



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



HASSAS TRİGONOMETRİK NİVELMANIN
DOĞRULUK ANALİZİ ÜZERİNE BİR
ÇALIŞMA

Mehmet ELMAS

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Şubat-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Mehmet ELMAS tarafından hazırlanan “Hassas Trigonometrik Nivelman ve Doğruluk Analizi” adlı tez çalışması 22/01/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof.Dr. Cevat İNAL
Konya Teknik Üniversitesi

.....

Danışman

Prof.Dr. Ayhan CEYLAN
Konya Teknik Üniversitesi

.....

Üye

Doç.Dr. Fuat BAŞÇİFTÇİ
Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Mehmet ELMAS

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HASSAS TRİGONOMETRİK NİVELMANIN DOĞRULUK ANALİZİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

Mehmet ELMAS

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Ayhan CEYLAN

2024,52 Sayfa

**Jüri
Prof. Dr. Ayhan CEYLAN
Prof. Dr. Cevat İNAL
Doç. Dr. Fuat BAŞÇİFTÇİ**

Günümüzde yükseklik belirlenmelerinde yaygın olarak geometrik, trigonometrik ve GNSS nivelman teknikleri kullanılmaktadır. Gerek bilimsel çalışmalarda gerekse her türlü mühendislik projelerinde ilk akla gelen yöntem geometrik nivelman tekniğidir. Geometrik nivelman tekniğinin özellikle engebeli arazilerde birçok model hatalarından etkilenmesi ve uygulamasının zor ve zaman alıcı olması nedeniyle, alternatif yöntem arayışında yeni geliştirilen yüksek doğruluklu düşey açı ve uzunluk gözlemleri yapabilen elektronik ölçüm cihazı kullanılması ile trigonometrik nivelman tekniklerinin doğruluklarının yeniden araştırılmasını güncel hale getirmiştir.

Bu tez çalışmasında, güncel donanımlar ile trigonometrik nivelman tekniklerinin doğruluklarının araştırılması amaç edinilmiştir. Bu amaçla, ilk olarak trigonometrik nivelman tekniklerine ait ölçme modelini etkileyen hatalar ele alınmıştır. Ayrıca, trigonometrik nivelman tekniklerinden beklenen teorik doğruluklar ile test alanında yapılan ölçmeler sonucu elde edilen karesel ortalama hatalar karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, tek taraflı ve ortadan trigonometrik nivelman teknikleri ile $\pm 5\text{mm}$ altı doğruluklara ulaşılabilindiği, karşılıklı trigonometrik nivelmanda ise $\pm 1.98\text{mm}$ 'lik doğruluk elde edilmiştir. Bu değerlendirmeler ışığında, özellikle karşılıklı trigonometrik nivelman tekniğinin karayolu, demiryolu, tünel vb. birçok alt yapı ve üs yapı projelerinde geometrik nivelman yerine trigonometrik nivelman tekniğinin kullanılmasının çalışmalarda zaman ve maliyet yönüyle bazı avantaj sağlayacağı söylenebilir.

Anahtar Kelimeler: Geometrik nivelman, Trigonometrik nivelman, GNSS nivelmanı, Doğruluk araştırması.

ABSTRACT

MS THESIS

A STUDY ON ACCURACY ANALYSIS OF PRECISION TRIGONOMETRIC LEVELLING

Mehmet ELMAS

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Geodesy and Photogrametry**

Advisor: Prof. Dr. Ayhan CEYLAN

2024,52 Pages

**Jury
Prof. Dr. Ayhan CEYLAN
Prof. Dr. Cevat İNAL
Doç. Dr. Fuat BAŞÇİFTÇİ**

Today geometric, trigonometric and GNSS levelling techniques are widely used in height determinations. The first method that comes to mind in both scientific studies and all kinds of engineering projects is the geometric levelling technique. Since the geometric levelling technique is affected by many model errors especially is rugged lands and its application is difficult and time taking, it has made up to date the re-research of trigonometric levelling techniques with the use of newly developed vertical angle and length observations in search of alternative methods.

The aim is to investigate the accuracy of these trigonometric levelling techniques . For this purpose, the errors affecting the measurement model of trigonometric levelling techniques were first discussed and the theoretical accuracy expected from the trigonometric levelling techniques and the mean squared errors obtained as a result of the measurements made in the test area were compared.

As a result unilateral and intermediate point trigonometric levelling techniques can be reached under ± 5.00 mm accuracy. Beside reciprocal trigonometric levelling technique can be reached ± 1.98 mm accuracy. As a result of these evaluations, it has been concluded that especially the reciprocal trigonometric levelling technique can be used in highways, railways , tunnels, etc. It can be said that using the trigonometric levelling technique instead of geometric levelling in many infrastructure and base building projects will provide some advantages in terms of time and cost.

Keywords: Geometric levelling, Trigonometric levelling, GNSS levelling, Accuracy research.

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın hayata geçirilmesi sürecinde bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, araştırmanın her bir aşamasında görüşleriyle beni destekleyen, samimiyetini her zaman hissettiren ve beni doğru yönde yönlendiren danışman hocam Prof. Dr. Ayhan CEYLAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Arazi çalışmalarında deneyim ve yardımını eksik etmeyen Harita Tek. Mustafa BIYIKLI'ya teşekkür ederim. Ayrıca çalışmamda desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen, bana olan güvenini hiç kaybetmeyen nişanlım İnş.Müh Beyzanur AKÇAOĞLU'na ve aileme teşekkür ederim.

Mehmet ELMAS
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. MATERYAL VE METOT	5
2.1. Yükseklik Kavramı	5
2.2. Yükseklik Sistemleri	5
2.2.1. Dinamik Yükseklik	5
2.2.2. Ortometrik Yükseklik	6
2.2.3. Normal Yükseklik	7
2.2.4. Elipsoidal Yükseklik	7
2.3. Yükseklik Belirlemeleri	7
2.3.1. Yükseklik Belirleme Yöntemi Tarihsel Gelişimi	7
2.3.2. Geometrik Nivelman	8
2.3.3. GNSS Nivelmanı	10
3. TRİGONOMETRİK NİVELMAN	12
3.1. Trigonometrik Nivelmanda Ölçme ve Hesap Modelleri	12
3.1.1. Tek Taraflı Trigonometrik Nivelmanda Ölçme ve Hesap Modeli	12
3.1.2. Ortadan (Atlamalı) Trigonometrik Nivelmanda Ölçme ve Hesap Modeli ...	15
3.1.3. Karşılıklı Trigonometrik Nivelmanda Ölçme ve Hesap Modeli	18
4. TRİGONOMETRİK NİVELMANDA DOĞRULUK ANALİZİ.....	20
4.1. Trigonometrik Nivelmandaki Tesadüfi Hataların Etkisi	20
4.1.1. Uzunluk Ölçmesindeki Rastlantısal Hata	20
4.1.2. Düşey Açı Gözlemlerindeki Rastlantısal Hata	20
4.1.3. Refraksiyon Hatası.....	22
4.2. Tek Taraflı Nivelman Doğruluk Analizi	22
4.3. Ortadan (Atlamalı) Trigonometrik Nivelmanda Doğruluk Analizi	23
4.4. Karşılıklı Trigonometrik Nivelmanda Doğruluk Analizi	24
4.5. Tek taraflı, Karşılıklı ve Atlamalı Trigonometrik Nivelman Doğruluk Araştırması	25
5. UYGULAMA	28
5.1. Uygulama Alanı	28
5.2. Arazi Çalışmaları	30

5.2.1. Uygulamada Kullanılan Donanımlar	30
5.2.2. Nivelman Ölçü ve Hesapları	34
5.2.3. Trigonometrik Nivelman Yöntemlerinin Doğruluk Karşılaştırmaları	36
5.2.4. Değerlendirmeler	38
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	40
KAYNAKLAR	42



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

H^D	Dinamik yükseklik
H	Ortometrik yükseklik
H^N	Normal yükseklik
h	Elipsoidal yükseklik
γ	Normal gravite
g	Gerçek gravite
N	Jeoid ondülasyonu
W	Ağırlık potansiyeli
Z	Zenit açısı
S	Eğik kenar
ε	Çekül sapması
k	Kırılma indisi
R	Dünya yarıçapı

Kısaltmalar

GNSS : Global Navigation Satellite Systems
EDM : Electronic Distance Measurement
GZK : Gerçek Zamanlı Kinematik
B.Ö.H.H.B.Ü.Y. : Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği
RTK : Real Time Kinematik

1. GİRİŞ

Harita Mühendisliğinin ana görevlerinden birisi de konumsal verilerin elde edilmesi ve yönetilmesidir. Bunlar arasında nokta yükseklik konum bilgileri veya noktalar arasındaki yükseklik farklarının belirlenmesi en önemlilerindendir. Burada söz edilen yükseklik fiziksel anlamı olan ortometrik yüksekliklerdir. Ulusal jeodezik ağların kurulması, kabuk ve plaka hareketlerindeki düşey hareketlerin izlenmesi gibi birçok jeodezik uygulamalarda yüksekliklerin hassas olarak belirlenmesi gerekmektedir. Diğer yandan yükseklikler mühendislik uygulamalarında da önemli bir yeri vardır. Yükseklik belirlemelerinde genellikle geometrik, trigonometrik ve GNSS nivelman tekniği yaygın olarak kullanılmaktadır. GNSS, Lidar ve Uzaktan algılama gibi modern konumsal veri toplama teknikleri kullanılmasına rağmen yüksek doğruluk gerektiren yükseklik belirlemelerinde genellikle presizyonlu geometrik nivelman tekniği tercih edilmektedir. Bilindiği üzere geometrik nivelmanın temel prensibi ölçü yüzeyi üzerinde nivo yardımıyla oluşturulan yatay bir düzlemden olan düşey uzaklıkların miralar yardımıyla ölçülmesidir. Presizyonlu Geometrik nivelman için önerilen ölçme modelleri uygulandığında yüksek doğruluklu sonuçlar elde etmek mümkündür. Son yıllarda sayısal nivolar ve barkodlu miraların kullanılması ile ölçme işlemleri operatör yeteneklerine daha az bağımlı olarak daha hızlı yapılabilmektedir. Presizyonlu geometrik nivelmanın dezavantajı ise özellikle dağlık ve engebeli arazilerde uygulamasının zor ve zaman alıcı olmasıdır (Ceylan, 1993). GNSS nivelman ise GNSS ile yükseklik belirlenmesi ve jeoid modellerinin birleşimidir. GNSS nivelman tekniği, noktalar arası görüş gerektirmeyen uygun maliyetli bir tekniktir. Bilindiği üzere GNSS tekniği ile seçilen referans elipsoidine bağlı olarak enlem, boylam ve elipsoidal yükseklikler elde edilmektedir. Pratikte kullanılabilmesi için elipsoidal yüksekliklerin ortometrik yüksekliklere dönüştürülmesi gerekmektedir. Dönüşüm için yeterli sayıda dayanak noktalarına veya tanımlanmış bir jeoid modeline ihtiyaç vardır. GNSS nivelman tekniğinin doğruluğu birçok parametreye bağlı olmasına rağmen esas olarak jeoid modelinin doğruluğuna bağlıdır. GNSS nivelman ile birkaç cm mertebesinde doğruluk elde edilmektedir. Güncel haliyle cm altı doğruluk gerektiren işler için yeterli değildir. Ayrıca, uydu sinyallerinin ciddi şekilde kesildiği yoğun yapılaşmanın olduğu yerleşim yerlerinde, ormanlık alanlarda ve kapalı alanlarda uygulanamaz. Bu tez çalışmasında kinematik ölçü yöntemi (Ağ-RTK) de kullanılmıştır. Noktaların 3 boyutlu konumları Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği “GNSS tekniğiyle poligon ölçmeleri” maddesine uygun olarak

belirlenmiştir. Sonuçlar geometrik nivelman ve trigonometrik nivelman sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Geometrik nivelmana alternatif yöntem arayışında, gelişen teknolojilerin sonucu üretilen yüksek doğruluklu elektronik takeometrelerin kullanılması ile trigonometrik nivelman yeniden gündeme gelmektedir.

Trigonometrik nivelmanda noktalar arası eğik uzunluk ve düşey açı yardımıyla yükseklik farkları belirlenmektedir. Trigonometrik nivelmanda doğruluğu etkileyen en önemli faktör düşey açı ölçümüdür. Trigonometrik nivelman tekniğinin avantajı arazinin topografik yapısından bağımsız olarak uzun mesafe gözleme uzunlukları ile çalışılması ve bunun sağladığı kolaylıkla yüksek üretim hızına sahip olmasıdır. Trigonometrik nivelman düşey açı gözlemlerinde uygulanan ölçme modeline bağlı olarak tek taraflı, ortadan ve karşılıklı trigonometrik nivelman olarak sınıflandırılmaktadır. Trigonometrik nivelman yönteminin doğruluğu atmosferik refraksiyon ve yer eğriliğinden ciddi oranda etkilenmektedir. Bu etkileri azaltmak için karşılıklı ve eşzamanlı ölçme modeli uygulanmaktadır.

