



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**GNSS DESTEKLİ TRİGONOMETRİK NİVELMAN İLE VADİ GEÇİŞİ
NİVELMANI**

Mustafa Doğukan BİTİM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Mustafa Doğukan BİTİM tarafından hazırlanan “**GNSS Destekli Trigonometrik Nivelman İle Vadi Geçişli Nivelmanı**” adlı tez çalışması 23/12/2025 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

Başkan

Prof.Dr.Cevat İNAL
Konya Teknik Üniversitesi

Danışman

Prof.Dr. Ayhan CEYLAN
Konya Teknik Üniversitesi

Üye

Prof.Dr.Cevat İNAL
Konya Teknik Üniversitesi

Üye

Doç.Dr.Fuat BAŞÇİFTÇİ
Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi

İmza

.....

.....

.....

.....

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.

Mustafa Doğukan BİTİM

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GNSS Destekli Trigonometrik Nivelman İle Vadi Geçişi Nivelmanı

Mustafa Doğukan BİTİM

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Ölçme Tekniği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof.Dr. Ayhan CEYLAN

2025, 56 Sayfa

Jüri

Prof.Dr.Ayhan CEYLAN

Prof.Dr.Cevat İNAL

Doç.Dr. Fuat BAŞÇİFTÇİ

Günümüzde gerek mühendislik projelerinde gerekse bilimsel merakı gidermeye yönelik çalışmalarda nokta yüksekliklerinin belirlenmesi harita mühendisliğinin önemli çalışma alanlarından birisidir. Nokta yükseklikleri yaygın olarak geometrik, trigonometrik ve GNSS nivelman tekniği ile belirlenmektedir. Bu tekniklerin kendine özgü bir çok avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Bunlardan yaygın olarak uygulanan yöntem geometrik nivelman tekniğidir. Geometrik nivelman tekniği özellikle geniş açıklıklı ve derin vadilerin ve akarsu geçişlerinde uygulanması zor ve zaman alıcı bir tekniktir. Geometrik nivelman tekniğine alternatif yöntem arayışında gelişen teknolojilerin sonucu olarak ortaya çıkan yüksek doğruluklu açı ve uzunluk ölçebilen Total Stationlar ve GNSS tekniği kullanılarak trigonometrik nivelman tekniğinin yeniden araştırılması gündeme gelmiştir. Bu çalışmada, geometrik nivelman yerine GNSS destekli trigonometrik nivelmanın kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Bu çalışmada, noktalar arası farklı uzunluklara sahip üç noktadan oluşan bir test alanında GNSS destekli trigonometrik nivelman tekniği ile elde edilen yükseklik farkları geometrik nivelman ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonunda, Total Station kullanılarak gerçekleştirilen trigonometrik nivelmanda maksimum -4.86 cm, minimum -0.5 cm ve ortalama -2.49 cm olarak hesaplanmıştır. Buna karşın, GNSS çözümleri ile elde edilen kenar uzunluklarının kullanıldığı GNSS destekli trigonometrik nivelmanda maksimum -4.92 cm, minimum -0.4 cm ve mutlak hatalar ortalaması -2.52 cm olarak bulunmuştur. A-B, B-C ve A-C hatlarında elde edilen karşılaştırmalı sonuçlar, hat uzunluklarına bağlı olarak yöntemin geometrik nivelmanla olan uyum düzeyi daha açık ve tanımlı biçimde ortaya konulabilmektedir. Yaklaşık 100 m uzunluğundaki B-C hattı kısa hat niteliğinde olup, bu hatta elde edilen yükseklik farkları geometrik nivelman sonuçlarıyla yüksek düzeyde uyumlu bulunmuştur. Yaklaşık 1400 m uzunluğa sahip A-C hattı ise orta hat uzunluğunu temsil etmekte olup, bu hatta ait sonuçlar geometrik nivelmanla karşılaştırıldığında yüksek düzeyde uyumlu, yaklaşık 1500 m uzunluğa sahip A-B uzun hattında ise kabul edilebilir doğrulukta sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Geometrik nivelman, GNSS nivelmanı, Trigonometrik Nivelman, Vadi Geçiş Nivelmanı

ABSTRACT

MS THESIS

GNSS-Assisted Trigonometric Leveling and Valley Crossing Leveling

Mustafa Doğukan BİTİM

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Geomatic Engineering**

Advisor: Prof.Dr. Ayhan CEYLAN

2025, 56 Pages

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

Nowadays, the determination of point elevations is one of the essential areas of surveying engineering in both engineering applications and scientific studies. Point elevations are commonly determined using geometric leveling, trigonometric leveling, and GNSS leveling techniques, each of which has its own advantages and limitations. Among these methods, geometric leveling is the most widely applied technique; however, it becomes difficult and time-consuming to implement, particularly in wide-span and deep valleys as well as in river crossings. Owing to recent technological developments, high-precision Total Stations capable of accurate angle and distance measurements, together with GNSS technology, have brought trigonometric leveling back into focus as a potential alternative. In this study, the applicability of GNSS-supported trigonometric leveling as an alternative to geometric leveling is investigated.

For this purpose, a test area consisting of three points with different inter-point distances was established, and height differences obtained using GNSS-supported trigonometric leveling were compared with those derived from geometric leveling. The results indicate that, for trigonometric leveling carried out using a Total Station, the maximum error was -4.86 cm, the minimum error was -0.5 cm, and the mean absolute error was -2.49 cm. In contrast, for GNSS-supported trigonometric leveling based on baseline lengths obtained from GNSS solutions, the maximum error was -4.92 cm, the minimum error was -0.4 cm, and the mean absolute error was -2.52 cm. Comparative analyses of the A–B, B–C, and A–C lines demonstrate that the level of agreement with geometric leveling depends on line length. While the short B–C line (approximately 100 m) exhibited a high level of agreement, the medium-length A–C line (approximately 1400 m) also showed high consistency with geometric leveling, whereas the long A–B line (approximately 1500 m) produced results with acceptable accuracy.

Keywords: Geometric leveling, GNSS leveling, Trigonometric Leveling, Valley Passing Leveling

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması kapsamında, yükseklik belirleme teknikleri içerisinde güncel ve uygulama değeri yüksek bir yöntem olan GNSS destekli trigonometrik nivelman tekniğini inceleme, uygulama ve değerlendirme fırsatı bulmuş olmanın memnuniyetini ifade etmek isterim. Bu çalışma süreci, özellikle GNSS teknolojilerinin trigonometrik nivelman ile entegrasyonuna yönelik önemli bir deneyim sağlamış ve mesleki gelişime değerli katkılar sunmuştur. Tez çalışmamın planlanması, yürütülmesi ve sonuçlandırılmasında akademik birikimi, tecrübesi ve yol göstericiliği ile her zaman yanımda olan Danışman Hocam Prof. Dr. Ayhan CEYLAN'a en içten teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım. Kendisi, çalışma boyunca hem bilimsel hem de metodolojik açıdan ufuk açıcı yönlendirmelerde bulunmuştur. GNSS verilerinin değerlendirilmesi, işlenmesi ve dengeleme aşamalarında bilgi ve desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Sercan BÜLBÜL'e de katkılarından dolayı teşekkür ederim. Bu tezin ortaya çıkış sürecinde saha ölçümleri ve uygulama sürecinin çeşitli aşamalarında teknik destek sağlayarak katkıda bulunan babam Tekin BİTİM'e ve Arkadaşım Hasan KIVANÇ'a ayrıca teşekkür ederim. Bununla birlikte tez süreci boyunca motivasyon ve desteklerini esirgemeyen tüm arkadaşlarıma da minnettarım.

Son olarak, eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan, sabır, anlayış ve destekleriyle beni bugünlere getiren aileme en derin teşekkürlerimi sunarım. Varlıkları, bu çalışmanın tamamlanmasında önemli bir motivasyon kaynağı olmuştur.

Mustafa Doğukan BİTİM
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	9
3.1. Yükseklik Kavramı	9
3.2 Yükseklik Belirleme Yöntemleri (Nivelman).....	9
3.2.1. Trigonometrik Nivelman Tekniği	10
3.2.2.Geometrik nivelman tekniği	18
3.2.3.Barometrik nivelman tekniği	22
3.2.4.GNSS Nivelman Tekniği	23
4. UYGULAMA	25
4.1.Uygulama Alanı	25
4.2.Nokta Yerleri Seçimi	26
4.3. Eş Zamanlı Dış Merkezli Trigonometrik Nivelman	27
4.3.1 Düşey açı ve uzunluk ölçmeleri.....	31
4.4. Geometrik Nivelman Ölçmeleri.....	35
4.5 Ölçülerin Değerlendirilmesi	37
4.5.1. Eş Zamanlı Trigonometrik Nivelmanda düşey açı ve eğik uzunluklar	37
4.5.2. GNSS Baz Uzunluklarının hesabı Hesaplanması	38
4.5.3. Yükseklik farklarının hesaplanması.....	39
4.5.4. Geometrik Nivelman ile Yükseklik farkların	40
4.5.5. Yükseklik farklarının karşılaştırılması.....	40
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	41
KAYNAKLAR	45

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

$^{\circ}$	:	Derece
'	:	Dakika
"	:	Saniye
e	:	East
g	:	Geri Okuma
$^{\circ}$	:	Grad
g	:	Yeryüzünde Ölçülen Gerçek Gravite
H	:	Ortometrik Yükseklik
h	:	Elipsoidal Yükseklik
i	:	İleri Okuma
K	:	Yerin ırılma kat sayısı
n	:	North
N	:	Jeoit Ondülasyonu
R _m	:	Yer Elipsoidinin Yarıçapı
S	:	Görüş Uzunluğu
S'	:	Eğik Mesafe
Z' _i	:	P _i 'den P _j 'ye olan model zenit açısı
Z' _j	:	P _j 'den P _i 'ye olan model zenit açısı
ε	:	Şakül sapmasından kaynaklanan model hata terimi
dZ _r	:	Kırılma etkisinden kaynaklanan model hata terimi
Z	:	Düşey açılar
ΔH	:	Yükseklik farkı
Δh_{ij}	:	P _i 'den P _j 'ye Olan Ortometrik Yükseklik Farkı

Kısaltmalar

BeiDou	:	BeiDou Navigation Satellite System
CORS	:	Continuously Operating Reference Stations
EDM	:	Electronic Distance Measurement
Galileo	:	European Global Navigation Satellite
GDOP	:	Geometric Dilution of Precision
GLONASS	:	Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS	:	Global Navigation Satellite Systems
GPS	:	Global Positioning System
PPM	:	Parts Per Million
RTK	:	Real Time Kinematic
SRTL	:	Simultaneous Reciprocal Trigonometric Levelling
LFTL	:	Leap-Frog Trigonometric Levelling
TUSAGA	:	Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı



1. GİRİŞ

Yükseklik ölçmeleri, fiziksel jeodezinin ana konularından biri olarak, yeryüzündeki noktaların düşey konumlarının ve bu noktalar arasındaki yükseklik farklarının tespitine odaklanır. Bu tür düşey konum bilgileri; mühendislik, jeoteknik, hidrolik ve jeodinamik uygulamalarda, birçok yapının güvenliği ve tasarımı açısından kritik girdilerdir (Ceylan, 2009). Özellikle baraj, köprü, tünel ve viyadük gibi büyük ölçekli yapılar için yükseklik farklarının doğru ve güvenilir biçimde belirlenmesi ekonomik ve emniyet açısından önem taşımaktadır.

Yükseklik ölçmelerinde değişen arazi şartlarına göre donanım, uygulanabilirlik, zaman, maliyet ve doğruluk gibi bazı kriterler göz önüne alınarak farklı teknikler kullanılabilmektedir. Bu noktada bize düşen görev mühendislik uygulamalarında gerekli hassasiyeti sağlayan uygun tekniğinin seçimidir.

Yükseklik belirleme teknikleri zaman içinde sürekli bir gelişim göstermiştir. Başlangıçta kullanılan geometrik nivelman yöntemi, yüksek doğruluğu nedeniyle uzun süre temel ölçüm tekniği olarak uygulanmıştır. Geometrik nivelman tekniği gerek aletsel gerekse dış ortamdan kaynaklanan model hatalarından etkilenmektedir. Söz konusu model hatalarının en aza indirilebilmesi için ana ölçme modeline ilave olarak yan modeller uygulanması gerekmektedir. Bu ise geometrik nivelman tekniğini uzun süren ve fazla iş gücü gerektiren bir yapıya sokmaktadır. Özellikle derin vadi vb. engebeli arazilerde ve geometrik nivelmanın uygulanamadığı akarsu geçişlerinde geometrik nivelmana alternatif yöntemlerin araştırılması ihtiyacını doğurmuştur. Başlangıçta silindirik düzeçli nivolar kullanılır iken sonrasında kompensatörlü (otomatik) nivolar kullanılmıştır. Son yıllarda ise sayısal (dijital) nivoların kullanımı ve motorize olarak uygulandığında geometrik nivelmanın üretim hızı önemli ölçüde arttırılmıştır. Geometrik nivelmanın özellikle engebeli arazilerde gözleme uzunluklarının sınırlı olması ve refraksiyon hatalarından büyük ölçüde etkilenmesi yöntemin önemli dezavantajlarından (Ceylan, 2009). Bu süreçte ele alınan diğer bir teknik ise trigonometrik nivelman tekniğidir. Trigonometrik nivelman tekniğinde noktalar arası düşey açı ve uzunluklar yardımıyla yükseklik farkları hesaplanmaktadır. Günümüzdeki teknolojik adımların bir çıktısı olarak elde edilen yüksek doğrulukta düşey açı ve uzunluk gözlemleri gerçekleştirebilen Total Stationların kullanımı ile özellikle kısa mesafelerde trigonometrik nivelmanın doğruluğu birkaç milimetre'ye kadar indirilmiştir. Tekniğin en önemli hata etkisi refraksiyon hatasıdır. Düşey açıların karşılıklı ve eşzamanlı

ölçülmesi suretiyle refraksiyon hatası minimuma indirilebilmektedir (Erkaya, 2006; Ceylan,2009).

1990'ların başında ve daha çok 2000'li yıllardan sonra çoğunlukla küresel konum belirleme sistemleri (GNSS) ile üç boyutlu konum belirlemelerine önemli katkılar sağlamıştır. GNSS tekniği, özellikle geniş alanlarda geometrik veya trigonometrik nivelmana alternatif bir yöntem olarak yüksek üretim hızı sunmuştur. Türkiye'deki referans istasyon ağlarının (örneğin TUSAGA-Aktif) yaygınlaşması sayesinde yatay ve düşey konum bilgileri gerçek zamanlı olarak elde edilebilir hale gelmiştir. GNSS gözlemleri ile yatay konum belirlemelerinde ulaşılan doğruluklara düşey konum belirlemelerinde henüz ulaşılammış olması gözden kaçırılmamalıdır. GNSS gözlemleri ile noktaların kartezyen koordinatları (X, Y, Z) yardımıyla seçilen referans elipsoidine göre noktaların enlem, boylam ve elipsoidal koordinatları elde edilmektedir. GNSS sistemleriyle elde edilen elipsoidal yüksekliklerin pratikte kullanılması mümkün değildir. (Kahveci 1993) Elipsoidal yüksekliklerin GNSS nivelman ile ortometrik yüksekliklere dönüştürülmesi gerekmektedir. Dönüşüm için global, bölgesel veya lokal jeoid modellerinden enterpolasyon ile hesaplanan jeoid yüksekliklerinden yararlanılır. Dönüşümün doğruluğu büyük ölçüde jeoid yüksekliklerinin doğruluğuna bağlıdır. (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger & Collins, 2001)

Bu çalışmada vadi ve akarsu geçişlerinde klasik trigonometrik nivelman tekniğinin özel bir uygulaması olan dış merkezli trigonometrik nivelman tekniğinin iyileştirilmesi amacıyla önerilen GNSS destekli trigonometrik nivelman ile vadi geçiş nivelmanı tekniği hakkında teori ve uygulamaya ilişkin ayrıntılı bilgiler verilmiştir. Uygulama bölümünde ise farklı uzunluklara sahip üç nokta arasındaki yükseklik farkları; geometrik nivelman, klasik trigonometrik nivelman ve GNSS destekli trigonometrik nivelman yöntemleriyle belirlenmiştir. Sonuç olarak bu tez çalışmasında GNSS destekli trigonometrik nivelman tekniğinin vadi geçişlerinde uygulanabilirliği, doğruluğu ve verimliliği araştırılmıştır. Çalışmanın temel amacı, GNSS ölçülerinden elde edilen konum bilgilerinin trigonometrik nivelman verileri ile değerlendirilmesi yoluyla klasik yöntemlere kıyasla elde edilebilecek iyileştirmeleri ortaya koymaktır. Böylece, hem arazi ölçümlerinde operasyonel kolaylık sağlayan hem de doğruluk açısından güvenilir sonuçlar üreten bir alternatif yaklaşımın geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Bu tez çalışmasının konusu, GNSS destekli trigonometrik nivelman yönteminin, referans yöntem olarak kabul edilen geometrik nivelmana göre performansının araştırılmasıdır. Çalışma kapsamında, farklı uzunluklara sahip noktalar arasında oluşturulan bir test alanında gerçekleştirilen ölçmelere dayanmaktadır. Bu test alanında, yükseklik farkları geometrik nivelman yöntemiyle referans olarak belirlenmiş; aynı noktalara ait yükseklik farkları klasik trigonometrik nivelman ve statik GNSS ölçmeleriyle elde edilen baz uzunluklarının kullanıldığı GNSS destekli trigonometrik nivelman yöntemleriyle hesaplanmıştır. GNSS destekli trigonometrik nivelmanda, nokta çiftleri arasındaki kenar uzunlukları statik GNSS ölçmeleriyle belirlenen bazlardan türetilmiş ve bu uzunluklar trigonometrik nivelman denklemlerinde kullanılmıştır.

