



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**TÜNEL İNŞAATLARINDA HARİTA
MÜHENDİSLİĞİ FAALİYETLERİ VE TÜNEL
DEFORMASYONLARI**

Osman KÜÇÜKDEMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2021
KONYA

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TÜNEL İNŞAATLARINDA HARİTA MÜHENDİSLİĞİ FAALİYETLERİ VE TÜNEL DEFORMASYONLARI

Osman KÜÇÜKDEMİRCİ

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

Danışman: Prof. Dr. Ayhan CEYLAN

2021, 143 Sayfa

Jüri

**Prof. Dr. Ayhan CEYLAN
Prof. Dr. Cevat İNAL
Prof. Dr. İsmail ŞANLIOĞLU**

Topoğrafyanın yeryüzünde ulaşım engel olduğu alanlarda ulaşımın güvenli, konforlu ve ekonomik olarak sağlanması amacıyla tüneller kullanılmaktadır. Tünel açma çalışmaları ülkemizde ve dünyada halen gelişmekte olan büyük çaplı planlama ve organizasyon gerektiren mühendislik uygulama alanlarıdır. Tünel yapılarının projeye uygun bir şekilde yönlendirilmesi, çalışma alanında ve varsa çevresindeki yapılarda oluşan hareketlerin izlenmesi, bu hareketlerin zamana bağlı olarak deformasyon miktarlarının tespiti ve bu deformasyonların herhangi bir hasara neden olup olmayacağını önceden belirlenmesi gerekmektedir. İnsan ve çevre güvenliği için en önemli faaliyetlerden biri olan deformasyon ölçmelerinin yapılması kadar elde edilen verilerin doğru yorumlanması da gerekmektedir. Tüm bunların yapılabilmesi için birçok mühendislik disiplininin birlikte çalışmaları şarttır. Bu mühendislik disiplinlerinden biri de Harita Mühendisliğidir. Tünel inşa çalışmalarında Harita Mühendisleri tünel kazı uygulamalarının temeli olan konum bilgisinin üretimi, proje verilerine göre yönlendirilmesi için gereken jeodezik çalışmalar ve projenin güvenli bir şekilde ilerlemesi için gereken deformasyon ölçmeleri ve analizi faaliyetlerini yerine getirmektedirler.

Bu çalışma kapsamında NATM tünel açma metodlarının uygulandığı, Ankara – Sivas Demiryolu projesi kapsamında yapımı devam eden ve proje uzunluğu 4.593,20 metre olan Tünel - 15 uygulama alanı olarak seçilmiş, tünel açma çalışmalarının gereksinimleri belirlenmiş, literatür araştırması yapılmış, tünel işlerindeki jeodezik çalışmaların yönetimi araştırılmış ve bu bilgiler ışığında tünel içinde yapılan ölçme verileri kullanılmıştır. Harita Mühendislerinin tünel yapım faaliyetlerindeki görev ve sorumlulukları hakkında bilgi verilmiş, elde edilen veriler kullanılarak Tünel-15'in kazı yönlendirmeleri yapıp, düşey ve yatay deformasyonların belirlenmesi ve deformasyonların zamanla olan değişimleri ile grafikleri elde edilmiştir. Sahada elde edilen gerçek okumalarla kıyaslama yapılarak, yüzey deformasyonlarının, tehlike yaratacak çok büyük değerlere ulaşmadan tespit edilebildiği görülmüş ve ülkemizde halen gelişen tünel yapım işlerinde Harita Mühendisleri için yararlı olacağı düşünülen önerilere yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Deformasyon Ölçmeleri, Jeodezik ve Geoteknik Yöntemler, Tünel, Tünel Açma Teknikleri, Tünel Ölçmeleri

ABSTRACT

Master Thesis

GEOMATIC ENGINEERING ACTIVITIES AND TUNNEL DEFORMATIONS IN TUNNEL CONSTRUCTION

Osman KÜÇÜKDEMİRÇİ

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

Advisor: Prof. Dr. Ayhan CEYLAN

2021, 143 Pages

Jury

**Prof. Dr. Ayhan CEYLAN
Prof. Dr. Cevat İNAL
Prof. Dr. İsmail ŞANLIOĞLU**

Tunnels are underground passageways that are used to ensure safe, comfortable and economical transportation in areas where topography prevents transportation on earth. In our country and in the world tunnel boring works are still developing areas of engineering application that require large-scale planning and organization. It is necessary to direct the tunnel construction structures in accordance with the project, to monitor the movements that occur in the work area and, if any, in the surrounding structures, to determine the amount of deformation depending on the time of these movements and to determine in advance whether these deformations will cause any damage. As well as performing deformation measurements, which is one of the most important actions taken for human and environmental safety, correct and accurate interpretation of the obtained data is highly essential too. This can only be achieved by ensuring so many different engineering disciplines work together closely. One of these engineering disciplines is Geomatic Engineering. In tunnel construction works, geomatic engineers carry out the geodetic studies required for the production of location/ map information, which is the basis of tunnel excavation applications, the necessary geodetic studies to guide the project according to the project data, and the deformation measurement and analysis activities required for the safe progress of the project.

In this study, the construction of Tunnel-15, which is under construction within the scope of the Ankara - Sivas Railway project, where NATM tunneling methods are applied and the project length is 4.593.20 meters, was selected as the application area, the requirements of the tunneling studies were determined, the literature was researched, the management of the geodetic studies in the tunnel works were examined, and in the light of this information, the measurement data obtained in the tunnel was used.

Information was given about the duties and responsibilities of the Geomatic Engineers in tunnel construction activities, the excavation directions of the Tunnel-15 were made using the acquired data, the determination of vertical and horizontal deformations and the changes of deformations over time were obtained. By making a comparison with the actual readings gained in the field, it has been observed that surface deformations can be detected before reaching very large values that might pose danger, and also some suggestions provided in this study are thought to be useful for Geomatic Engineers in tunnel construction that is still developing in our country.

Keywords: Deformation measurements, Geodetic and Geotechnical Method, Tunnel, Tunneling techniques, Tunnel measurements



Merhum babam İbrahim KÜÇÜKDEMİRCİ anısına,

ÖNSÖZ

Zorlu ve sıkıntılı bir süreç olan yüksek lisans ders ve tez yazım aşamasındaki çalışmalarını yapabilmem için emeği geçenlere teşekkürü bir borç bilirim. Lisans öğreniminde derslerinde mesleğimizin en önemli bilgilerini kendisinden öğrendiğim hocalarımdan biri olan, öğrenmenin gerekliliğini bize her seferinde kanıtlayan, soru ve sorunlarımı çözümsüz bırakmayan, bana yol gösteren değerli tez danışmanım Prof. Dr. Ayhan CEYLAN'a teşekkür ederim. Lisans öğrenimimden başlamak üzere yüksek lisans ders dönemi bitimine kadar birlikte çalıştığım ve çalışma konumun belirlenmesinde yardımcı olan, ne konuda olursa olsun ne zaman istersen beni arayabilirsin diyerek manevi desteğini her zaman hissettiren Prof. Dr. İsmail ŞANLIOĞLU'na teşekkür ederim. Araştırma görevlisi hocam Behlül Numan ÖZDEMİR'e öğrenim hayatım boyunca verdiği destekler için teşekkür ederim.

Yapmış olduğum çalışma için gerekli evrak, doküman ve uygulama alanının sağlanmasında yardım ve kolaylıklar sağlayan TCDD 5. Grup Müdürlüğü yönetim kadrosuna ve kontrol amirlerime, bir üyesi olmaktan mutluluk duyduğum UBM Müşavirlik Hizmetleri A.Ş.'nin yönetim kadrosuna ve değerli çalışma arkadaşlarıma, yüklenici firma olarak çalışma yürüten YDA İnşaat'ın Elmadağ-Kırıkkale YHT etüt-proje şefi Murat MARZİOĞLU'na, mesleği seçmemde büyük etkisi olan ve altyapı işine yönelmemi sağlayan sevgili büyüğüm, abim TCDD Harita İşleri Müdürü İbrahim CEYLAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Bana eksikliklerini hissettirmeyen, maddi ve manevi destekleri ile bugünlere gelebilmemi sağlayan ve çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen hayatımın her evresinde destek veren, bana olan güvenini her zaman hissettiren anneme ve yüksek lisans hayatım boyunca ayrıca kahrımı çeken ablalarıma teşekkür ederim.

Osman KÜÇÜKDEMİRCİ
KONYA-2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET	ii
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. MATERYAL VE YÖNTEM	8
3.1. Tünel	8
3.1.1. Tünel açma nedenleri	10
3.1.2. Tünel yapım çalışmalarının tarihsel gelişimi	11
3.1.3. Tünel yapım çalışmalarında maliyeti etkileyen faktörler.....	14
3.2. Tünel Yapımına Başlanmadan Önce Yapılan Çalışmalar	15
3.2.1. Jeolojik çalışmalar	18
3.2.2. Jeodezik altyapı.....	20
3.3. Tünel Açma Yöntemleri.....	25
3.3.1. Parçalı kesitli yöntemler (Klasik yöntemler).....	26
3.3.2. Yeni Avusturya tünel açma yöntemi (NATM).....	33
3.3.3. Tünel kazma makinesi (Tbm).....	57
3.3.4. Aç – Kapa tünel açma yöntemi.....	59
3.3.5. Del – Patlat tünel açma yöntemi	61
3.3.6. Batırma tünel açma yöntemi.....	63
3.4. Tünel Kazı Çalışmalarının Yönlendirilmesi	65
3.4.1. TBM kazı çalışmalarının yönlendirilmesi.....	67
3.4.2. Mekanik kazılarda yönlendirme	70
3.4.3. Batırma tünellerinde yönlendirilme	72
3.4.4. Del-Patlat yönteminde yönlendirme	73
3.5. Tünel Ölçme Çalışmalarındaki Hata Kaynakları	74
3.5.1. Refraksiyon etkisi	75
3.5.2. Çekül sapması	77
3.6. Deformasyon	79
3.6.1. Deformasyon nedenleri	80
3.6.2. Deformasyon ölçmelerinin tarihçesi	82
3.6.3. Deformasyon ölçmeleri nerelerde kullanılabilir?	83
3.6.4. Deformasyon ölçme yönteminin seçimi.....	84
3.6.5. Deformasyon analizinde kullanılan yöntemler.....	84
3.6.6. Deformasyon modelleri.....	84
3.6.7. Statik deformasyon modeli.....	85
3.6.8. Deformasyon ölçme yöntemleri	86

3.6.9. Deformasyon izleme ekipmanları.....	90
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	101
4.1. Çalışma Bölgesi ve Projenin Tanıtılması.....	101
4.2. Deformasyon Ölçmeleri.....	110
4.2.1. Jeodezik ölçmeler.....	118
4.2.2. Geoteknik ölçmeler	121
4.2.3. Yüzey okumalarıyla deformasyon izleme yöntemi	124
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	132
KAYNAKLAR	136



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

d:	Yoğunluk
P:	Basınç
T:	Sıcaklık
mm:	Milimetre
cm:	Santimetre
m:	Metre
km:	Kilometre
\bar{x} :	Kuzey yönünde artış yönünü gösteren bileşen
\bar{p} :	Doğu yönünde artış yönünü gösteren bileşen
V:	Hız vektörü
A:	İvme vektörü
t:	Zaman
ppm:	Milyonda bir
mgon:	miligon

Kısaltmalar

ADECO-RS:	Kaya ve Zeminlerde Kontrollü Deformasyon Analizi (The Analysis of Controlled Deformation in Rocks and Soils)
BÖHHYBÜY:	Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği
CAD:	Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design)
ED50:	Avrupa Datumu 1950 (European Datum 1950)
GPS:	Küresel Konumlama Sistemi (Global Positioning System)
GNSS:	Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (Global Navigation Satellite Systems)
ITRF:	Uluslararası Yersel Referans Ağı
RTK:	Gerçek Zamanlı Kinematik (Real Time Kinematic)
NATM:	Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (New Austria Tunnelling Method)
TBM:	Tünel Açma Makinesi (Tunnel Boring Machine)
TCDD:	Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
TUTGA:	Türkiye Ulusal Temel GPS/GNSS Ağı
TUSAGA:	Türkiye Sabit GPS/GNSS Ağı
TTGA:	Türkiye Temel Gravite Ağı
TUDKA:	Türkiye Düşey Kontrol Ağı
TUJJB:	Ulusal Jeodezi ve Jeofizik Birliği
KGM:	Karayolları Genel Müdürlüğü
KTŞ:	Karayolları Teknik Şartnamesi

1. GİRİŞ

Dünyada yer altı yapılarına olan ihtiyacın artmasıyla birlikte, ülkemizde de tüneller daha fazla tercih edilen yapılar haline gelmiştir. Gelişen teknoloji ve kazanılan tecrübelerle beraber ülkemizde son yıllarda tünel projelendirilmesi ve yapımı hızla artmış ayrıca kendi alanlarında ilkleri barındıran tüneller inşa edilmiştir.

Şehirlerde yaşayan ve şehirlerarası ulaşımı kullanan insan sayısının artması insanlara zaman kazandıracak, mesafeleri kısaltacak ve böylece günümüzün pahalı bir ihtiyacı olan yakıttan da tasarruf edilmesini sağlayacak şekilde bir ulaşım yönteminin ihtiyacını doğurmuştur. Tüneller, projenin özelliğine uygun ulaştırma araçları kullanılarak, doğal koşulların ulaşım açısından elverişsiz olduğu, farklı noktalar arasındaki ekonomik, güvenli ve sınırlı olmayan sürede ulaşımı sağlamaya yönelik olan büyük ölçekli, disiplinler arası çalışma gerektiren mühendislik yapılarıdır. Ulaşım başta olmak üzere sığınma, depolama, altyapı ve savunma gibi ihtiyaçları karşılamak amacı taşıyan, zemin ve topoğrafya koşullarının etkisine göre yapım teknikleri belirlenen tünellere günümüzde artan bir ihtiyaç vardır.

Tünel yapımı ihtiyacının artmasıyla, gelişen teknolojiye bağlı olarak tünel açma yöntemleri konusunda geçmişten günümüze farklı birçok yöntem denenmiş ve bu yöntemler gelişerek bugünkü halini almıştır. 1946 yılında Prof. L.v. Rabcewicz tarafından oluşturulmuş olan ve tünel yapım uygulamalarına yeni prensipler kazandıran Yeni Avusturya Tünel Metodu (NATM), kayayı kayaya taşıma prensibine kurulu, günümüzde yaygın olarak uygulanan, kazı sırasında beklenmedik zemin değişimlerine de kolaylıkla uygulanabilirliği olan ve tahkimatları şartlara göre değiştirilebilen parçalı kesit kazı yöntemidir.

Tünel inşaatlarındaki ölçüm faaliyetleri tünel projelerinin istenilen hassasiyette, güvenli ve düşük maliyetli bir şekilde yüksek kalite ile tamamlanmasını sağlamaya yönelik çalışmalar olması dolayısıyla büyük öneme sahiptir. Tünel projelerinin uygulaması esnasında yapım çalışmalarının yönlendirilmesi kadar, deformasyon ölçmeleri de emniyeti sağlamak ve çalışmalar sırasında oluşabilecek herhangi bir çökme sonucu uğranacak zararları önlemek için titizlikle yürütülmesi gereken çalışmalardır. Projenin devamı ve tamamlanmasından sonra da belli aralıklarla yapılacak olan deformasyon ölçmeleri, tünelin güvenli olarak kullanılabilmesi için son derece önemli ölçme faaliyetlerindedir.

Bu çalışmada, Ankara – Sivas Demiryolu projesi kapsamında Elmadağ-Kırıkkale Kesim-1 (Km:45+440 - 74+100) hattında yapımı devam eden ve proje uzunluğu 4.593,20 metre olan Tünel-15 uygulama alanı olarak seçilmiştir. NATM (Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi) ile tünel yapım faaliyetleri kapsamında Harita Mühendislerinin görev ve sorumlulukları içerisinde yer alan ölçme işleri, kazının yönlendirilmesi ve tünel içerisinde oluşan deformasyonların tespiti, gerekli bilgilerin incelenmesi ve aktarılması bu çalışma ile amaçlanmıştır.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Satır (2007), Doğu Karadeniz Bölgesinde yapımına devam edilen Doğu Karadeniz Sahil Devlet Yolu güzergâhındaki “Trabzon 2 ve Arhavi” tünellerinde deformasyonların; jeodezik, geoteknik ve sonlu eleman yöntemi gibi farklı deformasyon izleme metotları kullanılarak tespiti ve analizi amaçlanmıştır. Böylelikle birden fazla metotla elde edilen veriler incelenerek deformasyonlar yorumlanmıştır.

Her iki tünelde yapılan uygulamalarda da jeodezik ölçüler, geoteknik ölçüler ve sonlu eleman yöntemi ile belirlenen deformasyonların uyumlu olduğu sayısal verilerle de kanıtlanmıştır. Sonlu Eleman Yönteminin çok yönlü ve esnek problem çözme yapısı; karmaşık-sürekli değişim gösteren çalışma alanlarında ve karşılaşılan problemlerde neden sonuç ilişkilerini belirlemek için çok etkin bir şekilde kullanılabilmesinden dolayı bu yöntemin kullanılmasının yararlı olduğu vurgulanmıştır. Sonuç olarak, büyük mühendislik yapılarındaki deformasyonların belirlenmesi için jeodezik, geoteknik ve sonlu eleman yönteminin birlikte kullanılması önerilmiştir. Bu şekilde deformasyonların daha doğru değerlerde tespiti ve analizi yapılarak, gerekli tedbirlerin zamanında alınması sağlanabileceği ifade edilmektedir.

Ademoğlu (2008), tünel yapım aşaması, tünel tasarımının oluşturulması, kontrolünün ve onayının yapılabilmesi için kritik öneme sahip olan jeodezi ve ölçme biriminin uygulamalardaki sorumlulukları ve gelişen teknolojiye paralel olarak mesleğin ulaştığı teorik ve teknik gelişmelerin tünel yapım faaliyetlerine yansımaları araştırılmıştır. Yapılacak ölçme çalışmaları yöntemlerinin belirlenmesi, jeodezik alt yapının dizaynı ve sahada oluşturulması, kontrol ağının ön analiz değerlendirmeleri, tünel çalışmalarının yönlendirilmesindeki sistematik hatalar ile bunlardan en önemlisi olan refraksiyon hatasının nedenleri, bu hataların ölçüleri ne derecede etkilediği ve bu etkinin azaltılıp azaltılamayacağı bu çalışmada ele alınmıştır. Bu kapsamda Kadıköy-Kartal Metro İnşaat çalışmalarında yapılan jeodezik ölçme uygulamalarına yer verilmiştir. Çalışmada, tünel kavramının genel incelenmesi ve tünel açma faaliyetlerinde yer alan Harita Mühendislerinin görev ve sorumluluklarının neler olduğu açıklanmıştır. Ayrıca, projede kullanılan jeodezik altyapının nasıl tasarlandığı ve uygulandığı, tünel içi kontrol ağının önemi ve nokta konum doğruluğunu etkileyen hata kaynakları ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Seydanlıoğlu (2009), bu çalışmada 4.Levent- Ayazağa metro inşaatına ilişkin düşey ve yatay deformasyonların belirlenmesi ve deformasyonların zamanla olan

değişimleri ile yatay ve düşey deformasyon arasındaki ilişkinin incelenmesi için yeryüzü ölçmelerinde nivelman ölçmeleri kullanılırken, tünel içerisinde ise koverjans ölçmeleri kullanılmıştır. Nivelman ölçmelerinde mutlak sonuç elde edilirken, şerit ekstensometre ile yapılan koverjans ölçmelerinde ise bağıl sonuç elde edilmiştir. Bu nedenle her iki yöntemle elde edilen sonuç arasındaki ilişki sağlıklı olarak kurulamamıştır. Bu sonuçların yorumlanabilmesi için şerit ekstensometre ile yapılan koverjans ölçmelerine ek olarak koverjans bulonlarında 3D yöntemiyle ölçme yapmak gerekmektedir. Bu ise büyük deformasyonlarla karşılaşıldığında yapılabilmektedir. Uygulamalarda bu eksikliğin giderilmesi ve bilgilerin doğru yorumlanabilmesi için şerit ekstensometre ölçmeleri ile elde edilen sonuçların değerlendirilmesi için tünel uygulamalarında mutlak sonuç veren yeni bir yaklaşımlar ortaya konmuştur. Ayrıca, büyük mühendislik yapılarındaki deformasyon ölçmelerinin önemi ve ölçmeler sonucunda elde edilen verilerin doğru yorumlanması ve projenin tamamlanmasından sonra da belli periyotlarda deformasyon ölçmeleri yapılmasının projenin güvenliği ve bakımı için son derece önemli olduğu vurgulanmıştır.

Gengeç (2010), bu çalışmada tünel yapım çalışmalarında diğer yöntemlere göre yeni bir yöntem olarak karşımıza çıkan tünel açma makinelerinin (TBM) kazı yönlendirmesinde yapılan jeodezik çalışmalar, ölçme yöntemlerinin seçimi, hata kaynakları ve bu hataların giderilme yöntemleri uygulama örnekleri ile açıklanmıştır. Tünel yapım faaliyetleri Harita Mühendislerinin büyük riskler barındıran görev ve sorumlulukları üstlendikleri çalışma alanı olduğu vurgulanmış, bu çalışma için seçilen uygulama sahası için de, tespit edilmesi ve giderilmesi gerekli olan bazı sorunların ve olumsuz koşulların bulunduğu belirtilmiştir.

Köse (2018), Yeni Zigana Tüneli yapımındaki harita mühendisliği disiplininin faaliyetlerini irdelemiştir. Çalışmada uygulama alanı olarak seçilen Yeni Zigana Tüneli, Gümüşhane'ye bağlı güneyde Torul ile Trabzon'a bağlı kuzeyde Maçka ilçeleri arasında D.885 karayolunun bir parçası olarak, her ikisi de 14,5 km ve toplamda 29 km olan çift tünel olarak yapılmaktadır. Tez çalışmasıyla Yeni Zigana Tüneli projesi için yapılan jeodezik ölçme faaliyetleri, kullanılacak jeodezik referans sisteminin belirlenmesi, yükseklik ile jeoid modelinin seçimi, kullanılacak harita projeksiyonu tespiti, koordinat dönüşüm parametreleri, GNSS (Küresel Navigasyon Uydu Sistemi) - RTK (Gerçek Zamanlı Kinematik Uydu Sistemi) servisi kullanımı ve halihazır harita yapım çalışmaları araştırma konuları olarak seçilmiştir. Tünel projelerindeki ölçme işlerinin diğer mühendislik projelerindeki ölçme işlerine göre olan farklılıklarından ve zorluklarından

bahsedilmiştir. Tünel projesini planlanan sürede tamamlayabilmek için kazı çalışmalarının hem Gümüşhane hem de Trabzon tarafından eş zamanlı olarak yürütüldüğü ve tünellerin güzergâh üzerinde hatasız bir şekilde birleşmesi için ölçme çalışmalarının yüksek doğrulukta yapılması gerekliliği vurgulanmıştır. Hem yatay hem de düşey yönde gerekli olan yüksek konumsal doğruluk daha tecrübeli eleman, daha kaliteli ölçme aletleri ve daha hassas sonuçlar üreten ölçme tekniklerinin kullanılmasını gerektirdiği belirtilmiş, bunun da hem maliyeti hem de ölçme işleri için gerekli zamanı artırdığı sonucuna varılmıştır.

Zafer Köse (2018), yapılan bu çalışma ile Obruk Barajı gövdesi ve baraj çevresinde oluşabilecek muhtemel düşey deformasyonların tespit edilmesine yönelik çalışmaların yapılması, incelenmesi ve bilgi aktarılması amaçlanmıştır. Çalışma alanı olan Obruk barajı, Kızılırmak nehrinin üzerine tarım alanlarının sulanması ve hidroelektrik enerjisi üretebilmek için 1996-2007 yıllarında yapılmıştır. Elektrik enerjisi üretim gücü, ülkenin yıllık elektrik üretim miktarının binde beşine denk gelmekte olup, yapıldığı dönemde Türkiye'nin 18. barajı olmuştur.

Barajın gövdesinde oluşacak düşey deformasyonları tespit edebilmek için 8 tane referans noktasına ve 6 tane de barajın yapım çalışmaları sırasında beton yüzeye oluşturulan sağlam RS noktaları konumlandırılmıştır. Bunlara ek olarak barajın gövde kısmında yer alan 44 adet obje noktasına nivelman aparatı yapılmıştır. Toplam 58 tane olan noktaların hepsinde ölçmelerdeki doğruluk 0.6mm/km olan elektronik nivo ile invar miralar kullanılarak hassas nivelman ölçmeleri uygulanmıştır. Bu proje ile birlikte toplamda dört kampanya ölçümü yapılmıştır. Gidiş-dönüş oluşturacak biçimde ölçme çalışmaları yapılan nivelman hattının toplam uzunluğu 22 km'yi bulmaktadır. Gidiş-dönüş ölçmeleri arasında oluşan farklar ve lup kapanmaları değerlendirilerek 1 km'lik gidiş-dönüş ölçme için standart sapma değeri hesaplanır. Çalışmalar boyunca toplamda dört kampanya ölçmeleri yapılmış, bunların birbirinden ayrı dengelemeleri yapıldıktan sonra önemli kabul edilebilecek değişikliklerin tespit edilebilmesi amacıyla ölçmeler arasında analiz çalışmaları yapılmıştır. Analiz çalışmalarında PANDA program paketinde bulunan DEFANA deformasyon analiz modülü kullanılmıştır. Bu program modülünde deformasyon analizinin temelini, noktalar arasındaki yer değiştirmeleri tespit eden global yaklaşım testi oluşturmaktadır. Proje kapsamındaki çalışmalarla oluşturulan nivelman noktaları kullanılarak 2016 yılında Nisan, Temmuz ve Kasım ayında hassas geometrik nivelman ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçmelerle elde edilen verilerin serbest dengelenmesi ile elde edilen nokta yüksekliklerinin ortalama standart sapması ± 0.4 mm,

2017'nin Mayıs ayı yapılan ölçmelerin dengelenmesiyle ulaşılan ortalama standart sapma değeri ise ± 0.3 mm olmuştur. Yapılan çalışmalarla elde edilen deformasyon analizleri incelendiğinde Obruk barajında tehlikeli bir durum meydana getirecek düzeyde deformasyonun olmadığı tespit edilmiştir. Büyük ölçekteki mühendislik çalışmalarından olan baraj gibi yapılarda da kontrol amaçlı ölçme çalışmalarının yapılması ve ilerleyen süreçlerde oluşabilecek deformasyonların takip edilmesi hem projenin güvenliği hem de canlılar için hayati önem taşımaktadır.

Akçay (2019), Yeni Avusturya Tünel Metoduyla (NATM) şehir içinde açılan ikiz tünellerin neden olduğu, tünel etkileşim alanının içinde kalan bölgelerde ölçülmüş yüzey deplasmanları incelenerek, yüzey hareketliliğinin büyüklüğünü tanımlayan parametrelerden biri olan “dönüm noktasının tünel eksenine olan mesafesi” (i) örtü kalınlığı göz önüne alınarak İstanbul grovaklarında NATM ile açılan ikiz tüneller için bir ampirik bağıntı elde edilmesi bu çalışmanın amacını oluşturmuştur. İstanbul grovaklarında Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) ile açılan ikiz karayolu tünellerinin inşaatı nedeniyle tünel üzerindeki yapılarda oluşan deplasmanların düzenli ölçümler sonucunda elde edilen büyüklükler, yerel zemin koşullarına bağlı olarak incelenmiştir. Bu amaçla sahada düzenli yüzey ölçümlerinin yapıldığı, ikiz tünellerin tam ortası merkez eksen olarak belirlenmiş ve bu eksenden sağa ve sola 80'er m mesafedeki binalar analiz için seçilmiştir. Tünelin 500 metre ilerlediği bir bölge için yapılan çalışmada, yapı yoğunluğuna göre bu mesafe 10 kesite bölünmüş ve her kesit kendi içerisinde istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Tünel kazı aşamalarının yüzey oturmalarına etkisi bu analizler karşılaştırılarak elde edilmeye çalışılmıştır. Her bir kazı aşamasının kısa süreli deplasman miktarları incelenmiş, bu deplasmanların miktarları veya yüzdeleri arasında bir ilişki olmadığı, her bir enkesitte farklı aşama kazılarının birbirlerinden bağımsız olarak deplasmanlara neden olduğu, bu miktarların belli bir artış yüzdesine bağlanamayacağı sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak, tüneldeki geoteknik ölçümlerin düzenli aralıklarla yapılması, alınan ölçüm kalitesinin artması, hata oranlarının azaltılması, ölçüm aralıklarının sıklaştırılarak ölçüm kalitesinin artırılması önerilmektedir. Deplasman tahminlerinde zeminlerin özelliklerini belirlemek için kapsamlı bir zemin incelemesinin ve arazi deneylerinin yapılması önerilmektedir.

Yüceses (2019), bu çalışmada Çanakkale ili Ayvacık-Küçükkuyu karayolu 10+700 – 12+400 kilometreleri arasında yer alan tünel projelerindeki deformasyon ölçmeleri ele alınmıştır. Deformasyon ölçmeleri uygulamalarında jeodezik ve jeoteknik ölçme teknikleri kullanılmış, tünelde deformasyona neden olabilecek etmenlerin

birbiriyle ilişkisi ve bunların büyüklüklerinin tespiti ve incelenmesi amaçlanmıştır. Tünel yapım çalışmaları esnasında destek elemanları üzerinde meydana gelen yük, basınç ve gerilim değerleri ile yatay ve düşey hareketler de gözlemlenmiş, eldeki doneler kullanılarak aralarındaki ilişkinin varlığı sorgulanıp incelenmiştir. Devam eden tünel kazı çalışmalarında proje güzergâhının aktif fay zonu'na olan yakınlığından dolayı, oluşan depremlerin deformasyon değerlerini etkilediği ve deformasyonu tetiklediği gözlenmiştir. Bu bilgiler ışığında yapılmakta olan deformasyon ölçme yöntemleri ve analiz çalışmalarda çeşitli değişikliklere gidilmesi gerektiğine karar verilmiştir. Yapılan değişiklikler klasik deformasyon izleme yöntemlerine ek jeoteknik yöntemlerin de uygulanması ve depremsellik etkisinin de analiz çalışmalarında göz önünde bulundurulması olmuştur. Jeoteknik deformasyon ölçme yöntemleri ile dış baskıların deformasyon üzerindeki etkileri ile yapı tahkimat ekipmanlarının bu baskılara olan tepkileri incelenmiştir. Büyük ekonomik değere sahip olan tünellerdeki deformasyon ölçme uygulamaları ve bu uygulamalarla üretilen verilerin işlenmesiyle deformasyon belirleme ve izleme tekniklerinin seçimi ve uygulanmasının önemi ortaya çıkmış, bu duruma da dikkat çekilmiştir. Bu tür projelerde, daha proje aşamasından başlanılarak güzergâha ait litoloji ve depremsellik gibi deformasyona olabilecek etkilerin iyi analiz edilmesi, sondaj çalışmalarının ve diğer jeoteknik çalışmaların titizlikle yürütülmesi gerekliliğinden bahsedilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Tünel

Toplumların rahat ve kolay bir şekilde ulaşımını sağlayabilmeleri amacıyla yapılan demiryolu, karayolu, yaya yolu gibi ulaşım alternatiflerinin; teknik ya da ekonomik birtakım olumsuz koşullar nedeniyle belirli bir kısmının ya da tamamının yerin altından geçirilerek kullanılmasını sağlayan mühendislik yapılarına tünel denilmektedir. İngiltere'deki bir bölgede bodrum benzeri yerler için kullanılan 'tonne' kelimesinden adını alan tünel, kayaların veya zeminin doğal dengesini koruyarak, ulaşım yolunun yüzeyden geçirilmesinin mümkün olmadığı veya diğer ulaşım yöntemlerine göre daha ekonomik olması nedeniyle açılan, şehirleri birbirine bağlayan, çap ve uzunlukları kullanım amacına göre belirlenen, eğim açısı 30°'den daha küçük olan yeraltında kazılarak açılan sanat yapılarıdır (Vardar, 1979).