Eş zamanlı trigonometrik nivelman ile geometrik nivelman hassasiyetinin karşılaştırıldığı 5 noktalı bir test ağı üzerinde gerçekleştirilen araştırmada birim ağırlıklı ölçünün karesel ortalama hatası geometrik nivelmanda $\pm 0,706\text{mm}$, trigonometrik nivelmanda ise $\pm 1,677\text{mm}$ olarak bulunmuştur. Sonuç olarak trigonometrik nivelmanın geometrik nivelmana yakın hassasiyet verebileceği değerlendirilmiştir (Ceylan ve İnal, 1996).

Trigonometrik nivelmanın hassasiyeti, hata kaynakları ve prensiplerinin analizini irdelenmek amacıyla 2005 yılında yapılan bir çalışmada bir barajın yatay ve düşey ölçmeleri periyodik olarak yapılmıştır. Çalışma sonucunda 14 noktada yapılan ölçmeler ile hassas trigonometrik nivelman ve geometrik nivelman arasındaki tüm yüksekliklerin 2.5 mm 'den daha az olduğu sonucuna varılmıştır (Zhang at all .,2005). Bu çalışmada atmosferik kırılmanın sıcaklık, hava basıncı ve özellikle hava yoğunluğu ile ilişkili olduğundan bahsedilmiştir. Aynı zamanda bu değerin ölçülmesinin oldukça zor olduğundan bahsedilmiştir. İleri bakış ölçmesinin hava şartının geri bakış ölçmesi ile her zaman aynı olursa, atmosferik kırılma k değişkeninin değeri çok azdır. Bu sebeple karşılıklı trigonometrik nivelman benimsenmiştir.

Bir tez çalışmasında, uygulama alanı olarak seçilen Pabuçere barajında düşey değişimlerin belirlenmesine yönelik Haziran 2003 ve Eylül 2004 tarihleri arasında 3 dönem olarak ölçümler yapılmıştır. Bu ölçmeler üç ölçme dönemi için ayrı ayrı

dengelenmiş ve analiz edilmiştir. Hassas geometrik nivelman ve hassas trigonometrik nivelman yöntemleriyle elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Hassas geometrik nivelman ölçülerinin değerlendirilmesi sonucunda; 100m uzunluğundaki nivelman yolu için ortalama 0.15 mm ölçü doğruluğuna ulaşılmıştır. Aynı ölçme dönemlerinde gerçekleştirilen trigonometrik nivelman ölçülerinin değerlendirilmesi sonucunda ise aynı nivelman yolu uzunluğu için ortalama 3.22 mm doğruluk değeri elde edilmiştir (Turan, 2007). Bu araştırma, karşılaştırma ve irdelemeler sonucunda total stationlar ile yüksek doğruluklu gözlem yapma olanağı ile ölçme dönemleri arasında beklenen düşey değişimlerin milimetreler boyutlarında olması durumunda, hassas trigonometrik nivelman yönteminin dolgu barajlarda uygulanabileceği kanısına varılmıştır.

Bir çalışmada atmosferik kırılmanın sıcaklık, hava basıncı ve özellikle hava yoğunluğu ile ilişkili olduğundan bahsedilmiştir. Aynı zamanda bu değer ölçülmesi oldukça zor olduğundan bahsedilmiştir. İleri bakış ölçmesinin hava şartının geri bakış ölçmesi ile her zaman aynı olursa, atmosferik kırılma k değişkeninin değeri çok azdır. Bu sebeple karşılıklı trigonometrik nivelman benimsenmiştir (Zhang at all .,2005).

Karşılıklı trigonometrik nivelman ve Ortadan atlamalı trigonometrik nivelman atmosferik kırılmanın etkisini azaltabilir. Ortadan atlamalı trigonometrik nivelmanda alet yüksekliği ve prizma yüksekliği ölçümlerinden kaçınılabilmektedir. Sadece başlangıç ve bitiş noktalarında prizma yüksekliğinin ölçülmesine gerek duyulmaktadır (Hung et al., 2016).

Geometrik nivelmanla kıyaslandığında, Trigonometrik nivelman emek yoğunluğunu büyük ölçüde azaltabilmektedir. Fakat hala insan emeğine bağlı kalmaktadır. İnsan emeğine dayalı olan gücü hafifletmek için mobil araç platformu üzerine monte edilmiş mobil hassas trigonometrik nivelman ölçme yöntemi geliştirilmiştir. Ölçme hassasiyeti ve çalışma verimliliği gelişmiş total station ile yeni sensörler entegre edilerek eş zamanlı geliştirilmiştir (Kasser, 1985; Becker and Lithen, 1986; Becker at all., 1988). Bu teknikler motorize nivelman ve motorize trigonometrik nivelman yöntemleridir. Motorize trigonometrik nivelman görüş mesafesi genellikle 350 m'den azdır. En iyi sonuç $\pm 0.6 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$ 'dir (Becker and Lithen, 1986). Motorize trigonometrik nivelman tekniğinde gözlemler eş zamanlı yapılarak atmosferik kırılmanın etkisini, yeryüzü eğriliğini ve 2 ölçme robotu, konum sensörleri, meteorolojik sensörler, yazılım oto kontrol teknolojisi kullanılarak işlem hataları gibi diğer faktörleri azaltmaktadır (Zou at all., 2017). Motorize trigonometrik nivelmanın karşılıklı gözlem

mesafesi 350 ve 600m arası seçildiğinde geometrik nivelman yerine kullanılabileceği edinilmiştir (Zou at all., 2017).

Son 50 yıl içerisinde teknolojik gelişmelerin bir sonucu olarak üretilen en yeni EDM bordları ile yüksek doğrulukta uzunluk ölçmesi ve düşey açı gözlemleri yapabilen elektronik takeometrelerin (Totalstation) gelişimi ile trigonometrik nivelman yönteminin doğruluğunun yeniden araştırılması ihtiyacını doğurmuştur.

Bu çalışmada gelişen teknolojilere paralel olarak üretilen yüksek doğrulukla düşey açı $\pm(0.5-1^{\circ})$ ve uzunluk ölçmeleri $\pm(1\text{mm}+1\text{ppm})$ yapabilen elektronik takeometreler kullanılarak trigonometrik nivelman yöntemlerinin doğruluğunun araştırılması amaçlanmıştır.



2. MATERYAL VE METOT

2.1. Yükseklik Kavramı

Bir noktanın yüksekliği, bir referans yüzeyinden olan fiziksel veya geometrik uzaklığıdır. Jeodezik ölçmelerde kullandığımız ölçme aletleri çekül doğrultusuna göre düzeçlenir. Çekül doğrultusuna dik olan yüzeylere nivo yüzeyi denir. Her nivo yüzeyinde ağırlık potansiyeli W =sabittir (Heiskanen and Moritz 1984). Dünyanın kendi eksenini etrafında dönmesi sonucu oluşan kütle çekim kuvveti ve merkezkaç kuvveti ağırlık kuvvetinin bileşenleridir. Bu nedenle her nivo yüzeyi birbirine paralel değildir. Dolayısıyla nivo yüzeylerinin paralel olmaması büyük uzunluklarda ihmal edilemeyecek bir yükseklik farkını ortaya çıkarır. Bu nedenle yükseklik ölçmelerinde geometrinin yanında fiziksel kavramların da dikkate alınması gerekir (Baykal, 1980). Potansiyelleri eşit olan yüzeyleri normal olarak kesen eğriler tam doğru olmayıp hafifçe eğridirler. Bunlara çekül eğrileridir ve serbestçe sallandırılan bir çekülün ipliyle çakıştığında çekül doğrultusu elde edilir. Ağırlık kuvvetinin doğrultusu çekül ile gösterildiğinde elipsoidin normalleri ile çekül doğrultularının çakışmadığı görülür. Oluşan açısal fark çekül sapmasıdır (Gürkan, 1979).

2.2. Yükseklik Sistemleri

2.2.1. Dinamik Yükseklik

Yeryüzündeki bir P noktasının geopotansiyel sayısı gravitenin bir ortalama değerine, genellikle 45° enlem ve deniz yüksekliğindeki normal graviteye (γ_0^{45}) bölünürse dinamik yükseklik H^D elde edilir.

$$H^D = \frac{C}{\gamma_0^{45}} = \frac{1}{\gamma_0^{45}} \int_{P_0}^P g \cdot dh \quad (2.1)$$

Buna göre iki nokta arasındaki yükseklik farkı;

$$H_B^D - H_A^D = \frac{1}{\gamma_0^{45}} \int_A^B g \cdot dh \quad (2.2)$$

dir. Bu ifade,

$$H_B^D - H_A^D = \int_A^B dh + \frac{1}{\gamma_0^{45}} \int_A^B (g - \gamma_0^{45}) \cdot dh \quad (2.3)$$

şeklinde yazılabilir (Baykal, 1980). Burada ilk terim doğrudan nivelmanla bulunan yükseklik farkıdır. İkinci terim dinamik düzeltmedir.

2.2.2. Ortometrik Yükseklik

Yeryüzündeki bir A noktasının ortometrik yüksekliği, bu noktadan geçen çekül eğrisi boyunca jeoit'den olan geometrik uzaklığıdır (Niemeier, 1985). A noktası ile jeoit arasındaki çekül eğrisi boyunca ortalama gravite değeri $\bar{g}_A$ bilinirse, ortometrik yükseklik

$$H_A = \frac{C}{\bar{g}_A} \quad (2.4)$$

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

$$g_Q = g_P - \int_Q^P \frac{\partial g}{\partial h} \cdot dh \quad (2.5)$$

yazılır (Niemeier, 1985). Ortalama yoğunluk $\rho = 2.67 \text{ g / cm}^3$ ve normal gravite alanında gravitenin düşey değişimi;

$$\frac{\partial g}{\partial h} \cong \frac{\partial \gamma}{\partial h} + 4\pi \cdot G \cdot \rho = -0.0844 \text{ mgal/m} \quad (2.6)$$

dir (Niemeier, 1985).

Ortometrik yükseklikler, Helmert yükseklikleri olarak bilinen aşağıdaki bağıntısı ile hesaplanabilir (Heiskanen ve Moritz, 1984).

$$H = \frac{C}{g + 0.0424 \cdot H} \quad (2.7)$$

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

2.2.3. Normal Yükseklik

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

$$H^N = \frac{C}{\bar{\gamma}}, \quad \bar{\gamma} = \frac{1}{H^N} \int_0^{H^N} \gamma \cdot dH^N \quad (2.8)$$

bağıntısı ile tanımlanır (Niemeier, 1985). Burada $\bar{\gamma}$, normal gravite değeridir. (2.8) bağıntısına göre normal yükseklik, normal gravite alanında tanımlanmıştır. Bu durumda model yeryüzü artık geoid değil, bir nivo elipsoididir.

2.2.4. Elipsoidal Yükseklik

Elipsoidal yükseklik, yeryüzü noktası A ile nivo elipsoidi arasındaki metrik uzaklıktır (Şekil 2.2). Elipsoidal yükseklik, temel geometrik yükseklik sistemi olarak tanımlanmıştır. Teorik elipsoidal yükseklik normal gravite alanında,

$$h = \frac{U_0 - U_P}{\gamma}, \quad \gamma = \frac{1}{h} \int_0^A \gamma \cdot dh \quad (2.9)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir (Niemeier, 1985).

2.3. Yükseklik Belirlemeleri

2.3.1. Yükseklik Belirleme Yöntemi Tarihsel Gelişimi

Yükseklik belirlemesi için 1850’li yıllara kadar trigonometrik yükseklik belirleme tekniği kullanılmıştır. Ancak 1850’li yıllardan sonra refraksiyon hatası bakımından geometrik nivelmanın daha avantajlı olduğu düşünülüp kullanılmaya başlanmıştır. 19. Yüzyılın başlarında geometrik nivelmanda sadece silindirik düzeçli nivolar kullanılırken 1950’lerde kompansatörlü nivoların gelişmesiyle bu nivolar kullanılmaya başlamıştır. Sonraki yıllarda lazerli nivolar ve sayısal nivolar geliştirilmeye başlanmıştır. Prof. Zetsche tarafından 1966 yılında Boonn’da yapılan araştırmalar, günümüz sayısal nivolarının tasarımının başlangıcı sayılmaktadır. Zeiss Ni002 nivosu projesi 1988 yılında sona ermiştir. Bu denemeler Zeiss sayısal nivolarının gelişiminin temelidir.

1970’li yıllarda BAHNERT, gözleme uzaklıklarını birkaç yüz metre ile sınırlandırarak, düşey açların karşılıklı ve eşzamanlı ölçerek ayrıca elektronik uzunluk ölçerler kullanılarak trigonometrik nivelman tekniğini tekrar kullanmıştır (Bahnert 1970).

