

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TÜNEL AÇMA ÇALIŞMALARINDA YATAY YÖNLENDİRME  
DOĞRULUĞUNUN BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Necip Enes GENGEÇ**

**Anabilim Dalı : Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği**

**Programı : Geomatik Mühendisliği**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ergin TARI (İTÜ)**

**Haziran 2010**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TÜNEL AÇMA ÇALIŞMALARINDA YATAY YÖNLENDİRME  
DOĞRULUĞUNUN BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Necip Enes GENGEÇ  
501071622**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 30 Nisan 2010  
Tezin Savunulduğu Tarih : 07 Haziran 2010**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ergin TARI (İTÜ)  
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Mustafa YANALAK (İTÜ)  
Doç. Dr. Halil Erkaya (YTÜ)**

**Haziran 2010**







*Anneme ve Babama,*





## ÖNSÖZ

Zorunlu ve sıkıntılı bir dönem olan yüksek lisans ve tez aşamasında, bu çalışmanın yapılabilmesi için emeği geçenlere teşekkürü bir borç bilirim. Lisans öğrenimimden başlamak üzere yüksek lisans bitimine kadar birlikte çalıştığım, kolayca kaçmadan araştırma ve öğrenmenin gerekliliğini ve yararını bana her seferinde kanıtlayan ve soru ve sorunlarımı tez çalışması dışında dahi olsa çözümsüz bırakmayan tez danışmanım Prof. Dr. Ergin TARI'ya teşekkür ederim.

Araştırma görevlisi hocalarım Serdar BİLGİ'ye, Emin Özgür AVŞAR'a ve Umut AYDAR'a öğrenim hayatım boyunca verdikleri destekler için teşekkür ederim.

Bu çalışmanın yapılış süreci içinde, meslek hayatımın belli dönemlerde birlikte çalıştığım Müh. Azmi AKAL, Müh. Timuçin ÖZBAYIR, Yük. Müh. Ali YÜKSEL'e engin, teknik ve sosyal tecrübe paylaşımları için teşekkür ederim.

Eski mesai arkadaşım Müh. Yelda ADEMOĞLU'na çalıştığımız süre boyunca ve sonrasında yaptığı karşılıksız yardım ve destekleri için teşekkür ederim.

Lisans ve yüksek lisans hayatım boyunca yanımda olan meslektaşlarım Yük. Müh. Elif Ceylan BABAOĞLU'na, Müh. Ilgın ÇİMEN'e, Müh. Harun Kenan SUBAŞI'ya ve Müh. Mahmutcan GÖRÜRGÖZ'e verdikleri destekler için teşekkür ederim.

Bu zorlu süreçte kahrımı çeken, her konuda desteklerini gördüğüm, kötü zamanlarımda hep yanımda olan dostlarım Müh. Engin ÜNVER'e ve Yük. Müh. Semih DALĞIN'a beni bu süreçte yalnız bırakmadıkları için teşekkür ederim.

Bana hiçbir zaman eksikliklerini hissettirmeyen, maddi ve manevi destekleri ile bugünlere gelebilmemi sağlayan, bana verdikleri en önemli şey olduğunu düşündüğüm öğrenme ve tartışmanın hayat boyu gerekliliğini çocukluğumdan

beri bana aşılayan anneme ve babama ve özellikle yüksek lisans hayatım boyunca hep kahrımı çeken kardeşime teşekkür ederim.

Haziran 2010

Necip Enes GENGEÇ  
Jeodezi ve Fotogrametri Müh.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	v
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	vii
<b>KISALTMALAR</b> .....	ix
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	xi
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	xiii
<b>ÖZET</b> .....	xv
<b>SUMMARY</b> .....	xvii
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Çalışmanın Konusu.....	1
1.2. Çalışmanın Amacı.....	1
1.3. Yöntem.....	1
<b>2. TÜNELCİLİK ÇALIŞMALARI</b> .....	<b>3</b>
2.1. Tünel Açma Yöntemleri.....	4
2.2. Tünel Kazılarının Yönlendirilmesi.....	6
<b>3. TÜNEL YATAY KONTROL AĞLARI</b> .....	<b>11</b>
3.1. Yüzey Yatay Kontrol Ağı.....	11
3.2. Yüzey Yatay Kontrol Ağından Tünel İçi Yatay Kontrol Ağına Koordinat Transferi.....	12
3.2.1. CERN Parçacık Hızlandırıcı Tünelleri şaft yaklaşım yapılarında koordinat transferi örneği.....	14
3.2.2. Gotthard Base Tüneli Projesi şaft yaklaşım yapılarında koordinat transferi örneği.....	15
3.2.3. Süper İletken Parçacık Hızlandırıcı (SSC) Tünelleri Projesi şaft yaklaşım yapılarında koordinat transferi örneği.....	15
3.3. Tünel İçi Yatay Kontrol Ağı.....	16
3.4. Tünel İçi Yatay Kontrol Ağlarında Hata Kaynakları.....	17
3.4.1. Yanal refraksiyon.....	18
3.4.1.1. Gyro-teodolitin yanal refraksiyonun düzeltilmesinde kullanılması.....	20
3.4.2. Çekül sapması.....	22
3.4.3. Kaya deformasyonları.....	24
3.5. En Küçük Kareler Yöntemi ve En Küçük Kareler Yöntemi Kullanılarak Dengeleme Hesabının Yapılması.....	25
3.5.1. En küçük kareler yöntemi.....	25
3.5.1.1. Stokastik model.....	28
3.5.1.2. Fonksiyonel model.....	28

3.5.2	Yatay kontrol ağlarının en küçük kareler yöntemi ile dengelenmesi.....	29
3.5.2.1	Kenar ölçmeleri için düzeltme denklemlerinin oluşturulması.....	29
3.5.2.2	Doğrultu ölçmeleri için düzeltme denklemlerinin oluşturulması.....	30
3.5.3	En küçük kareler yöntemi ile dengeleme için ölçülerin ağırlıklandırılması.....	31
3.5.3.1	Açı ölçüleri için ağırlıkların hesaplanması.....	31
3.5.3.2	Kenar ölçülerinin ağırlıklarının hesaplanması.....	32
3.5.4	En küçük kareler yöntemi ile dengeleme hesabının yapılması.	33
3.5.5	Dengeleme hesabı sonrasında doğruluk ölçütlerinin hesabı....	34
3.6	Tünel Doğrultu Hatasının Belirlenmesi.....	36
3.6.1	Tünel doğrultu hatasının hesaplanması.....	37
3.7	Tünel Yapım Toleransları.....	39
<b>4.</b>	<b>TÜNEL İÇİ YATAY KONTROL AĞI TASARIM ÖRNEKLERİ.....</b>	<b>41</b>
4.1	Tek Hat Tüneli Ağ Tasarım Örnekleri.....	41
4.2	Çift Hat Tüneler için Ağ Tasarım Örnekleri.....	45
<b>5.</b>	<b>UYGULAMA ÖRNEĞİ.....</b>	<b>51</b>
5.1	Uygulamanın Yapıldığı Tünel.....	51
5.2	Tünel Kontrol Ağlarının Tasarlanması ve Tesisi.....	51
5.3	Tünel İçi Yatay Kontrol Ağı Ölçmeleri.....	52
5.4	Uygulama Örneği Ölçmelerinin En Küçük Kareler Yöntemi İle Dengelenmesi.....	53
5.5	Uygulama Örneği Verilerinden Tünel Doğrultu Hatasının Hesaplanması.....	57
5.6	Uygulama Örneği Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	58
<b>6.</b>	<b>SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>61</b>
	<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>63</b>
	<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>65</b>

## **KISALTMALAR**

- CERN** : The European Organization of Nuclear Research
- NATM** : New Austuria Tunnelling Method
- NSBT** : North - South Bypass Tunnels
- SSC** : Super Conducting Super Collider
- TBM** : Tunnel boring machine
- xml** : Extensible Markup Language



## ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Çizelge 3.1:</b> Eurotunnel Projesinde gyro-teodolit ölçmelerinin açıklık açılarına etkisi	22
<b>Çizelge 4.1:</b> 4600 metrelik tek hat tünel için %99.8 güven düzeyinde belirlenen tünel doğrultu hatası.....	43
<b>Çizelge 4.2:</b> Tek hat tünel için seri açı ölmelerinin tünel doğrultu hatasına etkisi.....	44
<b>Çizelge 4.3:</b> Gyro-teodolit ölçmelerinin tek hat tünel için tünel doğrultu hatasına etkisi.....	45
<b>Çizelge 4.4:</b> Çift hat tünellerde tünel doğrultu hatası ve tek hat tünellerde elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması.....	48
<b>Çizelge 4.5:</b> Çift hat tüneller için seri ölçme sayısının tünel doğrultu hatasına etkisi...	49
<b>Çizelge 4.6:</b> Gyro-teodolit ölçmelerinin çift hat tünelleri için tünel doğrultu hatasına etkisi.....	49
<b>Çizelge 5.1:</b> Uygulama örneği ölçme çizelgesi.....	53
<b>Çizelge 5.2:</b> Uygulama örneği dengeleme hesabı sonuçları.....	55
<b>Çizelge 5.3:</b> Uygulama örneği dengeleme hesabı sonuçları.....	56





## ŞEKİL LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Şekil 2.1:</b> Aç – Kapa Yöntemi ile Tünel açma çalışmaları.....	4
<b>Şekil 2.2:</b> Del – Patlat uygulamasında patlayıcıların yerleştirilmesi.....	4
<b>Şekil 2.3:</b> Del – Patlat uygulamasında patlama sonrası tünel görünümü.....	5
<b>Şekil 2.4:</b> NATM tüneline kazı çalışmaları.....	5
<b>Şekil 2.5:</b> Tünel açma makinası örnek kesiti.....	6
<b>Şekil 2.6:</b> SLS-T yönlendirme sistemi elemanlar.....	7
<b>Şekil 2.7:</b> SLS-T yönlendirme sistemi parçalar.....	8
<b>Şekil 2.8:</b> SLS-T yönlendirme sistemi ekran görüntüsü.....	9
<b>Şekil 2.9:</b> Total station kurulmuş yönlendirme konsolu.....	9
<b>Şekil 2.10:</b> Reflektör kurulu yönlendirme konsolu.....	10
<b>Şekil 3.1:</b> Tünel projesi için yüzey ağı örneği.....	12
<b>Şekil 3.2:</b> Portal yaklaşım yapısı girişinde TBM.....	12
<b>Şekil 3.3:</b> Portal yaklaşım yapısı girişinde TBM.....	13
<b>Şekil 3.4:</b> CERN projesinde koordinat transferi.....	14
<b>Şekil 3.5:</b> Gotthard Projesinde koordinat transferi.....	15
<b>Şekil 3.6:</b> SSC Projesinde koordinat transferi.....	16
<b>Şekil 3.7:</b> Düşey refraksiyon.....	18
<b>Şekil 3.8:</b> Yanal Refraksiyon.....	19
<b>Şekil 3.9:</b> Çapraz nokta tesisinde yan al refraksiyonun etkisi.....	19
<b>Şekil 3.10:</b> Çapraz çift poligon örneği.....	20
<b>Şekil 3.11:</b> Yanal refraksiyon etkisinin gyro-teodolit ölçmeleri ile azaltılması....	21
<b>Şekil 3.12:</b> Çekül sapması.....	23
<b>Şekil 3.13:</b> Hata elipsi çizimi.....	35
<b>Şekil 3.14:</b> Tünelin A noktasından belirlenen P noktasına doğru yönlendirilmesi.	37
<b>Şekil 3.15:</b> Tünel doğrultu hatası.....	37
<b>Şekil 3.16:</b> Hata elipsi ile tünel ekseninin durumu.....	38
<b>Şekil 4.1.a:</b> Tek hat tünel için 1A ağ tasarımı örneği.....	42
<b>Şekil 4.1.b:</b> Tek hat tünel için 1B ağ tasarımı örneği.....	42
<b>Şekil 4.1.c:</b> Tek hat tünel için 1C ağ tasarımı örneği.....	42
<b>Şekil 4.1.d:</b> Tek hat tünel için 1D ağ tasarımı örneği.....	42
<b>Şekil 4.1.e:</b> Tek hat tünel için 1E ağ tasarımı örneği.....	43
<b>Şekil 4.1.f:</b> Tek hat tünel için 1F ağ tasarımı örneği.....	43
<b>Şekil 4.2:</b> Tek hat tünellerde tünel doğrultu hatasının artışı.....	44
<b>Şekil 4.3.a:</b> Tek hat tünel için 2A ağ tasarımı örneği.....	46
<b>Şekil 4.3.b:</b> Tek hat tünel için 2B ağ tasarımı örneği.....	46
<b>Şekil 4.3.c:</b> Tek hat tünel için 2C ağ tasarımı örneği.....	46
<b>Şekil 4.3.d:</b> Tek hat tünel için 2D ağ tasarımı örneği.....	47
<b>Şekil 4.3.e:</b> Tek hat tünel için 2E ağ tasarımı örneği.....	47
<b>Şekil 4.3.f:</b> Tek hat tünel için 2F ağ tasarımı örneği.....	47

<b>Şekil 4.4:</b>	Çift hat tünellerde tünel doğrultu hatasının artışı.....	48
<b>Şekil 5.1:</b>	Tünel içi yatay kontrol ağı nokta tesisi örneği.....	52
<b>Şekil 5.2:</b>	gama-local giriş dosyası örneği.....	54
<b>Şekil 5.3:</b>	Tünel içi yatay kontrol ağı hata elipsleri.....	57
<b>Şekil 5.4:</b>	Uygulama örneği için tünel doğrultu hatasının yayılması.....	58

## **TÜNEL AÇMA ÇALIŞMALARINDA DOĞRULUĞUN BELİRLENMESİ**

### **ÖZET**

Tünel açma çalışmaları ülkemizde ve dünyada halen gelişmekte olan ayrıntılı mühendislik çalışmalarıdır. Bu çalışmaların yapılabilmesi için birçok mühendislik disiplini bir arada çalışır. Bunlardan biri de Geomatik Mühendisliğidir. Bu çalışmalarda Geomatik Mühendisleri tünel kazılarının proje verilerine göre yönlendirilmesinde ve projede belirlenen diğer yapım işlerinin inşaat çalışmalarında güvenilir konum bilgisi üreterek yer alırlar.

Bu çalışmada Geomatik Mühendislerinin aldığı görevlerin uygulanmasının temeli olan konum bilgisinin üretiminde ve transferinde kullanılan kontrol ağlarından başlayarak bir tünelin yönlendirilmesi için gereken jeodezik çalışmalardan bahsedilmektedir. Bunun için öncelikle tünel açma çalışmalarının gereksinimleri belirlenmiş, bu gereksinime göre literatürde bahsedilen bilgiler aktarılmış bu bilgiler ışığında karşılaşılabilecek sorunlara ve sorun önerilerine değinilmiştir. Tüm bu verilerin ışığında ülkemizde uygulaması yapılmış bir tünel örneği literatürde karşılaşılan diğer örneklerle kıyaslamalı olarak değerlendirilmiş, karşılaşılan eksiklikler listelenerek ülkemizde halen gelişen bu inşaat işlerinde Geomatik Mühendisleri için yararlı olacağı düşünülen öneriler verilmiştir.



## **DETERMINATION OF ACCURACY IN TUNNELLING**

### **SUMMARY**

Tunnelling is a developing engineering field in our country and in globe. In this workfield, a lot of different engineering disciplines work together. Geomatic Engineering is one of these engineering disciplines. In tunneling works, Geomatic Engineers are responsible for the production of reliable position data for the guidance of tunnel according to the construction projects and for other construction works determined in construction projects.

This paper focuses on survey applications, which are used in creating and transferring positional data for tunnel guidance, starting from control networks. These survey applications are the basis of Geomatic Engineering applications. The requirements of tunneling applications have been gathered from the cited literature to be able to highlight the expected problems and propose respective solutions. A tunneling application in Turkey has been evaluated in comparison to other global cases. Solutions have been proposed to address the listed problems regarding this specific application, within the perspective of Geomatic Engineering.



# **1. GİRİŞ**

## **1.1. Çalışmanın Konusu**

Tünel açma çalışmalarında tünel kazısının yönlendirilmesi TBM tünelleri özelinde çalışmanın konusunu oluşturmaktadır. Bu çalışmada, tünel açma çalışmaları sırasında yapılacak jeodezik uygulamalar, bu uygulamalar sırasında karşılaşılabilecek sorunlar ve bu sorunların çözüm yöntemleri değerlendirilecektir.

## **1.2. Çalışmanın Amacı**

Çalışmada ülkemizde halen gelişmekte olan tünel açma çalışmalarında yapılan ölçme işlerindeki fark edilen eksiklikler ve problemler de göz önüne alınarak tünel ağ tasarımları uygulamaları, uygulama sonrası doğrulukların belirlenmesi, konu ile ilgili literatürde anlatılan bilgilerin aktarılması, bu bilgiler ışığında yapılan uygulamaların irdelenmesi, uygulamalarındaki ortaya çıkabilecek sorunlar belirlenerek bu sorunlara çözüm önerileri getirilmesi amaçlanmaktadır.

## **1.3. Yöntem**

Çalışma öncelikle çalışmanın konusu ve amacı doğrultusunda var olan literatürün incelenmesi ve bu alt yapı doğrultusunda karşılaşılan çözüm yöntemlerinin anlatılması ve karşılaştırılması şeklinde oluşturulmuştur.

Devamında bahsedilen bilgiler kullanılarak ülkemizde uygulaması yapılan tünel açma çalışmalarının bir örneği, literatürde rastlanan diğer örneklerle kıyaslamalı olarak değerlendirilecektir.

Çalışmanın sonunda da uygulama örneği ve literatür bulguları ışığında karşılaşılan problemlerin çözüm önerileri ve eksikliklere vurgu yapılmış, konu ile ilgili çözüm önerilerinin yanında ileri araştırma konuları önerilmiştir.



## 2. TÜNELCİLİK ÇALIŞMALARI

Tüneller yer altında inşa edilmiş geçitlerdir. Tüneller, yayalar, motorlu taşıtlar, demiryolu araçları veya su ve kanalizasyon artıklarının taşınması gibi amaçlarla yapılırlar. Bunlara ek olarak tarih boyunca Gazze Şeridi'ni Mısır'a bağlayan tünellerde olduğu gibi farklı pratik ve siyasi nedenlerle inşa edilmişlerdir (URL-1)

Farklı amaçlarla inşa edilen tüneller yeryüzündeki engellerin aşılmasını sağlamaları, şehir görünümünü bozmayan yapıları ekonomik ve hızlı inşa edilebilir olmaları nedeniyle toplu taşımacılık başta olmak üzere birçok mühendislik yapısına göre daha tercih edilebilir durumdadırlar. Ülkemizde de mevcut düzensiz şehirleşme ve yoğun yerleşim nedeniyle yeryüzü mevcut alanlarının mühendislik uygulamalarında kullanılması zorlaşmış, uygulama alanının yer altına kaymasına neden olmuştur (Ademoğlu Y., Gengeç N.E., Güven N., Kösem C., 2008).

Ülkemizde yer altında inşa edilen ilk tünel Beyoğlu – Karaköy arasında 1870'li yıllarda inşa edilen ve günümüzde de faal durumda olan 573 metre uzunluğundaki tüneldir. Beyoğlu – Karaköy tünellerinin ardından Tünel Açma Makinaları (TBM) kullanılarak 1983 yılında İSKİ Güney Haliç Arıtma Projesi, Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM) kullanılarak Taksim – 4. Levent arası metro tünelleri inşa edilmiştir. Halen İstanbul'da inşaatı devam etmekte olan Marmaray ve Kartal – Kadıköy Metrosu projeleri başta olmak üzere bir çok tünel açma çalışması devam etmektedir (Ademoğlu Y., 2009).

## 2.1. Tünel Açma Yöntemleri

Bu bölümde uygulamada karşılaşılan tünel açma yöntemlerinden bahsedilecektir.

Bu yöntemlerden ilki, Aç – Kapa tünel açma yöntemidir. Bu yöntem yüzeye yakın tünel projelerinde uygulanır. Aç – Kapa tünel açma yönteminde tünel klasik bir inşaat işinde olduğu gibi yeryüzünden tünelin kazılması ve yapım işlerinin projeye göre tamamlanmasının ardından inşa edilen yapının tabii zemin kotuna kadar toprak ile tekrar kapatılması şeklindedir (URL – 2). Şekil 2.1’de Aç – Kapa tünel inşaatı çalışmaları gösterilmiştir.



**Şekil 2.1:** Aç – Kapa Yöntemi ile Tünel açma çalışmaları (URL – 2)

Değinilecek ikinci tünel açma yöntemi Del – Patlat yöntemidir. Bu yöntemle tünel ilerlemesi kazının, tünel kazısının en ileri noktası olan tünel aynası yüzeyine patlayıcılar yerleştirilmesi, bu patlayıcıların patlatılmasının ardından çıkan malzemenin tahliyesi ve tünel çeperinin güçlendirilmesi adımları ile sağlanır (URL – 2). Şekil 2.2’de ve Şekil 2.3’te bir Del – Patlat uygulaması gösterilmiştir.