Çalışma sahası genel olarak yeryüzü altı olan tünel yapıları, insanlığın ihtiyaçları doğrultusunda yıllar içerisinde maden çıkarma, sulama yapabilme, savaşta taktiksel amaçlı, iletim hizmetlerinin yerine getirilmesi ve ulaşımın sağlanması gibi çeşitli amaçlarda yapılmış ve kullanılmıştır. İletim amaçlı kavramı; içme suyu, yağmursuyu, atık su; telefon, elektrik, internet ve doğalgaz gibi altyapı hizmetleri için açılan tünellerdir. Ulaşım amaçlı planlanan ve hayata geçirilen yer altı tünel projelerinin sayıları dünyada ve ülkemizde giderek artmaktadır. Tünel yapılarının; yeryüzü üzerindeki aşılması zor engellerin doğal dengeyi de bozmadan aşılmasını sağlıyor olması, ekonomi açısından olumlu yönlerinin olması, şehrin görüntüsüne zarar vermemesi ve inşaat faaliyetleri sırasında yeryüzü ile bağlantısının olmamasının olumsuz iklim şartlarından etkilenmemesini sağlaması insan ve yük taşımacılığında ön plana çıkmalarını sağlamıştır.

Tünel gibi büyük mühendislik projelerinin planlanmasında, uygulanmasında ve inşaat sonrası takibinde farklı mühendislik alanlarına mensup olan kişilerin birlikte çalışması gerekmektedir. Harita Mühendisliği mesleği açısından değerlendirildiğinde, projenin sağlıklı bir şekilde planlanması ve uygulanması için gereken teknik işler hayati önem taşımaktadır.

Tünel inşaatlarındaki ölçme uygulamaları ve bu uygulamalardaki gelişmeler tünel projelerinin istenilen hassasiyette, güvenli olarak en kısa zamanda ve düşük maliyetle yüksek kalite ile tamamlanmasını sağlamaktadır. Günümüzde, tünel gibi kompleks mühendislik eserlerinin ve bu tünel çalışma alanı içerisinde meydana gelen hareketliliğin

takip edilmesi, bu yapıları etkileyen kuvvetlerin zamanla tünelde oluşturduğu deformasyon değerlerinin tespiti ile bu deformasyonun tünellerde bir hasar bırakıp bırakmayacağıının yapılan çalışma ve gözlemlerle önceden belirlenebilmesi inşaat faaliyetinde görev alanlar, sonrasında kullanacak olanlar ve çevre emniyeti açısından son derece önem taşımaktadır. Tünel projelerinin uygulaması esnasında yapılacak deformasyon ölçmeleri, emniyeti sağlamak ve oluşabilecek herhangi bir felaket sonucu uğranacak maddi zararları önlemek açısından çok önemlidir. Projenin tamamlanmasından sonrada belli periyotlarda yapılacak olan deformasyon ölçmeleri projenin uzun süre güvenli olarak çalışması için son derece önemli ölçme uygulamalarıdır.

Yerkabuğu içinde yüzeyden itibaren belirli derinliklerde inşa edilen yapılar olan tünellerde kullanılan çeşitli terimler bulunmaktadır. Bu terimler yeryüzü ile yatayda olan konumlarına, en kesit durumuna ve derinlik ilişkileri göz önünde bulundurularak ifade edilir (Şekil 3.1). Bunlar:

Kuyu-Baca-Şaft: Yer kabuğunda düşey olarak gerçekleştirilen (yerin derinliklerine doğru dik olarak yapılan) kazılardır.

Oda: Normal yükseklik ve genişlikten fazla kazılmış kısımlara verilen addır. Bu kısımlar bekleme veya dinlenme ile tünel yapımında görev alan büyük araçların manevra hareketlerini yapabilmesinde kullanılabilen alanlardır.

Örtü (Et) Kalınlığı: Açılan tünel veya galerinin tavanından yüzeye kadar olan kısmına denilir. Örtü kalınlığı yapılan tünel çalışmalarında zeminin sağlamlığı üzerinde etkisi olabilecek bir faktördür. Buna göre uygulanan tünel kazı destekleri değişiklik gösterebilmektedir.

Pasa: Tünel için yapılan kazı sırasında çıkarılan malzemeye (kütlelere) denilmektedir.

Ano: Herhangi bir çalışmanın yapıldığı kısma, bölüme denir. Uzunluk tercihi, projeye, zemin durumuna ve yapılan kazı çalışmasına göre 1,5 ila 12 m arasında olur.

Taban (radye): Tünelin ilerlediği boşluğun alt kısmıdır.

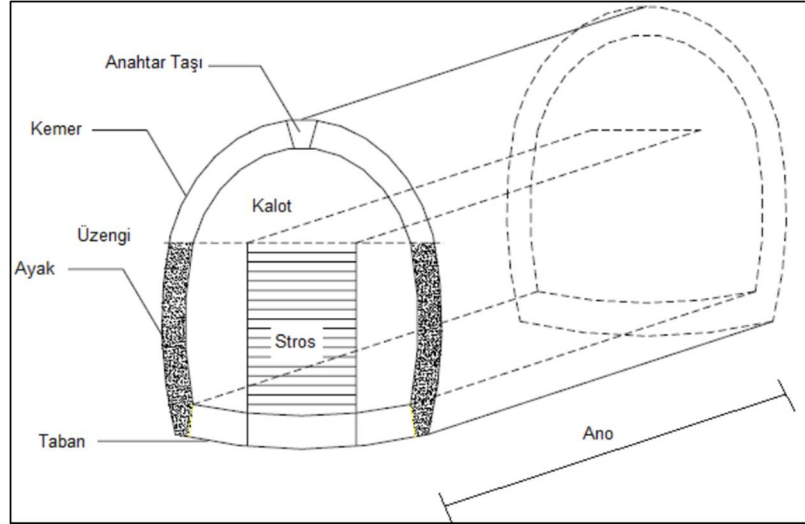
Yan (ayak-duvar): Tünelin yan kısımlarıdır.

Tavan (kemer): Tünelin üst kısımlarıdır.

Üzengi: Kemerin ayakla birleştiği noktadır.

Kalot: Üzenginin üstünde kalan kısımdır.

Stros: Üzengi seviyesinin altında kalan kısımdır.



Şekil 3.1. Tünel enkesiti (Köse ve diğ., 2007)

3.1.1. Tünel açma nedenleri

Mühendislik uygulamalarında tünel yapımını gerektiren nedenler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Güzergâhın değiştirilmesi gibi bir imkânın olmadığı veya ekonomik olması nedeniyle tercih edilmesi durumunda aşılması mümkün olmayan dağlık ve sarp araziden geçebilmek amacıyla,
- Trafik yoğunluğunun fazla olmasından dolayı diğer karayolu, demiryolu gibi yolları engellemeden yeni bir yol açmak gerektiğinde,
- Yüzeyde yapılması zorunlu hale gelebilen viyadük, köprü gibi sanat yapılarının veya büyük hacimli dolgu ve yarmanın yapımının istenmediği durumlarda,
- Tünelin yapımı sonrasında güzergâhın uzunluğunda kayda değer bir kısalma oluşacak ve bunun sonucunda proje bütçesinde azalma sağlanacak ise ya da tünelin yapılması proje maliyetini arttırsa bile bu artışın tünelin kullanılması ile elde edilecek ekonomik değer ile karşılanabilir olduğu durumlarda,
- Proje güzergâhında gereken kısımların toprak kayması, kaya yuvarlanması ve çığ gibi doğal faktörlerden korunmasının sağlanması için,
- Gerekli olması durumlarda akarsu veya boğaz gibi su doğal engelinin aşılmasının istenilmesi durumlarda,
- Kalabalık ve yoğun trafik kullanımı olan büyük kentlerde hızlı, kolay ve daha ekonomik ulaşım imkânlarının sunulması amacıyla,

- Kamulaştırma çalışmalarının yüksek maliyet gerektirdiği bölgelerde yol genişletme ya da yeni yol yapma çalışmasının mümkün olmadığı durumlarda,
- Kirli ve temiz suyun değişimi ile dağıtımının yapılabilmesi, enerji kaynaklarının kullanıcılara ulaştırılması, internet ve telefon bağlantıları için gereken altyapının sağlanabilmesi için,
- Yüzey üzerindeki yerleşim yeri yapılarının yüksek değerlerde olduğu bölgelerde ve aynı anda çok daha fazla insan ulaşımının yapılması amacıyla metro inşaatı için,
- Birbirlerinden dağ, sırt, göl, boğaz vb. gibi doğal engellerle ayrılmış şehir ve yerleşim yerlerinin birbirine bağlanması için tüneller açılmaktadır (Çeçen, 2007; Kun, 2010; Hemphill, 2013).

Yüzyıllar içinde yapılan çalışmalarda tünel açma metotları amaca, zemin durumuna, ekipmanlara ve sahip olunan teknik bilgiye göre değişiklikler göstermiştir. Tünel açma faaliyetlerinin ilk başladığı dönemlerde insan gücüyle açılırken zamanla tünel açılmasında kullanılan araçlar ve tünel açma yöntemleri de geliştirilmiştir.

Tünel inşaatından önce tünelin güvenli ve ekonomik olarak açılmasını sağlamak amacıyla gerekli araştırmaların yapılması büyük önem taşımaktadır. Doğanın tünel üstünde oluşturacağı etkiyi bilmek için jeoteknik araştırmalar yapılmalı ve zemin koşulları doğru bir şekilde, eksiksiz belirlenmelidir. Tünel projelerinin içerdiği jeolojik koşulların, yeraltı suyu durumunun ve sismolojik durumun güzergâh boyunca farklılıklar göstermesi nedeniyle diğer sanat yapılarına göre dizaynı ve inşaatı daha zor ve daha çok risk içermektedir. Bu riskleri en aza indirmek veya ortadan kaldırmak için geoteknik, jeolojik ve jeofizik araştırmalar çok kapsamlı ve detaylı olmalı, güzergâhta kapsamlı numune toplanıp bunların detaylı bir şekilde laboratuvar testleri yapılmalı, bu araştırmalar neticesinde tünel projesi doğal ortama uyum sağlayacak biçimde projelendirilerek uygulanmalıdır (Chapman ve diğ., 2018).

3.1.2. Tünel yapım çalışmalarının tarihsel gelişimi

İlk insanlara kadar uzanan tünel inşaat faaliyetleri toplumların gelişmesinde önemli bir yer tutmuştur. M.Ö. 2000 yılından beri tünel yapımı, insanların hayatlarını daha konforlu bir şekilde sürdürebilmesi, günlük faaliyetlerine devam etmesi ve

toplumların birbiriyle bağlantısının artması gibi önemli toplum ihtiyaçlarına cevap vermek için gündün güne kazanılan tecrübelerle birlikte gelişmiştir. Teknik bilginin beraberinde ekonomik gücü de bulunan, diğerlerine göre kültürel olarak daha gelişmiş olan topluluklarda tünel yapımının daha fazla olduğu görülmüştür. Tünel açmanın ayrıca barınma, savaş tekniği olarak kullanma, şehirlere altyapı hizmetlerinin sağlanması gibi birçok amacı bulunmaktadır (Bozkurt, 1987).

Geçmişten günümüze farklı nedenlerden dolayı yapılan tünel yapılarından ilkinde Neandertaller'in M.Ö. 40.000'lerde Svaziland'ını Bomvu tepesinde yapmış olduğu Ngwenya Madeni örnek gösterilmektedir (Matsebula, 1988). İnsanlar zaman içerisinde ilkel dönemin alet ve ekipmanlarını kullanarak ihtiyaçlarına uygun varolan doğal yeraltı oluşumlarını genişletmiş ve kendine ihtiyaçlarına uygun yeni alanlar oluşturmuştur. Tünel açma prensipleri barındırmasından dolayı gerçek manada tünel olarak kabul gören ilk yapının, M.Ö. 2200'lerde Babil'de bir geçit görevi üstlenmesi için saray ile tapınak arasına yapılmıştır. Burada yapılan tünelde aç-kapa metodunun uygulandığı tahmine edilmektedir (Özer, 2011). Projecisi ve mühendisinin bilindiği ilk tünel Samos Adasında M.Ö. 6. yüzyıl içerisinde yapılan ve uzunluğu 1036 metre olan Eupalinos tüneli kabul edilmektedir. Yapılış amacı şehrin su ihtiyacının sağlanmasına yönelik olan ve Megaralı Eupalinos'un mühendisliğini yaptığı bu tünel şehrin altyapı ihtiyacına yöneliktir (Angelakis ve diğ., 2012). Georg Bauer'in 1556 tarihli "De Re Metallicas Georg" adlı eserinde yer alan bir madencilik yöntemi tünel açma yöntemi olarak 350 yıl boyunca kullanılmış, uzun yıllar tünel yapım yöntemlerinde kayda değer bir gelişme yaşanmamıştır. Kanal taşımacılığının 17.yy.da başlamasıyla birlikte tünel açmada önemli bir adım atılmış, 18 ve 19.yy.da endüstri devriminin başlamasıyla beraber kanal ve tünel açma yöntemleri de ihtiyaçlar doğrultusunda gelişmiştir (Bozkurt, 1987).

Tünel yapım çalışmalarının dönüm noktası sayılabilecek teknik atılımlardan biri ise, 1825-1841 yılları arasında Fransız Marc Brunel'in yapmış olduğu Thames nehrinin altından geçen tünelin kazı çalışmalarında, günümüzdeki Tünel Açma Makinasının atası kabul edilebilecek teknikte tünel kazı makinası kullanmış olması kabul görmektedir (Polat, 2010). Buharlı makine teknolojisinin geliştirilmesiyle önemli atılımlar yapılan demiryollarında, yeryüzü eğiminin gelişimi sınırlıyor olması ile uzun mesafelerde karşılaşılan olumsuz doğa koşullarının sıklığı tünel yapılarının daha fazla inşa edilmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır (Kun, 2010). Artan ihtiyacı karşılamak için yapılan demiryolu çalışmaları, bilgi birikimini de beraberinde getirmiş böylece teknik birçok

gelişme sağlanmış ve bu gelişmeler ışığında Fransa ile İtalya arasında 1871 yılında 12,7 km uzunluğunda Mont Cenis Tüneli yapılmıştır (Bozkurt, 1987).

Türkiye’de demiryolu, karayolu ve su tüneli gibi amaçlarla açılan tünel çeşitleri bulunmaktadır. Yer altına inşa edilmiş olan ülkemizin ilk tüneli Beyoğlu – Karaköy arasındaki 573 metre uzunluğa sahip ve 1870’li yıllarda yapılmış olan tüneldir. Türkiye’de 1950’li yıllarda açılmaya başlanan karayolu tünellerinin genel amacı daha çok doğal afetlerden korunmaktır. 1980’lerin sonlarında otoyol yapımının hız kazanmasıyla beraber Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi tünel açma faaliyetlerinde kullanılmaya başlanmıştır. Böylece tünel uzunlukları artmış, 1990’lı yılların başlarında çift tüp tünel yapımına da başlamıştır. Yapılan tünellerin uzunlukları 2000’li yıllarda 5 km ve üzerinde, 2010’lu yıllarda ise 15 km’ye kadar artmıştır (Ünal, 2017). Karayolu tünellerinden elde edilen bilgi ve birikimin demiryolu yapım faaliyetlerinde de kullanılmasıyla birçok demiryolu projesi içerisinde kilometrelerce uzunluklara sahip olan tüneller yapılmaktadır. Açılan en eski tüneller ve bu tünellerin uzunlukları Çizelge 3.1’de belirtilirken en uzun tüneller ve bu tünellerin uzunlukları Çizelge 3.2’de verilmiştir. Ülkemizde yapılan ve kendi alanlarında yapımı ve konumu itibarıyla içerisinde ilkler barındırma özellikleri de bulunan bazı önemli tünel projeleri şu şekildedir:

- Marmaray Tüneli (2013): Boğaz’dan demiryolu geçişinin sağlandığı ve toplamda 13,6 km olan projenin, 9,8 km si delme tünel, 1,4 km si batırma tüp tünel ve 2,4 km si aç-kapa tüneli olma özelliğindedir.
- Türkiye’den KKTC’ye Su Temini (2015): Proje kapsamında, Anamur’da bulunan Dragon Çayı üzerindeki Alaköprü Barajı’nda tutulan su, dünyada ilk olma özelliğine sahip 66,5 km uzunluğundaki askıda duran borular aracılığıyla KKTC’nin Girne şehri yakınlarındaki Geçitköy Barajı’na aktarılmıştır.
- Ilgaz Tüneli (2016): Giriş ağız yapısı ve çıkış ağız yapısı "köpek balığı ağzı"ni anımsatacak biçimde projesi yapılan, 5,370 ve 5,391 metre uzunluklarında iki tüp tünelin yapılmasındaki amaç rakımından dolayı zorlu kış şartlarında yaşanan trafik kazalarının önüne geçebilmektir.
- AVRASYA TÜNELİ (2016): İstanbul Boğazı Karayolu Tüp Geçişi projesi kapsamında yapılan Asya ve Avrupa yakalarını deniz tabanından birleştiren karayolu tüneldir. Tünel uzunluğunun 5400 m olduğu proje toplam güzergâh tünel ve bağlantı yolları ile 14,6 kilometredir. Bu proje ile 2 saati bulan yolculuk süresi 15 dakikaya kadar inmiştir.

- Ovit Tüneli (2018): Rize-Erzurum kara yolu geçişi için İkizdere-İspir ilçeleri arasında yapılan tünelin toplam uzunluğu 14,3 km'dir. Türkiye'deki en uzun, dünyada ise 2'nci sırada olan çift tüplü kara yolu tüneldir.
- Sabuncubeli Tüneli (2018): İzmir ile Manisa şehirleri arasındaki ulaşım süresini kısaltması amacıyla, 4065 metre uzunluğunda iki tünelden oluşan toplamda 8130 metre uzunluğa sahip tünel 580 rakımda inşa edilmiştir.
- Cankurtaran Tüneli (2018): Karadeniz'in Doğu Anadolu bölgesinden geçilerek İran'a bağlamayı amaçlayan çalışma kapsamında, Artvin ilçeleri olan Hopa ile Borçka arasında çift tüp özelliğine sahip 5228 metrelik kara yolu tüneldir.

Çizelge 3.1. Dünya'da bilinen en eski tüneller (Kolymbas, 2005)

İsim	Konum	Yapım Yılı	Uzunluk (km)
Eupalinos Tüneli	Yunanistan	MÖ 500	1
Urner Loch	İsviçre	1707	14
Mont-Cenis	Fransa-İtalya	1857-1870	12
St. Gotthard Demiryolu Tüneli	İsviçre	1872-1878	15

Çizelge 3.2. En uzun tünel yapıları (Kolymbas, 2005)

İsim	Konum	Yapım Yılı	Uzunluk (km)
New Gotthard Base	İsviçre-İtalya	1999-2016	57
Seikan	Japonya	1946-1988	54
Chunnel (Manş) Tüneli	Fransa-İngiltere	1986-1993	50
Lotschberg Demiryolu Tüneli	İsviçre	2007	34.7
Laerdal Karayolu Tüneli	Norveç	2000	24.5
Simplon	İsviçre-İtalya	1898-1906	20
Grand Apennin	İtalya	1921-1930	19
Avrasya Tüneli	Türkiye	2016	14.6
Yeni Zigana Tüneli	Türkiye	2020	14.5
Ovit Dağı Tüneli	Türkiye	2018	14.35

3.1.3. Tünel yapım çalışmalarında maliyeti etkileyen faktörler

Tünel inşaat çalışmalarında projenin tamamlanabilmesinde en önemli konulardan biri de çalışma sürecinin güvenli ve ekonomik olarak bir şekilde gerçekleştirilmesidir. Zamanında, güvenli ve ekonomik iş planlaması için araştırma süreci en önemli konulardandır. Öyle ki bu süreçte elde edilen veriler işin uzamasına, proje ve güzergâhın değiştirilmesine dahi neden olabilecek kadar etkili ve önemlidir. Şehir içi ve şehirlerarası ulaşımı sağlayan, kalkınmadaki gelişmişliğin göstergesi sayılabilecek yapılar olan tünellerde maliyet en önemli konulardan biridir. Tünel projelerinde maliyeti etkileyen ve planlamada göz önünde bulundurulacak faktörler şunlardır;

- Belirlenen proje güzergâhındaki jeolojik ve hidrojeolojik özellikler,
- Zeminin özellikleri ve geoteknik yapı,
- Tünelin desteklenmesi gereklilik oranı ve seçilen destekleme yöntemi,
- Yer yüzeyinden ne kadar derinde inşa edileceği,
- Yapılacak olan tünelin uzunluğu çapı, şekli ve seçilen kazı yöntemi,
- Kalifiye çalışma ekibinin oluşturulması ve işçilik
- Çalışılan günler
- Makine ve ekipmanların tedariki

3.2. Tünel Yapımına Başlanmadan Önce Yapılan Çalışmalar

Tünel kazı çalışmalarını yönlendirmek en önemli konu ve tünel ölçmesinde ilk olarak dikkat edilmesi gereken uygulamalardan biridir. Tünel ölçümü, yer üstü ölçümlere göre kontrol edilebilmesi daha zor olduğundan daha hassas ölçülmelidir. Tünel çalışmalarına başlamadan önce yapılması gereken ölçme çalışması, güzergâhın tamamını kapsayan ölçme ağı tesisinin oluşturulmasıdır. Kazı çalışmaları öncesinde tamamlanması gerekli konular;

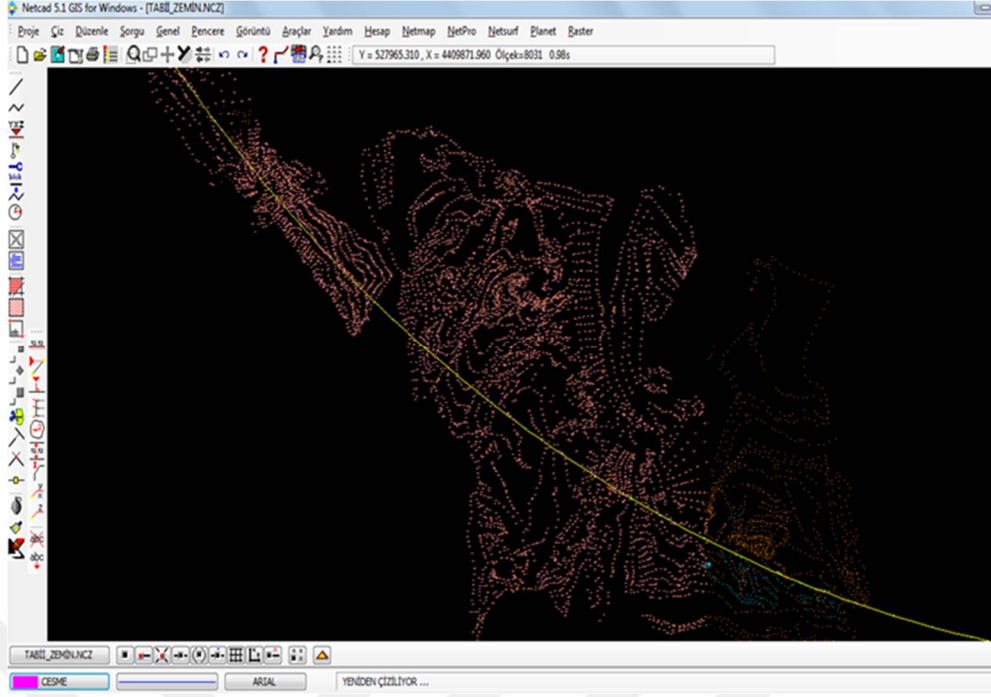
- Jeolojik özelliklerin belirlenmesi,
 - Yapılması istenilen tünelin tasarımlarının ve planlarının hazırlanması,
 - Proje alanını kapsayan ölçme ağının oluşturulması,
 - Nirengi ağları kullanılarak poligonlar için sıklaştırma çalışmaları,
 - Çalışma alanını kapsayan nivelman ağlarının üretilmesi,
 - Topografya durum haritalarının oluşturulması,
 - Şaft ve yaklaşma tünellerinin arazi ölçümlerinin yapılması,
 - Tünel proje detaylarındaki unsurların araziye aplikasyonu,
- şeklinde sıralanabilir.

Kazı çalışmalarında başvurulacak jeodezik yöntemlerde yersel ölçme tekniklerinin kullanılacağı kabul edilirse yatay ve düşey konum bilgisinin oluşturulması için ihtiyaç duyulan donanımlar vardır. Yatay konum bilgisi üretiminde total station temel ölçme donanımı olarak kullanılırken; gözlem için hedefleme ekipmanları, alet sehpası yardımcı donanım olarak kullanılır. Düşey konum bilgisi üretiminde geometrik nivelman yönteminin tercih edilmesi durumunda ise temel ekipman olarak nivo ve yardımcı ekipman olarak mira ile alet sehpası bu görevi görecektir. Tünelin yapım çalışmalarında

yönlendirme ve konumlandırma için ihtiyaç duyulacak olan aplikasyon çalışmaları, kesit belirleme ölçümleri, geri ve ileri kestirme, kontrol ve kalibrasyon ölçmelerinin yapılabilmesi için, gereklilik-maliyet etkisi göz önünde bulundurularak içerisinde ölçme ve hesaplamaları kolaylaştıran, kullanıcı hatasının en aza inmesini sağlan özel yazımların bulunduğu cihazların kullanılması çalışma güvenirliliği için her zaman avantaj olacaktır.

Jeodezik ölçme çalışmalarının yerine getirilmesinde, işin ciddiyetinden dolayı tecrübeli kişilere ihtiyaç vardır. Bu ihtiyaçtan dolayı sahada tecrübeli kişiler tarafından eğitilmiş alet operatörü ve şenörler yeni kişileri eğitmekle yükümlü olmalıdır. Bu bilgi öğretme ve öğrenme sürecinin bir sonunun olmadığı benimsenmeli, eğitimin her zaman devam ettiği kavranmalıdır. Tünel projesindeki yatay ve düşey tasarımın sahaya aktarılması, proje kesit ve profilinin kontrolü, eğer kullanılıyorsa tünel kazma makinelerinin konumlandırılması ve ilerleme yönelmeleri, proje gereklerine uygun deformasyon ölçme çalışmalarının yerine getirilmesi gibi birçok iş tünel yapımında Harita mühendisinin varlığını ve kontrolünü zorunlu hale getirmektedir. Bunlara ek olarak Harita mühendisinin tünel açma doğruluk optimizasyonu ve kontrol ölçmeleri tasarımını yapması önemli sorumluluklarındandır. Tünel kazı çalışmalarından önce bu tasarım çalışmalarının yapılması gereklidir. Genel olarak etüt-proje birimi şeklinde adlandırılan ölçme ekibinde yer alan kişilerin ve mühendisin çalışmalarında başarıya ulaşabilmesi; yapılacak işlerde alınan doğru kararlara ve iyi bir planlamaya, işin başından sonuna kadar sistemli bir şekilde arazi ve büro çalışma bütünlüğüne, kuralların ve teknik prensiplerin hiçbir taviz verilmeden uygulanması ve iletişimin güçlü olmasına dayandığı unutulmamalıdır. Harita mühendisinin görev aldığı çalışmada başarıya ulaşabilmesi için:

- Ölçme çalışmalarında kullanılacak modern aletlere ve bilginin işlenmesi için gereken yazılımlara hakim olması, sorun çözmeye yönelik yeterli meslek bilgisinin yanı sıra deneyime sahip olması, (Şekil 3.2)



Şekil 3.2. Harita mühendislerinin çalışmalarda kullandıkları programa ait ekran görüntüsü.

- Çalışmaya en uygun yöntemin ve donanımın kullanılması,
- Harita mühendisliği ile projede görev alan başka meslek grupları arası ilişkilerin ve ölçme işlerinin diğer çalışma birimleriyle olan etkileşiminin iyi oluşturulup, yorumlanması,
- Projede görev alan her birimin başarılı olmasında, gruplar arasında ilişkiler, yönetim, anlayış ve iletişim gücü gibi teknik olmayan ama büyük öneme sahip olan unsurların önemli olduğu,
- Sorumluluk aldığı projede yerine getireceği çalışmalara yönelik mesleki ön çalışmalar yapmış ve eksikliklerini tamamlamış olması,

projenin istenilen şekilde ilerlemesi için gereken hususlardır.

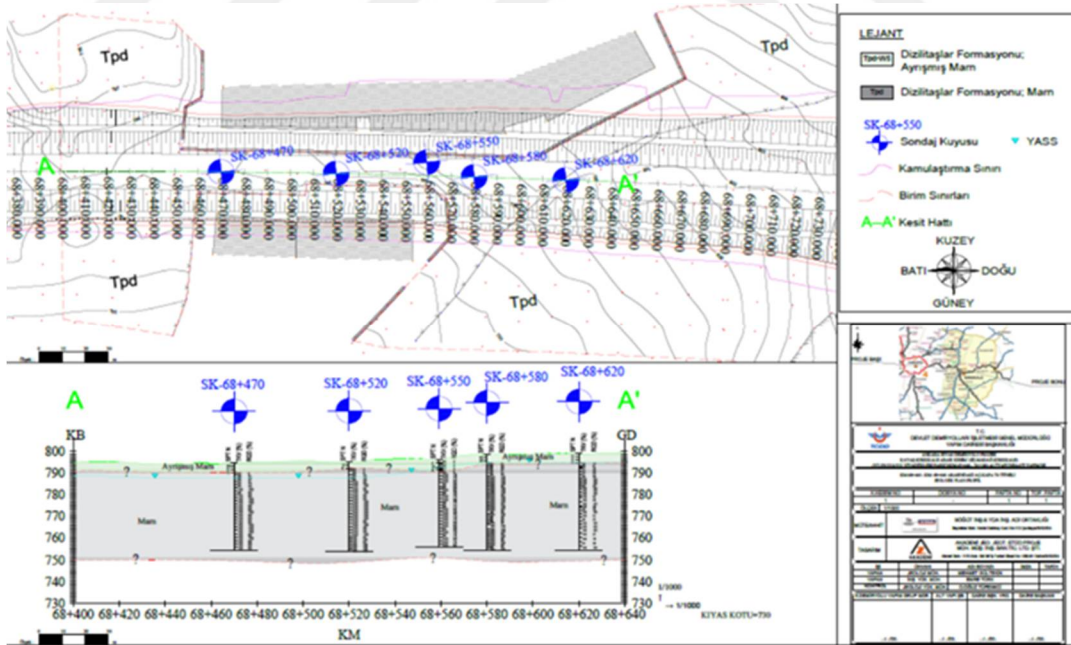
Tünellerdeki ölçme çalışmaları yerüstünde yapılan projeler için gerekli olan ölçme faaliyetleri ile benzerliklere sahip olsa da, kendilerine özgü yöntem ve aletlerinde kullanılmasını gerekli kılmaktadır. Doğrudan kontrol etmenin yerüstündeki ölçme çalışmalarında olduğu gibi mümkün olmadığından, tünelde ölçme çalışmaları yapılırken kullanılan cihazlarla her seferinde geride bulunan poligon noktalarına bağlantı yapılarak ilerlenmek zorundadır.

3.2.1. Jeolojik çalışmalar

Yer kabuğu, oluşturulan yapılarda temel olma görevini üstlenmektedir. Bundan dolayı yer kabuğunun sahip olduğu özelliklerin, içerisindeki malzeme türlerinin ve bunların taşıma kapasitesi ile göstereceği etki-tepki ilişkisinin belirlenmesi çok önemlidir. Şehirleşmenin yoğunlaştığı bu yüzyılda, teknolojiye sağlanan gelişim ve ilerleme ile birlikte yeraltından ihtiyaçlar doğrultusunda daha verimli kullanılması gerekmiş ve bununla birlikte farklı coğrafya ve zemin yüzeylerine uygun tünel açma yöntemleri denenmiş ve geliştirilmiştir. Tünel yapım çalışmalarında yaşanan bu gelişmeler ışığında, ölçüm tekniği ve kullanılan aletlerde de gelişmeler yaşanmıştır. Zemin özelliklerinin değişiklik gösterdiği durumlarda çalışma yöntemlerinin doğru tespiti, uygun projelendirme ve maliyet hesaplarının isabetli yapılabilmesi, çalışmalara başlanmadan önce yapılan ölçme ve haritalandırmaların doğru ve dikkatli yapılmış olmasıyla paraleldir. Bugünün teknolojisi ile ölçüm, hesaplama ve çizim çalışmalarının yerine getirilmesinde yüksek doğruluk sağlanmış durumdadır. Yapılması istenilen tünelin güzergâhında zemin hakkında detaylı bilginin oluşturulabilmesi için, karakteristiğini ortaya çıkaracak aralıklarda sondaj çalışmaları yapılmalıdır (Şekil 3.3). Çalışmalar sonucunda ulaşılan bilgiler kullanılarak tünel için en uygun parametre ve esaslar tespit edilir. Tünel açılacak yerin zemin yapısı ve topoğrafyası ile tünelin şekli ve geometrisi gibi özellikler kullanılması gereken tünel ölçme yöntemlerini belirler.