Bu zaman süreci içinde hidrostatik nivelman 1936 yılından sonra başarıyla uygulanmıştır. Hidrodinamik nivelman, Hidrostatik prensiplerin gelişmesiyle ortaya çıkmıştır. Günümüzde ise GNSS kullanılarak da yükseklikler belirlenebilmektedir. Yükseklik belirleme tekniklerinden en yaygın olarak kullanılan yöntemler GNSS nivelmanı, Geometrik nivelman ve Trigonometrik nivelmandır. Bu tezin amacı da Trigonometrik nivelmanın hassas ölçme yöntemleri kullanılarak diğer teknikler ile karşılaştırılması ve doğruluk analizinin incelenmesidir. Yükseklik belirlemede kullanılan başlıca üç yöntem Geometrik nivelman, Trigonometrik nivelman ve GNSS nivelman yöntemidir.

Tablo 2.1. Yükseklik belirleme yöntemleri ve tarihsel gelişimi.

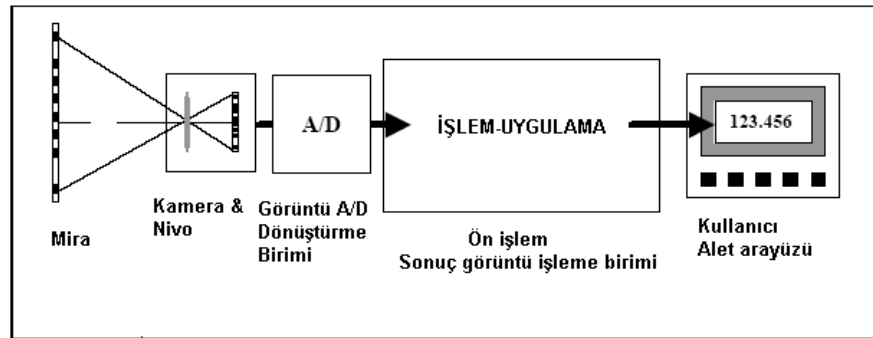
	1850	1900	1950	1960	1970	1980	1990
Trigonometrik yükseklik belirleme							
		Sadece dağlık alanlarda					
		Geometrik Nivelman		Kompansatörlü		Motorize	
							GPS

2.3.2. Geometrik Nivelman

Geometrik nivelman; yüksek doğruluklu yükseklik ölçmeleri çalışmalarında en çok tercih edilen ve bilinen en doğru yöntem olup, bu kapsamda kullanılan nivoların aletsel gelişimleri günümüz teknolojisiyle gelişmektedir. Geometrik nivelmanda noktalar arasındaki yükseklik farklarının hesaplanması, bu noktaların yatay bir düzleme olan düşey uzaklıkları ölçülerek, ardından bunların farkı alınarak bulunur. Bu tez çalışmasında sayısal nivo kullanarak yükseklik ölçmeleri yaptığımız için sayısal nivo yapısı incelenmiştir.

Sayısal nivolarla kullanılmak üzere bir yüzü barkodlu diğer yüzü metrik miralar Alüminyum mira (5m), Fiberglas mira (1cm) ve İnvar mira (3m) olarak üretilmektedir.

Normal nivolar optik ve mekanik donanımlara sahiptir. Sayısal nivolar ise normal nivonun sahip olduğu donanımların yanında elektronik mira okuması yapılmak üzere nivoya; barkod görüntüsünü dedektör diyot dizisine dönüştüren bir ışın ayırıştırıcısı eklenmiş olmasıdır. Barkoddan yansıyan sadece beyaz elemanlara ait ışık, ışın ayırıştırıcısı yardımıyla kızıl ötesi ve görünen ışınlara ayrıştırılır. Burada kızıl ötesi ışık diyot dizisine, görünen ışık gözlemci tarafına geçer. Alınan barkod görüntüsü, daha sonra alette kayıtlı bulunan referans kodu ile karşılaştırılacak olan analog video sinyaline dönüştürülür. Korelasyon işlemi, daha sonra kodların yer değiştirilmesiyle yüksek bir ilişki elde eder (Gürdal, 2004). Bu arada, nivo-mira uzaklığı alınan kodun görüntü ölçeğine bağlıdır. Ölçme değerlendirme işlemi tek çipli küçük bir mikroişlemci ile yapılır. Değerlendirilen veri daha sonra ekranda görüntülenir (Şekil 2.1). Ölçme işlemi nivodaki görüntü netleştirme vidasının hemen yanındaki bir düğmeye basılarak yapılır ve veriler veri kayıt modülünde kaydedilir. Alınan mira görüntüsünün, nivodaki bir merkezi işlem birimi (bilgisayarın) tarafından, bilgisayar hafızasında yüklü olan miranın tümüne ait bir görüntü kalıbı ile karşılaştırılmasından ibarettir. Alınan mira görüntüsü ile miranın tümüne ait görüntü arasında bir eşleşme bulunduğunda (yaklaşık 4 saniye süren bir işlem), mira okuması sayısal olarak görüntülenir ve bu değer otomatik olarak aletin hafızasına kaydedilir (Gürdal, 2004). Sayısal nivo bize bazı mira okumalarında milimetre mertebesinde ölçücünün kendisi yorum yapmamasını, hızlı kolay ve doğru sonuç almamızı, ekonomik ölçü elde etmemizi, verilerin doğrudan bilgisayar ortamına aktarılması ve kısa zamanda hesap yapılabilmesi gibi birçok üstünlük elde etmemizi sağlar (Gürdal, 2004).



Şekil 2.2. Sayısal nivolarla mira okuma prensibi (Gürdal, 2004).

Sayısal Nivelman Tekniğinin Hata Kaynakları

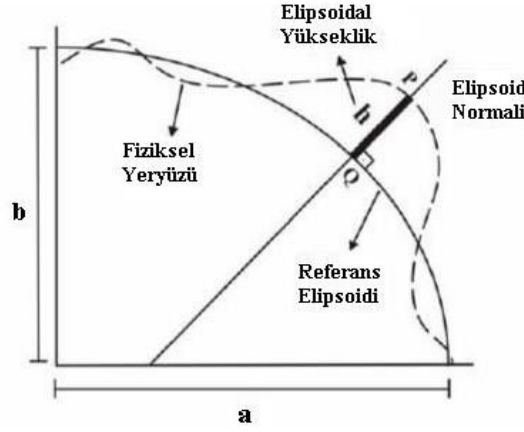
- Aydınlatma hataları; Doğal ışığın farklı ışık şiddetleri, gölge nedeniyle mirada homojen olmayan ışık şiddeti ve ışık kaynağının spektrumu.
- Atmosferik hata; Refraksiyon etkisi.
- Mekanik etkiler; Titreşimler, alet ve miranın kurulması ve mira diklik hatası.
- Aletsel hatalar; Termal etkiler (ışın hattının sapması), kod eleman boyutunun ve pikselllerin enterferansı (belirli uzaklıklarda yanlış sonuçlar) ve kompensatör fonksiyonu. Sayısal nivelman ölçmelerini, daha çok ortam hataları (refraksiyon ve küresellik hataları) ile alet hataları etkilemekte olup; klasik nivolardan farklı olarak, ölçücü, yazıcı ve miracıya bağlı kişisel hatalar (mira okuması, ölçü kayıt hatası ve mirayı dik tutma hatası) sayısal nivolarda ortadan kalkmaktadır.

2.3.3. GNSS Nivelmanı

GNSS nivelmanı GNSS ile yükseklik belirlemesi ve jeoit modellerinin birleşimidir. GNSS nivelman tekniği, noktalar arası görüş gerektirmeyen uygun maliyetli bir tekniktir. GNSS ölçmelerinden elde edilen yükseklikler elipsoidal yüksekliklerdir. Pratikte kullanılabilmesi için ortometrik yüksekliklere dönüştürülmesi gerekmektedir. Dönüşüm için yeterli sayıda dayanak noktalarına veya tanımlanmış bir jeoit modeline ihtiyaç vardır. Bir noktaya ortalama deniz düzeyinden itibaren nivelman yöntemiyle ortometrik yükseklik, GNSS yardımıyla elipsoidal yükseklik belirlenirse noktadaki jeoit yüksekliği,

$$N = h - H \quad (2.10)$$

eşitliği ile hesaplanabilir.



Şekil 2.3. GNSS yüksek belirleme mantığı

Jeoit yüksekliklerinin hesabında global jeoit modelleri, ulusal jeoit modelleri kullanılabileceği gibi lokal jeoit modeli de kullanılabilir. Ülkemizdeki GNSS nivelman belirlemelerinde Ulusal Jeoit modeli (TGyy) kullanılabileceği gibi lokal jeoit modeli de kullanılabilir (B.Ö.H.H.B.Ü.Y. 2018).

Ulusal Jeoit modelinin kullanılması durumunda 200 km^2 'ye kadar 4 nokta, 200 km^2 den büyük alanlar da her 200 km^2 için ilave 1 nokta seçilmek suretiyle dayanak noktaları belirlenir. Dayanak noktaları GNSS ile C1 nokta doğruluğunda gözlemler yapılarak elipsoidal yükseklikler elde edilir. Ayrıca, bu dayanak noktalarına geometrik nivelman ile Türkiye Ulusal Düşey Kontrol Ağına (TUDKA99) dayalı ortometrik yükseklikler de belirlenir. Hem elipsoidal hem de ortometrik yükseklikleri bilinen dayanak noktalarının (2.10) bağıntısı ile hesaplanan jeoit yükseklikleri ile mevcut Türkiye Jeoit (TGyy) modelinden türetilen jeoit yükseklikleri arasındaki farklar, bir trend yüzeyi yardımıyla modellenerek, Türkiye jeoit modelinden elde edilen jeoit yükseklikleri iyileştirilerek ortometrik yüksekliklere dönüşüm yapılabilir.

Lokal jeoit modelinin uygulanması durumunda ise proje alanında topografyayı en iyi temsil eden karakteristik noktalardan oluşan Jeoit dayanak noktaları (JDN) seçilir. Jeoit dayanak noktalarının sayısı, ilk 20 km^2 için 6 nokta, daha sonra ise her 15 km^2 için ilave 1 nokta olacak sayıda belirlenir. Jeoit dayanak noktalarının elipsoidal yükseklikleri GNSS ile belirlenir iken ortometrik yükseklikleri geometrik nivelman ile belirlenir. Jeoit dayanak noktalarına ait hesaplanan Jeoit yükseklikleri yardımıyla 2. veya 3. dereceden bir yüzey modeli oluşturulur. Proje alanındaki diğer noktaların jeoit yükseklikleri oluşturulan lokal jeoit modelinden hesaplanarak, GNSS nivelman ile ortometrik yükseklikler hesaplanabilir. GNSS nivelman tekniğinin doğruluğu uydu konum bilgileri,

dış ortam vb. birçok parametreye bağlı olması yanında esas olarak jeoit model doğruluğuna bağlıdır. Genel olarak cm mertebesinde doğruluk elde edilmekte olup, yüksek doğruluk gerektiren işler için yeterli değildir. Ayrıca, uydu sinyallerinin ciddi şekilde kesildiği yoğun yapılaşmanın olduğu ve ormanlık alanlarda uygulanamaz.

3. TRİGONOMETRİK NİVELMAN

Trigonometrik nivelmanda, düşey açılar ve yatay (veya eğik) uzaklıklar ölçülerek yükseklik farkları belirlenir. Bu yöntem, yanına varılamayan yapıların yüksekliklerinin belirlenmesinde, sarp engebeli arazilerde ve vadi geçişlerinde kullanılmaktadır. Kullanılan alet donanımı, teodolit, uzaklık ölçer ve gözleme işaretlerinden oluşur.

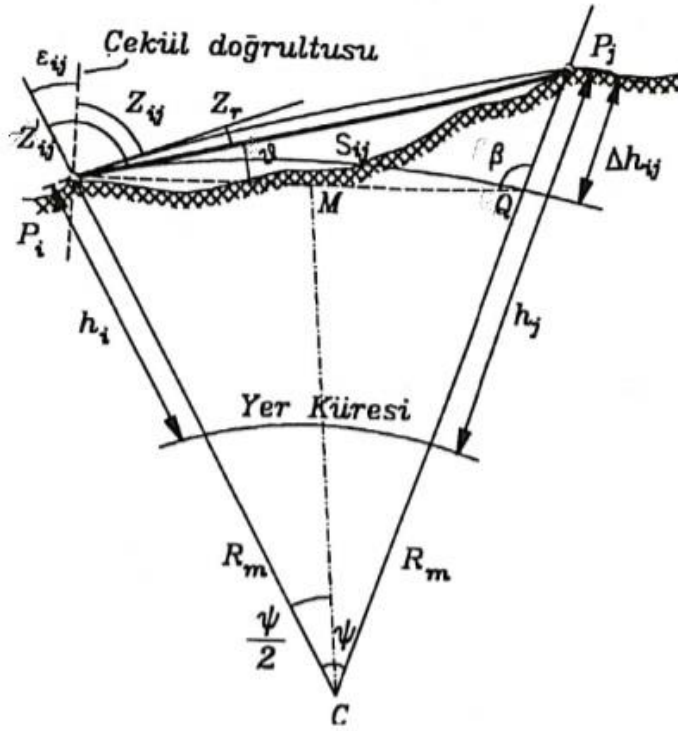
Trigonometrik nivelman ölçmeleri tek taraflı gözlem, ortadan (atlamalı) gözlem ve karşılıklı gözlemlerle yapılmaktadır. Yer küreselliği ve refraksiyon etkilerini en aza indirmek için karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelman tercih edilmektedir.