Çalışmada gerçekleştirilen analizler kapsamında, trigonometrik yöntemlerle elde edilen yükseklik farklarının geometrik nivelman sonuçlarından sapmaları incelenmiş; maksimum, minimum değerleri hesaplanarak yöntemlerin doğrulukları ortaya konulmuştur. Bununla birlikte, hat uzunluklarının ölçüm sonuçları üzerindeki etkisi değerlendirilmiş ve GNSS destekli trigonometrik nivelmanın kısa, orta ve uzun mesafelerde geometrik nivelmana göre başarımlı analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, GNSS destekli trigonometrik nivelman yönteminin belirli koşullar altında geometrik nivelmana alternatif bir yöntem olarak kullanılabilirliği tartışılmış; sonuç olarak bu çalışmanın, GNSS teknolojisinin trigonometrik nivelman yöntemiyle entegrasyonuna yönelik özgün bir uygulama örneği sunarak, özellikle zahmetli arazi koşullarında yükseklik farklarının güvenilir biçimde belirlenmesine ilişkin literatüre katkı sağlaması hedeflenmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Banger ve Aslan (1981.b) tarafından gerçekleştirilen çalışma sonucunda, vadi ve akarsu geçiş nivelmanı uygulamalarında yer eğriliği ve atmosferik refraksiyon gibi hata kaynaklarının ölçüm sırasında her zaman doğrudan giderilemeyebileceği belirtilmiştir. Bu tür durumlarda, söz konusu hata etkilerini en aza indirmek amacıyla uygun ve özel bir nivelman yönteminin seçilmesi gerekmektedir. Seçilecek gözlem ve uygulama yöntemi ile kullanılacak alet donanımı, nivelman ölçmelerinden beklenen hassasiyet düzeyine bağlı olarak belirlenmektedir. Noktalar arasındaki yükseklik farklarının belirlenmesi, karşılıklı ve eşzamanlı gözlemlerle gerçekleştirilebileceği gibi, özel donanıma sahip ölçme aletlerinin kullanımıyla da sağlanabilmektedir. Bu yaklaşım, zorlu arazi koşullarında güvenilir ve hassas yükseklik farkı elde edilmesine olanak tanımaktadır.

Ceylan ve İnal (1996)'ın gerçekleştirdiği çalışmada benzer biçimde, geometrik ve trigonometrik nivelman yöntemlerinin karşılaştırıldığı uygulamalarda, trigonometrik nivelman tekniğinin geometrik nivelmana kıyasla daha düşük doğruluk değerleri üretmesine rağmen, kabul edilebilir hassasiyet sınırları içerisinde kaldığı görülmektedir. Beş noktalı bir test ağı üzerinde yapılan değerlendirmelerde, birim ağırlıklı ölçünün karesel ortalama hatasının geometrik nivelmanda $\pm 0,706$ mm, trigonometrik nivelmanda ise $\pm 1,677$ mm mertebesinde gerçekleştiği rapor edilmiştir. Bu sonuçlar, özellikle engebeli ve ölçüm koşullarının zor olduğu arazilerde, trigonometrik nivelmanın geometrik nivelmana alternatif olabilecek doğruluk düzeylerinde sonuç verebildiğini ortaya koymaktadır.

Ceylan ve ark (2005)'ı tarafından Modern yükseklik belirleme tekniklerinin doğrulukları karşılaştırılmış ve her bir yöntemin avantajları ile dezavantajları incelenmiştir. Bu amaçla, geometrik, trigonometrik ve GPS teknikleri kullanılarak 11 noktalı bir nivelman hattında yükseklik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Hassas nivelman ölçümleri doğru kabul edilerek, diğer tekniklerle elde edilen sonuçlar bu doğru verilerle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, hassas geometrik nivelman tekniği ile yapılan ölçümler, sayısal nivolar kullanılarak yapılan geometrik nivelman tekniği ile en yakın sonuçları vermiştir.

Ceylan ve Baykal (2006) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, hassas geometrik nivelmanın uzun yıllardır doğru yüksekliklerin belirlenmesinde tercih edilen bir teknik olmasına karşın, özellikle engebeli arazilerde uygulanmasının güç, zaman alıcı ve maliyetli olduğu vurgulanmıştır. Bu durumun, araştırmacıları alternatif yükseklik belirleme yöntemlerine yönlendirdiği ifade edilmiştir. Gelişen ölçme teknolojileriyle birlikte hassas trigonometrik nivelman yöntemi yeniden önem kazanmıştır. Bu kapsamda, Selçuk Üniversitesi Kampüsü'nde gerçekleştirilen bir uygulamada, farklı görüş uzunlukları kullanılarak ortadan (atlamalı) trigonometrik nivelman (LFTL) tekniği ile optimum görüş uzunlukları belirlenmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları, hassas geometrik nivelman verileriyle karşılaştırılarak doğruluk, maliyet ve uygulanabilirlik açısından değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, $S = 150$ m görüş uzunluğu ile gerçekleştirilen ortadan trigonometrik nivelman uygulamasında, $\pm 1,87$ mm/km standart sapma değeri ve günlük 5,6 km üretim hızı elde edilmiştir.

Erkaya (2006)'nın çalışmasında belirttiği üzere, engebeli ve dağlık arazilerde geometrik nivelman uygulamaları; arazi koşulları, görüş kısıtları ve eğim etkileri nedeniyle çoğu zaman zor, maliyetli ve zaman alıcı olabilmektedir. Arazinin eğimine bağlı olarak alet ile mira arasındaki mesafelerin artması, ölçüm sürecini daha da karmaşık hâle getirmektedir. Bu bağlamda, uzunluk ve düşey açı ölçümü yapabilen modern ölçme aletlerinin kullanılmasıyla gerçekleştirilen eş zamanlı trigonometrik nivelman tekniğinin, uygun ölçüm koşulları sağlandığında geometrik nivelmana yakın doğruluk ve hassasiyet düzeyleri sunabileceği değerlendirilmektedir.

Ceylan ve Baykal (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, yüksek doğruluklu Total Station sistemlerinin piyasaya sunulmasıyla birlikte karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelman (SRTL) tekniğinin birçok mühendislik uygulamasında geometrik nivelmana alternatif bir yöntem olarak değerlendirilmeye başlandığı ifade edilmiştir. Yapılan uygulamalar, özellikle kısa görüş mesafelerinde yüksek hassasiyetli sonuçlar elde edilebildiğini göstermektedir. Çalışmada, yöntemin iki istasyondan karşılıklı ve eşzamanlı olarak gerçekleştirilen düşey açı ve uzunluk ölçümlerine dayanması sayesinde, atmosferik refraksiyon ve yer eğriliği gibi sistematik hataların etkilerinin büyük ölçüde ortadan kaldırılabildiği vurgulanmıştır. Sunulan uygulama sonuçlarına göre, yaklaşık 200 m görüş mesafesinde $\pm 1,9$ mm/ $\sqrt{\text{km}}$ mertebesinde standart sapma değerlerine ulaşılabildiği belirlenmiştir. Bu doğruluk düzeyinin, yükseklik farklarının belirlenmesini gerektiren birçok mühendislik projesi için yeterli olduğu değerlendirilmiştir. Ayrıca,

yöntemin yüksek ölçüm üretim kapasitesine sahip olduğu ve günlük yaklaşık 4 km uzunluğunda hat üzerinde ölçüm gerçekleştirilebildiği belirtilmiştir. Bu durum, SRTL yönteminin yalnızca yüksek hassasiyet sunmakla kalmayıp, aynı zamanda uygulama açısından da verimli bir teknik olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, modern Total Station teknolojileriyle birlikte uygulanan karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelman yöntemi, zamansal verimlilik, doğruluk ve maliyet etkinliği bakımından güvenilir bir yükseklik belirleme alternatifi olarak öne çıkmaktadır.

Wolf ve Ghilani (2012)'ye göre, yükseklik farklarının belirlenmesinde kullanılan yöntemler arasında en yüksek doğruluk düzeyini sağlayan teknik geometrik nivelman olup, özellikle yüksek doğruluk beklenen mühendislik projelerinde referans yöntem olarak kabul edilmektedir. Vadi gibi topoğrafyası karmaşık alanlarda gerçekleştirilen köprü inşaatlarında, karşılıklı yamaçlarda yer alan noktaların yükseklik sistemlerinin ortak bir referans düzlemine bağlanması büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla farklı nivelman yöntemlerinden yararlanılmakta olup, en yaygın kullanılan teknikler geometrik nivelman, trigonometrik nivelman ve GNSS nivelmandır. Geometrik nivelman, uzun yıllardır uygulanan klasik bir yöntem olarak kısa ve orta mesafelerde yüksek doğruluk sağlamasıyla öne çıkmaktadır. Trigonometrik nivelman yönteminde ise yatay uzunluklar ve düşey açı ölçülerine dayalı olarak yükseklik farkları hesaplanmakta, bu sayede erişimi zor alanlarda pratik çözümler elde edilebilmektedir. GNSS nivelman ise uydu tabanlı konumlama teknolojileri sayesinde hızlı veri üretimi sunarak modern mühendislik uygulamalarında önemli bir alternatif oluşturmaktadır. Bununla birlikte, söz konusu yöntemlerin doğruluk, uygulama kolaylığı ve çevresel koşullara duyarlılık açısından farklı avantaj ve sınırlamaları bulunmaktadır.

Ceylan ve Baykal (2013) tarafından Selçuk Üniversitesi Kampüsü'nde kurulan bir test ağı üzerinde gerçekleştirilen çalışmada, 200 m görüş mesafesi kullanılarak eşzamanlı–karşılıklı trigonometrik nivelman yöntemi ile hassas geometrik nivelman yöntemi karşılaştırılmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçlarına göre, eşzamanlı–karşılıklı trigonometrik nivelman tekniği için standart sapma değeri $\pm 1,86$ mm/km olarak hesaplanmıştır. Maliyet analizi kapsamında yapılan değerlendirmelerde ise, söz konusu tekniğin hassas geometrik nivelmana kıyasla yaklaşık %7 daha düşük maliyetli olduğu belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, eşzamanlı–karşılıklı trigonometrik nivelman yönteminin, özellikle zorlu ve engebeli arazi koşullarında hassas geometrik nivelmana göre daha uygun ve uygulanabilir bir alternatif sunduğu vurgulanmıştır.

Zrinjski ve ark. (2018) tarafından Rijeka’da gerçekleştirilen çalışmada, modern yükseklik belirleme yöntemleri kapsamında trigonometrik nivelman ve GNSS nivelman teknikleriyle elde edilen yükseklik farklarının doğruluğu incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, geometrik nivelman ölçüleriyle karşılaştırılarak değerlendirilmiş ve yöntemlerin doğruluk performansları ortaya konulmuştur.

Bitelli ve ark. (2018)’ları yüksek doğruluklu Total Station cihazlarının piyasaya sunulmasıyla birlikte trigonometrik nivelman tekniği kullanılarak geometrik nivelmana yakın doğrulukta sonuçlar elde edilebildiğini ortaya koymuştur. Bu gelişme, klasik geometrik nivelman yönteminin uygulanmasının zor veya mümkün olmadığı akarsu geçişleri, bataklık alanlar ve derin vadiler gibi sahalarda trigonometrik nivelmanın etkin bir alternatif olarak kullanılabilmesini sağlamaktadır. Bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmada, yüksek doğruluklu robotik Total Station kullanılarak uygulanan eşzamanlı ve karşılıklı trigonometrik nivelman ölçümlerine ait sonuçlar değerlendirilmiş ve açıklanmıştır.

Pırtı ve Hosbas (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, geometrik nivelman, trigonometrik nivelman ve GNSS (GPS) nivelman teknikleriyle elde edilen yükseklik farklarının doğrulukları karşılaştırılmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, her üç nivelman tekniğinin de birkaç milimetre mertebesinde farklarla kabul edilebilir doğrulukta sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, dijital nivelman ölçümlerinin diğer yöntemlere kıyasla daha belirgin ve tutarlı sonuçlar sunduğu ifade edilmiştir. Kısa kenarlarda (<250 m) gerçekleştirilen ölçümlerde, geometrik nivelman ile trigonometrik nivelman arasındaki yükseklik farkının yaklaşık 8 mm olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, yaklaşık 5 km uzunluğundaki bir hat üzerinde GNSS nivelman tekniğiyle elde edilen elipsoid yükseklik farkı ile geometrik nivelman yöntemiyle belirlenen ortometrik yükseklik farkı arasında 4 mm düzeyinde bir farklılık bulunduğu rapor edilmiştir. Elde edilen bu bulgular, her üç tekniğin hassasiyet açısından birbirine yakın sonuçlar verdiğini, ancak dijital ve uydu tabanlı yöntemlerin daha keskin ve tutarlı veriler sağladığını ortaya koymaktadır.

Dingliang ve ark. (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, uzun açıklıklı vadi geçişlerinde Total Station kullanılarak yapılan hassas trigonometrik nivelman ölçümleriyle yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilebildiği ortaya konulmuştur. Bununla birlikte, 3,5 km’yi aşan görüş mesafelerinde, düşey açı gözlemlerinde hedef tanıma güçlüğüne artması nedeniyle yöntemin etkinliğinin azaldığı tespit edilmiştir. Çalışma

kapsamında, uzun kenarlarda gerçekleştirilen hassas trigonometrik nivelman ölçümleri ile geometrik nivelman sonuçları karşılaştırılmıştır. Trigonometrik nivelman, hedeflerin doğrudan gözlenmesine dayalı bir ölçüm tekniği olup, özellikle uzun kenarlarda uygulanabilirliği ve sağladığı pratiklik açısından öne çıkmaktadır. Buna karşılık, geometrik nivelman yöntemi kısa mesafelerde yüksek doğruluk sağlamakla birlikte, uzun kenarlarda uygulama güçlükleri ve sınırlamalar içerebilmektedir. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, ölçümlere ait standart sapma değeri $\pm 0,9$ mm olarak hesaplanmış olup, bu değer elde edilen sonuçların oldukça yüksek bir doğruluk düzeyine sahip olduğunu göstermektedir. Bu tür hassas yükseklik ölçümleri, özellikle köprü inşaatı gibi mühendislik projelerinde düşey kontrolün sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır. Elde edilen bulgular, uzun kenarlı nivelman uygulamalarında güvenilir sonuçlar elde edebilmek için trigonometrik ve geometrik nivelman yöntemlerinin birlikte kullanılmasının etkili bir yaklaşım olduğunu ortaya koymaktadır.

Öğter (2024) tarafından gerçekleştirilen tez çalışmasında, vadi geçiş nivelmanı tekniği ayrıntılı olarak incelenmiştir. Geometrik nivelman, trigonometrik nivelman ve GNSS tekniklerinin farklı arazi koşullarında kendilerine özgü avantaj ve dezavantajlara sahip olduğu belirtilmiştir. Özellikle tabanı geniş vadi oluşumlarında geometrik nivelman yöntemi, kısa gözleme uzunlukları gerektirmesi nedeniyle uygulamada zaman alıcı ve maliyetli bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu dezavantajları azaltmak amacıyla, Carl Zeiss Oberkochen tarafından 1960 yılında vadi geçiş nivelmanı uygulamalarına yönelik özel bir donanım geliştirilmiştir. Söz konusu donanım, iki adet Ni2 nivo ve mikrometreli paralel cam kullanımıyla, kolimasyon değerlerine bağlı olarak eğim açılarının hassas bir biçimde ölçülmesine olanak sağlamaktadır. Çalışma kapsamında; vadi geçiş nivelmanı, geometrik nivelman, dış merkezli trigonometrik nivelman ve GNSS teknikleri kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Uygulama alanlarında hesaplanan yükseklik farkları sırasıyla ΔHVG , ΔHGN , ΔHTN ve $\Delta HGNNs$ olarak ifade edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, vadi ve akarsu geçişleri gibi zorlu topoğrafik koşullarda vadi geçiş nivelmanı yönteminin etkin ve verimli bir şekilde uygulanabileceğini ortaya koymaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Yükseklik Kavramı

Yeryüzündeki herhangi bir noktanın yüksekliğini tanımlayabilmek için öncelikle bir referans yüzey belirlenmeli ve bu yüzeye dik doğrultular tanımlanmalıdır. Arazi üzerinde en kolay tanımlanabilen dik doğrultular ise çekül doğrultularıdır. Durgun haldeki bir sıvı yüzeyi, fiziksel olarak çekül doğrultusuna dik olacak şekilde dengede bulunur. Bu nedenle, her bir noktada tanımlanan çekül doğrultuları, deniz yüzeyinde varsayılan denge halindeki yüzeye diktir. Karasal alanların altında varsayımsal olarak devam ettiği kabul edilen bu deniz seviyesi, yükseklik ölçümlerinde başlangıç yüzeyi olarak kabul edilmekte ve bu yüzey jeoit adıyla tanımlanmaktadır. Bu bağlamda yükseklik, bir noktanın çekül doğrultusu boyunca jeoide olan dik uzaklığı olarak tanımlanır. Eğer bir nokta, bu başlangıç yüzeyinin (jeoitin) altında yer alıyorsa, çekül doğrultusunda ölçülen bu mesafe derinlik olarak adlandırılır. (Erkaya, 2006; Herbert ve Ocak, 2021)

3.2 Yükseklik Belirleme Yöntemleri (Nivelman)

Fiziksel jeodezinin önemli misyonlarından birisi de nokta yüksekliklerinin veya noktalar arasındaki yükseklik farklarının belirlenmesidir. Günümüzde gerek bilimsel çalışmalarda gerekse de mühendislik projelerinde yükseklik belirlemelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Jeodezi literatüründe yükseklik belirlemelerine genel olarak nivelman adı verilmektedir. Nivelman teknikleri temel olarak geometrik, trigonometrik ve GNSS nivelman olarak üç gruba ayrılır. Uygulamada yüksek doğruluğu nedeniyle geometrik nivelman tekniği tercih edilmektedir. Ancak, topoğrafik yapının düzgün olmadığı dağlık ve engebeli arazilerde geometrik nivelmanın uygulanması çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Bu tür koşullarda trigonometrik nivelman tekniği öne çıkmaktadır. Bu yöntemde yükseklik farkı, uzunluk ve düşey açı gözlemleriyle hesaplanır. Ancak, düşey açı gözlemlerinde gözlem ışınının farklı yoğunluktaki atmosferik katmanlarından geçerken kırılması (refraksiyon) nedeniyle ölçme doğruluğunu olumsuz etkilemektedir. Bu durum, yükseklik farklarının belirlenmesinde önemli bir hata kaynağıdır. Günümüzde meteoroloji biliminde yaşanan gelişmeler sayesinde, refraksiyon yalnızca geometrik bir problem olmaktan çıkmış, aynı zamanda atmosferin fiziksel etkilerini de içeren bir olgu haline gelmiştir. Atmosferin daha iyi tanınması ve bu fiziksel etkilerin detaylı analiz

edilmesiyle birlikte, refraksiyonun yükseklik ölçümleri üzerindeki etkileri daha hassas biçimde değerlendirilebilir hale gelmiştir.