Şekil 3.3. Tünel-15 güzergâhında yapılan sondaj çalışması



Şekil 3.4. Zemin etüt haritalandırma çalışmaları.

3.2.2. Jeodezik altyapı

Jeodezide karşılaşılan problemler çözüme kavuşturulurken problemin yapısına uygun farklı koordinat sistemleri geliştirilmiştir. Koordinat sisteminin tanımlanabilmesi için başlangıç noktası yer bilgisi, koordinata ait eksenlerin yönü, koordinat sisteminde tanımlı bir noktaya ait konum bilgisini belirlemeye yardımcı parametrelerin belirtilmesi gereklidir. Çeşitli ülkelere ait jeodezik çalışmalarda kullanılan farklı jeodezik datum tanımlamaları yapılmıştır. Ülkemizde jeodezik çalışmalarda kullanılan referans elipsoidi GRS80 ve reasrasn epoğu 2005.00 olan ITRF96 datumu kullanılmaktadır (Yeni adı TUREF'tir). Ülkemizin tamamını kapsayan, yeryüzünde yeterli sıklıkta ve uygun dağılımda konumları ve gravite değeri bilinen noktaların bir araya gelmesiyle oluşturulan ağlara ülke temel jeodezik ağları denilir.

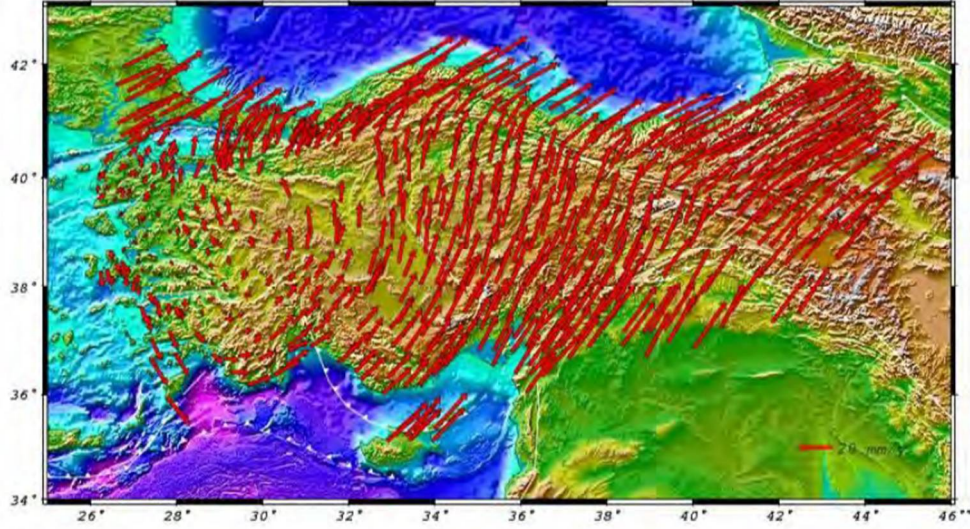
Tünel kazı çalışmalarını yönlendirmek, tünel ölçmesinde dikkat edilmesi gereken en önemli uygulamalardan biridir. Tünel ölçümü, yer üstü ölçümlere göre kontrol edilebilmesi daha zor olduğundan daha yüksek doğrulukta ölçülmesi gerekmektedir. Tünel yapım çalışmalarında yapılan ölçme faaliyetleri; kazı çalışmalarının yönlendirilmesini, tünel yapım çalışmalarının kontrollerinin yapılmasını, tünelin içerisinde ve dışarısında ortaya çıkan deformasyon durumunun izlenmesini ve tünelin içerisinde yapılan kaplama çalışmalarında kullanılan elemanların ölçme yöntemleriyle kontrol altında tutulması konularından oluşmaktadır. Projenin esaslarına uygun olarak tünel kazı çalışmalarının yönlendirilmesi, proje tip kesitine göre inşasının tamamlanması, ön görülen tahkimat sistemi elemanlarının konumlandırılması, tünel iç kaplama betonunun yapılabilmesi için çelik kalıbın yerleştirilmesinde tünel dışında oluşturulup tünel içine pilye noktaları ile taşınan üç boyutlu (x,y,z) ölçme ağı kullanılır. Bu ölçme ağında yer alan ölçme noktaları; tünel girişinin ağız yapısı portal ya da yaklaşım tüneli şeklinde yapılacak ve doğrudan ölçülebilecek ise poligon ağının devamı olarak ulaştırılır. Eğer giriş yapısı şaft ise ölçme noktaları şaft üzerinde oluşturulan ve dışarıdaki ölçme ağına bağlı olarak konumlandırılan noktaların "optik çekül" aracılığıyla şaft tabanına taşınması ile oluşturulur. Tünel giriş portalına kadar taşınmış olan pilye ve poligon noktaları kullanılarak tünel kazı faaliyetlerine başlanması ve projenin istenilen şekilde ilerlemesi sağlanır. Tünel kazı çalışmaları ilerledikçe pilye ya da poligon noktaları çalışmalara uyum sağlayacak şekilde ilerletilir. Tüm bu jeodezik ölçme çalışmalarında kullanılan jeodezik ağ yapısı aşağıda belirtilen ülke temel jeodezik ağlara bağlanarak oluşturulmalıdır.

- Yatay kontrol ağı
 - Türkiye Ulusal Temel GNSS Ağı (TUTGA-99A)
 - Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı (TUSAGA)
- Düşey Kontrol Ağı (TUDKA-99)
 - Temel Gravite Ağı (TTGA-99)

şeklinde sınıflandırılır.

3.2.2.1.a. Türkiye Ulusal Temel GNSS Ağı- TUTGA

Nokta sayısının 700'ü bulduğu Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı (TUTGA), 1997-1999 yılları arasında yapılan GPS gözlemleri sonucunda oluşturulabilmiştir. TUTGA'nın kurulmasından sonra, 1999 yılında oluşan yüksek sismisite (İzmit Depremi, 1999, Mw = 7.5, Düzce Depremi, 1999, Mw = 7.2, Çerkeş Depremi, 2000, Mw = 6.1, Sultandağ Depremi, 2000, Mw = 5.9, Çay Depremi, Mw= 6.6 ve Bingöl Depremi, 2003, Mw = 6.4) ve ağ yapısında bozulmaların oluştuğu ihtimaline yenileme ölçme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. En çokta yaşanan depremlerle ortaya çıkan etkilerin belirlenebilmesi için 2000 ve 2001 yılları içinde HGK tarafından GPS ve geometrik nivelman ölçmelerinin yapılmasıyla TUTGA-99 yenilenmesiyle, Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı-1999A kurulmuştur. İstasyonların 3B koordinatları ve hızları ITRF2000 ile belirlenmiş ve TUTGA-99A için başlangıç referans çerçevesi olarak belirlenen ITRF96'ya dönüşümü yapılmıştır. Çalışma noktalarının konum hassasiyet düzeyleri 1-3 santimetre mertebesindedir. Uluslararası Yersel Referans Sistemine dayalı TUTGA-99A (Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı 1999-A) koordinatlarının yenilenmesi ve zaman içerisindeki değişmelerin belirlenebilmesi için; 1992-2009 arasındaki yıllarda yapılan GPS kampanyaları yorumlanıp tüm veriler bir araya getirilerek Türkiye ve çevresinin koordinatlarının ve hız alanının hesaplamaları yapılmıştır. Tekrarlı GPS gözlemleriyle noktaların zamandan bağımsız koordinatları hesaplanmaktadır. Aynı zamanda TUTGA çalışmaları çerçevesinde ED50-ITRF96 dönüşüm modelleri belirlenmiştir. Sabit ve kampanya tipi GPS gözlemlerinin birleştirilmesi devam edilen çalışmalardır. Tüm bu çalışmalar ve incelemeler sonrası Türkiye'de ve çevresinde var olan depremden önceki 612 nokta, depremden sonra ise 107 noktanın tekrarlanabilir ve tektonik uyumluluğu kabul görmüş ve hız alanları bu noktalardan yararlanılarak tespit edilmiştir (Türkiye Ulusal Jeodezi ve Jeofizik Birliği (TUJJB) TUJK Bilimsel Toplantısı 04 Mart 2016 Bildirisi).



Şekil 3.5. Türkiye Yatay Hız Alanı (TUJK Bilimsel Toplantısı 04 Mart 2016 Bildirisi) (ITRF datumunda).

3.2.2.1.b. Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı- TUSAGA

Arap, Afrika ve Avrasya yer tabakalarının karşılıklı hareketliliklerinin sonucu bu kıta tabakalarının sınırlarında ve iç kısımlarında yüksek değerlerde deformasyon ortaya çıktığı ve bu plakaların kesişim noktasında yer alan Türkiye'nin de ortalama yılda 2,5 cm'ye yakın yer değiştirmelerinin olduğu bilinen bir durumdur. Bunlarla birlikte, meydana gelen depremlerin şiddetine bağlı olarak noktaların konumlarında 2-3 metreyi bulan kayma, konum değişikliği olabilmektedir. Bilinen bu hareketler göz önünde bulundurulduğunda, nirengi noktaları koordinatlarında oluşan değişimlerin devamlı olarak takip edilmesini gerekli kılmaktadır. Takip çalışmaları, periyodik (kampanya tipi) olarak ya da sabit istasyonlarda sürekli GNSS gözlemleri ile yapılmaktadır.

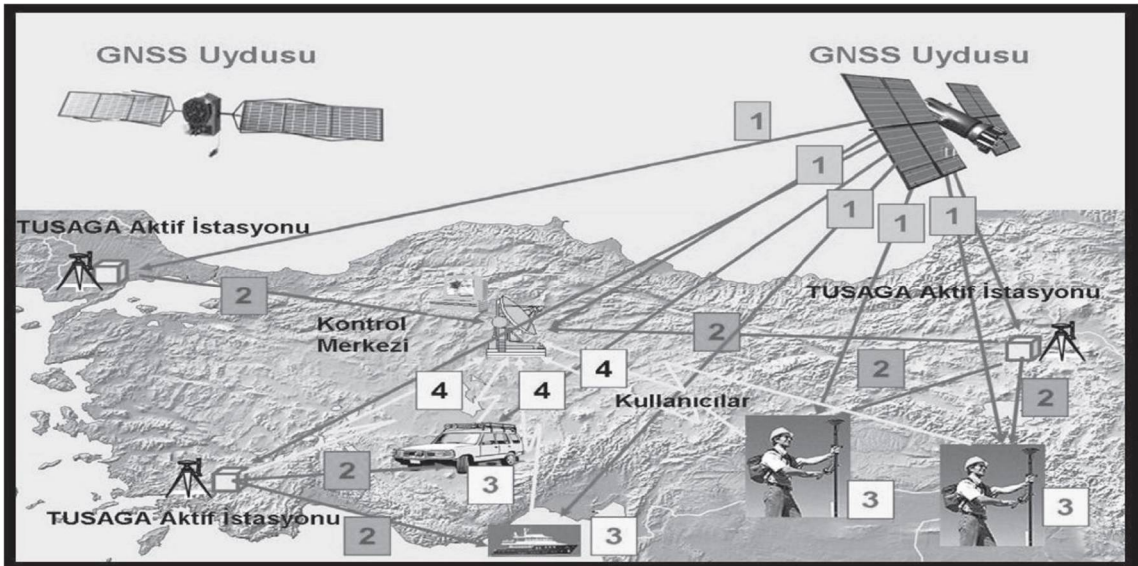
Jeodezi bilim dalı öncelikli olarak, konumsal bilgiye ihtiyacın olduğu tüm bilim dallarında ve çalışma kollarında hız, ekonomi ve doğruluk unsurlarına bağlı kalınarak konum bilgisi elde edebilmek için GNSS kullanılmaktadır. Konum bilgisi ihtiyacını karşılamak için tüm dünyada 7/24 veri toplayabilen sabit GNSS istasyonları oluşturulmakta ve yetkili kurumlar tarafından işletmesi yapılmaktadır. İstasyonlarda elde edilmiş olan veriler kullanıcılara belirli bir ücretle ya da ücretsiz olarak internet aracılığıyla ulaştırılmaktadır. Türkiye genelinde dağılmış noktalarda askerî ve sivil kullanıma yönelik jeodezik ve jeodinamik amaçlar doğrultusunda uydu bilgileri toplayan sabit istasyonlardan oluşan bir ağ kurulması çalışmaları 1990 yılında başlatılmıştır.

TUSAGA-Aktif Sistemi; TKGM ve HGM’de bulunan 2 adet kontrol merkezi ile 4 adet sabit GNSS istasyonu Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyetinde (K.K.T.C.) olmak üzere toplam 158 adet Sabit GNSS istasyonundan oluşmaktadır. “Sürekli Gözlem Yapan GNSS İstasyonları Ağı ve Ulusal Datum Dönüşümü Projesi (TUSAGA-Aktif / CORS-TR)” İstanbul Kültür Üniversitesi (İKÜ) yürütücülüğünde, Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü (TKGM) ve Harita Genel Müdürlüğü (HGM) müşterek müşteri olmak üzere, 08 Mayıs 2006 tarihinde başlamış olup, Aralık 2008 itibariyle tamamlanmasıyla faaliyete geçmiştir. TKGM ile HGM’ce müşterek olarak işletilen sistem, 15 Haziran 2011 tarihine kadar test amacıyla ücretsiz olarak işletilmiş olup, bu tarihten itibaren Bakanlıklar Arası Harita İşlerini Koordinasyon ve Planlama Kurulunca belirlenen Birim Fiyatlar üzerinden ücretli olarak işletilmeye başlanmıştır. Zemin tesisleri ülke ve bölge koşullarına uygun olarak planlanmıştır. Sonuç olarak iki türlü zemin tesisi yapımına karar verilmiştir;

- Toprak zeminde beton yer pilyesi,
- Çatı ve teraslarda büyük çaplı, galvaniz kaplı çelik pilyeler.

Ülke genelinde inşa edilen 146 adet pilyenin boyutlarına göre dağılımları şöyledir;

- 85 adet 2 m pilye (zeminler dahil),
- 58 adet 3 m pilye,
- 3 adet 4 m pilye.



Şekil 3.6. TUSAGA-Aktif Sistemi Ana Bileşenleri (Erdoğan ve Bakıcı, 2010).

3.2.2.2. Düşey Kontrol Ağı (TUDKA-99)

Ülkemizdeki çalışmalarda şuanda da kullanılmakta olan yükseklik sistemi; referans elipsoidine dayalı olarak hesaplanmış olan normal gravite değeri ve geometrik nivelman ölçülerinin bir arada kullanıldığı quazi-jeoide göre tanımlanmış normal ortometrik yükseklik sistemidir. Fakat yüksekliklerin jeoide göre tanımlanabilmesi için ortometrik yükseklik sisteminin kurulmasına imkân sağlayabilmek adına, 1991 yılında Türkiye Gravimetrik Jeoidi-1991 (TG-91), 1999 yılında Türkiye Jeoidi-1999 (TG-99) ve aynı yıl içerisinde Güncellenmiş Türkiye Jeoidi-1999 (TG-99A) oluşturulmuştur. Ayrıca, 1999 yılında tamamlanan değerlendirme çalışmaları sonucunda jeopotansiyel sayıları hesaplanan nivelman noktaları kümesinin oluşturduğu “Türkiye Ulusal Düşey Kontrol Ağı-1999 (TUDKA-99)” oluşturulmuştur (Demir, 1999).

TUDKA-99; TUDKA-92’ye yeni ölçülerin eklenmesiyle geliştirilen nivelman ağının dengelenmesiyle oluşturulan 25680 nokta, 29316 km ve 213 geçkiyi (nivelman hattını) içermektedir (Ayhan ve Demir, 1999). TUDKA-99 dengelemesi jeopotansiyel sayılarla yapılmıştır. Antalya mareograf istasyonundaki 36 yıl boyunca elde edilmiş olan ölçülerin aritmetik ortalamasının alınmasıyla düşey datumu tespit edilmiştir. Ortalama deniz seviyesi ile tanımlı olan sistemde tüm noktalarda jeopotansiyel sayı, Helmert ortometrik yüksekliği ve Molodensky normal yüksekliği belirlenmiştir. Dengeleme sonunda nokta yükseklik hassasiyetlerinin başlangıç noktası olan Antalya Mareograf İstasyonundan uzaklaştıkça arttığı ve +0.3-9 cm arasında değiştiği bulunmuştur (Demir, 1999). Türkiye Ulusal Düşey Kontrol Ağı ve buna dayalı olarak oluşturulan düşey kontrol ağlarının derecelendirilmesi aşağıda belirtilmiştir.

- I. ve II. derece nivelman ağı ve noktaları: Ülke nivelman ağı ve noktaları.
- III. derece nivelman ağı ve noktaları (ana nivelman ağı): En çok 40 km uzunluğundaki luplarla üst dereceli ağlara dayalı sıklaştırma ağı ve noktaları.
- IV. derece nivelman ağı ve noktaları (ara nivelman ağı): En çok 10 km uzunluğundaki luplarla üst dereceli ağlara dayalı sıklaştırma ağı ve noktaları.
- V. derece nivelman ağı ve noktaları: Poligon ve tamamlayıcı nivelman ağı ve noktaları. (BÖHNBÜY, Haziran 2018)

3.2.2.3. Temel Gravite Ağı (TTGA-99)

Türkiye Temel Gravite Ağı-1956 (TTGA-56) nokta gravite doğrulukları ($\pm 0.07-0.19$ mGal) jeodezik, jeofizik ve mühendislik alanlarındaki uygulamalar için ihtiyacı karşılayamadığından, 1993-1999 yılları arasında yapılan çalışmalarla Türkiye Temel Gravite Ağı-1999 (TTGA-99) oluşturulmuştur. TTGA-99, 55 I'inci derece nokta ve 13 mutlak gravite noktası olmak üzere toplam 68 noktadan meydana gelmektedir. Bu noktalar arasında 132 gravite bağlantı ölçüsü, Harita Genel Komutanlığı (HGK) ve Maden Tetkik ve Arama (MTA) Genel Müdürlüğü'nden sağlanan iki adet LaCoste & Romberg (LCR) Model G gravimetresi ile aynı anda ve gidiş-dönüş olarak yapılmıştır. Gravimetre okumaları, üretici firma tarafından her gravimetre için ayrı ayrı verilen kalibrasyon değerleri ile gravite değerlerine dönüştürülmüş ve bu değerlere gel-git düzeltmesi eklenmiştir. Her gravimetreye ilişkin aynı gündeki ölçüler ayrı ayrı dengelenmiş, drift hesaplanmış ve ölçüler indirgenmiştir. İndirgenmiş ölçüler, 13 mutlak gravite ölçüsü ve her gravimetre için yıllık olarak tanımlanan ölçek bilinmeyenleri dikkate alınarak topluca dengelenmiş ve dengeleme sonucunda I'inci derece nokta gravite değerleri için $\pm 0.0038 - 0.0086$ mGal standart sapma değerleri elde edilmiştir. 17 Ağustos 1999 İzmit ve 12 Kasım 1999 Düzce depremleri sonrasında, deprem bölgesindeki gravite bağlantı ölçüleri 2000 yılında yenilenecek değerlendirilmiş ve sonuçlar deprem öncesi gravite değerleri ile karşılaştırılmıştır; Adapazarı noktasında $+0.0475$ mGal (~ 15 cm çökme), Yığılca mutlak gravite noktasında -0.0406 mGal (~ 13 cm yükselme) gravite değişimi belirlenmiştir (Demir ve diğ., 2016).

3.3. Tünel Açma Yöntemleri

Tünel açma işlemlerinin ekonomik ve sağlam yapılması açısından çeşitli yöntemler tarihin akışı içinde teknolojik ilerlemelere de paralel gelişme göstermiş, günümüz yöntemleri şekillenmiştir. Eskiden basit araçlarla açılan tünellerin desteklemesinde ahşap malzemeler kullanılmışken, şimdilerde büyük kırıcı makineler kullanılmakta, TBM adı verilen kazı makinesi yardımıyla tünel stabilitesi sağlanıp birçok iş tek seferde yapılabilmektedir. Tüneller maden arama, drenajı sağlama, altyapı ve daha birçok ihtiyacı karşılamaya yönelik farklı coğrafi koşullarda farklı amaçlar için yapılmaktadır. Tünel kazılarında kazı ve destek sistemi benzer fakat uygulama sıraları farklı olan yöntemler ya da kazı adımları, kullanılan iksaların ve tünel içi kaplama

türlerinin tercihinde değişiklikler olacak şekilde uzun bir tecrübe evresi sonucunda geliştirilen çeşitli tünel açma yöntemleri oluşturulmuştur. Günümüzde tünel açma çalışmaları aşağıdaki yöntemlerle gerçekleştirilmektedir.

- Aç-kapa yöntemi ile yapılan tünel yapıları,
- Parçalı kesitle inşa edilen tüneller (Klasik yöntemler),
- Tünel yapma makinelerinin kullanıldığı tünel çalışmaları (TBM),
- Batırma tünel yönteminin uygulandığı çalışmalar,
- Del – Patlat ile tünel inşa olarak sıralanabilir.

3.3.1. Parçalı kesitli yöntemler (Klasik yöntemler)

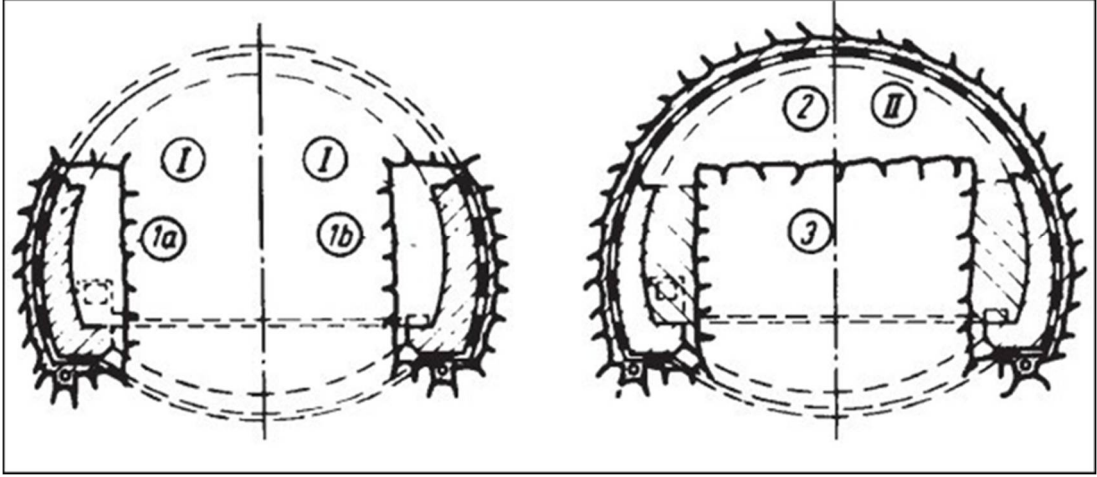
Klasik yöntemler olarak ifade edilen parçalı kesit tünel açma yöntemlerinde zemin kazı yüzeyi (ayna) planlanan şekilde kısımlara ayrılır, en uygun olduğu kabul edilen sırada kazı çalışmaları yapılır. En çok büyük çaplı, geniş açıklığa sahip tünellerde ve salınımı çok olan gevşek zeminin olduğu tünellerin yapımında tercih edilmektedir. Sırasıyla yapılan kazı çalışmalarında, tüm zeminin kazıdan etkilenme oranını azaltmak amacıyla, farklı kazı aşamaları projeye göre belirli mesafe aralıklarıyla yapılmalıdır. Uygulama kolaylıkları sunması nedeniyle tünel yapımında en çok kullanılan yöntem parçalı kesit yöntemleri olmuştur. Tünel çalışmalarında farklı ülkeler edinilen tecrübeye dayalı olarak farklı yöntemler oluşturmuş ve uzun yıllar başarılı şekilde uygulamışlardır. Bu yöntemlerden çoğu ise gelişen teknoloji ile önemini yitirmiştir. Klasik yöntemler olarak adlandırılan, birbirinden farklı sırada aşamalarla kazılan yöntemlerden Alman, Belçika, İngiliz, Eski Avusturya, İtalyan ve İsviçre tünel açma yöntemleriyle, günümüzde en çok tercih edilen daha kabul görmüş olan Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) aşağıda sırayla açıklanmıştır. Şekil 3.7’de çalışma bölgesinde NATM kurallarına göre açılan Tünel-15’e ait alt yarı ve üst yarı parçalarının net görülebildiği fotoğrafa yer verilmiştir. Burada kazı çalışmasında kural ayna yani üst yarı ile alt yarı arasındaki mesafenin 50 m’ den daha fazla olmamasına dikkat edilmesidir.



Şekil 3.7. Parçalı kesit yöntemlerinden günümüzde en çok tercih edilen NATM'a göre yapılan tünel kazı çalışması (Ankara-Sivas Demiryolu Projesi T-15 Tüneli).

3.3.1.1. Alman tünel açma yöntemi

Çekirdek yöntem diye de adlandırılan yöntemin uygulanması için öncelikli olarak iki tane yan ayak galeri kazısı yapılmaktadır. Sonrasında açılan bu galerilerden tavana doğru galeri genişletilerek tavan kazısı yapılmaya başlanır. Her tamamlanan aşamadan sonra oluşan boşluklara beton basılarak destekleme yapılır. Bu şekilde kazısı ve desteklemesi tamamlandığında tavanın ve yan duvarların da kaplamaları yapılmış olur. Çalışmanın son aşamasını tam orta kısmı oluşturan ve çekirdek olarak adlandırılan kısmın kazı yapılıp tünel inşaatı tamamlanır. Bu yöntemin avantajlı yönü, kazıya yan galeriler açılarak başlanmış olmasından dolayı zeminin litolojik yapısı hakkında bilgi ediniliyor olunması ve tavan için sağlam bir kemer destek sisteminin oluşturulmasıdır. Çalışılan alanın dar olması, zaman kaybına neden olacak sebeplerin çokça bulunması ve yan galerilerin varlığından dolayı ortaya çıkan farklı yön ve şiddetteki gerilme varlığı yöntemin dezavantajlarını oluşturmaktadır (Köse ve diğ., 2007). Eskisi kadar kullanım alanı olmasa da bu yöntem büyük kesitli yeraltı yapılarının kalot kazısının yapılmasında tercih edilmektedir.

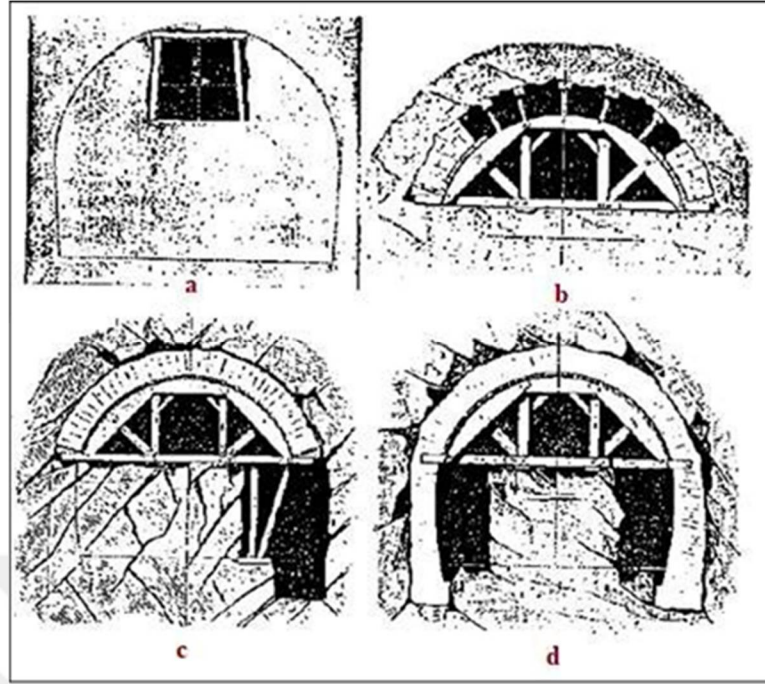


Şekil 3.8. Kazıların yapılması ve desteklenmesi (Latin harfleri ile gösterilen numaralar kazıları, Romen rakamıyla gösterilen numaralar destekleri ifade etmektedir) (Maidl ve diğ., 2013).

Bu yöntem ile açılan tünellerin Şekil 3.8’de kazı ve destekleme aşamaları numaralandırılmış olup, ilk adım ‘1a’ ve ‘1b’ ile gösterilen yan ayak galerilerinin kazılması ve ‘I’ ile gösterilen ahşap desteklerin yapılmasıdır. 2. aşama olarak ‘2’ ile gösterilen tavan galerisinin açılması bulunmaktadır. Bunlar ‘II’ ile gösterilen ahşap geçici desteklerle tutturulur. Bu açılımı izleyen sıra ile yan kargir duvarlar inşa edilir. Sonrasında yanlardaki ayak galerileri kullanılarak tavan galerisine doğru bu duvarların birleşmesini sağlayacak biçimde tünel istikametince galeri kazısına devam edilir. Yöntemin son aşamasında ‘3’ ile gösterilen çekirdek bölümünün kazılması yer almaktadır. Bu kazıdan sonra taban uygun malzeme ile kaplanır ve tünel kazısı tamamlanır. Bir anonun tamamlanması 7-8 aşamanın uygun sırada yapılması ile tamamlanır (Maidl ve diğ., 2013).

3.3.1.2. Belçika tünel açma yöntemi

Belçika Tünel Açma Yönteminin ilk aşaması Şekil 3.9’da ‘a’ ile ifade edilen bölümde gösterilen tavan kazısının yapılmasıdır. Tavan kazısının desteklenmesiyle devam eden tünel açımında daha sonra ‘b’ ile gösterilen üst yarıda tavan kenarları açılması ile çalışmalara devam edilir. Üst yarı kazısı bitimiyle beraber tavan kaplaması yapılır. Yukarıdan aşağıya doğru kazının devam ettiği bu yöntemde kenar ayaklar ‘c’ bölümünde gösterildiği şekilde kazılır ve yöntemin kullanımını teşvik ettiği destek elemanları olan ahşap kayıt ve payandalarla desteklenir. En son aşama olarak ‘d’ ile ifade edilen orta bölüm yani göbek kazısı yapılır.



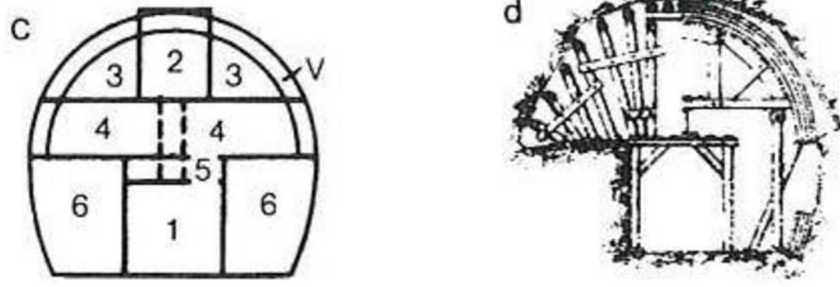
Şekil 3.9. Belçika Tünel Açma Yöntemi aşamalı kazı yapılması (Ayaydın, 1987).

Tünel kaplamaları kargir duvardan veya betondan yapılarak tünel kazısı tamamlanır. Tünel yüksek basınç etkisindeyken tünele baca (kuyu) açılır ve bu baca betonla doldurularak çalışmaların güvenliğinin sağlanması amacıyla zemin iyileştirme yapılır (Ayaydın, 1987). Bu durum maliyetin yükselmesine neden olmaktadır. Bu yöntemin olumlu yanları aşağıdaki gibidir (Sandström, 1963):

- Tavan kaplamasının kısa sürede tamamlanabilmesine olanak sağlamaktadır.
- Devamlı olarak kazı yapılabilmekte böylece zaman kaybı azaltılmaktadır.
- Her aşamada ekip çalışabileceği için ilerlemede hız kazanımı artırılabilir.
- Kayanın zeminde sabitliği sağlanarak göçük oluşumunun önüne geçilebilir.

Bu yöntemin olumsuz yanları aşağıdaki gibidir (Sandström, 1963):

- Tünel içi kaplamaların hızlı bir şekilde yapılması gerekmektedir.
- Çalışma alanı dardır.



