

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

29986

PRESİZYONLU NİVELMAN YERİNE TRİGONOMETRİK
NİVELMAN YÖNTEMİNİN KULLANILABİLİRLİĞİ ÜZERİNE
BİR ÇALIŞMA

Ayhan CEYLAN

DOKTORA TEZİ

JEODEZİ VE FOTOGRAMETRİ ANABİLİM DALI

Konya, 1993

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

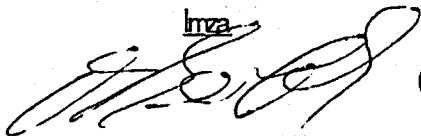
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PRESİZYONLU NİVELMAN YERINE TRİGONOMETRİK
NİVELMAN YÖNTEMİNİN KULLANILABİLİRLİĞİ ÜZERİNE
BİR ÇALIŞMA

Ayhan CEYLAN

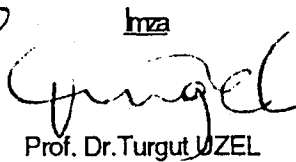
DOKTORA TEZİ
JEODEZİ VE FOTOGRAMETRİ ANABİLİM DALI

Bu tez 23 / 06 / 1993 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından kabul edilmiştir.

İmza


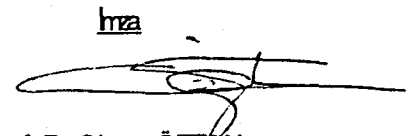
Prof. Dr. Orhan BAYKAL

(Danışman)

İmza


Prof. Dr. Turgut ÜZEL

(Jüri)

İmza


Prof. Dr. Olcay ÖZTAN

(Jüri)

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

ÖZET

Doktora Tezi

PRESİZYONLU NIVELMAN YERİNE TRİGONOMETRİK NIVELMAN YÖNTEMİNİN KULLANILABİLİRLİĞİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

Ayhan CEYLAN

Selçuk Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Jeodezi ve Fotogrametri Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Orhan BAYKAL

1993, Sayfa : 112

Jüri : Prof. Dr. Orhan BAYKAL

Prof. Dr.Turgut UZEL

Prof. Dr.Olcay ÖZTAN

Günümüzde gerek bilimsel amaçlarla, gerekse mühendislik hizmetlerine yönelik olarak yükseklik farklarının çok yüksek bir doğrulukla ($\pm 0.5 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$) belirlenmesi istenmektedir. Sözü edilen bu yüksek doğruluğu karşılayabilecek tek yöntem olarak bilinen presizyonlu nivelman tekniği, uygulaması zor, yavaş, pahalı ve her yerde uygulanması mümkün olmayan jeodezik bir ölçme yöntemidir. Presizyonlu nivelmanla, günde 30 - 40 istasyon noktasında ölçme yapılarak 20 - 30 m. lik gözleme uzaklıkları ile maksimum 0.7 ~ 1.0 km. lik ilerleme sağlanabilmektedir. Presizyonlu nivelman tekniği, yavaş olması yanında, eğimli geçkilerde geri ve ileri gözleme ışınları farklı atmosfer tabakalarından geçtiği için refraksiyon hatasından önemli derecede etkilenmektedir. Bu hatayı önlemek için bir çok araştırmacı tarafından geliştirilen farklı modeller, soruna yeterli çözüm getirememiştir. Ayrıca, yöntemin yavaş olması, ölçme sırasında mira ve nivonun çökmesi gibi bir çok düzenli hataya neden olmaktadır.

Presizyonlu nivelman yöntemindeki bu hata kaynaklarının yeterince önemsiz kılınmaması, ayrıca bu yöntemin pahalı ve özellikle arızalı arazide uygulanamaz oluşu, talep edilen doğrulukları karşılayacak alternatif yöntemlerin araştırılması gereğini doğurmuştur. Günümüzdeki teknolojik gelişmelerin sonucu olarak, yüksek doğrulukta düşey açı gözlemesi ve uzunluk ölçmesi yapabilen donatımların geliştirilmesi ile trigonometrik nivelman, söz konusu alternatif çözüm arayışında yeniden güncelleşmiş ve son yıllarda bu konudaki araştırmalar yoğunluk kazanmıştır.

Presizyonlu nivelmana alternatif olabilecek trigonometrik nivelman yöntemleri, yer zaman ve düşey açı gözlemlerinin yapılış biçimine göre; ortadan (atlamalı) trigonometrik nivelman ve karşılıklı - eşzamanlı trigonometrik nivelman olarak ikiye ayrılabilir. Bu yöntemlerin en önemli özelliği, her türlü arazi koşullarında uygulanabilir olmaları ve presizyonlu nivelmana göre çok yüksek ölçme hızlarına erişebilmeleridir.

Bu çalışmada trigonometrik nivelman yöntemleri ve bu yöntemlerdeki hata kaynakları teorik olarak ayrıntılarıyla incelenmiş, ayrıca Selçuk Üniversitesi Alaadin Keykubat Kampüsü

Alanı'nda kurulan nivelman test ağında yapılan uygulamalar yardımıyla bu yöntemler doğruluk, maliyet ve uygulanabilirlik açısından presizyonlu nivelmanla karşılaştırılmıştır.

Bu araştırma sonucunda, presizyonlu nivelman yöntemiyle, $\pm 0.59 \text{ mm./}\sqrt{\text{km}}$ ' lik doğruluğa ve 0.8 km/gün 'lük ölçme hızına ulaşılmıştır. Ortadan trigonometrik nivelman ve karşılıklı - eşzamanlı trigonometrik nivelman yöntemleri ile ulaşılan doğruluklar ve ölçme hızları, $S=200 \text{ m.}$ gözleme uzaklıkları için sırasıyla $\pm 2.74 \text{ mm./}\sqrt{\text{km}}$, 5.6 km/gün ve $\pm 1.86 \text{ mm./}\sqrt{\text{km}}$, 4.00 km/gün dür. Trigonometrik nivelman yöntemlerinde kullanılan donatımların maliyetlerinin yüksek olmasına rağmen, ölçme hızları yüksek olduğu için 1 km. 'lik nivelmanın maliyeti, presizyonlu nivelman yöntemine göre çok daha ucuzdur.

Sonuçta, trigonometrik nivelman yöntemleri ile beklenen doğruluğuna ulaşamamıştır. Bunun başlıca nedeni presizyonlu nivelmanın gidiş-dönüş, trigonometrik nivelmanın ise sadece gidiş olarak yapılmasıdır. Yine de trigonometrik nivelman yöntemleriyle elde edilen doğruluklar da görmemezlikten gelinemez ve $\pm 2.0 \text{ mm./}\sqrt{\text{km}}$ den daha düşük doğruluk isteyen yükseklik belirlemelerinde, yüksek ölçme hızlı ve düşük maliyetli olmaları nedeniyle tercih edilebilir.

ANAHTAR KELİMELEER : Hassas yükseklik belirlemeleri, presizyonlu nivelman, ortadan (atlamalı) trigonometrik nivelman, karşılıklı - eşzamanlı trigonometrik nivelman, düşey açı gözlemleri, uzunluk ölçmeleri.

ABSTRACT

Doctora Thesis

COMPARISON OF PRECISE LEVELLING AND TRIGONOMETRIC HEIGHT DETERMINATION METHODS

Ayhan CEYLAN

Selçuk University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Geodesy and Photogrammetry

Supervisor : Prof. Dr. Orhan BAYKAL

1993, Page : 112

Jury : Prof. Prof. Dr. Orhan BAYKAL

Prof. Dr.Turgut UZEL

Prof. Dr.Olcay ÖZTAN

Nowdays, the height differences, for scientific purposes or in engineering works, are wanted to be determined with a great accuracy ($\pm 0.5 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$). The only technique gives this accuracy is the precise levelling technique which is a slow, hard to apply, expensive and much time consuming geodetic measuring method and impossible to apply anywhere. Using to precise levelling technic it is possible to measure 0.7 - 1.0 km. on 30 - 40 station points using 20 - 30 m. sight distances. It is effected greatly by the refraction error originated from slope lines going through different atmospheric layers. Different models which are suggested by many researcher, couldn't eliminate it sufficiently. The slowness of the method cause also to other systematic errors as sink of the rods and level, during measurig.

Innegleable of this error in the precise levelling technique, its expensiveness and impossibility of its usage in the slope area; caused to investigate of alternative solution which will get the desirable accuracy, the results of technological developments on equipments to make distance and vertical angle measurements more precisely, the trigonometric levelling technique is again the actual method and studied in the last year.

The method which can be alternative to the precise levelling technique is the trigonometric levelling. This technique can be devided in two, namely Leap - Frong Trigonometric Levelling and Simultaneous-Reciprocal Trigonometric Levelling, according to the position of station point, time, observation of the vertical angle.

The most important speciality of these methods are to be used everywhere and their enormous speed in comparison with the precise levelling.

In this study the trigonometric levelling methods and their errors were investigated theoretically and the results, obtained from test network, established in the area of Selçuk University Campüs, this methods' accuracies, costs and their feasibilities were compared with precise levelling.

As a result of this study that, the standart deviation of precise levelling is ± 0.59 mm./ $\sqrt{\text{km}}$, proceeding speed is 0.8 km/day. Using the leap - frong and simultaneously - reciprocal trigonometric levelling obtained for S= 200 m. sight distance, ± 2.74 mm./ $\sqrt{\text{km}}$, 5.6 km/day and ± 1.86 mm./ $\sqrt{\text{km}}$, 4.0 km/day. Although the cost of equipments which are used in the trigonometric levelling, are expensive because cheaper than the precise levelling.

It was that found the accuracy of the trigonometric levelling is less accurate than expectative. But if it said that the precise levelling was made both ways, with other words it was made twice, trigonometric levelling was made only forward, so the accuracy difference between both technique can not be neglected. If it is satisfied with less accuracy than ± 2.0 mm./ $\sqrt{\text{km}}$, high proceeding speed and low cost trigonometric levelling be preferred for determination of hight.

KEY WORDS : Precise height determination, precise levelling, leap - frong trigonometric levelling, Simultaneously - reciprocal trigonometric levelling, systematic errors , observation of the vertical angle, distance measurements.



TEŞEKKÜR

Bu araştırma konusunu veren ve çalışma sũresince yakın ilgi, değerli fikir ve her tũrlũ yardımı benden esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Orhan BAYKAL'a , fikirleri ile çalışmaya bũyũk katkıları olan Prof.Dr. Turgut UZEL'e ve Prof.Dr. Olcay ÖZTAN'a teőekkũrlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Çalışma sũresince yardımlarını gũrdũęũm S.Ő. Mũhendislik ve Mimarlık Fakũltesi Jeodezi ve Fotogrametri Mũhendislięi Bũlũmũndeki Őğretim elemanlarına, laboratuvar ve idari gũrevlilere, Őlũlerin bilgisayarda değerlendirilmesi sırasında bũyũk yardımlarını gũrdũęũm Yağmur ATAER 'e, ve tezin yazımı ve çiziminde yardımcı olan Arş.Gör.Taner ŐSTUNTAŐ ve Arş.Gör. I.Őztuę BILDİRİCİ 'ye sonsuz teőekkũr ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
1. GİRİŞ	1
1.1 Yükseklik Kavramı ve Temel Bağlılıklar	2
1.1.1. Nivo Yüzeyleri ve Geopotansiyel Numaralar.....	2
1.2 Yükseklik Sistemleri.....	5
1.2.1. Dinamik Yükseklik.....	5
1.2.2. Ortometrik Yükseklik.....	5
1.2.3. Normal Yükseklik.....	6
1.2.4. Elipsoidal Yükseklik.....	9
1.3.Yükseklik Belirleme Teknikleri	9
1.3.1.Yükseklik belirleme tekniklerinin gelişimi.....	9
2. GEOMETRİK NİVELMAN	11
2.1. Geometrik Nivelman Tekniğinin Esasları.....	11
2.2. Presizyonlu Nivelmanda Ölçme Modeli.....	12
2.3. Presizyonlu Nivelmanda Fonksiyonel Model.....	13
2.4. Presizyonlu Nivelmanda Önemli Hata Kaynakları	14
2.4.1. Nivo ve miralardan kaynaklanan (Aletsel) hatalar.....	14
2.4.1.1. Miralardan kaynaklanan hatalar.....	14
2.4.1.2. Nivelardan kaynaklanan hatalar	17
2.4.2. Dış ortamdan kaynaklanan hatalar	19
2.4.2.1. Nivo ve miralarda çökme hatası	19
2.4.2.2. Sıcaklığın nivoya etkisi	19
2.4.2.3. Sıcaklığın miraya etkisi	20
2.4.2.4. Geomağnetik alanın kompensatörlü nivoya etkisi.....	20
2.4.2.5. Gel-git etkisi	21
2.4.2.6. Düşey refraksiyonun etkisi.....	21
2.4.2.7. Gravite alanının etkisi	21

2.5. Düzenli ve Raslantısal Hataların Nivelman Sonuçlarına Etkisi.....	21
3. TRIGONOMETRİK NİVELMAN YÖNTEMLERİ.....	25
3.1. Karşılıklı ve Eşzamanlı Trigonometrik Nivelman.....	25
3.2. Ortadan (Atlamalı) Gözlemeli Trigonometrik Nivelman.....	25
3.3. Tarihsel Gelişimi.....	26
4. TRIGONOMETRİK NİVELMANDA YÜKSEKLİK FARKLARININ HESABI.....	30
4.1. Ortadan (Atlamalı) Trigonometrik Nivelman.....	30
4.2. Karşılıklı Trigonometrik Nivelman.....	34
5. TRIGONOMETRİK NİVELMADAKİ HATA KAYNAKLARI.....	38
5.1. Trigonometrik Nivelmandaki Aletsel Hata Kaynakları.....	38
5.1.1. Uzunluk ölçmelerindeki hatalar.....	38
5.1.1.1. Düzenli ölçek hataları.....	40
5.1.1.2. Uzunluktan bağımsız düzenli hatalar.....	42
5.1.1.3. Uzunluğa bağımlı periyodik olmayan düzenli hata.....	42
5.1.1.4. Uzunluğa bağımlı periyodik düzenli hata.....	43
5.1.2. Düşey açı gözleme hataları.....	43
5.1.3. Miralardan kaynaklanan hatalar.....	44
5.1.3.1. Miraların eğit tutulması hatası.....	44
5.1.3.2. Miralardaki sıcaklık genleşmesi hatası.....	48
5.2. Diğer Hata Kaynakları.....	50
5.2.1. Çekül sapmasının etkisi.....	50
5.2.2. Atmosferik refraksiyonun etkisi.....	52
6. TRIGONOMETRİK NİVELMANDA DOĞRULUK ANALİZİ.....	56
6.1. Ortadan (Atlamalı) Trigonometrik Nivelmanda Doğruluk Analizi.....	56
6.1.1. Uzunluk ölçmesindeki raslantısal hata.....	58
6.1.2. Düşey açı gözlemlerindeki raslantısal hatalar.....	58
6.1.3. Nivelman miralarındaki raslantısal eğiklik hatası.....	59
6.1.4. Miralardaki ısı farkının sebep olduğu raslantısal hata.....	59
6.1.5. Miranın kalibrasyonundaki raslantısal hata.....	59
6.1.6. Refraksiyon hatası.....	60
6.2. Karşılıklı Trigonometrik Nivelmanın Doğruluk Analizi.....	60

6.3. 1 Km'lik Trigonometrik Nivelmanın Standart Sapması	61
6.4. Düzenli Hataların Etkisi	61
6.4.1. Ortadan trigonometrik nivelmanda düzenli hataların etkisi	61
6.4.2. Karşılıklı trigonometrik nivelmanda düzenli hataların etkisi	63
7. UYGULAMA	64
7.1. Test Ağı ve Özellikleri	64
7.2. Ölçme Sisteminin Yapısı ve Dizaynı	64
7.2.1. Uygulama için gerekli donatımlar	64
7.2.2. Hedef levhalarının dizaynı ve kalibrasyonu	67
7.2.3. Elektronik takeometrelerin ve donatımlarının hazırlanması	69
7.3. Arazi Çalışmaları ve Hesaplamalar	69
7.3.1. Presizyonlu nivelman yöntemi	69
7.3.2. Ortadan (Atlamalı) trigonometrik nivelman yöntemi	72
7.3.3. Karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelman yöntemi	74
7.4. Uygulama Sonuçları ve Değerlendirilmesi	77
7.4.1. Presizyonlu nivelman sonuçları	77
7.4.2. Ortadan (Atlamalı) trigonometrik nivelman sonuçları	79
7.4.3. Karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelman sonuçları	80
7.5. Trigonometrik Nivelman Yöntemleri ile Presizyonlu Nivelman Yönteminin Karşılaştırılması	80
7.5.1. Ortadan (Atlamalı) trigonometrik nivelman yöntemi ile presizyonlu nivelman yönteminin karşılaştırılması	82
7.5.2. Karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelman yöntemi ile presizyonlu nivelman yönteminin karşılaştırılması	82
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	86
9. KAYNAKLAR	88
10. EKLER	91
EK - 1	91
EK - 2	96
EK - 3	105

1. GİRİŞ

Geodezi, konusu yer küresi olan en eski bilimlerden biridir. Geodezi, yunanca bir kelime olup Geo= yer, Dezi = bölme, ölçme kelimelerinden meydana gelir.

Prof.F.R. Helmert (1880) geodeziyi "Yeryüzünün ölçülmesi ve projeksiyonu bilimi" olarak tanımlamıştır. Bu tanım dış çekim alanını içermediği için yetersiz görülerek 1970'li yıllardan sonra "dış çekim alanını belirlemek" eki de yapılmıştır. Bu tanımıyla Geodezi, yerbilimleri ve mühendislik bilimleri içindeki yerini almıştır (Torge 1980).

Geodezi, "dünyanın tümünün veya bir kısmının ölçülmesi ve bu ölçülerin matematiksel ve fiziksel esaslara göre değerlendirilerek dünyanın şeklinin, boyutlarının, dış çekim alanının belirlenmesi ve yüzey noktalarının projeksiyonu ile uğraşan bir bilim dalı" olarak tanımlanabilir (Yerci 1992).

Geodezi, çalışma alanlarına göre "Global geodezi", "Geodezik Ölçmeler" ve "Düzlem ölçmeler" olarak sınıflandırılabilir (Torge1980). Global geodezi, tüm dış çekim alanları dahil dünyanın şeklini belirlemeyi amaç edinir. Bu nedenle Global geodeziye "Dünya Ölçmesi" de denilebilir. Geodezik ölçmelerle yeterli sayıda kontrol noktalarının koordinatları yardımıyla ülke yüzeyi tanımlanır. Bu nedenle geodezik ölçmeler "Ülke Ölçmeleri" olarak da adlandırılır. Düzlem ölçmelerinde ise topoğrafik ölçmeler, kadastral ölçmeler ve mühendislik ölçmeleri yardımıyla yeryüzünün detayları belirlenir. Düzlem ölçmelerde referans yüzeyi olarak genellikle yatay bir düzlem seçilir.

Dünya ölçmesi, ülke ölçmesi ve düzlem ölçmeleri arasında sıkı bir ilişki vardır. Ülke ölçmeleri, dünya ölçmeleriyle elde edilen parametrelere bağlıdır. Düzlem ölçmeler ise ülke ölçmelerinde üretilen sabit noktalara dayanır.

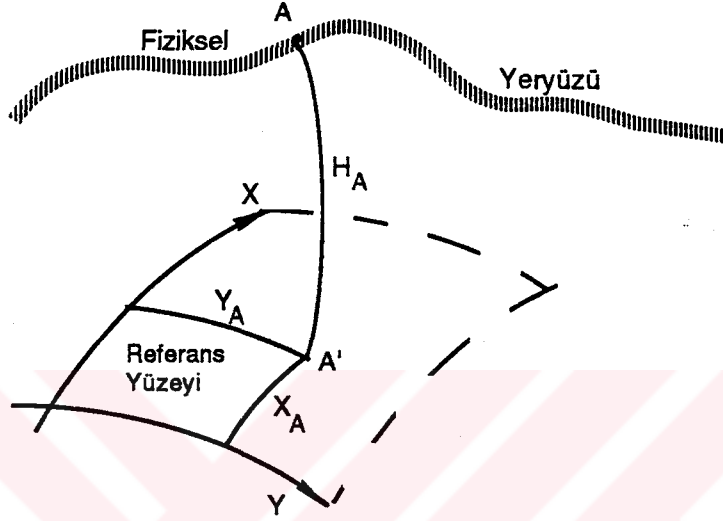
Dünyanın şekli denilince iki şey akla gelir: Fiziksel yeryüzü ve matematiksel yeryüzü. Fiziksel yeryüzü dünyanın katı ve sıvı yüzünü atmosferden ayıran yüzeydir. Bu yüzeyin karada kalan kısmı hiçbir kurala uymaz ve matematiksel olarak ifadesi olanaksızdır. Ancak nokta, nokta konum ve yükseklik değerleri yardımıyla fiziksel yeryüzeyinin kara kısmı belirlenir. Fiziksel yeryüzeyinin denizde kalan kısmı ise yaklaşık bir nivo yüzeyidir. Gel-git, fırtına, sıcaklık farkları v.b. etkilerden arınmış olarak düşünülen ideal okyanus yüzeyinin karaların altında da devam ettiği düşünülürse kapalı ve sürekli bir nivo yüzeyi elde edilir. Listing bu yüzeye "Geoid" adını vermiştir.

Geodezinin amacına ulaşabilmesi için, fiziksel yeryüzü üstünde oluşturulmuş sabit noktalardan ve bu noktalar arasında yapılan ölçmelerden yararlanır. Burada amaç, söz konusu sabit noktaların uzaydaki yerlerini, bir uzay koordinat sisteminde tek anlamlı olarak belirlemektir. Bunun için öncelikle, üç boyutlu bir koordinat sistemi kesin olarak tanımlanmalıdır.

Denge durumundaki durgun su yüzeyleri, her noktasında çekül doğrultusuna dik olduklarından gerçek yatay yüzeylerdir. Uzaydaki her noktadan böyle bir yüzey geçirilebileceği düşünülürse sonsuz sayıda gerçek yatay yüzey elde edilir. Bunların her birine "Nivo Yüzeyi" adı verilir. Bir ülkede veya tüm yeryüzünde koordinat birliğinin sağlanabilmesi için, nivo yüzeylerinden biri "Referans Yüzeyi" olarak seçilmeli ve nokta

koordinatları bu yüzeye göre belirlenmelidir. Yükseklikler için referans yüzeyi olarak geoid alınabilir. Ancak,geoid, üstünde hesap yapılabilecek düzgün bir yüzey olmadığından konum koordinatları için referans yüzeyi olarak dön elipsoid yüzeyi kullanılmaktadır.

Referans yüzeyi belirlendikten sonra, fiziksel yeryüzü noktaları bu yüzey üzerine izdüşürülür. Gerekli hesaplar referans yüzeyi üstünde yapılarak noktaların "Konum Koordinatları" elde edilir (Şekil 1.1'de $X_A ; Y_A$)(Baykal 1980).



Şekil 1.1. Noktaların koordinatları (X_A, Y_A, H_A)

Konum koordinatları, noktaların uzaydaki yerlerinin kesin olarak belirlenmesi için yeterli değildir. Çünkü aynı konum koordinatlarına sahip sonsuz sayıda uzay noktası vardır. Herhangi bir fiziksel yeryüzü noktasının uzaydaki yerinin kesin olarak saptanabilmesi için konum koordinatları yanında, üçüncü koordinat olan "nokta yüksekliği" nin de bilinmesi gereklidir (Şekil 1.1'de H_A).

Bu çalışmanın amacına uygun olarak yükseklik konusu daha ayrıntılı olarak incelenecektir.

1.1 Yükseklik Kavramı ve Temel Bağlıntılar

1.1.1. Nivo Yüzeyleri ve Geopotansiyel Numaralar

Geodezik ölçmelerde nivo ve teodolit çekül doğrultusuna göre düzeçlenir. Çekül doğrultuları gravite alanının en büyük eğim doğrultusudur. Gravite alanının kuvvet çizgilerine çekül doğrultusu denir. Her noktasında çekül doğrultusuna dik olan yüzeylere nivo yüzeyi denir. Fiziksel yeryüzü üzerinde yapılan ölçmeleri, tartışmasız bir şekilde

ancak çekül doğrultuları ve nivo yüzeylerinden meydana gelen bir sistem içinde değerlendirmek mümkündür.

Her nivo yüzeyinde ağırlık potansiyeli W =sabittir (Heiskanen and Moritz 1984). Bu nedenle nivo yüzeylerine eşpotansiyelli yüzeyler de denir.

Dünyanın kendi eksenini etrafında dönmesi sonucu oluşan merkezkaç kuvveti ve kütle çekim kuvveti ağırlık kuvvetinin bileşenleridir. Kütle yapısının homojen olmaması nedeniyle nivo yüzeyleri birbirlerine paralel değildir ve çekül doğrultuları bir uzay eğrisidir (Niemeier 1985) (Şekil 1.2).

Bir noktanın yüksekliği, genel olarak bir referans yüzeyinden olan geometrik veya fiziksel uzaklığıdır. Nivo yüzeyleri arasındaki uzaklık ve potansiyel farkı:

$$\frac{dW}{dh} = -g \quad (1.1)$$

bağıntı ile ifade edilebilir.

Geoid üzerindeki bir O başlangıç noktası ile bir A noktası arasında nivelman yapıldığında, önce birbirini izleyen noktalardan geçen nivo yüzeyleri arasındaki h_i yükseklik farkları bulunur (Şekil 1.3). Nivo yüzeylerinin paralel olmaması olgusu yakın noktalar arasında algılanamayacağından dh_i değeri kesin olarak bulunabilir. Ancak nivo yüzeylerinin paralel olmaması büyük uzunluklarda ihmal edilemeyecek yükseklik farklarının ortaya çıkmasına neden olur ve dh_i değeri A noktasının geoidden olan $AA_0 = H_A$ yüksekliğini vermez (Baykal 1980)

$$\sum_{j=1}^n dh_j \neq H_A$$

Buradan şu sonuç çıkartılabilir: Büyük uzunluklarda nivelman işlemi ile bulunan yükseklikler nivelman yoluna bağlı olup tek anlamlı değildir. Bu nedenle yükseklik ölçmelerinde geometrinin yanında fiziksel kavramların da dikkate alınması gerekir (Baykal 1980).

Yeryüzeyindeki bir P noktasından geçen nivo yüzeyinin W_p potansiyeli ile geoidin W_0 potansiyeli arasındaki fark için;

$$C = W_0 - W_p = \int_{P_0}^P dW = \int_{P_0}^P g \cdot dh \quad (1.2)$$

yazılabilir (Niemeier 1985).

Potansiyel farkı olan C, geopotansiyel sayı veya geopotansiyel birim (gpu) olarak tanımlanmıştır. Geopotansiyel sayı, ilgili noktayı deniz yüzeyine bağlayan

nivelman yolundan bağımsızdır. Bir nivo yüzeyinin tüm noktaları için bu hüküm geçerlidir (Heiskanen and Moritz 1984).

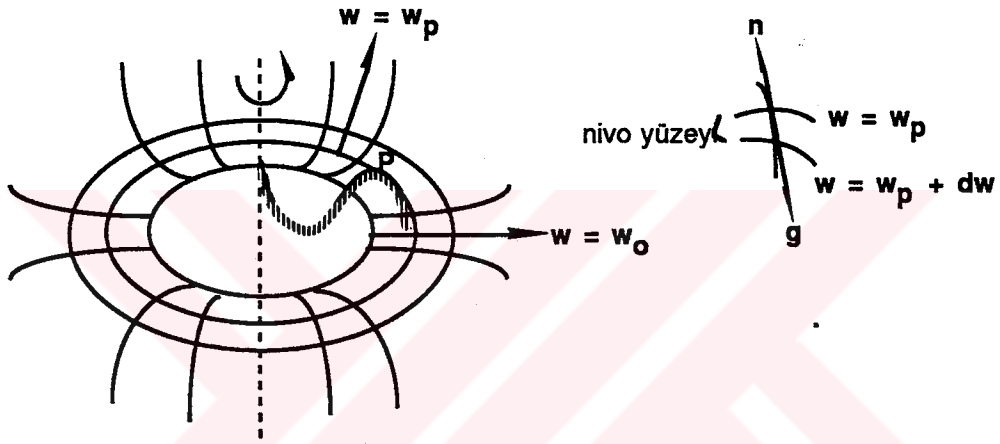
C 'nin birimi (g.p.u.) geopotansiyel birim:

1 g.p.u.= 1 kgal metre= 1000 gal metre

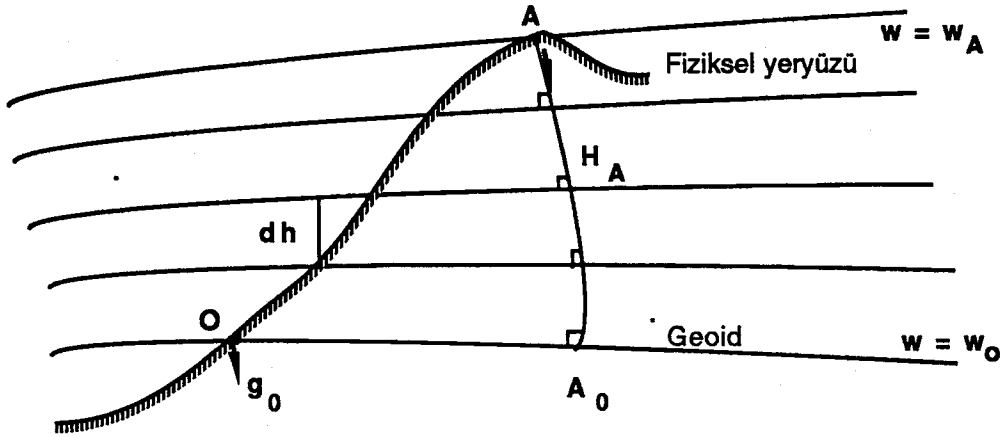
şeklinde tanımlanır. Ortalama ağırlık gravitesi $g \cong 0.98$ kgal olarak kabul edildiğinden,

$C \cong g \cdot H = 0.98 H$

yazılır. $H = 1000$ m için $C = 980$ olur. Buradan da geopotansiyel sayının metrik kusur taşıdığı ve nivelman ölçmeleri ile doğrudan doğruya karşılaştırılamayacağı sonucuna varılır.



Şekil 1.2. Yeryüzü, nivo yüzeyi ve çekül doğrultusu



Şekil 1.3. Geoid, nivo yüzeyleri, yükseklik farkları (dh) ve gravite (g)

1.2 Yükseklik Sistemleri

1.2.1. Dinamik Yükseklik

Yeryüzündeki bir P noktasının geopotansiyel sayısı gravitenin bir ortalama değerine, genellikle 45 ° enlem ve deniz yüksekliğindeki normal graviteye (γ_o^{45}) bölünürse dinamik yükseklik H^D elde edilir

$$H^D = \frac{C}{\gamma_o^{45}} = \frac{1}{\gamma_o^{45}} \int_{P_o}^P g \cdot dh \quad (1.3)$$

Buna göre iki nokta arasındaki dinamik yükseklik farkı;

$$H_B^D - H_A^D = \frac{1}{\gamma_o^{45}} \int_A^B g \cdot dh \quad (1.4)$$

dir. Bu ifade

$$H_B^D - H_A^D = \int_A^B dh + \frac{1}{\gamma_o^{45}} \int_A^B (g - \gamma_o^{45}) \cdot dh \quad (1.5)$$

şeklinde yazılabilir (Baykal 1980). Buradaki birinci terim doğrudan doğruya nivelmanla bulunan yükseklik farkı, ikinci terim ise "Dinamik Düzeltme" dir.

1.2.2. Ortometrik Yükseklik

Yeryüzündeki bir A noktasının ortometrik yüksekliği, bu noktadan geçen çekül eğrisi boyunca geoid'den olan geometrik uzaklığıdır (Şekil 1.3) (Niemeier 1985).

A noktası ile geoid arasındaki çekül eğrisi boyunca ortalama gravite değeri \bar{g}_A bilinirse, ortometrik yükseklik

$$H_A = \frac{C}{\bar{g}_A} \quad (1.6)$$

şeklinde ifade edilebilir (Heiskanen and Moritz 1984). Burada en önemli problem \bar{g}_A 'nin belirlenmesidir. Çekül doğrultusu üzerindeki bir Q noktasının gravite değeri için

$$g_Q = g_p - \int_Q^P \frac{\partial g}{\partial h} \cdot dh \quad (1.7)$$

yazılır (Niemeier 1985).

Ortalama yoğunluk $g=2.67 \text{ g / cm}^3$ ve normal gravite alanında gravitenin düşey değişimi ;

$$\frac{\partial g}{\partial h} \cong \frac{\partial \gamma}{\partial h} + 4 \cdot \pi \cdot G \cdot g = - 0.0844 \text{ mgal / m} \quad (1.8)$$

dir (Niemeier 1985).

Ortometik yükseklikler, Helmert yükseklikleri olarak bilinen aşağıdaki (1.9) bağıntısı ile hesaplanabilir (Heiskanen and Moritz 1984)

$$H = \frac{C}{g + 0.0424 \cdot H} \quad (1.9)$$

g 'nin belirlenmesi için önerilen başka modeller de vardır (Niemeier, 1985, Heiskanen and Moritz 1984).

1.2.3. Normal Yükseklik

Normal yükseklik, potansiyeli $U = U_0$ olan nivo elipsoidine göre normal gravite alanında

$$H^N = \frac{C}{\bar{\gamma}} \quad , \quad \bar{\gamma} = \frac{1}{H^N} \int_0^{H^N} \gamma \cdot dH^N \quad (1.10)$$

bağıntısı ile tanımlanır (Niemeier 1985). Burada $\bar{\gamma}$, normal gravite değeridir. (1.10) bağıntısına göre normal yükseklik, normal gravite alanında tanımlanmıştır. Bu durumda model yeryüzü artık geoid değil, bir nivo elipsoididir. Bu nivo elipsoidi şu özellikleri taşımaktadır:

- (i) Geoid ile aynı kütle, fakat düzgün kütle dağılımına sahiptir.
- (ii) Elipsoidin simetri merkezi ve dönme eksenini, yerin kütle merkezi ve dönme eksenini ile çakışıktr.
- (iii) Elipsoidin ve yerin ω açısal dönme hızları birbirine eşittir.

(iv) Elipsoidin normal ağırlık potansiyeli (U_o), geoidin gerçek ağırlık potansiyeline (W_o) eşittir.

Gerçek gravite alanındaki her nivo yüzeyine (jeop), normal gravite alanına ait bir nivo yüzeyi (sferop) karşılık geldiğine göre, A fiziksel yeryüzü noktasından geçen $W = W_A$ jeopunun normal gravite alanındaki karşılığı $U = U_A$ sferopudur ve her iki nivo yüzeyinin potansiyelleri birbirine eşittir

$$U = U_{A'} = W_A \quad (1.11)$$

$U = U_{A'}$ sferopu, A 'dan geçen AA_1 normal çekül eğrisini A' noktasında keser (Şekil 1.4). A' noktası, A fiziksel yeryüzü noktasının normal gravite alanındaki karşılığı olan (1.11) eşitliğini sağlamaktadır. Her noktasında (1.11) eşitliğini sağlayan yüzeye Tellüroid denir. Tellüroid, fiziksel yeryüzeyinin normal gravite alanındaki karşılığı olan ve fiziksel yeryüzeyine benzeyen kuramsal bir yüzeydir.

Nivo elipsoidi üzerinde

$$W_o = U_o = C = \text{Sabit} \quad (1.12)$$

dir.