3.1. Trigonometrik Nivelmanda Ölçme ve Hesap Modelleri

Ölçme sırasında uygulanan model “ölçme modeli”, bu modele bağlı olarak türetilen yükseklik farkı hesap bağıntıları ise “hesap modeli” olarak adlandırılır (Kalkan 1988).

3.1.1. Tek Taraflı Trigonometrik Nivelmanda Ölçme ve Hesap Modeli

Şekil 3.1’de tek taraflı trigonometrik nivelmanda ölçme modeli verilmiştir. Ölçme modelinde nivo yüzeylerinin aynı merkezli küre yüzeyleri olduğu varsayılır.



Şekil 3.1. Tek taraflı trigonometrik nivelman (Coşkun, 1996).

Z'_{ij} : Modele göre ölçülmesi gereken (küresel) düşey açı.

Z_{ij} : İstasyon noktasından P_j noktasına gözlenen düşey açı.

Z_r : Refraksiyon etkisinin neden olduğu model hatası.

ϵ_{ij} : Çekül sapmalarının neden olduğu bileşke model hatası.

S_{ij} : İstasyon noktasından P_j noktasına ölçülen eğik uzunluk.

h_i, h_j : P_i ve P_j noktalarının küresel (elipsoidal) yükseklikleri.

R_m : Yer küresi yarıçapıdır.

Şekil 3.1'de P_iMC üçgeninde,

$$\vartheta = \frac{\pi}{2} + \frac{\psi}{2} - Z'_{ij} \quad (3.1)$$

QMC üçgeninde,

$$\beta = \frac{\pi}{2} + \frac{\psi}{2} \quad (3.2)$$

ve QP_iP_j üçgeninde sinüs teoremine göre,

$$\Delta h_{ij} = S_{ij} \cos Z'_{ij} + S_{ij} \frac{\sin \frac{\psi}{2} \sin Z'_{ij}}{\cos \frac{\psi}{2}} \quad (3.3)$$

dir.

Ψ , her ölçme koşulunda küçük açı olacağından $\sin \frac{\Psi}{2} \cong \frac{\Psi}{2}$, $\cos \frac{\Psi}{2} \cong 1$ alınabilir (Greening, 1985) ve (3.3) eşitliği,

$$\Delta h_{ij} = S_{ij} \cos Z'_{ij} + S_{ij} \frac{\Psi}{2} \sin Z'_{ij} \quad (3.4)$$

olur. Ayrıca $P_i C P_j$, üçgeninden,

$$\sin \Psi = \frac{S_{ij}}{R_m + h_j} \sin Z'_{ij} \quad (3.5)$$

yazılabilir. $\sin \psi = \Psi$ ve $(R_m + h_j) \cong R_m$ alınabilir (Greening, 1985). Bu kabullere ve (3.5)'e göre (3.4) bağıntısı,

$$\Delta h_{ij} = S_{ij} \cos Z'_{ij} + \frac{S_{ij}^2 \sin^2 Z'_{ij}}{2R_m} \quad (3.6)$$

olur. Şekil 3.1'e göre,

$$Z'_{ij} = Z_{ij} + \varepsilon_{ij} + Z_r \quad (3.7)$$

dir. (3.7) bağıntısı (3.6)'da yerine konulur ve küçük açı oldukları kabulü ile $\cos(\varepsilon_{ij} + Z_r) \cong 1$, $\sin(\varepsilon_{ij} + Z_r) \cong \varepsilon_{ij} + Z_r$ alınırsa,

$$\begin{aligned} \Delta h_{ij} = & (S_{ij} \cos Z_{ij}) + \left(\frac{S_{ij}^2}{2R_m} \sin^2 Z_{ij} \right) \\ & - S_{ij}(\varepsilon_{ij} + Z_r) \left\{ \sin Z_{ij} - \frac{S_{ij}}{2R_m} \cos Z_{ij} [(\varepsilon_{ij} + Z_r) \cos Z_{ij} + 2 \sin Z_{ij}] \right\} \end{aligned} \quad (3.8)$$

bulunur. Burada 1. terim nominal yükseklik farkı olup 2. terim yer küreselliğinin, 3. terim ise düşey refraksiyon ve çekül sapmalarının sonuca etkilerini göstermektedir. Bu eşitlikteki düşey refraksiyon ve çekül sapması etkilerini gösteren üçüncü terimdeki $S_{ij}/2R_m$ çarpanlı ifadenin sonuca etkisi çok az olacağından, bu terim ihmal edilirse,

$$\Delta h_{ij} = (S_{ij} \cos Z_{ij}) + \left(\frac{S_{ij}^2}{2R_m} \sin^2 Z_{ij} \right) - S_{ij}(\varepsilon_{ij} + Z_r)(\sin Z_{ij}) \quad (3.9)$$

eşitliği elde edilir. ε_{ij} ve Z_r bilinmediğinden üçüncü terim ihmal edilerek yükseklik farkları (3.9) bağıntısının ilk iki terimiyle hesaplanır. Uygulamada,

$$\Delta h_{ij} = S_{ij} \cos Z_{ij} + (1 - k) \frac{S_{ij}^2}{2R_m} \sin^2 Z_{ij} \quad (3.10)$$

eşitliği kullanılmaktadır. Burada S_{ij} , P_i ve P_j noktaları arasındaki yatay uzaklık $k=0.13$ refraksiyon katsayısıdır.

3.1.2. Ortadan (Atlamalı) Trigonometrik Nivelmanda Ölçme ve Hesap Modeli

Ortadan trigonometrik nivelmanda teodolit, bilinen geometrik nivelmana benzer şekilde geri ve ileri doğrultudaki hedeflerin arasında ortada bir noktaya kurulur. Geri ve ileri doğrultudaki hedeflerde düşey açı gözlemesi ve uzunluk ölçmesi yapılır. Şekil 3.2’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 vektörü

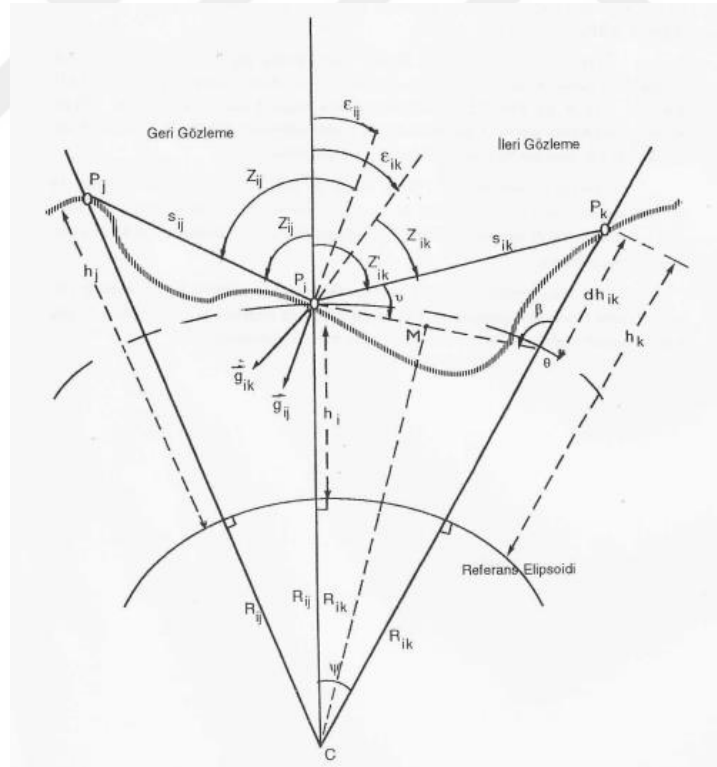
g_{ik} : P_i ve P_k noktalarına ait bileşke gravite vektörü

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 noktaların elipsoidal yüksekliğini

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



Şekil 3.2. Ortadan (atlamalı) Trigonometrik Nivelman (Ceylan, 1993).

Şekil 3.2’de PiMC üçgeninden:

$$V = \frac{\pi}{2} + \frac{\psi}{2} - Z'_{ik} \quad (3.11)$$

QMC üçgeninden

$$\beta = \frac{\pi}{2} + \frac{\psi}{2} \quad (3.12)$$

ve QP_iP_k üçgeninden sinüs teoremine göre;

$$dh_{ik} = S_{ik} \cdot \cos Z'_{ik} + \frac{S_{ik} \cdot \sin \frac{\psi}{2} \cdot \sin Z'_{ik}}{\cos \frac{\psi}{2}} \quad (3.13)$$

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

$$\sin \frac{\psi}{2} \cong \frac{\psi}{2} \quad (3.14)$$

ve $\cos \frac{\psi}{2} \cong 1$

kabul edilir. Bu kabulden dolayı 5000m’lik bir uzunluk için maksimum hata 0.2 mm’den az olmaktadır (Greening, 1985).

(3.14) deki kabuller (3.13)’de yerine konulursa,

$$dh_{ik} = S_{ik} \cdot \cos Z'_{ik} + S_{ik} \cdot \frac{\psi}{2} \cdot \sin Z'_{ik} \quad (3.15)$$

olur. Ayrıca P_iCP_k üçgeninden,

$$\sin \psi = \frac{S_{ik}}{R_{ik} + h_k} \cdot \sin Z'_{ik} \quad (3.16)$$

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 (3.16) bağıntısı,

$$\psi \cong \frac{S_{ik}}{R_m} \cdot \sin Z'_{ik} \quad (3.17)$$

şeklini alır. (3.17) bağıntısı (3.15) bağıntısında yerine konursa

$$dh_{ik} = S_{ik} \cdot \cos Z'_{ik} + \frac{S_{ik}^2 \cdot \sin^2 Z'_{ik}}{2 R_m} \quad (3.18)$$

olur.

Benzer şekilde geri gözleme için de

$$dh_{ij} = S_{ij} \cdot \cos Z'_{ij} + \frac{S_{ij}^2 \cdot \sin^2 Z'_{ij}}{2 R_m} \quad (3.19)$$

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

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

dır.

$dh_{ji} = -dh_{ij}$ olduğu dikkate alındığında (3.18) ve (3.19)'dan

$$dh_{jk} = (S_{ik} \cdot \cos Z'_{ik} - S_{ij} \cdot \cos Z'_{ij}) + \frac{1}{2 R_m} (S_{ik}^2 \sin^2 Z'_{ik} - S_{ij}^2 \sin^2 Z'_{ij}) \quad (3.20)$$

bulunur.

Şekil 3.2'den

$$Z'_{ik} = Z_{ik} + \varepsilon_{ik} \quad (3.21)$$

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

yazılabilir.

(3.21) bağıntısı (3.20)'da yerine konulursa;

$$dh_{jk} = (S_{ik} \cdot \cos Z_{ik} - S_{ij} \cdot \cos Z_{ij}) - (S_{ik} \cdot \sin Z_{ik} \cdot \varepsilon_{ik} + S_{ij} \cdot \sin Z_{ij} \cdot \varepsilon_{ij}) + \frac{1}{2 R_m} (S_{ik}^2 \sin^2 Z_{ik} - S_{ij}^2 \sin^2 Z_{ij}) \quad (3.22)$$

olur. Uygulamada, (3.22) bağıntısı,

$$dh_{jk} = dH^A_{jk} - (S_{ik} \cdot \sin Z_{ik} \cdot \varepsilon_{ik} + S_{ij} \cdot \sin Z_{ij} \cdot \varepsilon_{ij}) \quad (3.23)$$

şeklinde yazılabilir. Burada;

$$dH^A_{jk} = (S_{ik} \cdot \cos Z_{ik} - S_{ij} \cdot \cos Z_{ij}) + \frac{1}{2 R_m} (S_{ik}^2 \sin^2 Z_{ik} - S_{ij}^2 \sin^2 Z_{ij}) \quad (3.24)$$

dir. (3.24) bağıntısındaki birinci terim nominal yükseklik farkı, ikinci terim ise yer eğriligi düzeltmesidir. $S_{ik} \cong S_{ij}$ için bu düzeltme çok küçük bir değerdir ve ihmal edilebilir.