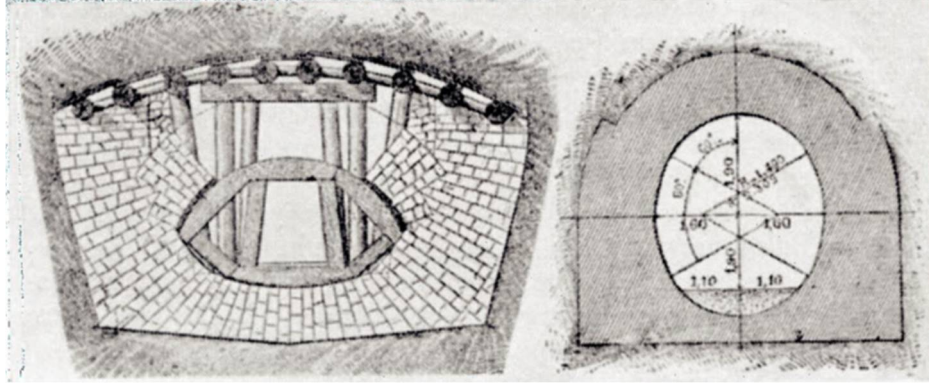
Şekil 3.10. Belçika yönteminin uygulandığı tip kesit ve Hönebacher Tüneli örneği (Maidl ve diğ., 2013).

3.3.1.3. İngiliz tünel açma yöntemi

İlk kez 1830 yılında İngiliz demiryolu yapım çalışmalarında kullanılan bu yöntem sehpa yöntemi olarak da bilinmektedir. Küçük kesitli tünellerde tercih edilen bir yöntemdir. Daha çok Eski Avusturya yöntemiyle benzerlik gösteren bu yöntem, ihtiyaç duyulan parça sayısının az olmasından dolayı sağlam ve baskının az olduğu kayalarda uygulanmıştır (Köse ve diğ., 2007).

İngiliz tünel açma yönteminde kazı çalışmaları iki etapta tamamlanmaktadır. Bunlar etaplar üst yarı ve alt yarı şeklinde adlandırılıp, kazı çalışmalarına ilk önce üst yarının orta kesiminden başlanmaktadır. Göbek olarak da adlandırılan bu orta kesimde kazı çalışmaları tamamlanınca keresteler kullanılarak destek sistemi oluşturulur. Kerestelerden oluşan bu destek sisteminin üst kısmı tünelin iç kaplamasını desteklerken, alt bölümü ise üst yarı kazısının orta kesimine bastırılarak destekleme yapılır (Tonon, 2010).

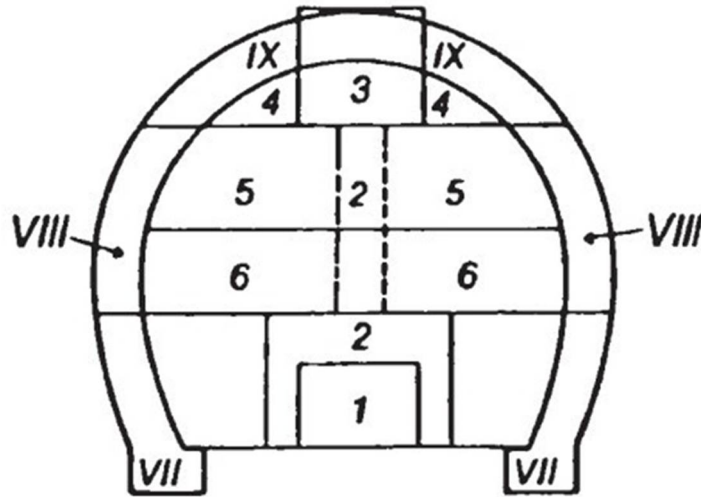
Destek oluşturma çalışmaları üst yarı kazıları ile aynı anda yapılarak kazının çevresini kaplayacak şekilde yapılır. Böylece zemin kazıları da sekteye uğramadan hem destek sistemi oluşturulur hem de kazı devam eder. Bu sistemde diğer yöntemlere göre kereste kullanımına olan bağlılığın diğerlerine göre daha az olması ve tüm aynada kazı yapılmasına olanak vermesi tercih edilme nedenlerini artırmaktadır. Eski Avusturya Yönteminden farklı olarak, değişen jeolojik koşullara kolayca uyum sağlanamaz ve ilerleme boyu da daha kısa kalmaktadır. Bu yöntemin uygulanabilmesi için örtü (et) kalınlığının düşük olması gerekmektedir (Tonon, 2010).



Şekil 3.11. İngiliz tünel açma yöntemi (Satıcı ve Topal, 2015)

3.3.1.4. Eski Avusturya tünel açma yöntemi

Genellikle kısa boylu ve geniş kesitli tünellerin yapımında kullanılan yöntemlerden biridir. Öncelikle tavan ve tabanda suyu drene edebilmek için nakliye galerileri açılır, kazı yukarıdan aşağıya doğru yapılmaktadır. Tavan kazıları tamamlandıktan sonra kalan tüm parçaların alınmasından sonra aşağıdaki kısımlardan yukarıya doğru kaplama işleminin yapımına geçilir. Kullanılan ağaç sayısının fazla olması ve kaplama olarak taş duvarın yapılması dolayısıyla yüksek maliyetler ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.12. Tünel kaplama sırası (Maidl ve diğ., 2013).

Yıllar içerisinde çelik-ağaç birlikteliğinin veya çeliğin tek başına kullanılmasına ek olarak sağlamlığı arttırmak amacıyla püskürtme betonun da kullanımı artmıştır. 50-60 metrede bir tavan ve taban galerileri birleştirilmekte, nakliyenin yapılabilmesi için de taban galerileri kullanılmaktadır (Emiroğlu, 2010).

Yöntemin avantajları:

- Kazı çalışmaları sırasında yeteri kadar alanın varlığı hız ve ekonomi yönünden uygun olmasını sağlamaktadır,
- Farklı birçok çeşitteki jeolojik yapıya ve değişen zemin koşullarına kolayca uyum sağlayabilmektedir,
- Desteklerin tabandan yerleştirilmesine başlanıldığından basıncın yüksek olduğu alanlarda dahi çalışmaya elverişli ve güvenlidir.

Yöntemin olumsuzlukları:

- Kullanılan ağaç sayısı fazladır,
- Çalışılan alanının dar olması,
- Taban kaplamasının yapımının gecikmeli olması beklenmedik olumsuz durumlara neden olabilir.

3.3.1.5. İtalyan tünel açma yöntemi

1867 yılında geliştirilerek Alp Tünellerinde kullanılan bu yöntemin kullanıldığı zeminler genellikle plastik ve akışkan olma özelliğine sahiptir. Kazı çalışmalarına başlamadan önce tünel aynası ve tünel iç çevresi rijit plakalarla kaplanır, kazının ilerlemesiyle beraber bu plakalar parça parça sökülür ve kazısı tamamlanan bölümler plakalarla kaplanır. Bu plakalar kalıcı olup sonradan tünel içine yapılan kaplama ile birlikte daha sağlam bir hale getirilir (Maidl ve diğ., 2013).

Bu yöntemin olumlu yanları:

- Değişken zemin koşullarına rijit plaka kaplamaları sayesinde hazırlıklı ve uygundur.
- Deplasmanların oluşumu daha az gözlenmektedir.

Bu yöntemin olumsuz yanları:

- Kazı öncesi kaplama çalışmaları gibi nedenlerden dolayı ilerleme hızının çok düşük olmasıdır.
- Yüksek maliyette yapılmaktadır (Tonon, 2010).

3.3.1.6. İsviçre tünel açma yöntemi

Bu yöntemde ilk olarak pasanın taşınmasını sağlamak amacıyla tabanda boşluk açarak ilerlenmektedir. Diğer aşamaların açılması ise bu bölümden tavana doğru tünelin kazılması ile yapılmaktadır. Yan duvarlar kazılarak tavandan aşağıya doğru tünelin kazısı devam eder. Tünelin kaplaması ise tabandan tavana doğru yapılır (Köse ve diğ., 2007).

3.3.2. Yeni Avusturya tünel açma yöntemi (NATM)

Günümüzde teknik ve teknolojik gelişmelerinde etkisiyle klasik yöntemlerden elde edilmiş olan bilgi ve tecrübelerin beraberinde birçok tünel kazı ve kazı tahkimat sistemi geliştirilmiştir. Bu yöntemin temelinde, kazıya destek oluşturacak sistemler uygulanırken zeminlere ait bilgilerinde bir sisteme oturtularak benzer zeminlerde aynı destekleme yapılarının oluşturulması amaçlanmıştır. Fakat zemin çeşitliliğinin çok fazla olup, kısa mesafede değişkenliklerin olmasının olumsuzluğu sebebiyle gruplandırma çalışmaları yapılarak tünel açma yöntemlerinin bir veri tabanı yapılamamıştır. Veri altlığının eksikliğini kapatmak için uluslararası kabul görmüş kaya kütle sınıflandırmaları kullanılmaya başlanmıştır. Günümüz uygulamalarında en çok tercih edilen ve uygulama alanının fazla olduğu yöntemler; Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) ve ADECO-RS (The Analysis of Controlled Deformation in Rocks and Soils-Kaya ve Zeminlerde Kontrollü Deformasyon Analizi) olarak karşımıza çıkmaktadır (Saticı ve Topal, 2015).

NATM, tünelin inşaat çalışmalarının sürdürüldüğü kazının litolojik durumlarını takip eden ve çalışmaların tüm etaplarında dikkate alınması gereken unsurlar doğrultusunda çalışma elemanlarında değişkenlikler gösterebilen bir anlayış ve felsefedir (Karaoğlan, 2002). Patent başvurusunda NATM tanımı şu şekilde ifade yapılmıştır: “İnce geçici bir destekleme yerleştirmek ve deformasyonlara izin vermek yoluyla kaya basıncının düşürülmesi ve bu basıncın çevreleyen kayaya dağıtılmasıdır. Böylece son destekleme daha az yüklenecek ve daha sonra daha da ince bir yapı halinde son destekleme yerleştirilebilecektir. Deformasyonlar ölçümler ile gözlenmeli ve sonuçlar yapısal analiz ve tasarım ile birlikte değerlendirilmelidir” (Kahyaoğlu, 2008).Yöntemi daha anlaşılır bir şekilde Rabcewicz tanımlamaktadır: “İnce ve geçici bir destekleme uygulayarak, deformasyonlara izin vererek, tünel içine doğru gelişen kaya basıncını azaltmak ve yükleri kazı çevresindeki kayaya dağıtmak. Böylelikle son destekleme

(kaplama) daha az yüklenecek, daha sonra yapılabilecek ve daha ince bir yapı olabilecektir. Deformasyonlar kazı sırasında ölçülecek ve projedeki hesaplamalarla karşılaştırılacaktır” (Karaoğlan, 2002).

NATM, parçalı kesit yöntemleri içerisinde olup saha çalışmaları ile bire bir elde edilmiş olan bilgi ve tecrübeye dayanan sistemler bütünüdür. Kullanım alanı yaygın olan bu yöntem ile tünel açma faaliyetlerinde yeni bir sistem gelişmiş, farklılık ve yenilikçilik kazanılmıştır. Kullanılan ekipmalarda belirli bir şartı bulunmayan, katı-değişmez kurallar mantığı bulundurmayarak esnek bir yöntemdir. Bu yöntemde asıl amaç, ilk kazı ile destekleme çalışmaları sonrası tüneli çevrelemekte olan ortamda ikincil baskının ve deformasyonların gözlenmesine, bunların denetlenebilmesine ve yönlendirilebilmesine imkan tanımak ve böylece kendini tutabilen statik bir sistem oluşturmaktır (Köse ve diğ., 2007). Yöntem her tarzdan zemine ve farklı geometrik yapıdaki tünellerin yapıma uyum sağlayabilen bir mantık içermektedir.

NATM’ın bütünlüğünü oluşturan çok sayıda prensibi bulunmaktadır. Temel prensibi kazı çalışmalarına maruz kalan kayadaki var olan dayanıklılığı muhafaza edebilmek, ana kayayı çokta kurcalamadan yükün ana kayada kalmasını sağlamak, deformasyonları ve baskıları ölçümlerle kontrol etmek, destekleme çalışmalarını biran önce tamamlayabilmek ve kesitleri mümkün mertebe yuvarlak seçebilmektir. NATM ile açılan tüneller için proje ile belirlene parametrelerin, yapım çalışmalarında tünel güvenliğini tehlikeye düşürecek bir durumla karşılaşıldığında yeni duruma uygun değişimin yapılabilir olması en önemli avantajdır. Yani; projede belirtilen iksa çeşidi ve iksalarla ilerleme mesafesi, kullanılması istenilen donatılar ya da bu gibi diğer parametrelerde revizyon yapılabilmektedir. Bu metot öncelikle Avusturya, Fransa, Almanya, İsviçre ve İtalya’da kullanılmaya başlanılmıştır. Metodun dünyada yaygınlaşması, uygulama rahatlığı, değişen koşullara uyum sağlanmasında kolaylıklar sunması gibi nedenlerden dolayı hızlı gelişmiştir. Yöntemin uygulama örneklerinden ilki olarak kabul edilebilen Frankfurt Metrosu çalışmalarına 1969 yılında başlanmış olup, birden fazla tabakaya sahip kil, marn, tebeşir ve kum taşının olduğu zeminde çalışılmıştır. Bu yöntemin uygulanmasıyla inşa edilen ilk büyük ölçekli tünel Rabcewicz tarafından Venezuela’da olmuştur (Aktaş, 2009). Bu yöntem Japonya’daki Seikan tüneline de başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Yöntemin başarıyla uygulandığı diğer bir örnek olarak Meksiko şehrindeki Emisor Central kanalizasyon tüneli gösterilebilir. Kullanım alanı gittikçe artan bu yöntemin Türkiye literatürüne kazandırılması 1979 yılında Mahir Vardar’ın çalışmaları sayesinde olmuştur (Çeçen ve İncecik, 2008).

NATM ile açılacak olan tünel güzergâhında yapılacak zemin etüt çalışmaları ile topografya, derinlik ve tünelin geometrisi gibi esaslara uygun nitelikte projenin temel hatları belirlenir ve buna göre proje şekillenir. Bunlara ek olarak çalışmalar esnasında zeminin incelenip gözlenmesi ve yapılan ölçmelerle elde edilen deformasyon verilerine göre kazı çalışmalarına gereken tahkimat sistemleri ve kullanımı gereken donanımlar sürekli revize edilerek en uygun olanların tespiti yapılır. İhtiyaç görülmesi durumunda proje aşamasında belirlenen detaylarda değişikliğe gidilerek daha uygun hale getirilebilir. Bu sayede tünellerde gerektiği kadar destekleme elemanları kullanılarak zamanında ve ekonomik bir şekilde gerektiği kadar emniyette sağlanmış olunur (Ünlütepe, 2005).

Ayna kazısı en az iki aşamada yapılır. Tünel geometrisinin büyük olması ve zeminin kötüleşmesi durumunda tünel aynasındaki kazı üç aşamalı olarak yürütülür. Kazı aşamaları sırasıyla;

- Üst Yarı,
- Alt Yarı
- Taban (gerekirse)

şeklindedir.

Tünelin ilk desteği olan dış kaplamanın görevi iç kaplama yapılana kadar hafriyatı yapılmış olan boşluğun güvenli bir şekilde korunmasıdır. Bu süre yaklaşık olarak 6-7 ay ile bir buçuk sene arasında değişebilmektedir. NATM'da tünel desteklenmesi prensip olarak bir açıdan yerüstündeki hafriyat çukurlarının desteklenmesine benzemekte olup aradaki fark tünel tavanının dairesel şeklinden istifade edilmesi ve çevreleyen zeminin aşırı gevşemesine müsaade etmeden zeminin/kayanın kendi taşıma gücünden yararlanılmasıdır.

Tünel desteğinin (çelik kafes iksa+çelik hasır+püskürtme beton+kaya bulonu) ve çevreleyen zemin birlikte bir kemer oluşturması ve bunun korunmasının sağlanması ile tünel üzerine gelen arazi yükü taşınabilmektedir. Sorunlu zeminlerde her kazı aşamasından sonra tünel desteği oluşturulmaktadır. Normal durumlarda ise bu işlem tüm ayna hafriyatının tamamlanmasını müteakip yapılmaktadır.

Geçmişte daha sık kullanımı olan ve hala kullanım alanı olan diğer yöntemlere göre NATM birçok üstünlük barındırmaktadır (Şeker, 2008):

- Avantajlarından en önemlisi olanı tüm zemin koşullarına kolayca uygulanabilir olmasıdır. Bu sayede farklı jeolojik koşullarına ve kısa mesafeli değişkenlik gösteren tünellerde daha çok tercih edilir olmuştur.

- Gevşek ve salınımı fazla olan zeminlerdeki yapılmak istenilen büyük kesitli tünellerin NATM ile açılması ekonomik olarak daha uygun hale gelmektedir.
- Tünel çalışmalarına büyük oranda olumsuz etkisi olan yüksek basınçlı boşluk sularının olduğu alanlarda su yalıtım malzemesi olan membranlar kullanılarak kuru bir çalışma ortamının oluşturulmasını sağlamaktadır.
- Yapılan tasarımda zemin hakkında veri toplama çalışmalarına önem verildiğinden en uygun sayı ve çeşitlilikte donatı kullanılarak tünel desteklemeleri daha ekonomik bir şekilde yapılabilmektedir.
- Sadece bir adet ana makineye bağlı olarak çalışılmaması işin aksaması gibi durumların önüne geçmektedir.

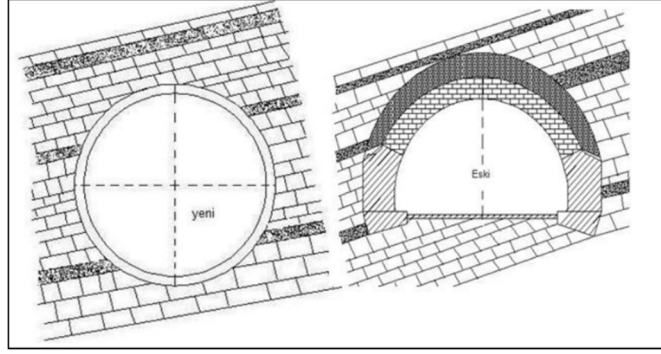
Yöntemde bazı olumsuz özellikler de bulunmaktadır (Uğurel, 2010):

- Destekleme ve kazı çalışmaları birlikte yapıldığından ilerleme hızı diğerlerine oranla az olabilmektedir.
- Personelin eğitilmiş ve pratik kazanmış olması gereklidir.
- Kalifiye işçilik kadar önemli olan yüksek kaliteli malzeme kullanımını gerektirir.
- Belirsizliklere göre değiştirilebilirlik özelliği bulunan bu yöntemde sahada çalışmaları yöneten ile projeyi yaptıran arasında anlaşma ve risk alma dağılım oranı farklıdır.

Bu yöntemde hem kazı çalışmaları süresince hem de çalışmalar sonrasında deformasyon varlığı izlenir. Böylece zeminin göstereceği tepki ve buna uygun deformasyon karakteristiği analiz edilip uygun planların geliştirilmesi yapılmaktadır.

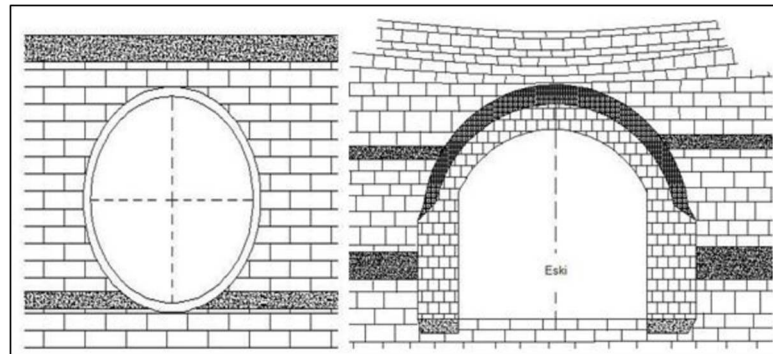
NATM'in karakterine uygun prensiplerin belirlenmesi yoluna gidilmiştir. Belirlenen bu prensiplerden herhangi birinden vazgeçilmesi yöntemden uzaklaşmak demektir. Bu temel prensipler aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir (Vardar, 1979; Verbundplan, 1987; Karaoğlan, 2002; Emiroğlu, 2010).

1. Yeraltı yapısının ana malzemesini içerisinde çalışma yapılan temel zeminin kendisi oluşturmaktadır. Bu yöntemde kazı alanı olan boşluğu çevreleyen ana kaya asıl taşıyıcı olma görevini yerine getirmektedir (Şekil 3.13).

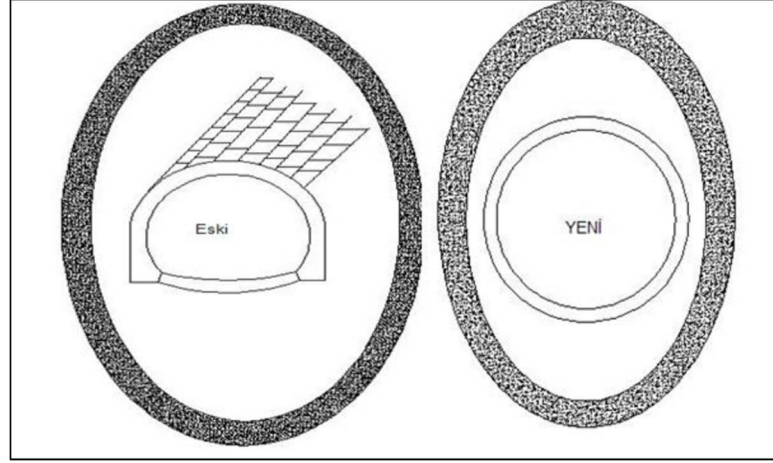


Şekil 3.13. Yeraltıta oluşturulan yapının taşıyıcı kısımları (Emiroğlu, 2010).

2. Kayanın başlangıçtaki sağlamlığını korumak temel amaçlardandır. Bu sebeple ana kayanın dayanımlılığının korunması vazgeçilmez ana presip olmalıdır.
3. Zeminde oluşan salınım ve dökülmelere önem verilmelidir. Bu tür salınımlar, ana kayada taşıma direncinin azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle zeminin kendini bırakmasına sebebiyet veren etmenler araştırılmalı, deformasyonlar takip edilmeli ve önlemek için araştırma yapılmalıdır (Şekil 3.14).
4. Tek ve çift olacak şekilde çok noktada oluşabilecek basınç ve baskılı ortamlardan kaçınılmalıdır. Bundaki amaç baskılar sonucunda taşıma kuvvetinde azalma olan kayanın harekete geçmesinden korunmaktır.
5. Koruyucu yapı, kayacın taşıma direncinin azalmasına fırsat vermeden oluşturulması gerekmektedir. Çalışmalar süresince ortaya çıkan deformasyonun destekleyici zonun oluşumuna imkan verecek düzeyde aynı zamanda gevşemelerin artıp kayanın taşıma direncinde düşmelere de sebep olmayacak düzeyde olmasına dikkat edilmeli, kontrol edilmeli ve yönlendirilebilir olmalıdır. Bunda ne kadar başarılı olunursa o kadar güvenlik sağlanmış ve ekonomik kayıpta önlenmiş olunur (Şekil 3.15).

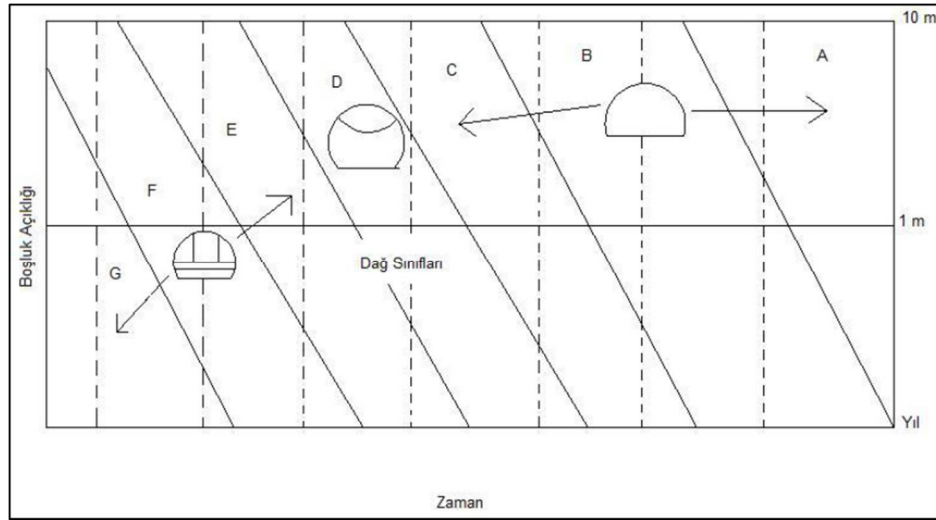


Şekil 3.14. Gevşeme gösteren kayacın tünele yaptığı etki (Emiroğlu, 2010).



Şekil 3.15. Koruyucu bölge halkası (Emiroğlu, 2010).

6. Destekleme çalışmaları gerekli düzeyde ve olması gereken zamanda yapılmalıdır. Bunun için destekleme çalışmalarına olması gerekenden erken ya da geç başlanılmamalı, iksa direnci oluşturan yapıda esneklik olmasına dikkat edilmelidir.
7. Kayanın kendini taşıyabileceği süresinin doğru tespit edilmesi çok önemlidir. Bu sebeple, kayacın ve özellikle kaya desteklemesinin birlikte, zamana bağlı kırılma davranışlarını belirleyen özgül zaman faktörleri doğru olarak tespit edilmelidir (Şekil 3.16).

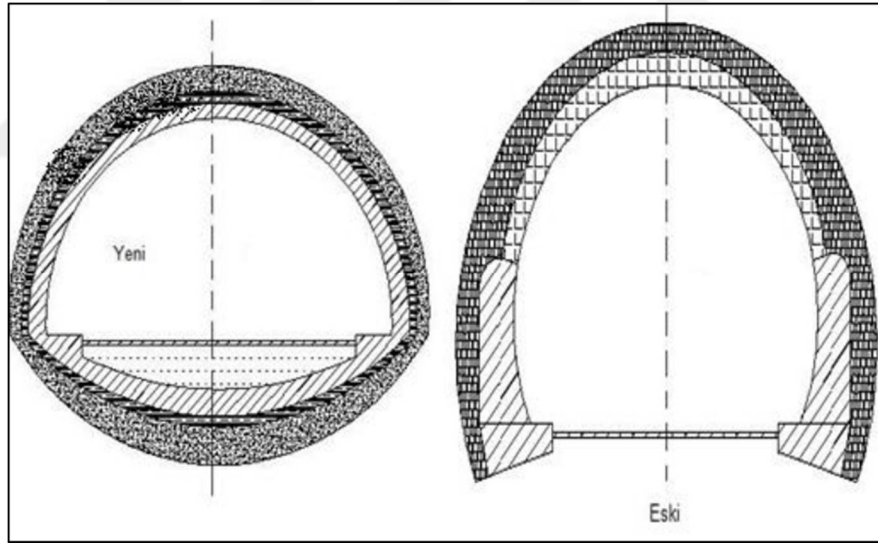


Şekil 3.16. Kayanın kendini tutabilme süresinin zamanla olan ilişkisi (Emiroğlu, 2010).

8. Sondaj çalışmaları, laboratuvar araştırmaları ve gerekli ölçme faaliyetleri yapılmak zorundadır. Zamanın etkisi ve kazıdan sonra kayada oluşabilecek deformasyon hareketlerinin önceden tespit edilebilmesi amacıyla laboratuvar

ve sahada deneylerin yapılması, deneme galerisinde de konverjans ve deformasyonların ölçülmesi gerekmektedir. Boşluğun kendini tutma süresi, deformasyon hızı ve kaya kalitesinin tünel projesinin yapılabilmesinde gereken unsurlar arasında olduğu bilgisi göz ardı edilmemelidir.

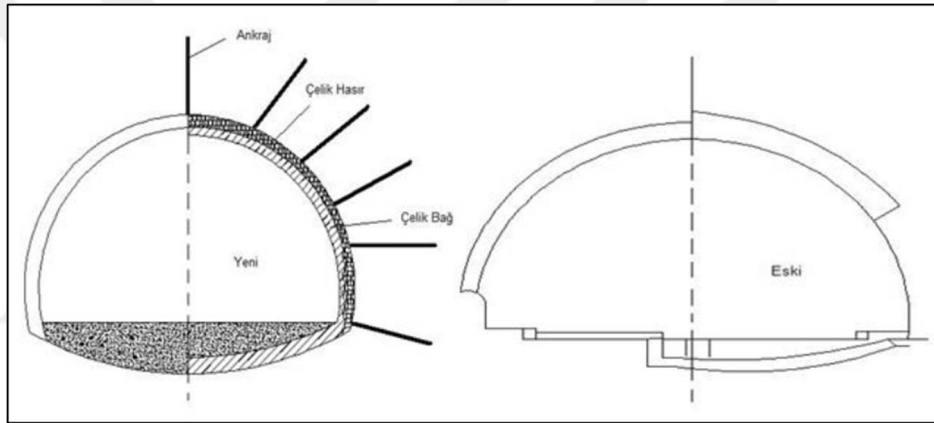
9. Destekleme, kuvvetleri bağlayıcı ve tamamlayıcı nitelikte olması gerekir. Tünel kazısında sonra büyük deformasyonların ve göçmelerin beklendiği durumlarda, destekleme direnci yaylı yükler şeklinde ve önemli boşluk yüzeyini tutacak biçimde olmalıdır. Bunu sağlayan en başarılı yöntem kısa sürede prizlenen (katılaştıran) ‘püskürtme beton’ kullanılmasıdır.
10. Destek için yapılan kaplamalar ince kemer benzerinde olması gerekir. İlk ve son tutucu destekleme tabakaları ince bir kemer benzerinde ve büküme uğrayabilecek esneklikte olması, kemer içerisinde bükülme momentlerinin oluşmasının ve bunun sonucunda oluşabilecek çekme ve kesme kırıklarının önlenmesini sağlayacaktır (Şekil 3.17).



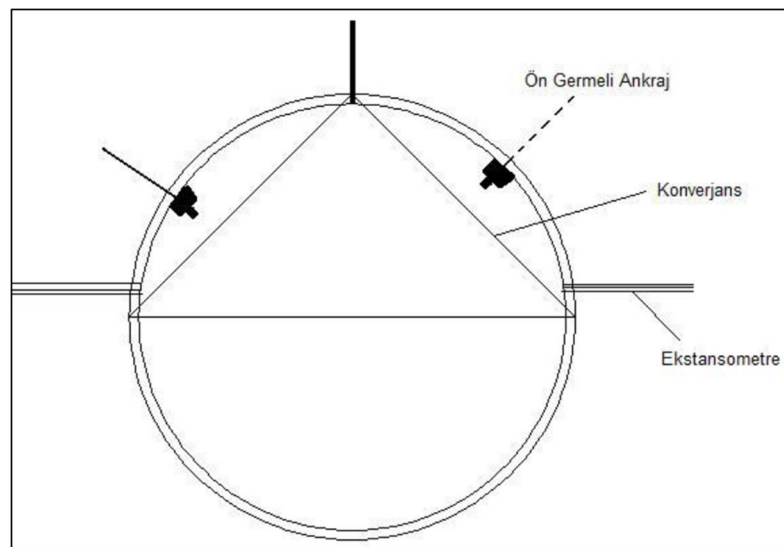
Şekil 3.17. Sağlamlaştırma kaplamaları (Emiroğlu, 2010).

11. Güçlendirme, çelik hasır, ankraj ve çelik bağlar ile yapılması gerekir. Güçlendirme, kemerin kalınlaştırılması ile değil, kemere gerekli esnekliği verecek olan çelik hasır ve bağlarla sağlanmalı, kayayı kendine taşıtmak için etkin gerilmeler ankrajlarla dağın içine aktarılmalıdır (Şekil 3.18).
12. Güçlendirmede uygun zaman ve kullanılacak araçlar yapılan ölçmelerle belirlenmelidir. Tünelin duvarlarındaki ve tüneli sarmalayan kayaçların içerisindeki deformasyon ve gerilme değerlerinin ölçülerek belirlenmesi, kayanın

çalışmalar esnasındaki davranışını gösterebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Ön varsayımlarla yapılacak bir projelendirme ile ana kayanın içerisine girilince yapılması gerekli olacak projede, çoğu önceden belirlenememiş durumların oluşması sebebiyle birbirlerinden farkları olacaktır. Bundan dolayı yeraltında oluşturulacak tünel yapılarının projelerinde, sürekli değişikliği gerektiren bir dinamizme ihtiyaç oluşmaktadır. Sistemde bütünlüğün sağlanıp zemine uyması ve de başarılı olunması için; gözleme, ölçme, deneysel çalışma, kontrol ve analiz gibi tüm mühendislik jeolojisi ve kaya mekaniği faaliyetlerinin tam olarak yerine getirilmesi mecburidir. Bu konulara dikkat edilmediği ve tüm kesitlerde aynı proje detaylarının uygulandığı bir çalışmada NATM'in kullanılmış olmadığı kabul edilmelidir (Şekil 3.19).