Bilindiği üzere GNSS gözlemleri ile noktaların kartezyen koordinatları (X, Y, Z) yardımıyla seçilen referans elipsoidine göre noktaların enlem, boylam ve elipsoidal koordinatları elde edilmektedir. GNSS sistemleriyle elde edilen elipsoidal yükseklik geometrik bir yükseklik olması nedeniyle pratikte kullanılması mümkün değildir. Bu nedenle elipsoidal yüksekliklerin fiziksel anlamlı ortometrik yüksekliklere dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu işleme GNSS nivelman adı verilmektedir. Dönüşüm için global, bölgesel veya lokal jeoid modellerinden enterpolasyon ile hesaplanan jeoid yüksekliklerinden yararlanılır. Dönüşümün doğruluğu büyük ölçüde jeoid yüksekliklerinin hesaplama doğruluğuna bağlıdır. (Yıldız, 2012; Erikson, 2014).

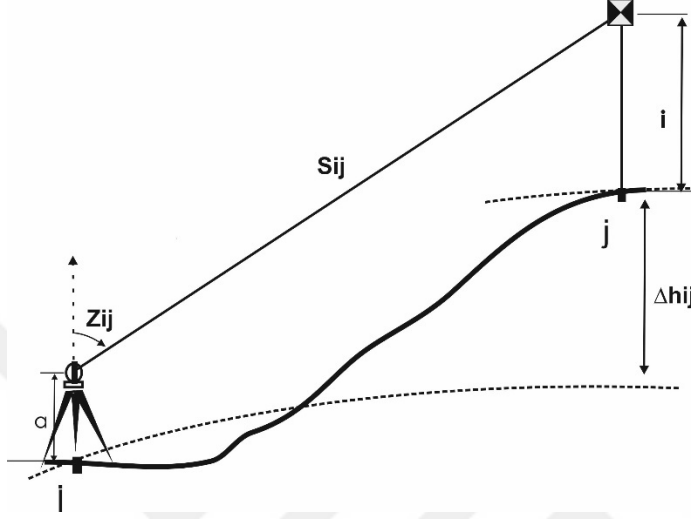
3.2.1. Trigonometrik Nivelman Tekniği

Trigonometrik nivelman yöntemi, yükseklik farklarını belirlemek için kullanılan bir tekniktir ve özellikle uzun kenarlarda ve zor arazi koşullarında tercih edilir. Bu teknikte, Total Station gibi elektronik aletler ile uzunluk ve düşey açı (zenith açısı) ölçülerek yükseklik farkları belirlenir. Trigonometrik nivelman tekniği, geometrik nivelman tekniğinin uygulanamadığı yerlerde, örneğin vadilerde, dağlık veya geniş akarsu geçişlerinde ayrıca uzun mesafelerde hızlı ölçüm gereksiniminin bulunduğu, erişimi zor hedeflerin söz konusu olduğu, ön etüt çalışmalarının yapıldığı ve zaman-maliyet ilişkisinin ön planda olduğu mühendislik projelerinde de etkin bir şekilde kullanılır. Trigonometrik nivelman tekniğinin avantajı, uzun kenarlarda veya erişilmesi zor noktalarda, doğrudan yükseklik ölçümü yapabilmesidir. Bu yöntemde, özellikle atmosferik koşullar ve elektronik takeometrenin düşey açı ölçme doğruluğu çok önemlidir. Trigonometrik nivelmanda yüksek doğruluklar elde edebilmek için Total Stationların nokta üzerine tam olarak merkezlenmesi ve hedefe tatbik çok önemlidir. Sonuç olarak, trigonometrik nivelman yöntemi, zor koşullarda yükseklik farklarının hesaplanmasını sağlamak için etkili bir yöntemdir.

Trigonometrik nivelman tekniği, alet konumu ve düşey açı gözlemlerinin yapılma durumuna göre; tek taraflı, ortadan ve karşılıklı trigonometrik nivelman olarak sınıflandırılır. Refraksiyon ve yer eğriliğinin etkisini en aza indirmek için karşılıklı ve eş zamanlı trigonometrik nivelman tekniği tercih edilmektedir.

3.2.1.1 Tek taraflı Trigonometrik Nivelman Tekniği

Tek taraflı trigonometrik nivelmanda, Şekil 3,1’de görüldüğü gibi düşey açı ve uzunluk tek taraflı olarak gözlenir.



Şekil 3.1. Tek taraflı trigonometrik nivelman

İ ve J noktaları arasındaki yükseklik farkı;

$$\Delta h_{ij} = S_{ij} \cos Z_{ij} + \frac{1-K}{2R} (s_{ij} \sin Z_{ij})^2 + a - i \quad (3.1)$$

Bağıntısı ile hesaplanır. Burada;

Z_{ij} : İ istasyon noktasından J noktasına ölçülen düşey açı

S_{ij} : İ istasyon noktasından J noktasına ölçülen eğik uzunluğu;

Δh_{ij} : İ istasyon noktası ile J noktası arasındaki yükseklik farkını

K: atmosferik kırılma katsayısı

R: yer eğrilik yarıçapını

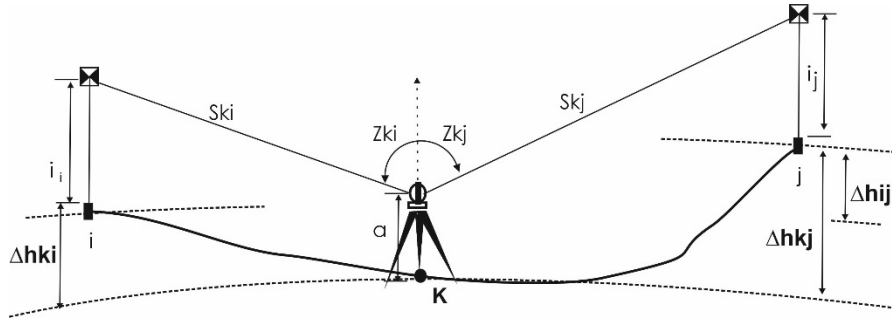
a: alet yüksekliğini

i: işaret yüksekliğini

göstermektedir.

3.2.1.2 Ortadan Trigonometrik Nivelman Tekniği

Ortadan trigonometrik nivelmanın ölçme modeli şekil 3.2’de gösterilmiştir. Bu yöntemde, düşey açı ve uzunluk gözlemleri ortada seçilen uygun bir noktadan yükseklik farkı belirlenecek olan noktalara yapılmaktadır.



Şekil 3.2. Ortadan trigonometrik nivelman

İ ve J noktaları arasındaki yükseklik farkı;

$$\Delta h_{ij} = S_{kj} \cos Z_{kj} - S_{ki} \cos Z_{ki} + \frac{1-K}{2R} \left[(S_{kj} \sin Z_{kj})^2 - (S_{ki} \sin Z_{ki})^2 \right] + i_i - i_j$$

(3.2)

Bağıntısı ile hesaplanır. Burada;

Z_{kj} : k istasyon noktasından j noktasına ölçülen düşey açı

Z_{ki} : k istasyon noktasından i noktasına ölçülen düşey açı

S_{kj} : k istasyon noktasından J noktasına ölçülen eğik uzunluğu

S_{ki} : k istasyon noktasından i noktasına ölçülen eğik uzunluğu;

Δh_{ij} : İ noktası ile J noktası arasındaki yükseklik farkını

K: atmosferik kırılma katsayısı

R: yer eğrilik yarıçapını

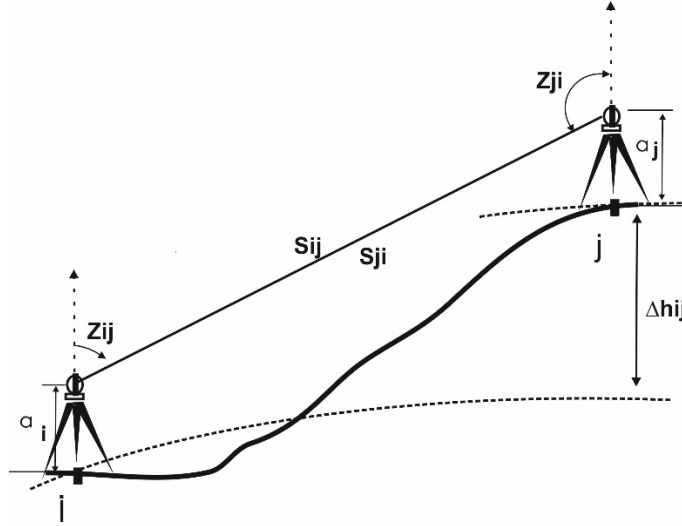
i_i : i noktasındaki işaret yüksekliğini

i_j : j noktasındaki işaret yüksekliğini

göstermektedir.

3.2.1.3 Karşılıklı Trigonometrik Nivelman Tekniği

Karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelmanın ölçüm modeli Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Bu yöntemde, i ve j olmak üzere iki nokta arasındaki yükseklik farkı, her iki noktaya da elektronik takometreler ile eşzamanlı ve karşılıklı gözlenen düşey açı ve uzunluklar ile hesaplanır (Ceylan ve Baykal, 2008).



Şekil 3.3. Karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelman

İ ve J noktaları arasındaki yükseklik farkı;

$$\Delta h_{ij} = \frac{1}{2} \left[S_{ij} (\cos Z_{ij} - \cos Z_{ji}) + \frac{S_{ij}^2}{2R} (\sin^2 Z_{ij} - \sin^2 Z_{ji}) \right] + a_i - a_j \quad (3.3)$$

Bağıntısı ile hesaplanır. Burada;

Z_{ij} : i istasyon noktasından j noktasına ölçülen düşey açı

Z_{ji} : j istasyon noktasından i noktasına ölçülen düşey açı

S_{ij} : i istasyon noktasından J noktasına ölçülen eğik uzunluğu

S_{ji} : j istasyon noktasından i noktasına ölçülen eğik uzunluğu;

Δh_{ij} : İ noktası ile J noktası arasındaki yükseklik farkını

R: yer eğrilik yarıçapını

a_i : i noktasındaki alet yüksekliğini

a_j : j noktasındaki alet yüksekliğini

göstermektedir.

3.2.1.4 Trigonometrik Nivelmanda Doğruluk Analizi

Trigonometrik nivelmanda yükseklik farkları, eğik uzunluklar (S) ve düşey açılar (Z) kullanılarak ile belirlenmektedir. Trigonometrik nivelman ölçülerini etkileyen en önemli hata kaynakları refraksiyon ve yer eğriligi etkisidir. Bu hata etkileri (3.4) bağıntısında gösterildiği gibi hesaplamalarında düzeltme olarak getirilmiştir.

$$\Delta h_{ij} = S_{ij} \cos Z_{ij} + \frac{1-K}{2R} (S_{ij} \sin Z_{ij})^2 + a - i \quad (3.4)$$

Bu bağıntıdaki değişkenler, eğik uzunluk (S), düşey açı (Z), alet (a) ve işaret (i) yüksekliğidir.

Trigonometrik nivelmanın doğruluk analizi için (3.4) bağıntısına hata yayılma kuralı uygulandığında,

$$\sigma_{\Delta h}^2 = \cos^2 Z \cdot \sigma_S^2 + \left(\frac{S \cdot \sin Z}{\rho''} \right)^2 \cdot \sigma_Z^2 + \left(\frac{S^2 \cdot \sin Z^2}{2R} \right)^2 \cdot \sigma_K^2 + \sigma_a^2 + \sigma_i^2 \quad (3.5)$$

elde edilir. Alet, işaret yüksekliklerinin ve refraksiyon'un standart sapmaları sırasıyla $\sigma_a = \sigma_i = \pm 0.3 \text{ mm}$, $\sigma_K = \pm 0.1$ olarak alınabilir (Shen ve ark., 2017); (Milovanovic, 1982). Düşey açı ve uzunluk ölçmelerine ait standart sapmalar sırasıyla $\sigma_Z = \pm 5''$; $\sigma_i = \pm (2+2 \cdot \text{ppm})$ seçilebilir.

Düşey açı, eğik uzunluk ve refraksiyon hatalarının standart sapmaya etkisi, 90-100° arası değişen düşey açılar ve 0-2000m arası değişen uzunluklarda hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 3.1, Tablo 3.2 ve Tablo 3.3'te gösterilmiştir. Bu hesaplamalarda, vadinin her iki yakasında seçilen referans noktalarının yaklaşık aynı yükseklikte seçilmesi nedeniyle düşey açılar için değişim aralığı 90-100° olarak alınmıştır.

Tablo 3.1. Düşey açı ölçme doğruluğunun standart sapmaya etkisi ($\sigma_{\Delta h}^Z$) (mm)

Uzunluk	S=100m	S=250m	S=500m	S=1000m	S=1500m	S=2000m
Düşey açı (°)						
90°	±0.9	±2.3	±4.7	±9.3	±14.0	±18.6
92	0.9	1.9	4.7	9.4	14.0	18.7
94	0.9	1.9	4.7	9.4	14.0	18.8
96	0.9	1.9	4.7	9.4	14.1	18.8
98	0.9	1.9	4.7	9.4	14.1	18.8
100	0.9	1.9	4.7	9.4	14.1	18.9

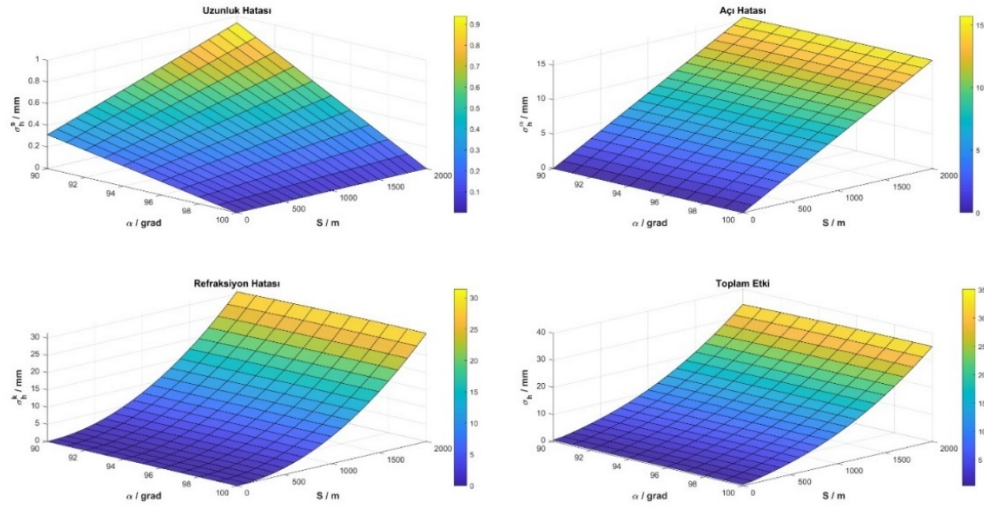
Tablo 3.2. Uzunluk ölçme doğruluğunun standart sapmaya etkisi ($\sigma_{\Delta h}^S$) (mm)

Uzunluk	S=100m	S=250m	S=500m	S=1000m	S=1500m	S=2000m
Düşey açı (°)						
90°	±0,3	±0.4	±0.5	±0.6	±0.8	±0.9
92	0.3	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8
94	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
96	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4
98	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tablo 3.3. Refraksiyon doğruluğunun standart sapmaya etkisi ($\sigma_{\Delta h}^K$) (mm)

Uzunluk	S=100m	S=250m	S=500m	S=1000m	S=1500m	S=2000m
Düşey açı (°)						
90 ^g	0.1	0.5	1.9	7.7	17.2	30.6
92	0.1	0.3	1.9	7.7	17.4	30.9
94	0.1	0.3	1.9	7.8	17.5	31.1
96	0.1	0.3	2.0	7.8	17.6	31.3
98	0.1	0.3	2.0	7.8	17.6	31.4
100	0.1	0.3	2.0	7.9	17.7	31.4

Düşey açı, eğik uzunluk ve refraksiyon hatalarının standart sapmaya etkisi, Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Trigonometrik nivelmanda hata etkileri (1.Senaryo)

Tablo 3,3'te görüldüğü gibi S=250m den daha kısa gözleme uzunluklarında refraksiyon hatasının yükseklik farkının standart sapmasına etkisi 0.3mm 'den küçük olması nedeniyle, kısa uzunluklarda refraksiyon etkisi ihmal edilebilir.

Trigonometrik nivelman ile elde edilen yükseklik farkının ortalama hatası, 90-100^g arası değişen düşey açılar ve 0-2000m arası değişen uzunluklarda hesaplanmıştır (Tablo 3.4).

