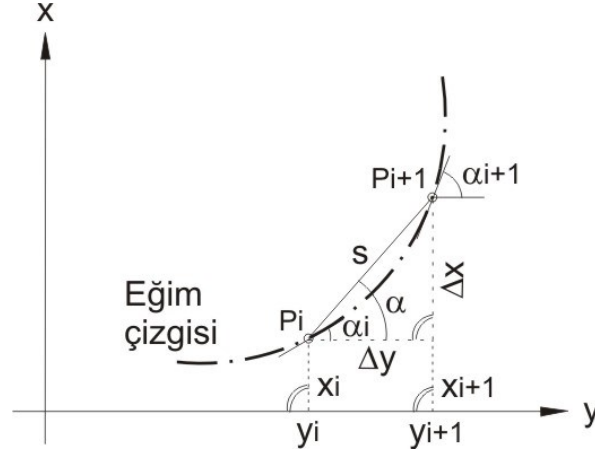
2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

$$\alpha = \frac{\alpha_i + \alpha_{i+1}}{2} \quad (2.43)$$

bağıntısı geçerlidir. İki nokta arasındaki S uzaklığı ile bu noktalar arasındaki ordinat farkı

$$\Delta y = y_{i+1} - y_i = S \sin \alpha \quad (2.44)$$

elde edilir.



Şekil-2.34 Eğim ölçerle eğim çizgisinin belirlenmesi

Uygulamada bir yapı elemanının eğim çizgisi nadiren ortaya çıkar ve ölçme teknikleri uygulanarak belirlenebilir. Kural olarak P_i ve P_{i+1} noktalarında α_i ve α_{i+1} eğim açıları yerine β_i ve β_{i+1} hatalı açıları ölçülür.

$$\beta_i = \alpha_i + \gamma_i, \quad \beta_{i+1} = \alpha_{i+1} + \gamma_{i+1} \quad (2.45)$$

Burada γ_i ve γ_{i+1} eğimölçerin yerleştirildiği doğrultu ile ideal eğim çizgisine teğet doğrultu arasındaki sapma açılarıdır. Bu sapma açılarının bilinmemesine karşılık zaman içinde sabit oldukları gözleniyorsa eğim çizgisinin değişimleri rahatlıkla elde edilebilir.

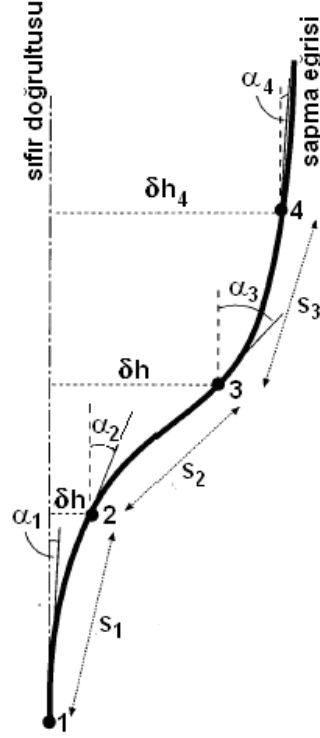
β_i ve β_{i+1} açıları ile eğim çizgisi açık poligon geçkisi gibi hesaplanabilir, (Şekil-2.35). Geçkinin kırık noktaları yaklaşık olarak aranan eğim çizgisi üzerindedir. Komşu P_i ve P_{i+1} noktalarının koordinat farkları (2.43) ve (2.44) bağıntılarına benzer şekilde

$$\beta = \frac{\beta_i + \beta_{i+1}}{2} \quad (2.46)$$

$$\begin{aligned} \Delta y &= y'_{i+1} - y'_i = S \sin \beta \\ \Delta x &= x'_{i+1} - x'_i = S \cos \beta \end{aligned} \quad (2.47)$$

bağıntıları ile elde edilir (Pelzer H. 1988).