**Şekil 2.2:** Del – Patlat uygulamasında patlayıcıların yerleştirilmesi (URL – 2)



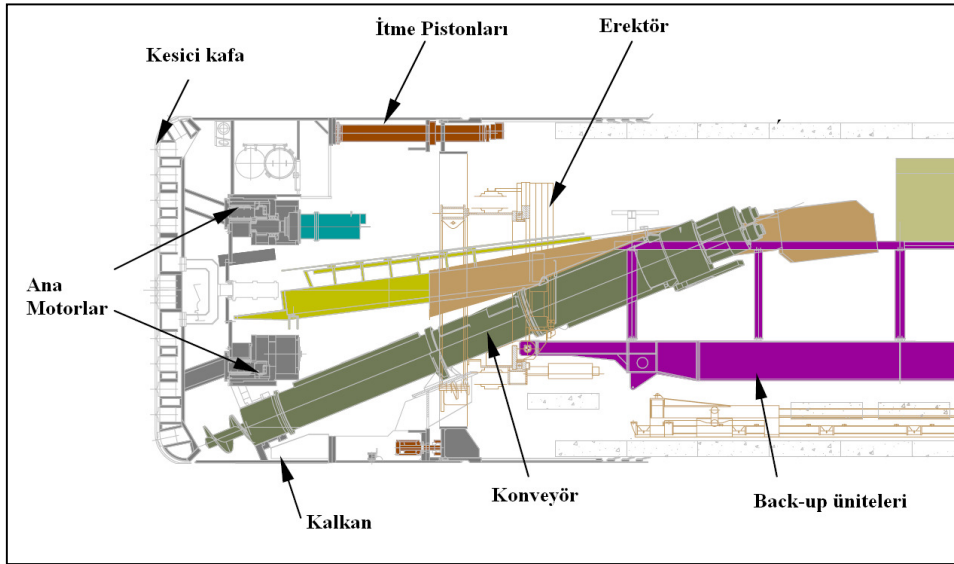
**Şekil 2.3:** Del – Patlat uygulamasında patlama sonrası tünel görünümü (URL – 2)

Yeni Avusturya Tünel Açma yöntemi (NATM) de sıklıkla uygulanan bir diğer tünel açma yöntemidir. NATM yönteminde tünel kazısı projeye göre iş makineleri tarafından yapılır ve kazının yapılmasının ardından tünel çeperine hasır çelik, iksa ve püskürtme beton kullanılarak geçici tahkimat ile güçlendirilir. Geçici tahkimatın ardından kemer kalıplar kullanılarak kalıcı tahkimat yapılır. Bu yöntemle ilgili en önemli unsur, ayrıntılarına bu çalışmada değinilmeyecek olan ancak ayrıntılı ölçme çalışmaları gerektiren kaya deformasyonlarının sürekli olarak izlenmesine ihtiyaç duyulmasıdır. Bahsi geçen geçici tahkimat, bu kaya deformasyonlarına kontrollü olarak izin vererek zemin hareketinin zaman içerisinde durağanlaştırılması amaçlı uygulanır (Ademoğlu Y., 2009). Şekil 2.4'te NATM yöntemi ile kazılan bir tünel görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 2.4:** NATM tüneline kazı çalışmaları (URL – 3)

Çalışmada değinilecek olan son tünel açma yöntemi Tünel Açma Makineleridir. TBM'ler tünel kazısını kesici başlık olarak adlandırılan dairesel kazı ünitesini kullanarak tam cepheli olarak yapar. Kazı sonucunda oluşan zemin artığı malzeme kazının yapıldığı zeminin cinsine bağlı olarak bantlar veya konveyör sistemler kullanılarak kesici baştan arka ünitelere aktarılırlar. Kazı yapılmakta iken Şekil 2.5'da gösterilen TBM elemanları şeklinde de görülen itme pistonları yardımı ile TBM ilerler. TBM ilerlemesi tünelin iç çeperini oluşturacak olan prekast halka boyutlarına geldiğinde tünel kazısı durur ve erektör kullanılarak prekast halka inşa edilir. Prestkast halka inşası TBM'in kalkan olarak adlandırılan bölümünde yapılır. Bir sonraki ilerlemede bu halka kalkandan kurtulur ve tünel ilerlemesi ve inşası bu adımlar tekrarlanarak devam eder.



Şekil 2.5: Tünel açma makinası örnek kesiti (Lee A.H.S., 2007)

## 2.2. Tünel Kazılarının Yönlendirilmesi

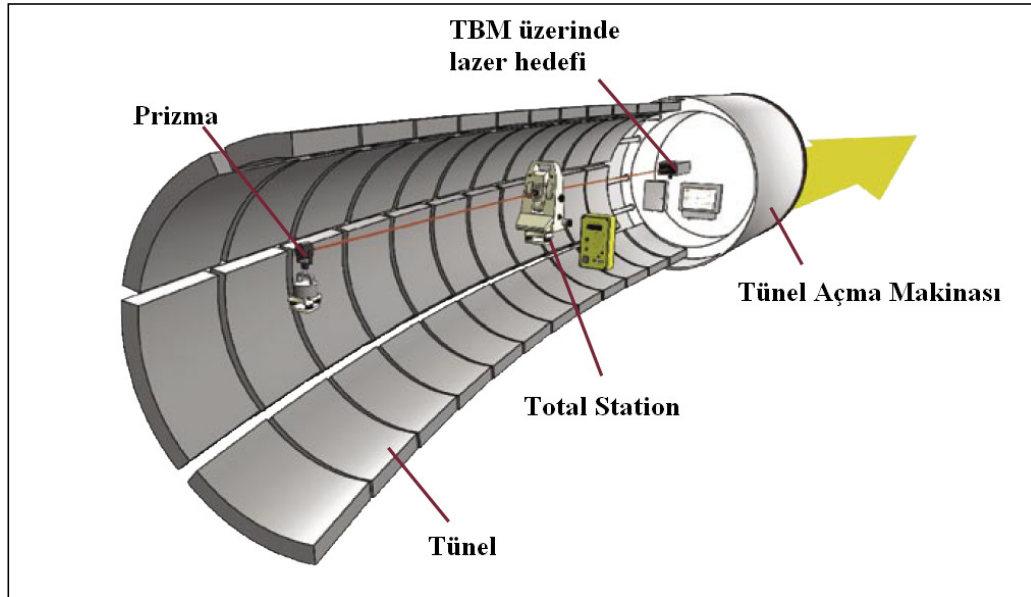
Tünel kazıları, ayrıntılı olarak çalışmanın üçüncü bölümünde anlatılacak olan tünel içi yatay kontrol ağı noktaları kullanılarak yönlendirilir. Çalışmada tünel kazılarının yönlendirilmesi TBM tünel açma yöntemi ile açılan tünellerin yönlendirilmesi ve diğer tünel açma yöntemleri kullanılarak açılan tünellerin yönlendirilmesi olarak ikiye ayrılacaktır.

TBM kullanılarak tünel açılırken TBM'in projede tasarlanan tünel eksenini üzerinde yönlendirilmesi, TBM'in bu eksene göre konumunun sürekli tespit edilerek sayısal

ve görsel olarak TBM'i yönlendiren operatöre aktarılması ile mümkündür. Bu nedenle günümüzde bu görevleri otomatik ölçme ve veri aktarım ve hesaplama ve görselleştirme programları kullanarak yapan TBM yönlendirme sistemleri tasarlanmıştır.

TBM tünellerinde yaygın olarak Geodata, PPS, SLS-T, ZED, ACS yönlendirme sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemlerin üretici firmalara göre birbirinden çok ufak şekilde farkları olsa da temel yaklaşımları aynıdır. Proje koordinat sisteminde konumu bilinen bir noktaya kurulmuş total station ve prizma ve total station ile eş güdümlü çalışan lazer yardımı ile TBM üzerinde belirlenmiş koordinatları TBM koordinat sisteminde bilinen noktaların sürekli olarak proje koordinat sisteminde koordinatlandırılması ve TBM'in eksene göre durumunun hesaplanıp görselleştirilmesi, yönlendirme sistemlerinin temel çalışma şeklini oluşturur (Ademoğlu Y., 2009).

Şekil 2.6'da SLS-T yönlendirme sisteminin anlatılan temel çalışma şeklini gösteren çizim görülmektedir.

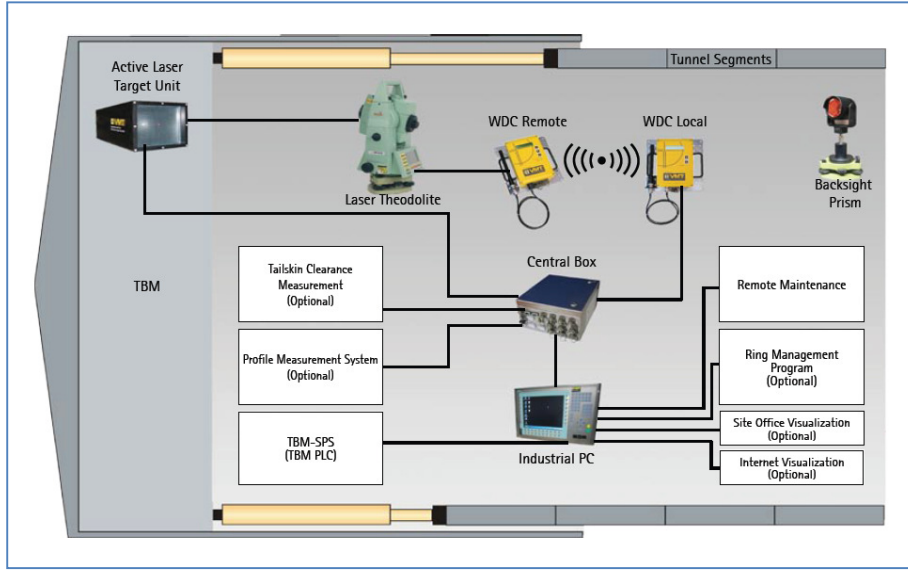


**Şekil 2.6:** SLS-T yönlendirme sistemi elemanları (URL – 4)

Şekil 2.7'de SLS-T yönlendirme sisteminin işleyişini sağlayan parçalar ve bunların ilişkileri gösterilmiştir.

Bölümün başında da bahsedildiği gibi total station ile TBM üzerinde bulunan ve SLS-T yönlendirme sisteminde aktif lazer ünitesi olarak adlandırılan hedefe ölçmeler

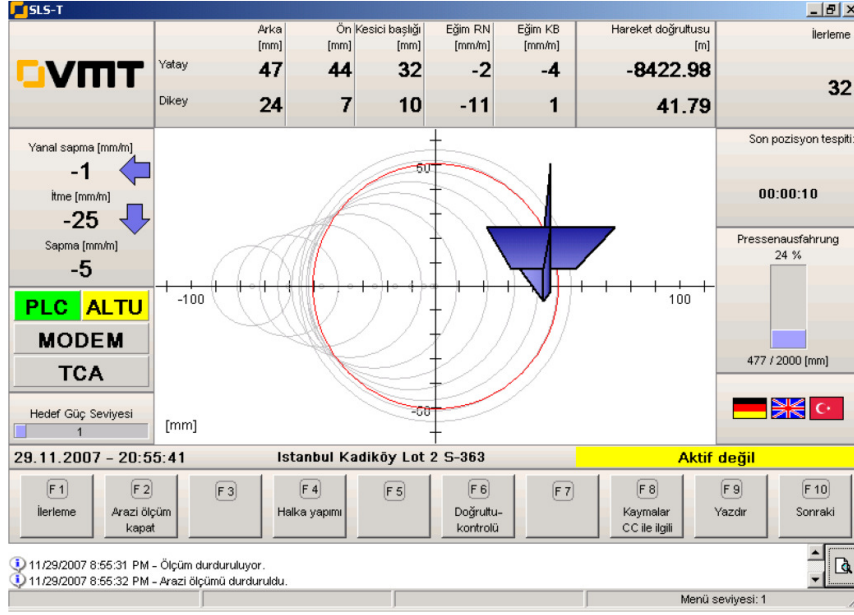
yapılarak TBM'in tünel eksenine göre konumu görselleştirilmektedir. Bahsedilen yönlendirme sistemleri TBM'in ekseninde üzerinde yönlendirilmesinin yanı sıra prekast halkaların yerleştirilmesi ile ilgili hesaplamalar da yapabilmektedirler.



**Şekil 2.7:** SLS-T yönlendirme sistemi parçaları (URL – 4)

SLS-T yönlendirme sisteminde TBM pozisyonunun görselleştirildiği ekran görüntüsüne Şekil 2.8'dan ulaşılabılır. TBM'in tasarlanmış tünel eksenindeki kilometresi, TBM'in kesici başlık, TBM kalkanının orta noktası ve arka noktası gibi bölümlerinin eksene göre konumları bu ekran görüntüsü ile hem sayısal hem de görsel olarak kazı süresince sürekli yapılan ölçmelerle verilmektedir.





**Şekil 2.8:** SLS-T yönlendirme sistemi ekran görüntüsü (Ademoğlu Y., 2009)

TBM yönlendirme sistemlerinde ölçmelerin yapılabilmesi için tünel tavanına konsollar tesis edilir. Tünel tavanına tesis edilen bu konsollar üzerine total station ve prizma kurularak ölçmeler yapılır. Şekil 2.9 ve Şekil 2.10'da yönlendirme sistemi için kullanılan konsol tesisleri görülebilir.



**Şekil 2.9:** Total station kurulmuş yönlendirme konsolu (Ademoğlu Y., 2009)



**Şekil 2.10:** Reflektör kurulu yönlendirme konsolu (Ünlütepe A., Messing M., 2005)

TBM tünel açma yöntemi ile açılmayan Del – Patlat, Aç – Kapa, NATM gibi yöntemlerde ise tünel ilerlemesinin yönlendirilmesi, ilerleme süresince kullanılacak olan proje yapılarının nokta konumlarının proje koordinat sisteminde tanımlı noktalar yardımıyla aplikasyon açılı ve kenarları hesaplanarak tünel içinde aplikasyonu ile yapılır.



### **3. TÜNEL YATAY KONTROL AĞLARI**

Tünellerde yapılan yapım ve önceki bölümde bahsedilen tünel yönlendirilmesi gibi inşaat işlerinin projeye uygun olarak yapılabilmesi için tünel yatay kontrol ağlarının tesisine ihtiyaç vardır. Bu ağlar, kullanılmaları amaçlarına göre yatay ve düşey kontrol ağları olarak ikiye ayrılabilir. Ancak çalışmanın konusu içerisinde sadece yatay kontrol ağlarından bahsedilecektir.

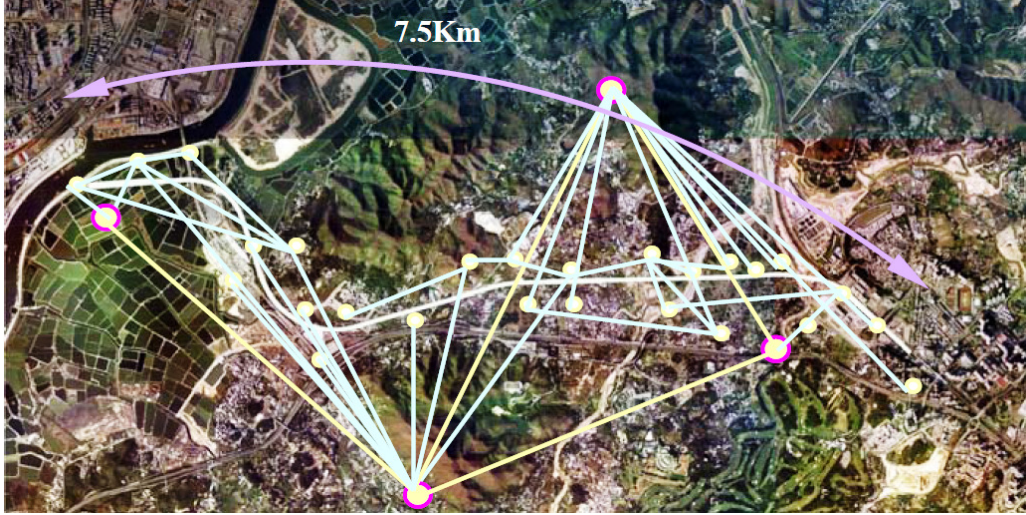
Yatay kontrol ağları tünel açma çalışmalarında yüzey yatay kontrol ağı ve tünel içi yatay kontrol ağı olmak üzere ikiye ayrılır.

#### **3.1. Yüzey Yatay Kontrol Ağları**

Yüzey yatay kontrol ağlarının doğruluğu, tünel açma çalışmalarında doğru bir başlangıç yapılması için önemli etkenlerden biridir (Ademoğlu Y., 2009).

Projede kullanılacak olan yüzey yatay kontrol ağı tünel güzergahı boyunca proje alanını içine alacak şekilde oluşturulur. Günümüzde uydu bazlı ölçme yöntemleri olan GPS ve GNSS teknolojileri önemli gelişmeler kaydetmiştir. Bu nedenle yüzey yatay kontrol ağlarının oluşturulmasında uydu bazlı ölçmeler ve yersel ölçmeler birlikte kullanılmaktadır. Uzun tünel projelerinde ana kontrol ağı tesisinden sonra sıklaştırma yapılmaktadır. İkincil ağlar ihtiyaç doğrultusunda, örneğin tünel portallarının ya da shaftların yakınlarında tesis edilmektedirler. Nokta tesisleri genelde geleneksel yer noktası ya da pilye olarak yapılır (Ademoğlu Y., 2009).

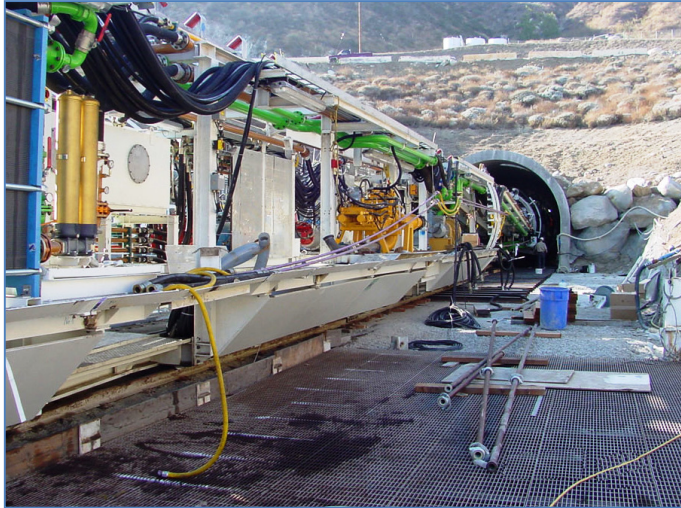
Şekil 3.1'de 7.5 kilometre uzunluğundaki bir tünel güzergahını ve proje alanını kapsayacak şekilde tesis yerleri belirlenmiş yüzey ağı örneği görülmektedir.



**Şekil 3.1:** Tünel projesi için yüzey ağı örneği (Lee A.H.S., 2007)

### **3.2. Yüzey Yatay Kontrol Ağından Tünel İçi Yatay Kontrol Ağına Koordinat Transferi**

Tünel içi yatay kontrol ağının oluşturulması, kontrol ağına ihtiyaç duyulan proje bölümündeki tünel yaklaşım yapılarının türüne bağlıdır. Tünel yapım çalışmalarında portal ve shaft olmak üzere iki tür yaklaşım yapısı vardır. Şekil 3.2’de görüleceği gibi portal yaklaşım yapıları yer yüzünün belli bir yerinden kazıya başlanarak yaklaşık yatay doğrultuda ilerleyen yaklaşım yapılarıdır.



**Şekil 3.2:** Portal yaklaşım yapısı girişinde TBM (URL – 5)

Portal yaklaşım yapılarında genellikle tünel girişinin büyük bir kısmı yüzey kontrol ağı noktaları kullanılarak gözlenebilir. Bu nedenle tünel içi yatay kontrol ağı, klasik yersel ölçme yöntemleri kullanılarak doğrudan koordinatlandırılabilir.

Tünel açma çalışmalarında kullanılan yaklaşım yapılarından ikincisi düşey şaftlardır. Şaftlar yeryüzünden düşey doğrultuda tünel ekseninin tasarlandığı derinliğe kadar uzanan genel olarak dairesel tasarımlı yapılardır. Şekil 3.3'te inşaat aşamasında bir düşey şaft gösterilmiştir.



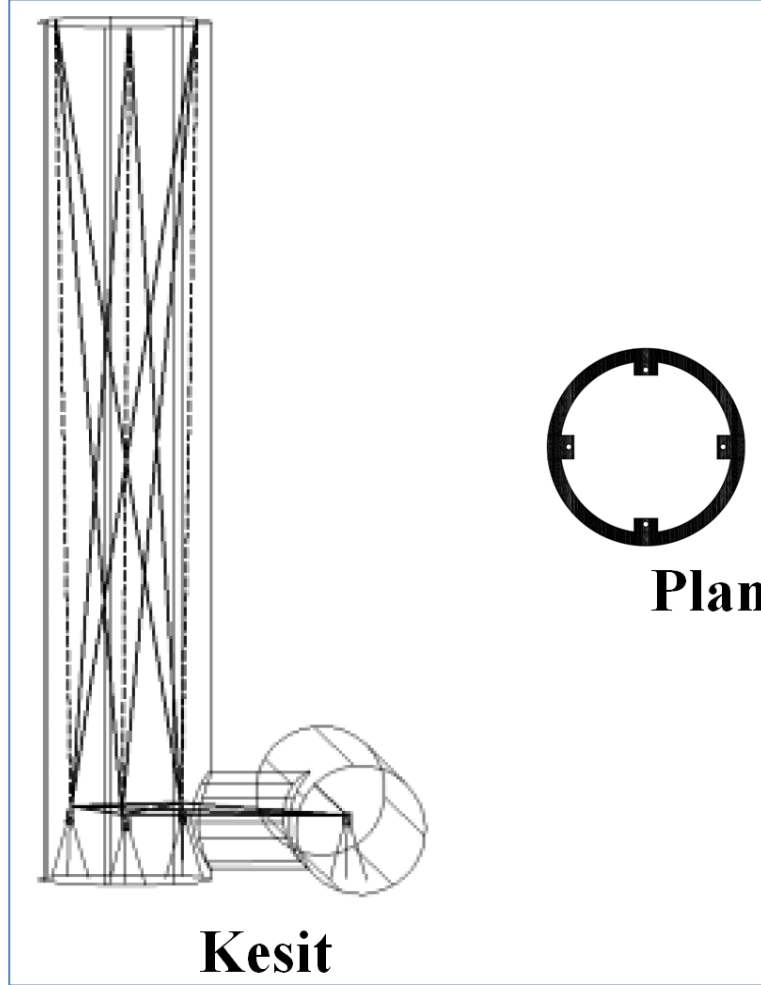
**Şekil 3.3:** Düşey şaft inşaatı (URL – 3)

Şaftlarda, şaftların derinliğine bağlı olarak yüzey yatay kontrol ağı noktaları kullanılarak şaft altındaki tünel içi yatay kontrol ağına ait noktalara koordinat transfer edilir. Ancak şaftlar sıklıkla yüzey yatay kontrol ağı noktalarından gözlem yapmaya izin vermeyecek kadar derindir. Bu nedenle kaynaklarda çekülleme olarak da değinilen bu çalışmaların birkaç farklı örneğine değinilecektir.