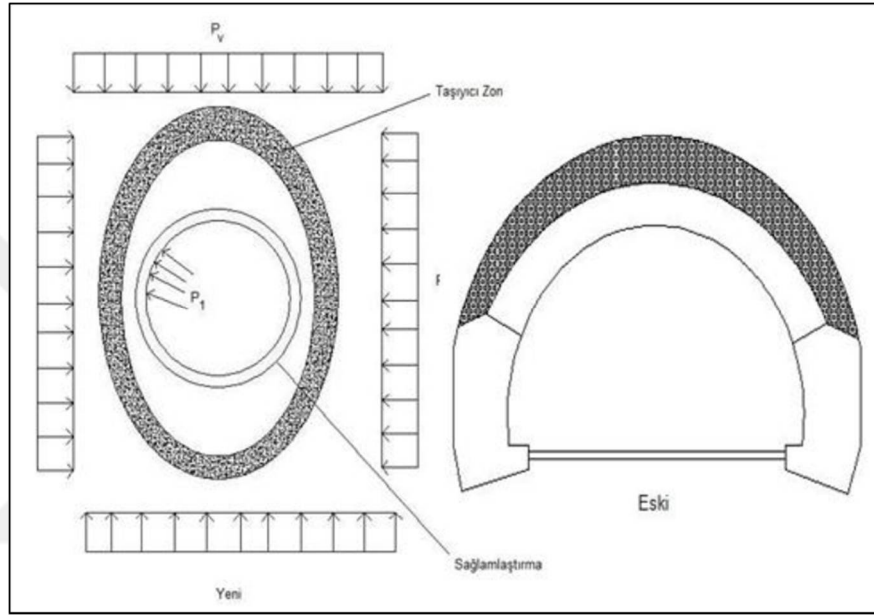


Şekil 3.18. Destekleme ekipmanları (Emiroğlu, 2010).

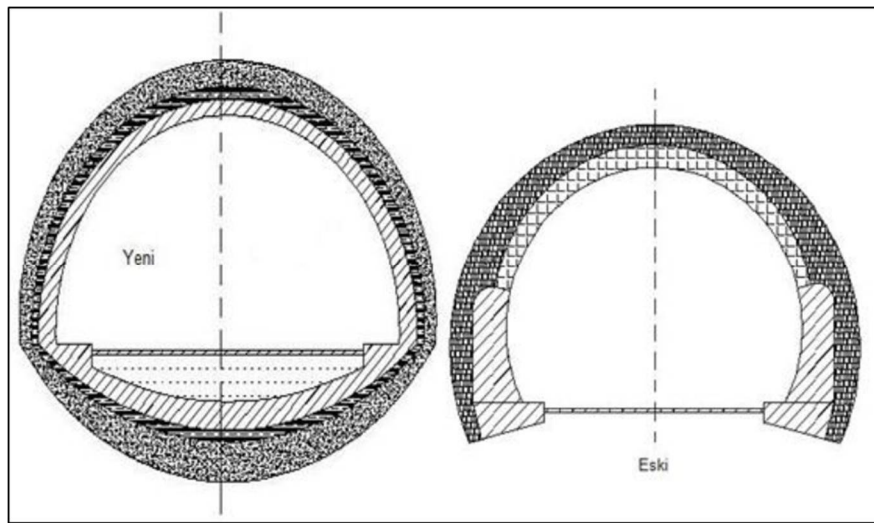


Şekil 3.19. Güçlendirme amaçlı ölçme çalışmaları (Emiroğlu, 2010).

13. Tünel, statik bakımdan taşıyıcı zon ile güçlendirme kemerinden oluşan, günümüz anlamında dairesel kesitteki yapılardır. Tünel içerisinde, boşluk galerisinde oluşturulan gerilme halkası (taşıyıcı zon) ile boşluk duvarına yapıştırılan güçlendirme kemeri birlikte çalışan bir halka yapısı oluştururlar (Şekil 3.20).
14. Güçlendirme kemeri kapak halka biçiminde yapılmalıdır. Bir halkanın statik olarak kendini tutabilir pozisyona gelebilmesi için halka kapmalarının tamamlanması mecburidir (Şekil 3.21).

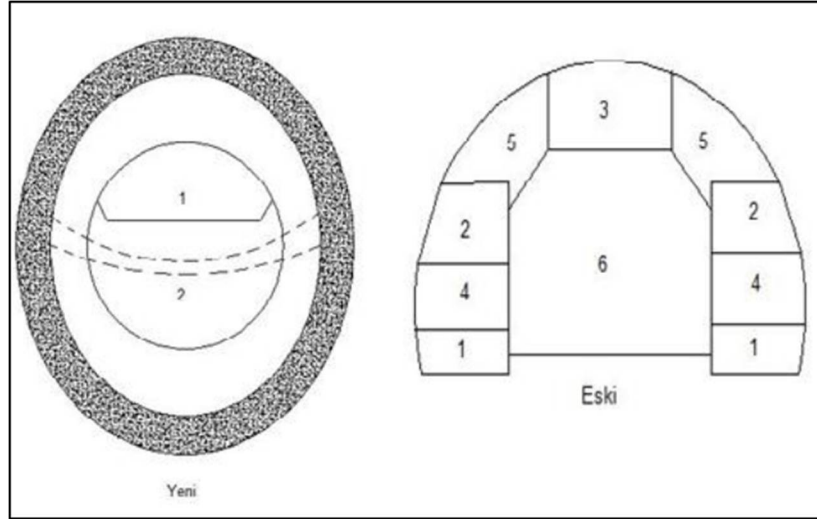


Şekil 3.20. Taşıyıcı zon ve sağlamlaştırma halkası (Emiroğlu, 2010).



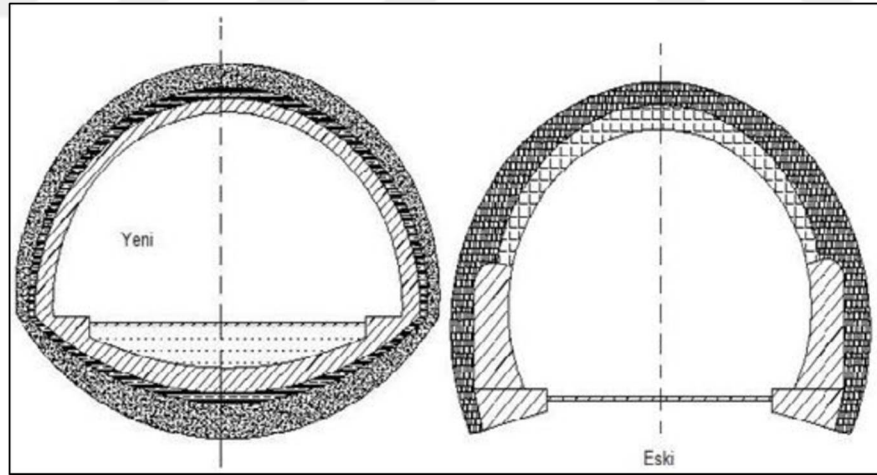
Şekil 3.21. Halka şeklindeki sağlamlaştırma kabuğu (Emiroğlu, 2010).

15. Sağlamlık için önemli olan halkanın biran önce oluşturulması gereklidir. Kayacın ikincil baskıların oluşum sırasındaki davranışı, kabuğun deformasyonlarına bağlıdır. Tam kapanmamış bir çember, taşıyıcı halka durumunda olduğu için gevşemeleri arttırarak ve boşluğu çevreleyerek onun taşıma direncini düşüren bir etken olmaktadır. Kaya içindeki deformasyonların ve plastik zon oluşumlarının zamanın bir fonksiyonu olduğu göz önüne alınacak olursa, sağlamlaştırma yayını en kısa zamanda halka şeklinde kapatmak çok olumlu sonuçlar verecektir.
16. Tünelin oluşturulduğu ana yapının kurcalanmasından mümkün olduğunca kaçınılmalıdır. Boşlukların oluşturulması primer gerilme durumunu bozarak yeni bir gerilme dağılımı oluşturmaktadır. Boşluğun biçimini ve boyutunu değiştirmeye yönelik her yeni kazı bir kez daha gerilmelerin yönünün, şiddetinin ve yerinin değişmesine neden olacak, böylece kaya dokusu giderek gevşeyecek ve kayanın taşıma direnci azalacaktır. Gerilmelerin boşalması sırasında kaçınılmaz olan boşluk içine yönelik deformasyonlar, süreksizlik yüzeylerini açmakta, rölatif ötelenmelerle kayanın dokusunu örselemektedir. Bu durum kayanın daha fazla su getirmesi ve çatlakların mekanik değişmesi bakımından da önem taşımaktadır (Şekil 3.22).
17. Yapılacak olan tünelin güvenilirliği bakımından seçilen tünel kazı yöntemi önemlidir. Seçilen yöntemin uygulanış biçimi yeraltı kaya yapısının duraylılığı (stabilitesi) ve güvenliği açısından, kayanın zamana bağlı davranışını doğrudan doğruya etkilediği için büyük önem taşımaktadır.
18. Yuvarlatılmış boşluk profilleri kullanılmalıdır. Yeraltı boşluğunun (tünel) en kesiti daire veya elips şeklinde olmalı, çıkıntı çentik ve köşeler bulunmamalıdır. Bunlar yapı duvarında ve kaya içinde gerilmelerin yoğunlaştığı bölmeler meydana getirerek, yapının durağanlılığını ve güvenliğini tehlikeye sokarlar.



Şekil 3.22. Sistemin deformasyon durumu (Emiroğlu, 2010).

19. İç kemer ince olmalı ve dış kemer ile sürtünmesiz fakat sıkı bağlı olmalıdır. İki kemerli desteklemelerde, iç kemerde istenmeyen eğilme momentlerinin oluşmaması için kaplama ince olmalıdır. Ancak dış kemerden gelebilecek olan yüklerin kesilmeye çalışmaması için dış kemerin sürtünmesiz bir şekilde ve tam yüzeyi ile sıkıca oturması sağlanmalıdır (Şekil 3.23).



Şekil 3.23. İç ve dış kabuk (Emiroğlu, 2010).

20. İlk etapta yapılan güçlendirme çalışmalarıyla kazı alanının stabilitesi sağlanmış olmalıdır. Kemer ve çevresindeki kayadan oluşan yeraltı kaya yapısının deformasyonları iç kabuğun yerleştirilmesinden önce durdurulmuş, yani ikincil denge durumu dengeli son şeklini almış olmalıdır. İkinci kemerin görevi, güvenliği arttırmak ve mimari görünümü sağlamaktır. Ancak yeraltı sularının

bulunduğu durumlarda iç kemer tüm yükleri alacak şekilde boyutlandırılmalıdır. Bu durumlarda dış kemer ile iç kemerin arası bitüm, naylon vb malzemeyle su geçirmeyecek biçimde izole edilmek zorundadır.

21. Kazı çalışmaları ve diğer çalışmalar boyunca yönlendirme, konumlandırma ve kontrol ölçmelerine devam edilmelidir. Kaya ve destekleyici elemanlardan oluşan sistemin, yapım süreci içerisindeki karşılıklı davranışların bilinmesi, deformasyonların sönümlenip sönümlenmediğinin belirlenmesi ile gerilmelerin, yer, büyüklük ve türlerinin saptanması açısından büyük önem taşımaktadır. Kaya ve beton içine yerleştirilen ölçüm aletleri yapının tamamlanmasından sonra da kontrol amaçlı kullanılmalıdır.
22. Drenaj ve dağdan kemere iletilen su basıncı boşaltılmalıdır. Yeraltı suyunun bulunduğu durumlarda yeraltında açılan her boşluk, bir drenaj yapısı gibi çalışmakta ve suyu kendisine çekmektedir. Hem süreksizliklerin mekanik özelliklerini değiştirmesi hem de çalışma ortamını güç koşullar altına sokması bakımından istenmeyen su gelişi, su boşaltan ağızların beton ile tıkanmasından sonra kemer gerisinde büyük değerlere varan su basınçları oluşturabilir. Çatlak suyu basıncının sistemi taşıma direncini düşürmesini önlemek için suyun drene edilmesi gerekir. Bu amaçla boşlukların çevresine drenaj boruları yerleştirilmelidir.

Tünelin kazı çalışmalarına başlanmasıyla oluşabilecek baskı ve deformasyon durumu sonrası tünel kaplamasının karşılaşıcağı yük miktarının tespitinde kullanılan yöntemler; ampirik, analitik ve sayısal yöntemler olarak gruplandırılır. Bunlar tek tek veya birlikte kullanılabilir.

Ampirik yöntemler; genellikle örnek zemin veya kaya üzerinde yapılan ölçümlere ve arazi verilerine dayanmaktadır. Geçmiş tünel kazıları ve deformasyon ölçümleri ile kaplama tipi seçimleri incelenerek hesaplamalarda kullanılır.

Analitik yöntemler; karmaşık şekilli kazı çalışmalarında, kayanın kırık zonlarının bulunduğu alanlarda, simetrik olmayan problemlerde ve izostatik gerilme durumuna uymayan arazi gerilme durumlarında başarıyla uygulanmaktadır.

Sayısal yöntemler; temel olarak üç modele ayrılmıştır. Bunlar süreklilik, süreksizlik ve yatak katsayısı modelidir. Süreklilik modeline uygun sayısal yöntemler; sonlu elemanlar yöntemi, sonlu farklar yöntemi ve sınır elemanlar yöntemidir. Süreksizlik modeline uygun hesap yöntemi ayrık (bölgesel) elemanlar yöntemidir.

3.3.2.1. NATM'a göre kaya sınıflaması ve tünel destekleme elemanları

Tünel yapım çalışmalarında en önemli husus olan güvenlik için yapılması gereken destekleme elemanları zeminin özelliğine göre seçilmektedir. NATM'a göre kaya sınıflamalarının belirlenmesinde izlenmesi gereken adımlar vardır. Öncelikle tünelin yapılacağı bölgedeki kayanın jeofiziksel durumunun belirlenebilmesi amacıyla sondaj çalışmalarının yapılması gereklidir. Elde edilmiş olan veriler, her kazı çalışması sonrası yapılan ayna durum haritaları ile karşılaştırılmalıdır. Proje ile belirlenmiş olan zemin karakteristikleri ile zemin kazısı sonucu elde edilen verilerin birbiriyle olan tutarlılığı incelenmelidir (Aktaş, 2009). Tünel içerisinde yapılan çalışmalar esnasında kayaç kütesinin sınıfının tespiti de üzerinde özenle çalışılması gereken bir konudur. Ortaya çıkan süreksizliklerin ve bunlar için kullanılması gereken dolgunun niteliği, su sızıntısının varlığı, kayaç mukavemeti, zemin akması, varsa fay hatlarının tünele göre konumlanması gibi verilerin kullanılmasıyla kazı çalışması yapılan ana kütle davranışları anlamlandırılır ve bunlar ışığında kayanın sınıf bilgisi ve hangi gruba girdiği belirlenir (Karaoğlan, 2002). T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü pratiğinde kullanılan NATM destek tipi seçimi ÖNORM B 2203/1994'te yer alan kaya sınıflarına göre belirlenir. Bu destekleme tiplerindeki imalat uygulamaları ise aşağıda açıklanmıştır.

- A1 Klası: A kaya tipi, zaman içerisinde kırılmaya yönelik davranış sergileyen sağlam kayalar için ifade edilmektedir. Bu sınıfta deformasyon değerleri çok küçük olabilmekte ve zamanla sönümlenmektedir. Yüzeydeki irili ufaklı kaya parçaları temizlendikten sonra sökülme eğilimi yoktur. Kayanın desteklenmeden kendini tutabilme süresi 3 haftayı geçmektedir. Devamlı olarak süren kazı çalışmalarında destekleme çalışmalarına ihtiyaç yoktur.

- A2 Klası: Deformasyonun küçük olduğu, ilerleyen zamanda kırılmanın olabildiği kayaç türleridir. Bu klasta da oluşan deformasyon hızlı bir şekilde sönümlenecektir. İhtiyaç görülmesi durumunda sadece bölgesel olacak şekilde tünelin tavan kısmında ya da yan duvarlarındaki lokal blok stabilize etme amaçlı kaya bulonlarından faydalanılabilir. Destekleme yapılmadan 3-4 gün kendini tutabilecektir.

- B1 Klası: Bu kayaç sınıfı kırılmandır. Küçük değerlerde deformasyon durumu oluşsa da hızla azalacaktır. Projede destekleme sistemleri belirlenmelidir ve bölgesel ön desteğe ihtiyacın olduğu durumlar olabilir. Desteklemenin kazıdan maksimum bir round geriden gelmesi uygundur. Destekleme yapılmadan 3-4 gün kendini tutabilecektir.

- B2 Klasi: Çok kırılğan kayaçlardır. Gerekli tahkimatların yapılmasıyla deformasyon 3-5 cm mertebesinde tutulacaktır. Desteklemenin yapılmasında gecikme ya da özen gösterilmemesi sonucunda zemin yüzeyinde gevşeme ve kopma oluşabilir. Tünel tavanında, yan duvarlarda ve aynada sistemli desteklere ihtiyaç vardır. İhtiyaç durumunda süren uygulaması yapılacaktır.

- B3 Klasi: Döküntünün fazla olduğu kayaç sınıfıdır. Parçalanmış zemin yüzeyinde dahi zeminde salınımlar görülebilir. Tünel tavanı ve yan duvarlarda sistematik çelik kuşak (iksa) uygulaması söz konusu olacaktır. Yapılan ilerlemenin uzunluğunda üst yarı kazılarında 1.25-1.50 metre, alt yarıda 3 metre ile sınırlandırılması gereklidir. Süren kullanımı yerel olarak gerekebilir. Jeolojik şartlara bağılı olarak, alt yarı aynası ile aralarındaki uzaklık 150 m'yi geçmemesi şartıyla, çalışma bölgesinde dökülen tabanı çevreleyen kemer beton imalâtına ihtiyaç olabilir.

- C1-C2-C3-C4-C5: Bu klasta yer alan kayaçlar plastik benzeri tepki veren kayaç türü diye de tanımlanabilmektedir. Kayacın yoğun gerime durumuyla karşı karşıya kalması, kabuk bırakma, burkulma ve esneme gibi plastik benzeri etki-tepki mekanizması oluştururlar. Tabanda gerekirse tahkim elemanları ve invert betonu dökülmelidir. Bu sınıftaki kayaları kendi içerisinde C1 patlamaya uygun, C2 kaya baskılı, C3 çok baskılı kayaç, C4 akışkan ve C5 şişen kayaçlar olarak beş farklı gruba ayrılmaktadır.

Tünelde kazı çalışmaları esnasında aynada kazı işlerine başlamadan önce ana kayada var olan ilk kuvvetin değışip yeni bir tepkiye dönüşeceği unutulmamalıdır. Tünel çevresinde ortaya çıkacak olan bu yeni gerilme tüneldeki stabiliteyi oluşturan ana etkidir (Vardar, 1979). Bu gerilim baskının ve deformasyonun oluşumuna sebep olmaktadır. Çalışma alanını dışardan çevreleyen ana kayadaki doğal kemerin kendini tuttuğu süre içerisinde yapılacak olan sağlamlaştırma ve destekleme çalışmalarıyla, güvenliğin sağlanması ve zeminde oluşabilecek sökümlerin önüne geçilmesi gereklidir. Kaya sağlamlaştırması; yerin altında kazısı yapılan tünelin kazı alanı içerisindeki ana kayada var olan kendini taşıyabilme özelliğinin korunarak stabilitenin yükseltilmesi amacıyla gerekli bir kayaç sağlamlaştırma elemanının (bulon gibi) yerleştirilmesi şeklinde yapılabilir. Sağlamlaştırma ekipmanlarının tam kapasiteli çalışabilmesi için kayaç malzemesinin içine yerleştirilerek kaya kütesinin bir parçası olması gerekir. Böylece kayadaki var olan direnç harekete geçirilip yardımcı elemanlarla birlikte kendini taşıyabilir hale getirilir (Aktaş, 2009). Kaya sağlamlaştırma ile kaya desteklemesi birbiriyle karıştırılmamalıdır. Kayanın desteklenmesinde ise, sağlamlaştırma elemanlarının tersine kaya kütesinin dışında yer alan çelik hasır, çelik iksa veya beton

kaplama gibi yardımcı unsurların kullanılmasıyla kayaç kütlesinde oluşabilecek hareketliliğin kontrolünü ve yönlendirilmesinin amaçlandığı uygulamadır (Aktaş, 2009). NATM uygulamasında ilk yapılan destekleme çalışmalarında kullanılan püskürtme betonu, hasır çelik ve kaya bulonları gibi unsurlar ana kütle ile beraber kompozit bir yapı meydana getirmektedir. Kayaçtan ve destek elemanlarından meydana gelen bu kompozit yapı tünel ve çevresindeki ortaya çıkan gerilmelerin ve baskının ana kaya yönünde dağılımını sağlayıp, gevşemeyle azalan dayanımın arttırılmasına yardımcı olmaktadır. Böylece deformasyonların tünel içerisinde göçük oluşumuna fırsat vermeden ya da emniyetin olmadığı bir alan oluşmadan gerçekleşmesine kontrollü bir şekilde izin verilmiş olunur (Karaoğlan, 2002). Tünel içerisinde en çok tercih edilen ana destek ekipmanları hakkında aşağıda bilgi verilmiştir.

3.3.2.1.1. Püskürtme betonu

Püskürtme beton; agrega, çimento, su ve priz hızlandırıcı katkı karışımının bir hortum yardımıyla basınçlı hava ile yüzeye püskürtülerek uygulandığı zemine yapışarak yüzeyinde örtü tabakası oluşturan betondur. Püskürtme betonun ilk uygulama örneklerinin maksimum dane boyutu 5 mm'yi geçmeyen agrega, kum ve çimentodan oluştuğu görülmektedir. Çimentolu malzemelerin dikey yönde yüzeylere uygulanabilmesi için geliştirilmiş olan yöntemlerden biri olan püskürtme beton 100 yılı aşan süreden beri kullanılmaktadır (Telford, 1996). Püskürtme betonu kullanımına 20. yüzyılın ilk yarısında başlanılmış fakat bazı teknik ve pratikteki eksiklikler dolayısıyla kullanımı sınırlı olmuştur. Ancak sistem 1950'lerden itibaren gelişim ve çeşitlilik gösteren teknolojiye paralel olarak yeni uygulama sahaları bulmuştur. 1960 yılları sonrası Rabcewicz ve ekibince geliştirilerek kullanıma sunulan NATM uygulamasında tünelin desteklenmesi amacıyla kullanılan sistemlerin en önemli unsurlarından biri haline gelmiştir (Arioğlu ve diğ., 2008). Şekil 3.24'te püskürtme betonun yüzeye Robot adı verilen makine yardımıyla yapılan örnek uygulanma gösterilmiştir.



Şekil 3.24. Püskürtme betonun uygulanması (Ankara-Sivas Demiryolu Projesi T-15 Tüneli).

Değişen zemin koşullarına uyumlu olması, yüzeye çabuk tutunması, kısa zamanda priz alarak dayanımının artmasından dolayı püskürtme beton uygulaması, çelik iksa, hasır çelik ve kaya bulonlarından oluşan tahkimat sisteminin ana elemanlarından birisidir. Püskürtme betonunu genel betondan ayıran özellikleri ise aşağıdaki gibi sıralanabilir (Arioğlu ve diğ., 2008):

- Kalıp kurulumunu gerektirmemesi ve yüksek uygulama hızına sahip olması (1-7 dakika),
- Esneklik göstermesi ve maliyet avantajı sağlaması,
- Kimyasal bir takım bileşenler kullanılarak çabuk priz alması (11-20 dakika),
- Çalışma yüzeyine yapışıp zeminin şeklini kolayca alması,
- Dayanımının kolayca artması,
- Esnek davranış göstermesi ve dayanımının kalıcı olması,
- Düşük geçirgenliğe sahip olması ve betona göre daha ince olması
- Her türden tünel kesit tiplerine uygulanmasıdır.

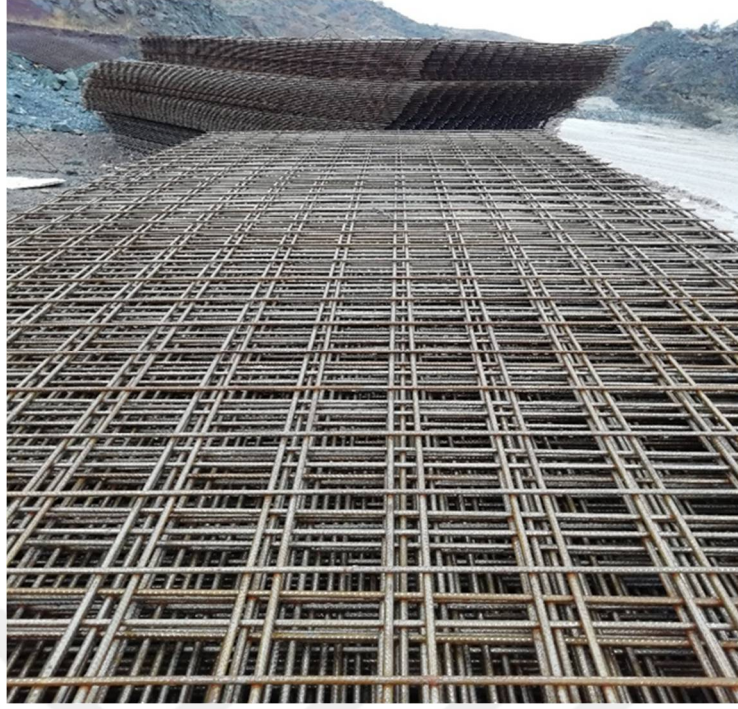
Püskürtme betonun tünel yapılarının içindeki görevleri aşağıdaki gibidir (Arioğlu ve diğ., 2008):

- Kayada kırık ve çatlakları doldurarak kayanın yerindeki tutunma dayanımının arttırmasını sağlar.

- Atıldığı yüzeyi doldurarak köşelerde düzgün yüzey elde edilmesini sağlar ve burada oluşan gerilme yoğunluğunun azalmasını sağlar.
- Püskürme beton kaya blokların yükünü çevre kayalara dağıtarak kayanın kendi kendini taşımasını sağlamaktadır.
- Kaya elemanlarının üstünü kabuk gibi kaplar hava ile teması keser ve böylece koruyucu görevi görmektedir.
- Zeminlerde oluşabilecek gevşeme (salınım) ve akmalara karşı kemerleşmeyi sağlar, dayanımı artırır ve dolayısıyla zemin basmalarını en aza indirmektedir.
- Tahkimat elemanı olarak görev yapmaktadır.
- Günümüzde tünel açma faaliyetleri yanı sıra, madencilik, hidro enerji santralleri, şevlerin stabilitesi, kanal kaplaması, hasarların onarımı şeklinde de tahkimat elemanları olma görevini yerine getirmektedirler.

3.3.2.1.2. Çelik hasır

Çelik hasır, S220 çeliğinin soğuk çekim yöntemiyle çekilmesinden sonra nervürlenip yüksek dayanım gücü kazandırılması şeklinde üretilen, bir betona tutunma yüzeyi oluşturan çeliktir. Çelik hasır, özellikle gevşek zeminlerde kazı yapıldıktan sonra çökmelerin meydana gelmemesi için kullanılan destekleme elemanlarından biridir. Çelik hasırlar kayanın ve zeminin desteklenmesi çalışmalarında püskürtme betonuyla beraber bir bütün halinde uygulanmaktadır. Kazı sistemini destekleyerek, püskürtme beton kaplamasının yüzeyi tutma oranını artırır, zeminde oluşabilecek kopmaların önüne geçer (Akçay, 2019). Kullanılması planlanan kayanın ya da zemin durumunun uygunluğuna bakılarak belirlenen çeşitli boyut ve kalınlıkta çelik hasır tipleri bulunmaktadır. Minimum akma sınırı 500 N/mm^2 olan çelik hasırların minimum çekme mukavemeti ise 550 N/mm^2 dir. A2-A3 gibi tahkimat sistemlerinde Q221/221 tipi çelik hasır, A5 tahkimat sisteminde ise Q377/Q221 tip çelik hasır tercih edilmektedir. Q221/221 tipi çelik hasırda; hasır boyu 500 cm, eni 215 cm, aralıklar arası genişlik ve en 15 cm, ağırlığı ise 3.53 kg/m^2 dir. Q377/221 tipi hasırda ise hasır boyu 500 cm, eni 215 cm, göz aralıklarının boyu ve eni 15 cm, ağırlığı ise 4.4 kg/m^2 olacak şekildedir. Hasırlarda bindirme oranları yatay ve düşey yönde 30 cm olarak belirlenmiştir (Emiroğlu, 2010).



Şekil 3.25. Çelik hasır örneği

Çelik hasır kayayı destekleyerek kayada kazı sonrasında oluşabilecek çatlakların ve kopmaların azalmasını sağlar. Püskürtme beton uygulaması sırasında basınç altında kalan çelik hasırın düşmemesi, zeminden ayrılmaması veya sarkmaması için zemine doğru bir şekilde monte edilip püskürtme beton ile sabitlenmesi gerekmektedir (Telford, 1996). Şekil 3.25'te hasır çeliğe örnek verilmiştir. Tünelin desteklenmesinde ve tahkimatlarında kullanma nedenlerini kısaca maddeler halinde şu şekilde belirtebiliriz (Nurnur, 2016):

- Püskürtme betonu prizini alıncaya kadar istenilen tutuculuk sağlanır.
- Baskı ve gerilme kuvvetine karşı dayanımın artması sağlanır.
- Muhtemel çatlamlar sonrası oluşabilecek zemin salınımların önüne geçilir.
- Bulonların sağlamlaştırma etkisinin geniş bir alana yayılmasını sağlar.

3.3.2.1.3. Çelik iksa

Çelik iksa, tünel aynasında yapılmakta olan kazı sırasında püskürtme beton priz alıncaya kadar tünel desteğini güçlendirmek, yapı bütünlüğünü korumak ve püskürtme betonda yük dağılımını sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Çelik iksa uygulaması, tahkimat yapılacak alanın kaya sınıfına göre H, I veya U profil ve kafes kiriş şeklindeki farklı seçenekler içinden belirlenebilmektedir. Ayrıca zeminin yapısı ve tünel aynasında

meydana gelebilecek deformasyonlara göre iksa aralıkları da değişiklik göstermektedir. Bu destekleme elemanları çatlakların oluştuğu kaya ortamlarında da oluşabilecek göçükleri önlemek amacıyla kullanılmaktadır. Aşırı çatlaklı, parçalı kazı ortamında çelik iksa ve ayna arasına çelik hasır veya çelik plaka yerleştirilerek kaya blokların düşmesinin ve hasara yol açmasının engellenmesi sağlanır. Çelik iksa zeminin yapısını değiştirmemekte, yapılan uygulamalar ile zeminle bir bütün halde çalışarak oluşabilecek deformasyonlar sonucu zayıflayan sisteme destek olmaktadır (Harris ve diğ., 1996). Ankara-Sivas Demiryolu Projesi kapsamında yapımı devam eden T-15 Tüneli'nde uygulanan kafes iksa Şekil 3.26'da gösterilmiştir.



Şekil 3.26. Ankara-Sivas Demiryolu Projesi kapsamında yapımı devam eden Tünel-15'te uygulanan kafes iksa.

3.3.2.1.4. Kaya bulonu

Kaya bulonu, kayaçlardaki baskı kuvvetine karşı koyabilmek ve bu kuvveti ana kaya yönüne iletilmesi sağlamak, salınım yapma eğilimindeki zeminin dayanım gücünü yükseltmek ve böylece kaya içerisinde üç eksenli gerilim durumu oluşturabilmek amacıyla ana kaya içerisine sürülen demir çubuklara denilmektedir (Nurnur, 2016) (Şekil 3.27).



Şekil 3.27. Kaya bulonlama çalışmalarında tercih edilen içlerinde delik bulunan nervürlü demir çubuklar (Nurnur, 2016).