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

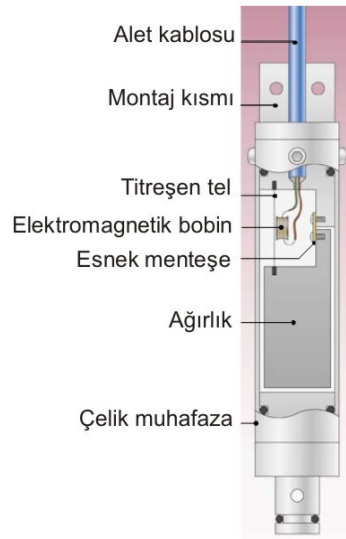


$$\delta h_4 = \left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \right) \cdot S_1 + \left(\frac{\alpha_2 + \alpha_3}{2} \right) \cdot S_2 + \left(\frac{\alpha_3 + \alpha_4}{2} \right) \cdot S_3$$

Şekil-2.35 Düşey doğrultudaki değişimin inclinometer yöntemi ile belirlenmesi

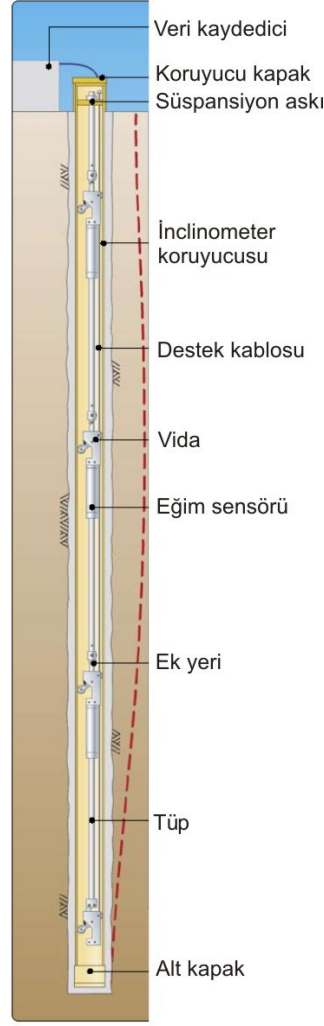
Kontrol amacı ile eğim çizgisi poligonunun son noktası çevredeki hareketsiz noktalara bağlanmalıdır. Bu poligonun ölçme dönemleri arasında ortaya çıkan koordinat farkları eğim çizgisinin değişimleri olarak yorumlanır.

Değişik tipte eğimölçerler vardır. Bunlardan biri de telli eğimölçerlerdir. Temel olarak kalibre edilmiş bir çubuk ile bunun alt ucuna sarılmış ve silindirik bir koruyucu içine yerleştirilmiş bir ağırlıktan oluşurlar (Şekil-2.36).



Şekil-2.36 Telli eğim ölçer (inclinometer)

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri



Şekil-2.37 Telli eğimölçer uygulama şekli

Çubuğun üst ucu, kontrol edilecek objede düşey veya düşeye yakın doğrultuda bir yüzeye asılarak monte edilir. Yüzeyin dönmesi durumunda çubukta aynı miktarda döner. Bu eğilme, karşılıklı olarak bağlanan tellerden birinin gerilmesi diğerinin ise gevşemesine neden olur. Farklı gerilme kuvveti nedeni ile tellere uygulanan titreşimlerde frekans farkları oluşur. Bu farklardan ψ_{13} 1-3 telleri, ψ_{24} 2-4 telleri doğrultusundaki eğim açıları olmak üzere

$$\begin{aligned} \psi_{13} &= \text{asn} \left\{ (F_1^2 - F_3^2) - (F_{01}^2 - F_{03}^2) \times C_1 \times 10^{-9} \right\} \\ \psi_{24} &= \text{asn} \left\{ (F_2^2 - F_4^2) - (F_{02}^2 - F_{04}^2) \times C_2 \times 10^{-9} \right\} \end{aligned} \quad (2.48)$$

bağıntıları ile tellerin eğim açıları hesaplanır. Bu bağıntıda F_{0i} 'ler i'inci telde başlangıçta ölçülen frekanslar, F_i 'ler ise daha sonra i'inci telde okunan frekans anlamındadır. C_i 'lerde tellerin gerilim katsayılarıdır (Uzel T. 1991).