### 3.2.1. CERN Parçacık Hızlandırıcı Tünelleri şaft yaklaşım yapılarında koordinat transferi örneği

Bu projede tünel içi yatay kontrol ağı şaft üzerinde tesis edilmiş yüzey yatay kontrol ağı noktalarının optik çeküller kullanılarak şaft altına izdüşürülmesi ile yapılmıştır.

Uygulamada Wild marka ZL optik zenit çekülü kullanılmıştır. Çekül çizgisinin şaft duvarı yakınından geçiyor olması nedeniyle hata kaynakları Bölüm 3.4’te değinilen refraksiyon etkisi göz önünde bulundurulmuştur. Şaft üstü noktaları izdüşüm noktalarından takeometrik olarak gözlemlenerek eksen hatalarının önüne geçilmeye çalışılmıştır (Glaus R., Ingensand H., 2002). Şekil 3.4’te uygulamanın yapılışı gösterilmiştir.

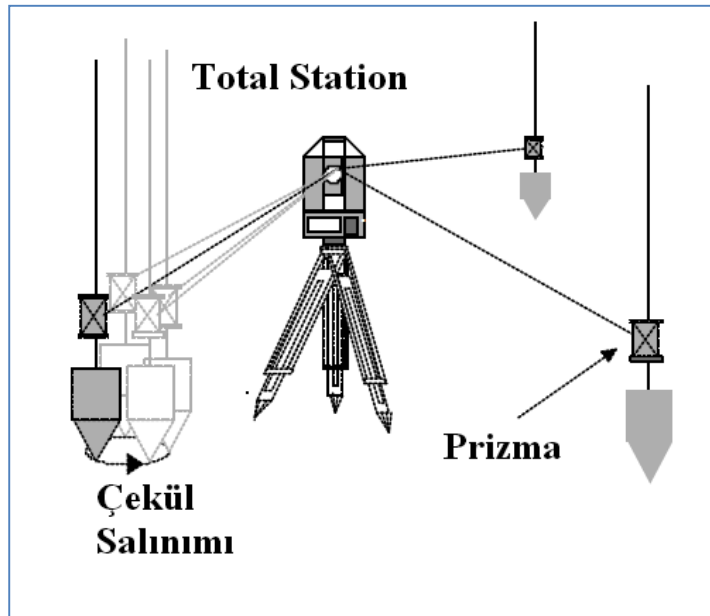


Şekil 3.4: CERN projesinde koordinat transferi (Glaus R., Ingensand H., 2002)



### 3.2.2. Gotthard Base Tüneli Projesi şaft yaklaşım yapılarında koordinat transferi örneği

Gotthard'da yapılan uygulamada şaft üstüne tesis edilen yüzey yatay kontrol ağı noktaları, şaft altına klasik çeküller, prizmalar ve otomatik hedef bulan total stationlar kullanılarak izdüşürülmüştür. Şekil 3.5'te de görüldüğü gibi çeküller üzerine monte edilen prizmalar total station kullanılarak sürekli olarak gözlenmiş, ölçmeler sonrasında çekül salınımlarının sönümlendiği anlaşılana kadar ölçmeler devam ettirilmiştir. Çekül salınımlarının sönümlenmesinin ardından izdüşüm noktaları tesis edilmiştir (Ingensand H., Ryf A., Stengele R., 1998).



**Şekil 3.5:** Gotthard Projesinde koordinat transferi (Ingensand H.,ve diğ. , 1998)

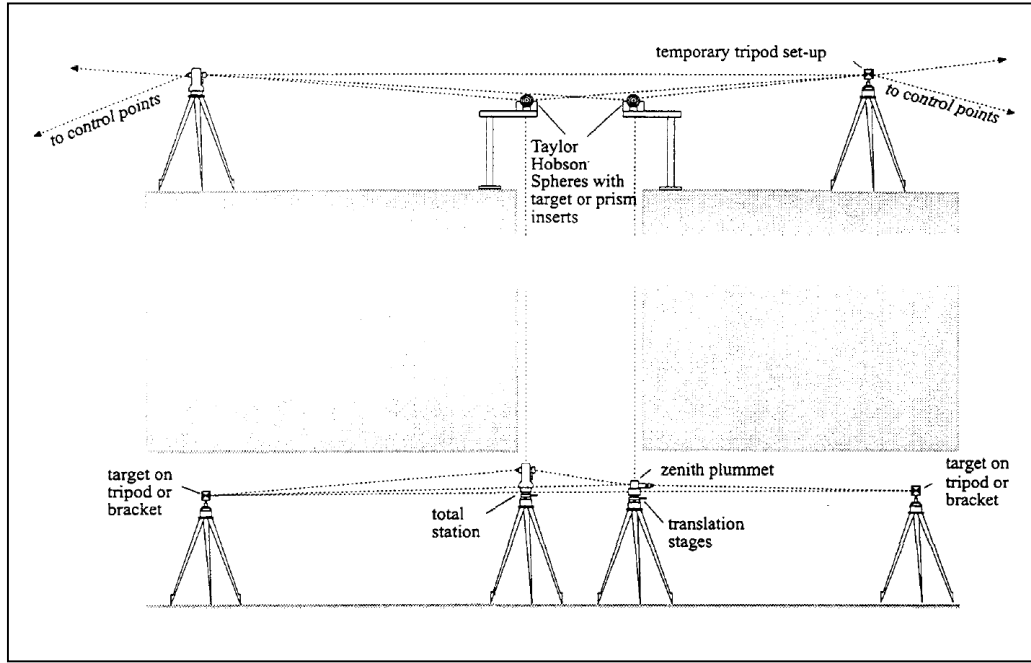
Gotthard örneğinde uygulama 800 metre derinliğinde, 8 metre çapındaki dairesel bir şaftta yapılmıştır. Şaftın derinliği de göz önünde bulundurularak iz düşüm noktaları gyro-teodolit ölçmeleri yapılarak kontrol edilmiş, gerekli kontroller sonrası gerekli görülen düzeltmeler şaft altı noktalarına yansıtılmıştır (Ingensand H., Ryf A., Stengele R., 1998).

### 3.2.3. Süper İletken Parçacık Hızlandırıcı (SSC) Tünelleri Projesi şaft yaklaşım yapılarında koordinat transferi örneği

SSC projesinde tünel içi yatay kontrol ağının koordinatlandırılması için şaft çevresinde iki veya daha fazla geçici nokta tesis edilmiştir. Bu noktalar, şaft üstüne

tesis edilen birçok mühendislik uygulamasında yüksek doğruluklu doğrultu belirlemek için kullanılan prizmalı Taylor – Hobson küreleri ile düzgün üçgenler oluşturacak şekilde konumlandırılmıştır (URL – 6). Geçici noktalar kullanılarak yüzey yatay kontrol ağı noktalarından Taylor – Hubson kürelerine açı ve kenar ölçmeleri yapılmıştır. Aynı zamanda şaft altına iki geçici nokta tesisi yapılmıştır. Sehpalar Wild marka ZL optik zenit çekülü kullanılarak Taylor – Hubson kürelerinin tesis edildiği şaft üstü noktalarının şaft altındaki izdüşümlerinde merkezleştirilmiştir (Greening T., Robinson G., Robbins J., Ruland R.).

Merkezlendirme tamamlandıktan sonra ZL zenit çekülü total station ile yer değiştirilerek konum bilgisi tünel içi yatay kontrol ağı noktalarına aktarılmıştır. Şekil 3.6’da uygulamayı anlatan çizimler verilmektedir.



**Şekil 3.6:** SSC Projesinde koordinat transferi (Greening T., ve diğ.)

Kaynaklarda SSC projesinde uygulanan yöntemin 80 metre derinliğindeki şaft içi izdüşüm noktalarının nokta konum doğruluğunda 0.5mm’den daha iyi sonuç verdiği değerlendirilmiştir (Greening T., Robinson G., Robbins J., Ruland R.).

### 3.3. Tünel İçi Yatay Kontrol Ağı

Tüneller dar ve uzun geometrileri nedeniyle tünel içerisinde kapalı geometrilerin tanımlanması için elverişli değildir. Bu nedenle tünel içinde tesis edilen kontrol

noktalarının konumlandırılması ve konum bilgilerinin üretilmesi sıklıkla ucu açık olarak kazı ilerlemesi yönünde koordinatı tesis edilen noktalara göre daha yüksek doğruluklu olan noktalara bağlanmaksızın açık poligon dizileri şeklinde gerçekleştirilir (Ademoğlu Y., 2009).

Tünel açma yöntemine bağlı olarak, tünel yatay kontrol ağı noktaları tünel yan duvarlarına, nadiren sadece gözlem amaçlı olarak tünel tavanına, tünel içindeki araç trafiğinden etkilenmemesi sağlandığı sürece de tünel tabanında gerçekleştirilebilir (Ademoğlu Y., 2009).

Tünel içindeki inşaat işlerinin uygulanmasında ve tünel yönlendirilmesinde kullanılacak olan bu noktaların konum doğruluklarının yapım toleranslarını anlatan Bölüm 3.6.1.'de bahsedilecek olan kısıtlamaları sağlaması istenir. Bu nedenle tünel ağının belirlenecek ağ tasarımına göre tesis edilmesinden nokta tesis şekillerine ve hesap yöntemine kadar geçen süreç yüksek maliyetlerdeki bu inşaat çalışmaları için büyük öneme sahiptir. Tünel içi yatay kontrol ağlarının tasarımı ile ilgili ayrıntılı bilgi Bölüm 4'te verilecektir.

### **3.4. Tünel İçi Yatay Kontrol Ağlarında Hata Kaynakları**

Yeryüzünde yapılan ölçmelerde söz konusu olan kullanıcıya bağlı hatalar, kullanılan aletlerin yapım ve düzenlenmesindeki eksikliklere bağlı hatalar ve ölçmenin yapıldığı atmosferik koşullara bağlı hatalar, tünellerde ve tünellerle ilgili uygulamalarda yapılan ölçme çalışmaları için de söz konusudur. Bu çalışmalarda fazla sayıda ölçme yapmak, aletlerin kontrol ve kalibrasyonlarını yapmak gibi yöntemlerle önüne geçilebilecek sistematik hataların yanında, ölçmelerdeki en önemli hata kaynağı düzensiz hatalardır. Düzensiz hatalar için hatanın yönü ve büyüklüğü değişken olduğu için sistematik bir hata yayılımı göstermezler. Düzensiz hataların yapılan ölçme çalışmalarındaki etkileri ölçmelerin farklı koşullarda tekrarlanması ile azaltılabilir (Ademoğlu Y., 2009).

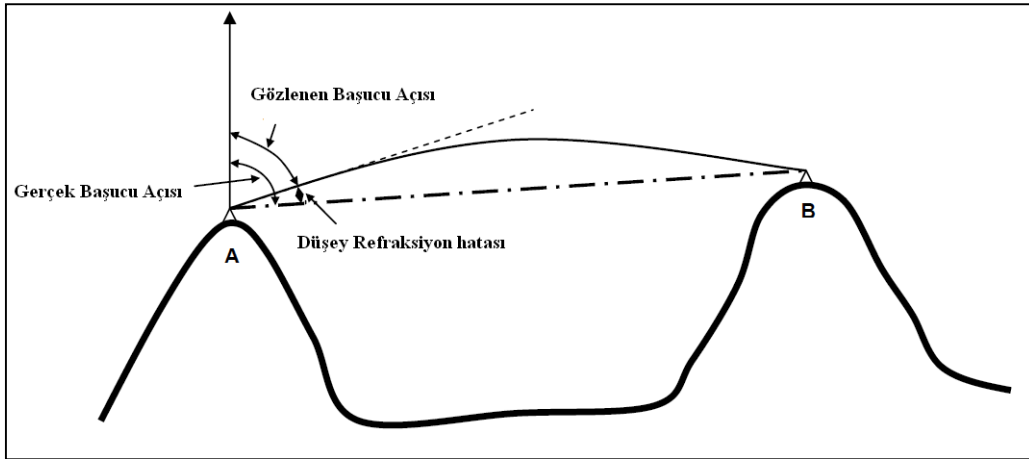
Bu bölümde tünel içi yatay kontrol ağlarının ölçülmesi sırasında karşılaşılabilecek düzensiz karakterdeki hata kaynaklarından ve bunların ölçmelerden asgari düzeyde arındırılmasına imkan verecek ölçme ve hesap yöntemlerinden bahsedilecektir.

### 3.4.1. Yanal refraksiyon

Refraksiyon etkisinin düşeydeki bileşeni Geomatik Mühendislerinin sıklıkla karşılaştıkları bir konudur. Ancak refraksiyon etkisinin düşey bileşeninin yanında yanıl refraksiyon olarak tanımlanan yataydaki yanıl bileşeni çok fazla üzerinde durulan bir konu olmamıştır (Fowler S., 2006).

Yanal refraksiyon, refraksiyonun tünel ekseninden duvara dik olan bileşendir.

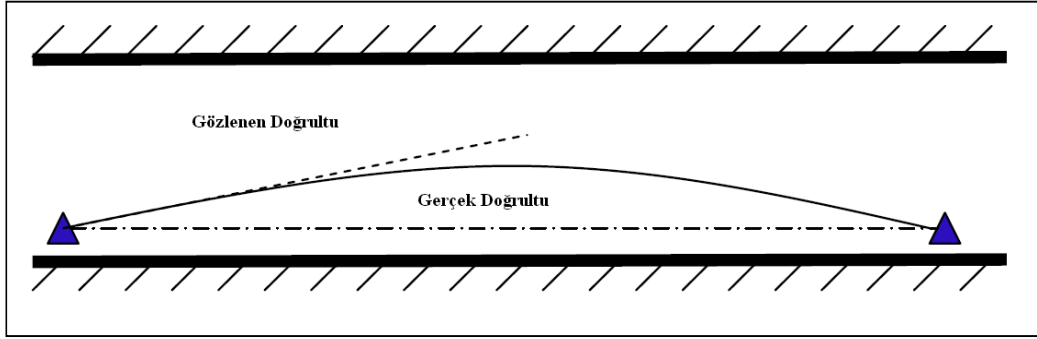
Şekil 3.7’de olduğu gibi iki ayrı tepe üstünde bulunan A ve B noktalarına, yüksekliğin değişmesine bağlı olarak farklı atmosferik koşullar etki eder. Bu da çevrelerindeki havanın yoğunluğunun farklı olması anlamına gelir. Bir ışık ışını, gözlemciye mümkün olan en hızlı yoldan ulaşacağı için ışık ışınının farklı yoğunluklu ortamlar arasında geçiş yaptığı durumlarda ışının izleyeceği doğrultuda sapmalar olacaktır. Buna göre ölçülecek baş ucu açıları gerçek değerlerinden farklılık gösterecektir. Bu durum düşey refraksiyon olarak tanımlanır (Fowler S., 2006).



Şekil 3.7: Düşey refraksiyon (Fowler S., 2006)

Tünellerde aynı prensip yanıl refraksiyon için de geçerlidir. Yer altında tünel duvarı ile çevresindeki hava arasında önemli derecede ısı transferi olur. Bu nedenle yatay sıcaklık değişimi sıcaklık tünel merkezine doğru hareket edeceği için tünel duvarına daha yakındır Basınç ise bir tünelin eşit yükseklikteki kısımlarında genel olarak aynı büyüklüktedir. Bu durum havanın en yoğun olarak tünel duvarı yakınında olacağı sonucunu doğurur. Bu nedenle gözlenen doğrultu da tünel merkezine doğru bir sapma gösterecektir (Fowler S., 2006). Sonuçta oluşan durum Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



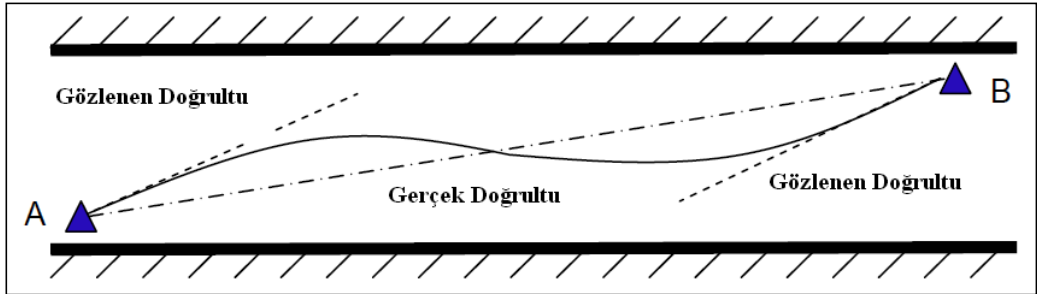


**Şekil 3.8:** Yanal Refraksiyon (Fowler S., 2006)

Şekil 3.18’de de görüldüğü gibi tünelin tek duvarı boyunca tesis edilecek noktalarda aynı yönde sistematik bir hata oluşur. Bu şekilde yönlendirilecek bir tünele etkiyecek hatalar hep aynı yönde olacağından inşaatı yapılan tünelin ekseninin de tek yönlü olarak sapması beklenir (Fowler S., 2006).

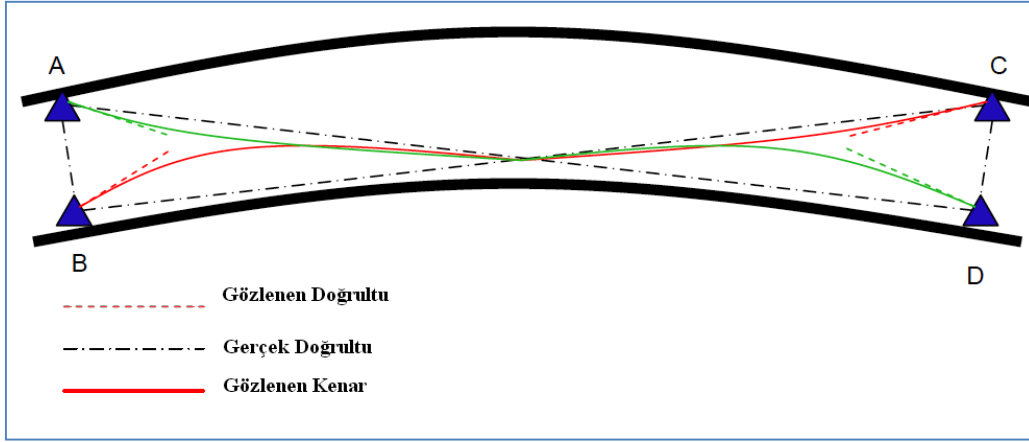
Yanal refraksiyon etkisini en aza indirmenin en etkin yollarından biri kontrol noktalarının çapraz doğrultular oluşturacak şekilde tünelin karşılıklı duvarlarına tesis edilmesidir. Bu yöntem yanıl refraksiyonun ölçmelerdeki etkisini tamamen kaldıramayacaktır ancak oluşan yanıl refraksiyon etkisini karşılıklı hale getirerek toplam hatayı görece küçük bir boyutta tutacaktır (Fowler S., 2006).

Şekil 3.9’da görüleceği gibi çapraz şekilde nokta tesisinde ölçülen kenar S eğrisi benzeri bir form alırken gözlenen doğrultular refraksiyon etkisinde olmasına rağmen farklı yönlerde sistematik olmayan bir duruma gelecektir (Fowler S., 2006).



**Şekil 3.9:** Çapraz nokta tesisinde yanıl refraksiyonun etkisi (Fowler S., 2006)

Bahsedilen yöntem tünel tasarımının alinyman olduğu yerlerde geçerlidir. Tünel ekseninin daire veya klotoid gibi eğrisel olduğu bölümlerinde bu yöntemle benzer olarak Şekil 3.10 benzeri çapraz nokta tesisleri tercih edilmelidir (Fowler S., 2006).



**Şekil 3.10:** Çapraz çift poligon örneği (Fowler S., 2006)

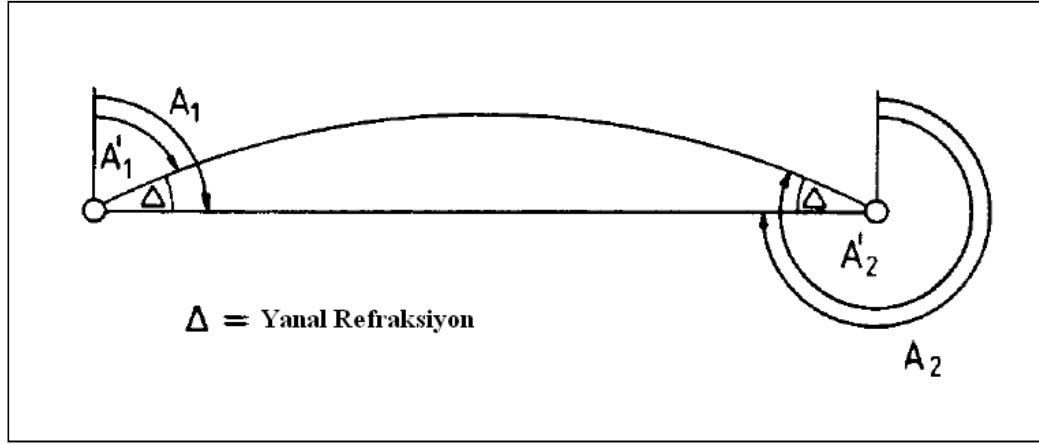
Yanal refraksiyonun ölçmelerdeki etkilerini azaltmanın bir diğer yolu da tünel içi yatay kontrol ağı noktalarında gyro-teodolit ölçmelerinin yapılmasıyla mümkündür.