Tünel kazı çalışmaları esnasında duvarda ya da tavanda kopabilecek durumdaki kayaların kopmalarını önleyen, çalışma emniyetinin sağlanmasına katkı sunan araçlardır (Karaoğlan, 2002). Kaya bulonlarının görevleri aşağıdaki gibidir:

- Kayayı sağlamlaştırarak kazı ile oluşan baskı gerilmelerini kayaya taştırır.
- Ana kayaya baskı gerilmelerini iletir.
- Kayada bulunan süreksizliklerin sürtünme ve dayanım dirençlerini arttırır.
- Kayadaki üç eksenli gerilme durumunu korumak amacıyla zemine monte edilir (Önalp, 1983).

Kaya bulonları, tüm destekleme elemanlarını birbirine tutturan, kayaların birbirinden kopmalarını ve dökülmelerini önleyen, tünelin en önemli ana destek elemanlarından biridir. Kaya bulonları, tünelin tavanında ve yan duvarlarında delikler açılarak bu deliklerin içine yerleştirilir ve sonrasında çimento enjeksiyonu ile delgi dolana kadar enjeksiyon yapılır. Kaya bulonu plakası ve somunu ile kayaya sabitlenir (Karayolları Teknik Şartnamesi – Yol Altyapısı, Sanat Yapıları, Köprü ve Tüneller, Üstyapı ve Çeşitli İşler, 2013). Bu bulonların boyu, çapı, uzunluğu ve sayısı tünelin geoteknik durumuna bağlı olarak değişkenlik gösterir. SN bulon, PG bulon ve IBO bulon gibi kaya bulonu türleri bulunmaktadır. Bunlardan PG bulonda, oluşturulan delik içersine ilk olarak bulon yerleştirilir, sonrada enjeksiyon ile doldurulur. SN bulonda ise PG bulonun aksine, bulon deliğe yerleştirilmeden önce açılan delik enjeksiyonla doldurulduktan sonra bulon yerleştirilmektedir. Kaya bulonu ve delici uçtan oluşan IBO bulon, içersindeki boş kısımdan deliğe doğru enjeksiyonun basılması şeklinde uygulanmaktadır. IBO bulonlar delme işleminden sonra dışarıya çıkartılmamaktadır

(Karayolları Teknik Şartnamesi – Yol Altyapısı, Sanat Yapıları, Köprü ve Tüneller, Üstyapı ve Çeşitli İşler, 2013). Bulonlar gerilmemiş, mekanik gerilmeli, uçtan yapışan olmak üzere üç tipte gruplandırılmaktadır (Polat, 2010).

3.3.2.1.5. Süren

Sürenlerin uygulanmasında amaç, tünel aynasında kazıya başlanılacak alanın daha önce desteklenerek emniyete alınmasını sağlamaktır. Enjeksiyonlu ön sürenler tünel aynasında kazı çalışmaları sırasında zemini destekleyici, iyileştirici ve ortam zemininin dayanımını arttırıcı özelliğe sahiptir. Kazı yapılmadan önce tünelin ilerleme yönünde, destekleme yapılacak alandaki kayanın sınıf durumuna bakılarak projede belirtilen aralıklarla çakılır. Bunlar 32 mm veya 51 mm çapında 6m-9m uzunluğunda borulardır. Tünelin ayna kesitinde oluşacak olan kesme gerilmelerini de kontrol amacı ile kullanılmaktadır. Bu destekleme işlemi ayna imalatı ilerledikçe süren boyuna bağlı olarak belirli bir bindirme boyu sağlanacak şekilde tekrarlanır.

3.3.2.1.6. Ayna çivisi

Tünellerdeki kazı çalışmalarında genellikle açıkta kalan tek kısım tünelin kazı yüzeyi yani ayna olmaktadır. Yeteri kadar sert olmayan ve salınımı fazla olan zeminlerde yapılan tünellerin, tünel aynasında stabilitesini korunması için aynada çivinin kullanılması yoluna gidilmiştir. Destekleme elemanı olan ayna çivisinin uygulaması; kazı aynası yüzeyine açılan deliklerin, uygun donatı ile doldurulup, açılan deliğin enjeksiyonla doldurulup sağlamlaştırılması şeklinde olur. Tercih edilen donatılar nervürlü çelikten çiviler ya da dayanımı yüksek fiberglas olmaktadır. Zeminin ihtiyaç duyduğu destek tipine göre sayıları değişmektedir. Fiberglas ve nervürlü ayna çivilerine ait örnekler Şekil 3.28'de gösterilmektedir. Bu uygulama ilk olarak 1980'lerde İtalya'daki geniş kesitli tünel aynalarında uygulanmıştır (Denek, 2003).



Şekil 3.28. Fiberglas ayna çivileri. (Nurnur, 2016)

3.3.2.1.7. Şemsiye kemer (Umbrella Arch)

Kazı çevresini saran yapısından dolayı şemsiye olarak adlandırılabilen kemer (umbrella arch) uygulaması, yüzeyde oturmaların en düşük düzeyde olması amaçlanan tünellerin yapım çalışmalarında sıklıkla tercih edilen bir uygulama olup, genellikle 101.6 mm çapında uygulanarak diğer sürenlere göre daha etkili bir yöntem olmaktadır (Karayolları Teknik Şartnamesi – Yol Altyapısı, Sanat Yapıları, Köprü ve Tüneller, Üstyapı ve Çeşitli İşler, 2013). Şemsiye kemer uygulamasıyla kazı çalışmaları esnasında tünelin tavan kısmından gelebilecek baskıları karşılamak amacıyla aynanın tavanına 9 ile 12 m uzunluğa sahip 114 mm çapında çelikten borular çakılmaktadır. Bu şemsiye görevi gören borular zemin ile yatayda 6-8 derece açığa sahip konumda, 130 mm çapındaki deliklere geçirilir (Emiroğlu, 2010). Bu yöntemle kazısı yapılan tünelin üstünde herhangi bir yapının varlığı söz konusu olduğunda, normal tünel uygulamalarından farklı olarak sadece tüneldeki halka yapının dayanımının artırılması değil, tünel çevresinde bulunan yüzey yapılarının da herhangi bir şekilde etkilenmemesi sağlanmaktadır. Uygulamalarda genelde 4" (101,6 mm) çapı olan, uç kısımları özel olarak sivriltilen borular tercih edilmektedir. Önce bu borulara uygun çap ve uzunluktaki delikler uygun makinalar kullanılarak proje detayında verilen aralıklarla açılır. Sonrasında deliklerin içerisine itilen boruların ağızlarından enjeksiyon basılarak kapatılır. Çevresinin kireç ile sıvanması suretiyle de yalıtım sağlanır. Yapılan uygulama ile tünelde aynanın ve çevre kayaçların dayanımı artırılmakta, böylece zeminde oluşabilecek oturmalarının önüne geçilmeye çalışılmaktadır. Ankara – Sivas Demiryolu Projesi T-15 Tüneli'nde tünel aynasına dik bir şekilde uygulanan, 9 m boyutlarında şemsiye kemer (umbrella arch) Şekil 3.29'da gösterilmektedir.



Şekil 3.29. Tünel aynasına uygulanan sürenler Şemsiye kemer (Ankara-Sivas Demiryolu Projesi T-15).

3.3.2.1.8. Tünel iç kaplama (Kemer) betonu

Su yalıtımı sağlayabilmek, tünel içerisindeki farklı elektromekanik (ışıklandırma-hava tahliye sistemleri-sinyalizasyon-haberleşme vb.) donanımlara alt yapının oluşturulabilmesi amacıyla ve yapı kullanım ömrü boyunca tüneldeki stabiliteye destek olması sistematigi ile ikincil destek türü olan tünelin özelliğine göre 40-68 cm kalınlığında değişen C-25/30 şeklinde olarak uygulanan iç kaplama (kemer) betonudur. Tünel destek elemanları içerisinde en son uygulanan iç kaplama betonudur. Teknik anlamda hiçbir taşıyıcı özelliği olmayan iç kaplama betonu, tünel çeperlerindeki deformasyonlar sönümlendikten sonra uygulanır. Her ne kadar taşıyıcı özelliği olmadığı düşünülse de tünel güzergâhındaki zayıf zeminlerde tünele etkiyen yüklerin bir miktarını karşıladığı düşünülmektedir.

Nihai kaplama betonun uygulanması, tasarlanan boyuna güzergâh kotlarında ve enine deyer değerlerine uygun tünel içinde iki kenarda da olacak şekilde yapılan kirişlerin üzerinden yürütülen bir ray sistemime montajı yapılmış çelik kalıp yardımıyla betonun dökülmesi şeklinde uygulanır. Üzerinde beton kalıp hareketinde kullanılacak raylar, yapılan hassas ölçmeler sonrasında zemine apliance edilmesi gerekir. Bu konumlandırmanın yapılmasından tamamen harita ölçüm ekibi sorumlu olmalıdır. Projedeki km ve kotlara uygun olarak yerleşmesi için gerekli ölçüm aletleri ile kalıbı yönlendirerek konumuna oturtturulmasını sağlarlar. Şekil 3.30'da tünel iç kaplama

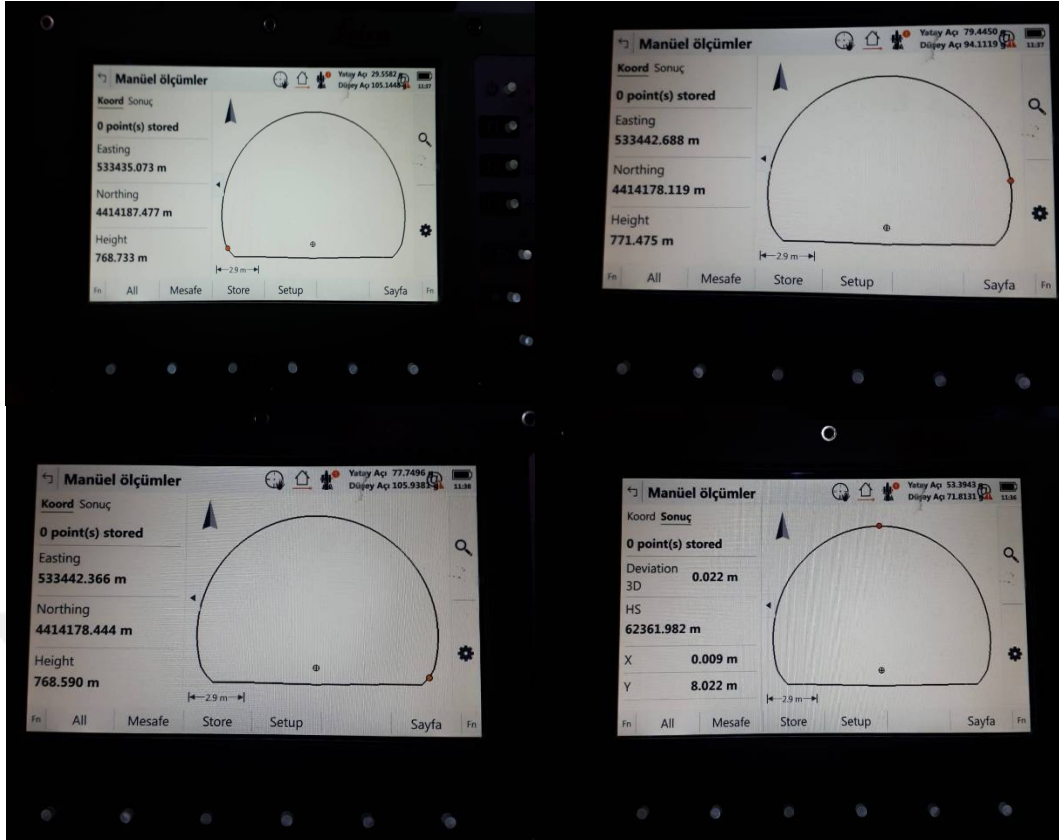
(kemer) betonuna ait elik kalıp ve Şekil 3.31’de bu elik kalıbın projeye göre konumuna oturturulması sonrası ölüm cihazındaki kot-koordinatlara ait görüntüler verilmiştir.



Şekil 3.30. Tünel i kaplama (kemer) beton kalıbı (Ankara-Sivas Demiryolu Projesi T-15 Tüneli).

Tünel kullanımı süresince, nihai (kalıcı) kaplama aşağıdaki görevleri üstlenecektir:

- Kalıcı olarak kaplama özelliğinin devamlılığının sağlanması
- Çevresel etkilerin karŐılanması
- Tünel işletme açıklığına daimi olarak uyumun sağlanması
- Sabit kalıcı st yapı hizmetleri ve taşınabilir ekipmanlara destek sağlanması
- Su geçirimsizliğinin sürdürülmesi



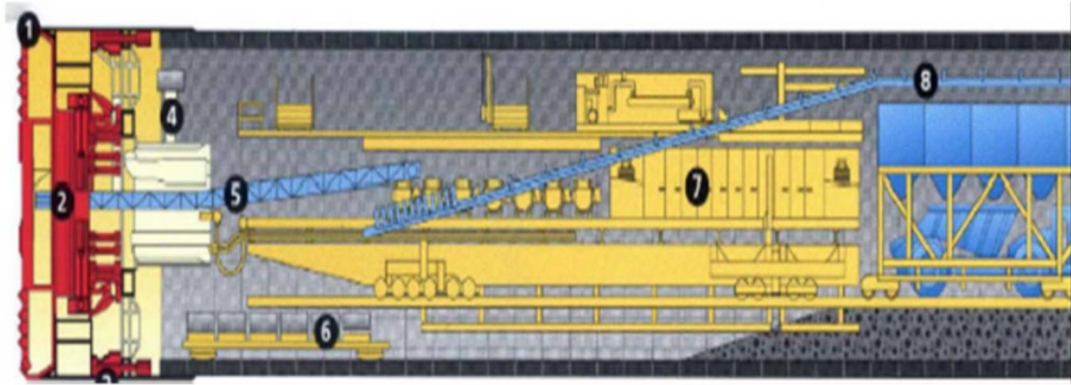
Şekil 3.31. İç kaplama betonu için çelik kalıbın konumuna yerleştirilmesi çalışmasında ölçüm aletindeki kot-koordinat görüntüleri.

3.3.3. Tünel kazma makinesi (Tbm)

Yeraltı yapılarının önemi ve yapılan yatırımlar teknolojiye gelişmelerle birlikte her geçen gün daha da artış göstermektedir. Kent merkezlerinin ve büyük şehirlerin elektrik, su, kanalizasyon, telefon, doğalgaz gibi altyapı ihtiyaçları ile ulaşımın sağlanmasına yönelik metro tünellerinin yapılmasında, çevrenin ve yeryüzündeki yapıların zarara uğramaması amacıyla bu yöntemin tercih edilmesi git gide önem kazanmaktadır. Projeye başlamakta harcanan parasal değerlerin fazla olduğu bu yöntemde, kullanılan tünel açma makinelerinin tam cephe çalışma kabiliyetinin zeminde oturma gibi olumsuzlukların önüne geçmesi, ses ve titreşimin minimum olması ve hız açısından üstünlük göstermesi bu yöntemin tünel açma çalışmalarında kullanımını arttırır hale getirmiştir.

TBM, kesici kafası, itmenin yapılabilmesi için silindirler, artikülasyon, gripper (tutucu ayak), keski kafasının motorları, hidrolik ve elektrikli malzemeleri bulduran yedek rayları, konveyörler ve havalandırma sistemleri şeklinde birçok mekanik ve elektrikli elemanlardan oluşan tünel kazısını tam cepheli olarak yapan makinelerdir.

Fransız Marc Brunel 1825 yılında Thames nehrini yeraltından geçilebilmek amacıyla yapımına başladığı sualtı tünel inşaatının çalışmalarında, günümüzdeki tünellerde kullanılan yapım makinalarının (TBM) ilki sayılabilecek türde tünel kazı aracı kullanılmıştır (Polat, 2010). Amerikalı bilim insanı Charles Wilson, 1851 yılında tünellerde çalışmayı hızlı ve kolaylaştırmayı amaçlayarak kazı makinesi yapmış ve bu makineye, modern sayılabilecek tarzda bir TBM'nin özelliklerini yerleştirmesiyle, tünelde delik oluşturarak çalışan ilk makine olma özelliğine sahip olmuştur.



Şekil 3.32. TBM boykesiti (Özgen, 2013).

Şekil 3.32'de 1 numara ile gösterilen parça kaya kesici başlık, 2. enerji ünitesi, 3. itici silindir, 4. erektör, 5. konveyör 1, 6. Segment tutucu, 7. elektrik kontrol takımı, 8. Konveyör-2 olarak adlandırılmaktadır (Özgen, 2013). TBM'ler kazı, ilerleme ve yüzeye tutunabilme, çıkan kazıyı toplayabilme ve destekleme sistemleri olmak üzere 4 adet çalışma sisteminden oluşmaktadır. Kazının yapılmasındaki sistem parçaları kazı aletlerinden ya da kesici disklerle kazı sonrası ortaya çıkan yığılı toprak için toplayıcı kürek, kesici disklerinin monteli olduğu delikler ve kesici kafanın bulunduğu, kırıcı-kesici disklerin kazı yüzeyindeki malzemenin türüne ve niteliklerine göre değişebilen sayıda yer aldığı bir sistemdir. İteleme ve zemine tutunabilme sistemi, TBM'nin performansında belirleyici olan unsur olup bu sistem hidrolik pistonların yardımıyla ileriye doğru itme kuvvetini oluşturarak kazıda ilerlenmesini sağlamaktadır. Pasa taşıma sistemi ise TBM tiplerine göre değişkenlik gösteren, fakat genel olarak kesici kafadaki kovalardan boşaltılan kazı malzemesinin helezon konveyör ile taşınmasının ardından bant konveyör veya vagonlarla dışarı atılmasını sağlayan sistemler bütününden oluşmaktadır. Sert zemin koşullarında hiçbir desteklemeye ihtiyaç duyulmamaktadır. Kayaç türünün yumuşak ve dayanıksız olduğu çalışma zeminlerinde kayacın kendini tutabilme süresi

azaldığından ve böyle durumlarda oluşan parçaların düşmesi riskini önleyebilmek amacıyla tünel tavan kısmında, kesici kafanın arka tarafına ve yan kısımlarına doğru uzanan destek kalkanın gerekli olduğu TBM destek sisteminde zeminin daha kötüleştiği çalışma ortamlarında makinenin tamamen kapanmasını sağlayan silindir biçiminde kalkan bulunmaktadır (Maidl ve diğ., 2008).

Bir nevi tüneller için yapım fabrikası niteliği olduğu kabul edinilebilen bu makinalarda, yapılması istenilen boyutlarda tam daireyi oluşturabilecek şekilde bir ring içinde tünelin yapılabilmesi için ihtiyaç duyulan ekipmanların hepsini bir bütün içerisinde bulundurmaktadır. Tünel yapım faaliyetlerinin en önemli unsurlarından olan ölçme uygulamaları ise TBM makineleriyle tünel açımı sırasında; tünel makinelerinin (TBM) yönlendirilebilmesi, tünelin stabilizesinin takibi ve destekleme için uygulanacak kaplama çalışmaları için gereken elemanların imalatının ölçme çalışmalarıyla kontrol edilmesi olacaktır (Butkuş ve diğ., 1999; Ünlütepe, 2003).

TBM makineleriyle tünel açımı sırasında uygulanacak olan ölçme çalışmaları aşağıdaki gibidir.

1. Tünel Makinesinin yönlendirilmesi:

- TBM'nin başlama konumunu alması,
- Tünel içerisinde ikincil bir ölçüm sisteminin kurulması,
- Tünel içi en kesitlerinin alınarak takip sisteminin oluşturulması,
- Tünel inşaatının tamamlanması, yeni ölçüm sisteminin oluşturulması ve tünel içi en kesitlerinin güncellenmesi,

2. Tünel stabilitesinin izlenmesi:

- Tünel çalışmalarından etkilenebilecek yapılarda deformasyon ölçümleri
- Tünel içerisindeki deformasyon düzenli olarak ölçümleri

3. Eğer gerekli ise tünel içerisinde montajı yapılacak destek ve kaplama ekipmanlarının imalat çalışmalarının ölçümlerle kontrol edilmesi:

- Fotogrametrik ve geleneksel yöntemler

3.3.4. Aç – Kapa tünel açma yöntemi

Genel olarak demiryolu tünel projelerinde güzergâhı kara yolu yapılarının altından geçirilebileceği gibi yer yüzeyine yakın kısımların altından da geçebilmektedir. Taşıtlar için yapılan yolların çığ tehlikesinden korunması amacıyla çığ tünellerinin, kanalizasyon tünellerinin, içme suyu tünellerinin ve alt geçitlerin yapım çalışmaları ise

açık sahada yapılıp sonrasında üzerinin kapatılması şeklinde, basitleştirilmiş ve maliyet açısından avantajlı bir yapım yöntemi olarak uygulanabilmektedir. Aç – Kapa tünel açma yöntemi tünel üstü örtü kalınlığının 35 metrenin altında kaldığı durumlarda uygulandığı gibi zeminin riskli olması nedeniyle normal tünel çalışmalarına uygun olmadığı durumlarda eğer uygun şartlar sağlanıyorsa aç kapa yapılarak riskli bölge geçilecek şekilde tercih edilebilir. Aç-Kapa yöntemi, genellikle 10 m taban kazısına kadar uygun bir biçimde yapılabilmektedir. Bu yöntem, kapalı saha tünellerinin yapımına kıyasla daha ekonomik ve uygulaması kolay olan çalışma yöntemidir. Ancak kent merkezleri gibi alanlarda, trafiğin engellenmesi, birtakım rahatsızlıkların verilmesi, gürültü kirliliğinin olması ve kazı yakınlarında bulunan temellerin korunması gerektiğinden pahalı kazık sistemleri gerektirmesinden dolayı çokta tercih edilmez. İnşaatinın yapım çalışmalarındaki aşamalar ve yöntemler yeryüzünde yapılan farklı inşaat çalışmalarıyla hemen hemen aynı olan bu yöntemde de yapılan ölçüm çalışmaları yine yerüstü yapılarında ihtiyaç duyulan yöntemlerle benzerlik gösterirler.

Yöntemin uygulanışında öncelikli olarak kazının alanının yanlarındaki boş kısımları, içerisinde demir ve beton bulunduran kazıklarla ya da beton duvar perdesiyle desteklenmesi sonrası kazı çalışmalarına başlanır. Çalışma alanında yeraltı suyunun zemine yakın olması durumunda yeraltı su seviyesinin düşürülmesi veya kanallar aracılığıyla drene edilip yüzeyden uzaklaştırılması sağlanır. Kenarlarda bulunan ayak kısımlarının yapılması normalden farklı bir uygulama değildir. Normal şartlardaki açık sahadaki duvar inşa edilmesi standartlarına göre yapılmaktadır. Tavan bölümünün oluşturulmasında uygun mesafe varsa bir kemer oluşturulma yoluna gidilir. Kemer yapısı da açık alanda oluşturulduğu için farklı bir etkiyle karşılaşmamaktadır. Ama yeryüzünden gereken mesafe bulunmuyorsa betonarmeden yapılmış bir tavanın oluşturulması yolu seçilebilir. Tavanın kaplaması tamamlandıktan sonra kazılan kısım yeniden doldurularak eski haline getirilir Aç-kapa tünel yapım yöntemlerinin diğer yöntemlerle olan önemli bir farkı da, tavan kısmında oturma ya da göçme gibi durumlarla karşılaşmamasıdır. Bu sayede çevredeki yapı ve yapılaşmaya zarar verilmeden yapılabilmektedir. Ayrıca başka yöntemlerde gerektiği şekilde ve yeterlilikte yapılamayan yalıtım çalışmaları bu yöntem ile rahatlıkla yapılabilir (Özer ve diğ., 2008).



Şekil 3.33. Aç-Kapa tünel çalışması örneği (Ankara-Sivas YHT Projesi Aç-Kapa 4)

3.3.5. Del – Patlat tünel açma yöntemi

Del-patlat yöntemi ile yapılan kazılarda öncelikle tünel kazılarının en uç noktası olan tünel aynası yüzeyine patlayıcı maddelerin yerleştirileceği delikler belirlenen aralıklarla delinerek doldurulur. Kuyular ve delikler destekleme elemanları olan kaya bulonları içerisinde de oluşturulabilir. Oluşturulan delikler projede belirtilmiş olan sınıf ve miktarda maddeler yerleştirilir. Ardından patlatma operasyonu kontrollü bir şekilde yapılır. Patlatma işlemi sonrası ortaya çıkan gazlar hava fanları aracılığıyla tahliye edilerek, ortaya çıkan pasanın temizlenmesine başlanır. Kopmamış kaya parçaları kırıcı makineler yardımıyla sökülerek ön tahkimatlar yapılır (Özer, 2011).



Şekil 3.34. Del – Patlat uygulamasında patlayıcıların yerleştirilmesi.

Tünel zemin durumunun iyi yani sağlam kayaç yapısına sahip ve kesiti 8 metreden küçük olacak şekilde inşa edilecek tüneller, del-patlatma yöntemiyle tek aşamada tam kesit olarak açılabilir. Del-patlat yöntemiyle amaçlanan durum minimum patlayıcının kullanıldığı ve minimum delikle en iyi verimin alınması istenmektedir. Bunlarla birlikte;

- Patlatma sonrası parçanın taşınabilir boyuttaki parçalara ayrılması
- Patlamayla birlikte sarsıntı, toz bulutu ve gürültü gibi olumsuzlukların en az olması
- Patlatmanın tünel içerisinde tamamlanmış kısımlara ve tünel çevresindeki mevcut duruma zarar vermemesi
- Tünelin içindeki ve çevresindeki kazı alanı dışındaki kayaçların mümkün olan en az seviyede etkilenmesiyle gerekebilecek desteklemenin minimum düzeyde tutulması
- Patlatma yapılan aynada mümkün olduğunca pürüzlü bir yüzeyin bulunmaması istenir (Osmanoğlu, 2007).

Del-patlat çalışmalarında dikkate alınması gerekli olan, özellikle de son zamanlarda daha çok ön plana çıkan durum, enerjinin bir miktarının hiçbir şekilde kullanılmadığından sismik, ısı, ışık ve ses enerjisi şeklinde harcanıyor olmasıdır. Bu durum beraberinde sarsıntıların oluşması, taş parçalarının fırlaması, hava şoku ve toz bulutu oluşumu gibi dezavantajları oluşturmaktadır. Bu olumsuzlukların da giderilmesi gerekliliği doğmaktadır (Hüdaverdi ve Kuzu, 2005).

Del-patlat yöntemiyle tünel yapım çalışmalarının sağladığı avantajlar:

- Uzun zamandır uygulamaların yapılmasının verdiği bilgi ve tecrübe,
- Gereken malzemelerin ve aletlerin ekonomik uygunluğu,
- Tüm kaya türlerinde uygulanabiliyor olmasıdır.

Del-patlat yöntemiyle tünel yapım çalışmalarının dezavantajları:

- Patlatma sonrası ortaya çıkan toz bulutunun dağılmasının beklenmesi gibi nedenlerden dolayı zamandan kayıp yaşanır.
- Aşırı sökümler önlenemediğinden tünel kazı çapının ve şeklinin korunması neredeyse imkânsızdır.
- Gösterilen tüm çaba ve özene rağmen, patlama sonrası salınımların ortaya çıkması önlenememektedir.

3.3.6. Batırma tünel açma yöntemi

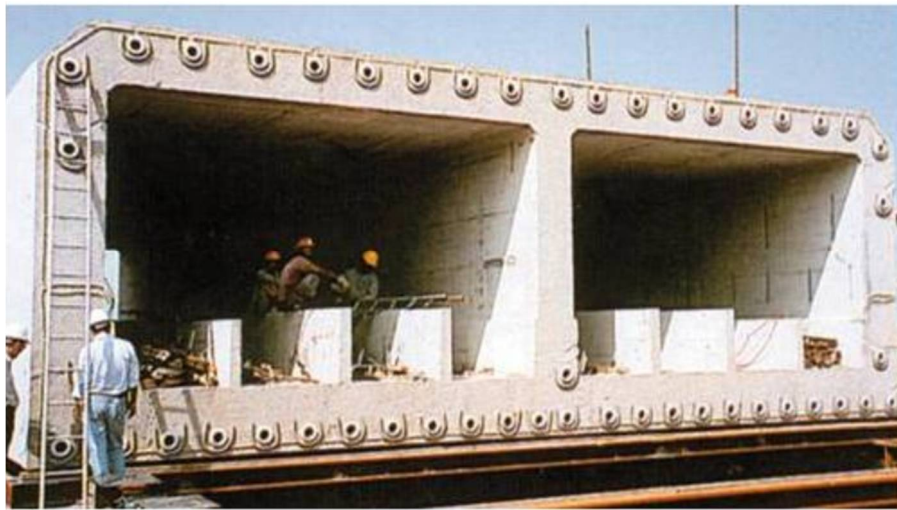
Tünel yapım uygulamalarından batırma yöntemindeki ölçme çalışmalarında, diğer tünel açma metotlarında kullanılan ölçme yöntemlerinden farklı olarak hidrografik ölçümlerine ve GNSS ölçmelerine de ihtiyaç vardır. Bu yöntemde kritik adım, tünel güzergâhında deniz dibi haritalarının oluşturulması, tabana yerleşecek tüpler için konumlanacağı kanal bölmelerinin hazırlanabilmesi amacıyla yapılan ölçüm faaliyetleri ile tabana indirilen tünel tüplerinin ölçümlerle su tabanındaki konumuna tam olarak yerleştirilebilmesidir. Karakteristik olarak batırılmış tünel (IMT) planı kanalların ve kanal tarzındaki doğal engellerin alttan geçmede en kısa yol olarak kabul edilebilir.

Deniz dibindeki tüp yerleşim alanının kazısı ve hazırlanması ile batırılan tüplerin konumu akustik konumlandırma sistemleri aracılığıyla eş zamanlı olarak takip edilir ve gerekli düzeltmeler ise hidrolik pistonlar kullanılarak yapılır. Bu amaçla ultrasonik ses dalgalarının kullanılmasıyla su dibi derinliğinin ölçülmesini sağlayan ve dikey biçimde su ortamındaki nesnelerin yüzeye olan mesafelerini belirlemek için Echo Sounder'ın gönderdiği ses dalgalarını algılamak üzere tüplerin üzerine ses algılayıcı cihazlar konumlarının belirlenmesi için yerleştirilir. Akustik algılayıcının çalışma mantığı, Echo Sounder'ın gönderdiği sinyali aldığı zaman bunu tanıyarak konumunu belirtmek şeklindedir. Konum düzeltme işlemleri diğer akustik algılayıcılardan gelen konum bilgilerini de göz önüne alarak yapılır. Gerekli konum düzeltmeleri dalgıçlar ya da özel tasarlanmış uzaktan kumandalı denizaltılar kullanılarak yapılmaktadır. Echo Sounder'ın konumu ise RTK-GNSS ölçmeleriyle belirlenmektedir (Holt, 2000; Ünlütepe, 2003). Batırılmış tünellerin, yaygın bir şekilde kullanılması 100 seneden beri devam etmektedir.

Dünya genelinde 150'den fazla batırma tüneli inşa edilmiş, bunların 100 kadarı kara yolu ve demiryolu geçişlerinin sağlanması için yapılmıştır. Diğerleri ise suyun aktarılması ve elektrik hatlarının dağıtılması için yapılmış tünelleridir. Tamamlandığı zaman, batırma tünellerinin kullanılış biçimi olarak diğer tünellerden herhangi bir farklılığı yoktur. 1893 yılı içerisinde ABD Boston'da atık suyun uzaklaştırılması sistemi için kullanılan teknoloji, 1910 yılında büyük boyutlarda Michigan Central'da yapılması istenilen demiryolu projesi için su engeli olarak aşılması gereken Detroit nehrinin geçişinde kullanılmıştır (Butkus, 1999, Ünlütepe, 2003). Batırma tüneli genel olarak dört aşamada inşa edilir:

- Prefabrik tüp imalatı
- Yerleşim kanallarının oluşturulması,
- Su dibine batırmanın yapılması ve tüplerin birleştirilmesi,
- Dolgularla tüplerin sağlamlaştırılması.

İnşaat çalışması ile ilgili örnek üzerinden bilgi vermek istenirse, standart bir yöntem olarak, 30 m'den az olan derinlikler için taraklama ve sonra gömülme biçiminde yapılan çalışmalar, 30 metre ile 50 metre arasında değişen derinliği olan deniz tabanına kazılan hendek içerisine plak parçalarının uygun kısmının gömülmesi ve üstte kalan kısımların da gerekli dolgu malzemesiyle örtecek şekilde yapılır. Son dönemlerde, Parsons Brinckerhoff beton tüplerin yüzen dubalar üzerinde imalatı yapılabilecek biçimde yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Böylece önceden ırmak veya kanal alanında beton dökümünün yapılması sureti ile uygulanan imalat yöntemi kaldırılmış ve bu sayede maliyet açısından %20–30 oranlarında bir tasarruf edilmesi sağlanmıştır (Satr, 2007).