(1.11) ve (1.12) bağıntılarından

$$W_o \equiv W_A \equiv U_o \equiv U_{A'} \quad (1.13)$$

yazılıp (1.10) 'da yerine konursa

$$H_A^N = \frac{W_o - W_A}{\bar{\gamma}_A} = \frac{U_o - U_A}{\bar{\gamma}_A} \quad (1.14)$$

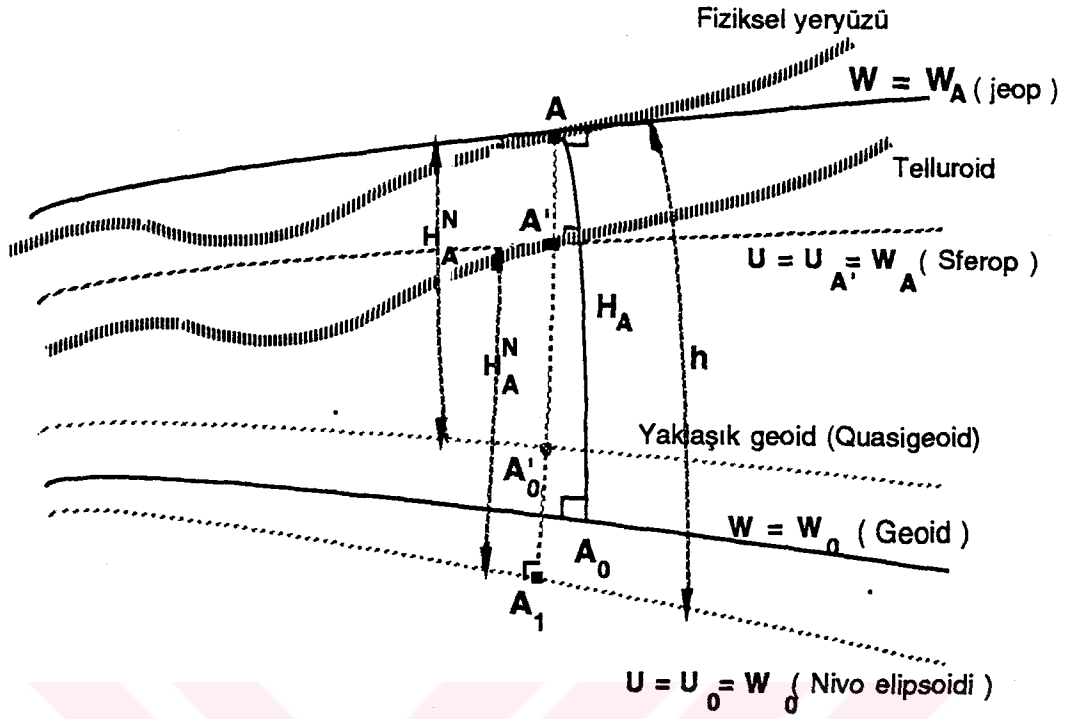
elde edilir. Böylece, (1.10) normal yükseklik tanımı, tümüyle normal gravite alanına dönüştürülmüş olur.

(1.14) ile (1.6) arasındaki benzerlikle birlikte Şekil 1.3'den, kolaylıkla

$$H_A^N = A'A_1 \quad (1.15)$$

sonucuna varılır. "A fiziksel yeryüzü noktasının normal yüksekliği, A' tellüroid noktasının, A dan geçen normal çekül eğrisi boyunca $U = U_o = W_o$ nivo elipsoidinden uzaklığına eşittir " (Şekil 1.4).

(1.14) bağıntısında $\bar{\gamma}_A$, $\widehat{A'A_1}$ normal çekül eğrisi uzunluğu boyunca ortalama normal gravite kuvvetidir. $\bar{\gamma}_A$ kesin olarak A'A₁' in orta noktasında oluşur ve



Şekil 1.4 Normal yükseklik (Baykal 1980)

$$\bar{\gamma}_A = \gamma_0^g \cdot (1 + \beta \cdot \sin^2 \varphi_A + \beta_1 \cdot \sin^2 2\varphi_A) - \frac{\partial \gamma}{\partial h} \frac{H_A^N}{2} \quad (1.16)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir (Baykal 1980).

Şekil 1.4 'den açıkça görüldüğü gibi, yükseklikler için referans yüzeyi olarak $U = U_0 = W_0$ nivo elipsoidi alınır, (1.16) ve (1.14) bağıntılarıyla hesaplanan normal yükseklik, A fiziksel yeryüzü noktası yerine A' telluroid noktasını verir (1.14) bağıntısı ile tanımlanan normal yüksekliğin, A fiziksel yeryüzü noktasını belirleyebilmesi için referans yüzeyinin değiştirilmesi gerekmektedir. H_A^N değeri, normal çekül eğrisi boyunca A noktasından aşağıya taşınırsa A'_0 noktası elde edilir (Şekil 1.4). A noktası fiziksel yeryüzü üstünde yer değiştirdikçe A'_0 noktası bir yüzey belirler. Bu yüzey normal yükseklik için referans yüzeyidir ve "Yaklaşık geoid (Quasigeoid)" adını alır.

Ortometrik yükseklik hesabı için gerekli olan g değerleri, ancak hipotezler yardımı ile elde edilebilmekte, bu yüzden ortometrik yüksekliklerde belirsizlikler ortaya çıkmaktadır. Buna karşın γ değerleri kesin olarak hesaplanabildiğinden, normal yüksekliklerde, bu sakınca tamamıyla ortadan kalkar. Bu nedenle günümüzde ülke nivelman ağlarının oluşturulmasında normal yükseklik en uygun yükseklik türü olarak görülmektedir (Baykal 1980).

1.2.4. Elipsoidal Yükseklik

Elipsoidal yükseklik, yeryüzeyi noktası A ile nivo elipsoidi arasındaki metrik uzaklıktır (Şekil 1.4). Elipsoidal yükseklik, temel geometrik yükseklik sistemi olarak tanımlanmıştır. Teorik elipsoidal yükseklik normal gravite alanında,

$$h = \frac{U_o - U_p}{\gamma}, \quad \gamma = \frac{1}{h} \int_0^A \gamma \cdot dh \quad (1.17)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir (Niemeier 1985).

1.3.Yükseklik Belirleme Teknikleri

1.3.1.Yükseklik belirleme tekniklerinin gelişimi

Yakın zamana kadar yükseklik belirlemeleri için sadece geometrik nivelman tekniği kabul edilmekteydi. Ancak özellikle son yirmi yıl içinde yeni teknikler geliştirilmiştir. Yükseklik belirleme tekniklerinin tarihsel gelişimi Çizelge 1.1'de verilmiştir.

Başlangıçta yükseklik belirlemesi için sadece trigonometrik yükseklik belirleme tekniği uygulanmaktaydı. Ancak 1850'li yıllardan sonra refraksiyon hatası bakımından trigonometrik yükseklik belirlemesinden daha avantajlı olan geometrik nivelman tekniği uygulanmaya başlanmıştır.

19. yüzyılın başlarında geometrik nivelmanda sadece silindirik düzeçli nivolar kullanılırken 1950'lerde kompansatörlü nivoların geliştirilmesiyle, yaygın olarak kompansatörlü nivolar kullanılmaya başlanmıştır. Daha sonraki yıllarda lazer nivoları, elektro-optik nivolar geliştirilmiş fakat yaygın olarak kullanılmamıştır.

1962'de Prof.PESCHEL tarafından motorize geometrik nivelman tekniği geliştirilmiştir. Bu teknik ile geometrik nivelmanın hızı artırılmış ve $\pm 0.2 \sim \pm 0.4 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$ 'lik bir doğruluğa ulaşılmıştır. Motorize geometrik nivelman tekniği günümüzde de pek çok ülkede yaygın olarak kullanılmaktadır (PESCHEL 1962).

1970 'li yıllarda BAHNERT, gözleme uzaklıklarını bir kaç yüz metre ile sınırlandırarak, düşey açıları karşılıklı ve eşzamanlı ölçerek ve elektronik uzunluk ölçerler kullanarak trigonometrik nivelman tekniğini yeniden gündeme getirmiştir (BAHNERT 1970).

Bu zaman süreci içinde Hidrostatik nivelman 1936 yılından sonra Hollanda'da başarıyla uygulanmıştır. Hidrodinamik nivelman, hidrostatik prensiplerin gelişmesiyle ortaya çıkmıştır.Son yıllarda ise Global Positioning System (GPS) sistemleri kullanılarak da yükseklikler belirlenebilmektedir (Niemeier 1985).

Günümüzde; bu tekniklerden en çok kullanılanı geometrik nivelman ve trigonometrik nivelman tekniğidir. Bu çalışmanın amacı da, bu iki tekniği karşılaştırmaktır. Bundan sonraki bölümlerde sadece bu iki teknikten beklenen doğruluk ve önemli hata kaynakları incelenecektir.

Çizelge 1.1 Yükseklik belirleme tekniklerinin tarihsel gelişimi

1850		1900		1950		1960		1970		1980		1990	
Trig. Bel.	Yük.	sadece dağlık alanlarda						Trig. Niv.					
Geometrik Niv.		⇒		Kompansatörlü		⇒		Motorize		GPS			
Hidrostatik Niv.													
Hidrodinamik Niv.													

2. GEOMETRİK NİVELMAN

2.1. Geometrik Nivelman Tekniğinin Esasları

Bu çalışmanın amacına uygun olarak sabit noktalar arasındaki yükseklik farkının belirlenmesinde daha yüksek doğruluk sağlayan prezisyonlu nivelman tekniği ele alınacaktır.

Prezisyonlu nivelman tekniğini alışılmış geometrik nivelmandan ayıran en belirgin özellikler şunlardır:

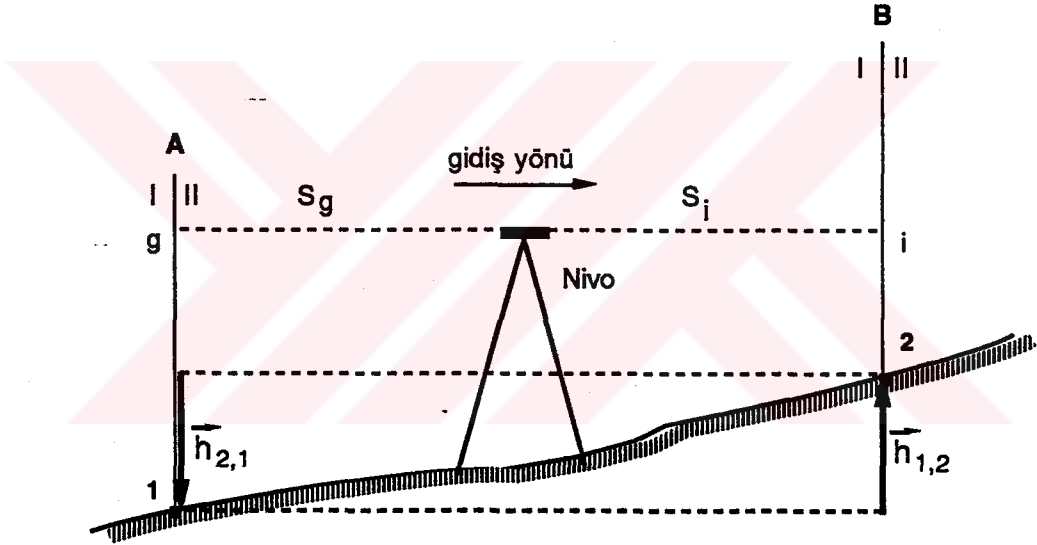
- Dürbün kalitesinin yüksek olması (Dürbün büyütmesi 40-50 x , objektif çapı 50 mm),
- Duyarlılığı yüksek bir yatay gözlemeyi sağlayan donatım (Silindirik düzeç veya kompensatör),
- Nivelarda, mira okuma inceliğini arttırmaya yönelik paralel yüzlü cam plak ve mikrometre donatımı,
- Nivo sehпасındaki iç çökmeleri önlemek için sabit bacaklı ağır nivo sehпасı kullanılması.
- Sıcaklık değişmelerinin ve nem alışverişinin neden olduğu mira boyu değişmelerini önemsiz kılmak için ağaç mira yerine invar miralar kullanılması (termik genişleme katsayısı $\alpha = 1.5 \cdot 10^{-6} \text{ C}^\circ \text{ m}^{-1}$)
- Ölçme sırasında miralardaki çökmeleri azaltmak için mira altlıkları kullanılmasıdır.

Günümüzde gerek bilimsel amaçlarla gerekse mühendislik hizmetlerine yönelik olarak yerkabuğu düşey hareketlerinin izlenmesinde ($\pm 0.1 \sim \pm 0.5 \text{ mm/yıl}$), atom santrallarının yerlerinin seçiminde ve düşey aplikasyonunda ($\pm 0.1 \sim \pm 0.2 \text{ mm}$), büyük köprü, baraj ve modern yüksek yapıların bakım ve kontrol ölçmelerinde noktaların birbirlerine göre rölatif yüksekliklerin belirlenmesinde ($\pm 0.2 \sim \pm 0.5 \text{ mm}$), I. ve II. derece ülke nivelman ağlarının ölçülmesinde, geoidi belirlemeye yönelik olarak noktalar arasındaki potansiyel farklarının bulunmasında, otoyol, demiryolu, boru hattı gibi mühendislik hizmetlerinde hata birikiminin önlenmesi ve yeterli sıklıkta güvenilir yüksekliğe sahip nivelman noktalarının oluşturulmasında, yeraltı maden işletmelerinin bulunduğu bölgelerde işletmenin yeryüzeyine etkilerinin belirlenmesinde, yükseklik farklarının çok yüksek bir doğrulukta belirlenmesi istenmektedir. Sözü edilen bu yüksek doğrulukları karşılayacak tek yöntem prezisyonlu nivelman tekniğidir (Baykal 1989.a).

2.2. Presizyonlu Nivelmanda Ölçme Modeli

İnsanoğlu yaptığı her işte, giriştiği her eylemde olduğu gibi presizyonlu nivelmanda da kafasında kurduğu belli bir modeli uygular.

Presizyonlu nivelman için kabul edilen "Ana Model" varsayımlara (hipotez) dayanır. Bu varsayımların gerçekten sapmaları "Hataları" oluşturur. Ölçme sırasında ana model uygulandıkça hataların bir kısmının farkına varılır ve herbir hata için "Yan Modeller" oluşturulur. Bu yan modellerle, ana modelle elde edilen sonuçlardaki hata etkileri azaltılır. Hataların yan modellerle belirlenen kısmına "Deterministik Hata Bileşeni" veya klasik hata bilgisinde "Düzenli Hata" denir. Düzenli hata bileşeni de bir modele dayandığından gerçek hatayı göstermez, geriye etkisi tam olarak bilinmeyen ancak hissedilebilen bir hata parçası kalır. Bu hata parçasına "Stokastik Hata Bileşeni" veya "Raslantısal Hata" denir (Baykal, 1989.a). Presizyonlu nivelmanın ana modeli Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Presizyonlu nivelmanda ölçme modeli (ana modeli) ve istasyon noktası (Baykal 1989.a)

Ana modeli oluşturan varsayımlar şunlardır:

- Aralarındaki yükseklik farkı belirlenecek noktalardan geçen nivo yüzeyleri ile nivonun gözleme düzlemi birbirine paralel düzlemlerdir.
- Bu noktalardan geçen düşey doğrular ile yatay düzlemler birbirine diktir.
- Nivelman ölçmeleri sırasında miralar daima düşey konumdadır.
- Nivelman ölçmeleri sırasında nivo ve miralar düşey yönde hiç hareket etmemektedir.

- Mira bölüm çizgilerinde, kesin olarak tanımlanmış uzunluk birimlerinden hiç bir sapma yoktur ve herhangi bir etki nedeniyle de böyle bir sapma ortaya çıkmamaktadır.

- Herhangi iki nokta arasındaki yükseklik farkı bir vektördür. Bu vektörün doğrultusu düşey doğrultu ile çakışır. Yönü ise gidiş yönüne göre seçilir.

$$\Delta \bar{h}_{12} \geq 0 \quad \text{ise} \quad \Delta \bar{h}_{21} \leq 0$$

veya

$$\Delta \bar{h}_{12} \leq 0 \quad \text{ise} \quad \Delta \bar{h}_{21} \geq 0$$

olur.

- İki nokta arasındaki yükseklik farkı, sözkonusu iki noktadan geçen nivo yüzeyleri arasındaki düşey uzaklığa eşittir.

- A ve B gibi birbirinden uzak iki sabit nokta arasındaki yükseklik farkını belirlemek için,

$$\Delta H_{AB} = \Delta h_{A1} + \Delta h_{12} + \Delta h_{23} + \dots + \Delta h_{nB} = \sum \Delta h \quad (2.1)$$

yazılabilir.

2.3. Presizyonlu Nivelmanda Fonksiyonel Model

Presizyonlu nivelman tekniğinin fonksiyonel modeli, bir istasyon noktasında yapılan geri okuma (g), ileri okuma (i); nivelman kenarında gidiş ölçmesi (G), dönüş ölçmesi (D) indisleri ile gösterilirse Şekil 2.1'e göre:

$$\Delta h_{12} = (g - i)_G \quad (2.2)$$

(2.1) ve (2.2) bağıntılarından gidiş ölçmesi için;

$$\Delta H_{AB} = \Delta H_G = \sum \Delta h_G = \sum g_G - \sum i_G \quad (2.3)$$

Dönüş ölçmesi için;

$$\Delta H_{BA} = \Delta H_D = \sum \Delta h_D = \sum g_D - \sum i_D \quad (2.4)$$

olur ve aralarında

$$\Delta H_G = - \Delta H_D$$

bağıntısı geçerlidir.

Nivelman yapılan noktaların yüksekliklerinin bulunabilmesi için enaz bir noktanın yüksekliğinin bilinmesi gereklidir. Yükseklikleri bilinmeyen diğer noktaların yüksekliği,

$$H_B = H_A + \Delta H_{AB} = H_A + \Delta H_G \quad (2.5)$$

bağıntısıyla hesaplanabilir.

2.4. Presizyonlu Nivelmanda Önemli Hata Kaynakları

Presizyonlu nivelman ölçülerini etkileyen model hataları, hem yükseklik farklarını, dolayısıyla nokta yüksekliklerini hem de doğruluk kriterlerini etkilemektedir. Bu nedenle hataların niteliği ve niceliğinin yeterli doğrulukta bilinmesi gerekir. Aksi takdirde güvenilir sonuçlar elde etmek imkansızdır. Şüpheli sonuçlara dayanılarak kesin yargılara varılırsa, bu yargılar bilimsel olmaktan çıkar. Bu nedenle, modellerden kaynaklanan hataların ayrıntılarıyla incelenmesi gerekir. Presizyonlu nivelman sonuçlarını etkileyen model hataları iki ana başlık altında toplanabilir. Bunlar:

- Nivo ve miralardan kaynaklanan (Aletsel) hatalar
- Dış ortamdan kaynaklanan hatalar

2.4.1. Nivo ve miralardan kaynaklanan (Aletsel) hatalar

2.4.1.1. Miralardan kaynaklanan hatalar

Presizyonlu nivelman ölçmelerinin ölçeklendirme elemanı miralar olduğu için, miralardan kaynaklanan hataların nivelman sonucuna etkisi önemlidir. Bu hatalardan bazıları şunlardır;

- Miraların eğik tutulması hatası
- Mira çifti sıfır konum hatası
- Mira tabanının düzlem olmaması hatası
- Mira bölümlendirme hatası

Miraların eğik tutulması hatası

Presizyonlu nivelman ölçmeleri için kabul edilen ana modelde de belirtildiği gibi, nivelman ölçmeleri sırasında miraların daima düşey doğrultuda olması gerekir. Ancak, gerek mira üzerindeki küresel düzecen eksen şartının düzensizliği, gerekse ölçme sırasında rüzgarın şiddeti ve miracının yorgunluğu ve dikkatsizliği nedeniyle mira düşey doğrultudan sapabilir.

Miranın gözleme doğrultusunda ϵ kadar eğik olması her mira okumasında işareti daima pozitif olan bir hatanın oluşmasına neden olur. Bu hata;

$$dh = \frac{1}{2} \epsilon^2 M \quad (2.6)$$

bağıntısıyla ifade edilebilir. Burada, M: mira okuması, ϵ : miranın gözleme doğrultusunda düşeyden sapma açısıdır. Bu hatayı mümkün olduğunca en aza indirebilmek için mira düzeçlerinin sık sık kontrol edilmesi gerekir (Ceylan 1988).

Mira çifti sıfır konum hatası

Presizyonlu nivelman ölçmelerinde kullanılan bir çift invar miralara ait ana ve yardımcı bölümlendirmelerin sıfır çizgilerinin, gerek invar şeritin mira kasasına yerleştirilmesi sırasında, gerekse mira tabanlarının farklı aşınması nedeniyle mira tabanlarından değişik uzaklıkta olmalarından kaynaklanır. Burada önemli olan miraların sıfır çizgilerinin mira tabanından olan mutlak uzaklıkları değil, herhangi bir bölümlendirmeye göre diğer bölümlendirmelerin sıfır çizgilerinin bağıl konumlarıdır.

Mira çifti sıfır konum hatasının sabit olması durumunda nivelman kenarı ölçmelerinde istasyon noktası sayısı çift alınarak bu hatanın etkisi ortadan kaldırılabilir (Tombaklar 1990).

Mira tabanının düzlem olmaması hatası

Prezisyonlu nivelmanda kullanılan miraların tabanı düzlem olmalı ve bu düzlem invar şerit yüzeyine dik olmalıdır. Aksi takdirde nivelman ölçmeleri sırasında, mira tabanının mira altlıkları üzerine rastgele konulması durumunda değişken sıfır konum hatası ortaya çıkar. Bu nedenle mira altlığı üstüne mira tabanının hep aynı noktası tutulmalıdır.

Mira bölümlendirme hatası

Mira bölümlendirme hatası, mira bölüm çizgilerinin standart uzunluk birimlerinden olan sapmalardır.

Prezisyonlu nivelman ölçmelerinde kullanılan invar miraların bölümlendirilmesinde genellikle "Püskürtme Boyama Tekniği", "Kazıma Tekniği" ve "Lazer - Interferans Komparatörü" kullanılmaktadır.

Püskürtme boyama tekniğinde kullanılan şablonların uç uca çakıştırılması ve herbir bölümlendirme sonucunda şablon üzerindeki boyaların temizlenmesi sırasında şablonun yıpranması nedeniyle, kazıma tekniğinde ise bölümlendirmede kullanılan frezenin adım genişliğinin 1 m olması ve kazıyıcı uçtaki düzensizlikler nedeniyle mira bölümlendirme hataları ortaya çıkmaktadır.

Mira üzerindeki herbir bölüm çizgisi için

$$t_i = \bar{t}_i + e_i$$

yazılabilir. Burada;

t_i = bölüm çizgisinin kesin değeri

\bar{t}_i = bölüm çizgisinin okunan değeri

e_i = bölümlendirme hatası (düzeltme)

dir.

Mira bölümlendirme hatası e_i için

$$e_i = a_0 + a_1 \cdot t_i + \text{diğer hata terimleri} + r_i \quad (2.7)$$

yazılabilir (Pelzer 1983). Burada;

a_0 = sıfır hatası

a_1 = ölçek hatası

r_i = raslantısal bölümlendirme hatası

dir.

Mira bölümlendirme hatalarının ölçülere etkisini önemsiz kılmanın en güvenilir yolu, herbir mira bölüm çizgisine ait e_i bölümlendirme hatasının belirlenmesi ve mira okumalarının düzeltilmesidir. e_i bölümlendirme hataları Laser - İnterferans komparatörü ile ve $\pm (4-5) \mu\text{m}$ doğrulukla belirlenebilmektedir (Schlemmer 1975).

2.4.1.2. Nivelardan kaynaklanan hatalar

Presizyonlu nivelman ölçmeleri için kabul edilen ana modeldeki varsayımlardan birisi de nivo gözleme ekseninin yatay bir düzlem oluşturması ve bunun bir istasyon noktasındaki ölçme süresince sabit kalmasıdır. Eğer gözleme eksenini yataydan sapa veya dübün geri doğrultudan ileri doğrultuya (veya tersine) döndürülürken gözleme ekseninde bir sıçrama meydana gelirse hatalı ölçmeler yapılmış olur. Sonuç olarak nivelardan kaynaklanan hatalar şu şekilde sıralanabilir.

- Nivo gözleme eksenini şartının düzensizliği
- Kompansatörlü nivelarda artık kompensasyon hatası
- Küresel düzeç eksen şartının düzensizliği

Nivo gözleme eksenini şartının düzensizliği

Nivoda yatay gözlemeyi sağlayan donatılar (silindirik düzeç veya kompensatör) ile nivo gözleme eksenini arasında belli bir şartın bulunması gerekir. Söz konusu şart nivo gözleme eksenini şartıdır ve yatay gözlemeyi sağlayan donatıya bağılı olarak değişik şekilde ifade edilebilir.

Silindirik düzeçli nivelarda "silindirik düzeç eksenini nivo gözleme eksenine paralel olmalıdır".

Kompansatörlü nivelarda "Küresel düzeç ortalandığında kompensatör alet yatayına karşılık olan gözlemeyi sağlamalıdır."

Bu şartları taşımayan nivo ile yapılan ölçmelerdeki mira okumaları eğik gözleme doğrultusunda yapılmış olur ve düzenli bir hata etkisi taşırlar.

Bir mira okumasındaki hata;

$$P = S \cdot \frac{\gamma}{\rho} \quad (2.8)$$

bağıntısı ile ifade edilebilir (Baykal 1989.a). Burada, γ : gözleme ekseninin yataydan sapma açısı, S: gözleme uzaklığıdır. Bu hatanın etkisini en aza indirebilmek için geri ve ileri gözleme uzaklıkları eşit alınmalı ve her ölçme gününe başlanılmadan nivo gözleme eksenini şartı kontrolü yapılmalı, gerekiyorsa alet düzenlenmelidir.

Kompansatörlü nivolarada artık kompansasyon hatası

Kompansatörlü nivolarada yatay gözleme şartı kompansatör yardımıyla sağlanmaktadır. Ancak kompansatörün dürbün içindeki konumunun zamanla değişmesi, kompansatör olarak görev yapan optik elemanları taşıyan tellerin yorulması, değişik gözleme uzaklıklarında netleştirme nedeniyle anallaktik noktanın, dolayısıyla alet yatayının değişmesi ve trafik, rüzgar v.b. dış etkenlerin yarattığı titreşimlerin kompansatörün denge konumunu etkilemesi nedeniyle kompansatör tam olarak çalışamaz ve gözleme eksenini düzensizliğine neden olur (Baykal, 1989.a). Gözleme eksenini düzensizliği uygun yöntemlerle giderilebilir. Fakat geriye tek bir mira okumasında fark edilemeyen, kompansatörlü nivonun yapısından ileri gelen ve eksen kontrolleriyle giderilemeyen tek taraflı bir hata kalır. Bu hataya "Artık Kompansasyon Hatası" veya "Eğik Ufuk Hatası" denir.

Presizyonlu nivelmanda kompansatörlü nivo kullanılması durumunda artık kompansasyon hatasının etkisini giderecek gözleme sırası uygulanmalıdır. Bunlardan başlıcaları "Kırmızı Pantolon" ve "Schwarz" yöntemleridir.

Kırmızı pantolon yönteminde, küresel düzeç kabarcığı tek nolu istasyon noktalarında geri mira doğrultusunda, çift nolu istasyon noktalarında ise ileri mira doğrultusunda ortalınır ve tek nolu istasyonlarda g_1 i_1 i_{11} g_{11} çift nolu istasyon noktalarında i_1 g_1 i_{11} g_{11} gözleme sırası uygulanır.

Schwarz yönteminde, her bir istasyon noktasında küresel düzeç kabarcığı önce geri mira doğrultusunda ortalınır ve miralar üzerinde sol bölüm okumaları (g_1 , i_1) yapılır. Daha sonra ileri mira doğrultusunda küresel düzeç kabarcığı bozulur ve tekrar ortalınır ve sağ bölüm okumaları (i_{11} , g_{11}) yapılır. Tüm istasyonlarda bu işlem tekrarlanır.

Küresel düzeç eksen şartının düzensizliği

Nivolarada küresel düzeç eksen düzlemi asal eksene dik olmalıdır. Bu şartın sağlanmadığı durumlarda küresel düzeç ortaladığı zaman asal eksen düşey doğrultudan yönü ve büyüklüğü aynı olan bir sapma gösterir. Bu hatanın sonuçlara etkisi silindirik düzeçli ve kompansatörlü nivolarada farklı olmaktadır.

Silindirik düzeçli nivolarada yatay gözleme fenklaj vidası yardımıyla sağlandığı için pek fazla etkili olmayabilir. Ancak silindirik düzeç kabarcığını ortalamak güçleşir ve zaman kaybına neden olur. Bu ise başka hatalara neden olur. Bu hatanın etkisini en aza indirebilmek için nivelmanda kullanılan nivonun küresel düzeç duyarlılığı yüksek olmalı ve her bir istasyon noktasında küresel düzeç kabarcığı dikkatle ortalınmalıdır (Baykal 1989.a).

Kompansatörlü nivolarada kompansatörün tam olarak çalışması için asal eksen eğikliğinin belli bir değerden küçük olması gerekir. Aksi durumda kompansatör görevini tam olarak yapamaz ve gözleme düzlemi eğikliği ortaya çıkar. Diğer bir sakıncası da dürbün geri mira doğrultusundan ileri mira doğrultusuna (veya tersine) döndürülürken

gözleme doğrultusunda yükseklik sıçramasının ortaya çıkmasıdır. Bu nedenle kullanılacak olan kompensatörlü nivodaki küresel düzeç duyarlılığı yüksek olmalı ve küresel düzeç eksen şartı mutlaka düzenli olmalıdır.

2.4.2. Dış ortamdan kaynaklanan hatalar

Presizyonlu nivelman ölçmeleri atmosfer koşullarında ve fiziksel yeryüzeyinde yapıldığından, dış ortamın fiziksel parametrelerindeki değişimler ölçmelerde hataya neden olmaktadır. Söz konusu hatalar;

- Ölçme sırasında nivo ve miralarda çökme hatası
- Sıcaklığın nivoya etkisi
- Sıcaklığın miraya etkisi
- Geomağnetik alanın kompensatörlü nivoya etkisi
- Gel-git etkisi
- Düşey refraksiyon etkisi
- Gravite alanının etkisi

2.4.2.1. Nivo ve miralarda çökme hatası

Presizyonlu nivelman ölçmeleri sırasında üzerinde ölçme yapılan zeminin cinsi ve fiziksel özellikleri, bir istasyon noktasındaki ölçmede ve istasyon değiştirmede harcanan zaman, kullanılan mira altlığının tipi ve uygulanan gözleme sırasına bağlı olarak nivo ve miralar düşey yönde hareket edebilirler. Bu düşey hareketlerin toplamı çökme hatasını oluşturur.

Çökme hatasının ölçme sonuçlarına etkisi kesin olarak belirlenemez. Bu hatanın etkisini enaza indirebilmenin tek yolu hatayı oluşturan parametreleri iyi belirlemek ve bunların etkilerini araştırıp bu hatalara karşı etkili uygun ölçme planı hazırlamaktır.

2.4.2.2. Sıcaklığın nivoya etkisi

Cisimlerin sıcaklık değişmelerine bağlı olarak boyut değiştirmeleri bilinen bir fizik kanunudur. Bu bakımdan silindirik düzeçli ve kompensatörlü nivoların optik sistemleri sıcaklık farklılaşmasından etkilenir. Bu etki iki grup altında incelenebilir.

- Ortam sıcaklığının ani değişiminin etkisi
- Güneş ışığının tek taraflı ve direk olarak nivoya vurmasının etkisi

Ortam sıcaklığının ani değişimi (nivo kutusundan çıkartıldıktan sonraki durum gibi) nivonun gözleme doğrultusunda eğikliğe neden olur. Geri ve ileri gözleme uzaklıkları eşit alınması durumunda sapma açısı her iki yönde aynı olur ve etkisi kendiliğinden ortadan kalkar.

Güneş işığının tek taraflı ve direk olarak nivoya vurması sonucunda nivonun gözleme doğrultusu etkilenir. Bu etkilenme gözleme doğrultusu ile güneş işığının doğrultusu arasındaki farka bağlıdır (Pelzer 1983).

Sıcaklığın nivoya etkisi, lme süresince nivo güneş işığından bir şemsiye ile korunur ve ölçmeler $g_{1 \perp} \parallel g_{1 \parallel}$ gözleme sırası ile hızlıca yapılırsa minimuma indirilebilir (Ceylan 1988).

2.4.2.3. Sıcaklığın miraya etkisi

Nivolarda olduğu gibi invar miralar da sıcaklık değişmelerinden iki şekilde etkilenir. Birincisi miranın kalibrasyon sıcaklığı (genellikle 20 C) ile nivelman sırasındaki miranın sıcaklığı arasındaki farktan dolayı oluşan hatadır (Pelzer 1983). İkinci hata ise nivelman ölçmeleri sırasında güneş işığı miraların birinin n yüzeyine (invar şerite), diğer miranın da arka yüzeyine vurursa, birinci miradaki invar şerit doğrudan güneş işığına maruz kalırken diğer miradaki invar şerit gölgede kalması sonucu miralar arasındaki sıcaklık farkı 6 C'yi bulmaktadır (Zippelt 1984). Bu ise hataya neden olur.

Sıcaklığın miralara etkisinin azaltılabilmesi için, invar şeritlerin termik genleşme katsayıları yeterli doğrulukta belirlenmeli ve nivelman ölçmeleri sırasında invar şeritlerin i sıcaklıkları 0.5 C doğrulukla ölçmelidir (Baykal 1989.c).

2.4.2.4. Geomağnetik alanın kompensatörlü nivoya etkisi

Kompensatörlü nivolarda sarkaç, salınımı gravite etkisiyle düşey doğrultuda denge konumuna gelir. Nivonun gözleme eksenini sarkaç ile dik açı yapacak şekilde bağlanmışır. Bunun anlamı ise diğer hatalar ihmal edilirse gözleme eksenini tam olarak yataydır. Fakat, sarkaç gravite etkisiyle birlikte geomağnetik alandan da etkilenir. Bu ise kompensatörün hata yapmasına neden olur. Hatanın büyüklüğü ve yönü kompensatörün yapısına ve yapısını oluşturan materyalin özelliklerine bağlıdır. Geomağnetik alanın yatay bileşeni ile nivonun gözleme doğrultusu paralel olduğunda sapma maximum olur (Zippelt 1983).

Geomağnetik alanın etkisini ölülere sonradan düzeltme getirerek gidermek pek kolay değildir. Çünkü; hata, gözleme doğrultusunun mağnetik kuzeyle yapmış olduğu açıya bağlı olarak değişmektedir. Bu hatadan uzaklaşmanın en etkili yolu mağnetik alandan etkilenmeyen (nonmağnetik) kompensatörlü nivoların kullanılmasıdır (Beckers 1983, Schulz 1983, Leitz 1983, Gesler 1983).

2.4.2.5. Gel-git etkisi

Nivelman ölçmeleri sırasında yatay gözleme, silindirik düzeç veya kompensatör yardımıyla sağlanır ve gözleme eksenini çekül doğrultusuna dik konuma getirilir. Çekül doğrultusu ay ve güneş kütlelerinin ortaya çıkardığı ve zamanla değişim gösteren gel-git kuvveti etkisi altındadır.

Bu etki nedeniyle çekül doğrultusu küçük bir açısal sapma gösterir. Dolayısıyla ölçmeler o istasyon noktasına ait gerçek gravite vektörüyle yürütülemez (Banger 1982).

2.4.2.6. Düşey refraksiyonun etkisi

Presizyonlu nivelmanda gözleme ışını farklı kırılma indislerine sahip atmosfer tabakalarından geçerken bilinen kırılma kanununa bağlı olarak ışın yolu eğrilerek nivoya ulaşır.

Fiziksel yapı farklılığı göstermeyen düz bir nivelman kenarında refraksiyonun etkisi tüm mira okumalarında yaklaşık aynı büyüklüktedir. Dolayısıyla yükseklik farklarının bu hatadan etkilenmesi rastgele özelliği taşır. Fakat, sabit eğimli nivelman kenarında yapılan ölçmelerde yere yakın mira okumaları, yerden uzakta olanlara göre refraksiyon hatasından çok daha fazla etkilenir. Bu nedenle yükseklik farklarında büyük ölçüde hata birikimi oluşur. Ölçmeler, genellikle sıcaklığın düşey değişiminin ($dt/dh < 0$) negatif olduğu zamanlarda yapıldığından, pozitif yükseklik farkları olması gerekenden daha küçük, negatif yükseklik farkları ise daha büyük olarak bulunur. Bu nedenle bu hata benzer atmosfer koşullarında yapılan gidış-dönüş ölçmeleriyle ortadan kaldırılamaz (Banger 1981).

Bu hatanın etkisi, ölçülere sonradan düzeltme getirilerek giderilebilir. Ancak, pratik uygulamalarda ölçülere sonradan hesapla düzeltme getirme yerine dönüş ölçmeleri sıcaklığın düşey değişiminin ters işaretli olduğu farklı atmosfer koşullarında yapılarak bu hata giderilmektedir (Banger 1981).

2.4.2.7. Gravite alanının etkisi

Bölüm 1.2 de açıklanmıştır.

2.5. Düzenli ve Raslantısal Hataların Nivelman Sonuçlarına Etkisi

j istasyon noktasında elde edilen Δh_j gerçek yükseklik farkı;

$$\Delta h_j = \Delta h_j + \Delta_j + \varepsilon_j = \Delta h_j + n_j \quad (2.9)$$

bağıntısı ile ifade edilebilir (Pelzer 1983). Burada;

Δh_j : j. istasyon noktasındaki gerçek yükseklik farkı

Δh_j : j. istasyon noktasındaki ölçülen yükseklik farkı

Δ_j : Düzenli hata bileşeni,

ε_j : Raslantısal hata bileşeni,

n_j : Toplam hatadır.