Gyro-teodolit, açısal momentumun korunumu prensibi ile çalışan bir jiroskopun teodolitle entegre olarak kullanılmasıdır. Gyro-teodolitler kullanılarak kontrol noktalarından yapılacak karşılıklı ölçmeler ile meridyen yönünde coğrafi kuzey ile yapılan açı belirlenebilir (URL – 7).

Bu çalışmada gyro-teodolitlerin çalışma prensipleri ayrıntılandırılmayacaktır ancak çok eski bir ölçme tekniği olmasına rağmen maliyeti ve üretilmiş gyro-teodolit sayısının az olması nedeniyle ülkemizde yapılan ölçme çalışmalarında fazla uygulama alanı bulamamış olan bu tekniğin yatay refraksiyonun ölçmelerdeki etkisinin azaltılmasında nasıl kullanıldığı açıklanacaktır.

#### **3.4.1.1. Gyro-teodolitin yanal refraksiyonun düzeltilmesinde kullanılması**

Bu yöntemde kontrol noktaları gyro-teodolit kullanılarak karşılıklı olarak ölçülmelidir. Karşılıklı ölçmeler sonrası Şekil 3.11’de gösterilen geometri elde edilir.



**Şekil 3.11:** Yanal refraksiyon etkisinin gyro-teodolit ölçmeleri ile azaltılması (Korittke N.)

Şekil 3.11’de gösterilen Gyro-teodolit ölçmeleri (3.1), (3.2), (3.3) ve (3.4) eşitliklerin kullanarak yanıl refraksiyondan arındırılmış doğrultuları hesaplamak mümkündür (Korittke N.).

$$A_1 = A'_1 + \Delta \quad (3.1)$$

$$A_2 = A'_2 + \Delta \quad (3.2)$$

$$A_1 = \frac{A'_1 + A'_2 - 200}{2} + \Delta \quad (3.3)$$

$$A_2 = \frac{A'_1 + A'_2 + 200}{2} + \Delta \quad (3.4)$$

Çizelge 3.1’de Eurotunnel Projesinde uygulanmış gyroteodolit ölçmeleri öncesi ve sonrasındaki doğrultu ölçmelerinden elde edilen açıklık açıları ve açıklık açıları farkının etkisini görmek mümkündür.

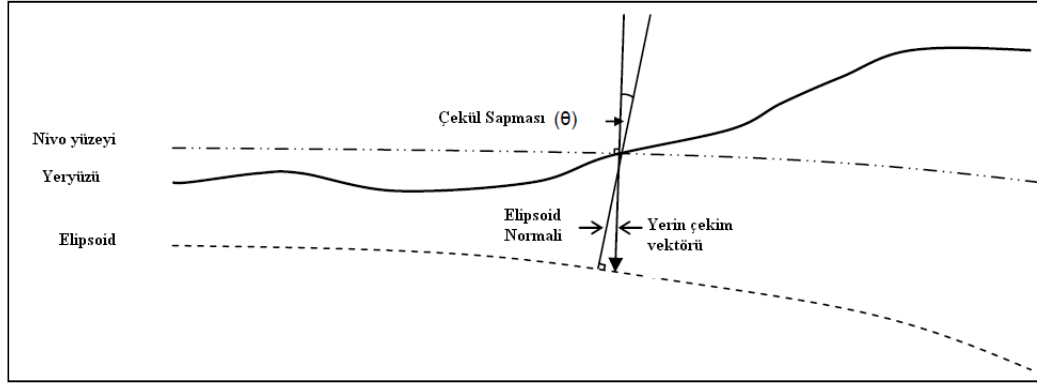
**Çizelge 3.1:** Eurotunnel Projesinde gyro-teodolit ölçmelerinin açıklık açlarına etkisi(Korittke N.)

Durulan	Bakılan	Gyro-Teodolit ile açıklık	Gyro-teodolit dengelemiş açıklık	Fark	Güzergah Boyu (km)	Sapma (mm)
A2/1	A2/2 *	49.4450	49.4457	-0.7	0.372	3
A2/2	MTS2 *	56.5071	56.5080	-0.9	0.499	4
MTS2	MTS1 *	122.8067	122.8074	-0.7	0.655	6
MTS1	17	119.8158	119.8155	+0.3	1.042	4
17	203	121.4786	121.4774	+1.2	1.302	3
203	345	120.8653	120.8631	+2.2	1.516	10
345	384 *	128.1011	128.0979	+3.2	1.575	12
384	423	119.5116	119.5079	+3.7	1.634	16
423	485	127.8503	127.8461	+4.2	1.728	22
485	548	123.1891	123.1844	+4.7	1.822	29
548	644	128.8531	128.8478	+5.3	1.967	41
644	691	124.4496	124.4437	+5.9	2.038	48
691	770 *	131.4425	131.4360	+6.5	2.158	60
770	852	128.4224	128.4145	+7.9	2.280	75
852	952	133.2877	133.2783	+9.4	2.431	97
952	1113	130.6273	130.6165	+10.8	2.673	138
1113	1280 *	132.7052	132.6930	+12.2	2.924	187
1280	1389 *	130.0523	130.0395	+12.8	3.088	220
1389	1680 *	132.2658	132.2527	+13.1	3.526	310
1680	1775 *	129.8136	129.8003	+13.3	3.669	340
1775	1880 *	133.3176	133.3037	+13.9	3.827	374
1880	2070 *	130.7208	130.7062	+14.6	4.113	440
2070	2175 *	133.3090	133.2939	+15.1	4.271	477
2175	2469 *	131.0435	131.0287	+14.8	4.713	580
2469	2569 *	133.3729	133.3580	+14.9	4.863	615
2569	2695 *	130.2317	130.2162	+15.5	5.052	661
2695	2815 *	133.0986	133.0822	+16.4	5.232	708
2815	3066 *	130.9558	130.9387	+17.1	5.609	809
3066	3178 *	133.2237	133.2060	+17.7	5.777	856
3178	3289 *	130.1029	130.0851	+17.8	5.944	903
3289	3410 *	131.6857	131.6682	+17.5	6.126	953
3410	3515	131.6927	131.6749	+17.8	6.284	988
3515	3650 *	131.6781	131.6605	+17.6	6.487	1052

\* Gyroteodolit ölçmeleri ile poligon dizisi

### 3.4.2. Çekül sapması

Çekül sapması, bir noktada elipsoid normali ile çekül doğrultusu veya başka bir deyişle yerçekiminin oluşturduğu vektör arasında kalan açı olarak tanımlanır. Çekül sapması aynı zamanda elipsoid normali ile nivo yüzeyinin normal bileşeninin ölçüsüdür (Fowler S., 2006). Şekil 3.12’de yukarıda anlatılan çekül sapması gösterilmiştir.



**Şekil 3.12:** Çekül sapması (Fowler S., 2006)

Vektörel bir büyüklük olan çekül sapması karşılıklı birbirine dik iki bileşene ayrılır. Bunlardan birincisi kuzey – güney doğrultusunda artış yönü kuzey olmak üzere “ $\zeta$ ” bileşeni ve doğu – batı doğrultusunda doğu yönünde artan “ $\eta$ ” bileşenidir. Çekül sapması bileşenlerine Pisagor teoremi uygulanarak (3.5) eşitliğinden çekül sapmasını hesaplamak mümkündür (Fowler S., 2006).

$$\theta^2 = \zeta^2 + \eta^2 \quad (3.5)$$

(3.5) eşitliğinden yararlanarak  $\alpha$  gibi bir azimut boyunca çekül sapması

$$\theta = \zeta \cos \alpha + \eta \sin \alpha \quad (3.6)$$

eşitliği ile çözümlenebilir (Fowler S., 2006).

Burada önemli olan, çekül sapmasını, çekül doğrultusu boyunca farklılık göstereceği için çekül sapması hesabının uygulandığı noktayı tam olarak belirleyebilmektir. Ayrıca yer çekiminin yönü de çekül doğrultusu boyunca değişkendir. Yeryüzünün altındaki kütle dağılımının homojen olmaması nivo yüzeyinin ve çekül doğrultusunun eğrisel olmasına neden olmaktadır. Buna bağlı olarak çekül sapması, geoid yüzeyinde veya dünya yeryüzünde bulunan herhangi bir nokta için tanımlanabilir (Featherstone W.E., 1999).

Yeryüzündeki çekül sapmasının pratik uygulaması, ölçmeler yeryüzünde yapıldığı için geoid üzerinde çekül sapmasının hesaplanmasından daha yaygındır. Yeryüzündeki herhangi bir noktadaki çekül sapması  $\theta_s$  noktanın astronomik ve jeodezik koordinatları kullanılarak hesaplanabilir. Yeryüzündeki herhangi bir A noktasında  $\Phi$  astronomik enlem,  $\phi$  jeodezik enlem,  $\Lambda$  astronomik boylam ve  $\lambda$  jeodezik boylam olmak üzere yeryüzünde çekül sapması bileşenleri

$$\zeta_s = \Phi - \phi \quad (3.7)$$

$$\eta_s = (\Lambda - \lambda) \cos \phi \quad (3.8)$$

eşitlikleri ile hesaplanır (Featherstone W.E., 1999).

Yersel ölçmelerde çekül sapmasının üç kullanım alanı mevcuttur:

- Astronomik koordinatların jeodezik koordinatlara transformasyonu
- Astronomik azimutun jeodezik azimuta dönüştürülmesi
- Yatay ve düşey açıların sferoide redüksiyonu

Bu uygulama alanlarından yatay ve düşey açıların redüksiyonu, ölçmeleri ilgilendirdiği için çalışmanın konusu kapsamında öneme sahiptir ve bu nedenle sadece açı redüksiyonları incelenecektir.

Yeryüzünde yapılan ölçmelerde, alet ve hedef aynı düzlemde olmadığı sürece çekül sapması düzeltilmesi getirilmelidir. Buna göre  $d$  düzeltilmiş doğrultu,  $D$  ölçülen doğrultu  $z$ , düşey açı,  $\alpha$  jeodezik azimut  $A$  astronomik azimut ve  $\phi$  jeodezik enlem olmak üzere

$$d = D - (\zeta_s \sin \alpha - \eta_s \cos \alpha) \tan(90 - z) \quad (3.9)$$

$$\alpha = A - (\eta_s \tan \phi) \quad (3.10)$$

eşitlikleri geçerlidir (Featherstone W.E., 1999).

Ölçülen düşey açıları da yatay açılarda olduğu gibi düzeltilmelidirler. Düzeltilmiş düşey açıları,  $z$  düzeltilmiş zenit açısı,  $Z$  ölçülen zenit açısı olmak üzere

$$z = Z + (\zeta_s \sin \alpha + \eta_s \cos \alpha) \quad (3.11)$$

$$\alpha = A - (\eta_s \tan \phi) \quad (3.12)$$

eşitlikleri ile hesaplanır (Featherstone W.E., 1999).

### 3.4.3. Kaya deformasyonları

Tünel inşaatı sırasında oluşan kaya deformasyonları, kontrol noktalarının yer değiştirmesine neden olabilirler. Konverjans olarak da bilinen bu kaya hareketleri tüneli çevreleyen jeodezik güçler neden olur.

Kaya deformasyonlarının neden olduğu yer değiştirmelerin tünel içindeki kontrol ağı noktalarına etkisinin en aza indirilebilmesi için kontrol ağı noktaları belirli aralıklarla düzenli olarak ölçülmelidir. Böylece farklı zamanlarda oluşabilecek kaya deformasyonları tesbit edilebilir (Fowler S., 2006).

### **3.5. En Küçük Kareler Yöntemi ve En Küçük Kareler Yöntemi Kullanılarak Dengeleme Hesabının Yapılması**

Bu bölüme kadar tünel ağlarından ve hata kaynaklarından bahsedilmiştir. Bu bilgilendirmeye ek olarak ilerleyen Bölüm 4.'te bahsedilecek olan aę tasarımları ve çalışmanın sonunda yer alan uygulama örneğinde kullanılacak ve ülkemizde tünel açma uygulamalarında nadiren tercih edilen bir hesap yöntemi olması nedeniyle en küçük kareler yöntemi ile dengeleme hesabının anlatılmasının tünel açma uygulamalarında kullanılmak üzere düzenli bir kaynak olarak yarar sağlayacağı düşünülmüştür.

#### **3.5.1. En küçük kareler yöntemi**

Gözlenen ölçüler geometrik kısıtlar olarak bilinen sayısal eşitlikleri sağlamalıdır. Örneğin kapalı  $n$  adet kenara sahip bir poligon ağında

$$iç\ açılar\ toplamı = (n - 2)180^o \quad (3.13)$$

olmalıdır. Ancak ölçmeler dengelenmediği sürece geometrik kısıtlamalar nadiren sağlanabilir (Ghilani C. D., Wolf P. R., 2006).

Ölçmelerdeki hatalar olasılık yasaları ile ifade edilir ve dengelenebilmeleri için normal dağılım teorisine uygun olmaları beklenir. Normal dağılım

$$F_x(t) = \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2\sigma^2} dx \quad (3.13)$$

fonksiyonu ile ifade edilir (Ghilani C. D., Wolf P. R., 2006).

$z_1, z_2, \dots, z_n$  aynı  $z$  niceliğine ait bağımsız, eşit ağırlıklı ölçmeler olmak üzere bunların en olasılıklı değerlerine  $M$  denilirse

$$\begin{aligned}
M - z_1 &= v_1 \\
M - z_2 &= v_2 \\
&\vdots \\
M - z_n &= v_n
\end{aligned} \tag{3.14}$$

olur. (3.14) eşitliklerinde  $v$  ölçülerin düzeltme değerlerini ifade eder. Düzeltmeler hatalarla aynı davranış karakterine sahiptirler ve bu şekilde normal dağılım fonksiyonunda  $x$ ,  $v$  ile yer değiştirilirse

$$\begin{aligned}
h &= \frac{1}{\sigma\sqrt{2}} \\
K &= \frac{h}{\sqrt{\pi}}
\end{aligned} \tag{3.15}$$

$$f_x(v) = y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-v^2/2\sigma^2} = K e^{-h^2 v^2}$$

eşitlikleri elde edilir (Ghilani C. D., Wolf P. R., 2006).

Olasılıklar, (3.13) eşitlikleri ile verilen normal dağılım fonksiyonunun altında kalan olarak ifade edilirler. Düzeltmelerin tek tek rastlanma olasılıkları  $v_1, v_2, \dots, v_n$  düzeltme değerlerinin  $y_1, y_2, \dots, y_n$  değerleri ile çarpımından elde edilebilir. (Ghilani C. D., Wolf P. R., 2006) Bu çarpma işleminin sonucunda (3.16) olasılık eşitliklerine ulaşılır.

$$\begin{aligned}
P_1 &= y_1 \Delta v = K e^{-h^2 v_1^2} \Delta v \\
P_2 &= y_2 \Delta v = K e^{-h^2 v_2^2} \Delta v \\
&\vdots \\
P_n &= y_n \Delta v = K e^{-h^2 v_n^2} \Delta v
\end{aligned} \tag{3.16}$$

(3.16) eşitliklerinde iki ayrı olayın eş zamanlı meydana gelmesinin olasılığı ise

$$P = P_1 \times P_2 \times \dots \times P_n \tag{3.17}$$

eşitliği ile hesaplanır (Ghilani C. D., Wolf P. R., 2006).

(3.17) eşitliğinde (3.16) eşitlikleri yerine koyulursa, düzeltmelerin eş zamanlı meydana gelme olasılıkları

$$P = (K e^{-h^2 v_1^2} \Delta v) \times (K e^{-h^2 v_2^2} \Delta v) \times \dots \times (K e^{-h^2 v_n^2} \Delta v) \tag{3.18}$$

olur. (3.18) eşitliği sadeleştirilirse,



$$P = K^n (\Delta v)^n e^{-h^2(v_1^2+v_2^2+\dots+v_n^2)} \quad (3.19)$$

elde edilir (Ghilani C. D., Wolf P. R., 2006).

Bölümün başında da bahsedildiği gibi  $M$ ,  $z$  ölçmesinin en olasılıklı değeridir ve bunun sonucu olarak  $M$  değerine göre  $z$  değerleri hesaplanırsa  $P$  en yüksek değerini alacaktır. (3.19) eşitliğine göre  $P$ 'nin en yüksek değeri alabilmesi için düzeltmeler toplamının

$$v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2 = \text{minimum} \quad (3.20)$$

olması gerekir. (3.20) ve (3.21) eşitliği en küçük kareler yönteminin temel prensibidir ve ölçülen bir büyüklüğün tekrarlı ölçülerinin en olasılıklı değeri, ölçmelerin düzeltmelerinin karelerinin toplamının en küçük olmasına bağlıdır (Ghilani C. D., Wolf P. R., 2006).

$$\sum v^2 = v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2 = \text{minimum} \quad (3.22)$$

Matematikte bir fonksiyonun alabileceği en küçük değer fonksiyonun birinci türevi işe bulunur. Bir fonksiyonun birinci türevi sıfıra eşittir ve bundan yararlanılarak (3.23) eşitlikleri elde edilir (Ghilani C. D., Wolf P. R., 2006).

$$\sum v^2 = (M - z_1)^2 + (M - z_2)^2 + \dots \dots \dots + (M - z_n)^2$$

$$\frac{d(\sum v^2)}{dM} = 2(M - z_1) + 2(M - z_2) + \dots \dots \dots + 2(M - z_n) = 0. \quad (3.23)$$

$$M = \frac{z_1 + z_2 + \dots \dots \dots + z_n}{n}$$

Buraya kadar ölçmelerin eşit ağırlıklara sahip oldukları varsayılmıştır. Yapılan ölçmeler  $w_1, w_2, \dots \dots \dots, w_n$  gibi farklı ağırlıklara sahip olduklarında olasılık fonksiyonu

$$P = K^n (\Delta v)^n e^{-h^2(w_1 v_1^2 + w_2 v_2^2 + \dots + w_n v_n^2)} \quad (3.24)$$

ve (3.24) eşitliğinin en büyük değeri (3.25) eşitliğinin sonucunun en küçük olduğu değer için sağlanır (Ghilani C. D., Wolf P. R., 2006)

$$\sum wv^2 = w_1 v_1^2 + w_2 v_2^2 + \dots + w_n v_n^2 = \text{minimum} \quad (3.25)$$

Düzeltilme (3.14) eşitliği ile verilen düzeltme değerleri (3.25) eşitliğinde yerine koyulursa

$$\sum wv^2 = w_1(M - z_1)^2 + w_2(M - z_2)^2 \dots \dots \dots + w_n(M - z_n)^2 \quad (3.26)$$

eşitliği elde edilir.

(3.25) eşitliğine göre ağırlıklı en küçük kareler yöntemi ile bir büyüklüğün en olasılıklı değeri düzeltmelerin karlerinin ölçme ağırlıkları ile çarpımının en küçük olduğu değerde elde edilir (Ghilani C. D., Wolf P. R., 2006). Buradan eşit ağırlıklı ölçmeler için (3.23) eşitliklerinde hesaplandığı gibi en olasılıklı değer (3.27) eşitlikleri ile bulunur (Ghilani C. D., Wolf P. R., 2006).

$$\frac{d(\sum wv^2)}{dM} = 2w_1(M - z_1) + 2w_2(M - z_2) + \dots \dots \dots + 2w_n(M - z_n) = 0$$

$$M = \frac{\sum wz}{\sum z} \quad (3.27)$$

### 3.5.1.1. Stokastik model

Ölçmelerin ağırlıklandırılması en küçük kareler yönteminde stokastik modeldir. Dengeleme için uygun bir stokastik model seçmek ileriki bölümlerde bahsedilecek olan ölçmelere gelecek düzeltme değerini doğrudan etkileyeceği için önemlidir (Ghilani C. D., Wolf P. R., 2006).

### 3.5.1.2. Fonksiyonel model

Dengeleme hesabında fonksiyonel model dengeleme şartını sağlayan bir veya birkaç eşitliktir. Eğer fonksiyonel model fiziksel durumu iyi ifade ederse ölçmelerdeki hatalar normal dağılıma uyacaklardır. En küçük kareler yönteminde iki farklı fonksiyonel model söz konusudur.

Bunlardan birincisi geometrik olarak koşullu ölçmeler ve bunların düzeltmeleri benzeri durumlarda kullanılan koşullu dengelemedir (Ghilani C. D., Wolf P. R., 2006).

İkincisi ise dolaylı ölçüler ile dengelemedir. Bu modelde ölçmeler doğrudan ölçülmemiş bilinmeyen parametrelerle ifade edilirler. Örneğin açı ve kenar ölçmeleri kullanılarak koordinat hesabında ölçmeler koordinat bilinmeyenleri ile ifade edilirler (Ghilani C. D., Wolf P. R., 2006).

### 3.5.2. Yatay kontrol ağlarının en küçük kareler yöntemi ile dengelenmesi

Yatay kontrol ağları önceki bölümde bahsedilen dolaylı ölçülerin denklemleri kullanılarak dengelenirken her açı, kenar ve doğrultu ölçmesi için düzeltme denklemleri oluşturulur. Bu denklemler lineer olmayan denklemlerdir. En küçük kareler yöntemi ile dengeleme hesabının yapılabilmesi için denklemler Taylor Serisine açılarak lineerleştirilir. Dengeleme hesabı için verilecek olan düzeltme denklemlerinin Taylor Seri açılımlarının iki ve daha yüksek dereceli terimleri göz ardı edilmiştir (Ayan T., 2003).