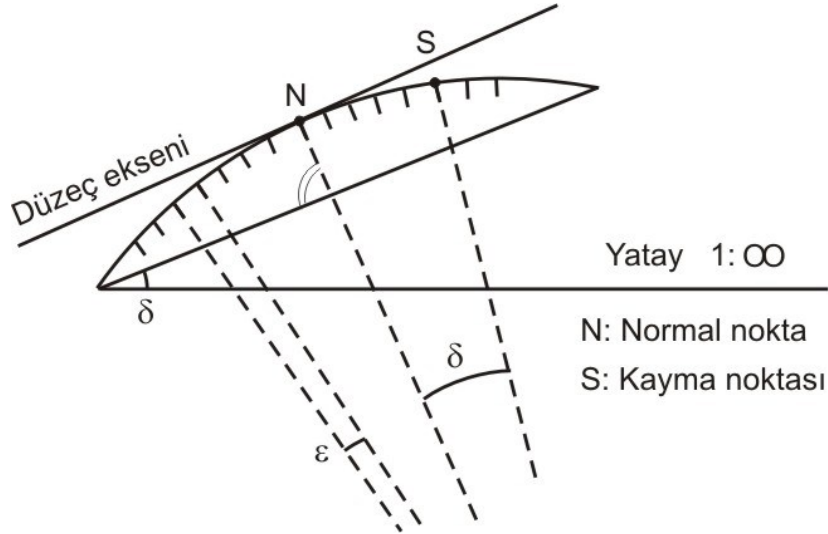
Kızaklı eğimölçerlerde benzer bir prensibe dayanmaktadır. Yapının seçilen bir yerinde açılan bir yuvaya birbirine dik iki doğrultuda eğimölçer monte edilmiş

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

ölçü kızağı bulunan bir düzeneğe yerleştirilir. Ölçü kızağı bir miktar yuvaya takılarak kızağın ilgili eğimleri ölçülür. Böylece yapıda açılmış bulunan yuvaların mekansal davranışları yineleme ölçüleri ile izlenir.

Eğim ölçerler çok hassas biçimde kontrol edilmelidir. Kalibrasyon büyüklükleri olarak,

- Düzey ekseni ile yerleştirildiği doğrultu arasındaki δ ayar açısı eğim ölçerin **sıfır noktası sabiti** olarak,
- ε düzey eğriliği eğim ölçerin **ölçek faktörü** olarak ifade edilir.



Şekil-2.38 Bir düzeyin (eğimölçerin) kalibrasyon parametresi

Eğim ölçer ile her iki konumda da eğim ölçüsü yapılabilirse, δ sıfır noktası sabitinin belirlenmesi göz ardı edilebilir. Klasik sıvılı düzeylerde ε düzey eğriliği (1 parslık açı) sabittir. Bu büyüklük düzey kontrolü yapılarak belirlenir ve belli aralıklarla kontrol edilmelidir. Elektronik eğimölçerlerin ölçek faktörleri daha sık kontrol edilmelidir. En uygun kontrol, uygulama yerinde kalibrasyonda kullanılabilecek bir düzenekteki bilinen bir açının ölçülmesi yolu ile gerçekleştirilir.