Tablo 3.4. Trigonometrik nivelmanda yükseklik farkı standart sapmaları ($\sigma_{\Delta h}$) (mm)

Uzunluk	S=100m	S=250m	S=500m	S=1000m	S=1500m	S=2000m
Düşey açı ($^\circ$)						
90	1.1	2.4	5.1	12.1	22.2	35.9
92	1.1	2.0	5.1	12.2	22.4	36.1
94	1.1	2.0	5.1	12.2	22.5	36.3
96	1.0	2.0	5.1	12.2	22.6	36.5
98	1.0	2.0	5.1	12.3	22.6	36.6
100	1.0	2.0	5.1	12.3	22.6	36.6

Daha yüksek doğruluklu robotik Total Stationlar için düşey açı ve uzunluk ölçmelerine ait standart sapmaların sırasıyla $\sigma_Z = \pm 0.5''$ ($1,5^{cc}$); $\sigma_i = \pm(1+1.ppm)$ seçilmesi durumunda, trigonometrik nivelmanın standart sapması düşey açı, eğik uzunluk ve refraksiyon hatalarının standart sapmaya etkisi yeniden hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 3.5, Tablo 3.6, Tablo 3.7 ve Tablo 3.8’de gösterilmiştir.

Tablo 3.5. Düşey açı ölçme doğruluğunun standart sapmaya etkisi ($\sigma^Z_{\Delta h}$) (mm)

Uzunluk	S=100m	S=250m	S=500m	S=1000m	S=1500m	S=2000m
Düşey açı ($^\circ$)						
90 ^g	± 0.2	± 0.6	± 1.2	± 2.3	± 3.5	± 4.7
92	0.2	0.5	1.2	2.3	3.5	4.7
94	0.2	0.5	1.2	2.4	3.5	4.7
96	0.2	0.5	1.2	2.4	3.5	4.7
98	0.2	0.5	1.2	2.4	3.5	4.7
100	0.2	0.5	1.2	2.4	3.5	4.7

Tablo 3.6. Uzunluk ölçme doğruluğunun standart sapmaya etkisi ($\sigma^S_{\Delta h}$) (mm)

Uzunluk	S=100m	S=250m	S=500m	S=1000m	S=1500m	S=2000m
Düşey açı ($^\circ$)						
90 ^g	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.3	± 0.4	± 0.5
92	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4
94	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3
96	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
98	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1
100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

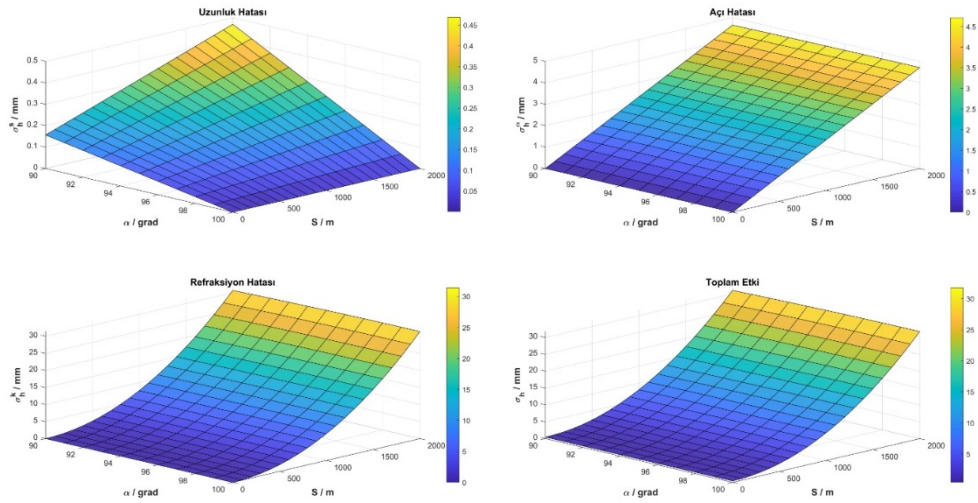
Tablo 3.7. Refraksiyon doğruluğunun standart sapmaya etkisi ($\sigma_{\Delta h}^K$) (mm)

Uzunluk	S=100m	S=250m	S=500m	S=1000m	S=1500m	S=2000m
Düşey açı (°)						
90°	±0.1	±0.5	±1.9	±7.7	±17.2	±30.6
92	0.1	0.3	1.9	7.7	17.4	30.9
94	0.1	0.3	1.9	7.8	17.5	31.1
96	0.1	0.3	2.0	7.8	17.6	31.3
98	0.1	0.3	2.0	7.8	17.6	31.4
100	0.1	0.3	2.0	7.9	17.7	31.4

Tablo 3.8. Trigonometrik nivelmanda yükseklik farkı standart sapmaları ($\sigma_{\Delta h}$) (mm)

Uzunluk	S=100m	S=250m	S=500m	S=1000m	S=1500m	S=2000m
Düşey açı (°)						
90	±0.5	±0.9	±2.3	±8.0	±17.6	±31.0
92	0.5	0.7	2.3	8.1	17.7	31.3
94	0.5	0.7	2.3	8.1	17.9	31.5
96	0.5	0.7	2.3	8.2	17.9	31.6
98	0.5	0.7	2.3	8.2	18.0	31.7
100	0.5	0.7	2.3	8.2	18.0	31.8

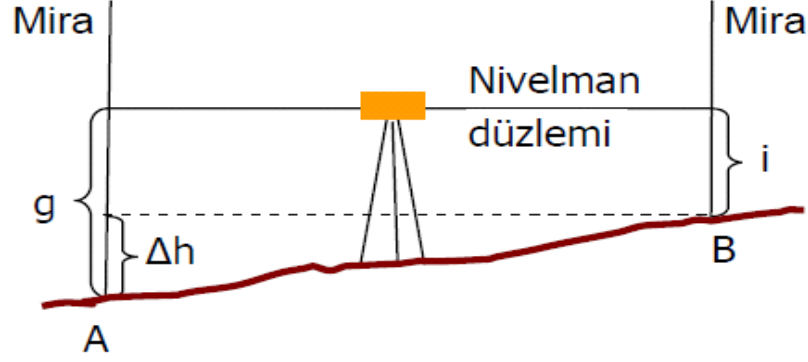
Düşey açı, eğik uzunluk ve refraksiyon hatalarının standart sapmaya etkisi, Şekil 3.5’de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Trigonometrik nivelmanda hata etkileri (2.Senaryo)

3.2.2.Geometrik nivelman tekniği

Geometrik nivelmanın ölçme modeli Şekil 3,6’da gösterilmiştir. Geometrik nivelmanın temel prensibi ölçü yüzeyi üzerinde oluşturulan yatay bir düzlemden olan düşey uzunlukların ölçülmesidir. Yatay düzlem nivo ile oluşturulur iken düşey uzunluklar miralar ile ölçülür.



Şekil 3.6. Geometrik nivelmanın temel prensibi

Şekil 3,6’da görüldüğü gibi gidiş yönüne göre, geri doğrultuda kalan nokta “geri nokta”, ileri doğrultudaki nokta “ileri nokta” olarak isimlendirilir. Geri noktada okunan mira okuması “g”, ileri noktada okunan mira okumasına “i” denilirse, İ ve J noktaları arasındaki yükseklik farkı;

$$\Delta h_{ij} = g - i \quad (3.5)$$

olur. A ve B gibi iki sabit nokta arasındaki yükseklik farkı, ölçme modelinin n kez uygulanması ile hesaplanır.

$$\Delta H_{AB} = \Delta h_{i,1} + \Delta h_{1,2} + \dots + \Delta h_{n-1,j} = \sum \Delta h = \sum g - \sum i \quad (3.6)$$

Geometrik nivelmanda ölçü kontrolünü sağlamak için gidiş ve dönüş olarak yapılır. Gidiş ölçüleri (G), dönüş ölçüleri (D) ile gösterilirse;

$$\Delta H_{AB} = \Delta H_G = \sum \Delta h_G = \sum g_G - \sum i_G \quad (3.7)$$

$$\Delta H_{BA} = \Delta H_D = \sum \Delta h_D = \sum g_D - \sum i_D$$

yazılır. A ve B noktaları arasındaki ortalama yükseklik farkı;

$$\Delta H_{AB} = \frac{\Delta H_G - \Delta H_D}{2} \quad (3.8)$$

şeklinde hesaplanır.

Geometrik nivelman ölçmelerini etkileyen hatalar yükseklik farklarını, nokta yüksekliklerini ve yükseklik doğruluğunu etkilemektedir. Geometrik nivelmanda hata kaynakları aletsel hatalar ve dış ortamdan kaynaklanan hatalar olarak iki grupta ele alınır.

Aletsel hatalar, nivo ve miradan kaynaklanan hatalardır. Nivolardan kaynaklanan hatalar;

- Küresel düzeç eksen şartının düzensizliği
- Nivo gözleme ekseni şartı düzensizliği
- Kompansatörlü nivolarda artık kompensasyon hatası

olarak sıralanabilir (Banger, 1981(a); Ceylan, 1988; Baykal, 1988; Pelzer, 1983) .

Küresel Düzeç Eksen Şartının Düzensizliği Hatası; Nivolarda küresel düzeç eksen şartı, “küresel düzeç eksen düzlemi aletin düşey dönme eksenine dik olmalıdır.” şeklinde ifade edilir. Bu şart düzensiz olursa, küresel düzeç kabarcığı ortalandığı zaman asal eksen düşey kılınamaz; asal eksenin düşeyden ayrılması sistematik karakterdedir; diğer bir deyişle düşeyden ayrılmanın yönü ve büyüklüğü daima aynı kalır. Sonuç olarak küresel düzeç eksen şartının düzensizliği bir tesviye hatası doğurur (Banger, 1981(a); Ceylan, 1988).

Nivo Gözleme Ekseni Şartı Düzensizliği; Nivoda silindirik düzeç veya kompensatör ile gözleme ekseni arasında belirli bir şartın bulunması gerekir. Söz konusu şart nivo gözleme ekseni şartıdır ve yataylığı sağlayan donanımlara bağlı olarak değişik şekilde ifade edilir.

- Silindir düzeçli nivolarda silindir düzeç ekseni nivo gözleme eksenine paralel olmalıdır.
- Kompansatörlü nivolarda “küresel düzeç ortalandığında kompensatör alet yatayına karşılık olan gözlemeyi sağlamalıdır.”

Bu şartları taşımayan aletlerle yapılan ölçmelerdeki mira okumaları eğik gözleme doğrultusunda yapılmış olur ve düzenli bir hata etkisi taşırlar (Baykal, 1988; Pelzer, 1983).

Artık Kompensasyon Hatası: Sayısal nivo da kompensatörlü bir nivodur. Nivodaki kompensatör belli bir düzeçleme aralığında çalışmakta olup, yeterli hassasiyette küresel düzeç ayarı yapılamadığı takdirde kompensatör devreye girmeyecektir. Bu nedenle hatalı ölçüm yapılacaktır. (Baykal, 1988).

Geometrik nivelmanda yükseklik farklarının ölçeklendirilmesi miralar ile yapılmaktadır. Bu nedenle miralardan kaynaklanan hataların ölçülere etkisi önemlidir. Miralardan kaynaklanan hatalar aşağıdaki şekilde sıralanabilir (Banger, 1981 (a); Ceylan, 1988; Baykal, 1988; Pelzer, 1983).

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

Miranın eğik tutulması hatası: Nivelman çalışmalarında miraların tam düşey konumda tutulması gerekir. Ancak pratik uygulamalarda ise mira üzerindeki küresel düzeç eksen şartının düzensizliği, rüzgârın etkisi, miracının yorgunluğu ya da dikkatsizliği gibi çeşitli etkenler mirayı düşey doğrultudan saptırabilir. Miranın eğik olması her mira okumasında işareti daima pozitif olan bir hatanın oluşmasına neden olur. Bu hata miraların küresel düzeçlerinin düzenli kontrolü ile azaltılabilir (Banger, 1981 (a); Baykal, 1988; Pelzer, 1983).

Mira çifti sıfır konum hatası: Mira üzerindeki bölümlendirme çizgilerinin sıfır çizgilerinin farklı olması veya mira tabanlarında zamanla oluşan aşınma farklılıkları, miraların taban uzunluklarının değişmesine ve dolayısıyla ölçülerde hataya neden olabilir. Alet kurulma sayısı çift alınması durumunda bu hata etkisiz hale getirilebilir. (Baykal 1988; Ceylan, 1988) .

Mira tabanının düzlem olmaması hatası: Nivelman çalışmalarında kullanılan miraların tabanı düz bir yapıya sahip olmalıdır. Tabanın düzgün olmaması halinde nivelman ölçüleri sırasında mira tabanını rasgele konulması değişken sıfır konum hatasını ortaya çıkarır. Bu nedenle, mira tabanının düzlüğü mutlaka kontrol edilmelidir. Ayrıca ölçüm tutarlılığı için mira, mira altlığı üzerine her seferde aynı noktada tutulmalıdır. (Banger, 1981 (a); Pelzer, 1983) .

Mira bölümlendirme hatası: Mira üzerindeki bölüm çizgilerinin standart uzunluk birimlerinden sapması, mira bölümlendirme hatasını oluşturur. Bu hatanın ölçülere etkisi önemsiz kılmanın en güvenilir yolu her bir mira bölüm çizgisine ait bölümlendirme hatasının belirlenmesi ve mira okumalarının düzeltilmesidir.

Nivelman ölçülerinde dış ortam koşullarında meydana gelen fiziksel parametrelerdeki değişmeler ölçümlerin doğruluğunu olumsuz etkileyerek çeşitli hatalara neden olur. Bu hatalar aşağıdaki gibi sıralanabilir (Banger, 1981 (a); Ceylan, 1988; Baykal, 1988).

- Yer eğriliğinin etkisi
- Nivo ve miranın çökmesi
- Sıcaklığın etkisi
- Geomağnetik alanın kompensatörlü nivoya etkisi
- Refraksiyon hatası

Yer eğriliğinin etkisi: Yerin küreselliğinden kaynaklanan hata, yükseklik farklarına düzeltme olarak getirilerek veya ölçü anında geri ve ileri gözleme uzunluklarının eşit alınmak suretiyle giderilebilir (Ceylan, 1988; Pelzer, 1983).

Nivo ve miranın çökmesi: Nivelman ölçmelerinde aletin kurulduğu veya miraların tutulduğu zeminin fiziksel özellikleri, istasyon noktalarındaki ölçme ve istasyon noktası değiştirmede kullanılan mira tipi veya uygulanan gözlem sırasına bağlı olarak nivo ve miralar düşey yönde hareket edebilir. Bu düşey hareketlerin tamamı çökme hatasını oluşturur. Çökme hatasının ölçme sonuçlarına etkisini azaltmak için miralar mümkün olduğunca sabit ve sert zeminlere tutulmalı, ayrıca ölçüler mümkün olduğunca hızlı yapılmalıdır (Banger, 1981(a); Pelzer, 1983).

Sıcaklığın etkisi: Sıcaklık değişimlerine bağlı olarak cisimler boyut değiştirirler. Bu durum nivolardaki optik eksenini etkiler. Bu etki iki grup altında incelenir.

- Çevre sıcaklığındaki hızlı değişimini etkisi
- Güneş ışığının nivoya tek yönlü ve doğrudan gelmesinin etkisi

Hızlı sıcaklık değişimleri nivo gözleme doğrultusunda eğikliğe neden olur. Geri ve ileri gözleme uzaklıkları eşit alınması durumunda sapma açısı her iki yönde aynı olur ve etki kendiliğinden ortadan kalkar.

Güneş ışığının nivoya tek yönlü ve doğrudan gelmesi nivo gözleme doğrultusunu etkiler. Bu etki gözleme doğrultusu ile güneş ışığının doğrultusu arasındaki farka bağlıdır. Sıcaklığın etkisini azaltmak için nivo bir şemsiye ile korunur ve ölçüler hızlıca yapılır (Banger, 1981 (a); Ceylan, 1988; Baykal, 1988; Pelzer, 1983).

Geomağnetik alanın kompensatörlü nivoya etkisi: Kompensatörlü nivolarda bulunan sarkaç salınımı gravite etkisiyle düşey doğrultuda denge konumuna gelir. Nivo gözleme eksenini sarkaç ile dik açı yapacak şekilde bağlanmıştır. Bunun anlamı ise diğer hatalar ihmal edilerek gözleme eksenini tam olarak yataylanır. Fakat sarkaç gravite etkisiyle birlikte geomağnetik alandan da etkilenir . Bu ise kompanstörün hata yapmasına neden

olur. Hatanın büyüklüğü ve yönü kompanstörün yapısına ve yapısını oluşturan materyalin özelliklerine bağlıdır. Geomağnetik alanın yatay bileşeni ile nivonun gözleme doğrultusu paralel olduğunda sapma maksimum olur . Bu hatadan etkisiz hale getirmenin en etkili yolu geomağnetik alanda etkilenmeyen (nonmağnetik) kompansatörlü nivolar kullanılır (Baykal, 1988; Pelzer, 1983).

Refraksiyon hatası: Nivelman sırasında gözleme ışını farklı kırılma indislerine sahip atmosfer tabakalarından geçerken bilinen kırılma kanunlarına bağlı olarak ışın yolu eğrilerek nivoya ulaşır. Düz bir nivelman hattında refraksiyonun etkisi tüm mira okumalarında yaklaşık aynı büyüklüktedir. Dolayısıyla yükseklik farkının bu hatalardan etkilenmesi rasgele özelliği taşır. Sabit eğimli arazilerde ise nivelman kenarında yapılan ölçmelerde yere yakın mira okumaları yerden uzakta olanlara göre refraksiyon hatasından çok daha fazla etkilenir. Bu nedenle büyük ölçüde hata birikimi oluşur. pratik uygulamalarda ölçülere sonradan hesapla düzeltme getirme yerine dönüş ölçüleri sıcaklığın düşey dağılımının ters işaretli olduğu farklı atmosfer koşullarında yapılarak bu hata giderilmektedir. Hatanın en aza indirilebilmesi için 500mm altında mira okuması yapılmaması ve ölçmelerin, sıcaklığın düşey değişiminin az olduğu saatlerde güneşin doğuşundan 2 saat sonra ve güneşin batımından 2 saat önceki saatlerde yapılması önerilir (Banger, 1981(a)).