#### 3.5.2.1. Kenar ölçmeleri için düzeltme denklemlerinin oluşturulması

$i$  ve  $j$  iki ayrı nokta olmak üzere, bu noktalar arasındaki kenarın uzunluğu (3.28) eşitliği kullanılarak hesaplanır.

$$S_{i,j} = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2} \quad (3.28)$$

(3.28) eşitliğinde bilinmeyen parametreler

$$X_i = X_{0i} + x_i, Y_i = Y_{0i} + y_i$$

$$X_j = X_{0j} + x_j, Y_j = Y_{0j} + y_j \quad (3.29)$$

ve

$$S_{ij} = S_{0ij} + v_{S_{ij}}$$

olmak üzere, (3.28) eşitliğinin Taylor Seri açılımı

$$S_{ij} + v_{S_{ij}} = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2} \quad (3.30)$$

$$+ \left(\frac{\partial S}{\partial X_i}\right)_0 x_i + \left(\frac{\partial S}{\partial Y_i}\right)_0 y_i + \left(\frac{\partial S}{\partial X_j}\right)_0 x_j + \left(\frac{\partial S}{\partial Y_j}\right)_0 y_j \text{ olarak elde edilir. Seri}$$

açılımında kısmi türevler,

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial S}{\partial X_i}\right)_0 &= a_{S_{ij}} = -\cos t_{ij} \\ \left(\frac{\partial S}{\partial Y_i}\right)_0 &= b_{S_{ij}} = -\sin t_{ij} \\ \left(\frac{\partial S}{\partial X_j}\right)_0 &= -a_{S_{ij}} = -\cos t_{ij} \\ \left(\frac{\partial S}{\partial Y_j}\right)_0 &= -b_{S_{ij}} = -\sin t_{ij} \end{aligned} \quad (3.31)$$

(3.31) eşitlikleri ile hesaplanır. (3.30) ve (3.31) eşitliklerinde

$$-l_{S_{ij}} = S_{0ij} - S_{ij}$$

ve  $t_{ij}$   $i$  noktasından  $j$  noktasına açıklık açısı olmak üzere kenar ölçmeleri için düzeltme denklemi,

$$v_{S_{ij}} = a_{S_{ij}}x_i + b_{S_{ij}}y_i - a_{S_{ij}}x_j - b_{S_{ij}}y_j - l_{S_{ij}} \quad (3.32)$$

olur (Ayan T., 2003).

### 3.5.2.2. Doğrultu ölçmeleri için düzeltme denklemlerinin oluşturulması

$i$  gibi bir noktadan  $j$  gibi bir başka noktaya yapılan doğrultu ölçmesinin düzeltme denkleminin hesaplanması için matematiksel model (3.33) eşitliğinde verilmiştir (Ayan T., 2003).

$$r_{0ij} + Z_i = r_{ij} + v_{r_{ij}} + Z_i = t_{ij} \quad (3.33)$$

(3.33) eşitliğinde  $r_{ij}$  doğrultunun ölçülen değerini,  $v_{r_{ij}}$  doğrultu ölçmesinin düzeltmesini,  $Z_i$   $i$  noktasında yöneltme bilinmeyenini,  $t_{ij}$   $i - j$  noktaları arası doğrultunun açıklık açısını ifade eder.

(3.33) eşitliğinde açıklık açısı eşitliği yerine yazılıp (3.29) eşitlikleri yerine koyulup Taylor Serisine açılırsa

$$\begin{aligned} r_{ij} + v_{r_{ij}} &= -z_i + Z_{0i} + \arctan\left(\frac{Y_j - Y_i}{X_j - X_i}\right) \\ &+ \left(\frac{\partial t_{ij}}{\partial X_i}\right)_0 x_i + \left(\frac{\partial t_{ij}}{\partial Y_i}\right)_0 y_i + \left(\frac{\partial t_{ij}}{\partial X_j}\right)_0 x_j + \left(\frac{\partial t_{ij}}{\partial Y_j}\right)_0 y_j \end{aligned} \quad (3.34)$$

elde edilir. (3.34) eşitliğinde verilen kısmi türevler alınırsa,

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial t_{ij}}{\partial x_i}\right)_0 &= a_{r_{ij}} = \frac{\sin t_{ij}}{s_{ij}} \\ \left(\frac{\partial t_{ij}}{\partial y_i}\right)_0 &= b_{r_{ij}} = \frac{\cos t_{ij}}{s_{ij}} \\ \left(\frac{\partial t_{ij}}{\partial x_j}\right)_0 &= -a_{r_{ij}} = \frac{\sin t_{ij}}{s_{ij}} \\ \left(\frac{\partial t_{ij}}{\partial y_j}\right)_0 &= -b_{r_{ij}} = \frac{\cos t_{ij}}{s_{ij}} \end{aligned} \quad (3.35)$$

katsayıları elde edilir (Ayan T., 2003).

(3.35) katsayıları (3.34) eşitliklerinde

$$-l_{r_{ij}} = -r_{ij} - Z_i + t_{ij} \quad (3.36)$$

ve yerine koyulursa, doğrultular için düzeltme denklemi

$$v_{r_{ij}} = -Z_i + a_{r_{ij}}x_i + b_{r_{ij}}y_i - a_{r_{ij}}y_j - b_{r_{ij}}x_j - l_{r_{ij}} \quad (3.37)$$

olur (Ayan T., 2003).

### 3.5.3. En küçük kareler yöntemi ile dengeleme için ölçülerin ağırlıklandırılması

Açı – kenar ağlarının en küçük kareler yöntemi ile dengelemesinde ölçmeler farklı ağırlıklara sahiptir. Bu bölümde açı ve kenar ölçüleri için ağırlıkların nasıl hesaplanacağı anlatılacaktır.

#### 3.5.3.1. Açı ölçüleri için ağırlıkların hesaplanması

Bir noktadan yapılan açı ölçmelerinin ağırlıkları istasyon dengelmesi hesabı ile belirlenmelidir (HKMO, 2001).

Bir noktadan yapılan açı ölçmelerinde  $n$  seri sayısını,  $s$  doğrultu sayısını,  $r_i$ ;  $i$ 'inci doğrultu ve  $\bar{r}_l$  doğrultunun ortalama değeri ve

$$\bar{r}_i - r_i = d_i$$

$$d_k = \frac{\sum_{i=1}^s d_i}{s}$$

$$v_i = d_k - d_i \quad (3.38)$$

$$[vv] = \sum_{i=1}^s v_i v_i$$

$$[vv] = \sum_{k=1}^n [vv]_k$$

olmak üzere,  $i$  noktasındaki doğrultu ölçmelerinin karesel ortalama hatası,

$$m_r = \sqrt{\frac{[vv]}{(n-1)(s-1)}} \quad (3.39)$$

ve seriler ortalamasından bir doğrultunun karesel ortalama hatası,

$$M_r = \pm \frac{m_r}{\sqrt{n}} \quad (3.40)$$

eşitlikleri ile hesaplanır (HKMO, 2001).

(3.41) eşitliğinde  $m_0$  birim ölçünün karesel ortalama hatası olmak üzere bir noktadan yapılan açı ölçmelerinin ağırlığı

$$P_{r_i} = \frac{m_0^2}{m_i^2} \quad (3.41)$$

olur (HKMO, 2001).

### 3.5.3.2. Kenar ölçülerinin ağırlıklarının hesaplanması

Bir kenar ölçmesinin karesel ortalama hatası, kullanılan aletin klavuzunda verilen  $a$  ve  $b$  katsayıları ile (3.42) eşitliği kullanılarak hesaplanır.

$$m_{S_i}^2 = a^2 + (b S_{i_{km}})^2 \quad (3.42)$$

(3.42) eşitliğinde elde edilen kenar ölçmesinin karesel ortalama hatası ve  $m_0$  birim ölçünün karesel ortalama hatası kullanılarak

$$P_{S_i} = \frac{m_0^2}{m_{S_i}^2} \quad (3.43)$$

Eşitliği kullanılarak kenar ölçmesi için ağırlık hesaplanır (HKMO, 2001).

### 3.5.4. En küçük kareler yöntemi ile dengeleme hesabının yapılması

Dengeleme hesabı düzeltme denklemi katsayılarının,  $-l$  terimlerinin ve ağırlıklarının matris formuna getirilip düzeltme denklemleri çözülerek bilinmeyen parametrelerin hesaplanması ile yapılır. Dengeleme hesabında katsayılar matrisi,

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & a_{n4} \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

ağırlık matrisi,

$$P = \begin{bmatrix} P_i & & & \\ & \ddots & & \\ & & \ddots & \\ & & & P_n \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

$-l$  terimleri vektörü,

$$-l = \begin{bmatrix} l_{ij} \\ \vdots \\ \vdots \\ l_{mn} \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

Formundadırlar (Ayan T., 2003).

$v$  düzeltme değerlerini içeren vektör ve  $x$  bilinmeyenler vektörü olmak üzere düzeltme denklemlerinin çözümü,

$$v = Ax - l \quad (3.47)$$

olur.

Buradan normal denklemler,

$$N = A^T P A \quad (3.48)$$

ve mutlak terim vektörü,

$$n = A^T P l \quad (3.49)$$

olur (Ayan T., 2003).

Normal denklemler,

$$A^T P A x - A^T P l = 0 \quad (3.50)$$

veya

$$N x - n = 0 \quad (3.51)$$

eşitlikleri ile çözülür (Ayan T., 2003).

(3.51) eşitliğinde bilinmeyenlerin çözülebilmesi için normal denklem katsayılar matrisi  $N$ 'in inversine ihtiyaç vardır. Bu invers matrise varyan – kovaryans matrisi denir ve simetrik bir matristir. Varyans – kovaryans matrisinin köşegen terimleri bilinmeyenlerin varyanslarıdır. Diğer terimleri ise bilinmeyenler arasındaki korelasyonu verir.

$$N^{-1} = Q_{xx} = \begin{bmatrix} q_{x1x1} & q_{x1y2} & \dots & q_{x1yn} \\ & q_{y1y1} & \vdots & \vdots \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & q_{ynyn} \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

### 3.5.5. Dengeleme hesabı sonrasında doğruluk ölçütlerinin hesabı

Dengeleme hesabı sonrasında ilk olarak birim ölçünün karesel ortalama hatası hesaplanır.

$$m_0 = \pm \sqrt{\frac{v^T P v}{n-u+r}} \quad (3.53)$$

(3.53) eşitliğinde  $n$  ölçü sayısını,  $u$  bilinmeyen parametrelerin sayısını,  $r$  ise dış parametreleri gösterir (Ayan T., 2003).

Buna göre bir ölçünün dengeleme sonrası karesel ortalama hatası,

$$m_i = \frac{m_0}{\sqrt{P_i}} \quad (3.54)$$

eşitliği ile hesaplanır (Ayan T., 2003).

Dengeleme hesabı sonunda bilinmeyenlerin veya başka bir deyişle koordinat bileşenlerinin karesel ortalama hatası,

$$\begin{aligned} m_{xi} &= \pm m_0 \sqrt{q_{xixi}} \\ m_{yi} &= \pm m_0 \sqrt{q_{yiyi}} \end{aligned} \quad (3.55)$$

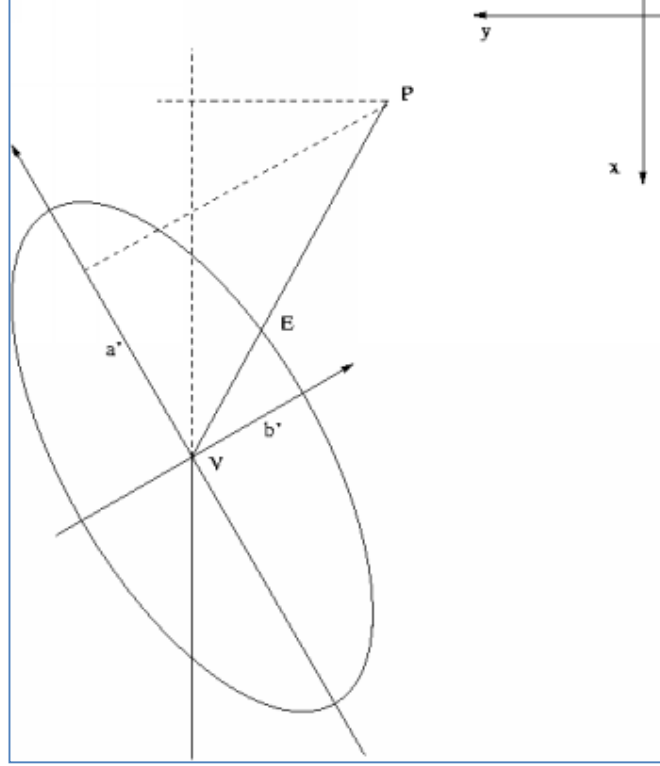
eşitlikleri ile ve nokta konum hatası,

$$m_{P_i} = \sqrt{m_{xi}^2 + m_{yi}^2} \quad (3.56)$$

eşitliği ile hesaplanır (Ayan T., 2003).



Nokta koordinatlarının karesel ortalama hataları  $m_x$  ve  $m_y$ , nokta konumunun eksenler doğrultusundaki doğruluğu ifade eder (Ayan T., 2003). Ancak dengeleme hesabı sonrası bir noktanın konum hatası bivaryant normal dağılıma uyar ve bu dağılımın  $x - y$  düzelemindeki izdüşümü bir elipstir (Ghilani C. D., Wolf P. R., 2006). (Şekil 3.12)



**Şekil 3.13:** Hata elipsi çizimi (Cepek A., 2007)

Hata elipsinin küçük eksenini  $a$ , büyük eksenini  $b$  ve büyük eksenin açıklık açısını  $\alpha$  olmak üzere,

$$a = \sqrt{\frac{1}{2}(q_{xx} + q_{yy} + c)} \quad (3.57)$$

$$b = \sqrt{\frac{1}{2}(q_{xx} + q_{yy} - c)} \quad (3.58)$$

$$c = \sqrt{(q_{xx} + q_{yy})^2 + 4q_{xy}^2} \quad (3.59)$$

$$\tan 2\alpha = \frac{2q_{xy}}{q_{xx} - q_{yy}} \quad (3.60)$$

eşitlikleri ile hesaplanırlar (Cepek A., 2007).

### 3.6. Tünel Doğrultu Hatasının Belirlenmesi

Tünel inşasında tünelin açılma doğruluğu yani tersi olarak tünel doğrultu hatası büyük bir öneme sahiptir. Tünel doğrultu hatasını Bölüm 4'te değinilecek tünel içindeki yatay kontrol ağı tasarımı ve ölçmeleri ve tünel güzergahının tasarımı doğrudan etkiler. Ağın güçlü ve yerinde olması tünel açma doğruluğunu doğrudan arttıracığı gibi tünel yapım toleranslarının da sağlanabilmesinde doğrudan etkilidir.

Segmanlı halkalardan oluşan TBM tünellerinde tünel doğrultu hatasını üç şekilde gözlemlemek mümkündür:

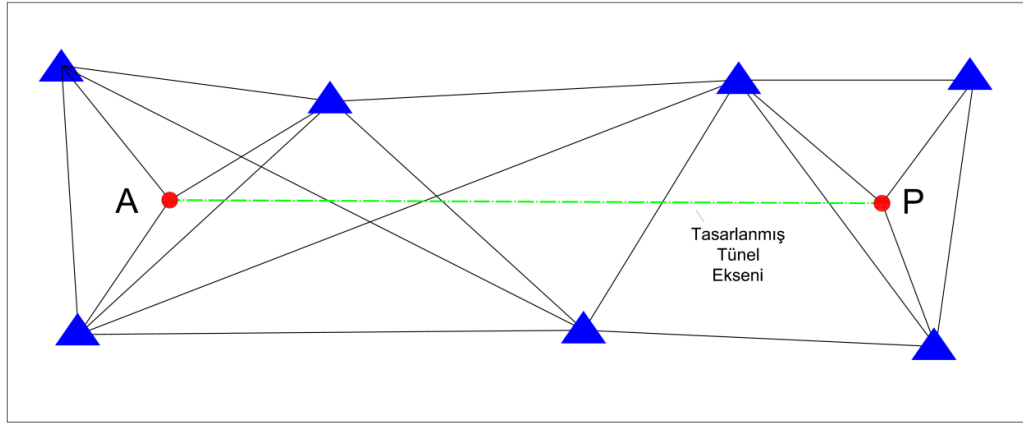
- 1- Makinenin tünel açma hatası
- 2- Ölçme hatası
- 3- Halka hatası

Bunlardan birincisi olan makinenin tünel doğrultu hatası TBM kazısı sonunda shaft, portal veya proje kapsamında inşa edilmiş bir diğer yer altı yapısına ulaşıldığında kesici baş merkezinin ulaşılan yer altı yapısı içinde tesis edilmiş noktalardan koodinatının belirlenmesi ve bu koordinatın projelendirilmiş değeri ile karşılaştırılması şeklinde yapılır.

İkinci olarak da TBM diğer yer altı yapısına ulaşıp tünelden tamamen çıkarıldıktan sonra tünel içinde kazı sırasında kazı ilerlemesi ile beraber tesis edilmiş tünel boyuna ilerleyen yatay kontrol ağı noktalarından, ulaşılan ikinci yer altı yapısının içinde tesis edilmiş yatay kontrol ağı noktalarını koordinatlandırarak tünel doğrultu hatasını belirlemek mümkündür. Bu şekilde elde edilecek kapanma hatası doğrudan tünel doğrultu hatasını verir. Bu yöntemden farklı olarak TBM tüneline tesis edilen kontrol ağı, ulaşılan ikinci yer altı yapısındaki noktalar da kullanılarak bağlı hale getirilir. Son olarak TBM tüneli segmanlı halkalar halinde tamamlandıktan sonra projeye göre yerleştirilecek olan son segman tünel doğrultu hatası nedeniyle yerine tam olarak oturmayacak, tam olarak yerleştirilebilmesi için yapım aşamasında yerinde revizyonlar yapılması gerekecektir. Bu revizyonlar sırasında da tünel doğrultu hatasını kaba olarak kestirebilmek mümkündür (Fowler S., 2006).

### 3.6.1. Tünel doğrultu hatasının hesaplanması

Bölümün başında da bahsedildiği gibi tünel doğrultu hatası basit bir koordinat kapanması şeklinde tesbit edilebilir. Ancak bunun yerine Chrzanowski tarafından ifade edilen yöntemle tünel doğrultu hatasını ve doğruluğunu hesaplamak mümkündür. Buna göre tünel çalışmasının başlangıcı olan yüzey ağının tesisinden tünelin ilerlemesi ve sonrasında tünelin açılmasına kadar hata yayılma yasası geçerlidir. Hata yayılması sonucunda tünel açıldığında yanal  $e$  ve boyuna  $l$  hataları oluşacaktır.



Şekil 3.14: Tünelin A noktasından belirlenen P noktasına doğru yönlendirilmesi (Fowler S., 2006)

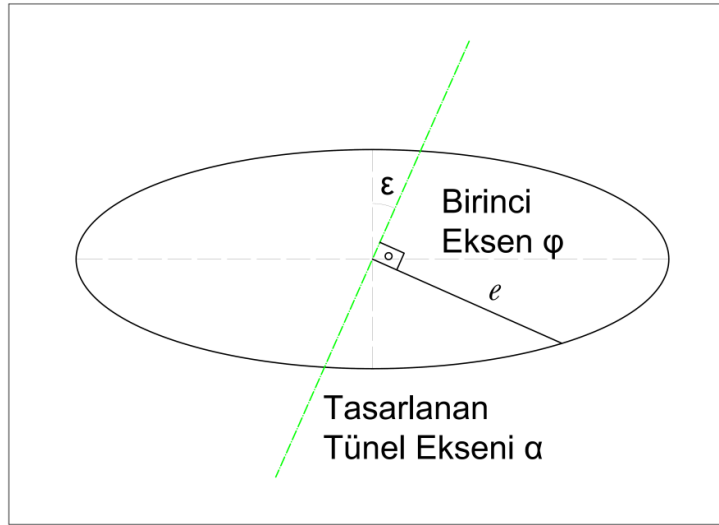


Şekil 3.15: Tünel doğrultu hatası (Fowler S., 2006)

Şekil 3.14 deki gibi bir tünel ağı düşünüldüğünde A noktasından başlayan bir tünel projeye göre P noktasında tamamlanmalıdır. Ancak gerçekte hata yayılma yasası gereği tünel tasarlanan tünel eksenini yerine farklı bir ekseninde ilerleyecektir ve P noktası yerine P' gibi farklı bir noktada tamamlanacaktır. Buna göre P ve P' noktaları arasındaki mesafe veya kapanma hatası toplam tünel doğrultu hatasını ifade eder. Bu hatanın tünel eksenini yönündeki bileşenine  $l$  ve boyuna tünel doğrultu hatası ve tünel eksenine dik yöndeki bileşenine  $e$  ve yanal tünel doğrultu hatası denir. Tünel

açma hatasının boyuna bileşeni önemsenmeyecek kadar küçük iken enine hata daha büyüktür ve tünelin yönelimine doğrudan etkili olduğu için daha büyük öneme sahiptir (Fowler S., 2006).

$e$  değerini ve doğruluğunu hesaplayabilmek için tünel içi yatay kontrol ağı en küçük kareler yöntemiyle dengelenmeli ve varyans-kovaryans matrisi hesaplanmalıdır. Yine varyans-kovaryans matrisinin alt matrisleri yardımıyla noktalara ait hata elipsi parametreleri belirlenmelidir. Hata elipsi parametreleri belirlendikten sonra tasarlanmış tünel eksenini ve tünel doğrultu hatası ve doğruluğu hesaplanacak olan P noktası Şekil 3.16'daki gibi olacaktır.



**Şekil 3.16:** Hata elipsi ile tünel ekseninin durumu (Fowler S., 2006)

Buradan  $e$  tünel doğrultu hatasının yanal bileşeni

$$e = \sqrt{a^2 \cos^2 \varepsilon + b^2 \sin^2 \varepsilon} \quad (3.61)$$

eşitliği ile hesaplanır. Eşitlikte  $\varepsilon$ ,  $\alpha$  tasarlanan tünel ekseninin P noktasındaki açıklık açısı ve  $\varphi$  hata elipsinin birinci ekseninin açıklık açısı olmak üzere

$$\varepsilon = 90^\circ - \alpha + \varphi \quad (3.62)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Uygulamada hatanın belirli bir güven aralığında ifade edilmesi gerekir. Buna göre %95 güven aralığında tünel açma hatasının yanal bileşeni  $e_{max}$  olmak üzere

$$e_{max} = e_{\%95} = 1.96e \approx 2e \quad (3.63)$$

eşitliği ile hesaplanabilir.