ε_j , raslantısal hatalar, her istasyon noktasında rasgele olarak değişirler. Bunların stokastik karakteristikleri şu şekilde ifade edilebilir (Pelzer 1983);

$E \{ \varepsilon_j \} = 0$: Beklenen değer

$E \{ \varepsilon_j^2 \} = \sigma_\varepsilon^2$: Varyans (2.10)

$E \{ \varepsilon_j \varepsilon_k \} = 0$: $j \neq k$: Kovaryans

Buna karşılık Δ_j düzenli hata bileşeni ise, tüm istasyon noktalarında veya bir kısmında benzer veya eşit büyüklüktedir. Bu hatalar stokastik değer olarak düşünülürse diğer karakteristikleri;

$E \{ \Delta_j \} = 0$: Beklenen değer

$E \{ \Delta_j^2 \} = \sigma_\Delta^2$: Varyans (2.11)

$E \{ \Delta_j \Delta_k \} = \text{Cov}(\Delta_j, \Delta_k) \neq 0$: $j \neq k$

şeklinde ifade edilir (Pelzer 1983).

(2.10) ve (2.11) bağıntılarından görüldüğü gibi, düzenli hatalar ile raslantısal hatalar arasındaki en önemli fark, düzenli hatalarının kovaryanslarının sıfır olmamasıdır. Bunun sonucu olarak düzenli hatalar, istasyon yükseklik farkları arasında korelasyon yaratırlar (Pelzer 1983).

Sabit iki nokta arasındaki ΔH yükseklik farkı

$$\Delta H = \sum_{j=1}^n dh_j = e^T \cdot \Delta h \quad (2.12)$$

bağıntısıyla hesaplanabilir. Burada;

$$\Delta h^T = [\Delta h_1, \Delta h_2, \dots, \Delta h_n]$$

$$\sigma_{\Delta H} = \sqrt{\underline{e}^T \cdot \underline{C}_{hh} \cdot \underline{e}} \quad (2.13)$$

Burada \underline{C}_{hh} ; Δh_j yükseklik farklarının kovaryans matrisidir (Pelzer 1983, Kalkan 1988).

$$\underline{C}_{hh} = \begin{bmatrix} (\sigma_{\varepsilon}^2 + \sigma_{\Delta}^2) & \text{Cov}(\Delta_1, \Delta_2) & \dots & \text{Cov}(\Delta_1, \Delta_n) \\ \text{Cov}(\Delta_2, \Delta_1) & (\sigma_{\varepsilon}^2 + \sigma_{\Delta}^2) & \dots & \text{Cov}(\Delta_2, \Delta_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{Cov}(\Delta_n, \Delta_1) & \text{Cov}(\Delta_n, \Delta_2) & \dots & (\sigma_{\varepsilon}^2 + \sigma_{\Delta}^2) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

(2.13) bağıntısıyla türetilen doğruluk kriterinin geçerli ve güvenilir olması için \underline{C}_{hh} kovaryans matrisinin gerçeğe uygun biçimde oluşturulması zorunludur. Ancak bu durumda istenilen doğruluğa ulaşıp ulaşılamadığı konusunda kesin bir yargıya varılabılır. Ayrıca ΔH yükseklik farklarıyla yapılacak olan dengeleme hesabının doğruluğu, stokastik modelin doğruluğuna da bağlıdır (Baykal 1989.d).

Günümüzde uygulanmakta olan klasik presizyonlu nivelman hata teorisinde, istasyon yükseklik farklarının birbirinden bağımsız gözlemler olduğu ($\text{Cov}(\Delta_j, \Delta_k)=0$) kabul edilmekte ve yükseklik farklarının standart sapmaları buna göre hesaplanmaktadır. Bu durumda düzenli hata bileşeninin raslantısal olduğu kabul edilmektedir (Baykal 1989.d).

Buna karşılık istasyon yükseklik farkları arasında sabit bir korelasyonun olduğu ve $\Delta_1 = \Delta_2 = \dots = \Delta_n = \Delta$ olması sonucu

$$\text{Cov}(\Delta_j, \Delta_k) = \sigma_{\Delta}^2 ; (\forall i, k) \quad (2.15)$$

olduğu kabul edilirse \underline{C}_{hh} matrisine daha iyi bir yaklaşım sağlanabilecektir (Pelzer 1983).

(2.15) varsayımıyla (2.13) ve (2.14) den

$$\sigma_{\Delta h} = \sqrt{n} \sigma_{\varepsilon} = \sqrt{1 + n \cdot (\sigma_{\Delta}^2 / \sigma_{\varepsilon}^2)}$$

$$\sigma_{\Delta h} = \sigma_r \sqrt{1 + n \cdot q^2} = \sigma_r \cdot k \quad (2.16)$$

elde edilir (Pelzer 1983). Burada;

σ_r : raslantısal hatalardan oluşan kenar yükseklik farkının standart sapması;

$$\sigma_r = \sqrt{n} \cdot \sigma_{\varepsilon} \quad (2.17)$$

n: istasyon noktası sayısı,

$$q^2 = \frac{\sigma_{\Delta}^2}{\sigma_{\varepsilon}^2} \quad : \text{ Bir istasyon noktasında d\u00fczenli hataların ve raslantısal}$$

hataların neden olduğu standart sapmaların oranı,

k : kenar yükseklik farkının standart sapmasında d\u00fczenli hataların payını g\u00f6steren \u00f6l\u00e7ek fakt\u00f6r\u00fcd\u00fcr. k \u00f6l\u00e7ek fakt\u00f6r\u00fc nivelman ge\u00e7kisi uzunluğunun bir fonksiyonu olacak \u015fekilde,

$$n = \frac{L}{2S} \quad (2.18)$$

ve

$$k = \sqrt{1 + n \cdot q^2} = \sqrt{1 + \frac{L}{2S} \cdot q^2} \quad (2.19)$$

\u015feklinde ifade edilebilir (Pelzer 1983). Burada, S: g\u00f6zleme uzaklığıdır.

3. TRİGONOMETRİK NİVELMAN YÖNTEMLERİ

Elektronik uzaklık ölçerlerin (EDM) gelişmesi ve modern teodolitlerin iyileştirilmesi ile birlikte, bilinen geometrik nivelmana alternatif olabilecek "Kısa - Mesafe Trigonometrik Nivelman" konusunda araştırmalar yoğunlaşmıştır (Kuntz and Schmitt, 1986, Hirsch 1990, Rueger and Brunner 1981, 1982, Haojian 1990, Kratzsch 1979, Hauf 1979, Whalen 1984, Chrzanowski 1985). Trigonometrik nivelman yöntemlerinde arazinin eğimine bakılmaksızın daha uzun gözleme uzaklıkları ile çalışılabilmekte ve buna bağlı olarak nivelman hattındaki alet kurma sayısında oldukça büyük oranda azalma olmaktadır. Ayrıca, gözleme doğrultuları yaklaşık olarak yeryüzeyine paralel alınırsa geri ve ileri gözleme ışınları benzer hava tabakalarından geçeceği için düzenli refraksiyon hatalarının yükseklik farklarına etkisi büyük ölçüde azaltılabilmektedir. Yöntemin sağladığı bu avantajları kazanabilmek için eğik uzaklıkların ve düşey açıların çok yüksek bir doğrulukta ölçülmesi gerekmektedir.

Eğik uzaklıkların ölçülmesinde kısa mesafe elektro - optik uzaklık ölçerler (EODMI) kullanılmalı, düşey açı gözlemleri ise, düşey dairesi kompensatörlü saniye teodolitleri ile yapılmalıdır. Kısa mesafe elektro-optik uzaklık ölçerler ile teodolit bir arada komple aletlerin kullanılması tercih edilmektedir.

Trigonometrik nivelmanın presizyonlu nivelmana alternatif olabilmesi için, bir çok hata kaynağının yeterince denetlenmesi, kaçınılmaz bir zorunluluktur. Bu nedenle tek taraflı gözleme ile trigonometrik nivelmanın bu görevi başarması mümkün değildir. Bu anlamda uygulanabilecek trigonometrik nivelman yöntemleri, yer, zaman ve düşey açı gözlemlerinin yapılış biçimine göre ikiye ayrılır:

- (i) Karşılıklı ve eşzamanlı gözlemler ile trigonometrik nivelman
- (ii) Atlamalı (Ortadan) gözlemler ile trigonometrik nivelman

3.1. Karşılıklı ve Eşzamanlı Trigonometrik Nivelman

Düşey açı gözlemleri her iki yönde aynı anda (eşzamanlı) yapılır (Şekil 3.1). Karşılıklı ve eşzamanlı düşey açı gözlemlerinin yapılabilmesi için her iki noktada bulunan teodolit üzerine hedef levhalarının monte edilmesi gerekir. Ayrıca, eğik uzaklıkların ölçülmesi için de elektro-optik uzaklık ölçerler (EODMI) ve yansıtıcının da monte edilmesine olanak verecek özel donatılara gerek vardır.

3.2. Ortadan (Atlamalı) Gözlemeli Trigonometrik Nivelman

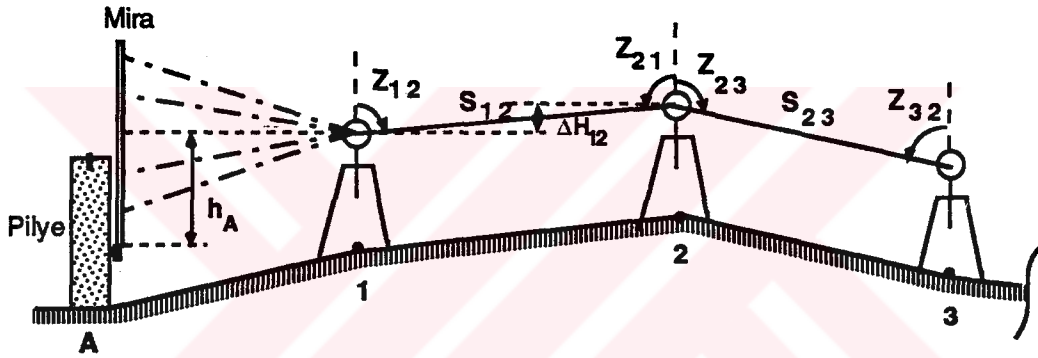
Ortadan gözlemeli trigonometrik nivelman yönteminde, bilinen geometrik nivelmana benzer şekilde alet geri ve ileri hedeflerin arasında ortaya kurulur (Şekil 3.2).

Bu teknikte kullanılan nivelman miralarının üzerine, düşey açı gözlemleri ve uzaklık ölçmeleri için EODMI prizmaları (yansıtıcı) ve hedef levhaları yerleştirilmelidir.

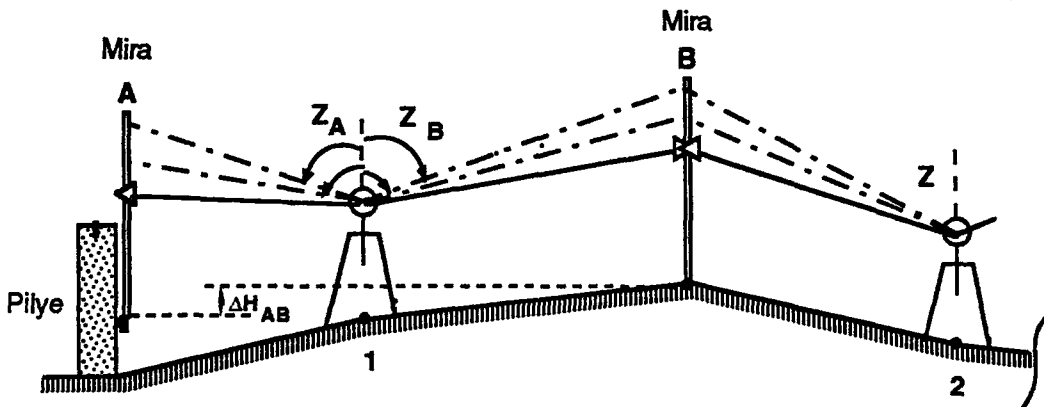
3.3. Tarihsel Gelişimi

Özellikle 1970'li yıllardan sonra birçok ülkede; poligon ölçmelerinde düşey ve yatay (veya eğik) uzaklıklardan yükseklik farkının hesabı, ilk olarak optik uzaklıklar daha sonra ise baz latası ile ölçülen yatay uzaklıklarla araştırılmıştır. Sonuçta birkaç mm'lik doğruluğa ulaşılmasına rağmen, fazla bir araştırma yapılmamıştır

Kısa mesafe elektro optik uzaklık ölçerlerin (EODMI) geliştirilmesi ile mm hassasiyetindeki yükseklik ölçmeleri daha kolay ve hızlı bir şekilde yapılabilir hale gelmiş



Şekil 3.1 Karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelman



Şekil 3.2. Ortadan (Atlamalı) trigonometrik nivelman

ve bu konuda birçok araştırma yapılmıştır. Bu araştırmaların çoğu teorik, çok azı da pratik uygulamalardır. 1970'li yıllardan sonra yapılmış araştırmalar, kronolojik bir sıraya göre aşağıda özetlenmiştir.

Campbell (1973): İki WILD T2 teodoliti ve bir Tellurometer MA 100 uzaklık ölçeri kullanılarak eşzamanlı karşılıklı düşey açı gözlemleriyle sabit noktalar arası yükseklik farkı hesaplanmıştır. Bu yükseklik farkları ile geometrik nivelmanla bulunan yükseklik farkları arasındaki fark 30 mm'yi geçmemiştir.

Lawry (1973): Campbell'in kullandığı aynı donatımla, kenar uzunlukları 280 ile 1250 m, düşey açılar 53° ile 88° arası değişen bir poligon geçkisinde karşılıklı trigonometrik nivelman yapılmış ve standart sapma $\pm 10 \text{ mm} \cdot \sqrt{S_{\text{km}}}$ olarak hesaplanmıştır.

Brunner (1975): 1972-1973 yılları arasında iki WILD T2 teodoliti ve WILD DI 10 uzaklık ölçeri kullanılarak yapılan trigonometrik yükseklik ölçmelerinin sonuçları yayınlanmıştır. Ortalama gözleme uzaklıkları 270 m alınarak 12 halka kapanmasından elde edilen standart sapma $\pm 6.9 \text{ mm} \cdot \sqrt{S_{\text{km}}}$ dir.

Kratzsch (1978, 1979): Toplam uzunlukları 4.3 km ve 1.9 km olan iki farklı hatta, eğim açıları 9° 'yi geçmeyecek şekilde 100 ile 300 m arası değişen gözleme uzaklıkları ile kenarlar üzerinde, özel donatımlı DM 501 elektronik uzaklık ölçer ve Kern DKM2-A teodoliti kullanılarak karşılıklı trigonometrik yükseklik ölçmeleri yapılmış, sonuçta birinci geçki için standart sapma $\pm 4.2 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$, ikinci geçki için ise standart sapma $\pm 3.7 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$ olarak bulunmuştur.

Blasek ve Hradilek (1979): 200 m'den 300 m'ye kadar değişen gözleme uzunlukları ile bir çift karşılıklı trigonometrik yükseklik ölçmesi yapılmıştır. Sonuçta elde edilen standart sapma $\pm 5 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$ 'dir.

Hauf (1979): gözleme uzaklıkları 300 m'yi geçmeyecek şekilde geri ve ileri gözleme uzaklıkları yaklaşık eşit alınarak, toplam geçki uzunluğu yaklaşık 10 km olan 8 halka üzerinde Zeiss Th2 teodoliti ve Zeiss ELDI 2 uzaklık ölçeri kullanılarak atlamalı trigonometrik yükseklik ölçmeleri yapılmıştır. Yer eğriliği ve refraksiyon düzeltilmesi yapılmamış ölçülerden elde edilen halka kapanmalarından hesaplanan standart sapma $\pm 7.7 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$, yer eğriliği ve refraksiyon düzeltilmesi yapıldığında ise $\pm 6.4 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$ 'lik standart sapma değeri hesaplanmıştır.

Bahnert (1980): 400 m'lik ortalama gözleme uzaklıklarıyla karşılıklı trigonometrik nivelman ölçmeleri yapılmıştır. Ölçülerin değerlendirilmesiyle, karşılıklı trigonometrik nivelmanın sistematik hatalardan etkilenmediği ve kenar kapanmalarının gözleme uzaklıklarına bağlı olmadığı sonucuna varılmıştır. Standart sapma $\pm 10 \text{ mm}$ 'den daha küçük bulunmuştur.

Rueger and Brunner (1981, 1982): Avustralya'da toplam uzunlukları 1.6 km ve 1.5 km olan iki farklı geçkide üç ayrı donatımla trigonometrik nivelman ölçmeleri yapılmış, sonuçta ortalama 300 m'lik gözleme uzaklıklarıyla $\pm 4.3 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$ 'lik standart sapma hesaplanmıştır. Ayrıca, güneşin doğuşundan 2 saat sonra ve güneş batışından iki saat önceki zamanda yapılan karşılıklı trigonometrik yükseklik ölçmelerinin (eşzamanlı

değil), refraksiyon katsayılarındaki büyük değişimlerden ($\Delta k = k_{ij} - k_{ji}$) etkilendiği saptanmıştır.

Chrzanowski (1983): Avustralya New Brunswick Üniversitesinde, Kern DKM2-A teodoliti, DM 502 elektronik uzaklık ölçeri ve özel olarak yapılmış ve üzerinde üç hedef levhası bulunan 5 m'lik iki mira kullanılarak atlamalı trigonometrik nivelman yapılmıştır. Geri ve ileri gözleme uzaklıkları arazinin eğiminden bağımsız olarak 300 m alınmıştır. Elde edilen standart sapma $\pm 3.0 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$ 'den daha küçüktür.

Hirsch (1984): eski tip optik teodolit, yeni tip optik teodolit ve elektronik teodolitlerin düşey açı ölçme hassasiyetlerine ve elektronik uzaklık ölçerlerin kenar ölçme doğruluklarına göre trigonometrik nivelman ölçmelerinden elde edilebilecek doğruluk teorik olarak incelenmiştir.

Whalen (1984): özel ekipmanlarla donatılmış iki adet WILD T2000 elektronik teodolit ve DI5 elektronik uzaklık ölçer kullanılarak eşzamanlı ve karşılıklı motorize trigonometrik nivelman ölçmesi ve WILD T2000 elektronik teodolit ve üzerine hedef ve reflektör yerleştirilmiş iki invar mira kullanılarak atlamalı motorize trigonometrik yükseklik ölçmeleri yapılmıştır. Aynı nivelman açında NI-002 kompensatörlü nivo kullanılarak yapılmış olan motorize geometrik nivelman sonuçları ile karşılaştırıldığında, her iki yöntemde 1.9 km/saat'lik ölçme hızına ulaşılmıştır. Motorize trigonometrik nivelman ölçmesinde $\pm 1.2 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$, motorize geometrik nivelmanda ise $\pm 0.7 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$ 'lik standart sapma elde edilmiştir. Sonuçta, trigonometrik nivelman yöntemleri düz alanlarda geometrik nivelmana nazaran ölçme hızı artışı sağlamadığı, ancak dağlık alanlarda daha avantajlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Whalen (1985): Virginia ve Fredersburg çevresindeki 30 km'lik test halkası üzerinde yapılmış motorize trigonometrik nivelman ölçmelerinin sonuçları yayınlanmıştır. Bu ölçmelerle iki tip ölçme yöntemi test edilmiştir. Birinci ölçmelerde bir WILD T2000 elektronik teodolit, DI5 elektronik uzaklık ölçer ve herbirinin üzerine bir yansıtıcı ile iki hedef levhası yerleştirilmiş iki invar mira, ikinci ölçmede ise iki WILD T2000 elektronik teodolit, DI5 elektronik uzaklık ölçer ve sabit noktalarda yükseklik bağlantısı için birinci ölçmede kullanılan invar miraların birisi kullanılmıştır. Sonuçta, birinci tip ölçmeler için bir çift ölçünün ortalamasının standart sapması $\pm 0.66 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$, ikinci tip ölçmeler için ise $\pm 1.0 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$ olarak hesaplanmıştır.

Chrzanowski ve arkadaşları (1985): New Brunswick Üniversitesi ölçme anabilim dalında yapılmış trigonometrik nivelman ölçmelerinin sonuçları yayınlanmıştır. Gözleme uzaklıkları ortadan gözleme için 200 m, karşılıklı gözlemler için 250 m alındığında 8-10 km/gün'lük ölçme hızına ve standart sapma $< 2.0 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$ 'lik bir doğruluğa ulaşılmıştır.

Kuntz and Schmitt (1985,1986): farklı nivelman ağıları üzerinde özel donatımlı Kern DKM2-A teodoliti ve makometer 3000, bir kısmında Hewlet Packard 3820 elektronik uzaklık ölçeri kullanılarak karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik yükseklik ölçmeleri yapılmıştır.

Mettlach Nivelman Ağı'nda ölçüler 9 kez tekrarlanmış ve bu ölçülerin herbiri ayrı ayrı serbest olarak dengelendiğinde, ortalama, 200 m'lik gözleme uzaklıkları için $\pm 0.4 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$ 'lik bir standart sapma bulunmuştur.

Caldarusani Nivelman Ağı'nda yapılan ölçmelerde ise standart sapma $\pm 1.6 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$ olarak hesaplanmıştır.

Koblentz Nivelman Ağı'nda, uzunlukları 25 m ile 280 arası değişen gözleme uzaklıkları ile yapılan ölçmelerden elde edilen sonuçlar, Fravel (1982)'nin aynı nivelman ağında yapmış olduğu geometrik nivelman sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, çok yakın değerler olduğu görülmüştür.

Haojian (1990): Çin'deki Zhuhai Test ağı'nda yapılmış olan trigonometrik yükseklik ölçmelerinin hassasiyeti ve sonuçları ayrıntılı olarak incelenmiştir. Ölçmelerde Wild T2 teodoliti ve AGA 122 elektronik uzaklık ölçeri kullanılmış, sonuçta değişik gözleme uzunlukları için farklı standart sapmalar elde edilmiştir. 500-750 m arası gözleme uzunlukları için standart sapma $\pm 3.17 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$ bulunmuştur.

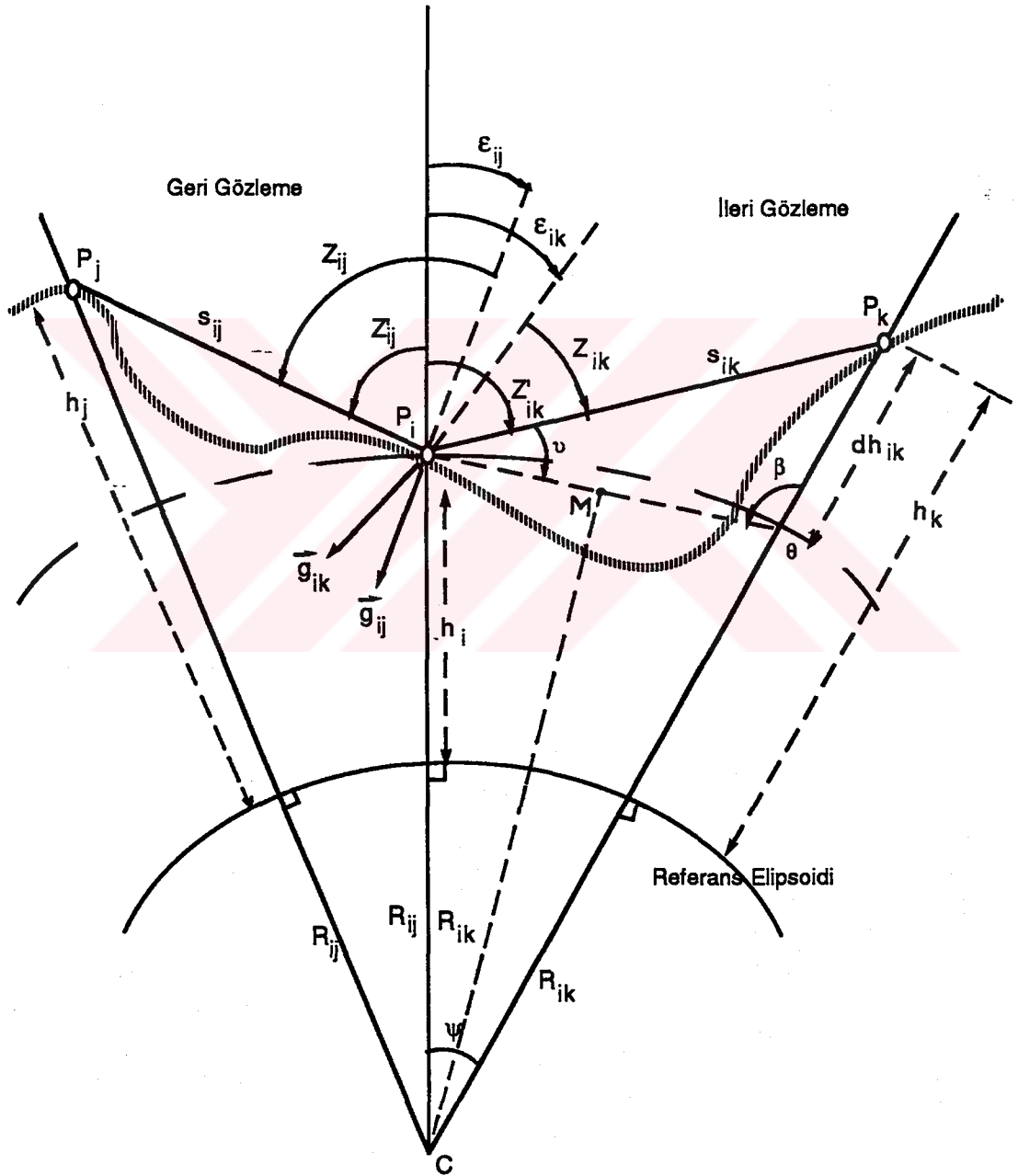
Hirsch ve arkadaşları (1990): Sudan'da Wild T2000 elektronik teodoliti, DI 2000 elektronik uzaklık ölçeri ve GRE 4A veri kayıt ünitesi kullanılarak ortalama 250 m'lik gözleme uzaklıkları ile trigonometrik nivelman ölçmelerinden $\pm 5.0 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$ 'lik standart sapma elde edilmiştir.

Bu araştırmalar, düzenli hata kaynaklarına karşı yeterli önlem alındığında trigonometrik nivelmanın presizyonlu nivelmana alternatif olabileceğini ve özellikle arızalı arazide önemli derecede ekonomi sağlayacağını açıkca göstermektedir.

4. TRİGONOMETRİK NİVELMANDA YÜKSEKLİK FARKLARININ HESABI

4.1. Ortadan (Atlamalı) Trigonometrik Nivelman

Ortadan trigonometrik nivelmanın temel prensibi Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Ortadan (Atlamalı) trigonometrik nivelmanın prensibi

Şekil 4.1'de;

Z_{ij} ve Z_{ik} : P_i istasyon noktasından, P_j ve P_k noktasında gözlenen ve yere indirgenen düşey açıları

S_{ij} ve S_{ik} : P_i istasyon noktasından, P_j ve P_k noktalarına ölçülen eğik uzunlukları

g_{ij} : P_i ve P_j noktalarına ait bileşke gravite vektörünü

g_{ik} : P_i ve P_k noktalarına ait bileşke gravite vektörü

ε_{ij} ve ε_{ik} : Bileşke çekül sapmalarını

Z'_{ij} ve Z'_{ik} : Elipsoidal düşey açıları

h_i, h_j ve h_k : P_i, P_j ve P_k noktalarının elipsoidal yüksekliğini

R_{ij} ve R_{ik} : Elipsoidal eğrilik yarıçaplarını

göstermektedir.

Şekil 4.1'de P_i MC üçgeninden:

$$v = \frac{\pi}{2} + \frac{\Psi}{2} - Z'_{ik} \quad (4.1)$$

QMC üçgeninden

$$\beta = \frac{\pi}{2} + \frac{\Psi}{2} \quad (4.2)$$

ve QP_iP_k üçgeninden sinüs teoremine göre;

$$dh_{ik} = S_{ik} \cdot \cos Z'_{ik} + \frac{S_{ik} \cdot \sin \frac{\Psi}{2} \cdot \sin Z'_{ik}}{\cos \frac{\Psi}{2}} \quad (4.3)$$

yazılabilir.

Kısa uzaklıklı trigonometrik nivelmanda gözleme uzaklıkları 1000 m'yi geçmediğine göre $\frac{\Psi}{2}$ açısı çok küçük değerde olacaktır. Buna göre yeterli bir yaklaşıklıkla,

$$\sin \frac{\Psi}{2} \cong \frac{\Psi}{2} \quad (4.4)$$

ve

$$\cos \frac{\Psi}{2} \cong 1$$

kabul edilebilir. Bu kabulden dolayı 5000 m'lik bir uzunluk için maximum hata 0.2 mm'den az olmaktadır (Greening 1985).

(4.4)'deki kabuller (4.3)'de yerine konulursa,

$$dh_{ik} = S_{ik} \cdot \cos Z'_{ik} + S_{ik} \cdot \frac{\psi}{2} \cdot \sin Z'_{ik} \quad (4.5)$$

olur. Ayrıca $P_i C P_k$ üçgeninden,

$$\sin \psi = \frac{S_{ik}}{R_{ik} + h_k} \cdot \sin Z'_{ik} \quad (4.6)$$

yazılabilir.

$\sin \psi \cong \psi$ alınması 5000 m'lik bir uzunluk için 10^{-3} den daha az bir hataya neden olmaktadır. Ayrıca, $(R_{ik} + h_k)$ ve $(R_{ik} + h_j)$ yerine R_m Gauss eğrilik yarıçapı alınabilir (Greening 1985). Bu kabullerle (4.6) bağıntısı,

$$\psi \cong \frac{S_{ik}}{R_m} \cdot \sin Z'_{ik} \quad (4.7)$$

şeklini alır. (4.7) bağıntısı (4.5) bağıntısında yerine konursa

$$dh_{ik} = S_{ik} \cdot \cos Z'_{ik} + \frac{S_{ik}^2 \cdot \sin^2 Z'_{ik}}{2R_m} \quad (4.8)$$

olur.

Benzer şekilde geri gözleme için de

$$dh_{ij} = S_{ij} \cdot \cos Z'_{ij} + \frac{S_{ij}^2 \cdot \sin^2 Z'_{ij}}{2R_m} \quad (4.9)$$

yazılabilir.

P_j ve P_k noktaları arasındaki dh_{jk} elipsoidal yükseklik farkı;

$$dh_{jk} = dh_{ji} + dh_{ik}$$

dir. $dh_{ji} = -dh_{ij}$ olduğu dikkate alınarak (4.8) ve (4.9)'dan,

$$\begin{aligned} dh_{jk} = & (S_{ik} \cdot \cos Z'_{ik} - S_{ij} \cdot \cos Z'_{ij}) + \\ & + \frac{1}{2R_m} \cdot (S_{ik}^2 \cdot \sin^2 Z'_{ik} - S_{ij}^2 \cdot \sin^2 Z'_{ij}) \end{aligned} \quad (4.10)$$

bulunur.

Şekil 4.1'den

$$Z'_{ik} = Z_{ik} + \varepsilon_{ik} \quad (4.11)$$

$$Z'_{ij} = Z_{ij} - \varepsilon_{ij}$$

yazılabilir.

(4.11) bağıntısı (4.10)'da yerine konulursa;

$$\begin{aligned} dh_{jk} = & (S_{ik} \cdot \cos Z_{ik} - S_{ij} \cdot \cos Z_{ij}) \\ & - (S_{ik} \cdot \sin Z_{ik} \cdot \varepsilon_{ik} + S_{ij} \cdot \sin Z_{ij} \cdot \varepsilon_{ij}) \\ & + \frac{1}{2R_m} \cdot (S_{ik}^2 \cdot \sin^2 Z_{ik} - S_{ij}^2 \cdot \sin^2 Z_{ij}) \end{aligned} \quad (4.12)$$

olur.

Uygulamada, (4.12) bağıntısı,

$$dh_{jk} = dH_{jk}^A - (S_{ik} \cdot \sin Z_{ik} \cdot \varepsilon_{ik} + S_{ij} \cdot \sin Z_{ij} \cdot \varepsilon_{ij}) \quad (4.13)$$

şeklinde yazılabilir. Burada;

$$\begin{aligned} dH_{jk}^A = & S_{ik} \cdot \cos Z_{ik} - S_{ij} \cdot \cos Z_{ij} \\ & + \frac{1}{2R_m} \cdot (S_{ik}^2 \cdot \sin^2 Z_{ik} - S_{ij}^2 \cdot \sin^2 Z_{ij}) \end{aligned} \quad (4.14)$$

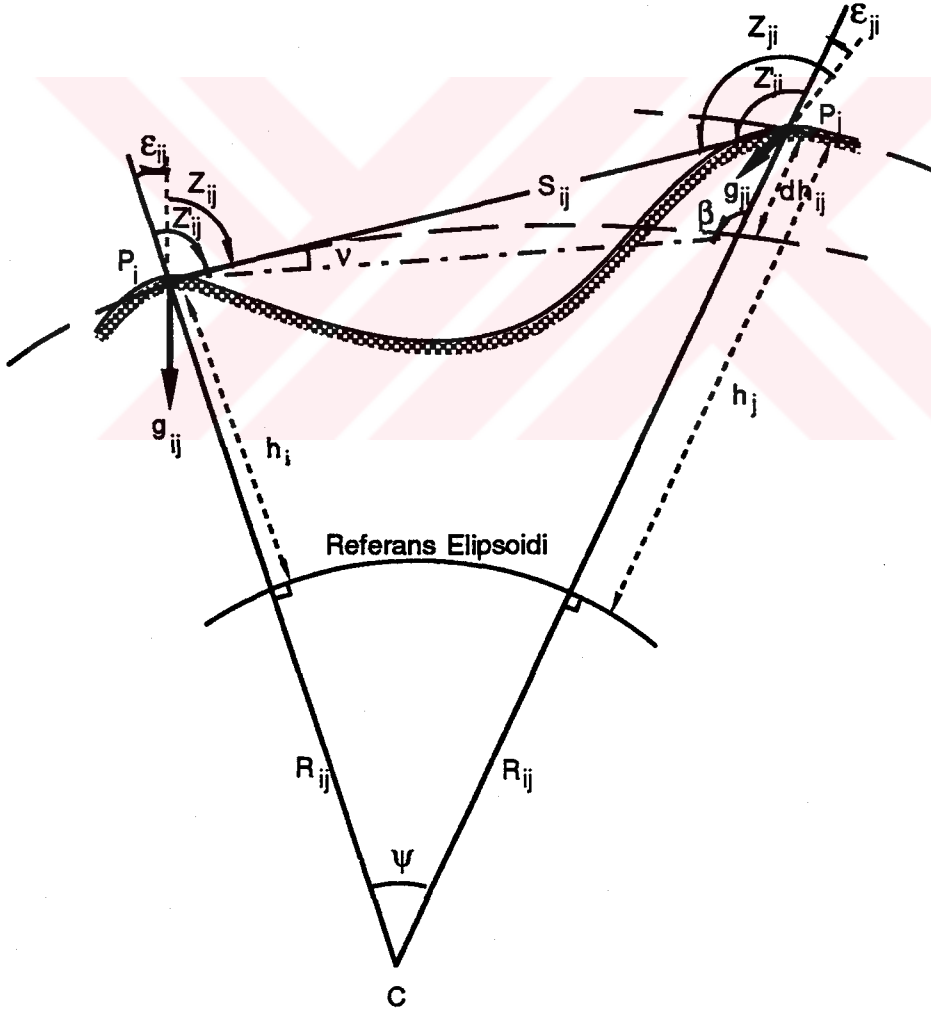
dir.

(4.14) bağıntısındaki birinci terim nominal yükseklik farkı, ikinci terim ise yereğriliği düzeltmesidir. $S_{ik} \cong S_{ij}$ için bu düzeltme çok küçük bir değerdir ve ihmal edilebilir.

(4.13)'deki ikinci terim çekül sapmalarının gözleme doğrultusundaki bileşenlerin sonuca etkisini gösterir. Uygulamada, ϵ_{ij} ve ϵ_{ik} çekül sapması bileşenleri çoğu kez bilinmez. Bu nedenle (4.13)'deki ikinci terim hesaplanamaz ve önemli bir düzenli hata kaynağı ortaya çıkar.

4.2. Karşılıklı Trigonometrik Nivelman

Karşılıklı trigonometrik nivelmanın temel prensibi Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Karşılıklı trigonometrik nivelmanın prensibi

Şekil 4.2'de

- Z_{ij} ve Z_{ji} : İstasyon noktalarında yere indirgenen düşey açıları
 Z'_{ij} ve Z'_{ji} : Elipsoidal düşey açıları
 S_{ij} : Eğik uzaklığı
 ϵ_{ij} ve ϵ_{ji} : Çekül sapmalarını
 g_{ij} ve g_{ji} : Gravite vektörlerini
 R_{ij} : Referans elipsoidinin eğrilik yarıçapını

göstermektedir.

dh_{ij} elipsoidal yükseklik farkı için, Şekil 4.2 ve (4.8) bağıntısından P_i 'den P_j 'ye yapılan gözlemler yardımıyla,

$$dh_{ij} = S_{ij} \cdot \cos Z'_{ij} + \frac{S_{ij}^2 \cdot \sin^2 Z'_{ij}}{2 (R_{ij} + h_j)} \quad (4.15)$$

veya

P_j 'den P_i 'ye yapılan gözlemlerden

$$dh_{ij} = -dh_{ji} = -S_{ij} \cdot \cos Z'_{ji} - \frac{S_{ij}^2 \cdot \sin^2 Z'_{ji}}{2 (R_{ij} + h_j)} \quad (4.16)$$

yazılabilir.