Şekil 3.35. Batırma tüneli inşası (Satr, 2007).

Dubalar su üzerinde yüzdürülerek tüpün yerleştirileceği kota gelince duvarlar batırılır. Hareket ettirilebilmesinin kolay olduğu tüpler dubasız bir biçimde yüzdürülür ve dış cepheleri kaygan ve su geçirimsiz duruma getirilmesinden sonra batırılır (Şekil 3.36). Suya batırılan tüp, bir önceki tüple birleştirilir (Şekil 3.37).



Şekil 3.36. Tüplerin yüzdürülmesi (Satır, 2007).



Şekil 3.37. Batırma tünel yöntemiyle inşa edilmiş tünel (Satır, 2007).

3.4. Tünel Kazı Çalışmalarının Yönlendirilmesi

İnşaat teknolojilerindeki teknik gelişmelere paralel bir şekilde daha önceden kazanılmış olan uygulama pratikliği ile ihtiyaçlara, maliyete ve diğer etmenlere bağlı olarak tünel kazılarının yöntem ve ölçüm teknikleri de gelişmiştir. Tünel yapım faaliyetlerinde, yapılması planlanan tünel güzergâhının topografik durumu, zeminin özellikleri ve yapılması planlanan tünel geometrisi gibi çeşitli ve önemli faktörler

değerlendirilerek tünel açma yöntemi ile kullanılacak ölçme yöntemleri belirlenmektedir. Tünel ölçmeleri üst yapı projeler için gerekli ölçümlerle benzerlik gösterse de kendine has ölçü yöntemleri de bulunmaktadır. Tünel içerisindeki ölçüm çalışmaları, üst yapı ölçümlere göre kontrol edilebilmesi ve olası hatalı çalışmaların düzeltilmesi daha zor olduğundan daha hassas ölçülmelidir. Tünel kazı çalışmalarını yönlendirmek tünel ölçmesinde en önemli dikkat edilmesi gereken uygulamaların başında gelmektedir.

Yüzeyde oluşturulan kontrol ağındaki doğruluk, tünelde yapılacak çalışmalara iyi ve doğru bir başlangıç yapılmasında önemli bir faktördür. Bu sebeple yüzeyde oluşturulacak kontrol ağı, tasarım ve doğruluk açısından büyük önem taşımaktadır. Genellikle projelerde oluşturulan kontrol ağları, projenin tamamını kapsayacak şekilde güzergâh boyunca tesis edilir (Fowler, 2006). Tünel uygulamaları öncesi gerekli olan ölçme uygulamaları aşağıda sıralanmıştır:

- Tünel çalışma sahasının tamamını kapsayan bir nirengi ve nivelman ağı oluşturulur. Nirengiler arası ise poligon ağı oluşturularak gerekli koordinat sistemi tünel ağzına kadar taşınmış olur.
- Bölgenin topografik haritası hazırlanır.
- Tünel tasarım ve planları yapılır.
- Tünel giriş yapılarının inşa edilmesi amacı ile ölçümler yapılır.
- Tünel projesinin parametreleri arazide işaretlenip gerekli yönlendirmeler yapılır.

Tünelde yer üstü ağının kurulması ve ölçülmesinde ana noktalar kuyu yakınında, galeri ve tünel girişlerinde olacak şekilde planlanmalıdır. Bundan sonra, ana noktalara 1-2 km mesafede 2 ya da 3 yan nokta tesis edilir. Ana noktalardaki yükseklik işaretleri monte edilerek pilye şeklinde yapılır. Ulusal ağa bağlanabilmek için referans noktalarından ikisi tünel ekseninin her iki tarafında, ikisi de tünel girişlerinin etrafında olacak şekilde yapılmalıdır. Konumu uygun durumdaki sabit noktaları ana ve yan nokta olarak da kullanabilmek mümkündür. Tünel ağı konum koordinatları en ekonomik olarak uydu gözlemlerinden (GNSS) yararlanılarak belirlenir (HKMO, 2018). Uzun tünel projelerinde ana kontrol ağının oluşturulması sonrası sıklaştırma çalışmaları yapılır. Oluşturulan ikincil ağ, ihtiyaç duyulan durumlara göre mümkün olduğunca tünel ağzlarının ya da varsa shaft yakınına kadar taşınır. Bu tesis edilmiş olunan noktalar çoğunlukla standart yer noktaları ya da pilye şeklinde tesis edilir (Ademoğlu, 2008).

Tünel ölçmelerinde kullanılan poligon ve nivelman noktaları tünel duvarlarına konsol şeklinde, üzerine ölçme aleti kurulacak şekilde inşaattan beklenen hassasiyete

göre tünelin her iki tarafında çaprazlama ve birbirlerini görecek şekilde tesis edilip ölçme ağı oluşturulur. Aşağıda tünel içinde duvara yapılmış olan konsol poligon tesisi Şekil 3.38’de gösterilmiştir (Köse, 2018).

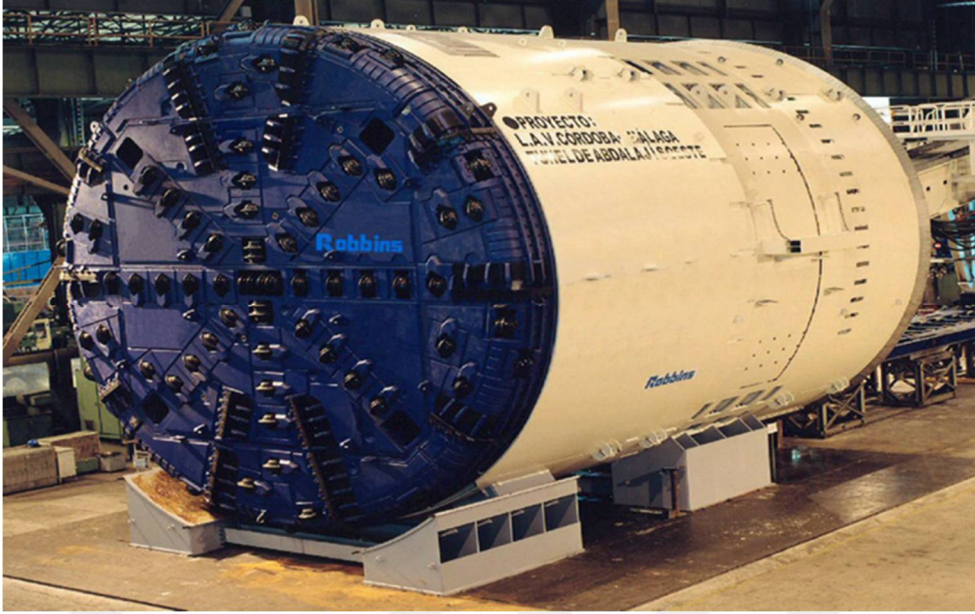


Şekil 3.38. Tünel duvarına tesis edilen poligon üzerinden ölçüm çalışması.

İnşaat halindeki tünelin birinci kaplamasına montajı yapılan bu noktalar için en önemli iki tehlike; kazı çalışmaları esnasında çok sayıda makinenin çalışma alanını kullanmasından kaynaklı zarar görebilmesi ve tünellerde ortaya çıkan deformasyon durumundan kaynaklanan nokta konumdaki değişimlere bağlı olarak projenin güzergâhının planlanan eksenine uygun ilerlememe riskinin bulunmasıdır.

3.4.1. TBM kazı çalışmalarının yönlendirilmesi

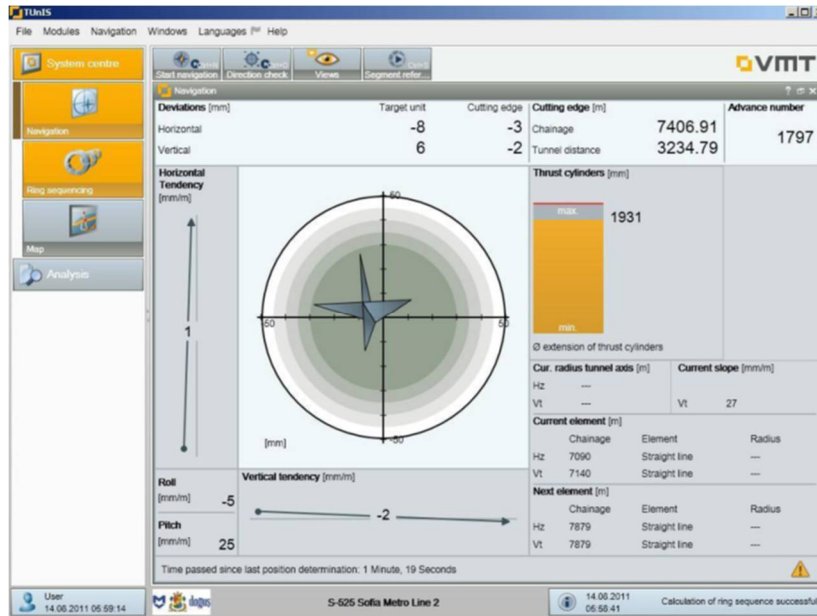
Başlangıçta yapılan parasal harcamaların fazla olduğu bu yöntemde, kullanılan tünel açma makinelerinin tam cephe çalışma kabiliyetinin zeminde oturma gibi olumsuzlukların önüne geçmesi, ses ve titreşimin minimum olması ve hız açısından üstünlük göstermesi bu yöntemin tünel açma çalışmalarında kullanımını arttırır hale getirmiştir.



Şekil 3.39. Tünel Açma Makinesi (TBM) (Seydanlıoğlu,2009).

TBM (Tunnel Boring Machine-Tünel Açma Makinesi), tam cepheli kazılar yapabilen makineler olma özelliğindedir. Bu metotla yapılan tünel kazı çalışmalarında TBM'in güzergâh boyunca yönlendirilebilmesi için özel ölçme uygulamalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Yönlendirme çalışmaları ile bu büyük makine pozisyonunun sürekli tespit edilip sunulması, böylece TBM'i kullanan kişinin yani operatörün kazı esnasında kolay, anlaşılabilir ve güvenli bir şekilde hareket edebilmesi için bilgilendirilmesi sağlanır. Bunun için bu alanda faaliyet gösteren birçok yazılım firmasının geliştirilen sistemler bulunmaktadır. Kullanım alanı daha yaygınlaşmış olan bazı sistemler, ZED tünel yönlendirme sistemi, ACS yön sistemi (TACS), Tauros TBM yön sistemi (Geodata), PPS TBM yön belirleme sistemi ve SLS-T TBM yönlendirme sistemi (VMT) olarak sıralanabilir. Belirtilen bu sistemlerin kullanılmasındaki amaç ve de sunmuş oldukları seçenekler bakımından birçok ortak yönleri bulunmaktadır. Bu sistemlerdeki amaç, tünelin belirlenen güzergâhı boyunca herhangi bir sapma durumu olmadan ilerleyebilmesidir. Bunun içinde projenin kot-koordinat sistemi içerisinde konum bilgileri olan bir nokta üzerine yerleştirilen total station ve bununla entegre çalışabilen lazer yönlendirici aracılığıyla, TBM üzerinde bulunan hedeflerin ölçülmesiyle TBM'in pozisyonu sürekli olarak belirlenir. Konum belirlemek için kullanılmakta olan bu hedeflere aktif lazer ünitesi ya da akıllı lazer ünitesi şeklinde adlandırılır. Bu LCD ekranı bulunan hassas hedefler, üzerlerine düşen lazer ışınının konumunu ve geliş açısını tespit eder. TBM'in konum bilgisinin üretilmesinde tespit edilmesinde kullanılan total station

cihazının bulunduğu noktaya ek, yatay açı bilgilerinin alınabildiği konumu bilinmekte olan bir ya da daha fazla noktadan geri hedefler şeklinde yararlanılmaktadır. Bu hedeflerle bağlantı kurulması ve TBM üzerinde bulunana prizmanın ölçmesiyle TBM konumu belirlenebilir. Çalışmalar süresince TBM hareketlerinde yanal sapma olarak adlandırılan dönme ve itme hareketleri yapacaktır. Projenin koordinat sistemiyle, TBM koordinat sistemi arasındaki ilişki tespiti, TBM'deki dönme ve sapma değerlerinin belirlenmesiyle mümkündür. Bunun içinde TBM üzerine çift eksenli inklonometre yerleştirilmekte ve inklonometre değerlerinin, bu iki koordinat sistemi arasındaki dönüklüğü tespit edebilecek şekilde ayarlanması gereklidir. Tüm bunlara bakıldığında TBM yönlendirilmesindeki sistemler bütünü; çift eksenli inklonometre, aktif lazer ünitesi, geri hedef prizması, otomatik hedef tanıma ve yönlendirme lazer aparatına sahip bir total station, veri işleme ve görsel sunumun yapılacağı bir bilgisayar ile verilerin anlık iletimini gerçekleştirecek veri aktarım kabloları, radyo modemler gibi ana ekipmanlardır. Yönlendirmede kullanılan sistemdeki yazılım, elde edilen verilerin direkt olarak işlenmesini, aktarılmasını ve depolanmasını sağlayabilen sistemlerdir. Tüm bunların sağlıklı bir şekilde işlemesi verilerin aktarılmasının ve koordinat sistemleri arasındaki dönüşümlerin doğru yapılabilmesi ve de yazılım algoritmalarının gerçeğe en uygun biçimde tasarlanmasıyla mümkün olacaktır (Ademoğlu, 2008).



Şekil 3.40. TBM yönlendirme takip ve kontrol ekranı (Eren, 2014)

3.4.2. Mekanik kazılarda yönlendirme

Tünelin yapım çalışmalarında TBM yerine del-patlat, aç – kapa ya da NATM’ın tercih edilmesi durumlarında, tüneldeki kazı çalışmalarının yönlendirilebilmesi, ilerleme boyunca uygulanacak destekleme, tahkimat ve kaplama gibi yapıların konumlarının projenin koordinat sistemiyle tanımlı noktalar kullanılarak aplikasyon açısı ve kenarların hesaplanması şeklinde tünel içinde aplikasyonu yapılır (Gengeç, 2010).

Mekanik kazı kırıcı gibi isimler verilen makineler kullanılarak yapılan kazıdır. Yapılacak olan kazının türünü tünelin boyutları, zeminin jeolojik durumu, destekleme elemanları, yeraltı suyu, tünelin içinde oluşabilecek deplasmanlar ve tünel üstünde yüzeyde bulunan binaların deplasman sınırları, patlatma limitleri, makine ve ekipman özellikleri ve çeşitleri belirlenmektedir. Zemin şartlarına göre tünel tek kademe halinde ya da aşamalı olarak kazılabilmektedir. Tünel ilerleme boyu da kazılan zeminin koşullarına göre belirlenmektedir (Telford, 1996).

Tünel içinde, zemin kazı yüzeyinde çalışmaya başlamak amacıyla önce aynanın ne kadar kazılacağı, yani ilerleme miktarı belirlenmelidir. Bu miktara göre kayanın kendini tutabilmesi için gereken tahkimat işlemleri yapılır. Kazı bölgesi kazı çalışmalarından sonra kendi kendini tutabileceği duruma getirilir. Tünel aynasında yapılacak olan kazı ilk ise üst yarı aynası topograf tarafından proje kesitine göre işaretlenir (Ademoğlu, 2008).

Mekanik kazı yöntemlerinden olan NATM, tam daire olmayan ve büyük çaplı tünellerin yapımında, zeminin zayıf ve salınımın fazla olduğu koşullar içerisinde, destekleme çalışmalarının biran önce yapılması gerektiğinden uygulanması faydalı olan bir yöntemdir (Ünlütepe, 2002). Sistemin esaslarında ve yapımı istenilen projenin şartlarına uygun bir şekilde projelendirilmiş olan çelik iksa ve şartlara göre kullanılan farklı destekleme elemanlarının aplikasyon çalışmaları projeye göre yapılır. Yapılan aplikasyon çalışmalarında kutupsal aplikasyon yöntemi dikkate alınmaktadır. Aplikasyonların yapılmasında koordinat değerleri bilinmekte olan noktalardan ve aplikasyon ölçmelerinde oluşan hataların bir sonucu şeklinde tanımlanmış olan noktaların standart sapma değerleri kullanılarak istenilen doğruluğa ulaşılmasının sağlanması gereklidir. Bu da ulaşılan doğruluğun talep edilen doğruluktan daha küçük değerlere sahip olmasını gerektirir. Aplikasyon çalışmalarına başlanılmadan önce ön hesaplamalarla belirlenen doğruluğun yakalanıp yakalanmadığı, ölçme yönteminde iyileştirmelere ihtiyacın olup olmadığı tespit edilmelidir. Merkezleştirme hataları, zorunlu

merkezleştirme sistemlerinin kullanılmasıyla birlikte minimum seviyeye indirilmektedir. Karşılaşılacak aletsel hataların giderilmesi için cihazların kontrol ve düzenlemelerinin yaptırılması çözüm olacaktır. Kullanılacak ölçüm aletlerini seçerken, istenilen doğruluk değerleri dikkate alınarak kullanılacak cihazın uygunluğu tespit edilir (Baykal ve diğ., 2005). Tünelin kazısı ve sonrasındaki aşamalarında doğrultu belirleme ve konumlandırmanın en önemli çalışma ayağını oluşturduğu asla göz ardı edilmemelidir.



Şekil 3.41. NATM tünel açma yöntemine göre yapılan kazı çalışmasının yönlendirilmesi (Ankara-Sivas Demiryolu Projesi Tünel-15)

Tünelin geometrik yapısına ve kazının yapılacağı tünel aynasındaki bölüme bağlı olarak istenilen miktarda lazer cihazı yerleştirilerek tünelin tamamında kazı ve iksa destekleme çalışmaları minimum sayıda ölçme elemanı ile yapılır. Tünel dizaynında aliymanın bulunması karşılaşılan ölçme zorluluğu olarak görülmemelidir. Harita mühendisinin yapması gereken şey; tünel aynasında koordinatı belirlenmek istenen noktaya en yakın lazer ışınından belirli bir mesafedeki yatay ve düşey uzaklık farklarının belirlenmesini sağlayabilmektir. Çalışmaların yönlendirilmesi için yapılması gereken bu uygulama tünel boyunca belirli mesafelerle hesap edilip hazır hale getirilir ve liste halinde kazının desteklemelerini yapan kişilere verilir. Bu değerler bütün lazer ışınları için tip kesit üzerindeki belirli noktalara bağlantı kurularak tünel boyunca belirlendiğinde çalışmalar süresince ölçme ekibinin sürekli olarak tünelde bekliyor olmasına ihtiyaç duyulmayacaktır (Ünlütepe ve Messing, 2005).

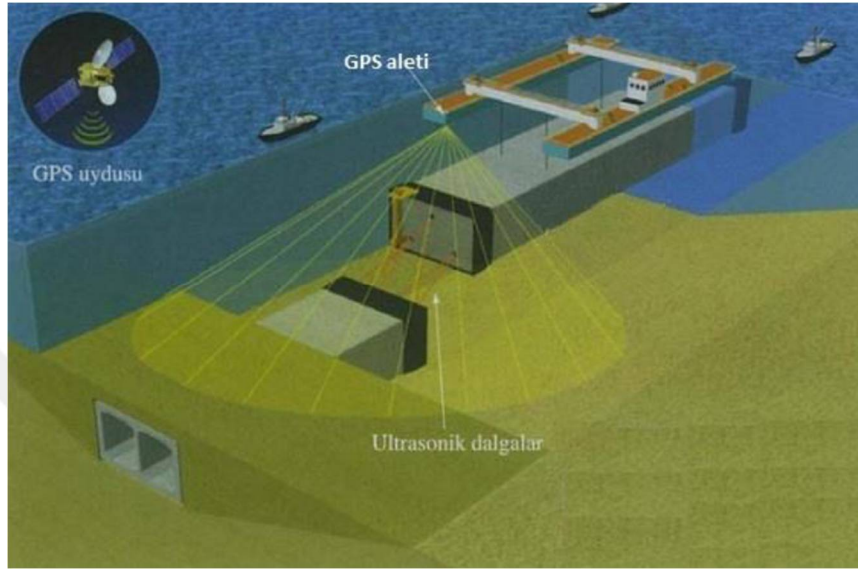
Roadheader makineleri kullanılarak kazı faaliyetlerinin gerçekleştirilmesi, farklı tip kesitlerindeki kazılarda ve sorunlu zeminlerde hız ve ekonomi açısından uygunluğu

nedeniyle daha çok tercih edilmektedir. Roadheader ile kazı çalışması yapılırken lazer cihazlarının kullanılması ya da aplikasyon yapılarak kazı alanının işaretlenmesi şeklinde tünel çalışmalarının yönlendirilmesi yapılabilmektedir. Artık bu şekildeki klasik yöntemler ölçümlerin otomatik olarak yapılabildiği, bilgisayarların dahi işin içinde olduğu yöntemlere yerlerini kaptırmış durumdadır. Makinenin üzerine konumlandırılan Roadheader'ların yönlendirme ekipmanları olarak farklı donanımlar yardımıyla bütün verilerin kaydedilebilir. Kazının profiline uygun değerlendirmelerin ve görselleştirmenin yapıldığı bilgisayar, verilerinin iletimi için bir adet modem kutusu, sensörlerden alınan verilerin toplandığı ve bilgisayarın kullanılabileceği hale dönüştürüldüğü merkez kutusu, lazer ışınlarını karşılayan 2 adet prizma, makinenin hareketlerinin tespitinde kullanılan 2 eksenli inklonometre sıralanabilir. Roadheader üzerindeki sisteme doğrudan tanımlanan aralıklarla ölçme yapmak için poligon noktasına yerleştirilmiş aktif teodolit sistemi bulunmaktadır. Data iletimini düzenleyen kumanda kutusu ile bu harici sistem desteklenir. Teodolit koordinat bağlantısını bir önceki poligonun üzerinde bulunan prizmadan alır. Makinenin üzerinde bulunan ve lazer ışınlarını karşılaya 2 adet prizma yardımıyla da teodolit-lazer ölçüleriyle Roadheader'ın genel konumunun proje koordinat sistemine göre belirlenmesini sağlamaktadır. Bu sırada makinenin kolunun ve kazı kafasının hareketlerinin de tanımlanması ve konumlandırılması için sensörler yerleştirilmelidir. Bu sayede kazıcı kafanın konumu, makinenin ana gövdesinin pozisyonundan ve sensörlerden alınan hareket verileri kullanılarak kazıcı kafanın rölatif koordinatlarına bağlı bir şekilde proje koordinatlarıyla tespit edilebilmektedir. Proje koordinatlarındaki kazıcı kafanın konumu ise kazılacak proje kesiti ile karşılaştırılarak operatöre güzergâha uygun bir yönde kazı yapılabilmesi için bilgisayar ekranında görsel ve sayısal bir yönlendirme verir (Ünlütepe ve Messing, 2005).

3.4.3. Batırma tünellerinde yönlendirilme

Tüplerle oluşturulacak olan tüneller için öncesinde kazısı tamamlanan güzergâhta, batımetrik ölçümler yapılarak tüplerin güzergâh konumuna batırılması yapılmaktadır. Batırma tüplerin yerleştirileceği konumun belirlenmesi amacıyla yapılacak tüm batımetrik ölçme işlemleri; GPS-GNNS ve Hassas Nivelman koordinat sistemlerine bağlı olarak tekne konumu RTK-GPS/GNNS ölçmeleriyle ve dip taraması ise multibeam (çok bimli) echo-sounder ile yapılır. Yerleştirme çalışmaları için, RTK-GPS/GNNS ölçme çalışmalarıyla kazıcı sistemleri ve kazıcı sistemlerinden de multibeam Echosounder

ölçme uygulamaları ile kazı çalışmalarının yönlendirilmesi yapılmaktadır. Değişik izleme sistemlerinin kombinasyonlarının bir arada kullanılmasıyla tünel elemanlarının montajının kontrolü yüksek bir hassasiyet ile yapılabilmektedir. Eğer varsa daha önceden yerleştirilmiş olan komşu tünel elemanına bağlı konum belirleme çalışması ise ultrasonik dalgalar kullanılarak yapılmaktadır (Gürdal, 2004), (Şekil 3.42), (Eren, 2014).



Şekil 3.42. Ölçme yardımıyla batırma tüp yerleştirme işlemi (Eren, 2014).

3.4.4. Del-Patlat yönteminde yönlendirme

Kırıcı olarak da ifade edilen ekskavatör ile kazı yapılamayacak sert kayalıklı zemin yüzeylerinde patlatma yoluna gidilir. Fakat bu yöntemin tercih edilmesinde bir diğer kriter de patlatma yapıldıktan sonra zeminin kendini belirli bir süre tutabilecek durumda olmasının gerektiğidir. Bu nedenle kazının yapılacağı bölgedeki zemin yüzeyinin özelliklerine ve bu özelliklerin aynı zemin yapısında ne kadar devam ettiğine bakılır. Bunun belirlenmesi için projelendirme çalışmaları kapsamında yapılan sondaj çalışmalarından elde edilmiş verilere bakılır veya istenilen bilginin güvenilirliğinin artırılması amacıyla da yerinde kılavuz delgiler delinerek karot numunelerini alınır. Patlatmanın yapılması planlı olan zemin yüzeyi kesimine, ilerleme miktarına, güzergâh üzerindeki yüzeyde yapının var olup olmamasına ve kayaç sertliğine bakılarak uygun patlatma modeli oluşturulmalıdır. Oluşturulan bu modelle aynada ne sıklıkta deliklerin açılacağı, hangi yöntem kullanılarak patlatmanın yapılacağı, kullanılacak patlayıcının miktarı, kaç metre ilerleme sağlanacağı ve bu patlatmanın sonrasında ortaya çıkacak

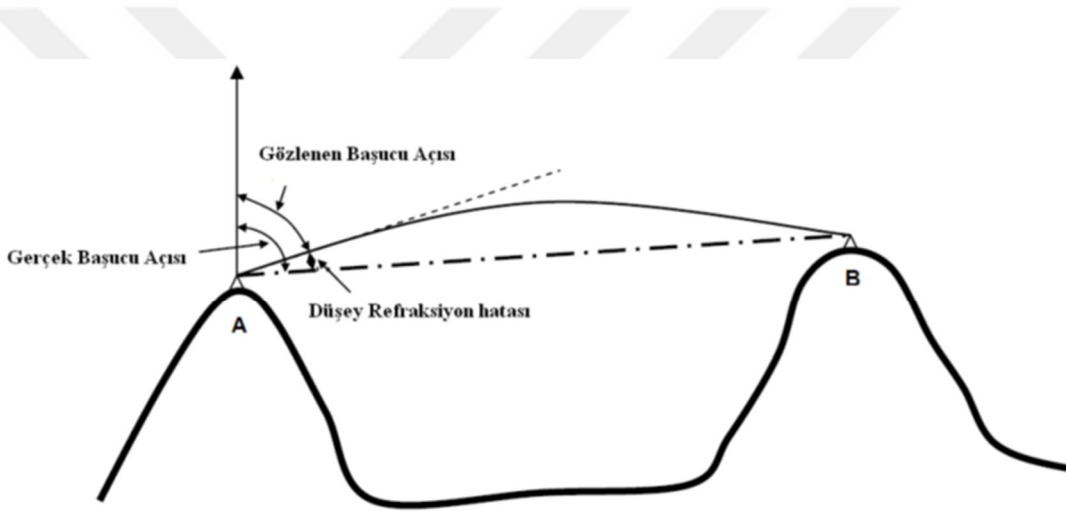
titreşim hesaplanır. Patlatmanın yapılacağı bölgeye deliklerin yerleri topografin vereceği konum bilgisine göre kazı yüzeyine işaretlenir. İşaretlenen noktalara jumbo ya da benzeri delgi makinesinin yardımıyla delikler dilinir. Alınması gereken tüm emniyet önlemleri de tamamlandıktan sonra patlatma yapılır. Bu işlemler tamamlandıktan ortaya çıkan toz bulutu dağıldıktan sonra ve ortam çalışmaya elverişli hale gelince patlatma sonrası ortaya çıkan malzeme (pasa) uygun hafriyat taşıyıcı araçlarla tünel içerisinde tahliye edilir. Patlatma sonrası kopmamış parça kalmış ise kırıcı yardımıyla bu parçalar zemin yüzeyinden koparılır. Patlatmanın yapıldığı alanı inceleyen topograf, ayna kesitine göre taranması gereken yer varsa belirtir, gereken yerler taranır ve uygun tahkimat yapılır (Emiroğlu, 2010).

3.5. Tünel Ölçme Çalışmalarındaki Hata Kaynakları

Harita mühendisliği çalışmalarında kabul edilen hata kavramları ve bunların kaynağı yerüstü çalışmalarında nasıl geçerli ise tünel çalışmalarında da aynı şekilde geçerlidir. Yani ölçme çalışmalarında kullanıcı kaynaklı hatalar, cihazın yapımından ve programlanmasın kaynaklı hatalar ve ölçme uygulamasının gerçekleştirildiği ortamın atmosfer koşullarından kaynaklı hatalar ortaya çıkabilmektedir. Bu hatalardan kimisi çok sayıda ölçme işlemi yapılarak yani bir büyüklüğü çok seçenekli olacak şekilde elde ederek, ölçü aletlerinin kontrollerinin ve kalibrasyon ayarlarının düzenli olarak yapılması sağlanarak ve sistematik hata miktarını hesaplayarak ölçmelere düzeltme şeklinde getirilmesi ile çözülebilir ya da ölçme sonucuna etkisi minimize edilebilir. Bu hatalardan tehlikeli olanları düzensiz hatalar olup bunlar giderilemez. Bu giderilemeyen hataların ölçü değerlerindeki etkisini minimuma düşürmek için ölçme çalışmaları farklı koşullar içerisinde tekrar tekrar yapılmalıdır. Dengeleme yöntemiyle de düzensiz hataların etkisi azaltılabilmekte ancak fakat tamamen ortadan kaldırılamamaktadır. Jeodezik ölçü aletleri ile yapılan ölçme çalışmalarındaki hata kaynaklarını; yönlendirme hataları, düzeçlemeden kaynaklı hata ve okuma hataları olarak sıralanabilir. Hata kaynaklarının tüm türleri için beklenen değerler hesaplanabilmektedir. Tüm bunlar bir bütün olarak değerlendirilerek ölçmelere ait standart sapmalar hesaplanabilir. Tünel ölçme uygulamalarında dikkat edilmesi gereken iki temel sistematik hata ise refraksiyon ve çekül sapması hatasıdır (Ademoğlu, 2008). Bu başlık altında tünel çalışmalarının en önemli çalışma uygulamalarından olan ölçme faaliyetlerinin doğruluğunu etkileyen bu iki temel sistematik hata olan refraksiyon ve çekül sapması hakkında bilgi verilecektir.

3.5.1. Refraksiyon etkisi

Refraksiyon etkisinin düşeydeki bileşeni Harita mühendisleri için yabancı olmayan sık sık karşı karşıya kaldıkları bir hata kaynağıdır. Fakat refraksiyon etkisinin düşey bileşeninin yanında yanal refraksiyon olarak ifade edilen yataydaki yanal bileşeni üzerinde çok fazla durulan bir konu değildir (Fowler, 2006). Yanal refraksiyon, refraksiyonun tünel ekseninden duvara dik olan bileşenine verilen addır. Şekil 3.43'te gösterildiği gibi iki ayrı tepenin üzerinde konumlandırılmış A ve B noktaları, yüksekliğin değişmesinden kaynaklı farklı atmosfer koşulları etkisindedir. Bu durum çevredeki hava yoğunluğunun farklı olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 3.43. Düşey refraksiyon (Fowler, 2006).