3.2.3.Barometrik nivelman tekniği

Barometrik nivelman, farklı noktalar arasındaki yükseklik farkını, bu noktalardaki atmosfer basınç değerlerini karşılaştırarak belirleyen bir yöntemdir. Yöntemin temelinde, deniz seviyesinden yukarı çıkıldıkça atmosfer basıncının azaldığı fiziksel esasına dayanır. Ölçümler genellikle hassas barometre veya altimetre ile yapılır ve basınç farkı yükseklik farkına dönüştürülür. Ancak sıcaklık, nem ve hava durumu gibi meteorolojik faktörler ölçümlerde önemli sapmalara neden olabileceğinden, bu etkiler için düzeltmeler uygulanması gerekir (Ceylan, 1988; Baykal, 1988; Pelzer, 1983).

Hızlı ölçüm yapılabilmesi ve az ekipman gerektirmesi yöntemin avantajları arasındadır. Buna karşın, özellikle kısa mesafelerde ve değişken hava koşullarında hata payı yükselir. Bu nedenle barometrik nivelman, yüksek doğruluk gerektiren mühendislik çalışmalarından ziyade, ulaşımı zor bölgelerde veya ön keşif çalışmalarında tercih edilir (Wolf ve Ghilani, 2012).

3.2.4. GNSS Nivelman Tekniği

GNSS nivelman, yeryüzündeki noktaların yüksekliğini uydu konumlama teknolojisi ile belirleyen modern güncel bir ölçme yöntemidir. Klasik geometrik veya trigonometrik nivelman yöntemlerinde olduğu gibi optik ölçü aletleri yerine, GNSS alıcıları kullanılarak uydulardan gönderilen sinyallerin faz ve kod ölçümleri değerlendirilir (Albayrak ve ark., 2020). Bu yöntem, ölçüm yapılan noktanın üç boyutlu kartezyen koordinatlar (X, Y, Z) yardımıyla elipsoidal yükseklikler (h) elde edilmektedir.

GNSS ölçümleri sonucunda elde edilen elipsoidal yükseklik, mühendislik çalışmalarında doğrudan kullanılamaz. Bilindiği üzere topografik harita üretiminde ve mühendislik projelerinde ortometrik yükseklik (H) tercih edilmektedir. Bu nedenle, GNSS'ten elde edilen elipsoidal yüksekliklerin ortometrik yüksekliklere dönüştürülmesi gerekir (Şekil 3.7). (Hofmann-Wellenhof ark., 2008). Temel dönüşüm formülü şu şekildedir:

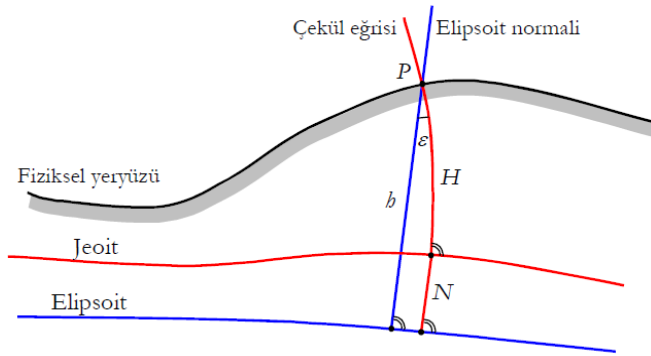
$$H = h - N$$

$H \rightarrow$ Ortometrik yükseklik (m)

$h \rightarrow$ Elipsoidal yükseklik (GNSS ile ölçülen, m)

$N \rightarrow$ Jeoit ondülasyonu (m)

Jeoit ondülasyonu, global veya bölgesel jeoit modellerinden elde edilir. Modelin doğruluğu, ortometrik yükseklik hesaplarının doğruluğunu doğrudan etkilemektedir (Featherstone, 2001).



Şekil 3.7. Elipsoidal yükseklik (h) ve ortometrik yükseklik (H)

GNSS Nivelmanın Avantajlar;

- Geniş alanlarda hızlı yükseklik belirleme imkânı
- Ulaşımı zor bölgelerde kolay ölçüm yapılabilmesi

- Klasik yöntemlere göre daha az personel ve ekipman gereksinimi
- Gece-gündüz ve farklı hava koşullarında çalışma olanağı

Dezavantajlar ve Hata Kaynakları

- Jeoit model hatalarının yükseklik hesaplarını doğrudan etkilemesi
- Atmosferik gecikmeler (iyonosfer ve troposfer), uydu geometrisi (GDOP) ve çok yollu sinyal (multipath) etkileri
- Yüksek hassasiyet için diferansiyel GNSS (DGNSS) veya sürekli izleme istasyonları (CORS) ağlarıyla çalışılması gerekliliği (Hofmann-Wellenhof ark., 2008)

Kullanım Alanları

- Altyapı projelerinin yükseklik kontrolü
- Hidrografik ölçmelerde derinlik referansının belirlenmesi
- Deformasyon ve yer hareketlerinin izlenmesi
- Fotogrametri ve uzaktan algılama projelerinde yer kontrol noktalarının yüksekliğinin belirlenmesi (Gunter, 2003)

4. UYGULAMA

Bu bölümde, çalışmanın amacına uygun olarak belirlenen uygulama alanı tanıtılmış, gerçekleştirilen arazi çalışmaları açıklanmış ve elde edilen bulgular ile bunlara ilişkin değerlendirmelere yer verilmiştir.

4.1.Uygulama Alanı

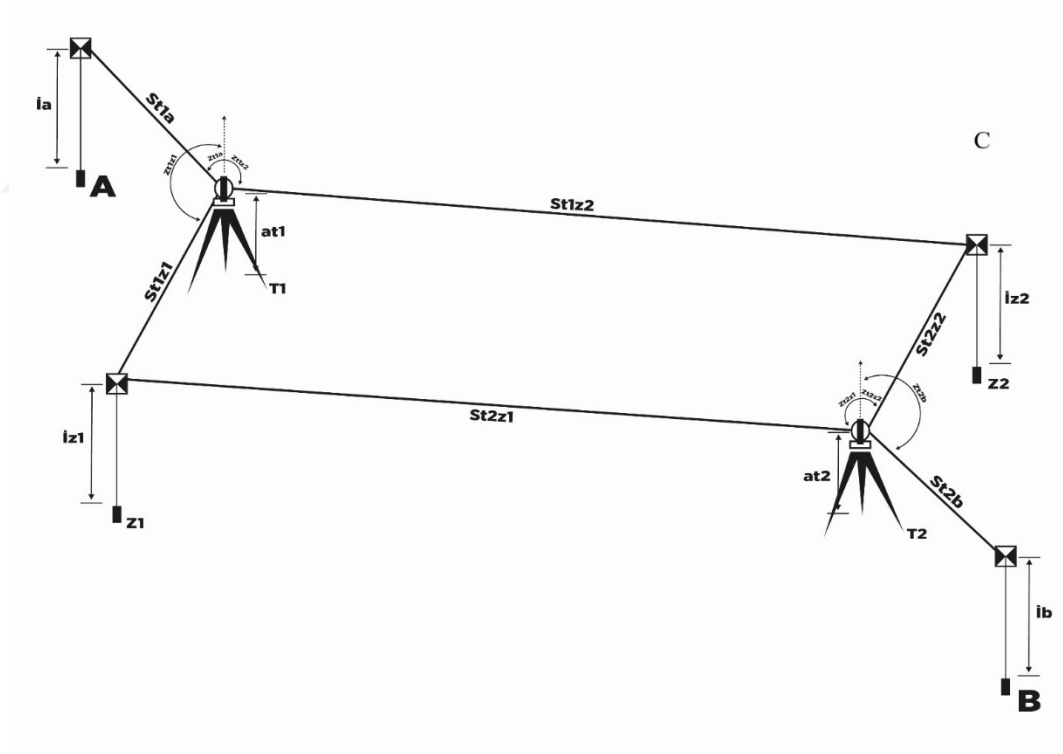
Bu çalışma kapsamında GNSS Destekli Trigonometrik Nivelman ile Vadi Geçişi Nivelmanı performansını değerlendirebilmek amacıyla bir uygulama alanı seçilmiştir. Yaklaşık koordinatları $37^{\circ}50'25.4''N$ $34^{\circ}27'17.1''E$ olan uygulama alanı Niğde İli Bor ilçesi , Niğde Bor Sanayisi karşısı olarak belirlenmiştir (Şekil 4.1). Bu uygulama alanının seçilme nedeni, alanın topoğrafik ve çevresel özelliklerinin yükseklik belirleme yöntemlerinin karşılaştırılmasına elverişli olmasıdır. Bölge, yer yer eğimli arazi yapısı ve açık görüş imkânı sunan geniş alanlarıyla geometrik, trigonometrik ve GNSS Destekli Trigonometrik Nivelman tekniklerinin birlikte uygulanmasına uygun koşullar sağlamaktadır. Bu uygulama alanında belirlenen noktalar arası yükseklik farkları GNSS Destekli Trigonometrik Nivelman, klasik trigonometrik nivelman ve geometrik nivelman teknikleri ile ayrı ayrı belirlenmiş ve bu nivelman tekniklerinin sonuçları, avantaj ve dezavantajları ortaya konmuştur.



Şekil 4.1 Uygulama Alanı

4.2.Nokta Yerleri Seçimi

Bu çalışma kapsamında, uygulama alanında farklı uzunluklarda olmak üzere üç adet kontrol noktası belirlenmiştir. Noktalar, vadinin her iki yamacında konumlandırılmıştır. A ve B noktaları arasındaki uzaklık yaklaşık 1500 m, B ve C arası 100 m, A ve C arası ise 1400.m dir. Her iki yaka üzerinde aletlerinin kurulacağı noktalar, benzer zemin özelliklerine sahip, birbirini gören açık yerlerde seçilmesine özen gösterilmiştir. Uygulama alanının topografyası genel olarak düz bir yapıya sahiptir. Noktaların yer seçiminde, yükseklik belirleme yöntemlerinin etkin bir biçimde uygulanabilmesi adına, her bir noktanın kendisinden önceki ve sonraki noktaları doğrudan görebilecek görüş hattına sahip olması dikkat edilmiştir. Ölçümlerin su yüzeyi üzerinden yapılacağı durumlar göz önünde bulundurularak, seçilen noktaların su seviyesine olan yüksekliklerinin birbirine yakın olmasına da özen gösterilmiştir.



Şekil.4.2. A, ve B noktaları

4.3. Eş Zamanlı Dış Merkezli Trigonometrik Nivelman

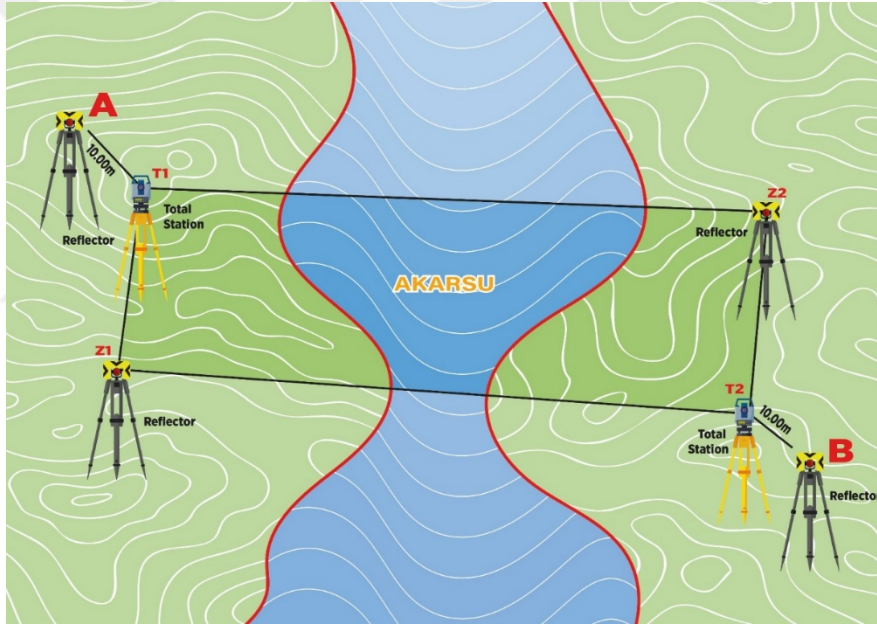
Karşılıklı ve eş zamanlı trigonometrik nivelman, iki nokta arasında iki yönlü (karşılıklı) ve eş zamanlı ölçümler yapılarak atmosferik kırılma ile alet kaynaklı hataların etkisini minimize etmeyi amaçlayan bir tekniktir. Bu yöntemle noktalar arası yapılan ölçümler karşılaştırılır, aritmetik ortalaması alınır ve bu sayede sistematik hatalar önemli ölçüde azaltılır.

Özellikle uzun mesafeli görüşlerde, yer eğriliği, atmosferik kırılma (refraksiyon) ve alet eksen hatası gibi hatalar ölçüm doğruluğunu olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Düşey açıların karşılıklı ve eşzamanlı olarak ölçülmesi, bu tür hataların en aza indirilmesi ve daha güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. (Kavanagh ve Slattery, 2009).

Eş zamanlı Trigonometrik Nivelman ölçmelerinde, yer eğriliği ve atmosferik kırılma hatalarının en aza indirilmesini ve yükseklik farklarının daha güvenilir ve tutarlı biçimde hesaplanmasında iki adet Spectra Focus 8 Total Station ve ekipmanları kullanılmıştır. Spectra Focus 8 Total Station, entegre Windows CE tabanlı bir işletim sistemiyle çalışmakta; kolay kullanıma sahip bir arayüz ve detaylı grafiksel veri sunumu sağlayan dokunmatik ekranla donatılmıştır. Bluetooth ve USB bağlantı seçenekleri ile veri aktarımı kolaylaştırılmış, dahili hafıza kapasitesi genişletilerek uzun süreli saha çalışmalarında veri saklama imkânı sağlanmaktadır. Spectra Focus 8 Total Station, yatay ve düşey açı ölçümleri ile birlikte eğik mesafe ölçümünü entegre olarak gerçekleştirebilen, yüksek hassasiyetli bir elektronik ölçme aletidir. Cihaz, 30x büyütme gücüne sahip teleskobu, $\pm 5''$ açı ölçüm doğruluğu ve $\pm(2 + 2 \text{ ppm})$ düzeyinde uzunluk ölçme doğruluğu ile mühendislik ölçmelerinde güvenilir sonuçlar sunmaktadır.



Şekil 4.3. Spectra Focus 8 Total Station ve Hedef Levhası ([URL 1](#), [URL 2](#))



Şekil 4.4 A ve B noktaları arasındaki ölçme modeli

Şekil 4.4’de ise, bu çalışmada önerilen trigonometrik nivelman yöntemine ait ölçme modeli şematik olarak gösterilmektedir.

A ve B referans noktaları arasındaki yükseklik farkı; üç parça şeklinde (Δh_{AZ1} , Δh_{Z1Z2} , Δh_{Z2B}) hesaplanır.

1) A noktasından Z1’e olan yükseklik farkı:

T₁ istasyon noktasından A ve Z1’e olan uzunluklar 10 m’den daha küçük olduğu için bağıntısındaki refraksiyon ve yer eğriliği terimi ihmal edilerek A ile Z1 arasındaki yükseklik farkı (Δh_{AZ1}) aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\Delta h_{A,Z1} = \Delta h_{T_1,Z1} - \Delta h_{T_1,A} = (s_{T_1,Z1} \cos Z_{T_1Z1} + a_{T_1} - i_{Z1}) - (s_{T_1,A} \cos \alpha_{T_1A} + a_{T_1} - i_A) \quad (4.1)$$

S; eğik uzunluğu, Z; düşey açıyı, a; alet yüksekliğini ve i; işaret yüksekliğini göstermektedir. A ve Z1 noktasındaki işaret yüksekliklerinin ($i_A=i_{Z1}$) eşit alınması durumunda, yükseklik farkı;

$$h_{AZ1} = h_{T1,Z1} - h_{T1,A} = s_{T1,Z1} \cos Z_{T1Z1} - s_{T1,A} \cos Z_{T1A} \quad (4.2)$$

bağıntısı ile hesaplanır.

2) Z2 istasyon noktasından B'ye olan yükseklik farkı:

T2 istasyon noktasından B ve Z2 dış merkez noktaya olan uzunluk 10 m'den daha küçük olduğu için (4.2) bağıntısına benzer şekilde, Z2 ile B arasındaki yükseklik farkı;

$$h_{Z2,B} = h_{T2,B} - h_{T2,Z2} = s_{T2,B} \cos Z_{T2B} - s_{T2,Z2} \cos Z_{T2Z2} \quad (4.3)$$

bağıntısı ile hesaplanır.