Yeterli bir yaklaşıklıkla; $\sin^2 Z'_{ji} \cong \sin^2 Z'_{ij}$ kabul edilir ve (4.16)'da yerine konursa;

$$dh_{ij} = -S_{ij} \cdot \cos Z'_{ji} - \frac{S_{ij}^2 \cdot \sin^2 Z'_{ij}}{2 (R_{ij} + h_j)} \quad (4.17)$$

olur.

(4.15) ve (4.17) bağıntısının ortalaması alınarak

$$dh_{ij} = \frac{S_{ij}}{2} \cdot (\cos Z'_{ij} - \cos Z_{ij}) + \frac{S_{ij}^2 \cdot \sin^2 Z'_{ij}}{4} \cdot \left(\frac{1}{R_{ij} + h_i} - \frac{1}{R_{ij} + h_j} \right) \quad (4.18)$$

elde edilir (Greening 1985).

(4.18) bağıntısındaki ikinci terimin ihmalı $S_{ij} = 3000$ m. ve $dh_{ij} = 1000$ m için 0.1 mm'den daha az bir hataya neden olmaktadır (Greening 1985). Buna göre;

$$dh_{ij} = \frac{S_{ij}}{2} \cdot (\cos Z'_{ij} - \cos Z_{ij}) \quad (4.19)$$

bulunur.

Şekil 4.2'ye göre, elipsoidal düşey açılar;

$$\begin{aligned} Z'_{ij} &= Z_{ij} + \varepsilon_{ij} \\ Z'_{ji} &= Z_{ji} - \varepsilon_{ji} \end{aligned} \quad (4.20)$$

şeklinde yazılabilir.

(4.20) bağıntısı (4.19)'da yerine konursa;

$$dh_{ij} = \frac{S_{ij}}{2} \cdot (\cos Z_{ij} - \cos Z_{ji}) - \frac{S_{ij} \cdot \sin Z_{ij}}{2} \cdot (\varepsilon_{ij} + \varepsilon_{ji}) \quad (4.21)$$

bulunur.

Yeterli bir yaklaşıklıkla, $\sin Z_{ij} \cong \sin Z_{ji}$ kabul edilir ve (4.21)'de yerine konursa;

$$dh_{ij} = dH_{ij}^K - \frac{S_{ij} \cdot \sin Z_{ij}}{2} \cdot (\varepsilon_{ij} + \varepsilon_{ji}) \quad (4.22)$$

olur.

(4.22) bağıntısındaki, dH_{ij}^K nominal yükseklik farkı,

$$dH_{ij}^K = \frac{S_{ij}}{2} \cdot (\cos Z_{ij} - \cos Z_{ji}) \quad (4.23)$$

dir.



5. TRİGONOMETRİK NİVELMANDAKİ HATA KAYNAKLARI

Trigonometrik nivelmandaki hata kaynakları,

- (i) Aletsel hata kaynakları
- (ii) Diğer hatalar

olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir.

5.1. Trigonometrik Nivelmandaki Aletsel Hata Kaynakları

Trigonometrik nivelmandaki önemli aletsel hata kaynakları şunlardır.

- (i) Uzunluk ölçmelerindeki hatalar
- (ii) Düşey açı gözlemlerindeki hatalar
- (iii) Miralardan kaynaklanan hatalar

5.1.1. Uzunluk ölçmelerindeki hatalar

Bu bölümde trigonometrik nivelmandaki uzunluk ölçmelerinde kullanılan kısa mesafe elektro-optik uzaklık ölçerler (EODMI)'deki hatalar incelenecektir.

Kısa mesafe elektro-optik uzaklık ölçerler için uzunluktan bağımsız ve uzunluğa bağımlı etkenlerin toplamı olarak bir uzunluk ölçmesinin karesel ortalama hatası aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir (Özgen ve Deniz 1986),

$$m_s = \pm \sqrt{a^2 + b^2 \cdot S^2}$$

Burada;

a: uzunluktan bağımsız hataların toplamı

b: Uzunluğa bağımlı hataların toplamı

S: ölçülen uzunluktur.

Kısa mesafe elektro-optik uzaklık ölçerlerindeki hatalar dört grupta incelenebilir:

- (i) Düzenli ölçek hataları
- (ii) Uzunluktan bağımsız düzenli hatalar
- (iii) Uzunluğa bağımlı periyodik olmayan düzenli hatalar
- (iv) Uzunluğa bağımlı periyodik düzenli hatalar.

Bu sınıflandırmaya göre ölçülen bir uzunluk için aşağıdaki model oluşturulabilir (Greening 1985).

$$S = m(u + \epsilon_u) + d + \epsilon_z + \epsilon_n(S) + \epsilon_c(S) \quad (5.1)$$

Burada;

u : aletin birim uzunluğunu

m : ölçülen uzunluktaki birim uzunluğun tekrarlama sayısını

d : kalıntı birim uzunluğu

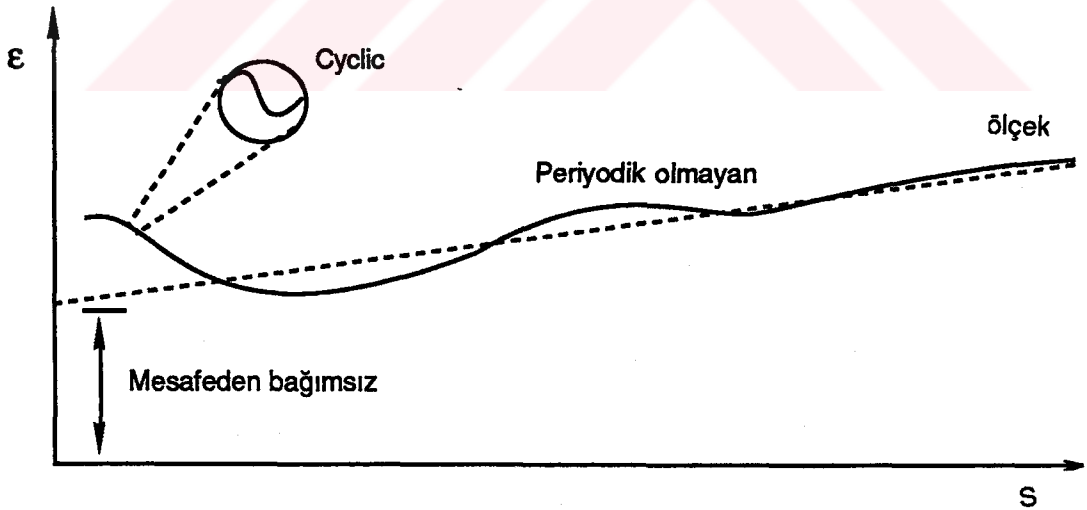
ϵ_u : ölçek hatasını

ϵ_z : uzunluktan bağımsız düzenli hatayı

$\epsilon_n(S)$: uzunluğa bağımlı periyodik olmayan düzenli hatayı

$\epsilon_c(S)$: uzunluğa bağımlı periyodik düzenli hatayı göstermektedir.

Kısa mesafe elektro-optik uzunluk ölçerlerdeki bu hatalar Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Düzenli EODMI hataları (Greening 1985).

5.1.1.1. Düzenli Ölçek Hataları

Modülasyon frekansı hatası

EODMI aletlerinin birim uzunluğu, modülasyon dalga boyunun yarısı olarak tanımlanmaktadır (Özgen ve Deniz 1986),

$$u = \frac{\lambda_m^n}{2} \quad (5.2)$$

Modülasyon dalga boyu, ışık hızı ve modülasyon frekansı cinsinden ifade edilebilir,

$$\lambda_m^n = \frac{c_0}{n_r \cdot f_m^n} \cdot (1 + n_r - n_l) \quad (5.3)$$

Burada,

c_0 : Boşluktaki ışık hızı

f_m^n : modülasyon frekansının nominal değeri

n_r : referans kırılma indisi

n_l : etkin kırılma indisidir.

(5.2) ve (5.3) bağıntılarına göre,

$$u = \frac{c_0}{2 n_r \cdot f_m^n} \cdot (1 + n_r - n_l) \quad (5.4)$$

olur (Greening 1985).

Uzunluklar, modülasyon frekansının nominal değerine (f_m^n) göre hesaplanır.

Bunun etkin frekanstan farklı olması, birim uzunlukta ölçek hatasına neden olur.

Modülasyon frekansları, quartz kristallerle denetlenen titreşim devreleriyle elde edilirler. Kristallerin frekansları kesit, kesit açısı, sıcaklık ve zamana bağlı olarak değişirler.

Kesit ve kesit açıları uygun seçilen ancak çevre sıcaklıkları termostatla denetlenmeyen kristallerin sıcaklık frekans değişimleri, -25°C den $+50^\circ\text{C}$ ' ye sıcaklık değişmesi için $\pm 3.16 \cdot 10^{-6}$ olarak verilmektedir (Özgen ve Deniz 1986).

Kristallerin çevre sıcaklığı termostat ile denetlenen aletlerde ise sıcaklık değişimine bağlı olarak frekans değişimi $\pm 10^{-6}$ oranından daha azdır (Özgen ve Deniz 1986).

Quartz kristallerinin frekansları zamanla da değişmektedir. Bu değişme kristalin traşlanmasıyla sonra büyük oranlarda ve zamanla azalan oranlarda olmaktadır.

Sıcaklık değişimi nedeniyle oluşan frekans değişimleri uzun zaman sabit kalan sıcaklıklarda yapılan ölçmelerle azaltılabilir. Zamana bağlı olarak oluşan frekans değişimleri ise kalibrasyon yöntemlerinden biri ile belirlenir ve ölçmeler bulunacak ölçüğe göre düzeltilir.

Kırılma indisi hatası

Ölçme ortamının kırılma indisinin belirlenmesinde yapılan hatadır. Elektro-optik uzaklık ölçmelerinden ortamın kırılma indisi Barrel ve Sears eşitliği ile hesaplanabilmektedir. Barrel ve Sears eşitliği

$$n = 1 + \frac{N_{gr} \cdot P \cdot 10^{-6}}{273.2 + t} - \frac{1.5026 \cdot e \cdot 10^{-5}}{273.2 + t} \quad (5.5)$$

olarak sadeleştirilebilir (Özgen ve Deniz 1986). Burada;

- t : °C biriminde kuru sıcaklık
P: mmHg biriminde atmosferik basınç
e : mmHg biriminde kısmi su buharı basıncı
 N_{gr} : Dalga grubu için grup kırılma indisidir.

Kırılma indisi hatasının nedeni,

- (i) Barometre ve termometrenin hatalı olması
- (ii) Basınç ve sıcaklık ölçmelerinin hatalı yerde yapılması
- (iii) Basınç ve sıcaklıktaki ani değişimlerdir.

Barometre ve termometredeki alet hataları presizyonlu ölçme yapan ve sık sık kalibre edilen aletler kullanılarak giderilebilir.

Ortamın kırılma indisi, genellikle ölçülecek kenarın iki ucundaki meteorolojik ölçmelerden hesaplanmaya çalışılır. Yapılan araştırmalar, iki nokta arasında gidip gelen

ölçme dalgası için geçerli olacak ortamın kırılma indisinin, iki nokta arasındaki arazi profiline, güneşin yüksekliğine, bulut tipine ve bulutluluk oranına, havanın ve yerin sıcaklığına, havanın ve yerin nemliliğine, zeminin toprak cinsine, bitki örtüsü ve pürüzlülüğüne, rüzgar hızına bağlı olduğunu göstermiştir. Buna göre uç noktalarda elde edilen meteorolojik ölçmeler dalga yolunun çok az bir bölümünü karakterize edeceğinden, bu ölçmelerden elde edilecek kırılma indisi değeri de atmosferik model hatasını içerecektir (Özgen ve Deniz 1986).

Atmosferik model hatası, uygun atmosferik modelin seçilmesiyle, uç noktalardan başka noktalarda ve özellikle profil boyunca farklı yüksekliklerde meteorolojik ölçmeler yapılarak ya da farklı atmosferik koşullarda ölçmeleri tekrarlayarak azaltılabilir (Özgen ve Deniz 1986).

5.1.1.2. Uzunluktan bağımsız düzenli hatalar

EODMI aletlerinin sıfır noktası (ölçülen uzunluğun alettaki başlangıç noktası) genellikle aletin düşey ekseninde deşildir. Bu sapma miktarına aletin sıfır eki hatası denir. Elektro-optik uzaklık ölçerlerin yapımında belirlenen sıfır eki değeri, alette kullanılan çeşitli aygıtların zamanla yorulması ve duyarlılıklarını bir ölçüde kaybetmeleri başta olmak üzere diğer yan etkenlerin etkisi ile deşışebilmektedir (Uzel 1981). Bu yan etkenler, faz ölçümü sırasında faz kaydırma, elektrik devrelerindeki gecikmeler, iç ve dış ışın yolu üzerindeki diğer etkiler olarak özetlenebilir (Uzel 1981).

Deşişik tip ve markalardaki yansıtıcıların (reflektör) sıfır noktası farklı olabileceğı gibi kullanılan yansıtıcı sayısına bağılı olarak da deşışebilmektedir.

Bu nedenlerden dolayı, özel olarak hazırlanmış kalibrasyon bazlarında yapılan ölçmeler yardımıyla ölçme donanımının sıfır eki hatası (yansıtıcı sabiti + aletin sıfır eki hatası) belirlenir ve ölçülen uzunluklara düzeltme olarak getirilir (Uzel 1981).

5.1.1.3. Uzunluğa bağımlı periyodik olmayan düzenli hata

(Faz homojensizliğı hatası)

Elektro-optik uzaklık ölçmelerinde ve özellikle kızılötesi dalgaları ile çalışan aletlerde oluşan bir hatadır.

EODMI aletinden yansıtıcılara gönderilen dalga konisinin genişliğı, belli bir uzunluktan sonra yansıtıcının boyutlarını aşar. Bu durumda yansıtıcıdan dalganın bir bölümü yansır. Faz farkı ölçmesinde yansıyan bu bölüm etkilidir. Taşıyıcı dalga kaynağının yapısına bağılı olarak modülasyon dalgasının dalga alınları düzgün bir yüzey oluşturmaz.

Bu nedenle de dalga konisinin farklı bölümleriyle yapılan faz farkı ölçmeleri arasında düzensizlikler oluşur (Özgen ve Deniz 1986).

Faz homojensizliği nedeniyle bazı aletlerde uzaklığa bağlı olarak uzunluk hataları ortaya çıkar. Özellikle tek prizma değil de farklı simetritelere prizmalı yansıtıcılarla çalışma yapmak zorunda kalınırsa bu durum daha belirgin olur (Uzel 1981).

Faz homojensizliği hatası, çok iyi yönlendirilmiş EODMI- yansıtıcı durumunda okumalar yapılarak azaltılabilir (Özgen ve Deniz 1986).

5.1.1.4. Uzunluğa bağımlı periyodik düzenli hata

(Cyclic hatası)

Kısa mesafe elektro-optik uzaklık ölçerlerdeki en önemli periyodik düzenli hata, çevrel faz hatası (Cyclic) dir.

Referans sinyali ile ölçüm sinyali arasındaki optik bindirmeli elektriksel eşlemeler, elektro-optik uzaklık ölçerlerin gönderici ve alıcı sistemlerinde, faz ölçümünün şekline bağımsız olarak üst üste binme hatalarına neden olurlar. Üst üste bindirme hatası uzaklık sinyalinin faz konumuna bağlı olarak bir sinüs eğrisi şeklinde değişir (Özgen ve Deniz 1986).

Çevrel faz hatası için uzunluğa bir düzeltme getirilmesi düşünülemez. Çünkü, genlikleri ve fazları uzaklığa bağlıdır (Özgen ve Deniz 1986).

5.1.2. Düşey açı gözleme hataları

Düşey açı gözlemlerindeki hatalar üç ayrı grupta ele alınabilir.

- (i) Uygun gözleme yöntemleriyle elimine edilebilen veya minimuma indirilebilen düzenli hatalar.
- (ii) Kalibrasyonla giderilebilen düzenli hatalar.
- (iii) Giderilemeyen raslantısal hatalar.

Düşey açı gözlemlerinde teodolitten kaynaklanan (Aleysel) hatalar ve özellikleri özet olarak Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1'de de görüldüğü gibi bu hataların çoğunluğu düzenli karakterde olup, kalibrasyonla giderilebilmektedir.

Çizelge 5.1. Düşey açı ölçmelerindeki aletsel hatalar

HATA KAYNAKLARI	ETKİSİ	HATAYA KARŞI ETKİLİ METOD
Gözleme çizgilerinin eğikliği	Düzenli	Ölçmelerin hep aynı kişi tarafından ve yatay gözleme çizgisinin aynı noktası ile yapılması
Düşey kolimasyon hatası	Düzenli	Dürbünün I.ve II. durumunda gözlem yapılarak
Muylu eksenini eğikliği	Düzenli	Dürbünün I.ve II. durumunda gözlem yapılarak
Optik Mikrometre		
- Büyütme hatası	Düzenli	Kalibrasyon
- Cyclic hatası	Düzenli	Kalibrasyon
Düşey Daire Bölümlendirmesi		
- Uzun periyodik hata	Düzenli	Kalibrasyon
- kısa periyodik hata	Düzenli	Kalibrasyon

5.1.3. Miralardan kaynaklanan hatalar

Ortadan (Atlamalı) trigonometrik nivelmanda kullanılan her iki mira üzerine, düşey açı gözlemleri için hedef levhaları ve uzaklık ölçmeleri için de yansıtıcı monte edilmiştir. Bu bölümde de mira ile ilgili iki düzenli hata kaynağından söz edilecektir.

(i) Miraların eğik tutulması hatası

(ii) Miralardaki sıcaklık genişmesi hatası

5.1.3.1. Miraların eğik tutulması hatası

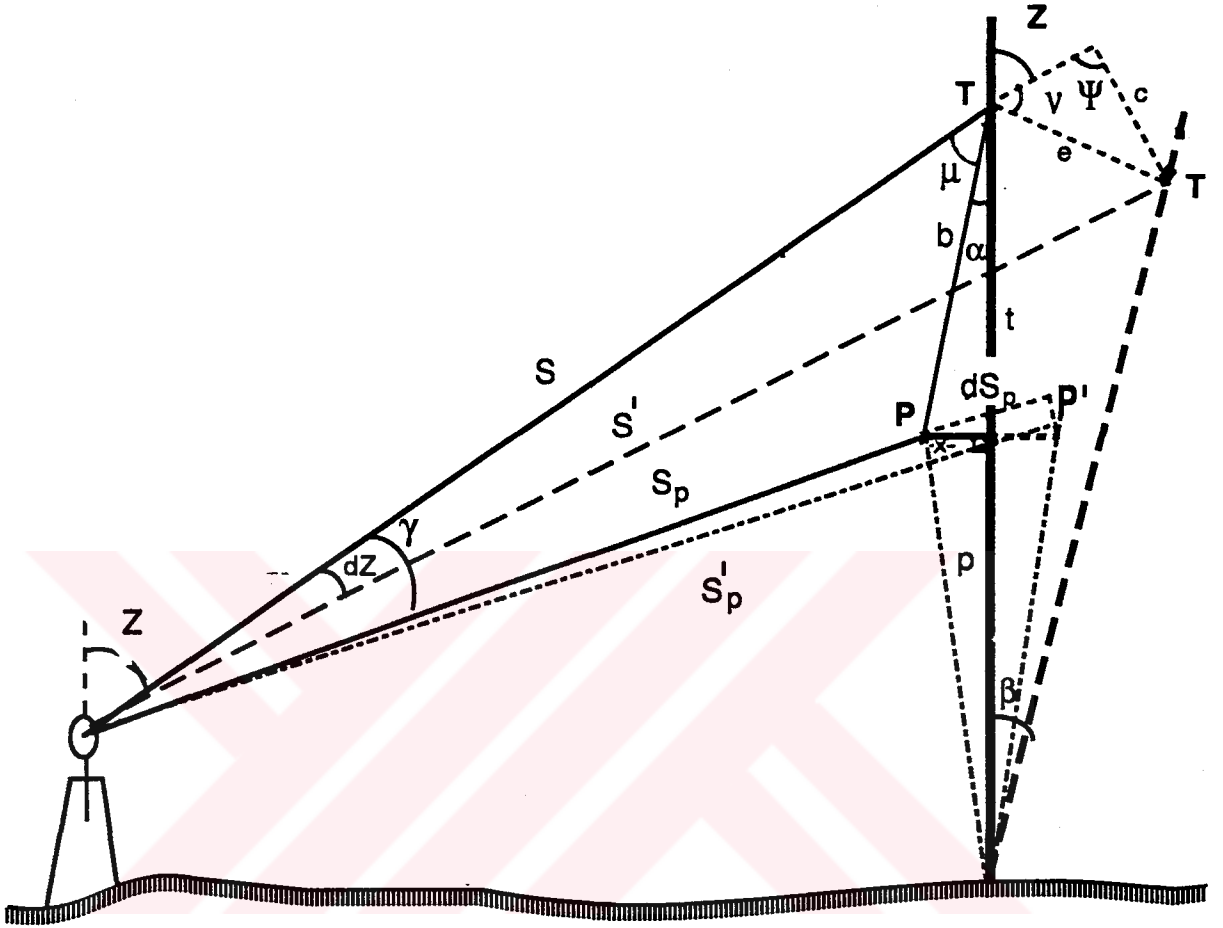
Şekil 5.2'de

Z : T hedefinde gözlenmesi gereken düşey açıyı

dZ : Miranın düşeyden sapmasının neden olduğu düşey açı hatasını,

S_p : P 'deki reflektörle ölçülen uzaklığı,

β :Miranın düşeyden sapma açısını,



Şekil 5.2. Mira düşeyleme hatası

- t : Hedefin mira tabanından olan uzaklığını,
- p : Reflektörün mira tabanından olan uzaklığını,
- x : Prizma eki düzeltmesini
- S : Hedefe indirgenmiş uzaklığı,

göstermektedir.

şekil 5.2.'de

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{x}{t-p}\right)$$

(5.6)

$$b = \frac{x}{\sin \alpha} \quad (5.7)$$

$$\mu = Z - \alpha \quad (5.8)$$

$$\gamma = \sin^{-1} \left(\frac{b}{S_p} \cdot \sin \mu \right) \quad (5.9)$$

$$S = \frac{(S_p \cdot \sin (Z + \gamma) + x)}{\sin Z} \quad (5.10)$$

yazılabilir.

(5.10) bağıntısı kullanılarak ölçülen eğik uzaklık S_p yardımıyla hedefteki eğik uzaklık hesaplanabilir.

β sapma açısının küçük olması durumunda;

$$e \cong \beta \cdot t \quad (5.11)$$

$$dS_p \cong PP' \cong \beta \cdot t \quad (5.12)$$

$$v = \frac{\pi}{2} - Z + \frac{\beta}{2} \quad (5.13)$$

ve

$$c = e \cdot \frac{\sin v}{\sin \psi} \quad (5.14)$$

olur.

(5.13) ve (5.14) bağıntısı birleştirilir ve dZ düşey açı hatası çok küçük olduğundan $\psi \cong \pi / 2$ olduğu kabul edilirse (5.14) bağıntısı,

$$c = e \cdot \cos \left(Z - \frac{\beta}{2} \right) \quad (5.15)$$

olur. Eğer $\beta / 2$ açısı çok küçük ise (5.15) bağıntısı;

$$c = e \cdot \left(\cos Z - \sin Z \cdot \frac{\beta}{2} \right) \quad (5.16)$$

şeklinde yazılır ve

$$dZ = \frac{c}{S'} \cong \frac{c}{S} ,$$

$$dZ = \frac{e}{S} \cdot \left(\cos Z - \sin Z \cdot \frac{\beta}{2} \right) \quad (5.17)$$

bulunur. (5.11) kabulü (5.17) bağıntısında yerine konursa;

$$dZ = \frac{\beta \cdot t}{S} \cdot (\cos Z - \sin Z \cdot \frac{\beta}{2}) \quad (5.18)$$

elde edilir.

(5.10) bağıntısının diferansiyeli,

$$dS \equiv dS_p \quad (5.19)$$

kabul edilir ve (5.12) bağıntısı ile birleştirilirse,

$$dS = \beta \cdot p \quad (5.20)$$

yazılabilir.

Geri veya ileri gözleme doğrultusundaki nominal yükseklik farkı

$$dH = S \cdot \cos Z \quad (5.21)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir. Bu bağıntının diferansiyeli alınır

$$d(dH) = \cos Z \cdot ds - S \cdot \sin Z \cdot dz \quad (5.22)$$

ve (5.18) ve (5.20) bağıntıları (5.22) de yerine konursa,

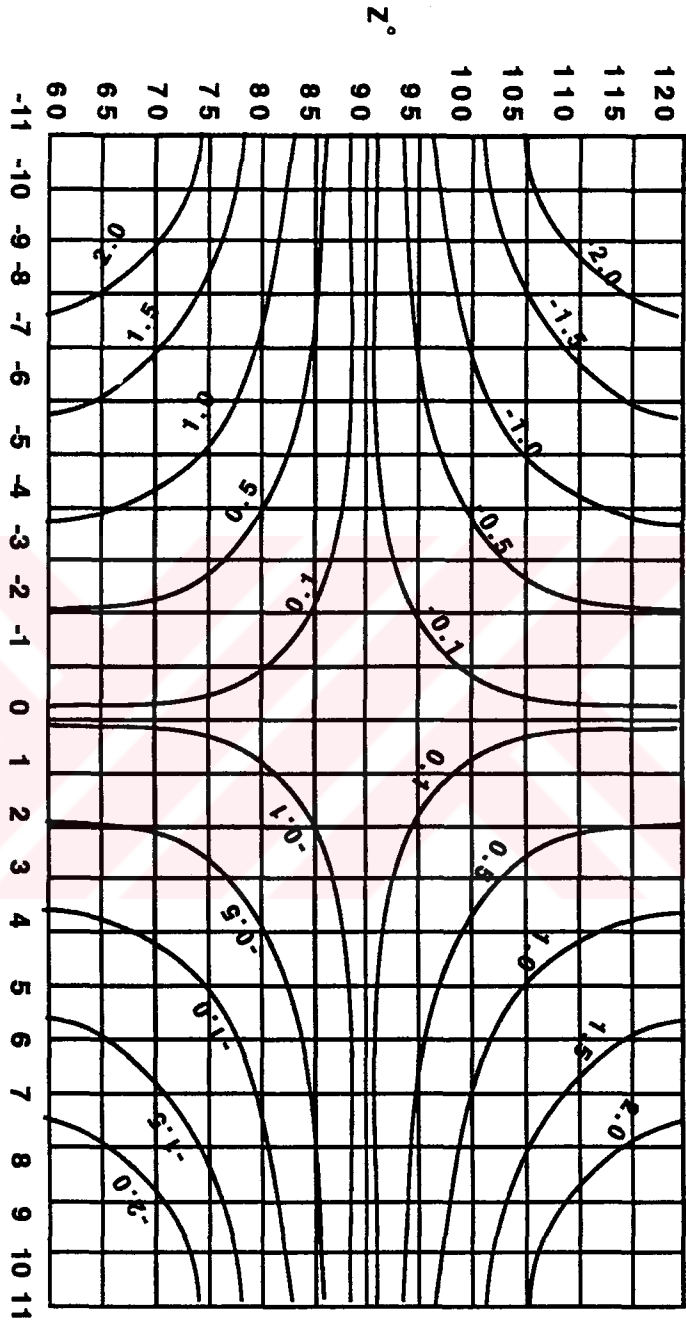
$$\epsilon_{\beta} = d(dH) = \beta \cdot p \cdot \cos Z - \beta \cdot t \left(\sin Z \cdot \cos Z + \frac{\beta}{2} \cdot \sin^2 Z \right) \quad (5.23)$$

olur.

Mira düzecinin düzensiz olması durumunda bu hata oldukça önemlidir. Miralardaki bu hata yeterli dikkat gösterilmez ise, özellikle yüksek hedef levhalarıyla çalışılması halinde nivelman hattı boyunca artabilir (Şekil 5.3). Eğer β sapma açısının rastlantısal karakterli olduğu ($E(\beta) = 0$ ve standart sapması σ_{β}) varsayılırsa (5.23) bağıntısından,

$$\sigma_{dH}^2 = (p \cdot \cos Z - t \cdot \sin Z \cdot \cos Z)^2 \cdot \sigma_{\beta}^2 \quad (5.24)$$

yazılabilir (Greening 1985).



Şekil 5.3 Mira eğikliği hatası ($p = 2.20$ ve $t = 4.50$ m. için) (Greening 1985)

5.1.3.2. Miralardaki sıcaklık genişmesi hatası

Trigonometrik nivelmanda kullanılan miraların her ikisi için de kalibrasyon sıcaklığı T_s ve ölçme sırasında geri miranın sıcaklığı T_i , ileri miranın sıcaklığı da T_j ile gösterilirse, yükseklik farkındaki hata;

$$\varepsilon_{\Delta T} = \alpha \cdot (T_j - T_s) \cdot t - \alpha \cdot (T_i - T_s) \cdot t \quad (5.25)$$

veya

$$\varepsilon_{\Delta T} = \alpha \cdot (T_j - T_i) \cdot t \quad (5.26)$$

bağıntısı ile ifade edilebilir (Baykal 1989.c).

(5.26) bağıntısında,

t : hedef yüksekliği,

α : miraların termik genişme katsayısıdır.

Bu hatanın büyüklüğü, çeşitli hedef yükseklikleri ve sıcaklık farkları için hesaplanmış ve Çizelge 5.2'de gösterilmiştir.

Bu hata, geri ve ileri miraların birinin gölgede, diğerinin ise doğrudan güneş ışığı altında kalması durumunda oldukça büyük değerlere ulaşılabilir (Ceylan 1988).

ΔT 'nin raslantısal nitelikte ($E(\Delta T) = 0$ ve standart sapması $\sigma_{\Delta T}$) olduğu varsayılırsa (5.26) bağıntısından

$$\sigma_{dH}^2 = (\alpha \cdot t)^2 \cdot \sigma_{\Delta T}^2 \quad (5.27)$$

elde edilir (Greening 1985).

Çizelge 5.2. Farklı sıcaklık genişmesinden ortaya çıkan hata [mm](invar şerit için $\alpha = 1.5 \cdot 10^{-6} \text{ mm} / ^\circ\text{C}$)

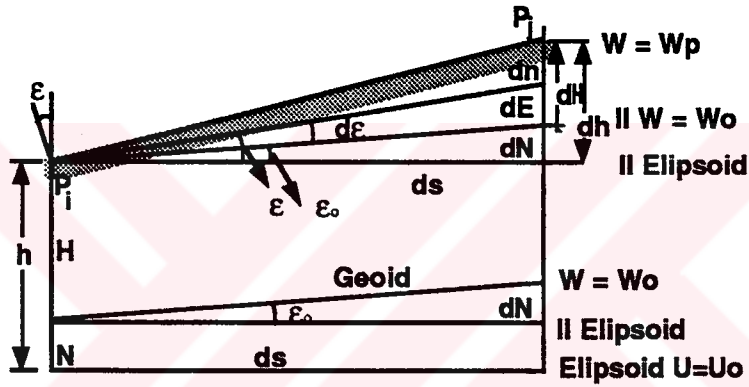
t [m] \ $ \Delta T $ [°C]	2	5	10	15
1.5	0.00	0.01	0.02	0.03
2.5	0.01	0.02	0.04	0.06
3.5	0.01	0.03	0.05	0.08
4.5	0.01	0.03	0.07	0.10

5.2. Diğer Hata Kaynakları

5.2.1. Çekül sapmasının etkisi

Gözleme istasyonlarındaki çekül sapmaları biliniyorsa bölüm 4'deki (4.13) ve (4.22) bağıntıları yardımıyla elipsoidal yükseklik farkları hesaplanabilir. Ancak çoğu zaman çekül sapmaları bilinmez ve bu nedenle de hesaplamalarda dikkate alınmaz. Bu durumda, düzeltilmemiş trigonometrik yükseklik farklarının indirgenmemiş geometrik nivelmana eşit olması istenir. Bu nedenle önce geometrik nivelman ve trigonometrik nivelman yöntemlerinin fiziksel özelliklerinin incelenmesi gerekir.

Geometrik nivelmanda bir istasyon noktasındaki ölçmeler Şekil 5.4'de gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Geometrik nivelman ve yer gravite alanı (Torge 1980)

Şekil 5.4 de

- h : Elipsoidal yüksekliği
- H : Ortometrik yüksekliği
- N : Geoid undulasyonunu
- ds : Gözleme uzaklığını
- ϵ : Çekül sapmasını
- ϵ_0 : Geoid sapmasını

göstermek üzere,

$$N = h - H \quad (5.28)$$

yazılabilir.

(5.28) bağıntısı P_j, P_k noktaları için diferansiyel anlamda yazılırsa

$$dh = dH + dN \quad (5.29)$$

olur. Buradaki dH, dn geometrik nivelman sonucundan ve dE ortometrik düzeltmeden oluşur.

$$dH = dn + dE \quad (5.30)$$

Yine aynı şekilden dN için,

$$dN = -\epsilon \cdot dS - dE \quad (5.31)$$

yazılabilir. Burada çekül sapmasının eksi işaretli alınmasının nedeni; $W = \text{sabit yüzeyinin}$ $U = \text{Sabit yüzeyi üzerinde olması durumunda artı işaretli bir } dN \text{ elde etmek içindir (Torge 1980). Sonuçta, (5.30) ve (5.31), (5.29)'de yerine konur ve integrali alınırsa elipsoidal yükseklik farkı için;$

$$dh_{jk} = h_k - h_j = \sum_j^k dn - \int_j^k \epsilon \cdot dS \quad (5.32)$$

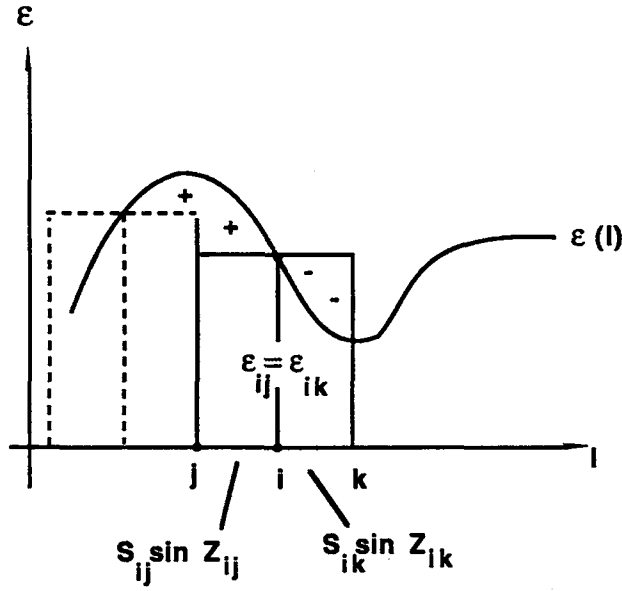
yazılabilir (Işık 1989).

Trigonometrik yükseklik farklarının fiziksel özelliği, bölüm 4.1 ve 4.2'deki (4.13) ve (4.22) bağıntılarından hareketle yukarıda verilen (5.32) bağıntısı yardımıyla açıklanabilir.

Buna göre; Ortadan (Atlamalı) trigonometrik nivelman için,

$$dh_{jk} = dH_{jk}^A - (S_{ik} \cdot \sin Z_{ik} \cdot \epsilon_{ik} + S_{ij} \cdot \sin Z_{ij} \cdot \epsilon_{ij}) = \sum_j^k dn - \int_j^k \epsilon \cdot dS \quad (5.33)$$

bağıntısı elde edilir (Greening 1985). Bu eşitlik, $\int_j^k \epsilon \cdot dS$ integralinin, $S_{ik} \cdot \sin Z_{ik} \cdot (S_{ij} \cdot \sin Z_{ij})$ genişlikli ve ϵ_{ik} (ϵ_{ij}) yükseklikli dikdörtgenin alanına eşit olması halinde, ortadan trigonometrik nivelman ile geometrik nivelmanın aynı sonucu vereceği anlamını taşımaktadır (Şekil 5.5) (Greening 1985).