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

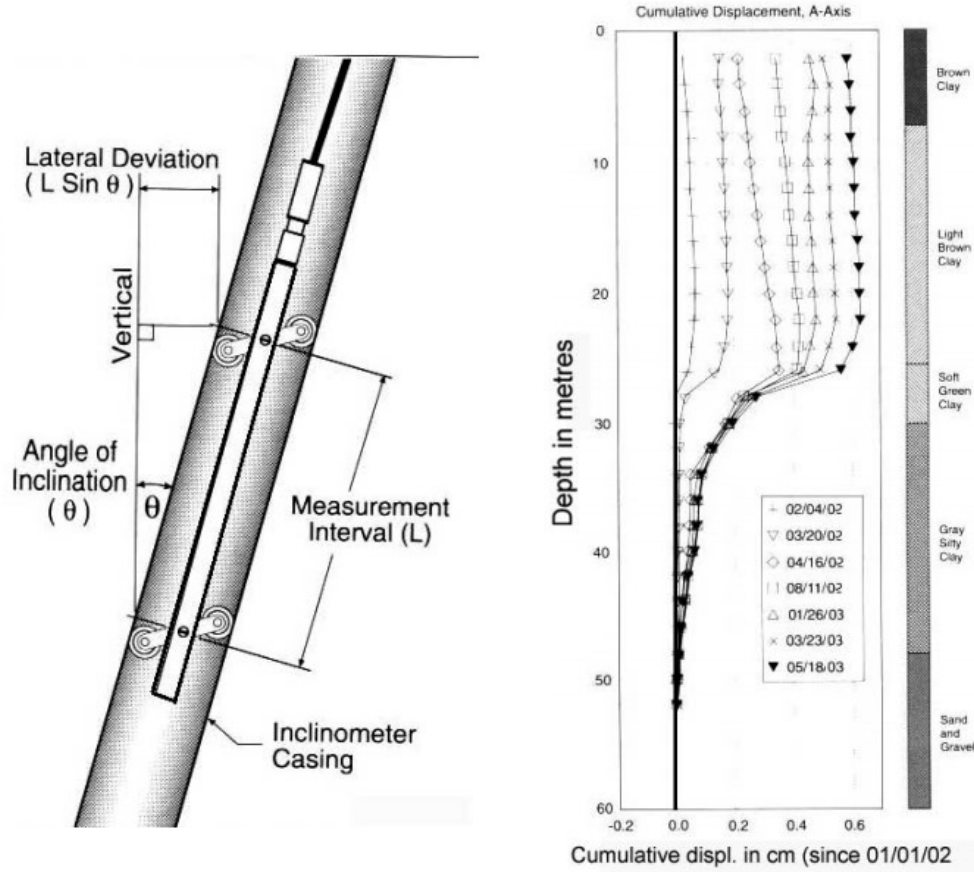


Fig. 6 : Left : Inclinometer probe and Right : typical horizontal displacement profile obtained by an inclinometer.

Proceedings, 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece, 2003.

MONITORING AND MODELLING GROUND DEFORMATIONS DURING TUNNELLING

Michael J. Kavvadas

*Civil Engineering Faculty, National Technical University of Athens,
9 Iroon Polytechniou St., GR-15780 Zografou, Greece*

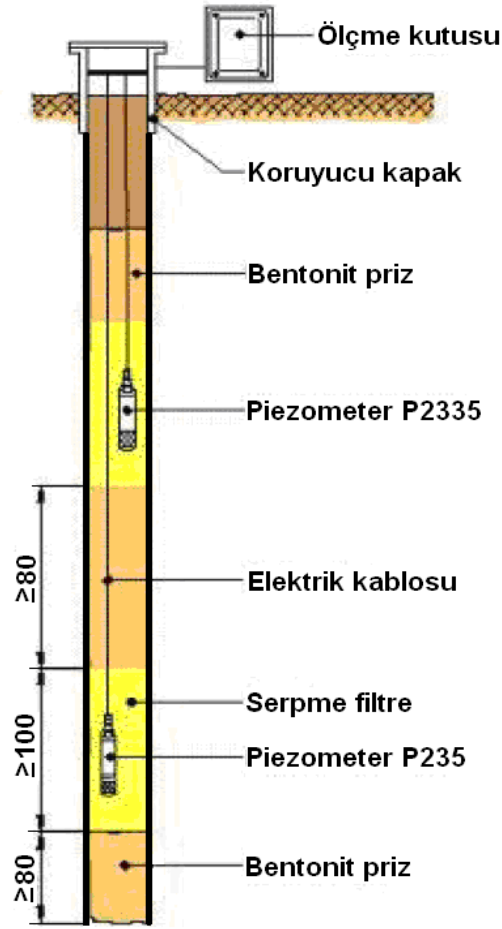
3.3.5. Yeraltı su seviyesi (piezometer) ölçmeleri