3) Z1-Z2 arasındaki yükseklik farkı:

Z1 ile Z2 arasındaki yükseklik farkı ($h_{Z1,Z2}^{T1}$); Şekil 4.4'de görülen paralel kenar ağında, iki ayrı ölçüm hattında hesaplandıktan sonra, bunların ortalaması alınarak kesin değer hesaplanır. T1'deki bir Total Station ile ölçülen Z1-Z2 arasındaki yükseklik farkı ($h_{Z1,Z2}$);

$$h_{Z1,Z2}^{T1} = h_{T1,Z2} - h_{T1,Z1} \quad (4.4)$$

Eşitlik (4.4)'te $h_{T1,Z2}$ ve $h_{T1,Z1}$ yükseklik farklarından elde edilir. T1-Z1 mesafesi 10 m'den kısa olduğundan kırılma ve yer eğriliği etkileri bu kısımda ihmal edilir; bu etkiler sadece T1-Z2 arasındaki farkın hesabında dikkate alınır

$$\begin{aligned} h_{T1,Z1} &= s_{T1,Z1} \cos Z_{T1,Z1} \\ h_{T1,Z2} &= s_{T1,Z2} \cos Z_{T1,Z2} + \frac{1-K_{T1Z2}}{2R} (s_{T1,Z2} \sin Z_{T1,Z2})^2 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Burada K, atmosferik kırılma katsayısını ve R, yerin ortalama yarıçapını km cinsinden ifade eder. Eşitlik (4.5)'i bağıntı (4.4)'de yerine koyduğumuzda, T1 noktasındaki bir Total Station ile ölçülen Z1 ile Z2 arasındaki yükseklik farkı şu şekilde gösterilir:

$$h_{Z1,Z2}^{T1} = s_{T1,Z2} \cos Z_{T1,Z2} - s_{T1,Z1} \cos Z_{T1,Z1} + \frac{1-K_{T1Z2}}{2R} (s_{T1,Z2} \sin Z_{T1,Z2})^2 \quad (4.6)$$

T2 noktasındaki Total Station ile Z1-Z2 yükseklik farkı, T1'deki hesaplama benzer şekilde;

$$h_{Z1,Z2}^{T2} = s_{T2,Z2} \cos Z_{T2,Z2} - s_{T2,Z1} \cos Z_{T2,Z1} - \frac{1-K_{T2Z1}}{2R} (s_{T2,Z1} \sin Z_{T2,Z1})^2 \quad (4.7)$$

yazılır.

Eşitlikler (4.6) ve (4.7) göre, Z1 ile Z2 arasındaki nihai yükseklik farkı, $h_{T1 Z1,Z2}$ ve $h_{T2 Z1,Z2}$ 'nin aritmetik ortalamasıdır.

$$h_{Z1,Z2} = \frac{1}{2}(s_{T2,Z2} \cos Z_{T2,Z2} - s_{T1,Z1} \cos Z_{T1,Z1} + s_{T1,Z2} \cos Z_{T1,Z2} - s_{T2,Z1} \cos Z_{T2,Z1}) + M \quad (4.8)$$

$$\text{Burada } M = \frac{1-K_{T1,Z2}}{4R} (s_{T1,Z2} \sin Z_{T1,Z2})^2 - \frac{1-K_{T2,Z1}}{4R} (s_{T2,Z1} \sin Z_{T2,Z1})^2$$

Daha sonra, işaret levhaları A ve B arasındaki yükseklik farkı, Eşitlik (4.2), (4.3) ve (4.8) kullanılarak A ile B arasındaki yükseklik farkı;

$$h_{A,B} = (s_{T2,B} \cos Z_{T2,B} - s_{T1,A} \cos Z_{T1,A}) + \frac{1}{2}(s_{T1,Z1} \cos Z_{T1,Z1} - s_{T2,Z2} \cos Z_{T2,Z2}) + \frac{1}{2}(s_{T1,Z2} \cos Z_{T1,Z2} - s_{T2,Z1} \cos Z_{T2,Z1}) + M \quad (4.9)$$

bağıntısı ile elde edilir.

Uygulamada, karşılıklı ve eşzamanlı trigonometrik nivelman ölçmelerinde simetrik bir ölçüm geometrisi oluşturulması amaçlanmaktadır. Bu nedenle, T1 noktasından Z2 noktasına yapılan görüş ile T2 noktasından Z1 noktasına yapılan görüş paralel kabul edilmekte ve buna bağlı olarak T1–Z2 ile T2–Z1 doğrultularındaki ölçülen uzunluklar yaklaşık olarak eşittir. Ayrıca, vadinin her iki tarafındaki tüm cihazlar, sıcaklık farklarına bağlı olarak oluşan hava dalgalanmaları ve bitki örtüsünün etkilerini azaltmak ve atmosferik kırılmanın stabil olmasını sağlamak amacıyla vadi yüzeyinin 5 ila 10 m üzerinde yerleştirilmelidir. Bunun yanı sıra, Total Station'dan karşı vadi kıyısındaki hedefe olan düşey açı, karşılıklı gözlem görüşünün aynı koşulda kalmasını sağlamak için 18° 'dan fazla olmamalıdır. Yukarıda açıklamalara dayanarak, karşılıklı gözlemler için atmosferik kırılma katsayıları yaklaşık olduğu varsayılarak (4.9) bağıntısındaki atmosferik etkisi terimi (M), ihmal edilebilir. Sonuç olarak, pratikte işaret levhaları A ve B arasındaki yükseklik farkı;

$$h_{A,B} = (s_{T2,B} \cos Z_{T2,B} - s_{T1,A} \cos Z_{T1,A}) + \frac{1}{2}(s_{T1,Z1} \cos Z_{T1,Z1} - s_{T2,Z2} \cos Z_{T2,Z2}) + \frac{1}{2}(s_{T1,Z2} \cos Z_{T1,Z2} - s_{T2,Z1} \cos Z_{T2,Z1}) \quad (4.10)$$

bağıntısı ile hesaplanır (Yang ve Zou, 2021).

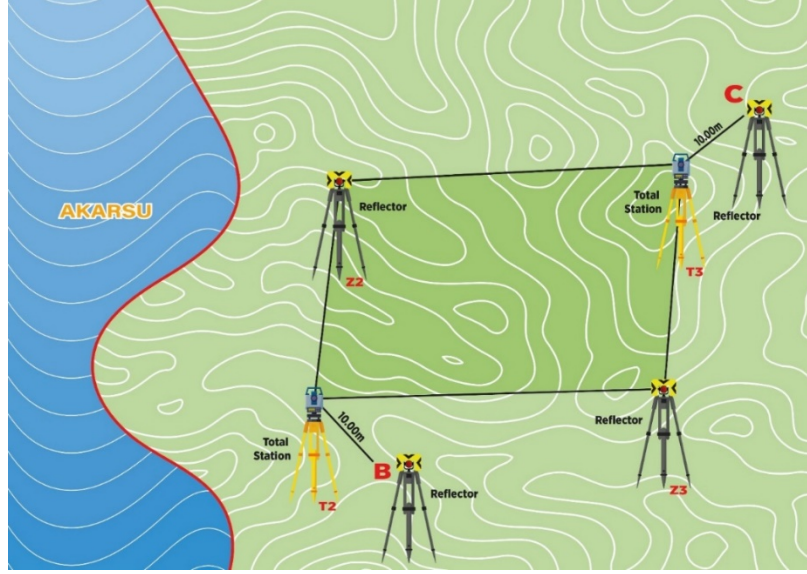
4.3.1 Düşey açı ve uzunluk ölçmeleri

4.3.1.1 Düşey açı ölçmeleri:

A ve B referans noktaları arasındaki düşey açı gözlemleri Şekil 4.4’de gösterilen ölçme modeline göre aşağıda açıklandığı şekilde gerçekleştirilmiştir.

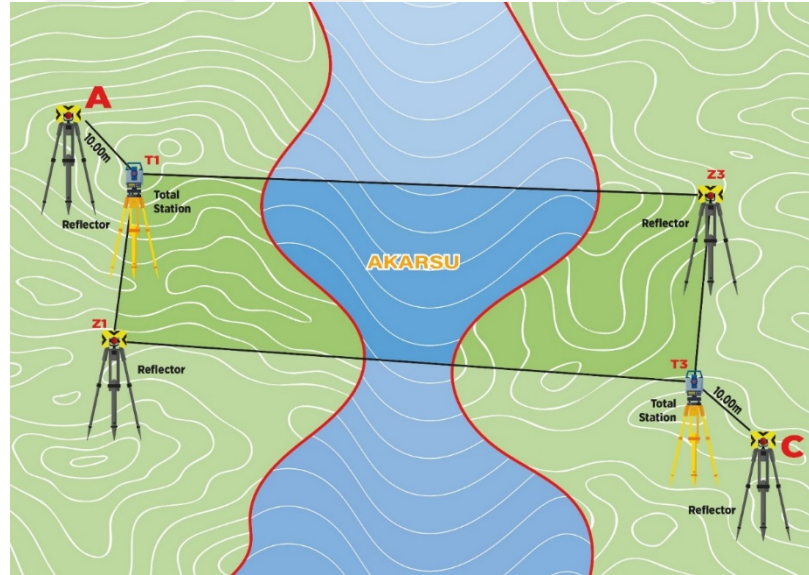
Reflektörler jalonet yardımıyla A ve B referans noktalarına düşey olarak yerleştirildikten sonra, Total Station aletleri T1 ve T2 noktalarına merkezlenip ölçüye hazır hale getirilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken iki husus vardır. Birincisi A ve B referans noktalarındaki reflektör yükseklikleri eşit alınmasıdır. İkincisi ise düşey açı ölçmelerinde alet kırılması ve atmosferik kırılma terimlerinin mesafeye bağlı olarak büyümesi nedeniyle T1 noktası ile A referans noktası ve Z1 noktası arasındaki uzaklıkların 10 metreden daha kısa olmasıdır. Aynı şekilde T2 noktasındaki bir Total Station’dan B referans noktasına ve Z2 dış merkez noktasına olan uzaklıkların 10 metreden fazla olmamasına dikkat edilmiştir. İlk olarak, T1 noktasındaki Total Station ile A noktasındaki, T2 noktasındaki Total Station ile de B noktasındaki hedef levhalarında 10 silsile düşey açı gözlemleri yapılmıştır, Daha sonra, T1 noktasından Z2 noktasındaki hedef levhasına ve T2 noktasından Z1 noktasındaki hedef levhasına yönelik düşey açı gözlemleri eş zamanlı olarak 10 silsile şeklinde gerçekleştirilmiştir. Düşey açı gözlemlerinin 10 silsile olarak planlanmasının temel amacı, ölçülerin rastgele hatalardan arındırılması ve ölçüm güvenilirliğinin artırılmasıdır. Aynı hedeflere yönelik olarak yapılan çoklu gözlemler sayesinde, her bir silsilede oluşabilecek tesadüfi hatalar istatistiksel olarak dengelenmekte; gözlemlerin aritmetik ortalaması alınarak daha güvenilir ve tutarlı düşey açı değerleri elde edilmektedir.

B ve C referans noktaları arasındaki düşey açı gözlemleri ise Şekil 4.5’de gösterilen ölçme modeline göre yukarıda açıklanan hususlara da dikkat edilerek benzer şekilde T2 ve T3 noktasına merkezlenen Total Stationlar ile Z2 ve Z3 noktalarındaki hedef levhalarında 10 silsile şeklinde yapılmıştır.



Şekil 4.5. B ve C Noktaları Arasındaki Ölçme Modeli

A ve C referans noktaları arasındaki düşey açı gözlemleri ise Şekil 4.6'de gösterilen ölçme modeline göre ve yukarıda açıklanan hususlara da dikkat edilerek benzer şekilde T1 ve T3 noktasına merkezlenen Total Stationlar ile Z1 ve Z3 noktalarındaki hedef levhalarında 10 silsile şeklinde yapılmıştır.



Şekil 4.6 A ve C Noktaları Arasındaki Ölçme Modeli

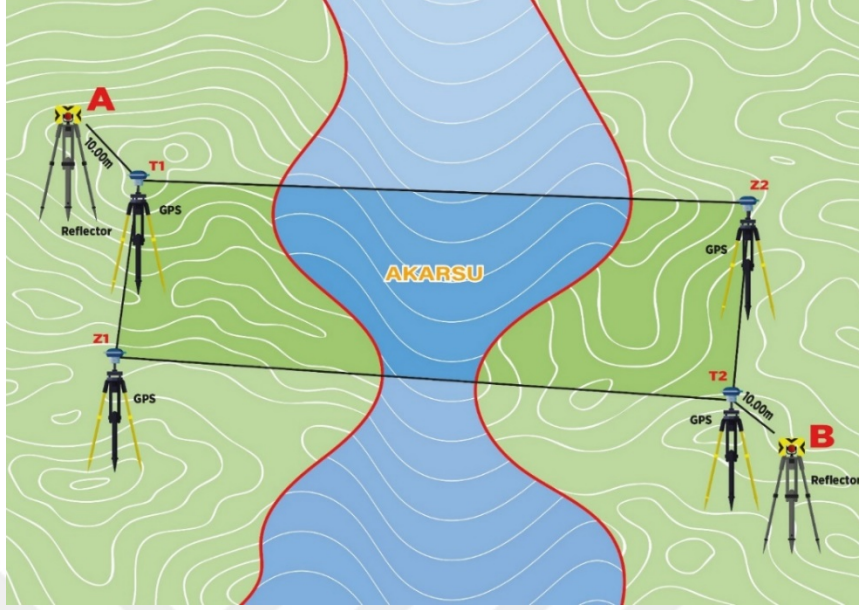
4.3.1.2 Uzunluk ölçmeleri

Bu çalışmada kullanılan eğik uzunluklar iki şekilde belirlenmiştir. Bunlardan birincisi, klasik trigonometrik nivelmanda olduğu gibi şekil 4.3’ de gösterildiği şekilde hedef levhalarının merkezine monte edilmiş olan tekli reflektörlerde düşey açılar ile birlikte 10 kez ölçülmüştür.

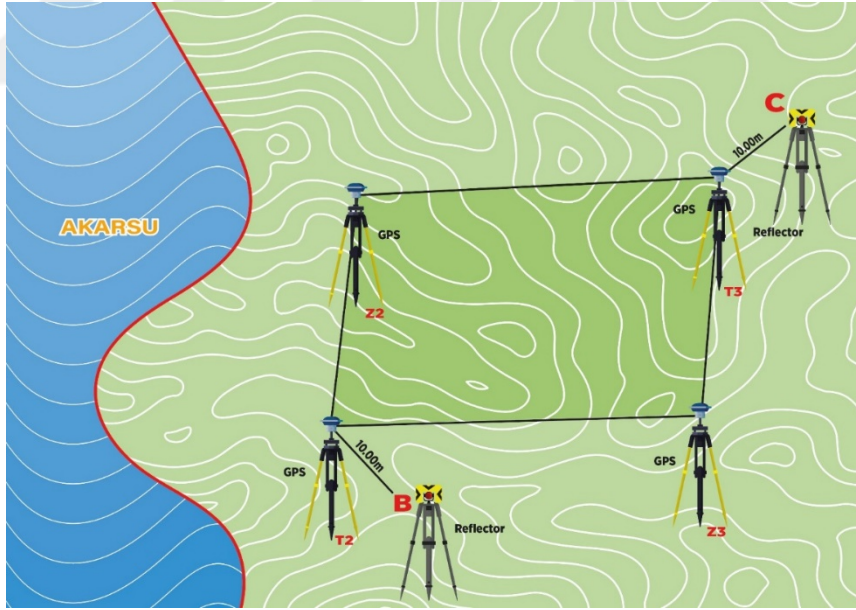
İkincisi ise, Total Stationlar ve hedef levhaları kaldırılıp yerlerine GNSS alıcıları yerleştirilmiştir (Şekil 4.7), (Şekil 4.8), (Şekil 4.9). İstasyon noktalarına kurulan Total Station alet yüksekliği ile GNSS alıcı yüksekliklerinin eşit alınması için Total Stationlar kaldırılmadan önce, Total Station alet yüksekliği ($\pm 0,5\text{cm}$) incelikte bir çelik şerit metre yardımıyla ölçülmüştür. İşaret yükseklikleri ise çalışma süresince tüm noktalarda $i=160\text{cm}$ olarak alınmıştır. İstasyon noktalarına kurulan GNSS alıcı yükseklikleri, Total Station alet yüksekliklerine, hedef noktalarına kurulan GNSS alıcı yükseklikleri ise işaret yüksekliklerine ($i=160\text{cm}$) eşit olacak şekilde merkezleştirilmiştir. Birkaç kilometrelik baz uzunluğuna kıyasla, cihazlar arasındaki yükseklik farkı 5 mm olduğunda, GNSS ve Total Station ile ölçülen vadi geçişi uzunlukları farkı ihmal edilebilir (Yang ve Zou, 2021).