Şekil 5.5. Ortadan trigonometrik nivelmandaki koşul

Benzer olarak karşılıklı trigonometrik nivelman için,

$$dh_{ij} = dh_{ij}^K - \frac{S_{ij} \cdot \sin Z_{ij}}{2} \cdot (\epsilon_{ij} + \epsilon_{ji}) = \sum_i^j dn - \int_i^j \epsilon \cdot dS \quad (5.34)$$

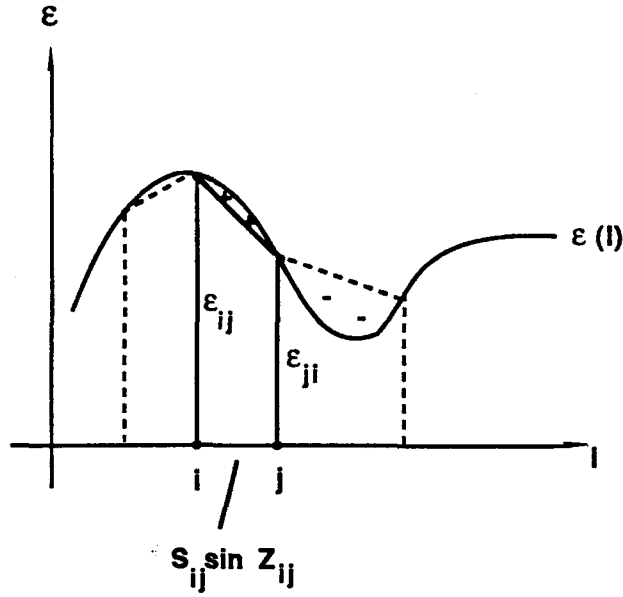
yazılabilir (Greening 1985).

(5.34) bağıntısı, $\int_i^j \epsilon \cdot dS$ integralinin, $S_{ij} \cdot \sin Z_{ij}$ yükseklikli ve taban

uzunlukluları ϵ_{ij} , ϵ_{ji} olan yamuğun alanına eşit olması halinde karşılıklı trigonometrik nivelman ile geometrik nivelmanın aynı sonucu vereceği anlamını taşımaktadır (Şekil 5.6) (Ulrike and Thies 1986)

5.2.2. Atmosferik refraksiyonun etkisi

İlk olarak, bilinen bir refraksiyon modeli incelenirse atmosferik refraksiyondan dolayı S uzaklıktaki bir hedefe uygulama hatası, $s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$ 'deki ($s_1 + s_2 + s_3 + \dots + s_n = S$) $k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$ refraksiyon katsayılarının bir fonksiyonu olarak tanımlanabilir (Angus-Leppan 1979).



Şekil 5.6. Karşılıklı trigonometrik .nivelman için koşul (Ulrike and Thies 1986)

Buna göre yapılan araştırmalar sonucunda aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir;

$$\tau = \frac{1}{2R} \{ s_1 \cdot [k_1 \cdot S + k_2 \cdot (S - s_1)] + s_2 \cdot [k_2 \cdot (S - s_1) + k_3 \cdot (S - s_1 - s_2)] + \dots + s_n \cdot [k_n \cdot (S - s_1 - s_2 - \dots - s_{n-1})] + 0 \} \quad (5.35)$$

Refraksiyon katsayılarının geçki boyunca sabit kaldığı (ışık yolunun dairesel olduğu) düşünülürse τ . refraksiyon hatası, daha basit bir şekilde yazılabilir (Angus-Leppan 1979);

$$\tau = \frac{s^2 \cdot k}{2R} \quad (5.36)$$

Gözleme doğrultusu boyunca ortalama bir yükseklikteki dT/dZ sıcaklığın düşey değişimi biliniyorsa, refraksiyon katsayısı (5.37) bağıntısıyla hesaplanabilir (Chrzanowski 1985);

$$k = 502 \cdot \frac{0.342 + \frac{dT}{dZ}}{T^2} \quad (5.37)$$

Burada, T: mutlak sıcaklık (K°) dır.

Yerden Z yükseklikteki dT/dZ 'nin değişimi doğrudan ölçülebilir veya sayısal formüllerinden hesaplanabilir;

$$T = a + b \cdot Z^c \quad (5.38)$$

$$\frac{dT}{dZ} = b \cdot c \cdot Z^{(c-1)} \quad (5.39)$$

a, b ve c katsayıları, düşey doğrultuda üç veya daha fazla farklı yüksekliklerde yapılan sıcaklık ölçmelerinden hesaplanabilir (Chrzanowski 1985, Banger 1982).

dT/dZ 'nin düzensiz değişimi gözönüne alındığında yukarıda açıklanan yol yardımıyla bulunan refraksiyon düzeltmesine, ölçme otoritelerince kuşku ile bakılmaktadır (Banger 1982). Bu nedenle pratik çözüm için refraksiyon etkisinin uygun ölçme modelleriyle raslantısal bir hale getirilmesi önerilmiştir.

Trigonometrik nivelman ölçmelerinde geri ve ileri gözleme doğrultularındaki refraksiyon katsayıları çok az da olsa farklı olabilmektedir. Bu nedenle, geri ve ileri gözleme doğrultularındaki refraksiyon katsayılarının farkı Δk ,

$$\Delta k = k_i - k_g \quad (5.40)$$

olur.

Δk 'nin sıfıra çok yakın bir değer olduğu ve raslantısal bir nitelikte olduğu varsayılır ve standart sapması $\sigma_{\Delta k}$ ile gösterilirse, toplam refraksiyon hatasının standart sapması

Ortadan (Atlamalı), trigonometrik nivelman için,

$$\sigma_{\tau_A}^2 = \frac{S^4}{4R^2} \cdot \sigma_{\Delta k}^2 \quad (5.41)$$

Karşılıklı trigonometrik nivelman için;

$$\sigma_{\tau_K}^2 = \frac{S^4}{16R^2} \cdot \sigma_{\Delta k}^2 \quad (5.42)$$

olur (Rueger and Brunner 1982).

Bu konuda yapılmış araştırmalar sonucunda, Δk belirsizliğinin standart sapması olarak, ortadan trigonometrik nivelman için $\sigma_{\Delta k} = \pm 0.76$, karşılıklı trigonometrik nivelman için $\sigma_{\Delta k} = \pm 0.50$ ve eşzamanlı karşılıklı trigonometrik nivelman için $\sigma_{\Delta k} = \pm 0.30$ değerleri verilmektedir (Rueger and Brunner 1981, Greening 1985).

Sonuçta, $S \leq 200$ m'lik gözleme uzaklıklarında karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelmanın düzenli refraksiyon hatasından etkilenmediği, atlamalı yöntemde ise hatanın ihmal edilebilecek kadar küçük değerlerde olduğu tesbit edilmiştir. Ayrıca, 1.5 m ile 4.5 m arası değişen hedef yüksekliklerinde ve farklı atmosfer koşullarında yapılan ölçmeler sonucunda refraksiyon hatasının raslantısal olması için en uygun zamanın günün 10.⁰⁰ ile 16.⁰⁰ saatleri arası olduğu belirlenmiştir (Chrzanowski 1985, Rueger and Brunner 1982).

6. TRİONOMETRİK NIVELMANDA DOĞRULUK ANALİZİ

6.1. Ortadan (Atlamalı) Trigonometrik Nivelmanda Doğruluk Analizi

Ortadan trigonometrik nivelmanda yükseklik farkının hesabı için (4.14) bağıntısı verilmişti. Bu bağıntıya diğer hata kaynaklarını ifade eden bağıntılar eklendiğinde, (4.14) bağıntısı,

$$\begin{aligned}
 dH_{jk}^A &= S_{ik} \cdot \cos Z_{ik} - S_{ij} \cdot \cos Z_{ij} \\
 &+ \frac{1}{2R_m} \cdot (S_{ik}^2 \cdot \sin^2 Z_{ik} - S_{ij}^2 \cdot \sin^2 Z_{ij}) : \text{Yer eğrilik düzeltmesi} \\
 &+ \left. \begin{aligned} &\beta \cdot p \cdot \cos Z_{ik} - \beta \cdot t \left(\sin Z_{ik} \cdot \cos Z_{ik} + \frac{\beta}{2} \cdot \sin^2 Z_{ik} \right) \\ &+ \beta \cdot p \cdot \cos Z_{ij} - \beta \cdot t \left(\sin Z_{ij} \cdot \cos Z_{ij} + \frac{\beta}{2} \cdot \sin^2 Z_{ij} \right) \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{Miranın Eğik tutulması} \\ \text{hatası düzeltmesi} \end{array} \\
 &+ \alpha \cdot t \cdot \Delta T \quad \text{Sıcaklık değişimi düzeltmesi} \quad (6.1) \\
 &+ \tau_A \quad \text{Refraksiyon düzeltmesi} \\
 &+ \epsilon_{\Delta t} \quad \text{Hedef yükseklikleri arasındaki fark} \\
 &+ \epsilon_{\Delta T} \quad \text{Diğer Hatalar}
 \end{aligned}$$

şeklinde yazılabilir. Burada, (4.14) bağıntısına eklenen hataların birbirinden bağımsız ve raslantısal nitelikte olduğu varsayılacaktır. $S_{ij} \equiv S_{ik}$ olması durumunda yer eğriliği düzeltmesinin sıfıra çok yakın bir değerde ve raslantısal nitelikli olduğu kabul edilerek bundan sonraki analizlerde dikkate alınmamıştır.

(6.1) bağıntısına hata artma yasası uygulandığında,

$$\begin{aligned}
 \sigma_{dH}^2 &= \cos^2 Z_{ik} \cdot \sigma_{S_{ik}}^2 + \cos^2 Z_{ij} \cdot \sigma_{S_{ij}}^2 \\
 &+ S_{ik}^2 \cdot \sin^2 Z_{ik} \cdot \sigma_{Z_{ik}}^2 + S_{ij}^2 \cdot \sin^2 Z_{ij} \cdot \sigma_{Z_{ij}}^2 \\
 &+ (p \cdot \cos Z_{ik} - t \cdot \sin Z_{ik} \cdot \cos Z_{ik})^2 \cdot \sigma_{\beta}^2 \\
 &+ (p \cdot \cos Z_{ij} - t \cdot \sin Z_{ij} \cdot \cos Z_{ij})^2 \cdot \sigma_{\beta}^2 \quad (6.2) \\
 &+ (\alpha \cdot t)^2 \cdot \sigma_{\Delta T}^2 \\
 &+ \sigma_{\Delta t}^2 + \sigma_{\tau_A}^2 + \sigma_e^2
 \end{aligned}$$

bulunur.

Bir nivelman mirası için σ_{β}^2 li terim (5.24) bağıntısı ile ,miralardaki sıcaklık değişimini gösteren $\sigma_{\Delta T}^2$ li terim ise (5.27) bağıntısı ile hesaplanabilir. Bu analizin daha kolay ve anlaşılabilir olması için;

$$\begin{aligned}
 S &\equiv S_{ik} \equiv S_{ij} \\
 Z &\equiv Z_{ik} \equiv Z_{ij} \\
 \sigma_S &\equiv \sigma_{S_{ik}} \equiv \sigma_{S_{ij}} \\
 \sigma_Z &\equiv \sigma_{Z_{ik}} \equiv \sigma_{Z_{ij}}
 \end{aligned} \tag{6.3}$$

olduğu varsayılabilir. (6.3) kabulleri (6.2) bağıntısında yerine konulursa;

$$\begin{aligned}
 \sigma_{dH}^2 &= 2 \cdot \cos^2 Z_{ik} \cdot \sigma_{S_{ik}}^2 + 2 \cdot \sin^2 Z_{ik} \cdot \sigma_Z^2 \\
 &+ 2 \cdot (p \cdot \cos Z_{ik} - t \cdot \sin Z_{ik} \cdot \cos Z_{ik})^2 \cdot \sigma_{\beta}^2 \\
 &+ (\alpha \cdot t.)^2 \cdot \sigma_{\Delta T}^2 \\
 &+ \sigma_{\Delta t}^2 + \frac{S^4}{4R^2} \cdot \sigma_{\Delta k}^2 + \sigma_e^2
 \end{aligned} \tag{6.4}$$

elde edilir.

Bir nivelman hattındaki toplam yükseklik farkı, n sayıdaki istasyon yükseklik farkının toplanması ile bulunabilir;

$$\Delta H = \sum_{i=1}^n dH_i \tag{6.5}$$

Herbir istasyon noktası için hesaplanan yükseklik farklarının birbirleriyle korelasyonsuz olduğu kabul edilirse, toplam yükseklik farkının standart sapması,

$$\sigma_{\Delta H}^2 = n \cdot \sigma_{dH}^2 \tag{6.6}$$

olur (Greening 1985).

(6.6) bağıntısındaki n, kenar uzunluklarının toplamının (K) ortalama kenar uzunluğuna (2S) bölünmesi ile bulunabilir,

$$n = \frac{K}{2S} \quad (6.7)$$

ve (6.7), (6.8) bağıntısında yerine konursa;

$$\sigma_K^2 = \sigma_{\Delta H}^2 = \frac{K}{2S} \sigma_{dH}^2 \quad (6.8)$$

elde edilir (Greening 1985).

6.1.1. Uzunluk ölçmesindeki raslantısal hata

Kısa mesafe elektro-optik uzaklık ölçerler (EODMI) ile ölçülen uzunluğun standart sapması, bölüm 5.1'de verilen (5.1.1) bağıntısındaki değişkenlerin korelasyonsuz olduğu kabul edilerek hata artma yasası uygulandığında,

$$\sigma_S^2 = m^2 \cdot \sigma_u^2 + \sigma_d^2 + \sigma_Z^2 + \sigma_n^2 + \sigma_c^2 \quad (6.9)$$

bağıntısı ile ifade edilebilir.

6.1.2. Düşey açı gözlemlerindeki raslantısal hatalar

Düşey açı gözlemlerinde, hedefe tatbik (uygulama), mikrometre okuma ve düşey indeksleme (kompansasyon) hatası gibi raslantısal karakterli hatalar oluşabilmektedir (Hirsch 1984). Birkaç yüz metrelik gözleme uzaklığında,

hedefe yöneltme hatası

$$\sigma_{pt} \cong \frac{30''}{M}, \quad (6.10)$$

düşey açı mikrometresinde çakıştırma ve okuma hatası (Gözlemci)

$$\sigma_{rd} \cong 2.5 \cdot d'' \quad (6.11)$$

dır.

Burada,

M: dürbünün büyütmesi

d: optik mikrometrenin en küçük birimidir.

Ayrıca, düşeyleme (kompanzasyon) hatası (σ_l) da raslantısal nitelikte bir hata olarak kabul edilebilir. Buna göre düşey açı gözlemlerinin standart sapması, ölçümede uygulanan seri sayısı da dikkate alınarak,

$$\sigma_z^2 = \frac{\left(\frac{30''}{M}\right)^2 + (2.5 \cdot d'')^2 + (\sigma_l)^2}{2n} \quad (6.12)$$

bağıntısı ile ifade edilebilir (Greening 1985). Burada, n seri sayısıdır.

6.1.3. Nivelman miralarındaki raslantısal eğiklik hatası

Nivelman mirasının düşeylenmesinde kullanılan düzeyin duyarlılığına bağlı olarak değişir.

6.1.4. Miralardaki sıcaklık farkının sebep olduğu raslantısal hata

Trigonometrik nivelmanın hata analizlerinde, miralardaki sıcaklık farkının standart sapması;

$$\sigma_{\Delta T} \cong 3^\circ \text{C}$$

alınabilir (Greening 1985).

6.1.5. Miranın kalibrasyonundaki raslantısal hata

Ortadan (Atlamalı) trigonometrik nivelmanda iki nivelman mirası kullanıldığından, her iki mira üzerinde bulun hedeflerin eşit yükseklikte olması gerekir. Bu ise kalibrasyonla sağlanabilir. WILD N3 presizyonlu nivo kullanılarak yapılan kalibrasyonun standart sapması,

$$\sigma_{\Delta t} \cong 0.10 \text{ mm}$$

alınabilir (Chrzanowski 1989).

6.1.6. Refraksiyon hatası

Ortadan (Atlamalı) trigonometrik nivelmandaki refraksiyon hatasının standart sapması olarak daha önce verildiği gibi,

$$\sigma_{\Delta k} \equiv 0.76$$

değeri alınabilir (Rueger and Brunner 1982).

6.2. Karşılıklı Trigonometrik Nivelmanın Doğruluk Analizi

Karşılıklı düşey açı gözlemleriyle hesaplanan trigonometrik yükseklik farkları daha önce verilmiş olan (4.23) bağıntısı ile hesaplanabilir.

Bu bağıntıya, refraksiyon hatası ve belirlenememiş diğer hata terimleri eklendiğinde,

$$dH_{ij}^K = \frac{S_{ij}}{2} \cdot (\cos Z_{ij} - \cos Z_{ji}) + \tau_K + \epsilon_e \quad (6.13)$$

şeklinde ifade edilebilir. Ortadan (Atlamalı) trigonometrik nivelmana benzer şekilde (6.13) bağıntısına hata artma yasası uygulandığında, bir istasyon noktasındaki yükseklik farkının standart sapması,

$$\sigma_{dH}^2 = \cos^2 Z_{ik} \cdot \sigma_S^2 + \frac{S^2 \sin^2 Z}{2} \cdot \sigma_Z^2 + \sigma_{\tau_K}^2 + \sigma_{\epsilon_e}^2 \quad (6.14)$$

şeklinde ifade edilebilir. K kilometrelik karşılıklı trigonometrik nivelmanın standart sapması;

$$\sigma_K^2 = \frac{K}{S} \cdot \sigma_{dH}^2 \quad (6.15)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir (Greening 1985). Burada, S ;gözleme uzaklığıdır.

Karşılıklı trigonometrik nivelmandaki uzaklık ölçmeleri ve düşey açı gözlemlerinin standart sapması, ortadan (Atlamalı) trigonometrik nivelmandakine benzer şekilde hesaplanabilir.

Refraksiyon hatasının standart sapması;

$$\sigma_{\Delta k} \equiv 0.30$$

olarak alınabilir (Rueger and Brunner 1982).

6.3. 1 Km'lik Trigonometrik Nivelmanın Standart Sapması

Karşılıklı ve ortadan (atlamalı) trigonometrik nivelman yöntemlerinin her ikisi için $\sigma_{\Delta k} = 0.50$ alınarak, çeşitli gözleme uzaklıklarındaki standart sapmalar Şekil 6.1'de grafik olarak gösterilmiştir (Rueger and Brunner 1982).

Bir çok bilim adamı, trigonometrik nivelman standart sapmasının büyük olmasının nedenini, uzunluk ölçmelerinin yüksek bir doğrulukta yapılmamış olmasına bağlamakta ve özellikle kısa mesafe elektro-optik uzaklık ölçerlerin kalibrasyonunun daha dikkatli bir şekilde yapılması halinde bu doğruluğun daha da yükseleceğini iddia etmektedir (Whalen 1984, Chrzanowski 1985).

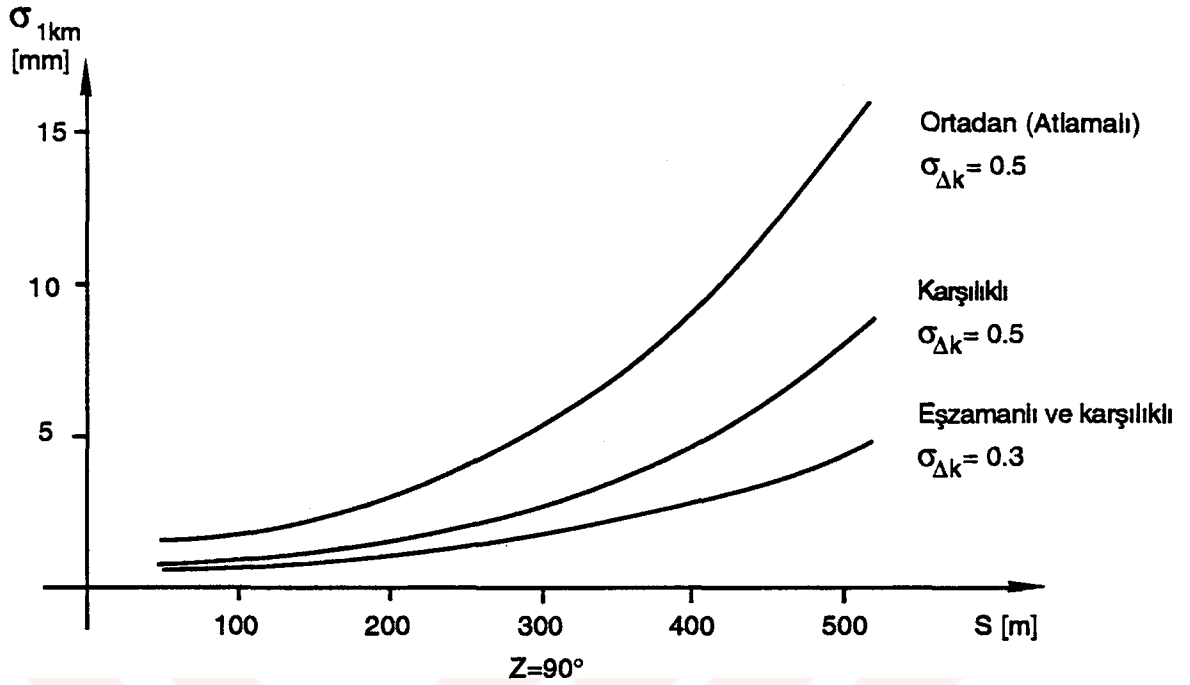
Bu ön analiz sonucunda "trigonometrik nivelman yöntemleri birkaç yüz metrelik gözleme uzaklıkları ve yerden birkaç metre yukarıdan geçen gözleme ışınları ile özellikle engebeli arazilerde uygulanabilir bir tekniktir" sonucuna varılmaktadır.

6.4. Düzenli Hataların Etkisi

6.4.1. Ortadan trigonometrik nivelmandaki düzenli hataların etkisi

Ortadan (atlamalı) trigonometrik nivelmandaki düzenli düşey açı ve uzunluk hatalarının etkisi (6.1) bağıntısındaki birinci terimin diferansiyeli alınarak hesaplanabilir,

$$d(dH_{jk}^A) = \cos Z_{ik} ds_{ik} - \cos Z_{ij} ds_{ij} - S_{ik} \sin Z_{ik} dZ_{ik} + S_{ij} \sin Z_{ij} dZ_{ij} \quad (6.16)$$



Şekil 6.1. 1 km'lik trigonometrik nivelmanın standart sapması (Greening 1985)

Bu analizi kolaylaştırmak için aşağıdaki kabuller yapılır,

$$Z \cong Z_{ik} \cong \pi - Z_{ij} \quad (6.17)$$

$$S \cong S_{ik} \cdot \sin Z_{ik} \cong S_{ij} \sin Z_{ij}$$

ve (6.16) bağıntısında yerlerine konulursa;

$$d(dH_{jk}) = \cos Z \cdot (ds_{ik} + ds_{ij}) - S \cdot (dZ_{ij} - dZ_{ik}) \quad (6.18)$$

bağıntısı elde edilebilir.

(6.18) bağıntısındaki birinci terim, düzenli uzunluk hatalarını göstermektedir. düzenli uzunluk hataları özellikle eğimli nivelman hatlarında önemli etkilere neden olabilirler. Daha açık bir ifade ile düzenli uzunluk hataları minimuma indirilmelidir.

(6.18) bağıntısındaki ikinci terim, her bir istasyon noktası için $dZ_{ij} - dZ_{ik} = \text{Sa- bit}$ olması durumunda significant yükseklik farkı hatalarını göstermektedir. Düz arazilerde

bu hata pek etkili değildir. Teodolitlerin kalibrasyonu daha detaylı bir şekilde yapılırsa düzenli düşey açı hataları belirlenebilir (Hirsch 1984).

Düzenli mira eğikliği hatası, gözleme doğrultusu çok eğimli ise significant yükseklik farkı hatası gibi görülebilir. Bu hatanın etkisi, 4.5 m'den daha aşağı yükseklikteki hedefler için oldukça düşüktür (Şekil 5.3).

Ortadan (atlamalı) trigonometrik nivelmanda miralarda ve teodolit sehpasında düzenli çökme veya yükselme hatası oluşabilir. Ancak geometrik nivelmana göre trigonometrik nivelmanda istasyon sayısı az olacağından bu hatanın etkisi çok az olmaktadır (Greening 1985).

6.4.2. Karşılıklı trigonometrik nivelmanda düzenli hataların etkisi

Karşılıklı trigonometrik nivelmanda düzenli hata etkisi (6.13) bağıntısının diferansiyeli alınarak belirlenebilir;

$$d(dH_{ij}^K) = (\cos Z_{ij} - \cos Z_{ji}) \frac{ds_{ij}}{2} + (\sin Z_{ji} \cdot dZ_{ji} - \sin Z_{ij} \cdot dZ_{ij}) \cdot \frac{S_{ij}}{2} \quad (6.19)$$

Bu analizi kolaylaştırmak için,

$$Z_{ji} \equiv \pi - Z_{ij} \quad (6.20)$$

$$\sin Z_{ji} \equiv \sin Z_{ij} \equiv 1$$

olduğu kabul edilir ve (6.18) bağıntısında yerlerine konursa,

$$d(dH_{ij}^K) = \cos Z_{ij} ds_{ij} + (dZ_{ji} - dZ_{ij}) \cdot \frac{S_{ij}}{2} \quad (6.21)$$

olur.

(6.21) bağıntısı ile (6.18) bağıntısı karşılaştırıldığında, karşılıklı trigonometrik nivelman yöntemi, ortadan (atlamalı) trigonometrik nivelman yöntemine benzer aletsel hatalardan etkilenmemekte, ancak karşılıklı trigonometrik nivelman yönteminde iki teodolit kullandığı için düşey açı hatalarının etkisi daha karmaşık olmaktadır.

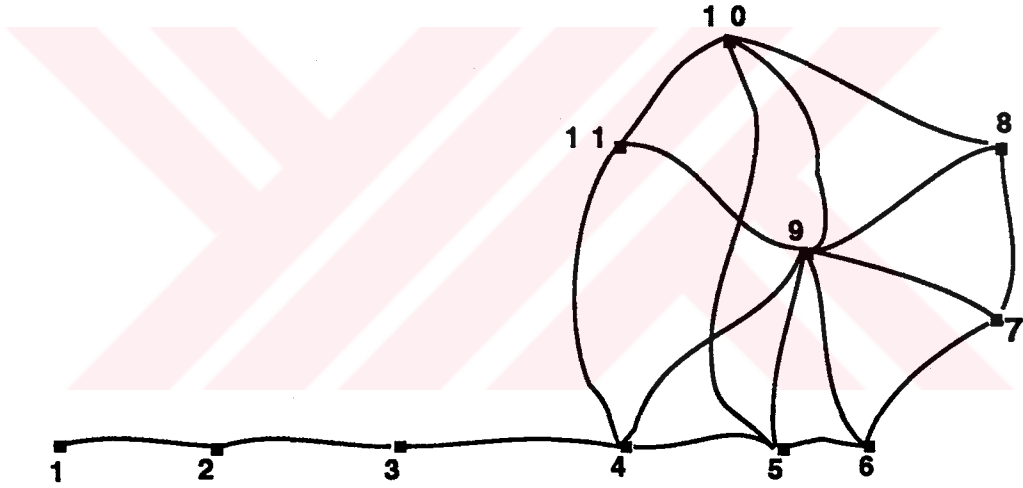
7. UYGULAMA

7.1. Test Ağı ve Özellikleri

Konya Selçuk Üniversitesi Alaaddin Keykubat Kampüs Alanı içinde kurulan nivelman test ağı 11 noktadan oluşmaktadır (Şekil 7.1).

Ağın kenar uzunlukları 120 m. ile 650 m. arasında değişmektedir. Ağdaki 1,2,3,4 nolu noktaların oluşturduğu hat sabit eğimlidir. Diğer kenarlar ise oldukça arızalı bir topoğrafik yapıya sahiptir.

Nivelman ağı noktalarının herbiri Büyük Ölçekli Haritaların Yapım Yönetmeliği'ne uygun olarak piye biçiminde tesis edilmiştir (Şekil 7.2). Bu piyelerin yan yüzeyine ve zeminden 40-60 cm. yukarıya, aynı yönetmeliğin belirttiği esaslara uygun olarak nivelman röper demirleri monte edilmiştir (Şekil 7.3).

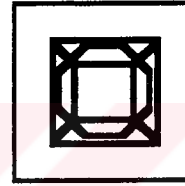
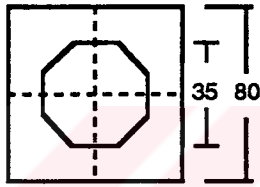
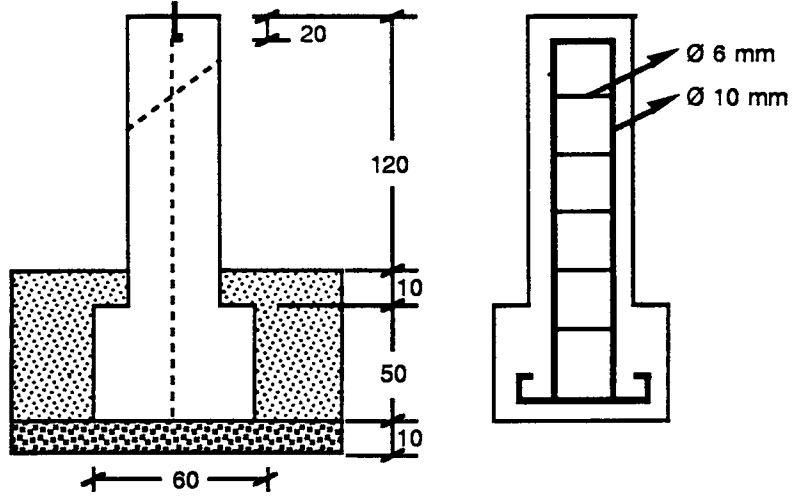


Şekil 7.1. Nivelman test ağı

7.2. Ölçme Sisteminin Yapısı ve Dizaynı

7.2.1. Uygulama için gerekli donatılar

Bu araştırmada öngörülen ölçme yöntemlerinin uygulanabilmesi için gerekli temel donatılar aşağıda verilmiştir:



(Ölçüler mm dir.)

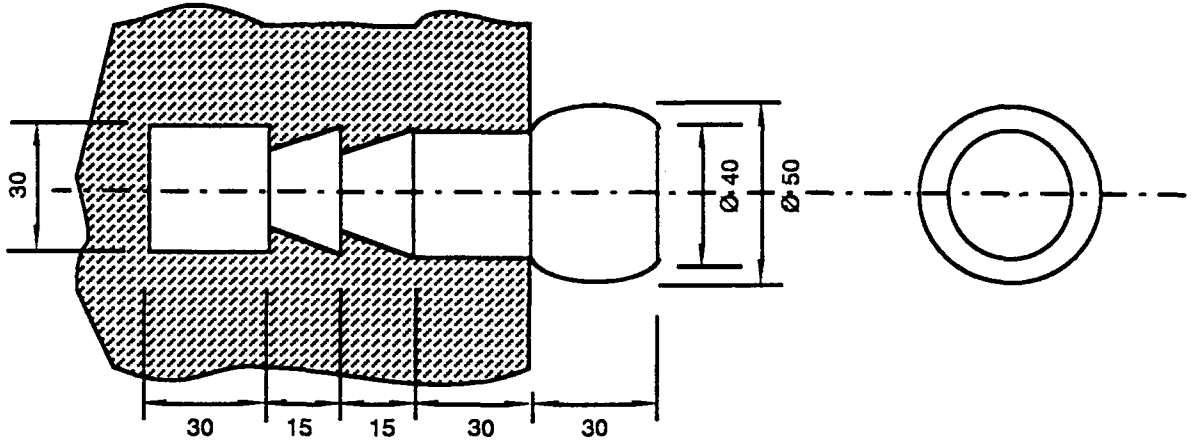
a) Kesit

b) Donatı durumu

Şekil 7.2. Normal zeminde pilye tesisi (B.Ö.H.Y.Yönetmeliği)

a) Presizyonlu nivelman yöntemi için:

- Bir adet presizyonlu nivo (WILD N3, 366608)
- Bir adet nivo sehпасı (tek parçalı)
- İki adet invar mira (3 m.'lik WILD marka, 3830)
- İki adet mira altlığı (3.5 kg.)
- Bir adet termometre
- Bir adet barometre
- 6 kişilik ölçme ekibi (1 nivo opr., 2 miracı, 1 yazıcı, 2 şenör)



(Ölçüler mm dir.)

Şekil 7.3.Duvarda nivelman röper demiri (B.Ö.H.Y.Yönetmeliği)

(b) Ortadan (Atlamalı) trigonometrik nivelman yöntemi için:

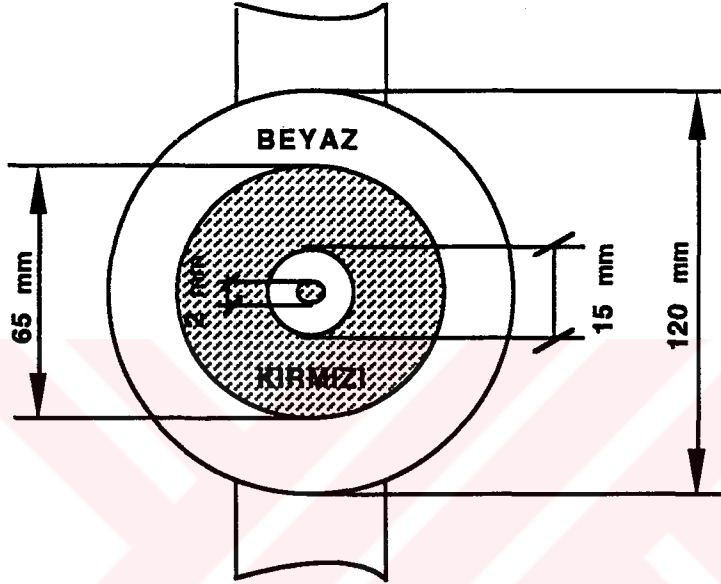
- Bir adet elektronik takeometre (SOKHISHA SET2, 99256)
- Bir adet takeometre sehpası
- Bir adet otomatik kayıt ünitesi (SOKHISHA SDR2)
- İki adet 2 m.'lik invar mira (Her birinin üzerine iki hedef levhası ve bir yansıtıcı yerleştirilmiş KERN marka invar mira, 197837-197838)
- İki adet mira aıtlığı (3.5 kg.)
- Bir adet psikrometre
- Bir adet barometre
- 4 kişilik ölçme ekibi (1 alet opr., 2 miracı, 1 yardımcı)

c) Karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelman yöntemi için:

- İki adet elektronik takeometre (SOKHISHA SET2, 99256, 92642).
- İki adet takeometre sehpası
- İki adet otomatik kayıt ünitesi (SOKHISHA SDR2)
- İki adet telsiz
- İki adet psikrometre
- İki adet barometre
- Bir adet yansıtıcı
- 4 kişilik ölçme ekibi (2 alet opr., 2 yardımcı)

7.2.2. Hedef levhalarının dizaynı ve kalibrasyonu

Ortadan trigonometrik nivelman yöntemi için gerekli hedef levhalarının seçiminde 200-300 m arası değişen gözleme uzaklıkları dikkate alınarak değişik boyutlara ve yapıya sahip hedef levhalarındaki yöneltme doğruluğu araştırılmış, sonuçta Şekil 7.4'deki hedef levhası seçilmiştir.



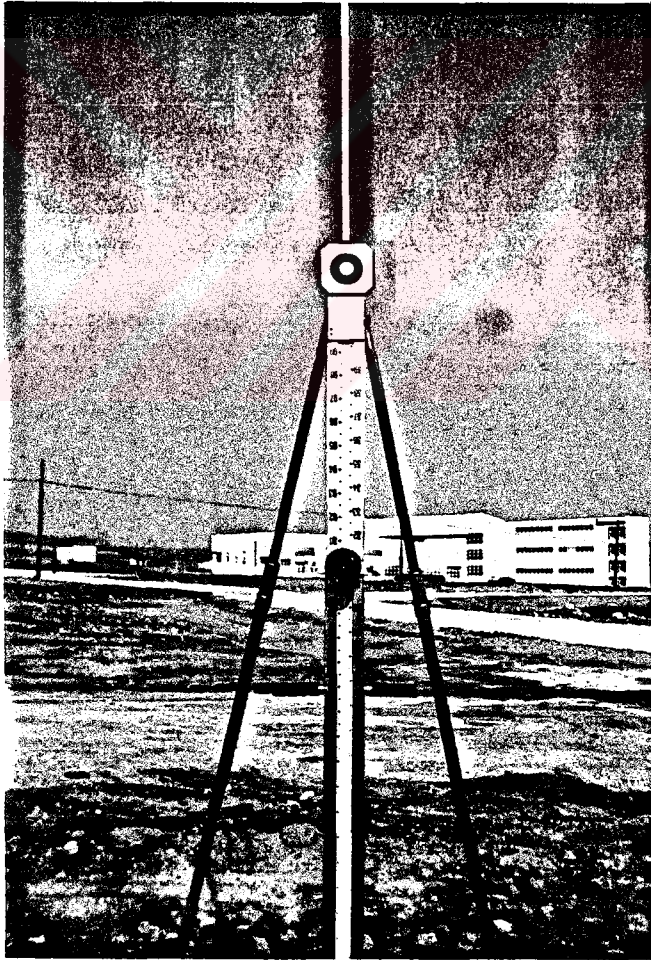
Şekil 7.4. Hedef levhası

Ortadan trigonometrik nivelmanda kullanılan miralar, 2 m.'lik KERN invar mirası üzerine 1 m. uzunluğunda ve 2 cm. çapında özel alaşımdan yapılmış çelik bir çubuk eklenerek oluşturulmuştur. Bölüm 5.2.2.'de de belirtildiği gibi, yerden en az 1.5-2.0 m. yüksek gözleme ışınları ile yapılan gözlemlere refraksiyon etkisinin raslantısal nitelikte olduğu da dikkate alınarak, mira üzerinde 2.20 m. ve 3.00 m.'ye iki hedef levhası, ayrıca uzunluk ölçmeleri içinde 1.70m.'ye yansıtıcı monte edilmiştir. Miraların düşeyliği küresel düzeç ve mira sehpaları yardımıyla sağlanmıştır (Şekil 7.5).