Yer altı suyu, çatlaklar ve yarıklar arasında hareket ederek yeraltı su seviyesinin değişmesine neden olur. Bu durumda yeraltı suyunun akış doğrultusu ve hızı da değişebilir.

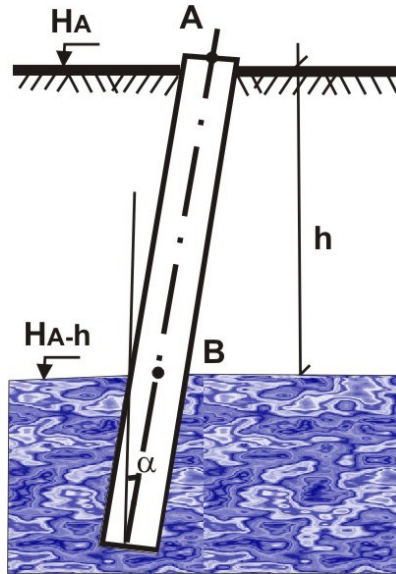
Bu anlamda örneğin bir baraj gölünün oluşması sırasında yer altı su seviyesindeki değişimlerin sürekli olarak ölçülmesi gerekir. Bu nedenle baraj bölgesinde seçilen belirli yerlere piezometer kuyuları açılır (Şekil-2.39). Bu

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

kuyuların ağızlarına nivelmanla kot taşınır. Örneğin bir ay aralıklarla yer altı su seviyesi ölçülür.



Şeil-2.39 Örnek bir piezometre kuyusu elemanları



Şekil-2.40 Eğik açılmış bir piezometre kuyusu

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

Piezometer, bir şerit metrenin ucuna bağlanan bir şamandıra-kontak ile bu kontakların elektrik telleri ile bağlandığı bir ampul ve pilden oluşmaktadır. Şerit metre, piezometerin borusundan aşağıya doğru sarkıtılır. Şamandıra suya değdiğinde kontak kapanır ve yukarıda kuyunun başındaki ampul yanar. O anda şerit metrenin değeri okunur. Böylece h^I ölçülmüş olur. Piezometer kuyusu eğer α kadar eğimli açılmış ise h derinliği

$$h = h^I \cos \alpha \quad (2.49)$$

bağıntısı ile bulunur, (Şekil-2.40).

Bu durumda yer altı suyunun kotu,

$$H_B = H_A - h \quad (2.50)$$

olur. Ölçü değerleri bir tabloda toplanır (Tablo-2.08).

Ye altı suyu değişimlerinin nedenleri, bir hidro-elektrik santralin işletme programı, kuvvetli yağışlar, mevsim dönümleri, gel-git'ler vb olaylar olabilir.

Tablo-2.08 Örnek bir piezometer kuyusundaki ölçü değerleri
(Oymapınar Barajı, Aygır 130 kuyusu)

Tarih	P1 131.08 m	P2 130.88 m	P3 130.94 m	P4 131.00 m	P5 131.00 m	Rezervuar su seviyesi
07.02.1985	47.95	47.78	61.92	47.44	77.37	167.00 m
27.02.1985	48.83	48.71	64.54	48.42	78.59	168.00
20.03.1985	44.77	44.47	57.12	44.15	74.75	169.00
12.06.1985	41.81	40.55	55.06	42.02	78.69	183.00

Havza ve göl çevresindeki hidro-jeolojik etütlerin sonucunda eş yükseklik eğrileri çizilir. Bunlar yardımı ile yeraltı suyunun akış doğrultusu, hidrolik eğim, yer altı suları ile yer üstü sularının ilişkisi, beslenme havzasının özellikleri ile yeni oluşan kaynakların durumları öğrenilebilir.