Bu çalışmada baz uzunluklarının belirlenmesinde 4 adet Gintec G50 GNSS alıcısı kullanılmıştır (Şekil 4.10). Gintec G50 GNSS alıcısı, çoklu uydu sistemlerini (GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou) destekleyen gelişmiş GNSS teknolojisi sayesinde konum belirleme ve yükseklik ölçümlerini yüksek doğrulukta ölçüm olanağı sunmaktadır. GNSS alıcısı, RTK ve statik ölçme yöntemiyle santimetre seviyesinde konum doğruluğu sunmakta; uygun gözlem koşullarında yatay konumda $\pm(8-10)$ mm, düşey konumda ise $\pm(15-20)$ mm mertebesinde doğruluk sağlamaktadır. GNSS gözlemleri 30 dakikalık gözlem süresi ile statik olarak gerçekleştirilmiştir. Değerlendirme işlemlerinde Leica Infinity ticari GNSS değerlendirme yazılımı kullanılmıştır. Leica Infinity, ofis ortamında GNSS ve klasik ölçme verilerinin değerlendirilmesi amacıyla geliştirilmiş ticari bir ölçme yazılımıdır. Yazılım, Windows tabanlı işletim sistemlerinde çalışmakta olup GNSS alıcıları, total station ve dijital nivo gibi farklı ölçme sistemlerinden elde edilen verilerin bütünleşik olarak işlenmesine olanak sağlamaktadır. Taşıyıcı faz ve kod ölçülerine dayalı olarak baz hatları oluşturulmakta ve statik ile RTK ölçü yöntemleri kullanılarak ölçümü yapılan noktaların üç boyutlu koordinatları hesaplanmaktadır. Çözüm sürecinde referans istasyon bilgileri tanımlanmakta, ağ geometrisi dikkate alınarak konum çözümleri

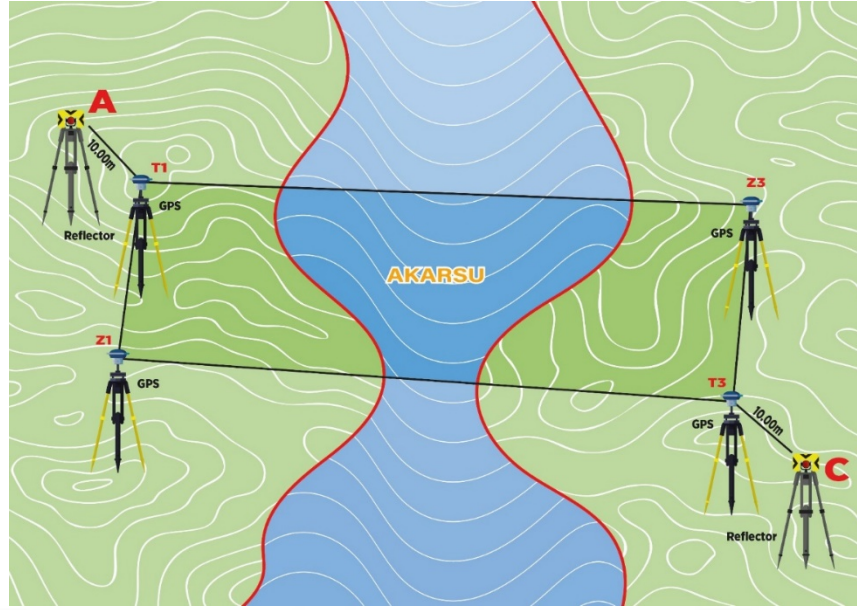
gerçekleştirilmektedir. Baz çözümlerinde çalışma alanına yakın Niğde, Aksaray ve Halkapınar Tusaga-aktif istasyonlarından temin edilen sabit verilerinden yararlanılmıştır.



Şekil. 4.7 Noktaları Arasındaki Baz Uzunluğu Ölçümü (A ve B)



Şekil. 4.8. Noktaları Arasındaki Baz Uzunluğu Ölçümü (B ve C)



Şekil 4.9. Noktaları Arasındaki Baz Uzunluğu Ölçümü (A ve C)

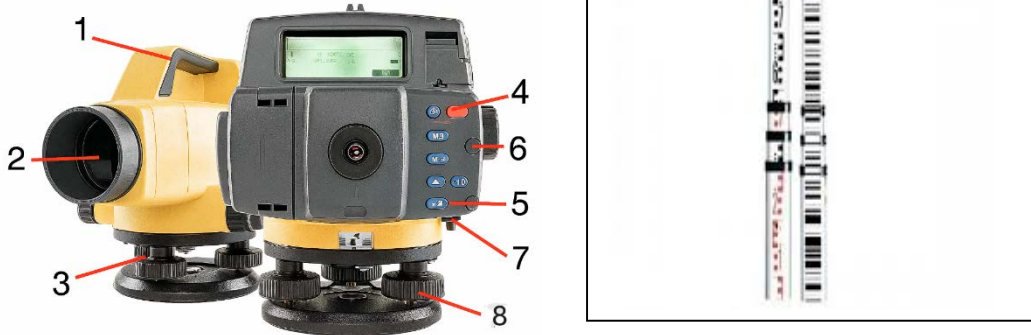


Şekil 4.10. GNSS Alıcısı ve Donanımları ([URL 3](#), [URL 4](#), [URL 5](#))

4.4. Geometrik Nivelman Ölçmeleri

Geometrik nivelman tekniği ile yükseklik farklarının ölçülmesinde, bir adet Topcon DL-503 serisi elektronik dijital nivo ve iki adet 5 metre uzunluğunda Topcon marka alüminyum mira kullanılmıştır (Şekil 4.11). Topcon DL-503 elektronik dijital nivolar, tek tuşla ölçüm ve veri kaydı yapabilme özelliğine sahip olup, 32x büyütme gücü, yaklaşık 2000 nokta kapasiteli dahili hafızası ve 1 km gidiş–dönüş nivelmanında yaklaşık ± 1.0 mm standart sapma doğruluğu ile yüksek doğruluklu ölçüm olanağı sunmaktadır. Kullanılan miraların bir yüzü barkodlu olup elektronik dijital nivolar ile otomatik okuma yapılmasına imkân tanırken, diğer yüzü klasik geometrik nivelman okumaları için derecelendirilmiştir. Ölçümlere başlanmadan önce, kullanılan elektronik dijital nivo ve yardımcı ekipmanların kalibrasyon ve bakım işlemleri yetkili servis tarafından kontrol edilerek uygunluğu doğrulanmıştır.

Geometrik nivelman ölçmeleri, atmosferik kırılma etkisinin en düşük ve hava koşullarının en stabil olduğu sabah erken saatler ile akşam üzeri saatlerinde gerçekleştirilmelidir. Özellikle öğle saatlerinde artan sıcaklık gradyanları ve hava hareketleri ölçüm doğruluğunu olumsuz etkilediğinden, bu zaman dilimlerinde ölçüm yapılmasından kaçınılmalıdır. Ölçümlerin hassasiyetini artırmak amacıyla, sakin ve rüzgârsız hava koşullarında veri toplama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sırasında kullanılan dijital nivo ile miralar, sağlam ve titreşimsiz zeminlere yerleştirilmiş; Geri ve ileri okuma işlemleri sırasında, alet ile mira arasındaki mesafelerin birbirine yakın olmasına özen gösterilmiş ve bu mesafeler 80-100 metre aralığında, ancak 100 metreyi aşmayacak şekilde sınırlandırılmıştır. Okuma işlemleri, 0.50 metrenin altındaki değerlerden kaçınılarak yapılmıştır. Tüm ölçümler hem gidiş hem de dönüş yönünde gerçekleştirilmiş olup, her iki yönde de aynı güzergâh üzerinden ilerlenmesine dikkat edilmiştir. Miraların sıfır konum hatası oluşturmasının önüne geçebilmek için, ölçüm sırasında kullanılan istasyon sayısının, yani cihaz kurulumlarının, çift sayıda olmasına özen gösterilmiştir. Geometrik nivelman ölçmeleri çift gidiş şeklinde kontrollü olarak yapılmıştır.



Şekil.4.11 Topcon DL-503 ve Barkodlu Mira ([URL 6](#), [URL 7](#))

4.5 Ölçülerin Değerlendirilmesi

4.5.1. Eş Zamanlı Trigonometrik Nivelmanda düşey açı ve eğik uzunluklar

Ölçüler referans noktaları arasında eş zamanlı olarak başlanmak suretiyle ilk olarak düşey açılar 10 silsile şeklinde 20 açı okuması yapılmıştır. Eğik uzunluklar ise 10 defa tekrarlı olarak ölçülmüştür. Düşey açı ve eğik eğik uzunluk ortalamaları Tablo 4.1, 4.2 ve 4.3’de gösterilmiştir. Ölçmeler, 2 kişilik ölçü ekibi tarafından her ikili nokta arası 2’şer saate yakın bir sürede gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.1. A-B Noktaları Arasındaki Düşey Açı ve Eğik Uzunluklar

D.N.	B.N.	Düşey açı (°)	Eğik uzunluk (m)
T1	A	93.2499	8.012
	Z1	100.0106	7.984
	Z2	100.1946	1447.097
T2	Z2	112.5925	8.064
	B	104.8192	8.103
	Z1	99.8753	1448.698

Tablo 4.2. A-C Noktaları Arasındaki Düşey Açı ve Eğik Uzunluklar

D.N.	B.N.	Düşey açı (°)	Eğik uzunluk (m)
T1	A	93.2499	8.012
	Z1	100.0106	7.984
	Z3	100.1337	1365.812
T3	Z3	95.7095	8.051
	C	98.2730	7.703
	Z1	99.8397	1366.570

Tablo 4.3. B-C Noktaları Arasındaki Düşey Açı ve Eğik Uzunluklar

D.N.	B.N.	Düşey açı (°)	Eğik uzunluk (m)
T2	B	104.2592	8.114
	Z2	111.1915	8.053
	Z3	100.0050	99.141
T3	Z3	95.7095	8.047
	C	98.2730	7.710
	Z2	100.5490	99.527

4.5.2. GNSS Baz Uzunluklarının hesabı Hesaplanması

GNSS destekli eş zamanlı trigonometrik nivelman hesabı için gerekli eğik uzunluklar, dengelenmiş kartezyen koordinatlardan,

$$\overline{AB} = \sqrt{\Delta Y^2 + \Delta X^2 + \Delta Z^2} \quad (4.11)$$

bağıntısı ile hesaplanmıştır (Tablo 4.4). Total Station ile GNSS ile elde edilen hesaplanan eğik uzunluk farkları Tablo 4.5’de gösterilmiştir.

Tablo 4.4 GNSS gözlemlerinden hesaplanan uzunluklar

A-B arası Uzunluklar(m)		B-C arası Uzunluklar(m)		A-C arası Uzunluklar (m)	
T2-Z2	8.071	T2-Z2	8.047	T3-Z3	8.048
T1-Z1	7.978	T3-Z3	8.039	T1-Z1	7.978
T1-Z2	1447.092	T2-Z3	99.134	T1-Z3	1365.805
T2-Z1	1448.691	T3-Z2	99.522	T3-Z1	1366.566
T1-A	8.009	T2-B	8.108	T1-A	8.007
T2-B	8.098	T3-C	7.702	T3-C	7.699

Tablo 4.5. Eğik uzunluk Farkları

A-B arası	Eğik Uzunluklar (m)		Farklar (mm)
	GNSS	Total Station	ΔS
T2-Z2	8.071	8.064	-7
T1-Z1	7.978	7.984	6
T1-Z2	1447.092	1447.097	5
T2-Z1	1448.691	1448.698	7
T1-A	8.009	8.012	3
T2-B	8.098	8.103	5
B-C arası			
T2-Z2	8.045	8.053	8
T3-Z3	8.039	8.047	8
T2-Z3	99.149	99.141	-8
T3-Z2	99.536	99.527	-9
T2-B	8.108	8.114	6
T3-C	7.702	7.71	8
A-C arası			
T3-Z3	8.043	8.051	8
T1-Z1	7.978	7.984	6
T1-Z3	1365.805	1365.812	7
T3-Z1	1366.566	1366.57	4
T1-A	8.007	8.012	5
T3-C	7.699	7.703	4

4.5.3. Yükseklik farklarının hesaplaması

Eş zamanlı dış merkezli trigonometrik nivelman ile A ile B noktası arasındaki yükseklik farkı;

$$h_{A,B} = (s_{T_2,B} \cos Z_{T_2B} - s_{T_1,A} \cos Z_{T_1A}) + \frac{1}{2} (s_{T_1,Z_1} \cos Z_{T_1Z_1} - s_{T_2,Z_2} \cos Z_{T_2Z_2}) + \frac{1}{2} (s_{T_1,Z_2} \cos Z_{T_1Z_2} - s_{T_2,Z_1} \cos Z_{T_2Z_1}) \quad (4.12)$$

Benzer şekilde, B ile C noktası arasındaki yükseklik farkı;

$$h_{B,C} = (s_{T_3,C} \cos Z_{T_3C} - s_{T_2,B} \cos Z_{T_2B}) + \frac{1}{2} (s_{T_2,Z_2} \cos Z_{T_2Z_2} - s_{T_3,Z_3} \cos Z_{T_3Z_3}) + \frac{1}{2} (s_{T_2,Z_3} \cos Z_{T_2Z_3} - s_{T_3,Z_2} \cos Z_{T_3Z_2}) \quad (4.13)$$

A ile C noktası arasındaki yükseklik farkı;

$$h_{A,C} = (s_{T_3,C} \cos Z_{T_3C} - s_{T_1,A} \cos Z_{T_1A}) + \frac{1}{2} (s_{T_1,Z_1} \cos Z_{T_1Z_1} - s_{T_3,Z_3} \cos Z_{T_3Z_3}) + \frac{1}{2} (s_{T_1,Z_3} \cos Z_{T_1Z_3} - s_{T_3,Z_1} \cos Z_{T_3Z_1}) \quad (4.14)$$

bağıntıları ile hesaplanmıştır.

Total Station ile ölçülen eğik kenarlar ile hesaplanan yükseklik farkları (Δh_{Tst}^{Trg})

Tablo 4.6'da gösterilmiştir.

Tablo 4.6. Total Station ile Ölçülen Eğik Uzunluklarla Elde Edilen Yükseklik Farkları (m)

A-B noktaları (Δh_{Tst}^{Trg})		B-C noktaları (Δh_{Tst}^{Trg})		A-C noktaları (Δh_{Tst}^{Trg})	
h_{A,Z_1}	-0.8493	h_{B,Z_2}	-0.8660	h_{A,Z_1}	-0.8490
$h_{Z_2,B}$	0.9719	$h_{Z_3,C}$	-0.3328	$h_{Z_3,C}$	-0.3332
h_{Z_1,Z_2}	-4.4224	h_{Z_2,Z_3}	1.4004	h_{Z_1,Z_3}	-2.1489
$h_{A,B}$	-4.2998	$h_{B,C}$	0.2017	$h_{A,C}$	-4.0655

GNSS ile belirlenen baz uzunlukları ile hesaplanan yükseklik farkları (Δh_{GNSS}^{Trg})

Tablo 4.7'de gösterilmiştir.

Tablo 4.7. GNSS Uzunluklarla Elde Edilen Yükseklik Farkları (m)

A-B noktaları (Δh_{GNSS}^{Trg})		B-C noktaları (Δh_{GNSS}^{Trg})		A-C noktaları (Δh_{GNSS}^{Trg})	
h_{A,Z_1}	-0.8489	h_{B,Z_2}	0.8342	h_{A,Z_1}	-0.8487
$h_{Z_2,B}$	0.9736	$h_{Z_3,C}$	-0.3325	$h_{Z_3,C}$	-0.3332
h_{Z_1,Z_2}	-4.4231	h_{Z_2,Z_3}	1.3996	h_{Z_1,Z_3}	-2.8831
$h_{A,B}$	-4.2984	$h_{B,C}$	0.2021	$h_{A,C}$	-4.0649

4.5.4. Geometrik Nivelman ile Yükseklik farkların

Uygulama alanın 'da geometrik nivelman tekniği ile elde edilen yükseklik farkları Tablo 4.8'da gösterilmiştir.

Tablo 4.8. Geometrik nivelman Tekniği İle Elde Edilen Yükseklik Farkları

Noktalar Arası	Gidiş $\Delta H_{gidiş} (m)$	Dönüş $\Delta H_{dönüş} (m)$	Ortalama $\Delta H_{ort} (m)$
AB	-4.3273	4.3143	-4.3208
BC	0.2002	-0.2132	0.2067
CA	4.1221	-4.1061	4.1141

4.5.5. Yükseklik farklarının karşılaştırılması

Yükseklik farklarının karşılaştırılmasında, Geometrik nivelman değerlerinin daha yüksek doğrulukta olduğu kabul edilerek, diğer iki yöntem ile elde edilen yükseklik farkları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları tablo 4.9'da gösterilmiştir.

Tablo 4.9. Yükseklik farklarının karşılaştırılması

Noktalar Arası	Yükseklik Farkları (m)			Farklar (cm)	
	Δh_{Tst}^{Trg}	Δh_{GNSS}^{Trg}	Δh_{Geom}	$\Delta h_{Tst}^{Trg} - \Delta h_{Geom}$	$\Delta h_{GNSS}^{Trg} - \Delta h_{Geom}$
A-B	-4.2998	-4.2984	-4.3208	-2.1	-2.24
B-C	0.2017	0.2021	0.2067	-0.5	-0.4
C-A	4.0655	4.0649	4.1141	-4.86	-4.92
Ortalama				-2.49cm	-2.52cm

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasının materyal ve metot bölümünde yükseklik belirleme teknikleri hakkında kısa bilgiler verildikten sonra özellikle bu çalışmanın konusu olan trigonometrik nivelman tekniklerinin ölçme ve fonksiyonel modelleri ayrıntılı olarak elle alınmıştır. Ayrıca, trigonometrik nivelmandaki uzunluk ölçme, düşey açı gözlemlerinin doğruluğu ve refraksiyon hatasının trigonometrik nivelman tekniğinin doğruluğuna etkisi araştırılması için iki farklı ölçme doğruluğuna sahip Total Stationlar ile iki farklı senaryoda doğruluk analizleri yapılmıştır. Doğruluk analizi için (3.1) bağıntısına hata yayılma kuralı uygulanmıştır. Doğruluk analizinde, düşey açı, eğik uzunluk ve refraksiyon hatalarının davranışları, 90-100^s arası değişen düşey açılar ve 0-2000m arası değişen uzunluklarda simüle edilmiş ve sonuçlar tablo ve grafik olarak gösterilmiştir

Senaryo 1’de: uygulamada pratikte yaygın olarak kullanılan standart bir Total Station’a ait uzunluk $\pm(2+2.ppm)$ ve düşey açı (5^{cc}) gözlemlerine ait standart sapmalar dikkate alınmıştır. Trigonometrik nivelmandaki hata etkilerinin etkileri önce ayrı ayrı analiz edilmiş sonra da toplam etkileri hesaplanmıştır. Sonuçlar sayısal olarak Tablo 3.1-3.4’de, grafik olarak da Şekil 3.4’de gösterilmiştir.