(3.23)'teki ikinci terim çekül sapmalarının gözleme doğrultusundaki bileşenlerin sonuca etkisini gösterir. Uygulamada, ε_{ij} ve ε_{ik} çekül sapması bileşenleri çoğu kez bilinmez. Bu nedenle (3.23)'teki ikinci terim hesaplanamaz ve önemli bir düzenli hata kaynağı ortaya çıkar (Ceylan, 1993).

$$dh_{ij} = S_{ij} \cdot \cos Z'_{ij} + \frac{S_{ij}^2 \cdot \sin^2 Z'_{ij}}{2(R_{ij} + h_i)} \quad (3.25)$$

veya P_j 'den P_i 'ye yapılan gözlemlerden

$$dh_{ij} = -dh_{ji} = -S_{ij} \cdot \cos Z'_{ji} - \frac{S_{ij}^2 \cdot \sin^2 Z'_{ji}}{2(R_{ij} + h_j)} \quad (3.26)$$

yazılabilir. Yeterli bir yaklaşıklıkla ; $\sin^2 Z'_{ji} \cong \sin^2 Z'_{ij}$ kabul edilir ve (3.26)'de yerine konursa;

$$dh_{ij} = -S_{ij} \cdot \cos Z'_{ji} - \frac{S_{ij}^2 \cdot \sin^2 Z'_{ij}}{2(R_{ij} + h_j)} \quad (3.27)$$

olur. (3.25) ve (3.27) bağıntısının ortalaması alındığında,

$$dh_{ij} = \frac{S_{ij}}{2} \cdot (\cos Z'_{ij} - \cos Z'_{ji}) + \frac{S_{ij}^2 \cdot \sin^2 Z'_{ij}}{4} \cdot \left(\frac{1}{R_{ij} + h_i} - \frac{1}{R_{ij} + h_j} \right) \quad (3.28)$$

elde edilir (Greening, 1985).

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

$$dh_{ij} = \frac{S_{ij}}{2} \cdot (\cos Z'_{ij} - \cos Z'_{ji}) \quad (3.29)$$

bulunur. Şekil (3.3)'ye göre, elipsoidal düşey açılar;

$$\begin{aligned} Z'_{ij} &= Z_{ij} + \varepsilon_{ij} \\ Z'_{ji} &= Z_{ji} - \varepsilon_{ji} \end{aligned} \quad (3.30)$$

şeklinde yazılabilir. (3.30) bağıntısı (3.29)'de yerine konursa ;

$$dh_{ij} = \frac{S_{ij}}{2} \cdot (\cos Z_{ij} - \cos Z_{ji}) - \frac{S_{ij} \cdot \sin Z_{ij}}{2} \cdot (\varepsilon_{ij} + \varepsilon_{ji}) \quad (3.31)$$

bulunur.

Yeterli bir yaklaşıklıkla $\sin Z_{ij} \cong \sin Z_{ji}$ kabul edilir ve (3.31)'da yerine konursa;

$$dh_{ij} = dH^K_{ij} - \frac{S_{ij} \cdot \sin Z_{ij}}{2} \cdot (\varepsilon_{ij} + \varepsilon_{ji}) \quad (3.32)$$

olur. (3.32) bağıntısındaki dH^K_{ij} nominal yükseklik farkı,

$$dH^K_{ij} = \frac{S_{ij}}{2} \cdot (\cos Z_{ij} - \cos Z_{ji}) \quad (3.33)$$

dir.

4. TRİGONOMETRİK NİVELMANDA DOĞRULUK ANALİZİ

Trigonometrik nivelman yöntemleri yer, zaman ve düşey açı gözlemlerinin yapılaş biçimine göre Tek taraflı, Ortadan (atlamalı) ve karşılıklı olmak üzere üçe ayrılır. Bu bölümde bu üç yöntemin doğruluk analizlerini ve trigonometrik nivelmanın doğruluk analizinde etkili olan tesadüfi hatalar ele alınacaktır.

4.1. Trigonometrik Nivelmandaki Tesadüfi Hataların Etkisi

4.1.1. Uzunluk Ölçmesindeki Rastlantısal Hata

Kısa mesafe elektro optik uzaklık ölçerler (EDM) için uzunluktan bağımsız ve uzunluğa bağımlı etkenlerin toplamı olarak bir uzunluk ölçmesinin standart sapması aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir (Özgen ve Deniz, 1986).

$$\sigma_s = \pm (a + b.s)$$

Burada;

a : Uzunluktan bağımsız hataların toplamı

b : uzunluğa bağımlı hataların toplamı

S : Ölçülen uzunluktur.

Bazı güncel Total Station cihazları için uzaklık ölçme standart sapmaları şu şekilde verilmiştir.

Leica Flexline TS06 plus : $\pm (1.5\text{mm}+2\text{ppm})$

Leica Flexline TS03-07-10 : $\pm (1\text{mm}+1.5\text{ppm})$

Topcon OS-200 : $\pm (2\text{mm}+2\text{ppm})$

S<500 m'lik gözleme uzaklıkları için uzunluk ölçmesinin standart sapması $\sigma_s = \pm 2.0\text{mm}$ alınabilir.

4.1.2. Düşey Açı Gözlemlerindeki Rastlantısal Hata

Düşey açı gözlemlerinde, hedefe tatbik (uygulama), mikrometre okuma ve düşey indeksleme (kompensasyon) hatası gibi rastlantısal karakterli hatalar oluşabilmektedir. Bir teodolit her iki dürbün durumundaki açı ölçme hassasiyeti için, şu bağıntılar geçerlidir.

Yatay açı gözlemleri için,

$$\sigma^2_H = \frac{1}{2}(\sigma^2_{uyg} + \sigma^2_{cak} + \sigma^2_{tahm}) \quad (4.1)$$

düşey açı gözlemleri için,

$$\sigma^2_V = \frac{1}{2}(\sigma^2_{uyg} + \sigma^2_{cak} + \sigma^2_{tahm} + \sigma^2_{komp}) \quad (4.2)$$

hedefe uygulama doğruluğu için,

$$\sigma_{uyg} = \frac{\alpha}{M_d} \quad (4.3)$$

$\alpha=38^{cc}$ (deneysel değer)

M_d : Dürbün büyütmesi

Çakıştırma doğruluğu için,

$$\sigma_{cak} = \frac{1000}{d \cdot M_o} \quad (4.4)$$

d : bölüm dairesinin çapı

M_o : okuma mikroskobunun büyütmesi

Mikrometre skalasındaki tahmin doğruluğu için,

$$\sigma_{tahm} = 0.5^{cc} \text{ (deneysel değer)}$$

Kompansatörün doğruluğu için,

$$\sigma_{komp} = 1^{cc} \text{ alınabilir (Hirsch, 1984).}$$

Dürbün büyütmesi : $M_d=32x$

Yatay açı bölüm dairesinin çapı : $dh=85 \text{ mm}$

Düşey açı bölüm dairesinin çapı : $dv=75 \text{ mm}$

Okuma mikroskobunun büyütmesi : $M_o=42x$

alındığında,

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{1}{2}(1.19^2 + 2.8^2 + 0.5^2)} = \pm 2.2^{cc}$$

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{1}{2}(1.19^2 + 3.17^2 + 1^2)} = \pm 2.52^{cc}$$

elde edilir. Yeni geliştirilen otomatik açı okuma sistemine sahip elektronik takeometrelerde, açı okuma doğruluğu için $\sigma_H \cong \sigma_Z \cong 1^{cc}$ verilmektedir (Hirsch, 1984).

4.1.3. Refraksiyon Hatası

Tek taraflı ve ortadan (atlamalı) trigonometrik nivelmandaki refraksiyon hatasının standart sapması olarak, $\sigma_k \cong \pm 0.07$, karşılıklı trigonometrik nivelmanda refraksiyon hatasının standart sapması $\sigma_k \cong \pm 0.03$ alınabilir (Zhang ve ark., 2005).

4.2. Tek Taraflı Nivelman Doğruluk Analizi

Tek taraflı düşey açı gözlemleriyle hesaplanan trigonometrik yükseklik farkları daha önce verilmiş olan (3.10) bağıntısı ile hesaplanabilir. Bu bağıntıya, refraksiyon ve yer eğriliği hatası ve belirlenememiş diğer hata terimleri eklendiğinde

$$\Delta H_{ij} = S_{ij} \cos Z_{ij} + \frac{S_{ij}^2}{2R} - \frac{k}{2R} \cdot S_{ij}^2 + a - i \quad (4.5)$$

Yer eğriliği ve refraksiyon düzeltmesi
Alet ve işaret yüksekliği

şeklinde yazılır.

(4.5) bağıntısına eklenen hataların birbirinden bağımsız ve rastlantısal nitelikte olduğu varsayılacaktır.

(4.5) bağıntısına hata artma yasası uygulandığında;

$$\sigma_{\Delta H}^2 = \cos^2 Z_{ij} \cdot \sigma_{S_{ij}}^2 + S_{ij}^2 \sin^2 Z_{ij} \frac{\sigma_Z^2}{\rho^2} + \frac{(1 + k^2) \cdot S_{ij}^2}{R^2} \cdot \sigma_{s_{ij}}^2 + \frac{S_{ij}^4}{4R} \cdot \sigma_k^2 + \frac{S_{ij}^4}{4R} \cdot \sigma_a^2 + \sigma_a^2 + \sigma_i^2 \quad (4.6)$$

elde edilir.

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

$$\Delta H = \sum_{i=1}^n dH_{ij} \quad (4.7)$$

elde edilir. Yükseklik farklarının birbiriyle korelasyonsuz ve standart sapmalarının eşit olduğu kabul edilirse, toplam yükseklik farkının varyansı,

$$\sigma_{\Delta H}^2 = n \cdot \sigma_{dH}^2 \quad (4.8)$$

olur. (4.8) bağıntısındaki n, kenar uzunluklarının toplamının (L) ortalama kenar uzunluğuna (S) bölünmesi ile bulunabilir,

$$n = \frac{L}{S} \quad (4.9)$$

ve (4.9), (4.8) bağıntısında yerine konursa;

$$\sigma^2_L = n \cdot \sigma^2_{\Delta H} = \frac{L}{S} \cdot \sigma^2_{dH} \quad (4.10)$$

elde edilir (Ceylan,1993).

4.3. Ortadan (Atlamalı) Trigonometrik Nivelmanda Doğruluk Analizi

Ortadan trigonometrik nivelmanda yükseklik farkının hesabı için (3.24) bağıntısı verilmişti. Bu bağıntıya diğer hata kaynaklarını ifade eden bağıntılar eklendiğinde $dH^A_{jk} = (S_{ik} \cdot \cos Z_{ik} - S_{ij} \cos Z_{ij})$

$$+ \frac{1}{2R_m} (S^2_{ik} \sin^2 Z_{ik} - S^2_{ij} \sin^2 Z_{ij}) \quad \text{Yer eğrilik düzeltmesi} \quad (4.11)$$

$$+ \frac{S^2_{ik}}{2R} \quad \text{Refraksiyon düzeltmesi}$$

şeklinde yazılabilir.

(3.24) bağıntısına eklenen hataların birbirinden bağımsız ve rastlantısal nitelikte olduğu varsayılacaktır. $S_{ij} \cong S_{ik}$ olması durumunda yer eğriliği düzeltmesinin sıfıra çok yakın bir değerde ve rastlantısal nitelikli olduğu kabul edilerek bundan sonraki analizlerde dikkate alınmamıştır.

(4.11) bağıntısına hata artma yasası uygulandığında,

$$\sigma^2_{dH} = \cos^2 Z_{ik} \cdot \sigma^2_{S_{ik}} + \cos^2 Z_{ij} \cdot \sigma^2_{S_{ij}} + S^2_{ik} \cdot \sin^2 Z_{ik} \cdot \sigma^2_{Z_{ik}} + S^2_{ij} \sin^2 Z_{ij} \cdot \sigma^2_{Z_{ij}} \quad (4.12)$$

bulunur (Ceylan, 1997).

Bu analizin daha kolay ve anlaşılabilir olması için;

$$\begin{aligned} S &\cong S_{ik} \cong S_{ij} \\ Z &\cong Z_{ik} \cong Z_{ij} \\ \sigma_S &\cong \sigma_{S_{ik}} \cong \sigma_{S_{ij}} \\ \sigma_Z &\cong \sigma_{Z_{ik}} \cong \sigma_{Z_{ij}} \end{aligned} \quad (4.13)$$

olduğu varsayılabilir.

(4.13) kabulleri (4.12) bağıntısında yerine konulursa;

$$\sigma_{dH}^2 = 2\cos^2 Z_{ik} \cdot \sigma_{S_{ik}}^2 + 2S^2 \sin^2 Z_{ik} \sigma_Z^2 + \frac{S^4}{4R^2} \cdot \sigma_k^2 \quad (4.14)$$

elde edilir.

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

$$\Delta H = \sum_{i=1}^n dH_i \quad (4.15)$$

Yükseklik farklarının birbiriyle korelasyonsuz ve standart sapmalarının eşit olduğu kabul edilirse, toplam yükseklik farkının varyansı,

$$\sigma_{\Delta H}^2 = n \cdot \sigma_{dH}^2 \quad (4.16)$$

olur.