Bölümün başlangıcında da bahsedildiği gibi hata yayılma yasası yüzey ağının tesisinden tünelin tamamen açılmasına kadar geçerlidir. Buna göre  $e_s$  yüzey ağının hatası ve  $e_u$  tünel içi yatay kontrol ağının hatası olmak üzere

$$e = \sqrt{e_s^2 + e_u^2} \quad (3.64)$$

ile ifade edilebilir (Fowler S., 2006).

Genel olarak tünel içindeki yatay kontrol ağının hatası yüzey ağından daha büyüktür ve tünel içindeki yatay kontrol ağında yapılacak iyileştirme daha anlamlı sonuçlar verecektir. Örneğin %95 güven düzeyinde

$$e_s = 50mm$$

$$e_u = 125mm$$

$$e = 135mm$$

olmak üzere yüzey ağında %40 değerinde  $30mm$  olarak yapılabilecek iyileştirme sonucunda (3.64) eşitliğinden toplam hata  $129mm$  olacaktır. Bu da toplama %4 olarak yansıyacaktır. Bunun yanında yüzey ağının hatası sabit tutulduğunda tünel içindeki ağda yapılacak %20 değerinde olan  $25mm$  büyüklüğündeki iyileştirme tünel açma hatasına %17'lik bir etki yapacaktır (Fowler S., 2006).

Buna göre Chrzanowski, *genelde yüzey ağı doğruluk gereksinimlerine göre abartılı tasarlanırken tünel içi kontrol ağı ciddiye alınmadan tasarlanmaktadır, bu nedenle tünel açma doğruluğunun iyileştirilmesi, tesisi ancak açık uçlu poligon dizisi şeklinde mümkün olan tünel içi kontrol ağının iyileştirilmesi ile mümkündür*, sonucuna ulaşmıştır (Chrzanowski A., 1981).

### 3.7. Tünel Yapım Toleransları

En küçük kareler yöntemi ile dengeleme hesabında da değinildiği gibi ölçmeler bir büyüklüğün gerçek değeri yerine dengeleme hesabından geçirildikten sonra en olasılıklı değerini verir. Bu da ölçmelerin hatasız olamayacağı anlamına gelir. Bu nedenle ölçme en olasılıklı değerleri ve bu değerlerin güven aralığı ile ifade edilir.

Ölçme sonuçlarından elde edilen doğruluk ölçütlerine ulaşılan doğruluk ( $\sigma$ ) denir. Mühendislik bilimleri kapsamına giren jeodezik çalışmaların optimize edilmesi için

mühendislik yapılarının niteliklerine bağlı olarak öncül (a-priori) doğrulukların belirlenmesi gerekir. Ölçme eylemlerinden bağımsız olarak, mühendislik yapılarının özelliklerine bağlı belirlenen bu doğruluklara talep edilen doğruluk ( $\mu$ ) denir (Baykal O., 2009).

Mühendislik çalışmalarına ait bir büyüklüğün üretimine yönelik jeodezik çalışmaların optimizasyonu

$$|\mu| \geq |\sigma| \quad (3.65)$$

eşitliği temel alınarak gerçekleştirilir (Baykal O., 2009). Buna göre mühendisler inşaat aşamasında yapılacak aplikasyonlar için uygun ölçme yöntemi, uygun alet, ağ tasarımı gibi konularda incelemeler yaparak en uygun ölçmeyi sahada gerçekleştirirler.

Tüneller de mühendislerin inşaat uygulamaları yaptığı bir disiplindir. Ancak bu uygulamalar için Bölüm 4'te değinilen NSBT örneği dışındaki kaynaklarda veya ilgili kuruluşlarca tanımlanmış yapım toleransları, talep edilen doğruluklar tanımlanmamıştır. Bu tanımlamaların yapılmaması tünel açma çalışmaları açısından önemli bir eksikliklerdir. Bu toleranslar üzerinde çalışılması, tünel inşaatı sırasında yapılacak gereksiz veya tam tersi olarak yapılacak yetersiz jeodezik çalışmaların önüne geçerek inşaat işlerinde çok önemli kalemler olan zaman, elaman kullanımı ve bütçe kullanımını optimize ederek güvenli tünellerin yapılmasına yardımcı olacaktır.

#### 4. TÜNEL İÇİ YATAY KONTROL AĞI TASARIM ÖRNEKLERİ

Çalışmanın bu bölümünde Bölüm 3'te bahsedilen hesap ve ölçme yöntemleri kullanılarak ölçmeleri yapılmış olası tünel ağı tasarımları incelenecektir. Kaynaklarda rastlanabilen bu konudaki en detaylı çalışma Samuel Fowler'ın incelediği Avusturalya, Brisbane'de inşa edilmiş olan North – South Bypass Tünelleri (NSBT) projesidir.

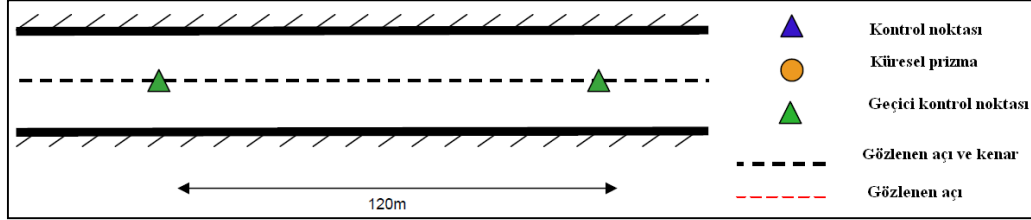
NSBT projesinde tünel içi yatay kontrol ağı tek ve çift hat olmak üzere altışar farklı ağ tasarımı, tünelin belli bölümlerinde gyro-teodolit ölçmeleri de eklenerek incelenmiştir (Fowler S., 2006).

Proje kapsamında tünel doğrultu hatası toleransı  $\pm 50 \text{ mm}$  olarak belirlenmiştir (Fowler S., 2006). Çalışmada ölçmeler açı ölçme doğruluğu 0.5" ve kenar ölçme doğruluğu 1mm+1ppm olan total stationlar ile yapılmış, ölçmeler Star\*Net-Plus yazılımı kullanılarak en küçük kareler yöntemi ile dengelenmiştir. Ölçmeler seriler halinde yapılmış, değerlendirme aşamasında ağırlıklandırma seri sayılarına göre artacak şekilde seçilmiş, böylece seri sayısının tünel doğruluğu hatasına etkisinin anlaşılmasına çalışılmıştır (Fowler S., 2006).

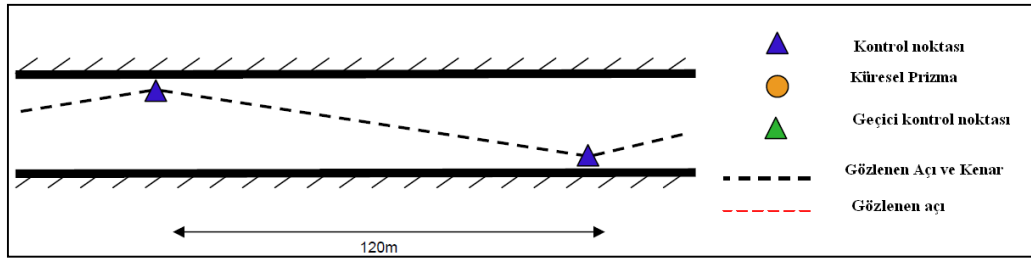
##### 4.1. Tek Hat Tüneli Ağ Tasarım Örnekleri

Tek hat tüneli için uygulanabilecek tasarımlar Şekil 4.1'de verilmiştir. Şekil 4.1'de yer alan 1A tasarımı tünel eksenini boyunca ilerleyen açık poligon dizisi, 1B tasarımı çapraz tek poligon dizisi 1C tasarımı çapraz çift poligon dizisi, 1D tasarımı birleştirilmiş çapraz çift poligon dizisi, 1E tasarımı birleştirilmiş iki çapraz çift poligon dizisine sadece gözlenen noktalar olarak kullanılan, tünel tavanına tesis edilmiş küresel prizmalardan oluşan ağ ve son olarak da 1F tasarımı simetrik

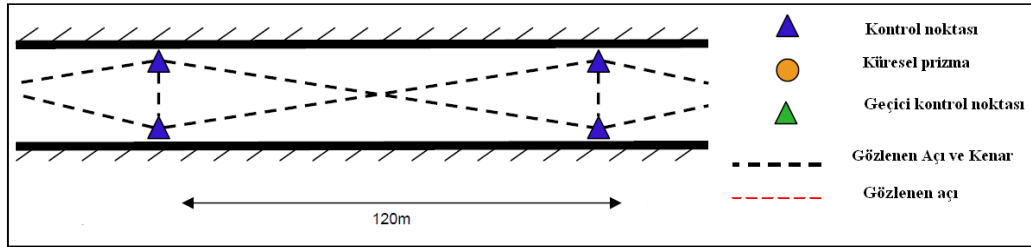
olmayan çapraz poligon dizisidir. Yaklaşık 4600 metre tünel boyunca uygulanan bu ağ tasarımları için %99.8 güven düzeyinde (3.63) eşitliği kullanılarak hesaplanan tünel doğrultu hataları Çizelge 4.1’de verilmiştir.



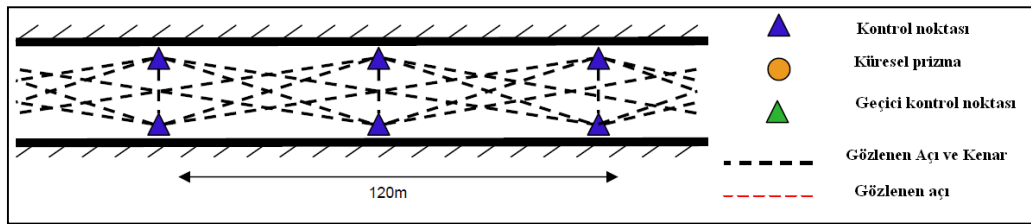
Şekil 4.1.a: Tek hat tünel için 1A ağ tasarımı örneği (Fowler S., 2006)



Şekil 4.1.b: Tek hat tünel için 1B ağ tasarımı örneği (Fowler S., 2006)

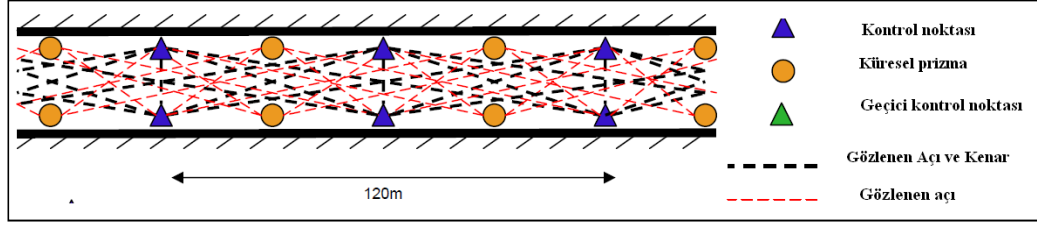


Şekil 4.1.c: Tek hat tünel için 1C ağ tasarımı örneği (Fowler S., 2006)

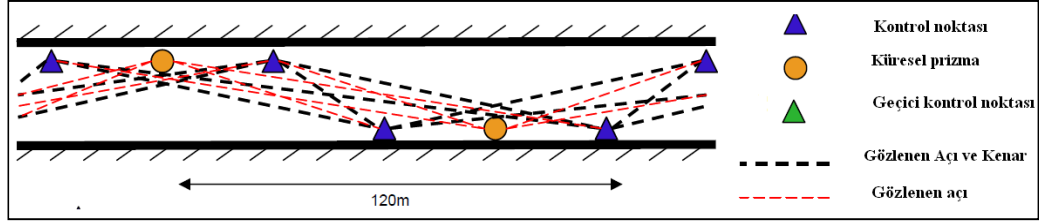


Şekil 4.1.d: Tek hat tünel için 1D ağ tasarımı örneği (Fowler S., 2006)





Şekil 4.1.e: Tek hat tünel için 1E ağ tasarımı örneği (Fowler S., 2006)

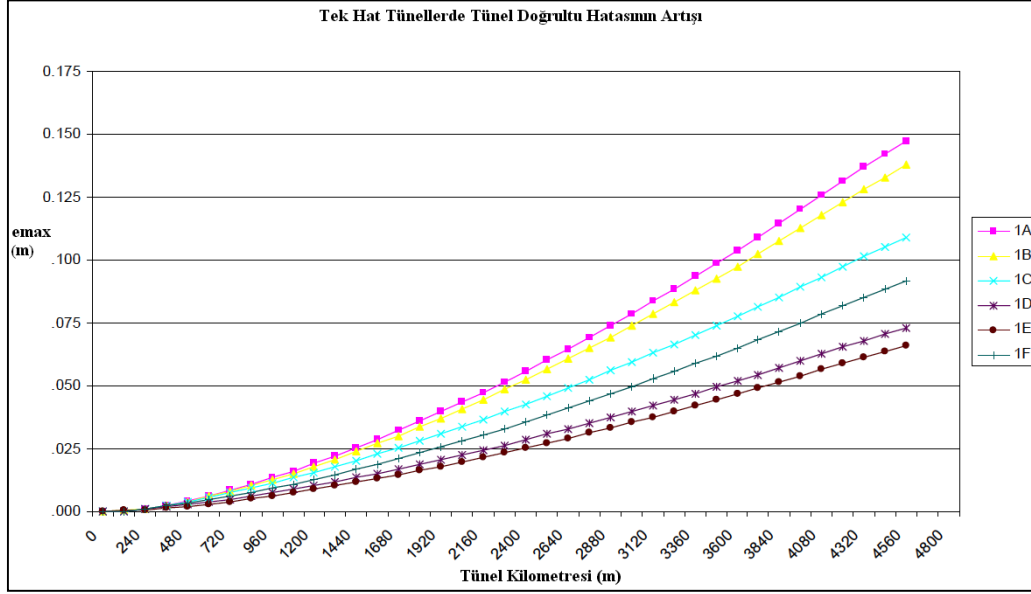


Şekil 4.1.f: Tek hat tünel için 1F ağ tasarımı örneği (Fowler S., 2006)

Çizelge 4.1: 4600 metrelik tek hat tünel için %99.8 güven düzeyinde belirlenen tünel doğrultu hatası (Fowler S., 2006)

Ağ Tasarımı	$e_{max}(mm)$
1A	147
1B	139
1C	108
1D	72
1E	66
1F	91

Şekil 4.2’de çalışmanın yapıldığı tünel boyunca tünel doğrultu hatasının artışı gösterilmiştir.



**Şekil 4.2:** Tek hat tünellerde tünel doğrultu hatasının artışı (Fowler S., 2006)

Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Çizelge 4.1 göz önünde bulundurulduğunda 1000 metre uzunluğundaki tünel için elde edilen tünel doğrultu hatası yaklaşık olarak bütün ağ tasarımları için 12.5 mm düzeyindedir. Bunlara ek olarak çalışmada 6, 12, 34 ve 48 seri şeklinde yapılan ölçmeleri kullanıldığında elde edilecek tünel doğrultu sapması değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

**Çizelge 4.2:** Tek hat tünel için seri açılı ölçmelerinin tünel doğrultu hatasına etkisi (Fowler S., 2006)

Ağ tasarımı	$e_{max}(mm)$			
	6 seri	12 seri	24 seri	48 seri
1A	147	110	78	54
1B	139	105	74	51
1C	108	81	57	40
1D	72	54	38	27
1E	66	50	35	25
1F	91	68	48	35

Çalışmanın bu bölümünde en küçük tünel doğrultu hatası 66 mm ile 1E ağ tasarımı kullanılarak elde edilmiştir. Çalışmada tek hat tüneli için 4600 metre’lik tünelde 720 – 840 , 2280 – 2400 ve 3720 – 3840 tünel kilometresi aralıklarında gyro-teodolit ölçmeleri eklenerek de hesaplar yapılmıştır.

**Çizelge 4.3:** Gyro-teodolit ölçmelerinin tek hat tünel için tünel doğrultu hatasına etkisi (Fowler S., 2006)

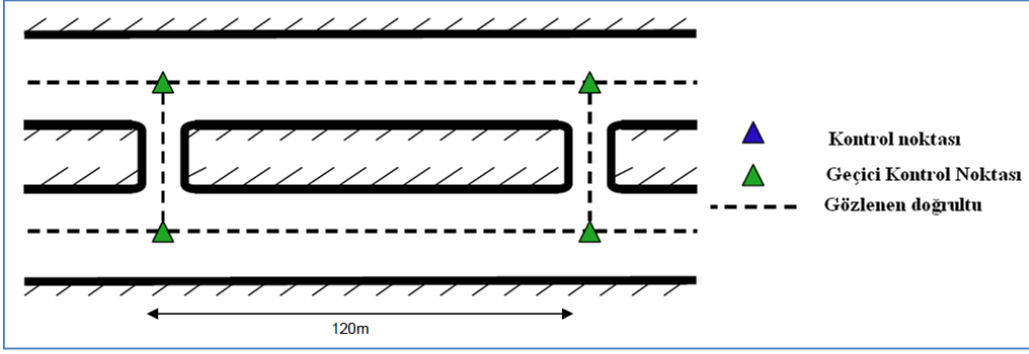
Ağ tasarımı	$e_{max}(mm)$			
	Gyro -teodolit kullanılmadan	Gyro-teodolit kullanılarak	Far k	Fark (%)
1A	147	86	61	41.5
1B	139	82	58	41.3
1C	108	75	33	30.2
1D	72	60	13	17.9
1E	66	56	10	15.6
1F	91	68	23	25.3

Çizelge 4.3'e göre gyro-teodolit ölçmeleri tünel doğrultu hatasını iyileştirmeye yardımcı olmaktadır. Gyro-teodolit ölçmeleri olmadan değerlendirilmediği gibi tünel doğrultu hatasının büyüklüğünün en küçük olduğu tasarım 1E tasarımıdır. Bu sonuçlara ek olarak gyro-teodolit ölçmelerinin iyileştirilmesi yüzdesinin en büyük olduğu tasarım 1A tasarımı olmuştur. Bu sonuç 1A ağ tasarımının basit ve kendi içinde kontrolsüz olduğunu, iyileştirme yüzdesinin daha düşük olduğu 1D, 1E ve 1F gibi ağ tasarımlarının daha güçlü tasarımlar olduğunu göstermektedir.

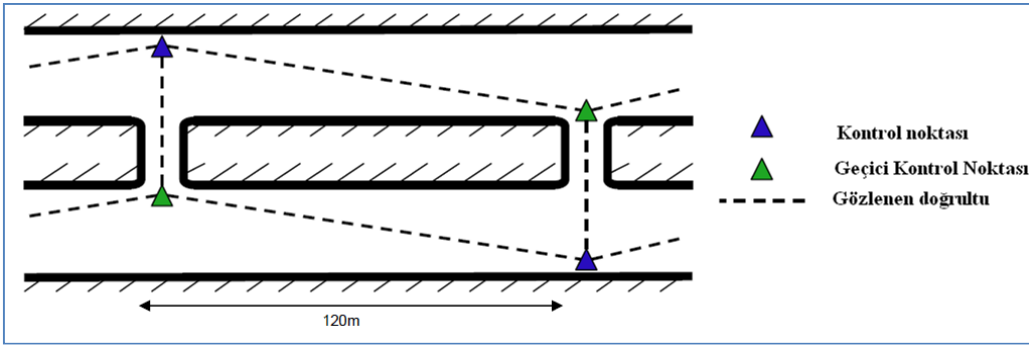
#### 4.2. Çift Hat Tüneller için Ağ Tasarım Örnekleri

Çift hat tüneller için incelenecek tasarımların tek hat tüneller için olanından en önemli farkı hatlar arasında açılacak ara geçişi sağlayan galeriler ile iki ayrı hatta ilerleyen tünel içi yatay kontrol ağlarının bağlantısının kurularak elde edilecek tünel doğrultu hatasının azaltılmasına imkan sağlanmasıdır (Fowler S., 2006).

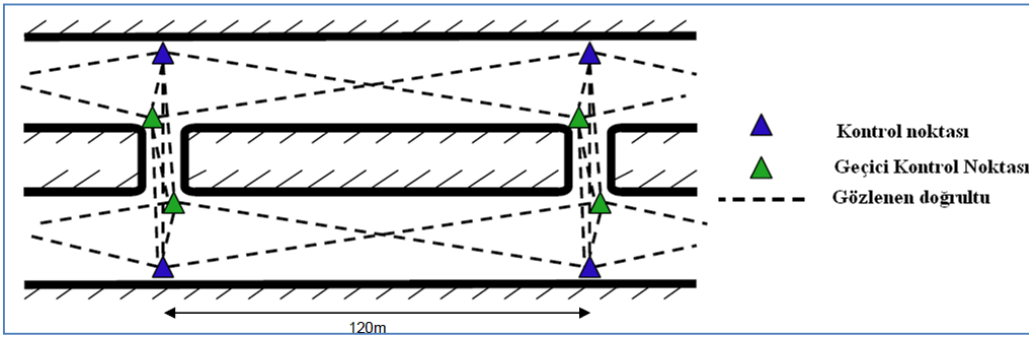
NSBT projesinde çift hat tüneller için de 6 ayrı ağ tasarımı incelenmiştir. Bu ağların tek hat tünelleri için verilen tasarımlardan tek farkları bağlantı galerilerinden yapılan tünel içi yatay kontrol ağlarını birbirine bağlayan ek ölçmelerdir. Şekil 4.3'te çift hat tüneller için değerlendirilen tünel içi yatay kontrol ağ tasarımları gösterilmiştir.