Ortadan trigonometrik nivelman ölçmelerinde kullanılacak olan bir çift miraya ait 1. ve 2. hedef levhalarının mira tabanına göre bağıl konumlarının aynı olması gerekir. Bu ise basit bir ölçme yöntemi ile sağlanmıştır. Bu yöntemde; önce A mirası eğimli bir arazinin aşağı kısmında sağlam bir zemine yerleştirilmiş mira altlığı üzerinde düşey olarak tutulmuştur. Daha sonra, presizyonlu nivo yaklaşık olarak 1. hedefin yüksekliğinde olacak şekilde arazinin yukarisına kurularak paralel yüzlü cam plak yardımıyla, nivonun yatay gözleme çizgisi 1. hedefe çakıştırılmış ve mikrometre okuması yapılmıştır. Daha sonra mira altlığı sabit kalmak şartı ile B mirası aynı altlık üzerinde düşey olarak tutulmuş ve mira

zerindeki 1. hedef, nivo operatörünün verdiği talimat doğrultusunda aşağı veya yukarı kaydırılarak yatay gözleme çizgisi ile çakıştırılmış sabitlenmiŐtir. Gözleme izgisi ile hedef levhasının merkezini tam olarak çakıŐtırmak mümkün olmamıŐtır. Bu durumda ise paralel yüzlü cam plak yardımıyla yatay gözleme çizgisi hedefe çakıŐtırılarak mikrometre okuması yapılmıştır. A ve B mirasındaki mikrometre okumalarının farkı, 1. hedef levhaları arasındaki yükseklik farkını vermiştir. Miralardaki 2. hedefler için de aynı yöntem uygulanarak yükseklik farkı bulunmuştur. Bu farklar daha sonraki hesaplamalarda dikkate alınarak lme sonuçları dzletilmiŐtir.

Hedef levhası ile yansıtıcı arasındaki yatay uzaklık C, ardışık olarak 50, 100, 150, 200 m. uzaklıklı bir kenar üzerinde , önce dzecli jalona monte edilmiş yansıtıcıda, daha sonra da invar miraya monte edilmiş yansıtıcıda olmak üzere tekrarlamalı olarak yapılan uzunluk ölçmelerinden yararlanılarak saptanmıştır.



Şekil 7.5. Hedef levhaları ve yansıtıcı

7.2.3. Elektronik takeometrelerin ve donatılarının hazırlanması

Karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelmanda kullanılacak olan elektronik takeometreler, karşılıklı ve eşzamanlı düşey açı gözlemlerine olanak verecek şekilde düzenlenmelidir. Bunun için de her iki takeometreye Şekil 7.6 daki gibi hedef levhaları monte edilmiştir. Ayrıca, sadece bir doğrultuda uzunluk ölçmesi öngörüldüğünden, elektronik takeometrelerin birisi üzerine yansıtıcı monte edilmiştir (Şekil 7.6).

Elektronik takeometrelerin üzerine yerleştirilmiş olan hedeflerin ve yansıtıcının, aletin muylu eksenine olan uzaklıkları test ölçmeleriyle belirlenmiştir. Hedef ile takeometrenin yatay eksenleri arasındaki yükseklik farkı (h_t), presizyonlu nivelman donatımı ile önce hedef levhasının yatay ekseninde daha sonra ise elektronik takeometrenin muylu ekseninde mikrometre okumaları yapılarak belirlenmiştir. Yansıtıcı ile takeometrenin yatay eksenindeki yükseklik farkı (h_r), cetvel ile mm doğruluğunda ölçülmüştür. Hedef ile yansıtıcının sıfır noktası arasındaki yatay uzaklık (Y_r), ardışık 100, 200, 300, 400 m uzaklıklı bir kenar üzerinde, önce alet üzerine monte edilmiş yansıtıcıda daha sonra da düzeçli jalona monte edilmiş olan yansıtıcıda olmak üzere tekrarlamalı olarak yapılan uzunluk ölçmelerinden yararlanılarak saptanmıştır. (Şekil 7.7).

Uygulamada kullanılan SOKHİSHA SET2 elektronik takeometresi, elektro-optik kısa mesafe uzunluk ölçer ile birleştirilmiş olduğundan aynı zamanda uzunluk ölçmesi de yapabilmektedir. Uzunluk ölçmesinin standart sapması fabrikasınca,

$$\sigma_S [\text{mm}] = \pm \sqrt{3^2 + (2 \cdot S [\text{km}])^2}$$

olarak verilmiştir.

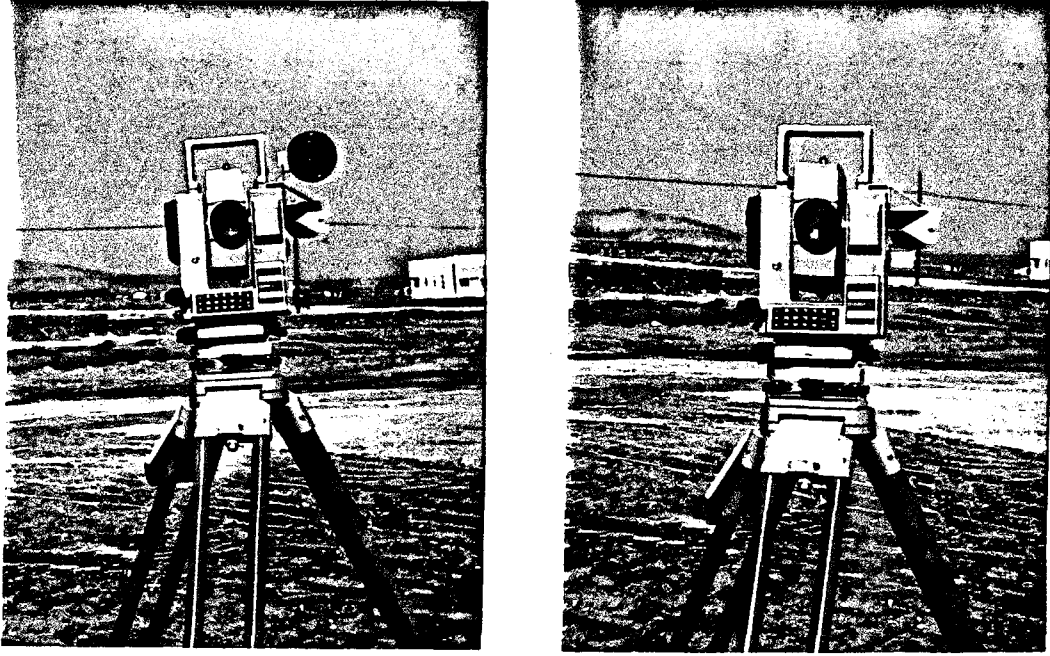
Bu bağıntı, uzunluk ölçmesindeki belirsizliklerin yarattığı bazı hataları kapsamaz. Bu nedenle uzunluk ölçmelerinin standart sapması bu değer dışına çıkabilir. Bu konu bölüm 5.1.1.'de ayrıntılarıyla verildiği için burada tekrarlanmayacaktır.

7.3. Arazi Çalışmaları ve Hesaplamalar

7.3.1. Presizyonlu nivelman yöntemi

Presizyonlu nivelman yönteminde bir istasyon noktasındaki ölçme modeli Şekil 2.1.'de gösterilmiştir.

Her ölçme gününün başlangıcında nivo ve miraların eksen şartları kontrol edilmiştir. Ölçmeler sırasında her bir istasyon noktasında aşağıdaki ölçme düzeni uygulanmıştır.



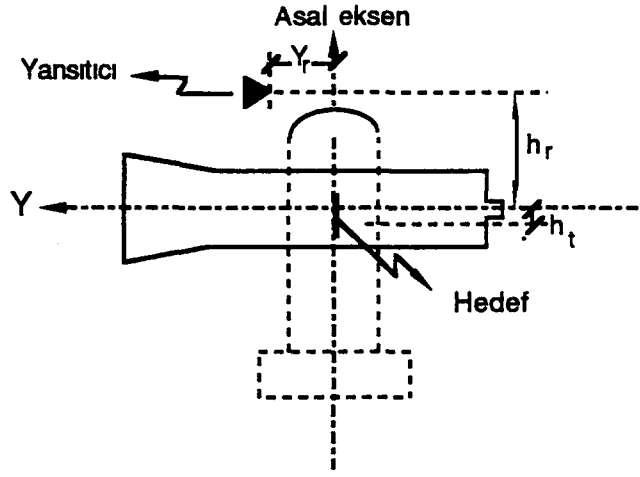
Şekil 7.6.-Elektronik takeometreler ve donatımları

- 1- Geri ve ileri gözleme uzaklıkları çelik şerit metre ile ölçülerek eşit alınmıştır ($S_g=S_i$)
- 2- Geri doğrultudaki mirada sol bölüm okuması (3 kez); g_I
- 3- İleri doğrultudaki mirada sol bölüm okuması (3 kez), i_I
- 4- İleri doğrultudaki mirada sağ bölüm okuması (3 kez), i_{II}
- 5- Geri doğrultudaki mirada sağ bölüm okuması (3 kez), g_{II}
- 6- Hava sıcaklığı ve basınç ölçülmüştür (2 kez)
- 7- Gözleme uzaklığı, hava sıcaklığı, basınç değeri, ölçmenin başlangıç ve bitiş zamanı ve mira okumaları nivelman defterine not edilmiştir.

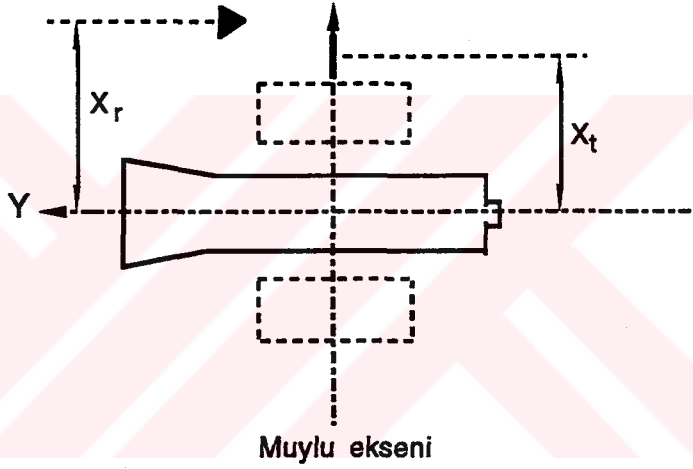
Ölçme sırasında, nivo bir şemsiye ile güneş ışığından korunmuştur. Miralar nivelman altlıkları üzerine tutulmuş ve 0.75 m.'den daha aşağı mira okumaları yapılmıştır.

Her bir nivelman kenarındaki ölçmeler, gidiş (G) ve dönüş (D) olarak yapılmış, gidiş ve dönüş ölçmelerinin çift sayıda istasyon noktası ile yapılmasına dikkat edilmiştir.

Presizyonlu nivelman ölçmeleri 22.05.1992 - 04.06.1992 tarihleri arasında yapılmıştır.



a) Kesit



b) Yatay İzdüşüm

- Y_r : Yansıtıcının gözleme doğrultusundaki yatay dışmerkezlik bileşeni
 X_r : Yansıtıcının gözleme doğrultusuna dik ve yatay dışmerkezlik bileşeni
 X_t : Hedefin gözleme doğrultusuna dik ve yatay dışmerkezlik bileşeni
 h_r : Muylu eksenini ile yansıtıcı arasındaki yükseklik farkı
 h_t : Muylu eksenini ile hedef arasındaki yükseklik farkı

Şekil 7.7.

7.3.2. Ortadan (Atlamalı) trigonometrik nivelman yöntemi

Ortadan trigonometrik nivelman yönteminde bir istasyon noktasındaki ölçme modeli Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Geri ve ileri doğrultudaki düşey açılar ve gözleme uzaklıkları elektronik takeometre ile ölçülmüştür.

Ortadan trgonometrik nivelman yönteminde optimum uzunluk araştırması yapılabilmesi için ortalama 50,100,150,200 m. gözleme uzaklıkları ile ölçmeler tekrarlanmıştır.

Bir istasyon noktasında alet iki kez düzeçlenmiş ve her bir düzeçlemede düşey açılar üç seri ölçülmüştür. Ayrıca, uzunluk indirgemesi için geri ve ileri yansıtıcıda iki kez kenar ve düşey açı okuması yapılmıştır. Tüm bu gözlemler, alet operatörü tarafından otomatik kayıt ünitesine kayıt edilmiştir. Ölçmeler sadece gidiş olarak yapılmıştır.

Ölçmeler sırasında, her bir istasyon noktasında aşağıdaki ölçme düzeni uygulanmıştır:

- 1- Alet düzeçlenir.
- 2- Dürbünün I. konumunda, geri miradaki yansıtıcıda uzunluk ve düşey açı okuması (2 kez)
- 3- Dürbünün I. konumunda, ileri miradaki yansıtıcıda uzunluk ve düşey açı okuması (2 kez)
- 4- Dürbünün II. konumunda, ileri miradaki yansıtıcıda sadece düşey açı okuması (2 kez)
- 5- Dürbünün II. konumunda, geri miradaki yansıtıcıda sadece düşey açı okuması (2 kez)
- 6- Dürbünün I. konumunda, geri miradaki 1. hedefte düşey açı okuması (3 kez)
- 7- Dürbünün I. konumunda, ileri miradaki 1. hedefte düşey açı okuması (3 kez)
- 8- Dürbünün I. konumunda ileri miradaki 2. hedefte düşey açı okuması (3 kez)
- 9- Dürbünün I. konumunda geri miradaki 2. hedefte düşey açı okuması (3 kez)
- 10- Dürbünün II. konumunda geri miradaki 1. hedefte düşey açı okuması (3 kez)
- 11- Dürbünün II. konumunda ileri miradaki 1. hedefte düşey açı okuması (3 kez)
- 12- Dürbünün II. konumunda ileri miradaki 2. hedefte düşey açı okuması (3 kez)

13- Dürbünün II. konumunda geri miradaki 2. hedefte düşey açı okuması (3 kez)

14- Aletin düzeçlenmesi tekrar yapılır.

15- İleri mira doğrultusundan başlanarak tüm ölçmeler tekrarlanır.

16- Her bir istasyon noktasında basınç ve sıcaklık değerleri ve ölçmenin başlangıç ve bitiş zamanı kayıt edilir.

Ortadan trigonometrik nivelman ölçmeleri 04.07.1992 - 12.07.1992 tarihleri arasında yapılmıştır.

Yükseklik farklarının hesabı:

Yansıtıcıda ölçülen uzunluklara, atmosferik ve sıfır eki düzeltmeleri getirilmiş, böylece alet ile yansıtıcı arasındaki eğik uzaklık (S_0) bulunmuştur. Hedefler ile alet arasındaki eğik uzaklık ise aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır,

$$S = (S_0 \cdot \sin Z_T + C) / \sin Z_t \quad (7.1)$$

Burada;

Z_T : Yansıtıcıda gözlenen düşey açı

Z_t : Hedefte gözlenen düşey açı

C : Hedef ile yansıtıcı arasındaki yatay uzaklıktır. (Bak. Bölüm 7.2.2)

Geri ve ileri mira noktaları arasındaki yükseklik farkı, 1. hedef ve 2. hedef için ayrı ayrı olmak üzere;

$$\Delta H_{jk} = \Delta h_i - \Delta h_G = S_i \cdot \cos Z_i - S_G \cdot \cos Z_G + (S_i^2 \cdot \sin^2 Z_i - S_G^2 \cdot \sin^2 Z_G) / 2R + (h_G - h_i) \quad (7.2)$$

bağıntısıyla bulunmuştur. Burada; ($h_G - h_i$), geri ve ileri doğrultudaki hedef yükseklikleri arasındaki fark (bak. Bölüm 7.2.2), R ise ortalama yer eğrilik yarıçapıdır.

7.3.3. Karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelman yöntemi

Karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelmanda bir istasyon noktasındaki ölçme modeli Şekil 3.2.'de gösterilmiştir. Bu yöntemle yükseklik farklarının belirlenmesi iki bölümden oluşmaktadır. Birincide , aletin muylu eksenini ile nivelman röper noktası arasındaki yükseklik farkı belirlenir, bu işleme yükseklik bağlantısı denir. Her bir nivelman kenarının başında ve sonunda nivelman röper noktalarına bağlantı ölçmeleri yapılması zorunludur(Bölüm 7.3.3.1). Nivelmanın ikinci bölümü ise, aletlerin muylu eksenleri arasındaki yükseklik farkının belirlenmesidir.

Karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelman yönteminde optimum uzunluk araştırması yapılabilmesi için ortalama 100,200,300 ve 400 m 'lik gözleme uzaklıklar ile ölçmeler tekrarlanmıştır.

Bir istasyon noktasında aletler, iki kez düzeçlenmiş ve her bir düzeçlemede düşey açılar karşılıklı ve eşzamanlı olarak üç seri ölçülmüştür. Kenar uzunluklar sadece bir doğrultuda ölçülmüştür. Tüm ölçmeler, alet operatörü tarafından otomatik kayıt ünitesinde depolanmıştır. Ölçmeler sadece gidiş olarak yapılmıştır.

Ölçmeler sırasında, nivelman kenarının başında ve sonunda nivelman röper noktalarına bağlantı ölçmeleri yapılmış ve her bir istasyon noktasında aşağıdaki ölçme düzeni uygulanmıştır;

1- Her iki istasyon noktasında bulunan elektronik takeometrelerden sadece biri ile ve dürbünün I. konumunda karşıdaki alet üzerindeki yansıtıcıda uzunluk okuması (2 kez)

2- Aletlerin her ikisi de dürbünün I. konumunda iken aynı anda birbirleri üzerindeki hedeflerde düşey açı okuması (3 kez)

3 Aletlerden biri dürbünün I. konumunda iken karşıdaki alet ile dürbünün II. konumunda düşey açı okuması (3 kez)

4- İkinci alet dürbünün I. konumuna getirilirken birinci alet ile dürbünün II. konumunda düşey açı okuması (3 kez)

5- Aletler tekrar düzeçlenir.

6- Düşey açı okumaları tekrarlanır.

7- Her iki istasyon noktasında da basınç ve sıcaklık değerleri, ölçmenin başlangıç ve bitiş zamanı kayıt edilir.

Karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelman ölçmeleri 15.07.1992 - 20.07.1992 tarihleri arasında yapılmıştır.

Karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelmanda bir istasyon noktasındaki yükseklik farkı, aletlerin birinci ve ikinci düzeçlenmesi için ayrı ayrı olmak üzere,

$$\Delta H = [S. (\cot Z_1 - \cot Z_G) + h_{tG} - h_{t1}] / 2 \quad (7.3)$$

bağıntısıyla hesaplanmıştır. Burada; h_{tG} ve h_{tI} , sırası ile geri ve ileri noktadaki takeometrelerin muylu eksenleri ile hedef merkezleri arasındaki yükseklik farkıdır. S ise elektronik takeometrelerin asal eksenleri arasındaki yatay uzaklık, Z_1 ve Z_G ise ileri ve geri noktadaki hedeflerde ölçülen düşey açılarıdır.

S için Şekil 7.8 'den dZ ,

$$dZ = (h_r - h_t) \frac{\sin Z}{S_0} \cdot \rho \quad (7.4)$$

şeklinde tanımlanırsa,

$$S = S_0 \cdot \sin (Z - dZ) + Y_r \quad (7.5)$$

olur. Burada; S_0 , atmosferik ve sıfır eki düzeltmeleri getirilmiş eğik uzaklık, Z ise hedefte gözlenen düşey açıdır.

İki nivelman röper noktası arasında n sayıdaki istasyon noktası ile belirlenen toplam yükseklik farkı;

$$\Delta H_{\text{Toplam}} = \sum_{j=1}^n \Delta H_j + h_{\text{baş.}} - h_{\text{bit.}} \quad (7.6)$$

bağıntısı ile hesaplanmıştır. Burada $h_{\text{baş.}}$ ve $h_{\text{bit.}}$ sırasıyla nivelman kenarının başında ve sonunda yapılan bağlantı ölçmelerinden elde edilen nivelman röperleri ile alet muylu eksenleri arasındaki yükseklik farklarıdır (bak. 7.3.3.1).

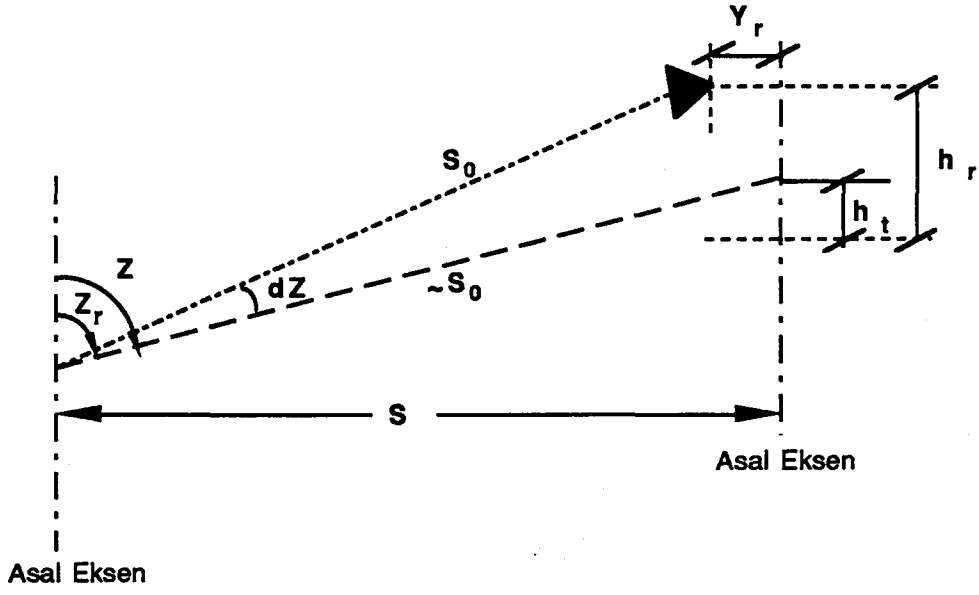
7.3.3.1. Nivelman röper noktalarına yükseklik bağlantısı

Karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelmanda röper noktalarına yükseklik bağlantısı çok önemlidir. Nivelman röper noktaları çoğu zaman duvar üzerinde olduğundan üzerlerine takeometreyi kurmak mümkün değildir. Ayrıca, yer nivelman röper noktalarında da alet yüksekliklerini tam olarak ölçmek zordur. Bu nedenle, takeometrenin muylu eksenini ve röper noktası arasındaki yükseklik farkının belirlenmesi için aşağıda açıklanan yöntem uygulanmıştır. Bu yöntem için trigonometrik nivelman donatımlarına ek olarak bir adet invar mira gereklidir.

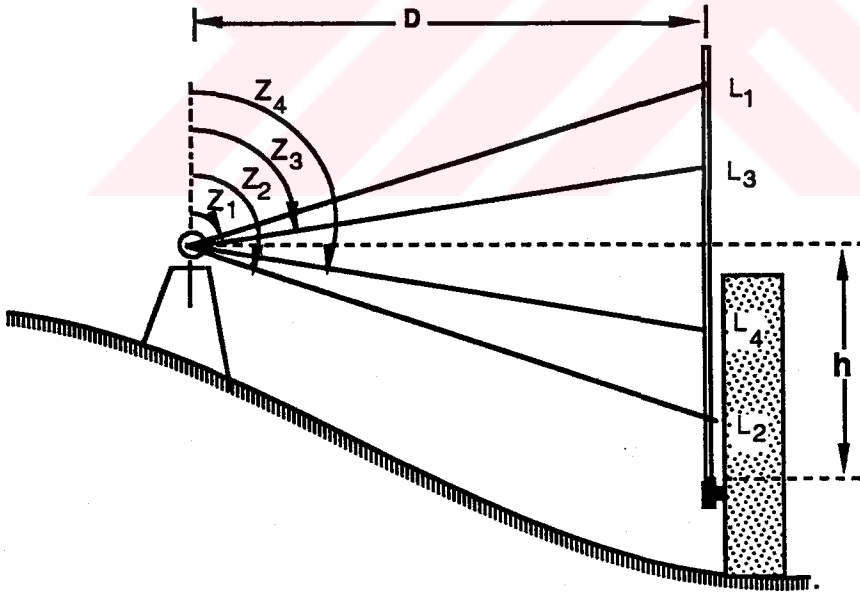
Nivelman röper noktası ile takeometrenin muylu eksenini arasındaki yükseklik farkı (h) mira üzerinde L_1 yükseklikteki hedefte gözlenen Z_1 düşey açısı yardımıyla hesaplanabilir,

$$h = L_1 - D \cdot \cot Z_1 \quad (7.7)$$

Burada; D : takeometre ile mira arasındaki yatay uzaklıktır.



Şekil 7.8. Uzunluk indirgemesi



Şekil 7.9. Nivelman röper noktalarına yükseklik bağlantısı

Mira üzerinde L_2 yüksekliğindeki ikinci bir hedefte de düşey açı gözlenirse (7.7) bağıntısındaki D uzaklığına gerek kalmadan h hesaplanabilir;

$$h = \frac{L_2 \cot Z_1 - L_1 \cot Z_2}{\cot Z_1 - \cot Z_2} \quad (7.8)$$

Daha genel olarak, ikinci bir düşey açı çifti kullanılarak (7.8) bağıntısı ile ikinci bir h hesaplanabilir. Bunların ortalaması alınarak ortalama h elde edilir.

Düşey açı gözlemleri ve mira bölümlendirme hataları, h yükseklik farkının belirlenmesinde hataya neden olurlar. (7.8) bağıntısına hata artma yasası uygulandığında h 'nın standart sapması,

$$\sigma_h^2 = \frac{(L_1 - h)^2 + (L_2 - h)^2}{(L_1 - L_2)^2} \cdot \sigma_L^2 + \frac{1}{(L_1 - L_2)^2} \cdot \left\{ 4 \left[(L_1 - h)^2 + (L_2 - h)^2 + \frac{[(L_1 - h)^2 + (L_2 - h)^2]^2}{D^2} \right] \right\} \sigma_Z^2 \quad (7.9)$$

şeklinde ifade edilebilir (Chrzanowski 1989). Burada; σ_L mira bölümlendirmesinin standart sapması, σ_Z : düşey açı ölçmelerinin standart sapmasıdır. (7.9) bağıntısı elde edilirken hataların raslantısal nitelikte olduğu varsayılmıştır.

(7.9) bağıntısından şu sonuç çıkarılabilir; en küçük σ_h değerinin elde edilebilmesi için düşey açı okumalarının yapıldığı mira üzerindeki hedef noktaları alet yatayı ile simetrik olmalıdır. İki simetrik hedef çiftinde yapılan düşey açı gözlemleriyle elde edilen " h " 'in standart sapması,

$$\sigma_h^2 = (D^2 \cdot \sigma_Z^2 + \sigma_L^2) / 4 \quad (7.10)$$

olur.

7.4. Uygulama Sonuçları ve Değerlendirilmesi

7.4.1. Presizyonlu nivelman sonuçları

Bölüm 7.3.1.'de açıklanan presizyonlu nivelman yöntemiyle elde edilen sonuçlar Çizelge 7.1'de gösterilmiştir. Presizyonlu nivelman ölçüleri aşağıdaki ağırlık modelleriyle serbest olarak dengelenmiştir:

$$(i) \quad P = 1 / S_{km} \quad (S: \text{Kenar uzunluğu})$$

$$(ii) \quad P = 1 / n \quad (n: \text{İstasyon sayısı})$$

Bu ağırlık modelleriyle elde edilen dengeleme sonuçları Ek - 2 'de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Presizyonlu nivelman ölçme sonuçları

Kenar No	Baş. N. No	Bitiş N. No	Kenar Uz. [m]	İstasyon Sayısı	GİDİŞ ΔH_G [m]	DÖNÜŞ ΔH_D [m]	ORTALAMA ΔH_{ORT} [m]
1	1	2	245	6	0.72476	-0.72512	0.72494
2	2	3	360	8	7.91170	-7.91176	7.91183
3	3	4	445	10	13.36920	-13.36972	13.36896
4	4	5	315	10	17.58099	-17.58006	17.58052
5	5	6	130	4	6.39486	-6.39423	6.39454
6	6	7	545	20	27.83808	-27.83723	27.83766
7	7	8	385	14	7.17212	-7.17116	7.17164
8	9	8	270	10	17.47161	-17.47143	17.47152
9	9	10	530	16	0.17049	-0.16982	0.17015
10	11	10	365	8	11.44699	-11.44696	11.44697
11	4	11	435	20	30.23496	-30.23442	30.23469
12	4	9	750	26	41.51136	-41.51108	41.51122
13	5	9	715	20	23.93037	-23.93061	23.93049
14	5	10	850	28	24.10069	-24.10016	24.10042
15	6	9	575	16	17.53638	-17.53548	17.53592
16	9	7	420	14	10.30021	-10.30088	10.30054
17	10	8	680	22	17.30288	-17.30112	17.30200
18	11	9	585	22	11.27696	-11.27748	11.27722

Ek - 2'de de görüldüğü gibi her iki ağırlık modeliyle elde edilen yükseklik farklarının standart sapmaları, F- testi ile karşılaştırıldığında aynı doğrulukta kabul edilebileceği sonucuna varılmıştır. Her iki ağırlık modeliyle elde edilen yükseklik farkları arasındaki fark maximum 0.06 mm. olmuştur. Bu farka, t- testi uygulandığında, yükseklik farklarının da aynı kabul edilebilir olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle her iki ağırlık modeli de geçerlidir. Ancak bundan sonra sadece $P = 1/S_{km}$ ağırlık modelinden elde edilen sonuçlar dikkate alınacaktır.

7.4.2. Ortadan (Atlamalı) trigonometrik nivelman sonuçları

Bölüm 7.3.2.'de açıklanan ortadan trigonometrik nivelman yöntemiyle farklı gözleme uzaklıklarında elde edilen sonuçlar Çizelge 7.2.'de verilmiştir.

Ortadan trigonometrik nivelmanda gözlenen düşey açıların standart sapmalarına, Barlett testi uygulanmış ve tüm ölçü gruplarının aynı doğrulukta yapılmamış olduğu görülmüştür (EK - 1).

Çizelge 7.2. Ortadan trigonometrik nivelman sonuçları

Kenar No	Baş. N. No	Bitiş N. No	Kenar Uz. [m]	Gözleme Uzaklıkları (S)			
				S = 50 m ΔH [m]	S = 100 m ΔH [m]	S = 150 m ΔH [m]	S = 200 m ΔH [m]
1	1	2	242	0.72632	0.72829	0.72829	0.72829
2	2	3	362	7.92403	7.91278	7.91462	7.91462
3	3	4	443	13.36626	13.36779	13.36579	13.36741
4	4	5	282	17.58637	17.58568	17.58444	17.58444
5	5	6	121	6.39602	6.39602	6.39602	6.39602
6	6	7	382	27.85290	27.84237	27.84328	27.84328
7	7	8	302	7.17221	7.17313	7.16993	7.16993
8	9	8	232	17.47595	17.47336	17.47336	17.47336
9	9	10	338	0.17092	0.17021	0.16856	0.16856
10	11	10	343	11.44898	11.45020	11.44813	11.44813
11	4	11	384	30.25118	30.24351	30.24068	30.24068
12	4	9	761	41.53711	41.51828	41.51828	41.51615
13	5	9	498	23.94096	23.93318	23.93318	23.93318
14	5	10	677	24.10951	24.09873	24.10400	24.09831
15	6	9	445	17.54262	17.53853	17.53853	17.53853
16	9	7	309	10.30642	10.30350	10.30099	10.30099
17	10	8	480	17.30994	17.29896	17.30551	17.30551
18	11	9	438	11.28458	11.28034	11.27920	11.27920

Ortadan trigonometrik nivelman sonuçları presizyonlu nivelmanda uygulanan ağırlık modelleriyle serbest olarak dengelenmiştir. Farklı gözleme uzaklıkları için elde edilen dengeleme sonuçları Ek - 2 'de gösterilmiştir.

Ek - 2 'de de görüldüğü gibi, her iki ağırlık modeliyle elde edilen yükseklik farklarının standart sapmaları F- testi ile karşılaştırılmış ve aynı doğrulukta olduğu görülmüştür. Her iki ağırlık modeliyle elde edilen yükseklik farkları arasındaki maximum fark'a t- testi uygulandığında yükseklik farklarının da aynı kabul edilebileceği sonucuna varılmıştır. Bu nedenle her iki ağırlık modeli de geçerlidir. Ancak bundan sonra sadece $P = 1/S_{km}$ ağırlık modelinden elde edilen sonuçlar dikkate alınacaktır.

7.4.3. Karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelman sonuçları

Bölüm 7.3.3.'de uygulanan karşılıklı ve eşzamanlı trionometrik nivelman yöntemi ile farklı gözleme uzaklıklarında elde edilen sonuçlar çizelge 7.3'de verilmiştir.

Karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelman ölçülerine, bir istasyon noktasında ölçülen düşey açıların aynı doğrulukta yapılıp yapılmadığını belirlemek için F- testi uygulanmış, ayrıca bir kenardaki tüm ölçülere ve daha sonra da ağıdaki tüm ölçülere Barlett testi uygulanmıştır. Sonuçta ölçülerin aynı doğrulukta olduğu belirlenmiştir (Ek - 1).

Karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelman sonuçları diğer ölçme yöntemlerinde olduğu gibi, farklı ağırlık modelleriyle serbest olarak dengelenmiştir. Farklı gözleme uzaklıkları için elde edilen dengeleme sonuçları Ek - 2 'de verilmiştir.

Ek - 2 'de de görüldüğü gibi, her iki ağırlık modeliyle elde edilen yükseklik farklarının standart sapmaları, F-testi ile karşılaştırıldığında aynı doğrulukta olduğu görülmüştür. Her iki ağırlık modelleriyle elde edilen yükseklik farkları arasındaki maksimum farka da t testi uygulanmış ve yükseklik farklarının da aynı kabul edilebileceği saptanmıştır. Bu nedenle her iki ağırlık modeli de geçerlidir. Ancak, bundan sonra sadece $P = 1/S_{km}$ ağırlık modelinden elde edilen sonuçlar dikkate alınacaktır.

7.5. Trigonometrik Nivelman Yöntemleri ile Presizyonlu Nivelman Yönteminin Karşılaştırılması

Trigonometrik nivelman yöntemleri ile presizyonlu nivelman yöntemi üç şekilde karşılaştırılmıştır:

- (i) Doğruluk ölçütlerinin karşılaştırılması
- (ii) Yükseklik farklarının karşılaştırılması
- (iii) Maliyet karşılaştırması

Çizelge 7.3. Karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelman sonuçları

Kenar No	Baş. N. No	Bitiş N. No	Kenar Uz. [m]	Gözleme Uzaklıkları (S)			
				S = 100 m	S = 200 m	S = 300 m	S = 400 m
				ΔH [m]	ΔH [m]	ΔH [m]	ΔH [m]
1	1	2	242	0.72662	0.72515	0.72515	0.72515
2	2	3	362	7.91325	7.91276	7.91276	7.91276
3	3	4	443	13.36640	13.36838	13.36710	13.36875
4	4	5	282	17.58341	17.58244	17.58358	17.58358
5	5	6	121	6.39470	6.39470	6.39470	6.39470
6	6	7	382	27.84006	27.83954	27.84058	27.84058
7	7	8	302	7.17370	7.17094	7.17186	7.17186
8	9	8	232	17.47386	17.47224	17.47224	17.47224
9	9	10	338	0.16948	0.16948	0.16921	0.16921
10	11	10	343	11.44942	11.44672	11.44670	11.44670
11	4	11	384	30.23708	30.23626	30.23665	30.23665
12	4	9	761	41.51613	41.51662	41.51662	41.51662
13	5	9	498	23.93166	23.92959	23.92959	23.92959
14	5	10	677	24.09931	24.10093	24.09950	24.09914
15	6	9	445	17.53683	17.53501	17.53501	17.53501
16	9	7	309	10.30007	10.30084	10.29976	10.29976
17	10	8	480	17.30357	17.30306	17.30242	17.30242
18	11	9	438	11.27482	11.27685	11.27680	11.27680

Doğruluk ölçütlerinin karşılaştırılması: Trigonometrik nivelman yöntemleri ile elde edilen yükseklik farklarına ait standart sapmalar ile presizyonlu nivelmanla bulunan yükseklik farklarına ait standart sapmaların eşit olup olmadığı F- testi ile belirlenmiştir.