Piezometer ve göl seviyesi ölçmeleri ile değişimlerinin incelenmesi, diğer ölçme aletlerinden elde edilen verilerin birlikte değerlendirilmesi ile anlam kazanır (Uzel T. 1991).

3.3.6. Yapı malzemesinde deformasyon ölçmeleri

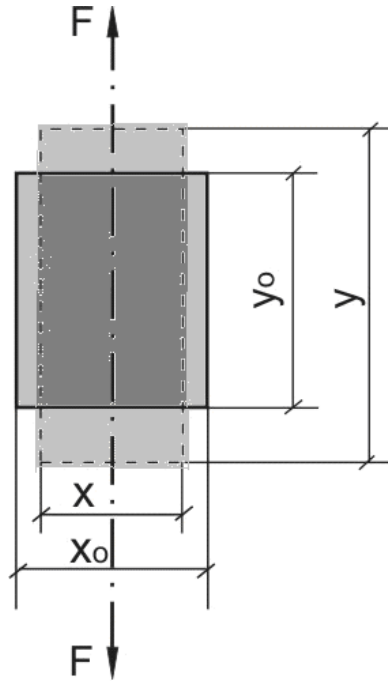
Cisimlerin basınç ve çekme kuvvetlerinin etkisi altındaki davranışlarının belirlenmesi için öncelikle *elastikiyet modülü* ve *Poisson oranı* 'nın bilinmesi gerekir. Malzemenin bu değerleri için çoğunlukla kesin değerler verilemez. Çünkü bu büyüklükler malzemenin kalitesine, başlangıçtaki gerilim durumuna,

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

yüklemenin hızına, zamana ve korunma şekline bağlı olarak değişim gösterirler.

Kısaca *e-modülü* olarak da adlandırılan elastikiyet modülü betonun şekil değişikliği durumundaki elastikiyetini ifade eder. Betonun elastikiyet modülü betonun bileşenleri olan çimento ve agregaların (kum ve çakıl) elastikiyet modülünden belirlenir.

Alman DIN normu 1048'e göre 20 cm'lik küp şeklindeki bir numuneye hazırlanmasından 28 gün sonra baskı uygulanarak elastikiyet modülü belirlenir. Elastikiyet modülünün zaman, sıcaklık ve nem ile de değiştiği bilinmektedir. Yüksek sıcaklık elastikiyet modülünün değerini artırır. Nemlenen veya suyla temas eden betonun elastikiyet modülü kuru betona göre daha yüksektir.



Şekil-2.41 Tek eksenli kuvvet uygulamada enine ve boyuna deformasyonlar

Betona kuvvet uygulandığında kuvvet doğrultusundaki şekil değişikliklerinin yanında buna dik doğrultuda da şekil değişiklikleri meydana gelir. Şeklin boyutlarındaki bağıl değişiklikler için

$$\varepsilon_x = \frac{x - x_0}{x_0} \quad , \quad \varepsilon_y = \frac{y - y_0}{y_0} \quad (2.51)$$

eşitlikleri geçerli olur, (Şekil-2.41). Poisson oranı, numunenin enine yönündeki bağıl değişimlerinin, boyuna yönündeki bağıl değişimlere oranı olarak ifade edilir.

2. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

$$\mu = \frac{\varepsilon_X}{\varepsilon_Y} \quad (2.52)$$

Poisson oranı genel olarak 0 ile 0.5 arası değerler alır. Bir çok teknik malzemenin poisson oranı 0.2 ile 0.4 aralığındadır (Gülal E. 1997).