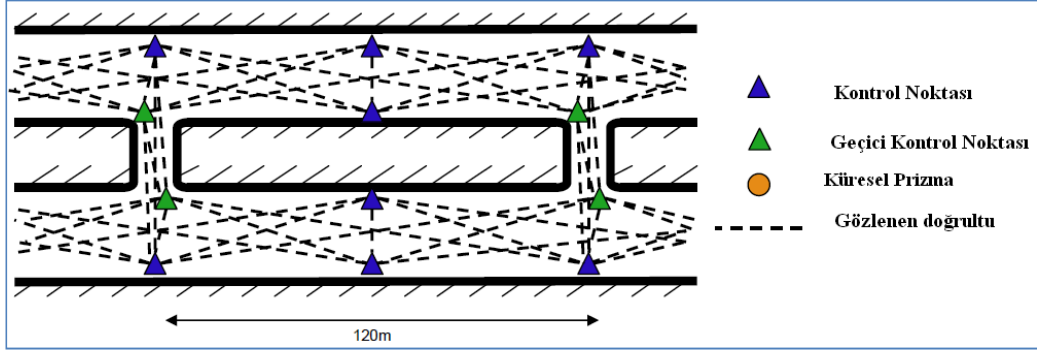
Şekil 4.3.a: Çift hat tüneller için 2A ağ tasarımı örneği (Fowler S., 2006)



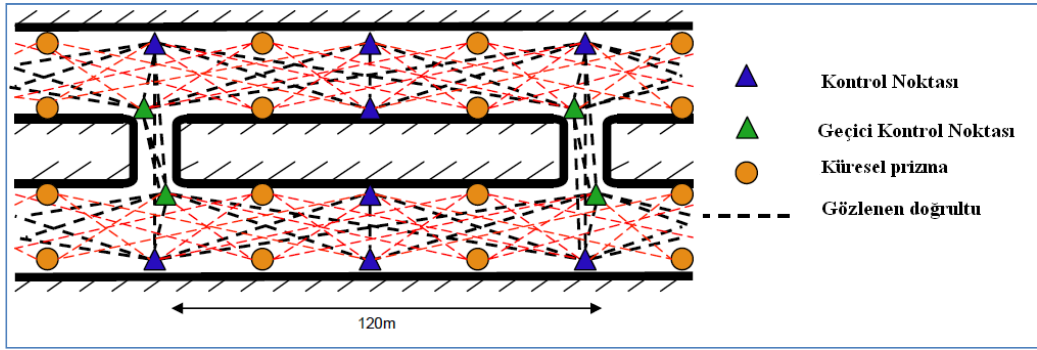
Şekil 4.3.b: Çift hat tüneller için 2B ağ tasarımı örneği (Fowler S., 2006)



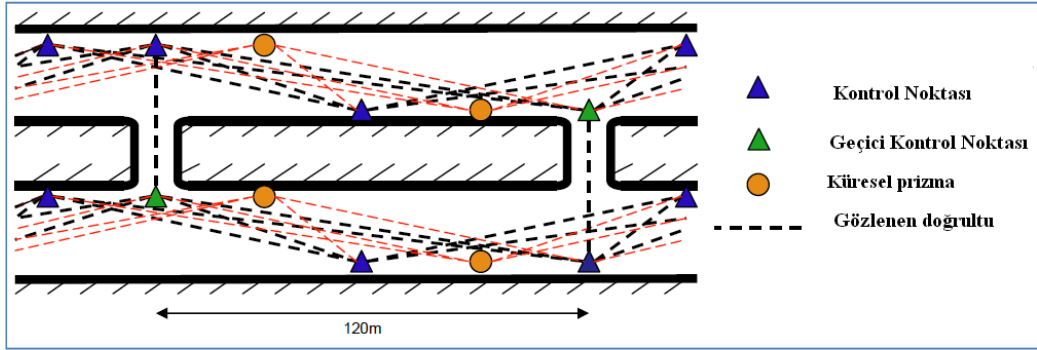
Şekil 4.3.c: Çift hat tüneller için 2C ağ tasarımı örneği (Fowler S., 2006)



Şekil 4.3.d: Çift hat tüneller için 2D ağ tasarımı örneği (Fowler S., 2006)



Şekil 4.3.e: Çift hat tüneller için 2E ağ tasarımı örneği (Fowler S., 2006)

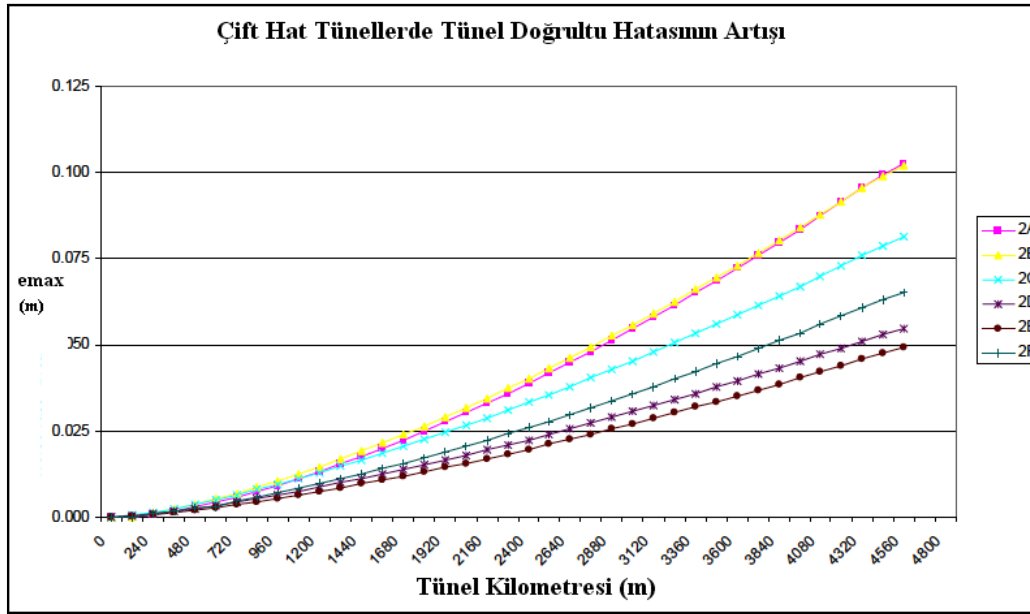


Şekil 4.3.f: Çift hat tüneller için 2F ağ tasarımı örneği (Fowler S., 2006)

Bu ağ tasarımlarının değerlendirilmesi sonucu elde edilen tünel doğrultu hatası ve tek hat tünellere göre iyileştirme miktarı ve yüzdelik olarak iyileştirme Çizelge 4.4'te verilmiştir.

**Çizelge 4.4:** Çift hat tünellerde tünel doğrultu hatası ve tek hat tünellerde elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması (Fowler S., 2006)

Ağ tasarımı	$e_{max}(mm)$			
	Tek hat tünel	Çift hat tünel	Fark	Fark (%)
2A	147	103	44	29.9
2B	139	102	37	26.6
2C	108	81	27	25
2D	72	55	17	23.6
2E	66	49	17	25.8
2F	91	65	26	28.6



**Şekil 4.4:** Çift hat tünellerde tünel doğrultu hatasının artışı (Fowler S., 2006)

Tünel kilometresine göre tünel doğrultu hatasının artışı Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Bu şekle göre 1000 metrelik tünel için elde edilen tünel doğrultu hatası incelenen bütün ağ tasarımları için yaklaşık olarak 5 mm olmuştur.

Çizelge 4.4 ve Şekil 4.5'e göre 49 mm'lik tünel doğrultu hatası ile 1E tasarımının çift hat tüneller için uygulanan şekli olan 2E tasarımı en küçük tünel doğrultu sapması değerine sahiptir.

Tek hat tüneller için olduğu gibi çift hat tüneller için de seri sayısının tünel doğrultu hatasına etkisi incelenmiş ve seri sayısının arttırılmasının tünel doğrultu hatasına olumlu yönde etki yaptığı görülmüştür. 6, 12, 24 ve 48 seri olarak yapılan ölçmeler sonucunda elde edilen tünel doğrultu hatası değerleri Çizelge 4.5'te verilmiştir.

**Çizelge 4.5:** Çift hat tüneller için seri ölçme sayısının tünel doğrultu hatasına etkisi (Fowler S., 2006)

Ağ Tasarımı	$e_{max}(mm)$			
	6 seri	12 seri	24 seri	48 seri
2A	103	77	55	38
2B	102	77	54	38
2C	81	61	42	29
2D	55	41	29	20
2E	49	37	25	18
2F	65	48	34	24

Gyro-teodolit ölçmeleri çift hat tünellerde 480 – 600, 1320 – 1440, 2280 – 2400, 3120 – 3240 ve 4080 – 4200 tünel kilometreleri arasında yapılmıştır. Bu ölçmeler sonucunda elde edilen iyileştirme miktarı ve yüzdelik iyileştirme Çizelge 4.6’da verilmiştir.

**Çizelge 4.6:** Gyro-teodolit ölçmelerinin çift hat tünelleri için tünel doğrultu hatasına etkisi (Fowler S., 2006)

Ağ tasarımı	$e_{max}(mm)$			
	Gyro-teodolit kullanılmadan	Gyro-teodolit kullanılarak	Fark	Fark (%)
2A	103	73	30	30
2B	102	72	30	30
2C	81	64	17	21
2D	55	48	7	12
2E	49	44	5	9
2F	65	55	10	16

Çizelge 4.6’ya göre yüzdelik olarak en çok iyileştirme 2A tasarımında en az iyileştirme de 2D, 2E ve 2F tasarımlarında gerçekleşmiştir. Bu durum tek hat tünellerinde olduğu gibi 2D, 2E ve 2F tasarımlarının jeodezik anlamda güçlü tasarımlar olduğunu kanıtlamaktadır.

Tüm tasarımlar ve ölçmeler göz önünde bulundurulduğunda NSBT projesinde incelenen ağ tasarımlarından 2E ağ tasarımı proje toleransı olarak belirlenen 50 mm tünel doğrultu hatasından daha küçüktür ve tünel doğrultu hatası için elde edilen en küçük değerler 2E tasarımı ile gerçekleşmiştir. Bu sonuç gyro-teodolit ölçmeleri olmaksızın da geçelidir.





## **5. UYGULAMA ÖRNEĞİ**

Bu bölümde, çalışmanın önceki bölümlerinde anlatılan yöntemlere dayanarak gerçekte uygulaması yapılmış, TBM kullanılarak kazısı tamamlanmış bir tek hat tünelin tünel içi yatay kontrol ağı ölçmeleri, ölçmelerin hesapları ve hesaplar sonucunda elde edilen tünel doğrultu hatası anlatılacaktır. Bölüm boyunca tünel açma çalışmasını yapan firma, kullanılan kontrol noktalarının koordinatları, nokta isimlendirmeleri ve shaft isimlendirmeleri gizli tutulmuştur.

### **5.1. Uygulamanın Yapıldığı Tünel**

Uygulama, çift hat olarak projelendirilmiş, yaklaşım yapısı olarak iki shaft kullanılmış raylı sistem tünelinin tek hattında yapılacaktır. Tünel, TBM tünel açma yöntemi ile kazılmıştır. Yaklaşım yapısı shaftlar yaklaşık olarak 35 metre derinliğe sahiptirler. Bu shaftlardan tünel kazısı başlangıç yönünde olan Shaft – 1 olarak isimlendirilmiş, tünel güzergahına yaklaşım tüneli kullanılarak ulaşılan ve tünel kazısının tamamlandığı konumda bulunan shaft ise Shaft – 2 olarak isimlendirilmiştir.

### **5.2. Tünel Kontrol Ağlarının Tasarlanması ve Tesisi**

Yüzey yatay kontrol ağı GPS ölçmeleri ile tesis edilmiştir. Yüzey yatay kontrol ağı noktalarından Shaft – 1 ve Shaft – 2 üzerine tesis edilen noktalar koordinatlandırılmıştır. Daha sonra bu noktalardan Wild marka ZNL optik zenit çekülü kullanılarak shaft altına izdüşüm noktaları tesis edilmiştir. Bu izdüşüm noktalarından yararlanılarak Shaft – 1 altında K-101, K-102, K-103, K-104 VE K-105 Shaft – 2 altında da K-201 ve K-202 noktaları koordinatlandırılmıştır.

Yüzey yatay kontrol ağının ve tünel içi yatay kontrol ağının ilk safhasıyla ilgili, çalışmanın önceki bölümlerinde değinilen yöntemlere uygun veri bulunmadığından

uygulamanın geri kalan bölümünde yüzey yatay kontrol ağından tünel içi yatay kontrol ağının koordinatlandırılmasına ilişkin hatalar gözardı edilecektir.



**Şekil 5.1:** Tünel içi yatay kontrol ağı nokta tesisi örneği (Ademoğlu Y., 2009)

Tünel içi yatay kontrol ağı nokta tesisleri Şekil 5.1’de tünel yan duvarına monte edilmiş zorunlu merkezleştirme sistemi bulunan ölçme konsolları şeklindedir. Bunlara konsollara ek olarak Şekil 2.10’da gösterilen TBM yönlendirme sistemi için kullanılan noktaların dengeleme hesabına girebilecek şekilde fazla ölçülmüş oldukları sürece hesaplara dahil edilmişlerdir. Hesaplarda sekiz adet TBM yönlendirme noktası bulunmaktadır.

Tünel içi yatay kontrol ağı noktaları, şaft altında ilk tesisi yapılan, ağı koordinat sistemini tanımlayan noktalar K-xxx, TBM yönlendirme sistemi noktaları Y-xxx ve sadece tünel içi yatay kontrol ağının tünel kazısı yönünde ilerletme amacıyla tesis edilmiş olan noktalar P-xxx formatında olacak şekilde isimlendirilmişlerdir.

Uygulamada incelenen tünel içi yatay kontrol ağı Bölüm 4’te değinilen çapraz çift poligon dizisi olarak tasarlanmıştır. Bu poligon dizisi için yapılan ölçmelere ek olarak görüşün mümkün olduğu tüm noktalara ölçme yapılmaya çalışılmıştır. Bu yöntemle kapalı geometri oluşturularak geometrik kısıtlar yardımıyla açı ve kenarlar kontrol edilip ilerlemenin sağlıklı olarak yapılması amaçlanmıştır.

### **5.3. Tünel İçi Yatay Kontrol Ağı Ölçmeleri**

Tünel içi yatay kontrol ağı açı ölçme doğruluğu 2” ve kenar ölçme doğruluğu 2mm+2ppm olan total stationlar kullanılarak yapılmıştır. Uygulama örneğinde, tünel içi yatay kontrol ağı ölçmeleri belli zaman aralıklarında tünel içi yatay kontrol ağının tünel ilerlemesine göre ilerletilmesi şeklinde yapılmıştır. Bu yöntemle göre 1. kampanyada yapılan ölçmeler sonucunda ilerleme yönüne göre en ileride yer alan noktalarından çıkış alınarak 2. Kampanya ölçmeleri yapılmıştır. Bu durum

2. Kampanyada ölçmelerin kaynaklarca tavsiye edilen aksine tünel başlangıç noktasından değil güzergah üzerindeki belli bölümlerden başlayarak tünel içi yatay kontrol ağının kontrol edildiğini göstermektedir. 1. kampanya ile tesis edilen noktaların Bölüm 3'te değinilmiş olan kaya deformasyonlarını göz ardı eden bu yöntem ile, zaten yoğun olan tünel içi yapım çalışmalarının tünel içindeki trafiğin durdurulmasını gerektiren kontrol ölçmelerinin süresini en aza indirilmesi amaçlanmıştır.

Uygulama örneğinde açılı kenar ölçmeleri 3 seri olarak yapılmıştır. Ölçmeler total stationlara sayısal olarak kaydedildikten sonra Çizelge 5.1'de bir örneği bulunan çizelgeler oluşturulmuştur.

**Çizelge 5.1:** Uygulama örneği ölçme çizelgesi

Durulan Nokta	Bakılan Nokta	Doğrultu	İndirgenmiş Kenar
<b>P-146</b>	<b>P-139</b>	0.00000	59.9342
	<b>P-144</b>	395.54430	36.0962
	<b>P-141</b>	10.46303	21.1228
	<b>P-143</b>	181.54330	20.6731

Tabloda “İndirgenmiş Kenar” olarak gösterilen uzunluklar Büyük Ölçekli Harita Yapım Yönetmeliği'nde belirlenmiş hesap yöntemleri ile hesaplanmış kenarlardır (HKMO, 2001).

Özet çizelgeler üzerinden Bölüm 3'te bahsedilen, ölçmelerin ağırlıklandırılmasında esas alınacak dengeleme öncesi ölçmelerin karesel ortalama hataları hesaplanmıştır. Doğrultu ölçmeleri için istasyon dengelemesi hesabı ile kenar ölçmeleri için ise alet üreticisi tarafından verilen  $2\text{mm}+2\text{ppm}$  katsayıları kullanılarak dengeleme öncesi ölçülerin karesel ortalama hataları belirlenmiştir. Bu hesaplar sonucunda açılar için en küçük değer P-110 noktasında  $\pm 2.3''$  ve en büyük değer K-101 noktasında  $\pm 10.8''$  olarak hesaplanmıştır. Kenar ölçmeleri ise yapılan hesaplarda bütün kenarların dengeleme öncesi karesel ortalama hatası  $\pm 2.0\text{ mm}$  olarak elde edilmiştir.

#### **5.4. Uygulama Örneği Ölçmelerinin En Küçük Kareler Yöntemi İle Dengelenmesi**

Uygulama örneği ölçmeleri en küçük kareler yöntemi ile dengelenmiştir. Dengeleme hesabı için gama-local programı kullanılmıştır. Çek Teknik Üniversitesi, İnşaat

Fakültesi, Harita ve Kartografya bölümü tarafından halen geliştirilmekte olan ve GNU lisansı ile dağıtımı yapılan program iki boyutlu, üç boyutlu ağların ve nivelman ağlarının en küçük kareler yöntemi ile dengeleme hesabını yapabilmekte halen geliştirilmekte olan modüllerinin tamamlanmasını ile de GPS ağlarının dengelenmesini mümkün kılacaktır (Cepek A., 2007).

gama-local programı hesaplamalar için giriş verisini xml formatında kabul etmektedir. Ayrıca program dengeleme metodunun kontrolü, iterasyon sayısı kontrol noktalarının tanımlanması gibi belli başlı parametreleri de bu xml dosyası yardımıyla yapar. Şekil 5.2’de programın xml giriş dosyasının bir örneği gösterilmiştir.

```

gama-local_xml_ornek - Notepad
File Edit Format View Help
<?xml version="1.0" ?>
<!DOCTYPE gama-local
SYSTEM "http://www.gnu.org/software/gama/gama-local.dtd">
<gama-local>
<network>
<description>
=====
Ağın tanımlanması...
=====
</description>
<parameters
update-constrained-coordinates="yes"
sigma-act="apriori" />
<points-observations>
<point id="P-101" adj="xy" />
<point id="P-102" adj="xy" />
<point id="K-102" y="yyyy.yyy" x="xxxx.xxx" adj="xy" />
<obs from="P-101">
<direction to="K-103" val="0.00000" from_dh="0.00000" to_dh="0.00000" stdev="5.3" />
<direction to="P-102" val="384.06605" from_dh="0.00000" to_dh="0.00000" stdev="5.3" />
<direction to="K-101" val="392.10648" from_dh="0.00000" to_dh="0.00000" stdev="5.3" />
<direction to="P-104" val="343.03715" from_dh="0.00000" to_dh="0.00000" stdev="5.3" />
<direction to="P-106" val="226.25633" from_dh="0.00000" to_dh="0.00000" stdev="5.3" />
<direction to="P-103" val="200.43045" from_dh="0.00000" to_dh="0.00000" stdev="5.3" />
<direction to="P-108" val="207.47718" from_dh="0.00000" to_dh="0.00000" stdev="5.3" />
<distance from="P-101" to="P-102" val="16.3476" from_dh="0.00000" to_dh="0.00000" stdev="2.0" />
<distance from="P-101" to="P-104" val="5.9742" from_dh="0.00000" to_dh="0.00000" stdev="2.0" />
<distance from="P-101" to="P-106" val="12.4711" from_dh="0.00000" to_dh="0.00000" stdev="2.0" />
<distance from="P-101" to="P-103" val="23.9544" from_dh="0.00000" to_dh="0.00000" stdev="2.0" />
<distance from="P-101" to="P-108" val="38.9380" from_dh="0.00000" to_dh="0.00000" stdev="2.0" />
</obs>
</points-observations>
</network>
</gama-local>

```

Şekil 5.2: gama-local giriş dosyası örneği

gama local dengeleme hesabı sonrasında noktalara ve ölçmelere ait konum bilgisini, hata elipsi parametrelerini ve varyans – kovaryans matrisini de yine xml formatında vermektedir. Uygulama örneği verileri gama-local programı ile sabit noktaların koordinatlarının da bilinmeyen alındığı serbest dengeleme hesabına tabi tutulmuştur. Serbest dengeleme hesap yöntemi uygulama örneğinde kullanılan tünel içi kontrol ağını tanımlayan sabit kontrol noktalarının doğruluklarını belirleyebilmek için tercih edilmiştir. Serbest dengeleme hesabında Bölüm 3.5.4.’de bahsedilen normal denklem katsayılar matrisinin inversi doğrudan alınamaz. Bu nedenle bu matrisin dönüştürülmüş bir formu ile dengeleme hesabı yapılır (Bektaş S.).

Dengeleme hesabı sonrasında elde edilen kontrol noktalarının koordinat bileşenlerinin karesel ortalama hatası, konum doğrulukları ve hata elipsi parametreleri Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3'te gösterilmiştir.