Yükseklik farkların karşılaştırılması: Trigonometrik nivelman yöntemleri ile elde edilen yükseklik farkları ile presizyonlu nivelman sonucu bulunan yükseklik farkları arasındaki farkın anlamlı olup olmadığı t- testi ile belirlenmiştir.

Maliyet karşılaştırması: Trigonometrik nivelman yöntemleri ve presizyonlu nivelman yönteminin uygulanabilmesi için gerekli donatımların maliyeti (kira), personel giderleri,hesaplama ve diğer giderler ve toplam işgünü dikkate alınarak her bir yöntem için 1 km.'lik nivelmanın maliyeti hesaplanmıştır.

7.5.1. Ortadan (Atlamalı) trigonometrik nivelman yöntemi ile presizyonlu nivelman yönteminin karşılaştırılması

Farklı gözleme uzaklıkları ile uygulanmış ortadan trigonometrik nivelman yöntemi ile presizyonlu nivelman yönteminin karşılaştırılabilmesi için her iki yöntem için $P = 1/S_{km}$ ağırlık modeli ile serbest dengeleme sonuçları Ek - 3'de gösterilmiştir.

Ek - 3 'de de görüldüğü gibi, farklı gözleme uzaklıkları ile uygulanmış ortadan trigonometrik nivelman sonuçları ile presizyonlu nivelman sonuçları karşılaştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar çıkartılmıştır.

(i) Doğruluk ölçütlerinin karşılaştırması : S=50-100-150-200 m gözleme uzaklıkları ile uygulanmış ortadan trigonometrik nivelman sonuçları ile presizyonlu nivelman sonuçları aynı doğrulukta değildir. Ancak, kendi aralarında bir karşılaştırma yapılması istenirse, en iyi sonuç, S=150-200 m 'lik gözleme uzaklıklarıyla elde edilmiştir.

(ii) Yükseklik farklarının karşılaştırılması: S=50 m gözleme uzaklıkları ile uygulanmış ortadan trigonometrik nivelman sonucunda bulunan yükseklik farklarının % 39'u, S=100 m. gözleme uzaklıkları ile bulunan yükseklik farklarının % 83'ü, S=150 m gözleme uzaklıkları ile bulunan yükseklik farklarının % 56'sı, S=200 m gözleme uzaklıkları ile bulunan yükseklik farklarının % 72'si presizyonlu nivelmanla bulunan yükseklik farkları ile uyusmaktadır.

(iii). Maliyet: Çizelge 7.4 'de de görüldüğü gibi presizyonlu nivelman yöntemi ile 0.8 km/gün'lük ilerleme hızına ulaşılırken, ortadan trigonometrik nivelmanda 5.6 km/gün'lük bir ölçme hızına ulaşılabilir. Ortadan trigonometrik nivelman yöntemi, donatım maliyeti yüksek olmasına rağmen, yüksek ilerleme hızı sebebiyle presizyonlu nivelmandan 3 kat daha ucuzdur.

7.5.2.Karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelman yöntemi ile presizyonlu nivelman yönteminin karşılaştırılması

Farklı gözleme uzaklıkları ile uygulanmış karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelman yöntemi ile presizyonlu nivelman yönteminin karşılaştırılabilmesi için her iki yöntem için $P = 1/S_{km}$ ağırlık modeliyle serbest dengeleme sonuçları Ek - 3 'de gösterilmiş ve elde edilen sonuçların karşılaştırılmasından aşağıdaki bulgulara varılmıştır:

(i) Doğruluk ölçütlerinin karşılaştırılması: S=100-200-300-400 m gözleme uzaklıkları ile uygulanmış karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelman sonuçları ile presizyonlu nivelman sonuçları aynı doğrulukta değildir. Ancak, kendi aralarında bir değerlendirme yapılması istenirse, en iyi sonuç, S=200 - 300 m gözleme uzaklıkları ile elde edilmiştir.

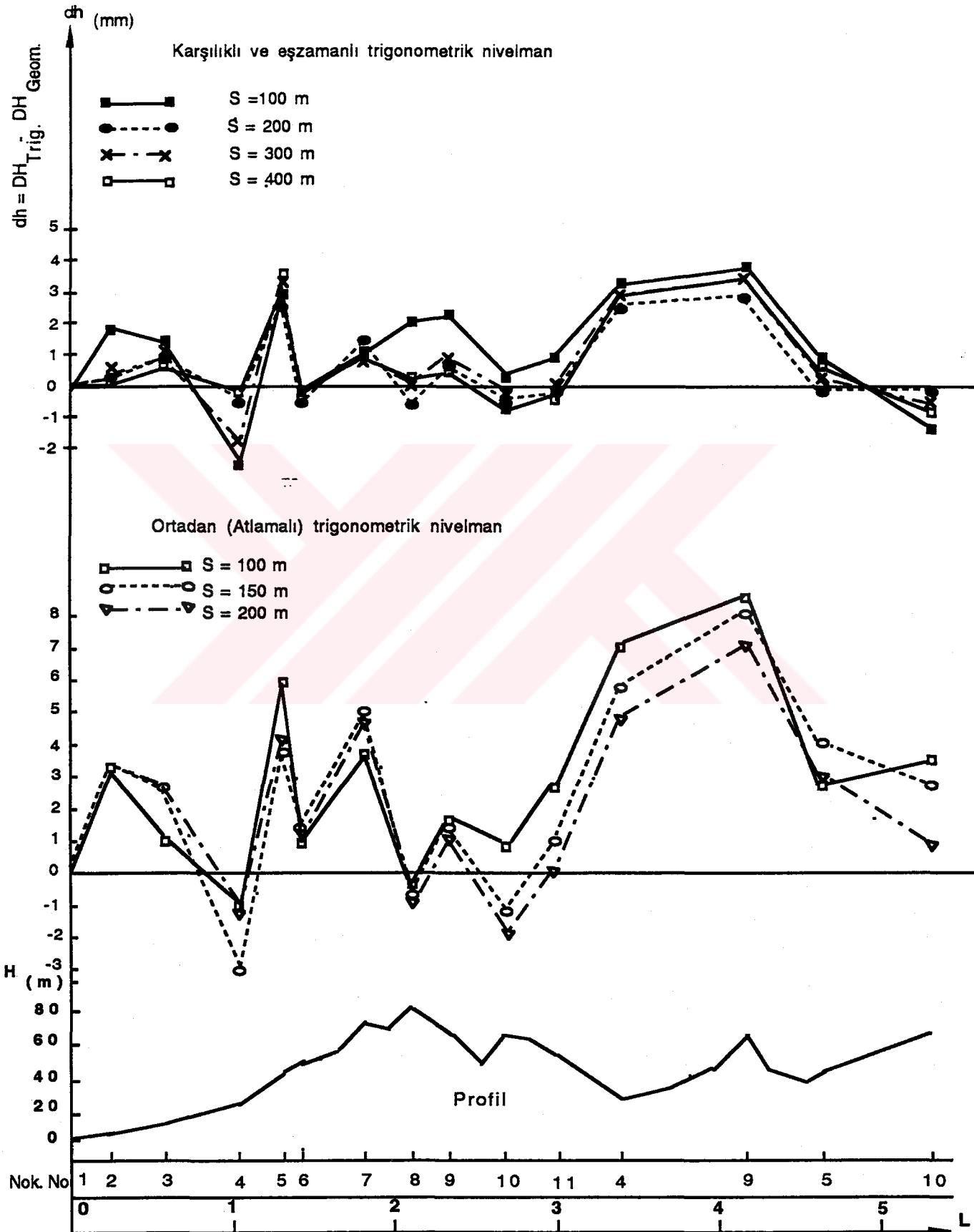
(ii) Yükseklik farklarının karşılaştırılması: S=100 m. ve S=200 m. gözleme uzaklıkları ile uygulanan karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelman sonucunda bulunan yükseklik farklarının % 100'ü, S=300 m. gözleme uzaklıkları ile bulunan yükseklik farklarının % 89'u, S=400 m. gözleme uzaklıkları ile bulunan yükseklik farklarının % 94'ü presizyonlu nivelman sonucunda bulunan yükseklik farkları ile uyusmaktadır.(EK - 3 ve Şekil 7.10)

(iii). Maliyet: Çizelge 7.4 'de de görüldüğü gibi, karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelmanda 4.0 km/gün'lük bir ölçme hızına ulaşılabilir. Presizyonlu nivelman donatımı maliyeti yanında karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelman donatımının maliyeti 7 kat daha pahalı olmasına rağmen, yüksek ilerleme hızı nedeniyle karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelman % 40 daha ucuzdur.

Çizelge 7.4 Nivelman Yöntemlerinin Maliyet Analizi (*)

Maliyet	Yöntem	Presizyonlu Nivelman (Gidiş)	Ortadan Trigonometrik Nivelman (Gidiş)	Karşılıklı ve Eşzamanlı Trigonometrik Nivelman (Gidiş)
Ölçme Donanımının Kira Ücreti [\$ / Saat]		12.3	49.3	85.1
Ölçü Ekibinin Ücreti [\$ / Saat]		18.5	14.8	14.8
Hesaplama ve Diğer Giderler [\$ / Saat]		10	10	10
Toplam Çalışma Süresi (Arazi + Büro) [Saat]		70 + 20 = 90	10 + 8 = 18	14 + 8 = 22
Istasyon Sayısı		274	21	40
Bir İstasyondaki Ölçme Zamanı [Dakika]		15	29	21
Toplam Maliyet [\$]		2156 + 200 = 2356	641 + 80 = 721	1398.6 + 80 = 1478.6
1 km'lik Nivelmanın Maliyeti [\$ / km]		336.6	103	211.2
Günlük İlerleme [km / Gün]		0.8	5.6	4.0
Standart Sapma [± mm / √km]		± 0.59	± 2.74	± 1.86

(*) Hesaplamalarda, T.M.M.O.B. Harita ve Kadastro mühendisleri odasının yayınlamış olduğu Tescil veya Tasdiğe Konu olan Harita ve Planların 1992 yılı Birim Fiyatları, 01.07.1992 tarihindeki T.C.Merkez Bankası Döviz satış kuru (1 Dolar = 6909.00 TL.) esas alınarak Dolara dönüştürülmüştür.



Şekil 7.10. Trigonometrik nivelman sonuçlarının presizyonlu nivelmandan olan sapmaları

8.SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, presizyonlu nivelman yöntemine alternatif olabilecek trigonometrik nivelman yöntemlerinin potansiyeli teorik ve pratik olarak araştırılmıştır. Öncelikle, presizyonlu nivelman yöntemi ve trigonometrik nivelman yöntemlerinin esasları ve etkilendikleri hata kaynakları teorik olarak ele alınmıştır.

İkinci aşamada, Selçuk Üniversitesi Alaaddin Keykubat Kampüs Alanı'nda oluşturulan nivelman test ağı, presizyonlu nivelman, ortadan (atlamalı) trigonometrik nivelman ve karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelman yöntemleriyle ölçülmüştür. Trigonometrik nivelman ölçmeleri değişik gözleme uzaklıkları ile yinelenmiştir. Presizyonlu nivelman ölçülerinin değerlendirilmesi sonucunda, $\pm 0.59 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$ 'lik bir doğruluğa ve 0.8 km/gün 'lük ilerleme hızına ulaşılmıştır. Aynı test ağına, farklı gözleme uzaklıkları ile uygulanan ortadan trigonometrik nivelman ölçülerinin değerlendirilmesi sonucunda, $S = 50 \text{ m}$ gözleme uzaklıkları ile $\pm 4.50 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$, $S=100 \text{ m}$ gözleme uzaklıkları ile $\pm 4.07 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$, $S=150 \text{ m}$ gözleme uzaklıkları ile $\pm 1.87 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$, $S=200 \text{ m}$ gözleme uzaklıkları ile $\pm 2.74 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$ 'lik bir doğruluğa ve ortalama 5.6 km/gün 'lük ilerleme hızına ulaşılmıştır. Ortadan trigonometrik nivelman sonuçları ile presizyonlu nivelman sonuçları karşılaştırıldığında, ortadan trigonometrik nivelmanla elde edilen yükseklik farklarının doğruluğu presizyonlu nivelmana göre daha düşük olmasına rağmen özellikle $S=150-200 \text{ m}$. gözleme uzaklıkları ile elde edilen yükseklik farkları presizyonu nivelmanla bulunan yükseklik farkları ile büyük oranda uyuşmaktadır. Aynı test ağına, farklı gözleme uzaklıkları ile yapılan karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelman ölçülerinin değerlendirilmesi sonucunda, $S=100 \text{ m}$ gözleme uzaklıkları ile $\pm 2.50 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$, $S=200 \text{ m}$ gözleme uzaklıkları ile $\pm 1.86 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$, $S=300 \text{ m}$ gözleme uzaklıkları ile $\pm 2.43 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$, $S = 400 \text{ m}$ gözleme uzaklıkları ile $\pm 2.46 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$ 'lik bir doğruluğa ve ortalama 4.00 km/gün 'lük ilerleme hızına ulaşılmıştır. Farklı gözleme uzaklıkları ile yapılan karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelman sonuçları ile presizyonlu nivelman sonuçları karşılaştırıldığında, karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelmanla elde edilen yükseklik farklarının doğruluğu presizyonlu nivelmana göre daha düşük olmasına rağmen yükseklik farkları büyük oranda uyumlu çıkmıştır.

Presizyonlu nivelman yöntemi ile trigonometrik nivelman yöntemleri arasında, yöntemlerin uygulanabilmesi için gerekli donatımların maliyeti (kira), ölçme ekibi, hesaplama ve diğer giderler dikkate alınarak maliyet karşılaştırması yapıldığında presizyonlu nivelmanda kullanılan donatımların maliyeti ucuz olmasına rağmen hızının düşük olması ve personel giderlerinin fazla olması nedeniyle 1 km 'lik presizyonlu nivelmanın maliyeti trigonometrik nivelman yöntemlerinin maliyetine göre daha pahalıdır (Çizelge 7.4).

Buradan da şu sonuç çıkartılabilir, presizyonlu nivelman tekniği yüksek doğruluk sağlaması yanında uygulanması zor, yavaş ve pahalı bir jeodezik ölçme yöntemidir. Trigonometrik nivelman yöntemleri ise presizyonlu nivelmana göre daha düşük doğrulukta olması yanında uygulanması kolay, hızlı, daha ucuz ve her türlü arazi koşullarında uygulanabilen bir jeodezik ölçme yöntemidir.

Ortadan trigonometrik nivelman yöntemi ile karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelman yöntemi karşılaştırıldığında, her iki yöntemin de kendine özgü avantaj ve dezavantajları vardır. Karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelman yönteminde, nivelman röper noktaları arası çok kısa ve sık olan nivelman ağlarında nivelman röper noktalarına yükseklik bağlantısı ölçmeleri yöntemin hızını düşürmektedir. Diğer yandan ortadan trigonometrik nivelman yönteminde ise geri ve ileri gözleme uzaklıklarının eşit alınması çalışmaları zaman alıcıdır. Trigonometrik nivelman yöntemlerinde gözleme ışınları yer yüzeyine paralel aynı atmosfer koşullarından geçtiği için özellikle karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelman yöntemi refraksiyon hatasından daha az etkilenmektedir. Bu açıklamalardan sonra, özellikle karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelman yöntemi ile elde edilen sonuçlar görmemezlikten gelinemez. Bu nedenle $2.0 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$ 'den daha düşük doğruluk gerektiren yükseklik belirlemelerinde kullanılabilir.

Ölçme sırasında mira ve aletdeki çökme hatalarını önlemek için sağlam zeminli geçkiler tercih edilerek hızlı ölçme yapılmalı ve düşey açı gözleme doğruluğu çok daha yüksek aletlerle çalışılması halinde trigonometrik nivelman yöntemleriyle daha yüksek doğruluğa ulaşmak mümkündür.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ışığında şu önerilerde bulunulabilir:

- Trigonometrik nivelmanda kullanılacak elektronik takeometreler hem düşey açı gözlemi hem de uzunluk ölçmelerini yapabilecek nitelikte olmalıdır.
- Elektronik takeometreler saniye inceliğinde düşey açı ölçebilmelidir.
- Düşey açılar aletin iki kez düzeçlenmesi ile ve her bir düzeçlemede 3 seri olmak üzere en az 6 seri ölçülmelidir.
- Uzunluk ölçmelerinde kullanılan elektronik uzaklık ölçerin kalibrasyonu iyi yapılmalıdır.
- Uzaklıklar, elektronik uzaklık ölçerler kullanılarak en az iki kez ölçülmeli ve ölçülen uzunluklara sıfır eki, ölçek ve atmosferik düzeltmeler getirilmelidir.
- Karşılıklı trigonometrik nivelman yönteminde nivelman röper noktalarına yükseklik bağlantısı ölçmeleri, invar miralar kullanılarak dikkatli bir şekilde yapılmalıdır.
- Ölçülerin kayıt edildiği otomatik kayıt üniteleri aynı zamanda sayısal işlem yapabilme özelliğine sahip olmalıdır.
- Ortadan trigonometrik nivelmanda geri ve ileri gözleme uzaklıkları mümkün olduğunca eşit alınmalıdır.

Sonuç olarak, düzenli hata kaynaklarına karşı etkin önlemler alındığında $S=200 - 300$ m gözleme uzaklıkları ile karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelman yöntemi özellikle arızalı arazilerde presizyonlu nivelman yöntemi yerine kullanılabilceği ve önemli derecede ekonomi sağlayacağı söylenebilir.

9. KAYNAKLAR

- AKSOY, A., 1974. Jeodezik Ölçülerin İrdelenmesi. Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul.
- ANGUS-LEPPAN, P.V., 1979. Refraction in Levelling Its Variation with Ground Slope and Meteorological Conditions. Aust. J. Geod. Photo. Surv., 31, pp.51-64.
- BAHNERT, G., 1970. Möglichkeiten und Grenzen der Trigonometrischen Höhenmessung. Habilitationsschrift, arb.Verm. Kart. DDR. Band 24, und 25.
- BAHNERT, G., 1975. Zur Genauigkeit Trigonometrischer Nivellements. Vermessungstechnik, Vol. 23, pp. 8-13.
- BAHNERT, G., 1980. Die Genauigkeit Langsteitiger Trigonometrischen Nivellements. Vermessungstechnik, Vol. 28, pp. 312-314.
- BANGER, G., 1981. Hassas Nivelmanda Hata Kaynakları. İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, Seri. A, Cilt 31, Sayı2, İstanbul.
- BANGER, G., 1982. Magnitude of Refraction in Levelling and its Parameters. Aust. J. Geod. Photo. Surv., 37, pp. 29-61.
- BARIŞKANER, A., 1984. Dengeleme Hesabı. Ders Notları, Selçuk Üniversitesi Müh. Mim.Fak. Jeodezi ve Fot. Müh. Böl., Konya.
- BARIŞKANER, A., 1988. Hatalar Bilgisi ve İstatistik Ders Notları. Selçuk Üniversitesi Müh. Mim.Fak. Jeodezi ve Fot. Müh. Böl., Konya.
- BAYKAL, O., 1980. Yükseklik Ölçmeleri. İ.T.Ü. M.M.L.S. Ders Notları, İstanbul (Basılmamış).
- BAYKAL, O., 1989.a. Presizyonlu Nivelman Tekniği. İ.T.Ü.M.M.L.S. Ders Notları, İstanbul, (Basılmamış).
- BAYKAL, O., 1989.b. Presizyonlu Nivelman Ölçülerinin Değerlendirilmesi. İ.T.Ü.M.M.L.S. Ders Notları, İstanbul, (Basılmamış).
- BAYKAL, O., 1989.c. Presizyonlu Nivelmanda Sıcaklık Hatalarının Önemi ve Ölçme Sonuçlarının Düzeltilmesi. İ.T.Ü.Seminer, (Basılmamış).
- BAYKAL, O., 1989.d. Presizyonlu Nivelmanda Korelasyonlu Gözlemler Durumunda Hata Artma Yasası. İ.T.Ü. Seminer, İstanbul, (Basılmamış).
- BECKERS, H., 1983. Influence of Magnetism on Precise Levelling. Bonn, Dümmler Verlag, pp. 67-83.
- BLASEK, R. and HRADILEK, L., 1979. Investigation on Refraction in Trigonometric Levelling Traverses. Refractional Influences in Astrometry and Geodesy, Eds. E. Tengstrom and G. Teleki, Reidel, Dordrecht, pp. 195-201.
- BRUNNER, F.K., 1975. Trigonometric Levelling With Measured Slope Distances. Proceedings of the 18 th. Australian Survey Congress, Perth, pp. 181-189.
- CAMPBELL, B.A., 1973. Longitudinal Section and Traverse of a Proposed Trunk Water Pipe Line. The Australian Surveyor. 25, pp.189-198.
- CEYLAN, A., 1988. Presizyonlu Nivelmanda Önemli Sistematik Hata Kaynakları Üzerine Bir Çalışma. Y.Lisans Tezi, S.Ü.Fen Bil.Enst., Konya.
- CHRZANOWSKI, A., 1983. Economization of Vertical Control Surveys in Hilly Areas by Using Modified Trigonometric Levelling. ACSM-ASP Convention, March 13-18, Washington, 635-644.
- CHRZANOWSKI, A., GREENING, T., KORNACKI, W., SECOND, J., VAMOSI, S. and CHEN, Y.Q., 1985. Applications and Limitations of Precise Trigonometric Height Traversing. Proceedings of the Third International Symposium on the North American Vertical Datum. Rockville, April, 21-26, 81-93.
- CHRZANOWSKI, A., 1989. Implement of Trigonometric Height Traversing in Geodetic Levelling of High Precision. Dept. of Surveying Engineering, Univ. of New Brunswick, Fredericton, Canada.

- DEMİREL, H., 1987. S-Transformasyonu ve Deformasyon Analizi. Türkiye I. Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara.
- FRAVEL, H., 1982. Die Bedeutung von Nivellements und Schweremessungen für die Bestimmung von Höhenkoordinaten. Nachr. blatt der Verm. U. Katasterverw. Rheinland Pflaz 4/82, 231-242.
- GESSLER, J. 1983. Some Results of the Determination of Geomagnetic Influence on Automatic Level Instruments, Bonn, Dumler Verlag, 109-118.
- GREENING, W.J.T. 1985. Evaluation of Precision Trigonometric Levelling Methods. Dept. of Surveying Engineering, Univ. of New Brunswick, Fredericton, Canada.
- HAOJIAN, F., 1990. Research Report on the Extensive Test of EDM - Trigonometric Levelling in Zhuhai Area of China. FIG XIX. International Congress Helsinki, Finland. pp. 501.8/1-8.
- HAUF, M., 1979. Das Trigonometrische Nivellement Mittels Moderner Geräte. Vermessungstechnik, 27, 45-47.
- HEISKANEN, W. and MORITZ, H., 1984. Fiziksel Jeodezi. Çeviri: Onur GÜRKAN, K.T.Ü. Basımevi, Trabzon.
- HIRSCH, O., 1984. Zur Genauigkeit des Trigonometrischen Nivellements Vom Optischen Zum Informatik Theodolit. Vortrag Zum International Kurs für Ingenieurvermessung, Graz.
- HIRSCH, O., SCHEELEN, R., SCHOLZ, H., BAUTSCH, P., 1990. Trigonometric Levelling in Arid Areas. FIG. XIX. International Congress Helsinki, Finland, 501.9/1-20.
- IŞIK, B.C., 1989. Çekül Sapmalarının Gözönüne Alınması Durumunda Trigonometrik Yükseklik Ölçüsü ile Geometrik Nivelmanın Karşılaştırılması. Türkiye II. Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 523-529, Ankara.
- İNAL, C., 1989. Dengelemede Uyuşumsuz Ölçülerin Ayıklanması. S.Ü. Müh.Mim. Fak. Dergisi, Cilt 4, Sayı 1, 7-14, Konya.
- KALKAN, Y., 1987. Presizyonlu Nivelmanda İstasyon Noktaları Arasındaki Korelasyonun Dengeleme Sonuçlarına Etkisi. Ülkemizin Kalkınmasında Mühendisliğin Rolü Sempozyumu, Yıldız Ün., 422 - 431.
- KRATZSCH, H., 1978. Trigonometric Levelling With Theodolite and Electro-optical Distance Meter. Kern Bulletin, 26, 6-8.
- KRATZSCH, H., 1979. Motorisierte Höhenzugmessung Mit Electro-optischen Tachymeter. Vermessungswesen Und Raumordnung, 41, 139-150.
- KUNTZ, E., 1970. Messung von Zenitdistanzen in der Electrooptischen Entfernungsmessung. Allg. Vermessungs - Nachrichten, 2/1970, 41.
- KUNTZ, E. and SCHMITT, G., 1985. Präzisionshöhenmessung durch Beobachtung gleichzeitiger Zenitdistanzen. Allgemeine Vermessungsnachrichten, 92, 427-434.
- KUNTZ, E. and SCHMITT, G., 1986. Precise Height Determination by Simultaneous Zenit Distances. The Symposium on Height Determination and Recent Vertical Crustal Movements in Western Europe, Hannover, Fed. Rep. of Germany, September 15-19.
- LAWRY, R., 1973. Trigonometrical Level Control for Tunnel Surveys. The Australian Surveyor, 25, 199-201.
- LEITZ, H., 1983. The Influence of the Magnetic Field on the Zeiss NI-1 Precision Level, Bonn, Dumler Verlag, 97-108.
- NIEMEIER, W., 1985. Observation Techniques for Height Determination and Their Relation to Usual Height Systems. Presented in the Symposium on Height Determination and Recent Vertical Crustal Movements in Western Europe, Fed. Rep. of Germany, September 15-19, Hannover.

- ÖZGEN, M.G. ve DENİZ, R., 1986. Elektromagnetik Dalgalarla Jeodezik Ölçmeler. I.T.Ü. Matbaası, İstanbul.
- PELZER, H., 1979. Some Criteria for the Accuracy and the Reliability of Networks. XVII. General Assembly of the International Union on Geodesy and Geophysics, Cambera, Australia.
- PELZER, H., 1983. Systematic Instrumental Errors in Precise Levelling. Bonn, Dümmler Verlag, 3-17.
- PESCHEL, H., 1964. Das Motorisierte Präzisionsnivelement - Leistung Sfhahiges Verfahren Genauer Höhenmessung Vermessungstechnik, 22.s.57 - 64.,.
- RUEGER, J.M. and BRUNNER, F.K., 1981. Practical Results of EDM-Height Traversing. The Australian Surveyor, 30, 363-372.
- RUEGER, J.M. and BRUNNER, F.K., 1982. EDM-height Traversing Versus Geodetic Leveling. The Canadian Surveyor, 36, 69-88.
- SAKA, M.H., 1990. Karşılıklı Zenit Açısı Ölçmeleriyle Çekül Sapmalarının Sıkılaştırılması. Y.Lisans Tezi, I.T.Ü. İstanbul.
- SHELLEIN, H. and WEBER, D., 1986. The Present Stuation of Precise Levelling. Presented in the Symposium on Height Determinations and Recent Vertical Crustal Movements in Western Aurope, Fed. Rep. of Germany, September 15-19.
- SCHLEMMER, H., 1975. Lazer - Interferans Komparator Zur Prufungvon Praezisionsnivellierlatten. D.G.K., Reihe C, 210,München.
- SCHULZ, G., 1983. The Influence of the Surrounding Magnetic Field on Automatic Levels on the Type N1-1. Bonn, Dümmler Verlag, 85-95.
- TOMBAKLAR, Ö.H., 1990. Ölçme Bilgisi. Ders Notları, S.Ü.Müh.Mim.Fak. Jeodezi-Fot.Müh.Böl., 158-171, Konya.
- TORGE, W., 1980. Geodesy. de Gruyter and Co., Berlin.
- ULRIKE, T. and THIES, 1986. Theoretical Aspects of Trigonometric Levelling. Presented in the Symposium on Height Determation and Recent Vertical Crustal Movements in Western Aurope, Fed.Rep. of Germany, September 15-19.
- UZEL, T., 1981. Jeodezik Amaçlı Elektromagnetik Ölçmeler. I.D.M.A. Akademisi Basımevi, İstanbul.
- WHALEN, C.T., 1984. Preliminary Test Results of Precise Trigonometric Levelling with the WILD T200 - DI5 System. ACSM. Bulletin, 93, 15-18.
- WHALEN, C.T., 1985. Trigonometric Motorized Levelling at the National Geodetic Survey. NAVD. Symposium 1985, Rockville, Mryland, April 21-25, 65-67.
- YERCI, M., 1980. Matematik İstatistik. Ders Notları, K.D.M.M.A. Yayınevi, Konya.
- YERCI, M., 1992. Geodezi. Ders Notları, S.Ü.Müh.Mim.Fak.Jeodezi ve Fot. Müh.Böl., Konya (Basılmamış).
- ZIPPELT, K., 1983. Measurement of Level Rod's Temparature and Effect on precise Levelling. Bonn, Dümmler Verlag, 165-177.
- B.Ö.H.Y.Y., 1989. Büyük Ölçekli Harita Yapım Yönetmeliği., T.M.M.O.B. Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, İstanbul Şubesi Yayını, İstanbul.
- Tescil veya Tasdike Konu olan Harita ve Planların 1992 1.Yarı Yılı Birim Fiyatları 1992. T.M.M.O.B. Harita ve Kadastro Müh. Odası, Ankara.

10. EKLER

EK - I. Uygulamada Kullanılan Testler

1.1 İki Ölçü Vektörü Arasındaki Farkın Test Edilmesi (t - testi)

t - testinin amacı, normal dağılımdaki iki ayrı ölçü vektörüne ait kesin değerler arasındaki farkın anlamlı olup olmadığını saptamaktır.

Ölçü vektörleri;

$$L_i' \in N(\mu_1, \sigma_1) \quad : i = 1,2,3,\dots,n_1$$

$$L_i'' \in N(\mu_2, \sigma_2) \quad : i = 1,2,3,\dots,n_2$$

olsun. Bu ölçü vektörlerine ait kesin değerler arasındaki fark için alınacak bir hipotez değeri irdelenecektir. Bu irdeleme için iki durum vardır.

(i) $\sigma_1 = \sigma_2$ kabulü durumunda, iki ölçü vektöründe aynı ölçme yöntemi uygulanmalı, aynı araçlar kullanılmalı ve aynı ölçme ortamı hazırlanmalıdır. Yani bu iki ölçüde de aynı şartlar olmalıdır (Barışkaner 1988).

$$E(S_1^2) = \sigma_1^2 = E(S_2^2) = \sigma_2^2 = \sigma^2$$

X_1 'in fazla ölçü sayısı f_1 , ve X_2 'nin fazla ölçü f_2 ise, Standart sapmalar;

$$S_1 = \pm \sqrt{\frac{[PVV]_1}{f_1}} \quad ; \quad S_2 = \pm \sqrt{\frac{[PVV]_2}{f_2}}$$

bağıntıları ile hesaplanabilir (Barışkaner, 1984).

$$\text{Hipotez : } H_0 : \mu_1 - \mu_2 = \Delta \mu$$

$$\text{Test büyüklüğü : } t = \frac{d}{S_d} = \frac{X_1 - X_2}{S_d} = \frac{\Delta X}{S_d}$$

Hipotezin geçerli sayılabilmesi için test büyüklüğünün, α istatistik güvende

çift taraflı test için ; $1 - \frac{\alpha}{2}$ ve $f = f_1 + f_2$ değerlerine karşılık bulunacak $(\pm t_{f, 1 - \alpha/2})$ güven sınırları arasında kalması veya tek taraflı test için ; $1 - \alpha$ ve $f = f_1 + f_2$ değerlerine karşılık bulunacak $(t_{f, 1 - \alpha})$ güven sınırlarından daha küçük olması gerekir.

S_d için ;

$$S_d = S \cdot \sqrt{Q_{11} + Q_{22}}$$

bağıntısı geçerlidir. Burada,

$$S = \pm \sqrt{\frac{f_1 \cdot S_1^2 + f_2 \cdot S_2^2}{f_1 + f_2}}$$

dır (Aksoy 1974).

(ii) $\sigma_1 \neq \sigma_2$ genel durumunda, test bir önceki (i) durumunda olduğu gibi uygulanır. Ancak t - dağılımı için Fazla ölçü sayısı,

$$f = \frac{f_1 \cdot f_2 \cdot (S_1^2 + S_2^2)^2}{f_1 \cdot S_2^4 + f_2 \cdot S_1^4}$$

bağıntısı ile yaklaşık olarak hesaplanabilir (Aksoy 1974).

1.2 İki Ayrı Amprik Standart Sapmanın Karşılaştırılması (F - testi)

F- testinin amacı, standart sapmaları S_1 ve S_2 olan iki ayrı ölçü grubunun aynı doğrulukta olup olmadığını saptamaktır.

$$E(S_1^2) = \sigma_1^2$$

$$E(S_2^2) = \sigma_2^2$$

Sıfır hipotezi

$H_0 : \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$: Sıfır hipotezi

$H_{A1} : \sigma_1 \neq \sigma_2$: Alternatif hipotez

$H_{A2} : \sigma_1 > \sigma_2$: Alternatif hipotez

Ölçülere ve amprik standart sapmalara bakılarak ölçülerin aynı doğrulukta olup olmadığına karar verilemez. Bunun için F - testinden yararlanılır (Yerci 1980).

Test büyüklüğü: $F = \frac{S_1^2}{S_2^2}$ dir. (Burada $S_1 > S_2$ olmalıdır)

Sıfır hipotezinin geçerli sayılabilmesi için F - test büyüklüğünün tablo değerinden ($F_{f_1, f_2, 1-\alpha}$) küçük olması gerekir. Sıfır hipotezi geçerli ise birinci ölçünün doğruluğu ile ikinci ölçünün doğruluğu eşittir. Sıfır hipotezi red edilirse iki ölçü aynı doğrulukta değildir denir.

I.3. Bir çok Amprik Standart Sapmanın Karşılaştırılması (BARLETT- testi)

Barlett- testinin amacı, m sayıdaki ölçü grubuna ait standart sapmaların aynı doğrulukta olup olmadığını saptamaktır.

Ölçü grubuna ait standart sapma ve fazla ölçü sayısı,

S_1	ve	f_1
S_2	ve	f_2
S_3	ve	f_3
.	..	.
.	..	.
.	..	.
S_m	ve	f_m

$E(S_i^2) = \sigma_i^2$; $i = 1, 2, 3, \dots, m$

olsun.

Sıfır hipotezi

$$H_0 : \sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_m = \sigma \quad : \text{Sıfır hipotezi}$$

$$H_A : \sigma_k \neq \sigma \quad : \text{Alternatif hipotez}$$

Ölçü gruplarının aynı doğrulukta olup olmadığını irdeleyebilmek için Barlett - testinden yararlanılır. Barlett - testinde,

$$f = \sum_{i=1}^m f_i$$

ve standart sapmaların ağırlıklı ortalaması ,

$$S^2 = \frac{1}{f} \cdot \sum_{j=1}^m f_j \cdot S_j^2$$

bağıntısı ile hesaplanır (Barışkaner 1988)

Test büyüklüğünün hesaplanabilmesi için,

$$C = 1 + \frac{1}{3(m-1)} \cdot \left(\sum_{i=1}^m \frac{1}{f_i} - \frac{1}{f} \right)$$

bağıntısı ile yardımcı bir C büyüklüğü tanımlanmaktadır. Buna göre test büyüklüğü,

$$B = \frac{1}{C} \left\{ f \cdot \ln(S^2) - \sum_{i=1}^m f_i \cdot \ln(S_i^2) \right\}$$

Bağıntısı ile hesaplanabilir (Barışkaner 1988).

Sıfır hipotezinin geçerli sayılabilmesi için test büyüklüğü (B_{Hesap}) değerinden ($\chi_{m-1, 1-\alpha}^2$) küçük olmalıdır. Sıfır hipotezi geçerli ise ölçü grupları aynı doğruluktadır.

Sıfır hipotezi red edilirse ölçü grupları aynı doğrulukta değildir.

Çizelge I.1 Trigonometrik nivelman ölçülerinin Barlett testi sonuçları (*)

Nivelman Yöntemi	Gözleme Uzaklığı [S]	Ölçü Grubu Sayısı [m]	B _{Hesap}	$\chi^2_{m-1,0.95}$ [Tablo]
Ortadan Trigonometrik Nivelman	50	71	132.36	90.50
	100	35	92.32	48.60
	150	25	59.68	36.40
	200	22	53.81	32.40
Karşılıklı ve Eşzamanlı Trigonometrik Nivelman	100	128	116.38	125.00
	200	80	67.33	100.94
	300	56	46.95	73.30
	400	52	50.00	68.66

(*) .B > $\chi^2_{m-1,0.95}$: Ölçü grupları aynı doğrulukta değildir.