(4.16) bağıntısındaki n, kenar uzunluklarının toplamının (L) ortalama kenar uzunluğuna (2S) bölünmesi ile bulunabilir,

$$n = \frac{L}{2S} \quad (4.17)$$

ve (4.17), (4.16) bağıntısında yerine konursa;

$$\sigma_L^2 = \sigma_{\Delta H}^2 = \frac{L}{2S} \cdot \sigma_{dH}^2 \quad (4.18)$$

elde edilir (Ceylan, 1997).

4.4. Karşılıklı Trigonometrik Nivelmanda Doğruluk Analizi

Karşılıklı düşey açı gözlemleriyle hesaplanan trigonometrik yükseklik farkları daha önce verilmiş olan (3.33) bağıntısı ile hesaplanabilir. Bu bağıntıya, refraksiyon hatası ve belirlenememiş diğer hata terimleri eklendiğinde,

$$dH_{ij}^K = \frac{S_{ij}}{2} \cdot (\cos Z_{ij} - \cos Z_{ji}) + \frac{S^2}{4R} \cdot k \quad (4.19)$$

şeklinde ifade edilebilir. Ortadan (atlamalı) trigonometrik nivelmana benzer şekilde (4.19) bağıntısına hata artma yasası uygulanırsa,

$$\sigma_{dh}^2 = \cos^2 Z_{ik} \cdot \sigma_S^2 + \frac{S^2 \cdot \sin^2 Z}{2} \cdot \sigma_Z^2 + \frac{S^4}{16R^2} \sigma_k^2 \quad (4.20)$$

ile ifade edilebilir. (4.17) bağıntısındakine benzer varsayım la L kilometrelik karşılıklı trigonometrik nivelmanın varyansı (4.18)'e benzer olarak;

$$\sigma^2_L = \frac{L}{S} \cdot \sigma^2_{dH} \quad (4.21)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir (Ceylan, 1993).

4.5. Tek taraflı, Karşılıklı ve Atlamalı Trigonometrik Nivelman Doğruluk Araştırması

Tek taraflı, ortadan ve karşılıklı trigonometrik nivelman yöntemleri farklı hatalardan etkilendikleri için ölçmelerde kullanılan elektronik takeometrelerin düşey açı gözlemlerinin standart sapması $\sigma_z = \pm 1''$ ve $\sigma_z = \pm 3''$, uzunluk ölçmelerinin standart sapması için $\sigma_s = \pm 1.5\text{mm}$ alınmak suretiyle aşağıdaki hesaplamalar yapılmıştır.

Tek taraflı trigonometrik nivelmanda bir istasyon noktasında ölçülen yükseklik farkının standart sapması (4.6) bağıntısı ile hesaplanmış ve Tablo 4.1’de gösterilmiştir. Ayrıca, 1 km’lik tek taraflı trigonometrik nivelmanda yükseklik farkının standart sapması (4.10) bağıntısı kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 4.2’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Tek taraflı trigonometrik nivelmanda bir istasyonda ölçülen yükseklik farkının standart sapması (mm). [k=0.13, R=6370 km, $\sigma_k=0.07$, $\sigma_a=\sigma_i=0.2\text{mm}$]

S(m)	100		200		300		400		500	
σ_z	1 ^{cc}	3 ^{cc}	1 ^{cc}	3 ^{cc}	1 ^{cc}	3 ^{cc}	1 ^{cc}	3 ^{cc}	1 ^{cc}	3 ^{cc}
Z=100 ^s	0.33	0.55	0.47	1.01	0.74	1.53	1.12	2.10	1.61	2.74
Z=95 ^s	0.35	0.57	0.49	1.01	0.75	1.53	1.13	2.10	1.61	2.73
Z=90 ^s	0.41	0.59	0.53	1.02	0.77	1.53	1.14	2.09	1.61	2.72
Z=85 ^s	0.48	0.65	0.58	1.05	0.81	1.53	1.16	2.08	1.63	2.70

Tablo 4.2. 1 km’lik tek taraflı trigonometrik nivelmanda bir istasyon noktasında ölçülen yükseklik farkının standart sapması (mm).

S(m)	100		200		300		400		500	
σ_z	1 ^{cc}	3 ^{cc}	1 ^{cc}	3 ^{cc}	1 ^{cc}	3 ^{cc}	1 ^{cc}	3 ^{cc}	1 ^{cc}	3 ^{cc}
Z=100 ^s	1.04	1.73	1.05	2.26	1.35	2.78	1.77	3.32	2.28	3.89
Z=95 ^s	1.11	1.80	1.12	2.26	1.37	2.78	1.78	3.32	2.28	3.86
Z=90 ^s	1.30	1.87	1.19	2.28	1.40	2.83	1.80	3.30	2.28	3.85
Z=85 ^s	1.52	2.06	1.30	2.35	1.48	2.83	1.83	3.29	2.31	3.82

Ortadan trigonometrik nivelmanda bir istasyon noktasında ölçülen yükseklik farkının standart sapması (4.14) bağıntısı ile hesaplanmış ve Tablo 4.3’de gösterilmiştir.

Ayrıca, 1 km’lik ortadan trigonometrik nivelmanda yükseklik farkının standart sapması (4.18) bağıntısı kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 4.4’de gösterilmiştir.

Tablo 4.3. Ortadan (atlamalı) trigonometrik nivelmanda bir istasyon noktasında ölçülen yükseklik farkının standart sapması (mm) [$k=0.13$, $R=6370$ km, $\sigma_k=0.07$]

S(m) σ_z	100		200		300		400		500	
	1 ^{cc}	3 ^{cc}	1 ^{cc}	3 ^{cc}	1 ^{cc}	3 ^{cc}	1 ^{cc}	3 ^{cc}	1 ^{cc}	3 ^{cc}
Z=100 ^s	0.23	0.67	0.50	1.35	0.83	2.06	1.25	2.81	1.77	3.60
Z=95 ^s	0.28	0.69	0.52	1.36	0.84	2.06	1.26	2.80	1.77	3.60
Z=90 ^s	0.40	0.74	0.59	1.38	0.89	2.06	1.29	2.80	1.79	3.58
Z=85 ^s	0.54	0.82	0.69	1.40	0.95	2.07	1.33	2.78	1.82	3.55

Tablo 4.4. 1 km’lik ortadan (atlamalı) trigonometrik nivelmanda yükseklik farkının standart sapması (mm).

S(m) σ_z	100		200		300		400		500	
	1 ^{cc}	3 ^{cc}	1 ^{cc}	3 ^{cc}	1 ^{cc}	3 ^{cc}	1 ^{cc}	3 ^{cc}	1 ^{cc}	3 ^{cc}
Z=100 ^s	0.51	1.50	0.78	2.14	1.07	2.66	1.40	3.14	1.77	3.60
Z=95 ^s	0.63	1.54	0.82	2.15	1.09	2.66	1.41	3.13	1.77	3.60
Z=90 ^s	0.90	1.65	0.94	2.17	1.15	2.67	1.44	3.13	1.79	3.58
Z=85 ^s	1.21	1.83	1.10	2.22	1.23	2.67	1.48	3.11	1.82	3.55

Benzer şekilde, karşılıklı trigonometrik nivelmanda bir istasyon noktasında ölçülen yükseklik farkının standart sapması (4.20) bağıntısı ile hesaplanmış ve Tablo 4.5’de gösterilmiştir. 1 km’lik karşılıklı trigonometrik nivelmanda yükseklik farkının standart sapması (4.21) bağıntısı yardımıyla hesaplanmış ve Tablo 4.6’da gösterilmiştir.

Tablo 4.5. Karşılıklı trigonometrik nivelmanda bir istasyon noktasında ölçülen yükseklik farkının standart sapma (mm). [$k=0.13$, $R=6370$ km, $\sigma_k=0.04$]

S(m) σ_z	100		200		300		400		500	
	1 ^{cc}	3 ^{cc}	1 ^{cc}	3 ^{cc}	1 ^{cc}	3 ^{cc}	1 ^{cc}	3 ^{cc}	1 ^{cc}	3 ^{cc}
Z=100 ^s	0.11	0.33	0.23	0.67	0.35	1.01	0.48	1.35	0.63	1.69
Z=95 ^s	0.16	0.35	0.26	0.68	0.37	1.01	0.50	1.35	0.64	1.69
Z=90 ^s	0.26	0.40	0.32	0.70	0.42	1.02	0.53	1.35	0.67	1.69
Z=85 ^s	0.37	0.48	0.41	0.74	0.49	1.04	0.59	1.36	0.71	1.68

Tablo 4.6. 1 km’lik karşılıklı trigonometrik nivelmanda yükseklik farkının standart sapması (mm).

S(m) σ_z	100		200		300		400		500	
	1 ^{cc}	3 ^{cc}	1 ^{cc}	3 ^{cc}	1 ^{cc}	3 ^{cc}	1 ^{cc}	3 ^{cc}	1 ^{cc}	3 ^{cc}
Z=100 ^g	0.35	1.05	0.51	1.49	0.64	1.83	0.76	2.13	0.89	2.39
Z=95 ^g	0.51	1.12	0.57	1.51	0.67	1.84	0.78	2.13	0.90	2.39
Z=90 ^g	0.82	1.28	0.73	1.57	0.76	1.86	0.84	2.14	0.94	2.39
Z=85 ^g	1.16	1.51	0.93	1.65	0.89	1.90	0.93	2.14	1.00	2.38

Tablo 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 ve 4.6 incelendiğinde, gözleme uzaklıklarının etkisi, düşey açının büyüklüğü, refraksiyonun etkisi, özellikle düşey açı ölçümünün doğruluğu için farklı kabullerin sonuca etkisi açıkça görülmektedir.

Modern elektronik takeometrelerin geliştirilmesi ile günümüze kadar trigonometrik nivelman ile ulaşılamayan doğruluklara ulaşılabilir. Ayrıca bu takeometrelerde ölçülerin otomatik olarak doğrudan cihazda saklanması ölçme işleminin hızı ve doğruluğunu arttırmaktadır.

5. UYGULAMA

Bu tez çalışmasında Antalya ili, Serik İlçesi Belek-Serik yolu üzerinde bir poligon güzergahı oluşturularak arazi çalışmalarının tümü yapılmıştır.

5.1. Uygulama Alanı

Antalya ili, Serik ilçesi Serik-Belek yolu üzerinde kenarların toplam uzunluğu 4346.5 m olan bir güzergah hattı belirlenmiştir. Güzergah belirlenirken tezin amacına ve varmak istenilen bilgilere göre dikkat edilmiştir. Bu güzergah yaklaşık 180-500 m arası değişen kenar uzunluklarına sahip toplam 13 kenar ve 14 poligon noktasından oluşmaktadır. Poligon nokta tesisinde 37 mm pullu tabanca çivisi olarak adlandırılan çiviler zeminde bulunan sağlam taşların üzerine çakılmıştır.

Tablo 5.1. Kenar uzunlukları

Kenar No	Poligonlar	Kenar uzunlukları (m)
1	P.1 - P2	183.595
2	P.2 - P3	502.987
3	P.3 - P4	410.034
4	P.4 - P5	457.207
5	P.5 - P6	180.846
6	P.6 - P7	299.842
7	P.7 - P8	400.16
8	P.8 - P9	200.343
9	P.9 - P10	198.072
10	P.10 - P11	329.416
11	P.11 - P12	503.836
12	P.12 - P13	394.503
13	P.13 - P14	285.173

Uygulama alanının topografyası genel anlamda düz olarak nitelendirilebilir. Noktaların yerlerinin seçiminde, uygulamada kullanılacak yükseklik belirleme yöntemlerinin rahatlıkla uygulanabilmesine imkan verecek şekilde noktaların kendinden önceki ve sonraki noktayı rahatlıkla görecek şekilde seçilmiştir (Şekil 5.1)'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Uydu görüntüsü üzerinde güzergah.

5.2. Arazi Çalışmaları

5.2.1. Uygulamada Kullanılan Donanımlar

Bu çalışmada 1 adet Stonex S850A GNSS alıcısı, 1 adet Leica Flexline TS03 Total Station, reflektör ve jalón sehbası, 1 adet Topcon DL-503 sayısal nivo ve 2 adet 3m uzunluğunda barkodlu mira kullanılmıştır.

5.2.1.1-Stonex S850A GNSS alıcı

GNSS ölçmelerinde **Stonex S850A model GNSS** alıcısı kullanılmıştır (Şekil 5.2). GNSS alıcısı çift frekanslı olup 800 kanala sahiptir. Statik ölçmelerde konum belirleme doğruluğu yatayda $\pm(2.5 \text{ mm}+1 \text{ ppm})$ ve düşeyde ise $\pm(5.0 \text{ mm}+1 \text{ ppm})$ dir. Gerçek zamanlı kinematik ve Ağ-RTK ölçmelerinde yatay konum belirleme doğruluğu $\pm(8\text{mm}+1.\text{ppm})$ ve düşey konum belirleme doğruluğu $\pm(15 \text{ mm}+1 \text{ ppm})$ dir.