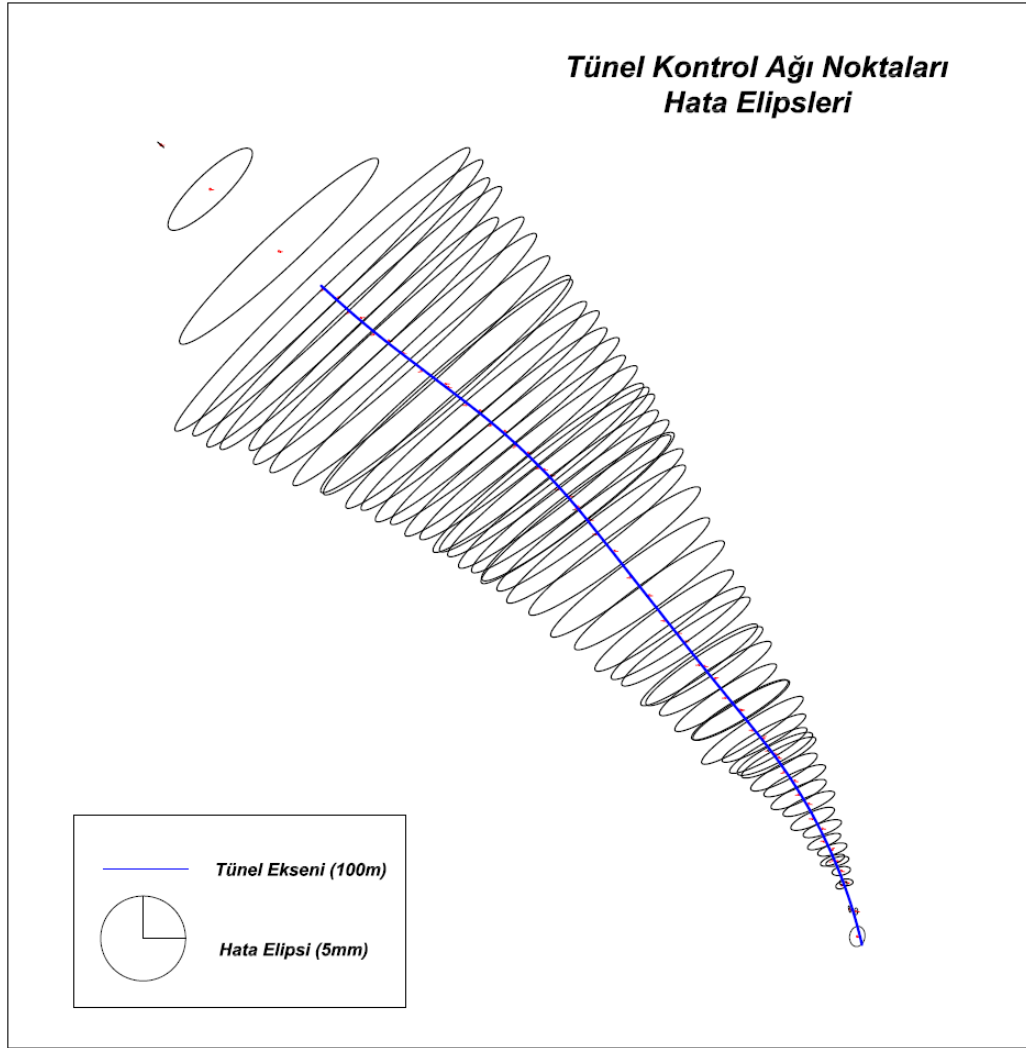
**Çizelge 5.2:** Uygulama örneği dengeleme hesabı sonuçları

NOKTA NO:	$m_x$ (mm)	$m_y$ (mm)	$m_p$ (mm)	$m_{xy}$ (mm)	Hata Elipsi Parametreleri		
					a (mm)	b (mm)	alpha (g)
P-101	0.7	1.4	1.6	1.1	1.5	0.5	77.3
P-102	0.5	1.1	1.2	0.9	1.1	0.5	87.1
P-103	1.0	1.9	2.2	1.5	2.1	0.6	75.3
P-104	0.6	1.4	1.5	1.1	1.4	0.5	83.6
P-105	1.4	2.6	2.9	2.1	2.8	0.8	73.0
P-106	0.8	1.7	1.9	1.3	1.8	0.6	80.8
P-107	1.8	3.3	3.7	2.6	3.6	0.9	70.9
P-108	1.1	2.3	2.5	1.8	2.4	0.7	77.3
P-109	2.2	3.9	4.5	3.2	4.4	1.0	69.1
P-110	1.5	3.0	3.4	2.4	3.3	0.8	74.2
P-111	2.7	4.5	5.3	3.7	5.2	1.0	67.3
P-112	1.9	3.7	4.1	2.9	4.0	0.9	71.8
P-113	3.2	5.1	6.0	4.2	5.9	1.1	65.7
P-114	2.4	4.3	5.0	3.5	4.9	1.0	69.7
P-115	4.0	6.0	7.2	5.1	7.1	1.2	63.3
P-116	2.8	4.9	5.6	4.0	5.6	1.0	67.9
P-117	4.9	6.9	8.5	6.0	8.3	1.3	61.7
P-118	3.5	5.7	6.7	4.7	6.6	1.2	65.5
P-119	6.0	8.1	10.1	7.1	10.0	1.5	60.3
P-120	4.4	6.5	7.9	5.6	7.8	1.3	63.4
P-121	7.0	9.4	11.7	8.3	11.6	1.6	59.3
P-122	5.3	7.6	9.2	6.5	9.1	1.4	62.0
P-123	8.1	10.5	13.3	9.4	13.2	1.7	58.4
P-124	6.4	8.9	11.0	7.7	10.8	1.6	60.4
P-125	8.8	11.2	14.2	10.1	14.1	1.7	58.0
P-126	7.6	10.1	12.6	8.9	12.5	1.7	59.4
P-127	9.3	11.8	15.0	10.6	14.9	1.8	57.6
P-128	8.4	10.9	13.8	9.7	13.7	1.7	58.7
P-129	10.0	12.4	15.9	11.2	15.8	1.8	57.1
P-130	9.0	11.6	14.7	10.4	14.6	1.8	58.3

**Çizelge 5.3:** Uygulama örneği dengeleme hesabı sonuçları

NOKTA NO:	$m_x$ (mm)	$m_y$ (mm)	$m_p$ (mm)	$m_{xy}$ (mm)	Hata Elipsi Parametreleri		
					a (mm)	b (mm)	alpha (g)
P-131	10.7	13.0	16.8	11.9	16.7	1.8	56.4
P-132	9.6	12.2	15.5	10.9	15.4	1.8	57.8
P-133	11.4	13.6	17.7	12.6	17.7	1.9	55.7
P-134	10.3	12.8	16.4	11.6	16.3	1.8	57.2
P-135	12.2	14.2	18.7	13.2	18.6	1.9	54.9
P-136	11.0	13.4	17.4	12.3	17.3	1.8	56.5
P-137	13.5	15.1	20.3	14.4	20.2	1.9	53.6
P-138	11.8	14.0	18.3	12.9	18.2	1.9	55.7
P-139	15.1	16.1	22.1	15.6	22.0	2.0	52.2
P-140	12.8	14.7	19.5	13.8	19.4	1.9	54.5
P-141	15.9	16.7	23.0	16.3	22.9	2.0	51.6
P-142	14.6	16.0	21.6	15.3	21.5	2.0	52.9
P-143	16.7	17.4	24.1	17.0	24.0	2.1	51.3
P-144	15.5	16.6	22.7	16.0	22.6	2.0	52.2
P-145	16.2	17.1	23.6	16.7	23.5	2.0	51.6
Y-101	2.5	4.4	5.1	3.6	5.0	1.1	69.0
Y-102	3.6	5.7	6.7	4.8	6.6	1.2	65.6
Y-103	4.7	6.9	8.4	5.9	8.2	1.4	63.0
Y-104	5.5	7.9	9.6	6.8	9.5	1.4	61.9
Y-105	8.7	11.3	14.3	10.1	14.2	1.9	58.5
Y-106	9.7	12.4	15.8	11.1	15.6	1.8	57.8
Y-107	12.7	14.7	19.4	13.7	19.3	2.0	54.7
Y-108	14.1	15.7	21.1	14.9	21.0	2.0	53.5
K-201	0.3	0.4	0.5	0.4	0.5	0.0	145.4
K-202	4.8	5.0	6.9	4.9	6.7	1.8	51.0
K-203	11.0	11.7	16.1	11.4	15.9	2.1	52.2
K-101	0.4	0.8	0.9	0.6	0.8	0.4	97.9
K-102	0.5	0.7	0.8	0.6	0.7	0.4	78.0
K-103	0.4	0.2	0.5	0.3	0.4	0.2	2.2
K-104	0.4	0.1	0.4	0.3	0.4	0.1	185.1
K-105	1.2	0.9	1.4	1.0	1.2	0.9	10.4

Dengeleme hesabı sonrasında elde edilen hata elipslerinin güzergaha göre durumuna Şekil 5.3'ten ulaşılabilir.



**Şekil 5.3:** Tünel içi yatay kontrol ağı hata elipsleri

Şekil 5.3'e göre hata elipsleri tünel ilerlemesi yönünde büyümektedirler. Bu hatanın tünel ilerlemesine bağlı olarak arttığını göstermektedir. Buna ek olarak hata elipslerinin büyük eksenleri Şekil 6.3'te görüldüğü gibi tünel eksenine yaklaşık dik karakterdedirler. Bu da tünel geometrisinin hatanın yayılma yönüne etkisinin olduğunu göstermektedir.

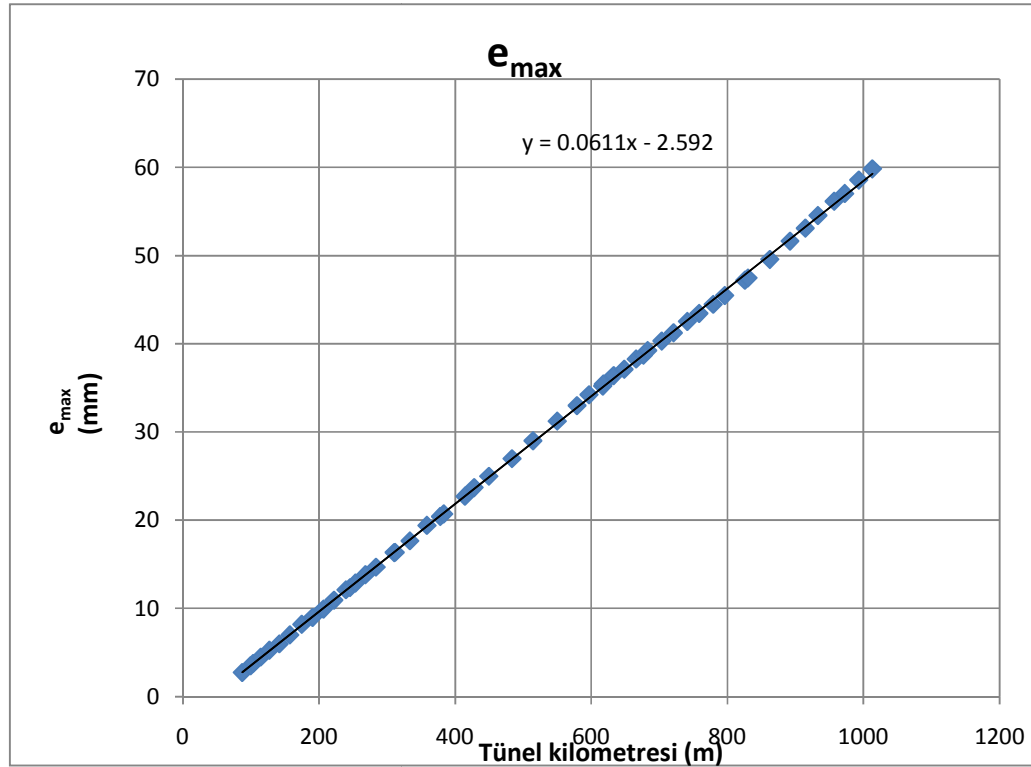
### **5.5. Uygulama Örneği Verilerinden Tünel Doğrultu Hatasının Hesaplanması**

Uygulama örneğinde dengeleme sonrasında elde edilen hata elipsleri kullanılarak Bölüm 3'te bahsedilen tünel doğrultu hatası hesaplanmıştır. Hesaplama hata elipslerinin sayısal ortamdaki çiziminden yararlanarak (3.61), (3.62) ve (3.63) eşitliklerinde bulunan açılar ölçülmüştür. Yine bu denklemler kullanılarak

hesaplamalar tamamlanmıştır. Hesaplamalar sonunda bulunan tünel doğrultu hataları için güven düzeyi Bölüm 4 örnekleriyle karşılaştırmaya imkan vermesi için %99.8 seçilmiştir.

Hesaplara göre tünel içinde tesis edilen son nokta olan P-143 noktasında tünel açma hatası  $\pm 58$  mm olarak bulunmuştur.

Şekil 5.4'ten uygulama örneğinden elde edilen tünel doğrultu hatasının güzergah boyunca yayılması görülebilir.



Şekil 5.4: Uygulama örneği için tünel doğrultu hatasının yayılması

Şekil 5.4'teki doğrunun eğimini veren formülden yararlanarak 1000 metre tünel uzunluğu için elde edilecek tünel doğrultu hatası  $\pm 58.5$  mm olarak hesaplanır.

## 5.6. Uygulama Örneği Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Uygulama örneğinin değerlendirilmesi sonucunda 1000 metre tünel için tünel doğrultu hatası %99.8 güven aralığında  $\pm 58.5$  mm olarak belirlenmiştir. Bu değer bölüm 5'te incelenen NBST örneğinde tek hat tüneller için elde edilen 12.5 mm'lik değerden daha büyük bir değerdir.



Uygulama örneğini hesaplarının ve değerlendirilmesinin sonuçlarında (3.64) eşitliğinde dikkate alınarak yüzey ağı bileşeni de ihmal edilmezse elde edilecek tünel doğrultu hatasının daha da büyük olacağına dikkat edilmelidir.

Uygulama örneği sonuçları ile Bölüm 4'te verilen tasarımlar karşılaştırılırsa aşağıdaki sonuçlar ortaya çıkmaktadır:

- Uygulama örneğinde ölçmeler 3 seri olarak yapılmıştır. Bu NSBT projesi örneğinde verilen en az 6 seri sayısından daha küçük bir değerdir. NSBT örneğinde kanıtlanan seri sayısının artırılmasının ölçmelere olumlu etkisi de göz önünde bulundurulduğu bu beklenen bir sonuç olmaktadır.
- NSBT örneğinde belirli kilometrelerde gyro-teodolit ölçmeleri yapılmıştır. Ancak çalışmanın uygulama örneğinde herhangi bir gyro-teodolit ölçmesi mevcut değildir.
- NSBT örneğinde verilen ağ tasarımı, tünel ilerlemesine göre sürekli olarak tünel başlangıç noktasından itibaren tekrar tekrar ölçülmüştür. Ancak uygulama örneğinde uygulanan kampanya yaklaşımı sonucu önceki kampanyalarda ölçülen noktaların hiçbir şekilde kaya defromasyonlarından etkilenmedikleri varsayılmaktadır. Bu durumun eldeki verilere göre bilimsel olarak kanıtlanması mümkün değildir. Uygulama örneği sonucunda elde edilen nokta konum ve konum doğruluklarının ve tünel doğrultu sapmasının bu etkilere maruz kalıp kalmadıkları bilinmemektedir.
- NSBT örneğinden bağımsız olarak tünel içi yatay kontrol ağlarında hata kaynağı olarak değinilen yanal refraksiyon ve çekül sapmasının ölçmelere etkisinin ağı geometrik tasarımı ile ölçmelere olan etkilerinin en aza indirilmesine çalışılmıştır. Ancak özellikle yanal refraksiyon etkisinin tam olarak modellenmesini sağlayan mevcut bir yaklaşım bulunmadığı için ölçmelerde düzensiz bir hata olarak halen bulunduğu söylenebilir.

•

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada tünel açma çalışmalarından, tünel açma çalışmaları içinde görece yeni bir uygulama olan TBM'lerden ve TBM kazılarında uygulanan jeodezik yöntemlerden, bu jeodezik yöntemlerin hata kaynaklarından ve giderilme yöntemlerinden bir uygulama örneği verilerek bahsedilmiştir.

Tünel açma çalışmaları maliyeti yüksek, özellikle ölçme çalışmaları sonucu oluşabilecek hatalar sonucunda ciddi etkilenebilecek çalışmalardır. Bu durum ve çalışmada ve uygulama örneğinde değinilen konular göz önünde bulundurularak aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Bölüm 3'te bahsedilen yanal refraksiyon etkisi tam olarak modellenenilmiş bir büyüklük değildir ve uygulanan ölçme yöntemleri, yanal refraksiyon etkisinin ölçmelerden tamamen arındırılması sağlanamamaktadır.
- Uygulama örneğinde de değinildiği gibi maliyeti ve sonuçta elde edilecek tünel yapısını doğrudan etkilemesi olası tünel doğrultu hatasını en aza indirmeyi amaçlayan jeodezik çalışmaların, üretimi en üste çıkarma kaygısı ile yapılması gerekli görülen ve kaynaklarca tavsiye edilen ölçmelerin belli zamanlara sıkıştırılması nedeniyle oluşabilecek hatalar sonucunda daha büyük para ve zaman kaybı yaşanabilir. Bu nedenle yapım işlerinin yanısıra tünellerde yapılacak jeodezik çalışmaların da yeterli süreler verilerek projenin ilerleyiş aşamalarını gösteren iş planları içerisine alınması gerekmektedir.
- Uygulama örneğinde ve kaynaklarda verilen diğer örneklerin sonuçlarından yararlanarak, tünel içinde tesis edilen yatay kontrol ağı noktaları kullanılarak yapılacak olan ve tünel yönlendirilmesi bölümünde tünel açma yöntemine göre uygulama teknikleri anlatılan aplikasyon çalışmalarının sonucunda elde edilecek doğruluklar araştırılmamıştır. Bu doğrulukların belirlenmesi tünel

inşaat işleri için talep edilen doğruluk baz alınarak kullanılacak yöntem, kullanılacak aletler, ölçme sayısı ve sıklığı gibi uygulama safhalarının daha uygun planlanmasını ve belirlenen toleranslar çerçevesinde tünel inşaat işlerinin yapılmasına olanak verecektir.

- Bölüm 3'te bahsedildiği gibi tünel inşaat işleri için standartlaştırılmış inşaat toleranslarına kaynaklarda rastlanamamıştır. Yukarıda da değinildiği gibi bu toleransların standartlaştırılması yapılacak ölçme işlerinin optimizasyonunu kolaylaştıracak ve tünel inşaat işlerinin daha kaliteli olarak yapılmasına olanak sağlayacaktır.

Tünel açma çalışmaları Geomatik Mühendislerinin aktif olarak görev ve sorumluluk aldıkları projelerdir. Bu çalışma alanı ile ilgili araştırılması ve geliştirilmesi gereken birçok kısıt ve problem bulunmaktadır.

## KAYNAKLAR

- Ademoğlu Y.**, 2009, Modern Tünelcilikte jeodezik alt yapı ve jeodezik ölçmeler, *Yüksek Lisans Tezi, İTÜ*
- Ademoğlu Y., Gengeç N.E., Güven N., Kösem C.**, Yer Altından Notlar, Kösem C., *HKMO İstanbul Bülteni*, Ağustos 2008, Sayı , 28-31.
- Ayan T.**, 2003, Dengeleme Hesabı Ders Notları, *İstanbul*
- Baykal O.**, 2009, Mühendislik Ölçmeleri -I Kara ve demiryollarında geçi geometrisi tasarımı ve uygulaması Cilt - I, Birsen Yayınevi
- Bektaş S.**, Serbest Dengeleme
- Cepek A.**, 2007, Gnu Gama 1.9.03
- Chrzanowski A.**, 1981, Optimization of breakthrough accuracy in tunnelling surveys
- Featherstone W.E.**, 1999, The use and abuse of vertical deflections, *Sixth South East Surveyors' Congress Fremantle, West Australia*, November 1-6
- Fowler S.**, 2006, Design and preanalyses of underground control networks for tunnel construction, *Lisans Tezi, University Of Otago*
- Ghilani C. D., Wolf P. R.**, 2006, Adjustment computations spatial data analysis, John Wiley & Sons Inc.
- Glaus R., Ingensand H.**, 2002, Tunnel Surveys for New CERN Particle Accelerators, *TS6.2 Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering II*, Washington DC USA April 19-26
- Greening T., Robinson G., Robbins J., Ruland R.**, Control survey for underground construction of super conducting super collider
- HKMO**, 2001, Büyük ölçekli haritaların yapım yönetmeliği, *Ankara*
- Ingensand H., Ryf A., Stengele R.**, 1998, The Gotthard Base Tunnel - a challenge for geodesy and geotechnics, Symposium on geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, Eisenstadt April 20-22
- Korittke N.**, Influence of horizontal refraction on the traverse measurements in tunnels with small diameters
- Lee A.H.S.**, 2007, Engineering survey system for TBM (Tunnel Boring Machine) tunnel construction, *Strategic Integration of Surveying Services FIG Working Week 2007, Hong Kong May 13-17*
- Ünlütepe A., Messing M.**, 2005, Tünel açma uygulamalarında son yenilikler, 2.

*Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, İstanbul Kasım 23-25*

- URL - 1** <<http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Tunnel&printable=yes>>, alındığı tarih 25.04.2010
- URL - 2** <<http://www.gautrain.co.za/index.php?pid=1822&ct=1&fid=6&click=6>>, alındığı tarih 25.04.2010
- URL - 3** <<http://www.p3planningengineer.com/productivity/tunneling/tunneling>>, alındığı tarih 25.04.2010
- URL - 4** <<http://www.vmt-gmbh.de/>> alındığı tarih 25.04.2010
- URL - 5** <<http://www.tunneltalk.com/Equipment-Sales.php>> alındığı tarih 26.04.2010
- URL - 6** <<http://www.taylor-hobson.com/uploads/images/alignment-systems.pdf>> alındığı tarih 26.05.2010
- URL - 7** <<http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Gyrotheodolite&printable=yes>> alındığı tarih 26.04.2010

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad Soyad:** Necip Enes GENGEÇ  
**Doğum Yeri ve Tarihi:** Kayseri - 09.11.1984  
**Adres:** Vişnezade Mah. Çatalmektep Sok. Ertem Apt. Beşiktaş  
İstanbul  
**Lisans Üniversitesi:** İstanbul Teknik Üniversitesi

### Yayın Listesi:

**Gengeç N.E., Tarı E.,** 2007, Tasarlanmış Bir Raylı Sistem Geometrisinin Yeni Nesil Geçiş Eğrileri Kullanılarak Sabit Hızlı Hareket Modelinde İncelenmesi, *3.Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu*, 24 -26 Ekim, Konya