EK - 2

Çizelge II.1 Presizyonlu nivelman dengeleme sonuçları

Kenar No	Baş. N. No	Bitiş N. No	DENGELEME SONUÇLARI				$F = \frac{m_1^2}{m_2^2}$	$t = \frac{d}{m_d}$
			$P = \frac{1}{S_{km}}$		$P = \frac{1}{n}$			
			ΔH [m]	$\pm m_{\Delta H}$ [mm]	ΔH [m]	$\pm m_{\Delta H}$ [mm]		
1	1	2	0.72494	0.29	0.72494	0.24	1.46	
2	2	3	7.91183	0.35	7.91183	0.28	1.56	
3	3	4	13.36896	0.39	13.36896	0.32	1.06	
4	4	5	17.58061	0.33	17.58061	0.32	1.10	
5	5	6	6.39447	0.21	6.39448	0.20	1.05	
6	6	7	27.83696	0.44	27.83692	0.45	1.05	
7	7	8	7.17122	0.37	7.17122	0.37	1.00	
8	9	8	17.47185	0.31	17.47187	0.32	1.07	
9	9	10	0.16995	0.43	0.16997	0.40	1.16	
10	11	10	11.44692	0.36	11.44694	0.28	1.65	
11	4	11	30.23445	0.39	30.23440	0.45	1.33	
12	4	9	41.51143	0.51	41.51137	0.51	1.00	0.08
13	5	9	23.93081	0.50	23.93076	0.45	1.23	
14	5	10	24.10076	0.54	24.10073	0.53	1.04	
15	6	9	17.53634	0.45	17.53627	0.40	1.27	
16	9	7	10.30063	0.38	10.30064	0.37	1.05	
17	10	8	17.30190	0.49	17.30190	0.47	1.09	
18	11	9	11.27698	0.45	11.27698	0.47	1.09	
Standart Sapma			$m_0 = \pm 0.59 \text{ mm} / \sqrt{km}$		$m_0 = \pm 0.10 \text{ mm} / \sqrt{n}$			

$$F_{8,8,0.95} = 3.44$$

$$t_{16,0.95} = 2.13$$

Çizelge II.2 S = 50 m. gözleme uzaklıkları ile Ortadan trigonometrik nivelman dengeleme sonuçları

Kenar No	Baş. N. No	Bitiş N. No	DENGELEME SONUÇLARI				$\frac{m_1^2}{F} = \frac{m_2^2}{m_2^2}$	$t = \frac{p}{1}$
			$P = \frac{1}{S_{km}}$		$P = \frac{1}{n}$			
			ΔH [m]	$\pm m_{\Delta H}$ [mm)	ΔH [m]	$\pm m_{\Delta H}$ [mm)		
1	1	2	0.72632	2.21	0.72632	2.50	1.28	
2	2	3	7.92403	2.71	7.92403	2.89	1.14	
3	3	4	13.36626	2.99	13.36626	3.23	1.17	
4	4	5	17.58922	2.39	17.58934	2.50	1.09	
5	5	6	6.39662	1.56	6.39655	1.45	1.16	
6	6	7	27.85200	2.78	27.85187	2.89	1.08	
7	7	8	7.17117	2.47	7.17110	2.50	1.02	
8	9	8	17.47725	2.16	17.47718	2.04	1.12	
9	9	10	0.16835	2.62	0.16845	2.50	1.10	
10	11	10	11.45013	2.64	11.45018	2.50	1.11	
11	4	11	30.24999	2.79	30.24994	2.89	1.07	
12	4	9	41.53177	3.92	41.53168	4.09	1.09	
13	5	9	23.94254	3.18	23.94234	3.29	1.07	
14	5	10	24.11090	3.71	24.11078	3.82	1.06	
15	6	9	17.54593	3.03	17.54578	2.89	1.10	
16	9	7	10.30608	2.50	10.30608	2.50	1.00	
17	10	8	17.30889	3.12	17.30873	3.23	1.07	
18	11	9	11.28177	2.98	11.28174	2.89	1.06	
Standart Sapma			$m_0 = \pm 4.50 \text{ mm} \cdot \sqrt{\text{km}}$		$m_0 = \pm 1.45 \text{ mm} / \sqrt{n}$			

$$F_{8,8,0.95} = 3.44$$

$$t_{16,0.95} = 2.13$$

Çizelge II.3 S = 100 m. gözleme uzaklıkları ile Ortadan trigonometrik nivelman dengeleme sonuçları

Kenar No	Baş. N. No	Bitiş N. No	DENGELEME SONUÇLARI				$\sum_{i=1}^n m_i^2$ F = $\frac{\sum m_i^2}{n}$	$t = \frac{d}{m_0}$
			$P = \frac{1}{S_{km}}$		$P = \frac{1}{n}$			
			ΔH [m]	$\pm m_{\Delta H}$ [mm]	ΔH [m]	$\pm m_{\Delta H}$ [mm]		
1	1	2	0.72929	2.00	0.72829	1.83	1.19	0.17
2	2	3	7.91278	2.45	7.91278	2.59	1.12	
3	3	4	13.36779	2.71	13.36779	2.59	1.09	
4	4	5	17.58661	2.16	17.58687	2.59	1.44	
5	5	6	6.39537	1.41	6.39496	1.83	1.68	
6	6	7	27.84065	2.51	27.84067	2.59	1.06	
7	7	8	7.17083	2.24	7.17048	2.59	1.34	
8	9	8	17.47336	1.95	17.47304	1.83	1.11	
9	9	10	0.17074	2.37	0.17078	2.59	1.19	
10	11	10	11.44950	2.39	11.44951	2.59	1.17	
11	4	11	30.24133	2.52	30.24121	2.59	1.06	
12	4	9	41.52009	3.55	41.51994	3.17	1.25	
13	5	9	23.93348	2.88	23.93307	2.59	1.24	
14	5	10	24.10423	3.35	24.10385	3.17	1.12	
15	6	9	17.53812	2.74	17.53811	2.59	1.12	
16	9	7	10.30253	2.26	10.30255	2.59	1.31	
17	10	8	17.30262	2.82	17.30255	2.59	1.19	
18	11	9	11.27875	2.69	11.27873	2.59	1.08	
Standart Sapma			$m_0 = \pm 4.07 \text{ mm} / \sqrt{km}$		$m_0 = \pm 1.83 \text{ mm} / \sqrt{n}$			

$$F_{8,8,0.95} = 3.44$$

$$t_{16,0.95} = 2.13$$

Çizelge II.4 S = 150m. gözleme uzaklıkları ile Ortadan trigonometrik nivelman dengeleme sonuçları

Kenar No	Baş. N. No	Bitiş N. No	DENGELEME SONUÇLARI				$\sum_{m_1}^2$ = $\sum_{m_2}^2$	$t = \frac{d}{m_0}$
			$P = \frac{1}{S_{km}}$		$P = \frac{1}{n}$			
			ΔH [m]	$\pm m_{\Delta H}$ [mm]	ΔH [m]	$\pm m_{\Delta H}$ [mm]		
1	1	2	0.72829	0.92	0.72829	1.00	1.18	
2	2	3	7.91462	1.12	7.91462	1.00	1.25	
3	3	4	13.36579	1.24	13.36579	1.42	1.31	
4	4	5	17.58445	1.00	17.58449	1.42	2.02	
5	5	6	6.39572	0.65	6.39541	1.00	2.37	
6	6	7	27.84186	1.15	27.84219	1.00	1.32	
7	7	8	7.17054	1.03	7.17054	1.00	1.06	
8	9	8	17.47330	0.89	17.47323	1.00	1.26	
9	9	10	0.16863	1.09	0.16866	1.00	1.19	
10	11	10	11.44774	1.10	11.44778	1.00	1.21	
11	4	11	30.24017	1.16	30.24028	1.00	1.35	
12	4	9	41.51928	1.63	41.51940	1.74	1.14	
13	5	9	23.93483	1.32	23.93490	1.42	1.16	
14	5	10	24.10345	1.54	24.10356	1.42	1.18	
15	6	9	17.53910	1.26	17.53949	1.42	1.27	0.20
16	9	7	10.30276	1.04	10.30269	1.00	1.08	
17	10	8	17.30467	1.23	17.30457	1.42	1.33	
18	11	9	11.27911	1.23	11.27911	1.42	1.33	
Standart Sapma			$m_0 = \pm 1.87 \text{ mm} / \sqrt{km}$		$m_0 = \pm 1.00 \text{ mm} / \sqrt{n}$			

$$F_{8,8,0.95} = 3.44$$

$$t_{16,0.95} = 2.13$$

Çizelge II.5 S = 200 m. gözleme uzaklıkları ile Ortadan trigonometrik nivelman dengeleme sonuçları

Kenar No	Baş. N. No	Bitiş N. No	DENGELEME SONUÇLARI				$\frac{m_1^2}{m_2^2}$ $\hat{F} = \frac{m_1^2}{m_2^2}$	$\hat{t} = \frac{p}{m_1}$
			$P = \frac{1}{S_{km}}$		$P = \frac{1}{n}$			
			ΔH [m]	$\pm m_{\Delta H}$ [mm]	ΔH [m]	$\pm m_{\Delta H}$ [mm]		
1	1	2	0.72829	1.35	0.72829	1.69	1.57	
2	2	3	7.91462	1.65	7.91462	1.69	1.05	
3	3	4	13.36741	1.83	13.36741	1.69	1.17	
4	4	5	17.58463	1.46	17.58508	1.69	1.34	
5	5	6	6.39537	0.95	6.39538	1.69	3.16	
6	6	7	27.84133	1.70	27.84158	1.69	1.01	
7	7	8	7.17027	1.51	7.17018	1.69	1.25	
8	9	8	17.47320	1.32	17.47312	1.69	1.64	
9	9	10	0.16789	1.60	0.16764	1.69	1.12	
10	11	10	11.44698	1.61	11.44668	1.69	1.10	
11	4	11	30.23930	1.70	30.23907	1.69	1.01	
12	4	9	41.51839	2.39	41.51811	2.40	1.01	
13	5	9	23.93376	1.94	23.93303	2.40	1.53	
14	5	10	24.10165	2.26	24.10067	1.69	1.79	
15	6	9	17.53840	1.85	17.53865	2.40	1.68	
16	9	7	10.30293	1.53	10.30294	1.69	1.22	
17	10	8	17.30551	1.90	17.30548	2.40	1.60	
18	11	9	11.27909	1.82	11.27904	1.69	1.16	
Standart Sapma			$m_0 = \pm 2.74 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$		$m_0 = \pm 1.69 \text{ mm} / \sqrt{n}$			

$$F_{8,8,0.95} = 3.44$$

$$t_{16,0.95} = 2.13$$

Çizelge II.6 S = 100 m. gözleme uzaklıkları ile Karşılıklı ve Eşzamanlı trigonometrik nivelman dengeleme sonuçları

Kenar No	Baş. N. No	Bitiş N. No	DENGELEME SONUÇLARI				$F = \frac{m_1^2}{m_2^2}$	$t = \frac{p}{m_d}$
			$P = \frac{1}{S_{km}}$		$P = \frac{1}{n}$			
			ΔH [m]	$\pm m_{\Delta H}$ [mm]	ΔH [m]	$\pm m_{\Delta H}$ [mm]		
1	1	2	0.72662	1.25	0.72662	1.19	1.10	0.05
2	2	3	7.91325	1.53	7.91325	1.46	1.10	
3	3	4	13.36640	1.70	13.36640	1.68	1.02	
4	4	5	17.58345	1.35	17.58348	1.46	1.17	
5	5	6	6.39428	0.89	6.39434	0.84	1.12	
6	6	7	27.83830	1.58	27.83818	1.68	1.13	
7	7	8	7.17316	1.40	7.17315	1.46	1.09	
8	9	8	17.47410	1.22	17.47408	1.19	1.05	
9	9	10	0.17017	1.49	0.17016	1.46	1.04	
10	11	10	11.44771	1.50	11.44774	1.46	1.06	
11	4	11	30.23755	1.58	30.23748	1.46	1.17	
12	4	9	41.51508	2.22	41.51506	2.23	1.01	
13	5	9	23.93163	1.80	23.93158	1.68	1.15	
14	5	10	24.10181	2.10	24.10174	2.06	1.04	
15	6	9	17.53735	1.72	17.53725	1.68	1.05	
16	9	7	10.30094	1.42	10.30093	1.46	1.06	
17	10	8	17.30393	1.77	17.30393	1.88	1.13	
18	11	9	11.27753	1.69	11.27759	1.68	1.01	
Standart Sapma			$m_0 = \pm 2.55 \text{ mm} / \sqrt{km}$		$m_0 = \pm 0.84 \text{ mm} / \sqrt{n}$			

$$F_{8,8,0.95} = 3.44$$

$$t_{16,0.95} = 2.13$$

Çizelge II.7 S = 200 m. gözleme uzaklıkları ile Karşılıklı ve Eşzamanlı trigonometrik nivelman dengeleme sonuçları

Kenar No	Baş. N. No	Bitiş N. No	DENGELEME SONUÇLARI				$F = \frac{\sum m_1^2}{\sum m_2^2}$	$t_{p=1}$
			$P = \frac{1}{S_{km}}$		$P = \frac{1}{n}$			
			ΔH [m]	$\pm m_{\Delta H}$ [mm]	ΔH [m]	$\pm m_{\Delta H}$ [mm]		
1	1	2	0.72515	0.92	0.72515	0.78	1.39	0.09
2	2	3	7.91276	1.12	7.91276	1.10	1.04	
3	3	4	13.36838	1.24	13.36838	1.10	1.27	
4	4	5	17.58301	0.99	17.58306	1.10	1.23	
5	5	6	6.39464	0.65	6.39464	0.78	1.44	
6	6	7	27.83817	1.15	27.83832	1.10	1.09	
7	7	8	7.17072	1.02	7.17065	1.10	1.16	
8	9	8	17.47245	0.89	17.47243	0.78	1.30	
9	9	10	0.16950	1.09	0.16949	1.35	1.53	
10	11	10	11.44681	1.09	11.44682	1.10	1.02	
11	4	11	30.23677	1.16	30.23686	1.10	1.11	
12	4	9	41.51409	1.62	41.51419	1.56	1.08	
13	5	9	23.93108	1.32	23.93113	1.35	1.05	
14	5	10	24.10058	1.54	24.10062	1.35	1.30	
15	6	9	17.53644	1.26	17.53654	1.35	1.15	
16	9	7	10.30173	1.29	10.30294	1.10	1.12	
17	10	8	17.30296	1.29	17.30294	1.35	1.10	
18	11	9	11.27732	1.23	11.27733	1.10	1.25	
Standart Sapma			$m_0 = \pm 1.86 \text{ mm} / \sqrt{km}$		$m_0 = \pm 0.78 \text{ mm} / \sqrt{n}$			

$$F_{8,8,0.95} = 3.44$$

$$t_{16,0.95} = 2.13$$

Çizelge II.8 S = 300 m. gözleme uzaklıkları ile Karşılıklı ve Eşzamanlı trigonometrik nivelman dengeleme sonuçları

Kenar No	Baş. N. No	Bitiş N. No	DENGELEME SONUÇLARI				$F = \frac{m_1^2}{m_2^2}$	$t = \frac{d}{m_2}$
			$P = \frac{1}{S_{km}}$		$P = \frac{1}{n}$			
			ΔH [m]	$\pm m_{\Delta H}$ [mm]	ΔH [m]	$\pm m_{\Delta H}$ [mm]		
1	1	2	0.72515	1.20	0.72515	1.24	1.07	
2	2	3	7.91276	1.46	7.91276	1.24	1.39	
3	3	4	13.36710	1.62	13.36710	1.76	1.18	
4	4	5	17.58378	1.29	17.58349	1.24	1.08	
5	5	6	6.39431	0.85	6.39363	1.24	2.13	
6	6	7	27.83792	1.50	27.83866	1.24	1.46	
7	7	8	7.17119	1.34	7.17130	1.24	1.17	
8	9	8	17.47241	1.17	17.47241	1.24	1.12	
9	9	10	0.16928	1.42	0.16921	1.24	1.31	
10	11	10	11.44675	1.43	11.44665	1.24	1.33	
11	4	11	30.23731	1.51	30.23723	1.24	1.48	
12	4	9	41.51479	2.12	41.51467	2.49	1.38	
13	5	9	23.93100	1.72	23.93118	2.16	1.58	
14	5	10	24.10028	2.01	24.10039	1.76	1.30	
15	6	9	17.53670	1.64	17.53755	2.16	1.73	
16	9	7	10.30123	1.35	10.30111	1.24	1.19	
17	10	8	17.30314	1.68	17.30320	1.76	1.10	
18	11	9	11.27748	1.61	11.27744	1.24	1.69	
Standart Sapma			$m_0 = \pm 2.43 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$		$m_0 = \pm 1.24 \text{ mm} / \sqrt{n}$			0.31

$$F_{8,8,0.95} = 3.44$$

$$t_{16,0.95} = 2.13$$

Çizelge II.9 S = 400 m. gözleme uzaklıkları ile Karşılıklı ve Eşzamanlı trigonometrik nivelman dengeleme sonuçları

Kenar No	Baş. N. No	Bitiş N. No	DENGELEME SONUÇLARI				$\frac{m_1^2}{F} = \frac{m_2^2}{m_1^2}$	$\frac{m_1}{i} = \frac{m_2}{m_1}$
			$P = \frac{1}{S_{km}}$		$P = \frac{1}{n}$			
			ΔH [m]	$\pm m_{\Delta H}$ [mm]	ΔH [m]	$\pm m_{\Delta H}$ [mm]		
1	1	2	0.72515	1.21	0.72515	1.29	1.14	0.51
2	2	3	7.91276	1.48	7.91276	1.29	1.32	
3	3	4	13.36875	1.63	13.36875	1.29	1.60	
4	4	5	17.58382	1.30	17.58364	1.29	1.02	
5	5	6	6.39429	0.85	6.39350	1.29	2.30	
6	6	7	27.83789	1.52	27.83857	1.29	1.39	
7	7	8	7.17117	1.35	7.17124	1.29	1.10	
8	9	8	17.47240	1.18	17.47240	1.29	1.20	
9	9	10	0.16922	1.43	0.16905	1.29	1.23	
10	11	10	11.44671	1.44	11.44650	1.29	1.25	
11	4	11	30.23727	1.52	30.23711	1.29	1.39	
12	4	9	41.51476	2.14	41.51456	2.57	1.44	
13	5	9	23.93095	1.74	23.93092	2.23	1.64	
14	5	10	24.10017	2.03	24.09997	1.29	2.48	
15	6	9	17.53666	1.66	17.53742	2.23	1.80	
16	9	7	10.30123	1.37	10.30115	1.29	1.13	
17	10	8	17.30318	1.70	17.30335	1.82	1.15	
18	11	9	11.27749	1.63	11.27745	1.29	1.60	
Standart Sapma			$m_0 = \pm 2.46 \text{ mm} / \sqrt{km}$		$m_0 = \pm 1.29 \text{ mm} / \sqrt{n}$			

$$F_{8,8,0.95} = 3.44$$

$$t_{16,0.95} = 2.13$$

EK - 3

Çizelge III.1

Kenar No	Baş. N. No	Bitiş N. No	PRESİZYONLU NİVELMAN		S = 50 m ORTADAN TRİGONOMETRİK NİVELMAN		$d = \Delta H_T - \Delta H_G$ [mm]	$\dot{F} = \frac{m_1^2}{m_2^2}$	$\frac{p}{p_0} = 1$
			ΔH_G [m]	$\pm m_{\Delta H}$ [mm]	ΔH_T [m]	$\pm m_{\Delta H}$ [mm]			
1	1	2	0.72494	0.29	0.72632	2.21	1.38	58.07	0.62
2	2	3	7.91183	0.35	7.92403	2.71	12.20	59.95	4.46
3	3	4	13.36896	0.39	13.36626	2.99	-2.70	58.78	0.90
4	4	5	17.58061	0.33	17.58922	2.39	8.61	52.45	3.57
5	5	6	6.39447	0.21	6.39662	1.56	2.15	55.18	1.37
6	6	7	27.83696	0.44	27.85200	2.78	15.04	39.92	5.34
7	7	8	7.17122	0.37	7.17117	2.47	-0.05	44.56	0.02
8	9	8	17.47185	0.31	17.47725	2.16	5.40	48.55	2.47
9	9	10	0.16995	0.43	0.16835	2.62	-1.60	37.12	0.60
10	11	10	11.44692	0.36	11.45013	2.64	3.21	53.78	1.20
11	4	11	30.23445	0.39	30.24999	2.79	15.54	51.18	5.52
12	4	9	41.51143	0.51	41.53177	3.92	2.35	59.08	5.15
13	5	9	23.93081	0.50	23.94254	3.18	11.73	40.45	3.64
14	5	10	24.10076	0.54	24.11090	3.71	10.14	47.20	2.70
15	6	9	17.53634	0.45	17.54593	3.03	9.59	45.34	3.13
16	9	7	10.30063	0.38	10.30608	2.50	5.45	43.28	2.15
17	10	8	17.30190	0.49	17.30889	3.12	6.99	40.54	2.21
18	11	9	11.27698	0.45	11.28177	2.98	4.79	43.85	1.59
Standart Sapma [m_0]			$\pm 0.59 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$		$\pm 4.50 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$				

$$F_{8,8,0.95} = 3.44$$

$$t_{16,0.95} = 2.13$$

Çizelge III.2

Kenar No	Baş. N. No	Bitiş N. No	PRESIZYONLU NIVELMAN		S = 100 m ORTADAN TRIGONOMETRİK NIVELMAN		d = $\Delta H_T - \Delta H_G$ [mm]	$F = \frac{m_1^2}{m_G^2}$	$t = \frac{d}{m_d}$
			ΔH_G [m]	$\pm m_{\Delta H}$ [mm]	ΔH_T [m]	$\pm m_{\Delta H}$ [mm]			
1	1	2	0.72494	0.29	0.72829	2.00	3.35	47.56	1.66
2	2	3	7.91183	0.35	7.91278	2.45	0.95	49.00	0.38
3	3	4	13.36896	0.39	13.36779	2.71	-1.17	48.28	0.43
4	4	5	17.58061	0.33	17.58661	2.16	6.00	42.84	2.75
5	5	6	6.39447	0.21	6.39537	1.41	0.90	45.08	0.63
6	6	7	27.83696	0.44	27.84065	2.51	3.69	32.54	1.45
7	7	8	7.17122	0.37	7.17083	2.24	-0.39	36.65	0.17
8	9	8	17.47185	0.31	17.47336	1.95	1.51	39.57	0.76
9	9	10	0.16995	0.43	0.17074	2.37	0.79	30.38	0.33
10	11	10	11.44692	0.36	11.44950	2.39	2.58	44.07	1.07
11	4	11	30.23445	0.39	30.24133	2.52	6.88	41.75	2.70
12	4	9	41.51143	0.51	41.52009	3.55	8.66	48.45	2.41
13	5	9	23.93081	0.50	23.93348	2.88	2.67	33.18	0.91
14	5	10	24.10076	0.54	24.10423	3.35	3.47	38.49	1.02
15	6	9	17.53634	0.45	17.53812	2.74	1.78	37.07	0.64
16	9	7	10.30063	0.38	10.30253	2.26	1.90	35.37	0.83
17	10	8	17.30190	0.49	17.30262	2.82	0.72	33.12	0.25
18	11	9	11.27698	0.45	11.27875	2.69	1.77	35.73	0.65
Standart Sapma [m ₀]			$\pm 0.59 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$		$\pm 4.07 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$				

$$F_{8,8,0.95} = 3.44$$

$$t_{16,0.95} = 2.13$$

Çizelge III.3

Kenar No	Baş. N. No	Bitiş N. No	PRESIZYONLU NIVELMAN		S = 150 m ORTADAN TRIGONOMETRİK NIVELMAN		d = ΔH _T - ΔH _G [mm]	$F = \frac{m_1^2}{m_0^2}$	$t = \frac{d}{m_0}$
			ΔH _G	± m _{ΔH}	ΔH _T	± m _{ΔH}			
			[m]	[mm]	[m]	[mm]			
1	1	2	0.72494	0.29	0.72829	0.92	3.35	10.06	3.47
2	2	3	7.91183	0.35	7.91462	1.12	2.79	10.24	2.38
3	3	4	13.36896	0.39	13.36579	1.24	-3.17	10.11	2.44
4	4	5	17.58061	0.33	17.58445	1.00	3.84	9.00	3.68
5	5	6	6.39447	0.21	6.39572	0.65	1.25	9.58	1.83
6	6	7	27.83696	0.44	27.84186	1.15	4.90	6.83	3.98
7	7	8	7.17122	0.37	7.17054	1.03	-0.68	7.75	0.62
8	9	8	17.47185	0.31	17.47330	0.89	1.45	8.24	1.54
9	9	10	0.16995	0.43	0.16863	1.09	-1.32	6.43	1.13
10	11	10	11.44692	0.36	11.44774	1.10	0.82	9.34	0.71
11	4	11	30.23445	0.39	30.24017	1.16	5.72	8.55	4.67
12	4	9	41.51143	0.51	41.51928	1.63	7.85	10.21	4.60
13	5	9	23.93081	0.50	23.93483	1.32	4.02	6.97	2.85
14	5	10	24.10076	0.54	24.10345	1.54	2.69	8.13	1.65
15	6	9	17.53634	0.45	17.53910	1.26	2.76	7.84	2.06
16	9	7	10.30063	0.38	10.30276	1.04	2.13	7.49	1.92
17	10	8	17.30190	0.49	17.30467	1.23	2.77	6.93	2.01
18	11	9	11.27698	0.45	11.27911	1.23	2.13	7.47	1.63
Standart Sapma [m ₀]			± 0.59 mm / √km		± 1.86 mm / √km				

$$F_{8,8,0.95} = 3.44$$

$$t_{16,0.95} = 2.13$$

Çizelge III.4

Kenar No	Baş. N. No	Bitiş N. No	PRESIZYONLU NIVELMAN		S = 200 m ORTADAN TRIGONOMETRİK NIVELMAN		$d = \Delta H_T - \Delta H_G$ [mm]	$f = \frac{m_1^2}{m_0^2}$	$t = \frac{d}{m_0}$
			ΔH_G	$\pm m_{\Delta H}$	ΔH_T	$\pm m_{\Delta H}$			
			[m]	[mm]	[m]	[mm]			
1	1	2	0.72494	0.29	0.72829	1.35	3.35	21.67	2.43
2	2	3	7.91183	0.35	7.91462	1.65	2.79	22.22	1.65
3	3	4	13.36896	0.39	13.36741	1.83	-1.55	22.02	0.83
4	4	5	17.58061	0.33	17.58463	1.46	4.02	19.57	2.69
5	5	6	6.39447	0.21	6.39537	0.95	0.90	20.45	0.93
6	6	7	27.83696	0.44	27.84133	1.70	4.37	14.93	2.49
7	7	8	7.17122	0.37	7.17027	1.51	-0.95	16.66	0.61
8	9	8	17.47185	0.31	17.47320	1.32	1.35	18.13	1.00
9	9	10	0.16995	0.43	0.16789	1.60	-2.06	13.85	1.24
10	11	10	11.44692	0.36	11.44698	1.61	0.06	20.00	0.04
11	4	11	30.23445	0.39	30.23930	1.70	4.85	19.00	2.78
12	4	9	41.51143	0.51	41.51839	2.39	6.96	21.96	2.85
13	5	9	23.93081	0.50	23.93376	1.94	2.95	15.05	1.47
14	5	10	24.10076	0.54	24.10165	2.26	0.89	17.52	0.38
15	6	9	17.53634	0.45	17.53840	1.85	2.06	16.90	1.08
16	9	7	10.30063	0.38	10.30293	1.53	2.30	16.21	1.46
17	10	8	17.30190	0.49	17.30551	1.90	3.41	15.04	1.74
18	11	9	11.27698	0.45	11.27909	1.82	2.11	16.36	1.13
Standart Sapma [m_0]			$\pm 0.59 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$		$\pm 2.74 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$				

$$F_{8,8,0.95} = 3.44$$

$$t_{16,0.95} = 2.13$$

Çizelge III.5

Kenar No	Baş. N. No	Bitiş N. No	PRESİZYONLU NİVELMAN		S = 100 m KARŞILIKLI VE EŞZAMANLI TRIGONOMETRİK NİVELMAN		d = ΔH _T - ΔH _G [mm]	$F = \frac{m_1^2}{m_0^2}$	$t = \frac{p}{m_0}$
			ΔH _G [m]	± m _{ΔH} [mm]	ΔH _T [m]	± m _{ΔH} [mm]			
1	1	2	0.72494	0.29	0.72662	1.25	1.68	18.58	1.31
2	2	3	7.91183	0.35	7.91325	1.53	1.42	19.11	0.90
3	3	4	13.36896	0.39	13.36640	1.70	-2.55	19.00	1.47
4	4	5	17.58061	0.33	17.58345	1.35	2.84	16.74	2.04
5	5	6	6.39447	0.21	6.39428	0.89	-0.19	17.96	0.21
6	6	7	27.83696	0.44	27.83830	1.58	1.34	12.89	0.82
7	7	8	7.17122	0.37	7.17316	1.40	1.94	14.32	1.34
8	9	8	17.47185	0.31	17.47410	1.22	2.25	15.49	1.79
9	9	10	0.16995	0.43	0.17017	1.49	0.22	12.01	0.14
10	11	10	11.44692	0.36	11.44771	1.50	0.79	17.36	0.51
11	4	11	30.23445	0.39	30.23755	1.58	3.10	16.41	1.90
12	4	9	41.51143	0.51	41.51508	2.22	3.65	18.95	1.60
13	5	9	23.93081	0.50	23.93163	1.80	0.82	12.96	0.44
14	5	10	24.10076	0.54	24.10181	2.10	-1.45	15.12	0.67
15	6	9	17.53634	0.45	17.53735	0.72	1.01	14.61	0.57
16	9	7	10.30063	0.38	10.30094	1.42	0.31	13.96	0.21
17	10	8	17.30190	0.49	17.30393	1.77	2.03	13.05	1.11
18	11	9	11.27698	0.45	11.27753	1.69	0.55	14.10	0.31
Standart Sapma [m ₀]			± 0.59 mm / √km		± 2.51 mm / √km				

$$F_{8,8,0.95} = 3.44$$

$$t_{16,0.95} = 2.13$$

Çizelge III.6

Kenar No	Baş. N. No	Bitiş N. No	PRESİZYONLU NİVELMAN		S = 200 m KARŞILIKLI VE EŞZAMANLI TRIGONOMETRİK NİVELMAN		$d = \Delta H_T - \Delta H_G$ [mm]	$F = \frac{m_1^2}{m_2}$	$t = \frac{d}{m_d}$
			ΔH_G [m]	$\pm m_{\Delta H}$ [mm]	ΔH_T [m]	$\pm m_{\Delta H}$ [mm]			
1	1	2	0.72494	0.29	0.72515	0.92	0.21	10.06	0.22
2	2	3	7.91183	0.35	7.91276	1.12	0.93	10.24	0.79
3	3	4	13.36896	0.39	13.36838	1.24	-0.58	10.11	1.43
4	4	5	17.58061	0.33	17.58301	0.99	2.40	9.00	3.04
5	5	6	6.39447	0.21	6.39464	0.65	-0.17	9.58	0.23
6	6	7	27.83696	0.44	27.83817	1.15	1.21	6.83	0.78
7	7	8	7.17122	0.37	7.17072	1.02	-0.50	7.60	0.03
8	9	8	17.47185	0.31	17.47245	0.89	0.60	8.24	0.59
9	9	10	0.16995	0.43	0.16950	1.09	-0.45	6.43	0.57
10	11	10	11.44692	0.36	11.44681	1.09	-0.11	9.17	0.15
11	4	11	30.23445	0.39	30.23677	1.16	2.32	8.85	2.34
12	4	9	41.51143	0.51	41.51409	1.62	2.66	10.09	0.11
13	5	9	23.93081	0.50	23.93108	1.32	-0.27	6.97	0.13
14	5	10	24.10076	0.54	24.10058	1.54	-0.18	8.13	0.29
15	6	9	17.53634	0.45	17.53644	1.26	0.10	7.84	0.27
16	9	7	10.30063	0.38	10.30173	1.29	1.10	7.49	0.54
17	10	8	17.30190	0.49	17.30296	1.29	1.06	6.93	0.90
18	11	9	11.27698	0.45	11.27732	± 1.23	0.34	7.47	0.38
Standart Sapma [m_0]			$\pm 0.59 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$		$\pm 1.86 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$				

$$F_{8,8,0.95} = 3.44$$

$$t_{16,0.95} = 2.13$$

Çizelge III.7

Kenar No	Baş. N. No	Bitiş N. No	PRESIZYONLU NİVELMAN		S = 300 m KARŞILIKLI VE EŞZAMANLI TRIGONOMETRİK NİVELMAN		$d = \Delta H_T - \Delta H_G$ [mm]	$\dot{F} = \frac{m_1^2}{m_0^2}$	$i = \frac{d}{m_0}$
			ΔH_G [m]	$\pm m_{\Delta H}$ [mm]	ΔH_T [m]	$\pm m_{\Delta H}$ [mm]			
1	1	2	0.72494	0.29	0.72515	1.20	0.21	17.12	0.17
2	2	3	7.91183	0.35	7.91276	1.46	0.93	17.40	0.62
3	3	4	13.36896	0.39	13.36710	1.62	-1.86	17.25	0.35
4	4	5	17.58061	0.33	17.58378	1.29	3.17	15.28	1.80
5	5	6	6.39447	0.21	6.39431	0.85	-0.16	16.38	0.19
6	6	7	27.83696	0.44	27.83792	1.50	0.96	11.62	0.77
7	7	8	7.17122	0.37	7.17119	1.34	-0.03	13.12	0.36
8	9	8	17.47185	0.31	17.47241	1.17	0.56	14.24	0.50
9	9	10	0.16995	0.43	0.16928	1.42	-0.67	10.91	0.30
10	11	10	11.44692	0.36	11.44675	1.43	-0.17	15.78	0.07
11	4	11	30.23445	0.39	30.23731	1.51	2.86	14.99	1.49
12	4	9	41.51143	0.51	41.51479	2.12	3.36	17.28	1.21
13	5	9	23.93081	0.50	23.93100	1.72	0.19	11.83	0.15
14	5	10	24.10076	0.54	24.10028	2.01	-0.48	13.85	0.09
15	6	9	17.53634	0.45	17.53670	1.64	0.36	13.28	0.06
16	9	7	10.30063	0.38	10.30123	1.35	0.60	12.62	0.78
17	10	8	17.30190	0.49	17.30314	1.68	1.24	11.76	0.61
18	11	9	11.27698	0.45	11.27748	1.61	0.50	12.80	0.20
Standart Sapma [m ₀]			$\pm 0.59 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$		$\pm 2.43 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$				

$$F_{8,8,0.95} = 3.44$$

$$t_{16,0.95} = 2.13$$

Çizelge III.8

Kenar No	Baş. N. No	Bitiş N. No	PRESIZYONLU NİVELMAN		S = 400 m KARŞILIKLI VE EŞZAMANLI TRIGONOMETRİK NİVELMAN		d = $\Delta H_T - \Delta H_G$ [mm]	$\bar{F} = \frac{m_1^2}{m_2}$	$t = \frac{d}{m_0}$
			ΔH_G [m]	$\pm m_{\Delta H}$ [mm]	ΔH_T [m]	$\pm m_{\Delta H}$ [mm]			
1	1	2	0.72494	0.29	0.72515	1.21	0.21	17.41	0.17
2	2	3	7.91183	0.35	7.91276	1.48	0.93	17.88	0.61
3	3	4	13.36896	0.39	13.36875	1.63	-1.21	17.47	0.13
4	4	5	17.58061	0.33	17.58382	1.30	3.21	15.52	2.39
5	5	6	6.39447	0.21	6.39429	0.85	-0.18	16.38	0.21
6	6	7	27.83696	0.44	27.83789	1.52	0.93	11.93	0.59
7	7	8	7.17122	0.37	7.17117	1.35	-0.05	13.31	0.04
8	9	8	17.47185	0.31	17.47240	1.18	0.55	14.49	0.45
9	9	10	0.16995	0.43	0.16922	1.43	-0.73	11.06	0.49
10	11	10	11.44692	0.36	11.44671	1.44	-0.21	16.00	0.14
11	4	11	30.23445	0.39	30.23727	1.52	2.82	15.19	1.80
12	4	9	41.51143	0.51	41.51476	2.14	3.33	17.61	1.51
13	5	9	23.93081	0.50	23.93095	1.74	0.14	12.11	0.08
14	5	10	24.10076	0.54	24.10017	2.03	-0.59	14.13	0.28
15	6	9	17.53634	0.45	17.53666	1.66	0.32	13.61	0.19
16	9	7	10.30063	0.38	10.30123	1.37	0.60	13.00	0.42
17	10	8	17.30190	0.49	17.30318	1.70	1.28	12.04	0.72
18	11	9	11.27698	0.45	11.27749	1.63	0.51	13.12	0.30
Standart Sapma [m ₀]			$\pm 0.59 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$		$\pm 2.46 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$				

$$F_{8,8,0.95} = 3.44$$

$$t_{16,0.95} = 2.13$$