Tablo 3.2 ve Şekil 3.4 incelendiğinde; uzunluk ölçme doğruluğunun etkisi düşey açı değeri 100^s’a yaklaştıkça azaldığı, tam yatay olduğunda da sıfıra indiği görülmektedir ($S=1000$ m ve $Z=90g$ için $\pm 0.63mm$). Ayrıca, uzunluk arttıkça da hata etkisi büyümektedir ($S=2000$ m ve $Z=90g$ için $\pm 0.94 \cong \pm 1mm$). Düşey açı ölçme doğruluğunun etkisi ise uzunlukla doğrusal bir değişim göstermektedir. Yani uzunluk iki katına çıkarsa, hata da yaklaşık iki katına çıkmaktadır ($S=2000$ m ve $Z=90g$ için $\pm 18.62 \cong \pm 19mm$). Düşey açı değişiminden çok fazla etkilenmediği görülmektedir. Refraksiyon etkisinin uzunluğun karesiyle orantılı olarak arttığı görülmektedir. Kısa uzunluklarda özellikle $S \leq 250$ m için hata etkisi $\leq \pm 0.5$ mm olması nedeniyle ihmal edilebilir. Ancak, uzun mesafelerde örneğin; $S=2000$ m için $\pm 31.39mm$ ’ ulaşmaktadır.

Senaryo 2’de ise; uygulamada çok az kullanılan robotik bir Total Station’a ait uzunluk $\pm(1+1.ppm)$ ve düşey açı ($\pm 1.5^{cc}$) gözlemlerine ait standart sapmalar dikkate alınmıştır. Bu değerlere göre, trigonometrik nivelmandaki hata etkilerinin etkileri Senaryo 1’deki gibi önce ayrı ayrı analiz edilmiş sonra da toplam etkileri hesaplanmıştır. Sonuçlar sayısal olarak Tablo 3.5-3.8’de, grafik olarak da Şekil 3.5’de gösterilmiştir.

Tablo 3.6 ve Şekil 3.5 incelendiğinde; uzunluk ölçme doğruluğunun etkisi düşey açı değeri 100^g 'a yaklaştıkça azaldığı, tam yatay olduğunda da sıfıra indiği görülmektedir. Ayrıca, uzunluk arttıkça da hata etkisi büyümektedir ($S=2000$ m ve $Z=90g$ için $\pm 0.47 \cong \pm 0.5mm$). Düşey açı ölçme doğruluğunun etkisi ise uzunlukla doğrusal bir değişim göstermektedir. $S=2000$ m ve $Z=90g$ için $\pm 4.65mm \cong \pm 5mm$ olarak hesaplanmıştır. Refraksiyon etkisi; senaryo 1'deki gibi uzunluğun karesiyle orantılı olarak arttığı görülmektedir. Kısa uzunlarda özellikle $S \leq 250$ m için hata etkisi $\leq \pm 0.5$ mm olması nedeniyle ihmal edilebilir. Ancak, uzun mesafelerde örneğin; $S=2000$ m için $\pm 31.39mm$ 'ye ulaşmaktadır. Burada görüldüğü gibi her iki senaryoda etki aynı olmaktadır. Bu da mantıklı, çünkü refraksiyon ölçme aletinden bağımsızdır. Sadece uzunluk ve atmosferik koşullardan etkilenmemektedir. Sonuç olarak; iki senaryoda da uzak noktalar arası trigonometrik nivelmanda en etkili hata kaynağı refraksiyon hatasıdır.

Bu analiz bize şunu göstermiştir ki, trigonometrik nivelmanda uzunluğu ölçme doğruluğu çok önemli (mm altı) değildir. Ancak düşey açı ölçme doğruluğu ve özellikle refraksiyon hatasındaki belirsizlikler sonucu doğrudan etkileyen faktörlerdir.

Çalışmanın temel amacı, geometrik nivelmanın yapılamadığı (Akarsu geçişi gibi) veya derin ve uzun açıklı vadi geçişlerinde uygulanması hızlı ve daha kolay alternatif bir yöntem arayışında standart Total Stationlar kullanılarak klasik trigonometrik nivelmanın ve GNSS destekli trigonometrik nivelman tekniğinin performansını değerlendirmektir. Karşılaştırılmalarda geometrik nivelman ile elde edilen sonuçlar daha doğru kabul edilmiştir.

Bu çalışma, Türkiye'nin İç Anadolu Bölgesi'nde, Niğde ili Bor ilçesi sanayi bölgesi karşısında yer alan uygulama alanında gerçekleştirilmiştir. Uygulama alanındaki referans nokta yerlerinin seçiminde oluşturulacak olan kenarların farklı uzunlarda olması ve loop kapanması olacak şekilde planlanmıştır. A, B ve C referans noktaları arasındaki, AB, BC ve CA kenarları üzerinde eş zamanlı trigonometrik nivelman, GNSS destekli eş zamanlı trigonometrik nivelman ve geometrik nivelman tekniği uygulanmıştır.

Eş zamanlı trigonometrik nivelmanda, standart iki adet Total Station (Spectra Focus 8) yardımıyla gözlenen düşey açı ve eğik uzunluklar yardımıyla noktalar arası yükseklik farkları (Δh_{Tst}^{Trg}) hesaplanmıştır. GNSS destekli trigonometrik nivelmanda da aynı Total Stationlar kullanılarak sadece düşey açılar ölçülmüştür. Noktalar arası uzunluklar Uydu Konum belirleme tekniği (GNSS) ile yapılan 30 dakikalık statik

gözlemlerden elde edilen baz uzunlukları alınarak noktalar arası yükseklik farkları (Δh_{GNSS}^{Trg}) hesaplanmıştır.

Geometrik nivelman sonuçları daha yüksek doğrulukta olduğu düşünülerek, geometrik nivelman ile elde edilen yükseklik farkları gerçek değer olarak kabul edilmiş ve diğer sonuçlara ait hatalar hesaplanmıştır. Tablo 4.9’da görüldüğü gibi Total Station kullanılarak yapılan trigonometrik nivelmanda maksimum -4.86 cm, minimum -0.5 cm ve ortalama -2.49 cm olarak hesaplanmıştır. GNSS çözümleri ile elde edilen kenarların kullanıldığı GNSS destekli trigonometrik nivelmanda maksimum -4.92 cm, minimum -0.4 cm ve ortalama -2.52 cm olarak hesaplanmıştır. Burada, GNSS destekli trigonometrik nivelman ile klasik trigonometrik nivelman yönteminin tüm kenarlarda birbirine oldukça yakın sonuçlar üretmesi, bu iki yöntemin aynı matematiksel modele dayanması ve ortak hata kaynaklarından etkilenmesine bağlanabilir. Minimum değerler yaklaşık 1500m’lik uzunluğa sahip olan AB kenarında olduğu, diğer bir önemli sonuç da trigonometrik nivelman sonuçlarının çok küçük bir farkla da olsa daha iyi olduğu görülebilir.

Mutlak hatalar yönüyle değerlendirildiğinde, bizim uygulama alanındaki A-B ve C-A kenarları dikkate alındığında, özellikle derin vadi geçişlerinin olduğu arazilerde en iyi şartlarda 3.0 km’lik toplam nivelman yolu uzunluğu olacağı düşünülebilir. Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliğinde (2018); gidiş-dönüş ölçüleri arasındaki fark için hata sınır değerleri olarak, ara nivelman ağırları için $2.59\text{cm} (W_{mm} \leq 15\sqrt{S_{km}})$, yardımcı nivelman ağırları için $3.50\text{ cm} (W_{mm} \leq 20\sqrt{S_{km}} + 0.0002.\Delta H)$ hesaplanabilir. Bu durumda, bu çalışmada araştırılan her iki trigonometrik nivelman tekniğinin de özellikle yardımcı nivelman ağırlarında geometrik nivelmandan istenen sınır değerleri karşıladığı söylenebilir.

A-B, B-C ve C-A kenarlarını uzunluklarına göre uzak noktalar arası ve yakın noktalar arası trigonometrik nivelman şeklinde de sınıflandırabiliriz.

A-B ve C-A kenarları uzak noktalar arası trigonometrik nivelman olarak sınıflandırılır. Bu hatlarda iki trigonometrik yöntem de yaklaşık 2.5 ve 5 cm’lik sapma üretmesi, uzun hatlarda troposferik gecikmenin, refraksiyonun, elektronik uzaklık ölçer (EDM) doğruluğunun ve düşey açıdaki saniyelik hataların büyüyerek yükseklik farkına doğrudan yansımalarının doğal bir sonucudur. Geometrik nivelmana kıyasla bu hatlar, trigonometrik teknikler açısından kritik eşik niteliğindedir. Sonuçlar, trigonometrik yöntemlerin uzun hatlarda kabul edilebilir doğruluk üretmesine karşın, milimetre

seviyesinde doğruluk gerektiren mühendislik göstermektedir uygulamaları için geometrik nivelmanın hala vazgeçilmez olduğunu.

B-C hattı yakın noktalar arası trigonometrik nivelman olarak değerlendirilir. Her iki trigonometrik nivelman tekniği de geometrik nivelmana yaklaşık 4-5 mm'lik sapma ile çok yakın sonuçlar üretmiştir. Bu hattaki doğruluğun esas olarak düşey açı doğruluğuna bağlı olduğunu, GNSS yüksekliğinin kısa bazlarda kararsız olabileceğini ve prizma-alet eksen hatalarının bu tür kısa hatlarda dahi etkili olabileceğini göstermektedir. Buna karşın 4.5 mm'lik hata, kısa mesafede trigonometrik yöntemlerin pratik mühendislik uygulamalarında kullanılabilir doğruluk seviyesinde sonuç ürettiğini; özellikle kontrol amaçlı veya ön mühendislik çalışmalarında yeterli olabileceğini göstermektedir.

Zaman yönüyle değerlendirildiğinde, GNSS Destekli Trigonometrik Nivelmandan ölçümleri yaklaşık 5-6 saat'lik zaman diliminde, klasik trigonometrik nivelman yöntemi 7-8 saat aralığında, geometrik nivelman ölçüleri ise 8-10 saat gibi daha uzun bir zamanda tamamlanmıştır. Personel açısından GNSS Destekli Trigonometrik Nivelman yöntemleri 2 kişilik, geometrik nivelman ise 4 kişilik bir ölçü ekibi ile yürütülmüştür.

Sonuç olarak GNSS destekli trigonometrik nivelman, geometrik nivelmanın uygulanamadığı veya güç olduğu vadi geçişleri, su yüzeyi bölgeleri, menfezler ve uzun hat ölçmeleri gibi durumlarda modern, hızlı ve operasyonel açıdan avantajlı bir alternatif olarak değerlendirilebilir. Çalışmadan elde edilen tüm karşılaştırmalar, yöntemin kısa hatlarda geometrik nivelmanla yüksek uyum, uzun hatlarda ise kabul edilebilir doğruluk sunduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada kullanılan Total Station aletleri, Bölüm Jeodezik Ölçme Aletleri Laboratuvarındaki standart bir Total Station aletidir. Son yıllarda geliştirilmiş olan otomatik hedefe yöneltme sağlayan ve daha yüksek doğrulukta açı ve uzunluk gözlemleri yapabilen Robotik Total Stationların kullanımı 1km üzeri kenar uzunluğa sahip nivelman hatlarında daha iyi sonuçlar elde edilebileceğini söyleyebilirim.

KAYNAKLAR

- Albayrak, M., Özlüdemir, M.A., Aref, M.M., and Halicioğlu, K., 2020, Determination of Istanbul geoid using GNSS/levelling and valley cross levelling data, *Geodesy and Geodynamics*, 11(3), 163-173.
- Baykal, O., 1988, Presizyonlu Nivelman Tekniği, İ.T.Ü. Fen Bil. Enst. Ders notları, İstanbul.
- Banger, G., 1981.(a), Hassas Nivelmanda Hata Kaynakları, İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, Cilt 31, Sayı 12, İstanbul.
- Banger, G., ve Aslan, H. A. (b) 1981, Geçiş Nivelmanı Üzerine Bir Çalışma, Harita Dergisi, 12 29.<https://www.harita.gov.tr/uploads/files/articles/gecis-nivelmani-uzerine-bir-calisma-822.pdf> [Ziyaret Tarihi: 3 Ekim 2025]
- B.Ö.H.H.B.Ü.Y., 2018, Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği, Harita ve Kadastro Müh. Odası.
- Bitelli, G., Roncari, G., Tini, M.A., Vittuari, L., 2018, High-precision topographical methodology for determining height differences when crossing impassable areas, *Measurement*, 118, 147-155.
- Ceylan, A., 1988, Duyarlı Nivelmanda Önemli Sistemik Hata Kaynakları Üzerine Bir Çalışma, Yüksek Lisans tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, S.117, Konya
- Ceylan, A. ve İnal, C., 1996, Dış Merkezli Trigonometrik Nivelman, S.Ü. Müh. Mim. Fak. Derg., 11, 1-6.
- Ceylan, A., 2009, Modern Yükseklik Belirleme Teknikleri: Geometrik Nivelman Tarih Mi Oluyor?, *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 12. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, Ankara.
- Ceylan, A., Baykal, O., 2006, Precise Height Determination Using Leap-Frog Trigonometric Leveling, *Journal of Surveying Engineering*, 132(3), 118.
- Ceylan, A., Baykal, O., 2008, Precise height determination using simultaneous-reciprocal trigonometric levelling, *Survey Review*, 40(308), 195-205.
- Ceylan, A., Inal, C. and Şanlıoğlu, İ., 2005, Modern Height Determination Techniques and Comparison of Accuracies, *From Pharaohs to Geoinformatics*, 16-21.
- Dingliang, Y., Jingui Z., Yanwen, S., and Zhu. H., 2021, Research and Application of Trigonometric Leveling to Replace Precise Leveling, *Journal of Surveying Engineering*, 147(3), e-published.
- Erikson, P., 2014, Review of current and near-future levelling technology, 2, *Lantmateriet, Gaule-İsveç*, 5-8.
- Erkaya, H. 2006, Yükseklik Ölçmeleri, Yıldız Teknik Üniversitesi, Ders notları, 87 sayfa, İstanbul
- Herbert, T., Olatunji, R.I., 2021, Determination of Orthometric Height Using GNSS and EGM Data: A Scenario of The Federal University of Technology Akure, *International Journal of Environment and Geoinformatics (IJEEO)*, 8(1), 100 105.

- Hofmann-Wellenhof, Bernhard, Herbert Lichtenegger, and James Collins. "Applications of GPS." *Global Positioning System: Theory and Practice*. Vienna: Springer Vienna, 2001.
- Hofmann-Wellenhof, Bernhard, Herbert Lichtenegger, and Elmar Wasle. *GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Vienna: Springer Vienna, 2008.
- Featherstone, W.E., 2001, Absolute and relative testing of gravimetric geoid models using Global Positioning System and orthometric height data, *Computers & Geosciences*, 27(7), 807-814.
- Gunter, S. "Satellite Geodesy Foundation, Methods and Applications." (2003).
- Kahveci, M., 1993, "Ortometrik Yüksekliklerin Belirlenmesinde GPS Sistemi", Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kavanagh, B. F., & Slattey, D. K. (2009). *Surveying with Construction Applications* (7th ed.). Pearson Education.
- Ocak, M., 2021, "GNSS/Nivelman Ölçüleri ile Yerel Jeoid Modellemede Çeşitli Entropolasyon ve Yapay Zeka Yöntemlerinin İncelenmesi", Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Öğür, M.C. , 2024 Vadi Geçiş Nivelmanının Doğruluk Araştırması, *Lisansüstü Tezi*, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya
- Pelzer, H., 1983, Systematic Instrumental Errors in Precise Levelling, *Dümler Verlag*, s.3-17, Bonn
- Pırtı, A., Hosbas, R. G., 2019, Evaluation of some levelling techniques in surveying application, *Geodesy and Cartography*, 68(2), 361-373.
- Yang, D. and Zou, J., 2021, Precise levelling in crossing river over 5 km using total station and GNSS, *Scientific Reports*, 11, 7492 (2021).
- Yıldız, H., 2012, Yükseklik Modernizasyonu Yaklaşımı: Türkiye İçin Bir İnceleme, *Harita Dergisi*, 147, 1–12.
- Zrinjski, M., Barković, D., Baričević, S., 2018, Accuracy Analysis of Geometric, Trigonometric and GNSS Height Difference Levelling, VI. hrvatski kongres o katastru i 7th Land Administration Domain Model Workshop, Zagreb, Croatia.
- Wolf, P. R., & Ghilani, C. D. (2012). *Elementary Surveying, An Introduction to Geomatics*
- URL 1 : <https://geoplusharita.com/shop/spectra-focus8-total-station-set/> [Ziyaret Tarihi: 21 Kasım 2025]
- URL 2 : <https://www.sfs-topo.fr/canne/159-cls12-trepied-porte-canne-cls111.html> [Ziyaret Tarihi: 21 Kasım 2025]
- URL 3 : <https://mapsis.com.tr/urun/g50-lazergnss/> [Ziyaret Tarihi: 21 Kasım 2025]
- URL 4 : <https://www.paksoymarket.com/gps-jalon-sehpasi-uc-ayak-pmu499> [Ziyaret Tarihi: 21 Kasım 2025]
- URL 5 : <https://www.geomaticsgroup.com/urunler/seco-teleskopik-gps-jalonu-36m> [Ziyaret Tarihi: 21 Kasım 2025]
- URL 6 : <https://www.lssltd.net/topcon-dl-502-digital-level/> [Ziyaret Tarihi: 21 Kasım 2025]

URL 7 : <https://www.baytekin.com.tr/leica-uyumlu-5-mt-barkodlu-alüminyum-mira-sprinter-seri> [Ziyaret Tarihi: 21 Kasım 2025]