Şekil 5.2. Stonex S850A marka GNSS alıcısı.

5.2.1.2-Leica Flexline TS03 Total Station.

Trigonometrik nivelman ölçmelerinde Leica Flexline TS03 Total Station kullanılmıştır (Şekil 5.3). Leica Flexline TS03 Total Station'nın teknik özellikleri Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Leica Flexline TS03 Total Station ve teknik özellikleri.

Leica Flexline TS03	
Açı Ölçümü	
Doğruluk; Yatay ve Düşey	
* Mutlak, Sürekli, Çapsal * Ekran Çözünürlüğü: 0.1" (0.1 mgon) * Dörtlü Eksen Kompansatörü * Kompansatör Ayar Doğruluğu²: 0.5" / 1" / 1.5" / 2" * Kompansatör Aralığı : +/-4" * Elektronik Düzey Doğruluğu : 2" * Dairesel Düzey Hassasiyeti : 6 / 2 mm	
Mesafe Ölçümü	
Menzil	
* Prizma (GPR1, GPH1P): 0.9 m ila 3.500m * Prizma GPR1 (Uzun-Mesafe Modu) > 10.000 m * Prizmasız / Her türlü yüzeye * R500³ * R1000⁴	
Doğruluk ve Ölçüm Süresi	
* Tek Prizma * Prezisyonlu+/Bir kez: 1mm + 1.5 ppm (tipik 2.4 sn) * Prezisyonlu & Hızlı / Bir Kez & Hızlı : 2mm + 1.5 ppm (tipik 2 sn) * İzleme / Sürekli : 3mm + 1.5 ppm (tipik<0.15 sn) * Ortalama : 1mm + 1.5 ppm * Uzun mesafe modu / > 4 km: 5mm + 2 ppm (tipik 2.5 sn) * Prizmasız / Her türlü yüzeye * 0m - 500 m : 2mm +2 ppm (tipik 2.4sn⁵) * >500 m : 4mm + 2 ppm	
Lazer Nokta Boyutu	
* 30 m'de : 7 mm x 10 mm * 50 m'de : 8 mm x 20 mm * 100 m'de : 16 mm x 25 mm	
Teleskop	
* Büyütme : 30x * Çözücü güç : 3" * Odaklama mesafesi : 1.55m / 5.08 ft - sonsuza * Görüş alanı : 1°30" / 1.66 gon / 100m'de 2.7m	



Şekil 5.3. Leica Flexline TS03.

5.2.1.3-Topcon DL 503 sayısal nivo ve barkodlu mira.

Geometrik nivelman ölçmelerinde Topcon DL 503 sayısal nivo ve barkodlu mira kullanılmıştır (Şekil 5.4). Topcon DL 503 sayısal nivo'nun teknik özellikleri Tablo 5.3'de verilmiştir.



Şekil 5.4. Topcon DL 503 sayısal nivo

Tablo 5.3. Topcon DL 503 sayısal nivo ve teknik özellikleri.

Topcon DL503	
Teleskop	
* Magnifikasyon : 32x * Objektif Aralığı : 5mm (1.78") * Çözme Gücü : 3" * Arazi Görüş Açısı : 1°20" * Minimum Fokus 1.5 mt (5.0 ft) * Görüntü : Düz * Ölçüm Oranı : 100	
Kompansatör (Magnetik)	
* Çalışma Aralığı : $\pm 15'$	
Yükseklik Ölçümü	
Hassasiyet (1 km gidiş dönüş nivelman standart sapma)	
* Invar Mira : 0.6 mm - 0.8 mm * Fıberglas Mira : 1.0 mm - 1.5 mm * Optik Okuma : 1.00 mm - 2.0 mm * Ölçme aralığı : 5.3-328 ft (1.6-100 mt)	
Çevresel	
* Suya Dayanıklılık : IPX4 * İşlem Isısı : -4°F - 122°F (-20°C - 50°C) * Kayıt Isısı : -40°F - 158°F (-40°C - 70°C)	
Diğer	
* İşlem Süresi : Yaklaşıl 16 Saat * Ağırlık : 5.3 lbs (2.4 kg) * Ölçü : 10.1 x 6.2 x 7.2in (257x158x182mm)	

5.2.2. Nivelman Ölçü ve Hesapları

Bu tez çalışmasının ana konusu olan trigonometrik nivelman yöntemlerinin doğruluklarının araştırılması amacıyla seçilen uygulama alanında, geometrik nivelman, tek taraflı, ortadan ve karşılıklı trigonometrik nivelman ölçmeleri yapılmıştır. Trigonometrik nivelman ölçmelerinde düşey açılar ve eğik kenarlar iki silsile (seri) şeklinde ölçülmüştür (Tablo 5.4). Ayrıca, ülkemizde kullanılmakta olan CORS-TR (TUSAGA-Aktif) sistemi ile ağ GZK yöntemiyle de noktalar arasındaki yükseklik farkları belirlenmiştir.

Geometrik nivelmanda Topcon DL 501 sayısal nivosu ve 5 m’lik barkodlu miralar kullanılarak, yükseklik farkları gidiş-dönüş olarak ölçülmüştür. Geometrik nivelman ölçmelerinde, gerileri gözleme uzunlukları mümkün olduğunca eşit alınmasına ve 50 m altında mira okuması yapılmamasına dikkat edilmiştir. Gidiş-dönüş ölçüleri farklı zaman aralıklarında yapılmıştır.

Tablo 5.4.Düşey açı ve eğik kenar ölçüleri.

Durulan Nokta	Bakılan Nokta	Dürbün Durumu	Düşey Açı Z	Eğik Kenar	Düzeltilmiş Düşey açı	Z (ort.)	E.kenar (ort)
P.1 a=1.548	P.2 i=1.500	I	100.1334	183.593	100.1305	100,1304	183.592
		II	299.8725	183.593	299.8696		
			400.0059		400.0000		
		I	100.1338	183.592	100.1305		
		II	299.8728	183.592	299.8695		
			400.0066		400.0000		
P.2 a=1.511	P.3 i=1.500	I	100.3787	502.999	100.3757	100,3744	502.998
		II	299.6273	502.999	299.6243		
			400.0060		400.0000		
		I	100.3765	502.999	100.3732		
		II	299.6301	502.999	299.6268		
			400.0066		400.0000		

Tek taraflı trigonometrik nivelmanda, ölçme modeline uygun olarak gözlenen düşey açı ve eğik uzunluk değerlerinin ortalamaları kullanılarak noktalar arası yükseklik farkları;

$$\Delta H_{ij} = S_{ij} \cos Z_{ij} + \frac{(1 - k)}{2R} \cdot S_{ij}^2 + a - i$$

eşitliği ile hesaplanmıştır. Sonuçlar tablo 5.5’de gösterilmiştir.

Ortadan trigonometrik nivelmanda, ölçme modeline uygun olarak geri ve ileri doğrultuda yapılan düşey açı ve eğik uzunluk gözlemlerinin ortalamaları kullanılarak noktalar arası yükseklik farkları;

$$dH^A_{jk} = (S_{ik} \cdot \cos Z_{ik} - S_{ij} \cos Z_{ij}) + \frac{1}{2R_m} (S_{ik}^2 \sin^2 Z_{ik} - S_{ij}^2 \sin^2 Z_{ij})$$

eşitliği ile hesaplanmıştır. Uygulamada geri ve ileri doğrultudaki hedef ve reflektör yükseklikleri eşit alınmış olması nedeniyle hesaplamalarda hedef ve işaret yükseklikleri dikkate alınmamıştır. Sonuçlar tablo 5.6'da gösterilmiştir.

Karşılıklı trigonometrik nivelmanda, ölçme modeline uygun olarak karşılıklı yapılan düşey açı ve eğik uzunluk gözlemlerinin ortalamaları hesaplandıktan sonra, düşey açılar zemine indirgenmiştir.

Zemine indirgemelerde;

$$\begin{aligned} \Delta Z_{ij} &= \frac{i_j - a_i}{S_{ij}} & Z_{ij} &= Z'_{ij} + \Delta Z_{ij} \\ \Delta Z_{ji} &= \frac{i_i - a_j}{S_{ij}} & Z_{ji} &= Z'_{ji} + \Delta Z_{ji} \end{aligned}$$

eşitlikleri kullanılmıştır. Burada,

Z'_{ij} ve Z'_{ji} ; karşılıklı gözlenen düşey açılar ortalaması

S_{ij} ve S_{ji} ; karşılıklı gözlenen eğik uzunluklar ortalaması

a_i ve a_j ; sırasıyla i ve j noktalarındaki alet yükseklikleri

i_i ve i_j ; sırasıyla i ve j noktalarındaki hedef ve işaret yükseklikleridir.

Zemine indirgenmiş düşey açılar ve eğik uzunluklar kullanılarak noktalar arası yükseklik farkları;

$$dH^K_{ij} = \frac{S_{ij}}{2} \cdot (\cos Z_{ij} - \cos Z_{ji}) + \frac{S_{ij}^2}{4R} \cdot k$$

eşitliği ile hesaplanmıştır. Sonuçlar tablo 5.5'de gösterilmiştir.

CORS-TR sisteminde noktalarının koordinatları; aşağıda belirtilen koşulları sağlayacak şekilde ve farklı zamanlarda en az iki GNSS oturumu ile belirlenmiştir.

CORS-TR sisteminde Ağ GZK yöntemiyle konum belirlemelerinde, Uydu sayısı:

En az beş adet, Uydu yükseklik açısı: 10° , veri toplama aralığı: bir saniye, Ölçüm

süresi: her noktada en az 10 epok ve oturumlar arası zaman: en az bir saat,

alınmıştır. İki oturumdan elde edilen izdüşüm koordinatları ve elipsoit

yükseklikleri arasındaki farklar ± 7.0 cm (dahil)'den küçük olmasına dikkat

edilmiştir. Sonuçlar tablo 5.5'de gösterilmiştir.

Tablo 5.5. Geometrik, tek taraflı ve karşılıklı trigonometrik nivelman sonuçları.

Kenar No	Kenarlar	Geometrik ΔH (m)	Tek taraflı Trig. ΔH (m)	Karşılıklı Trig. ΔH (m)	CORS-TR Sistemi ΔH (m)
1	P.1-P.2	-0.33305	-0.3271	-0.3332	-0.355
2	P.2-P.3	-2.9297	-2.9298	-2.9334	-3.006
3	P.3-P.4	-0.9216	-0.9195	-0.9202	-0.953
4	P.4-P.5	-0.3523	-0.3533	-0.3528	-0.3995
5	P.5-P.6	-0.2227	-0.2219	-0.2237	-0.223
6	P.6-P.7	-0.2054	-0.1999	-0.2038	-0.244
7	P.7-P.8	0.1271	0.1304	0.1277	0.107
8	P.8-P.9	-0.0713	-0.0648	-0.0714	-0.0935
9	P.9-P.10	-0.0805	-0.0760	-0.0777	-0.104
10	P.10-P.11	-0.7272	-0.7315	-0.7263	-0.756
11	P.11-P.12	0.1144	0.1191	0.1186	0.074
12	P.12-P.13	0.1619	0.1575	0.1633	0.1155
13	P.13-P.14	-0.0329	-0.0350	-0.0322	-0.0615

5.2.3. Trigonometrik Nivelman Yöntemlerinin Doğruluk Karşılaştırmaları

Trigonometrik nivelman yöntemlerinin doğruluk karşılaştırılmasında geometrik nivelman ölçmeleriyle elde edilen yükseklik farkları gerçek değer olarak alınmıştır.

Tablo 5.6. Geometrik, ortadan trigonometrik nivelman sonuçları.

Kenar No	Kenarlar	Geometrik ΔH (m)	Ortadan Trig. ΔH (m)
1	P.1-P.3	-3.2627	-3.2698
2	P.3-P.5	-1.2739	-1.2741
3	P.5-P.7	-0.4281	-0.4254
4	P.7-P.9	0.0557	0.0601
5	P.9-P.11	-0.8077	-0.8109
6	P.11-P.13	0.2763	0.2756

Doğruluk karşılaştırmaları için her bir yönetime ait yükseklik farklarına ait karesel ortalama hataları aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\delta H_i = \Delta H_{\text{Trg.}} - \Delta H_{\text{Geo.}}$$

$$\sigma_{\Delta H} = \sqrt{\frac{\delta H_i \cdot \delta H_i}{n}}$$

Tek taraflı ve karşılıklı trigonometrik nivelman ile elde edilen yükseklik farklarına ait karesel ortalama hatalar Tablo 5.7’de verilmiştir.

Tablo 5.7. Tek taraflı ve karşılıklı trigonometrik nivelmana ait karesel ortalama hatalar.

Kenar No	Kenarlar	$\delta H_{\text{Tek}} = \Delta H_{\text{tek.}} - \Delta H_{\text{geom.}}$ (mm)	$\delta H_{\text{karş}} = \Delta H_{\text{karş.}} - \Delta H_{\text{geom.}}$ (mm)
1	P.1-P.2	6.0	-0.2
2	P.2-P.3	-0.2	-3.8
3	P.3-P.4	2.1	1.4
4	P.4-P.5	-1.0	-0.6
5	P.5-P.6	0.8	-1.0
6	P.6-P.7	5.5	1.6
7	P.7-P.8	3.4	0.6
8	P.8-P.9	6.6	-0.1
9	P.9-P.10	4.5	2.8
10	P.10-P.11	-4.4	0.9
11	P.11-P.12	4.7	4.2
12	P.12-P.13	-4.3	1.4
13	P.13-P.14	-2.0	0.8
		$\sigma_{\Delta H_{\text{tek}}} = \pm 4.02\text{mm}$ Ort = +1.7mm Max = +6.5mm Min = -4.4mm	$\sigma_{\Delta H_{\text{karş}}} = \pm 1.95\text{mm}$ Ort = +0.6mm Max = +4.2mm Min = -3.8mm

Ortadan trigonometrik nivelman ile elde edilen yükseklik farklarına ait karesel ortalama hatalar Tablo 5.8’de verilmiştir.

Tablo 5.8. Ortadan trigonometrik nivelmana ait karesel ortalama hata.

Kenar No	Kenarlar	$\delta H_{\text{ort}} = \Delta H_{\text{ort.}} - \Delta H_{\text{geom.}}$ (mm)
1	P.1-P.3	-7.1
2	P.3-P.5	-0.2
3	P.5-P.7	2.7
4	P.7-P.9	4.4
5	P.9-P.11	-3.3
6	P.11-P.13	-0.6
		$\sigma_{\Delta H_{\text{ort}}} = \pm 3.84\text{mm}$ Ort = -0.7mm Max = +4.4mm Min = -7.1mm

CORS-TR sistemiyle elde edilen yükseklik farklarına ait karesel ortalama hatalar Tablo 5.9’da verilmiştir.

Tablo 5.9. CORS-TR ile elde edilen yükseklik farklarına ait karesel ortalama hatalar.

Kenar No	Kenarlar	$\delta H_{\text{cors-TR}} = \Delta H_{\text{cors-TR}} - \Delta H_{\text{geom.}}$ (mm)
1	P.1-P.2	39.05
2	P.2-P.3	-78.35
3	P.3-P.4	-32.40
4	P.4-P.5	14.25
5	P.5-P.6	-48.35
6	P.6-P.7	-89.58
7	P.7-P.8	28.95
8	P.8-P.9	-66.68
9	P.9-P.10	12.50
10	P.10-P.11	-61.85
11	P.11-P.12	-29.40
12	P.12-P.13	-32.85
13	P.13-P.14	-8.08
$\sigma_{\text{cors-TR}} = \pm 37.1\text{mm}$ Ort = -32.8mm Max = +0.35mm Min = -76.4mm		

5.2.4. Değerlendirmeler

Bu çalışmada uygulama alanı olarak seçilen 14 nokta ve 13 kenardan oluşan test alanı, topografik arazi yapısı düz olarak kabul edilebilir. Düşey açı gözlemleri incelendiğinde düşey açıların 99-101^g olduğu görülmektedir. Düşey açı gözlemlerine ait karesel ortalama hatalar, tek taraflı düşey açı gözlemler için $\pm 2.98^{\text{cc}}$, ortadan düşey açı gözlemler için $\pm 2.99^{\text{cc}}$ karşılıklı düşey açı gözlemler için $\pm 2.91^{\text{cc}}$ olarak hesaplanmıştır. Genel olarak $\sigma_z = \pm 3.0^{\text{cc}}$ alınabilir.

Kenar uzunlukları 180-503 m arası değişmektedir. Ortalama kenar uzunluğu 334.30m dir. Leica Flexline TS03 total station için uzunluk ölçmeleri için karesel ortama hata $\pm(1+1.5\text{ppm})$ dir. Bu çalışma için kenar uzunluklarına ait karesel ortalama hata olarak $\sigma_s = \pm 1.5\text{mm}$ alınmıştır.

Uygulamaya ilişkin yukarıda verilen değerler göz önüne alınarak Tablo 4.2, Tablo 4.4 ve Tablo 4.6 incelendiğinde tek taraflı, ortadan ve karşılıklı trigonometrik nivelmandan beklenen teorik doğruluklar sırasıyla $\pm 2.78\text{mm}$, $\pm 2.66\text{mm}$ ve $\pm 1.83\text{mm}$ dir.

Test alanında yapılan trigonometrik nivelman yöntemleri için geometrik nivelman sonuçları gerçek değere en yakın değer olarak alındığında Tablo 5.7 ve Tablo 5.8 de görüldüğü gibi tek taraflı, ortadan ve karşılıklı trigonometrik nivelman için, sırasıyla $\pm 4.02\text{mm}$, $\pm 3.84\text{m}$ ve $\pm 1.95\text{mm}$ 'lik karesel ortalama hatalar hesaplanmıştır.

Ülkemizde yaygın olarak kullanılan TUSAGA-Aktif (CORS-TR) sistemiyle yapılan konum belirlemelerindeki yükseklikler, geometrik nivelman sonuçları ile karşılaştırıldığında yükseklik farklarına ait karesel ortalama hata $\pm 37.1\text{mm}$ olarak hesaplanmıştır.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Gerek bilimsel amaçlı araştırma projelerinde gerekse uygulamaya yönelik mühendislik projelerinde yükseklik belirlemeleri harita mühendisliğinin önemli misyonlarından birisidir. Bilindiği üzere, yükseklik belirlemelerinde presizyonlu geometrik nivelman, geometrik nivelman, trigonometrik nivelman ve GNSS nivelman teknikleri uygulanmaktadır. Yükseklik belirleme tekniklerinin şüphesiz birbirlerine göre birçok avantajları ve dezavantajları vardır. Özellikle engebeli ve dağlık arazilerde geometrik nivelman tekniği birçok model hatalarından etkilenmesi, gözleme uzunluklarının kısıtlı olması gibi nedenlerden dolayı uygulaması zor ve zaman alıcı bir yöntemdir. Geometrik nivelmana alternatif yöntem arayışında, son yıllardaki teknolojik gelişmelerin sonucu olarak üretilen yüksek doğruluklu düşey açı ve uzunluk ölçmeleri yapabilen elektronik takeometreler ile trigonometrik nivelmanın doğruluğunun yeniden araştırılması ihtiyacını doğurmuştur. Bu amaçla değişik gözleme uzunluklarında ve düşey açılar ile trigonometrik nivelman yöntemlerinden beklenen teorik doğruluklar hesaplanmıştır. Tablo 4.2, Tablo 4.4 ve Tablo 4.6 incelendiğinde düşey açı $Z=99-101^\circ$ ve ortalama kenar uzunluğu $S=300m$ alındığında $1km$ 'lik tek taraflı, ortadan ve karşılıklı trigonometrik nivelmandan beklenen teorik karesel ortalama hatalar sırasıyla $\pm 2.78mm$, $\pm 2.66mm$ ve $\pm 1.83mm$ olarak hesaplanmıştır.

Test alanında yükseklik ölçmeleriyle, geometrik nivelman sonuçları gerçek değer olarak kabul edilerek elde edilen yükseklik farklarına ait maksimum, minimum, ortalama değer ve karesel ortalama hatalar hesaplanmıştır. Tek taraflı trigonometrik nivelmanda; $Max=+6.5mm$, $Min=-4.4mm$, $Ort=+1.7mm$ ve $\sigma_{\Delta H_{tek}}=\pm 4.02mm$ elde edilmiştir. Ortadan trigonometrik nivelmanda; $Max=+4.4mm$, $Min=-4.1mm$, $Ort=+0.7mm$ ve $\sigma_{\Delta H_{ort}}=\pm 3.84mm$, Karşılıklı trigonometrik nivelmanda ise; $Max=+4.2mm$, $Min=-3.8mm$, $Ort=+0.6mm$ ve $\sigma_{\Delta H_{karş}}=\pm 1.95mm$ olarak elde edilmiştir. TUSAGA-Aktif (CORS-TR) sistemi ile elde edilen yükseklik farkları için ise; $Max=-0.35mm$, $Min=-476.4mm$, $Ort=-32.8mm$ ve $\sigma_{\Delta H_{tek}}=\pm 37.1mm$ 'lik maksimum, minimum, ortalama değer ve karesel ortalama hatalar elde edilmiştir.

Sonuç olarak, trigonometrik nivelman yöntemleriyle genel anlamda $0.5cm$ altı doğruluklara rahat bir şekilde ulaşılabilinmektedir. Özellikle, karşılıklı trigonometrik nivelman ile $2mm$ altı doğrulukların elde edilmiş olması, yöntemin Karayolu, demir yolu, kanalizasyon, sulama, havaalanı vb. birçok alt yapı ve üst yapı projelerinde kullanılması, uygulama, maliyet ve süre açısından önemli avantajlar sağlayacaktır.

Bu tez çalışmasında seçilen test alanının genel anlamda düz olarak değerlendirilebilecek bir topografik yapıya sahip olduğu akıldan çıkarılmamalıdır. Dağlık ve engebeli arazilerde de benzer çalışmaların yapılarak, trigonometrik nivelmanın doğruluğu hakkında daha kesin sonuçlar elde edilebilir. Ayrıca, biz bu çalışmada kullanmayı çok arzu ettiğimiz ama maddi imkansızlıklar nedeniyle kullanamadığımız 0.1^{cc} incelikte düşey açı gözlemleri yapabilen elektronik takeometrelerin kullanılması halinde trigonometrik nivelmandan elde edilebilecek doğrulukların önemli ölçüde iyileşeceğini ümit etmekteyim.

.



KAYNAKLAR

- Bahnert, G., 1970. Moglichkeiten und Greenzer der Trigonometrischen Hohenmessung Habilitationsschrift, arb.Verm. Kart. DDR. Band 24, und 25.
- Baykal, O., 1980. Yükseklik Ölçmeleri. İ.T.Ü. M.M.L.S. Ders Notları, İstanbul (Basılmamış).
- Ceylan, A. “Prezisyonlu Nivelman Yerine Trigonometrik Nivelman Yönteminin Kullanılabilirliği Üzerine Bir Çalışma.” Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, 1993.
- Ceylan, A. “Elektronik Takeometrelerle Trigonometrik Nivelman ve Doğruluk Analizi.” S.Ü. Müh. Mim. Fakültesi Dergisi, C.12, S.1, Sayfa:25-30, 1997, Konya.
- Ceylan, A., ve İnal, C, 1996, Dış Merkezli Trigonometrik Nivelaman, S.Ü. Müh. Mim. Fak. Derg. 11, 1-6.
- Coskun, M. Z. and O. Baykal, Functional models and new stochastic model in combined leveling nets, J. Surv. Eng., 128 (4) ,168-186, 2002.
- Coşkun, M. Z. Karışık Nivelman Ağlarında Stokastik Model Araştırması, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi, 1996
- Deniz, R.; Çelik, R.; Kutoğlu, H., (2015), Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği, Hermes Tanıtım Ofset Baskı, Ankara.
- Gürkan, O. (1979). Çekül Sapması Kavramı, KTÜ, Trabzon.
- Greening, W.J.T., 1985, Evaluation of Precison Trigonometric Levelling Methods. Dept. Of Surveying Engineering, Univ. of New Brunswick, Frederiction, Canada.
- Gürdal, M. (2004). “Sayısal Nivoların Teknolojisi ve Tarihsel Gelişimi”, Harita Dergisi, 71, 131, 20-33.
- Heiskanen, W. And Moritz, H., 1984. Fiziksel Jeodezi. Çeviri: Onur GÜRKAN, K.T.Ü. Basımevi, Trabzon.
- Hung-Lin, L., Tung-Chiung, C., and Chih-Wei., 2016, An Approach for Improving the Precision on Short – Range Electronic Distance Measurement Trigonometry, No:60, Sec:1, Taiwan.
- Hirsch, O., 1984, Zur genauigkesit des Trionometrischen Nivellements Vom Optischen Zum Informatik Theodolit. Vortrag Zum İnternational Kurs für Ingenieurvermessung, Graz.
- J. Zou, Y. Zhu, Y. Xu, Q. Li, L. Meng & H. Li (2017) Mobile Precise trigonometric levelling system based on land vehicle: an alternative method for precise levelling, Survey Review, 49:355, 249-258.

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 Europ, Fed.Rep. of Germany, September 15-19, Hannover.

Özgen,M.G. ve Deniz, R., 1986, Elektromagnetik Dalgalarla Jeodezik Ölçmeler. İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul.

Turan, F. “Dolgu Tipli Barajlarda Düşey Değişimlerin Hassas Trigonometrik Nivelman Yöntemiyle Belilenmesi Üzerine Bir İnceleme.” Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2007.

Zhang, Z., Zhang K, Deng, Y., Luo C.,Research on Precise Trigonometrik Leveling in Place of FİRST Order Leveling, Geospatial Information, Vol.8, December 2005