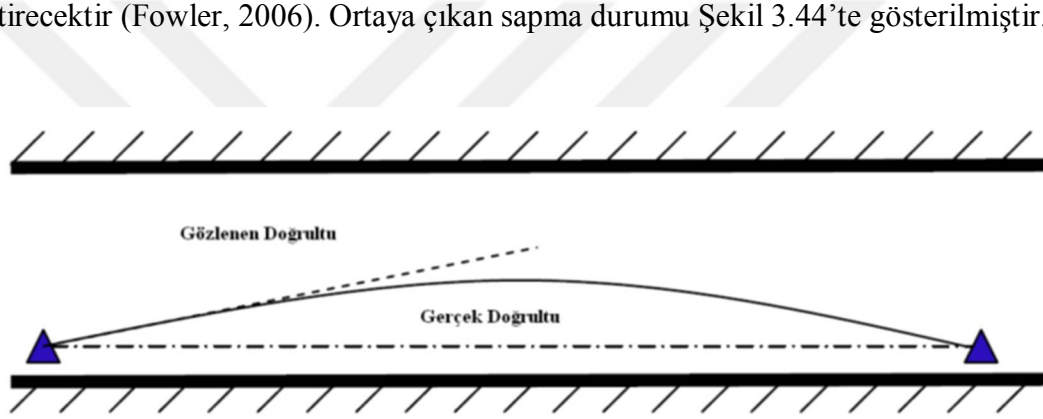
Havanın yoğunluğu aşağıda verilen bağıntı kullanılarak hesaplanabilir.

$$(d) = P / (R * T) \quad (3.1)$$

d: Yoğunluk, P: Basınç T: Sıcaklık R: Sabit

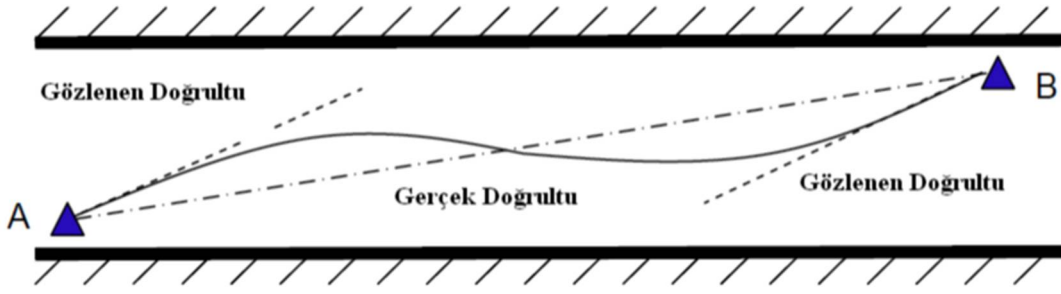
Düşey refraksiyon etkisinde yüksekliğin artıp, sıcaklık değerlerinin azaldığı ve basıncın düştüğü düşünülürse yükseklik ile yoğunluk faktörlerinin ters orantıda olduğu bu bağıntıdan anlaşılmaktadır. Yani havanın yeryüzüne daha yakın yerlerde daha yoğun olacaktır. Bu sebeple ışın yeryüzü eğrilğine paralel konkav bir yol izleyecektir. Atmosfer koşulları ve bu koşulların etkisi tünel için düşünülerek yatay refraksiyonun tünel çalışmaları için yapılan açı ve kenar ölçmelerini ne şekilde etkileyeceği görülebilir.

Bir ışık ışını, gözlemciye mümkün olan en hızlı yoldan ulaşacağından ışık ışınının farklı yoğunluklu ortamlar arasında geçiş yaptığı durumlarda ışının takip ettiği doğrultuda sapmalar meydana gelecektir. Buna göre ölçülecek başucu açıları ile olması gereken değerler arasında farklılıklar oluşacaktır. Ortaya çıkan bu durum düşey refraksiyon olarak tanımlanmaktadır (Fowler, 2006). Tünel içerisindeki aynı prensip yanal refraksiyon için de geçerli olacaktır. Yer altında tünel duvarı ile çevresindeki hava arasında önemli derecede ısı transferi gerçekleşir. Bu sebeple yatay sıcaklık değişimi sıcaklık tünel merkezine doğru hareket edeceğinden tünel duvarlarına daha yakın olur. Basınç ise bir tünelin aynı yükseklikteki kısımlarında genel olarak sabit büyüklüktedir. Oluşan bu durum havanın en yoğun olarak tünel duvarı yakınında olacağı sonucunu vermektedir. Bu nedenle gözlenen doğrultu da tünel merkezine doğru bir sapmanın meydana getirecektir (Fowler, 2006). Ortaya çıkan sapma durumu Şekil 3.44'te gösterilmiştir.



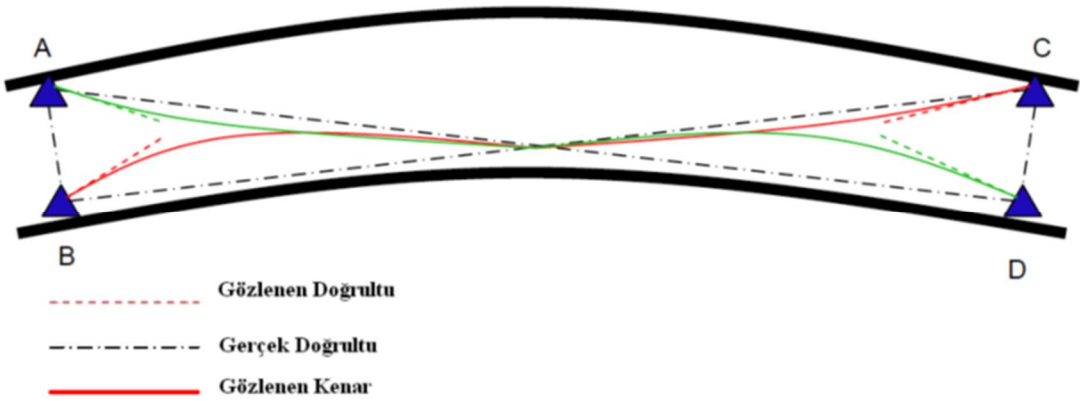
Şekil 3.44. Yanal Refraksiyon (Fowler, 2006).

Şekil 3.44'te görüldüğü üzere tüneldeki tek duvar boyunca tesis edilecek noktalarda aynı yönde sistematik bir hatalar meydana gelir. Bu şekilde yönlendirilecek olan bir tünelde etkiyecek hatalar hep aynı yönde olacağından inşaatı yapılan tünelin ekseninin de tek yönlü olarak proje güzergâhından sapması beklenir (Fowler, 2006). Yanal refraksiyon etkisini en aza indirmenin en etkin yollarından biri olarak tünel içi kontrol noktalarının çapraz doğrultular oluşturacak şekilde tünelin karşılıklı duvarlarına birbirlerini görecek şekilde tesis edilmesidir. Bu yöntem yanıt refraksiyonun ölçmelerdeki etkisini tamamen kaldıramayacaktır fakat oluşan yanıt refraksiyon etkisini karşılıklı hale getirerek toplam hatayı mümkün olduğunca küçük bir boyutta tutacaktır (Fowler, 2006). Şekil 3.45'te 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, 2006).



Şekil 3.45. Çapraz nokta tesisinde yanal refraksiyonun etkisi (Fowler, 2006).

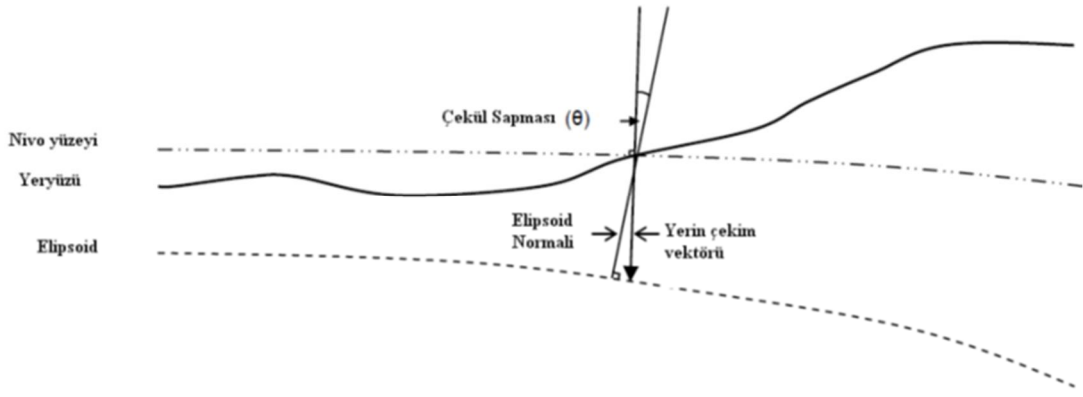
Bahsedilen yöntem tünel tasarımının alıynman olduğu yerlerde de geçerlidir. Tünel ekseninin daire veya klotoit gibi eğrisel olduğu bölümlerinde bu yönteme benzer olarak Şekil 3.46 benzeri çapraz nokta tesisinin yapılması tercih edilmelidir (Fowler, 2006).



Şekil 3.46. Çapraz çift poligon örneği (Fowler, 2006).

3.5.2. Çekül sapması

Çekül sapması, bir noktada elipsoid normali ile çekül doğrultusu ya da başka bir deyişle yerçekiminin oluşturduğu vektör arasında kalan açı olarak ifade edilir. Çekül sapması aynı zamanda elipsoid normali ile nivo yüzeyinin normal bileşeninin bir ölçüsüdür (Fowler, 2006).



Şekil 3.47. Çekül sapması (Fowler, 2006).

Şekil 3.47’de yukarıda anlatılan çekül sapması gösterilmiştir. Vektörel bir büyüklük olan çekül sapması karşılıklı birbirine dik iki bileşene ayrılmaktadır. Bunlardan birincisi kuzey – güney doğrultusunda artış yönü kuzey olmak üzere “ ξ ” ile gösterilen bileşeni ve doğu – batı doğrultusunda doğu yönünde artan “ η ” ile gösterilen bileşenidir. Çekül sapması bileşenlerine Pisagor teoremi uygulanıp (3.2) eşitliği kullanılarak çekül sapmasını hesaplamak mümkündür (Fowler, 2006)

$$\theta^2 = \xi^2 + \eta^2 \quad (3.2)$$

(3.2) eşitliğinden yararlanarak α gibi bir azimut boyunca çekül sapması

$$\theta = \xi \cdot \cos\alpha + \eta \cdot \sin\alpha \quad (3.3)$$

eşitliği ile çözülebilir (Fowler, 2006).

Burada önemli olan detay, çekül sapmasını, çekül doğrultusu boyunca farklılık göstereceği için çekül sapması hesabının uygulandığı noktayı tam olarak tespit edebilmektir. Ayrıca yer çekiminin yönün de çekül doğrultusu boyunca değişken olduğu unutulmamalıdır. Yeryüzünün altındaki kütle dağılımının homojen olmaması nivo yüzeyinin ve çekül doğrultusunun eğrisel olmasına sebep olmaktadır. Buna bağlı olarak çekül sapması da, geoid yüzeyinde veya dünya yeryüzünde bulunan herhangi bir nokta için tanımlanabilir (Featherstone, 1999). Çekül sapması ya astronomik jeodezik ölçmelerden veya gravimetrik ya da uydu gözlemleri yardımıyla hesaplanabilir. Bunlardan astronomik ölçmelerin Laplace eşitlikleriyle hesaplanması öncelikli olarak tercih edilen yöntemdir. Diğer yöntem proje alanında geoid elipsoid ayırımına en iyi uyan düzlemin en küçük kareler yöntemi kullanılarak hesaplanmasıyla çekül sapmasının belirlenmesidir. Bu metod da ideal olarak gravimetre ölçmelerini de içeren güvenilir ortometrik yükseklik bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Hesaplanan düzlem geoidin elipsoide göre eğimini verir. En küçük kareler yöntemi ile düzlemin kuzey ve doğu

yönlerinde sapmalarının elde edilmesi suretiyle çekül sapmasından dolayı meydana gelecek sistematik hatalardan en az etkilenmek için, gözleme çizgilerini mümkün olduğunca yatayda oluşturmak gereklidir (Arslan, 2005; Fowler, 2006).

3.6. Deformasyon

Yeryüzündeki bazı bölgelerde, makine tesislerinde ve sanat yapılarında geçici ya da kalıcı özellikteki birtakım faktörlerin etkisinde kalarak yapı ve/veya çevresinde zaman içerisinde bazı nedenlere de bağlı olarak şekil değişimleri meydana gelebilmektedir. Meydana gelen bu değişimler deformasyon olarak adlandırılır. Jeodezik olarak bir alanda ya da yapılar üzerinde belirlenen özgün bir P_i noktasında t_1 ve t_2 gibi iki farklı zamanlarda yapılmış ölçülerin sonucunda konum bilgisi $P_i(t_1)$ ve $P_i(t_2)$ şeklinde tespit edilebiliyorsa ve bu değerler arasındaki fark olan d_i 'nin istatistik olarak sıfırdan farklı olduğu ispatlanabiliyorsa bu deformasyon olarak ifade edilir (Hoşbaş, 1992). Deformasyon değerlerinin net bir şekilde belirlenerek yorumlanabilmesi için zaman faktörüne bağlı olarak obje ya da yapının sürekli izlenmesi zorunludur. Deformasyonlar hakkında konuşabilmek ve analiz yapabilmek amacıyla bir periyotluk ölçü serisinden daha fazla ölçüye ihtiyaç duyulmaktadır, tek bir ölçü/gözlem ile deformasyon miktarı ve bunların etkisi belirlenemez. Çalışmalardaki ilk ölçme değerleri sıfır ölçmesi ya da referans ölçme (t_0) değerleri, ikinci seferde yapılacak ölçmeler tekrar ölçüsü (t_1, t_2) şeklinde isimlendirilir.

Mühendislikte meydana gelen şekil ve konum değişikliklerinin belirlenmesi, jeodezik araştırmaların eskiye bakışla önem kazanmış olan uygulama alanlarından biridir. Baraj, köprü, tünel, viyadük ve kule gibi mühendislik yapılarında doğal ve yapay çeşitli kuvvetler nedeniyle geçici ve kalıcı deformasyonlar meydana gelmektedir. Bu deformasyonların nedenleri arasında genellikle zeminin fiziksel özellikleri, yapının ağırlığı, aktif dış kuvvetler sayılabilir (Clough, 1960). Meydana gelen şekil değişimlerine neden olan çeşitli faktörler vardır. Bunlar:

- Yapının tesis edildiği zemindeki durum,
- Bölgenin fay hareketliliğinin özellikleri,
- Yapı kütlesi ve seçilen malzemelerin cinsi,
- Yapıyı etkileyen değişken basınçtaki yükler,
- Jeolojik koşullara ve atmosfere dayalı faktörler,
- Su tarafından uygulanan dinamik basınç,

şeklinde sıralanabilmektedir.

Meydana gelen şekil değişimlerinin belirlenmesi amacıyla yapılan ölçme faaliyetlerine deformasyon ölçmeleri, bu ölçülerin yer, zaman ve büyüklük gibi parametrelere bağlı olarak değişimlerinin boyutlarının ve etkilerinin belirlenip, incelenmesi çalışmalarına da “Deformasyon Ölçülerinin Analizi” denir.

Şekilde oluşan değişmelerin yapısı ve türüne göre kalıcı ve geçici(elastik) olarak deformasyonlar iki grupta incelenir. Kalıcı deformasyonlar çökme, kayma, dönme ve dilatasyon olarak gruplara ayrılırken; geçici (elastik) deformasyonlar bükülme ve burulma olarak kendi içlerinde iki gruba ayrılmaktadır. Bir objenin konum değişimi kayma (ötelenme), eğilme ve dönmeden kaynaklı deformasyona uğramaktadır. Kayma bir objenin belirli bir doğrultu boyunca yaptığı hareketi ifade etmektedir. Dönme; döndürme momenti kuvvetinin etkisiyle cisimde meydana gelen dönel hareket olarak tanımlanır. Eğilme; objenin veya yapının ekseninin olması gereken durumdan bir açı yaparak ayrılması veya sapması sonucu meydana gelen deformasyon türüdür. Bir objenin iç geometrisinde oluşan şekil değişikliği olarak tanımlanır. Şekil değişikliğinin meydana geldiği bir yapıda, objenin noktaları arasında var olan geometrik ilişki değişime uğramaktadır. Uzama durumunda ise çekme kuvvetinin etkisindeki objenin boyunda uzama ya da basınç kuvveti etkisinde obje boyunda kısaltmalar olarak karşımıza çıkmaktadır. Burulma ise objenin konstrüksiyon eksenini boyunca dönmesini ifade etmektedir (Gülal, 2004).

Deformasyonlar farklı meslek gruplarında değişik biçimlerde karşımıza çıktığından uygulama alanları da geniştir. Bunlardan bazıları;

- Mühendislik yapılarının güvenli bir şekilde oluşturulması ve yapı kullanımının sürdürülebilirliğinin sağlanmasında,
- Makine tesislerinde ve kalite-kullanım kontrollerinde,
- Yer yüzeyindeki ve kaya mekaniğindeki temel sorunların çözülmesinde,
- Jeolojide yer kabuğunun yapmış olduğu hareketlerin izlenmesi ve incelenmesi, olarak örnek gösterilebilir.

3.6.1. Deformasyon nedenleri

Kuvvetlerin etkisi sonucunda oluşan ve genellikle zamana bağlı olarak değişen deformasyonların oluşumunda çeşitli etmenler vardır. Yapılarda ve çevresinde oluşan deformasyon nedenleri;

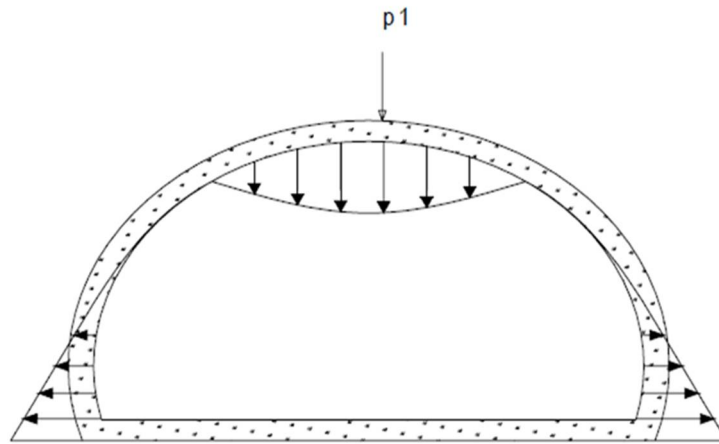
- Yapının zeminindeki değişimler,
- Yapı temelindeki gevşemeler ve bunun sonucunda oturma, çökme gibi yaşanan durumlar,
- Nemin, sıcaklığın ya da basıncın değişmesi

şeklinde sıralanabilirler (İnal, 2000).

Tünel inşaat çalışmaları sırasında meydana gelen önemli deformasyonlar yumuşak zeminlerde “zemin kaybı” (ground loss) olarak tanımlanmaktadır. Kazı faaliyetleri sonucu oluşan gerilme (basınc) değişimleri tünel çevresinde ve ayna kısmında deformasyonlara neden olacaktır. Deformasyonların büyüklüğü ve sıklığı zeminin jeostatik durumuna, zemin özelliklerine ve tünel açma yöntemlerine bağlıdır (Lunardi, 2000).

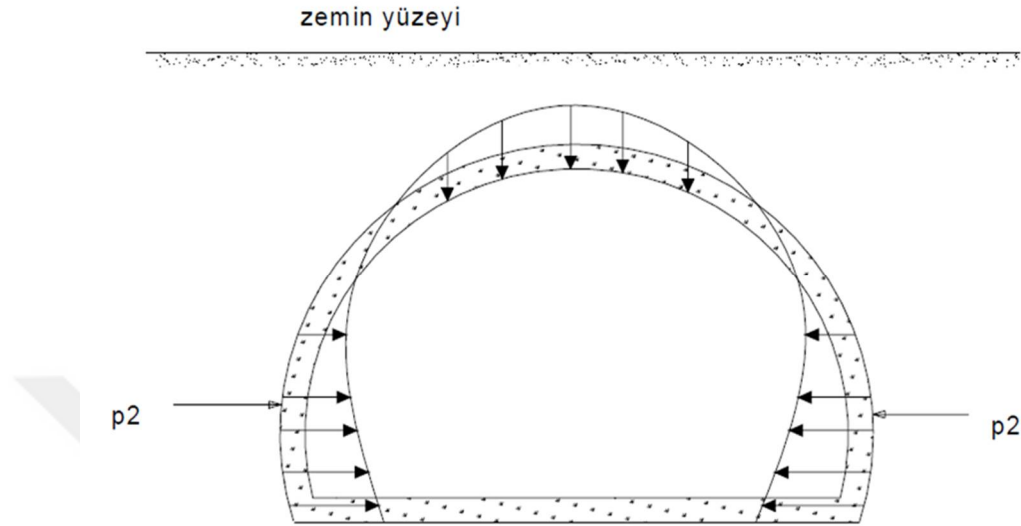
Yeryüzünden derinlere indikçe yumuşamış ve parçalanmış zemin yapısının yerini kayalara veya daha sert zemine bırakabilmektedir. Tabakalaşma, kırıklı yapı, çatlakların oluşması, fay hatları ve yer altı sularının hareketleri, zemindeki homojenliğin bozulmasına ve sağlam zeminde olması gereken dayanımın azalmasına neden olmaktadır. Bu sebeple tünel güzergâhı boyunca jeolojik özellikler detaylı olarak incelenmeli ve değişen zemin yapısına karşı tedbirli de olunmalıdır. Bunu sağlayabilmek amacıyla da projelendirme aşamasında uygun sıklıktaki noktalarda sondaj çalışmalarının yapılmasına ihtiyaç vardır (Özhan, 1994).

“ P_1 ” kuvvetinin yapmış olduğu baskı sonucu tünel tavanında aşağı doğru bir eğilme gözlenir. Bu kuvvete bağlı olarak da tünel duvarları yana doğru açılma eğiliminde olacaktır.



şekil 3.48. “ P_1 ” kuvvetinin yaptığı baskı sonucu ortaya çıkan şekil değişikliği görölmektedir (Özhan, 1994).

“ P_2 ” ile gösterilen baskı kuvvetlerinin etkisiyle de tünel duvarları tünel içine doğru şekil değiştirebilir. Bu şekil değişimlerine bağlı olarak da tünel tavanının yukarı doğru itilmesi gibi bir sonuç ortaya çıkabilmektedir.



Şekil 3.49. P_2 kuvvetinin yapmış olduğu baskı sonucu meydana gelen şekil değiştirmeler görülmektedir (Özhan, 1994).

3.6.2. Deformasyon ölçmelerinin tarihçesi

Büyük mühendislik yapılarında zaman içerisinde ortaya çıkan ve önemli kayıplara yol açan kazalardan dolayı, insanlar bu yapıların davranışlarını zamana bağlı olarak incelemenin ne kadar önemli olduğunu kavramış ve Ölçme Tekniği Anabilim Dalının çok önemli bir uzantısı olan deformasyon ölçmelerine önem vermişlerdir (Hoşbaş, 2004). Bu amaçla ilk deformasyon ölçmeleri 1860'da ABD'nin California Eyaletinde San-Andreas fay kuşağında yapılmış ve 1876 - 1906 yıllarında yatay açı gözlemleri tekrarlanmıştır. Söz konusu ölçme çalışmaları 1908 yılında Almanya'nın Thuringen Eyaletinde bulunan Gotheur Barajında da yapılmış olan çalışmalardır. Burada baraj üzerinde baraj kretinin ortasında seçilen iki noktanın yatay hareketleri, aliyman yöntemi ile belirlenmesine dayalı bir çalışma yöntemi seçilmiştir.

Deformasyon ölçme çalışmalarına dair ikinci önemli bir uygulama da yine Almanya'da bir kemer baraj olan Pfafensprung'da 1928 yılında yapılmıştır. Bütün bu çalışmalar yapılırken basit sayısal çözümler veya grafik tespitler ile yapılan analizler kullanılmıştır. 1928 yılında ABD' de 50 metre yüksekliğindeki San-Francisko Barajının

çökmesi sonucu 436 kişinin ölümüyle sonuçlanan faciadan sonra, deformasyon ölçmelerinde oldukça hassas yöntemlerin kullanılmasının gerektiği anlaşılmıştır. Deformasyonlar ve birtakım başka nedenlerden dolayı yıkılmış olan baraj sayıları 250'ye dayanınca 1929 yılında organize edilen bir konferansta konu üzerine çalışılmış ve hemen sonra aynı yıl içerisinde bu konu hakkındaki ilk yazılı kitap W. Lang tarafından yayımlanmıştır. W. Lang'ın kitabı ve sunduğu öneriler ışığında, aliyman ve önden kestirme yöntemlerine ek olarak hassas poligon yöntemi de deformasyon ölçmelerinde kullanılmaya başlanmıştır. 1690'lı yıllara kadar jeodezik deformasyon ölçmelerinde ulaşılmak istenen hedef, elde edilen verilerin analizi için yapılacak olan hesapların kolaylaştırılması olmuştur. Poligonların baraj duvarı üzerinden her iki tarafa kayalara uzatılması ve alet teknolojisinin gelişmesi ile triyangülasyon (üçgenleme) yönteminin kullanılabilirliği gündeme gelmiştir. İstatistiksel analiz bilimi, gelişmiş bilgisayarların kullanıma girmesiyle birlikte hesaplarda jeodezik ağ dengelemesinde doğru ve daha hassas güvenilir veriler elde edilmiştir. Tüm bu gelişmelere Aschlimann, Baumann, Löschner, Milev, Pelzer, Welsch, Niemeier gibi isimlerin önemli katkıları olmuştur.

Deformasyon ölçüm teknikleri ve uygulamalarına olan ilgi ülkemizde 1960'lı yıllardan sonra artmıştır. Ancak tam anlamıyla ciddi boyutlarda çalışmalar daha ileriki yıllarda ortaya konulmuştur. Örneğin, Kemer-Bozdoğan Barajında ölçü tesisleri kurulmuş fakat istenilen ölçüler yıllarca yapılamamıştır. Yine Sarıyar Barajında ilk ölçü değerleri elde edilmiş fakat daha sonra bunların nasıl değerlendirilip analiz edileceği bilinmediğinden dolayı ölçüler tekrarlanmamıştır. Daha sonra yapılmış olan Gökçekaya, Keban ve Oymapınar Barajlarında yapılan ölçmeler, ilk bilimsel nitelikteki deformasyon ölçme çalışmaları kabul edilebilir (Özaydın vd., 2006).

3.6.3. Deformasyon ölçmeleri nerelerde kullanılabilir?

Yapılarda zaman içerisinde oluşabilecek geometrik değişikliklerin ve bu değişikliklere yol açacak olan faktörlerin incelenmesinde kullanılacak sistem, araç-gereç, ölçme yöntemleri ve elde edilen sonuçların analizi deformasyon ölçmelerinin konusuna girer. Deformasyon birçok meslek türünde, üzerinde çalışılabilen ve farklı biçimde karşılaşılan bir konudur. Bunlara;

- Bir inşaata başlamadan önce, kullanılan malzemelerin yükü yapıda oluşturabileceği değişimlerin araştırılması,
- Makinelerin aksamalarında, çalışma durumlarının kontrolünde ve takibinde,

- Yer yüzeyindeki ve kaya mekaniğindeki temel sorunların çözülmesinde,
- Jeolojide yer kabuğunun yapmış olduğu hareketlerin izlenmesi ve incelenmesi, kullanılan alanlardan bazılarıdır (İnal, 2000).

3.6.4. Deformasyon ölçme yönteminin seçimi

Deformasyon ölçme yöntemleri seçiminde, deformasyon araştırması yapılacak yapının yakınına gidilip gidilemediği, üstünden geçilebilme durumunun olup olmadığı ya da sadece gözlenebilir durumda olup olmadığı gibi faktörler ile ölçme çalışmaları için ayrılacak bütçenin ve gereken sürenin belirlenmesi gereken temel başlıklardır (İnal, 2000). Ölçme çalışmaları genelde geniş bir zaman aralığı içerisinde, şekilde yavaş yavaş değişmelerin olduğu obje ya da yapıları içerdiğinden seçilecek yöntemde bu durum göz ardı edilmemelidir.

3.6.5. Deformasyon analizinde kullanılan yöntemler

Deformasyonların analiz edilmesinde kullanılacak olan yöntemler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Bağıl güven elipsleri yöntemiyle deformasyonların analiz çalışmaları
- S transformasyonu yardımı ile deformasyonların analizinin yapılması
- Mierlo yöntemi ile deformasyonların analizi
- Kinematik modeller kullanılarak deformasyon analizi
- Cholesky çarpanlara ayırma yöntemi ile deformasyonların analizi
- θ^2 ölçütü veya Ortalama Aykırılıklar yöntemi ile deformasyonların analizi

3.6.6. Deformasyon modelleri

Deformasyonlar, beklenen hareket şekline, beklenen büyüklüğe ve yapının bulunduğu zeminin özelliklerine göre seçilen ölçme yöntemleri ile belirlenir ve analizi yapılır. Ölçme çalışmalarındaki yöntemler de deformasyonun biçimine, çalışmanın yapılacağı alana ve elde edilecek verilerden istenilen hassasiyete göre seçilir. Bütün bunlar dikkate alınarak statik, dinamik ve kinematik deformasyon modeli olmak üzere üç farklı deformasyon modeli geliştirilmiş, deformasyonlar bu modeller ile incelenmiştir.

3.6.7. Statik deformasyon modeli

Statik deformasyon modeli en basit deformasyonlar için tanımlanmış olan modeldir. Deformasyonların takibine konu olan obje ya da yapının karakteristik noktalarındaki, deformasyon vektörlerini zamandan ve etki eden kuvvetlerden bağımsız olarak tespit edilmesini sağlamaktadır. Bu model ile yapılan çalışmalarda tüm ağıın bir kez ölçülmesi sırasında noktaların sabit kaldığı kabul edilir (Öztürk ve Ünver, 1992). Geometrik değişimlerin başlangıç zamanı olarak ölçme çalışmaları bittikten sonraki süre kabul edilir ve belirli sıklıktaki aralıklarda tekrar ölçmeleri yapılır. Statik deformasyon modeli, jeodezideki yöntemler içerisinde en fazla tercih edilen analizi modeli olmuştur.

3.6.7.1. Dinamik deformasyon modeli

Dinamik deformasyon modeliyle objelerin sergilediği geçici davranışlarının yanında deformasyon oluşumuna sebep olabilecek kuvvetlerin zaman ve dış etkenlere dayalı olarak değişimlerini ve bu kuvvetlerle aralarındaki fonksiyonel ilişkileri tanımlamaktadır (Ayan, 1982). Bu deformasyon modelinde, dış kuvvetlerin etkisinde olan ve zaman içerisinde sistem hareketleri ile bunlara neden olan kuvvetlerin ya da bu kuvvetlerle orantılı büyüklüklerin fonksiyonu olarak tespit edilir (Demirel, 1993). Modelde doğru bir yorumlama yapılabilmesi için etki yapan her kuvvetin çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Örneğin bir su tüneli ele alınacak olursa suyun miktarındaki değişim, suyun akış hızı, kaplama içindeki gerilmeler, tünel etrafındaki yer kabuğu hareketleri deformasyon nedenleri olarak görülmektedir. Ya da bir baraj örneği ile de açıklamak gerekirse, barajın topladığı suyun hem yapıyı hem de baraj çevresindeki topoğrafyayı etkilediği, su seviyesindeki değişimlerin basınca olan etkileri, mevsimlik ısı değişimleri, yapının iç gerilimleri ve yer kabuğu hareketleri gibi her bir faktör deformasyonun sebepleridir. Deformasyonların tespit edilebilmesi, etkiyen kuvvetler ile yapı özelliklerinden oluşan bir dönüşüm fonksiyonu ile olur. Böylece deformasyonların yer, zaman ve frekans ilişkileri ortaya çıkarılır (Ayan, 1982).

3.6.7.2. Kinematik deformasyon modeli

Bu model ile üzerinde deformasyon araştırması yapılacak karakteristik noktalarda oluşan hareketler ve bu hareketlerin boyutları incelenmektedir. Deformasyonun

araştırılması, çalışma alanının uzun bir süre gözlenmesiyle elde edilmektedir. Örneğin bir bölgede yerkabuğunun hareketlerini tespit edebilmek için ölçümler yapılırken sadece nivelman ölçümlerinin yenilenmesi 3-4 yıl sürebilmektedir. Bu süre içinde nivelman noktalarına ait yükseklikler meydana gelebilecek bir hareketin etkisiyle değişebilir ve değerlendirme sonuçları pek güvenilir olmayacaktır. Bu durumda analiz çalışmalarında kriter olarak noktaların yükseklikleri değil yükseklik değişimleri zamanın bir fonksiyonu olarak ele alınmalı ve düşey hareketin hızı incelenmelidir (Doğruluoğlu, 2009).

Kinematik deformasyon modelinde dayanak ve obje noktalarının koordinatları zamanın fonksiyonları biçiminde ele alındığından X koordinat parametreleri vektörü zamana bağlı bir değişkendir. Bu da aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Doğan, 2002).

$$X(t) = X(t_k) + (t - t_k) V(t_k) + \frac{1}{2} a(t_k)(t - t_k)^2 \quad (3.4)$$

$X(t)$: t zamanına ilişkin durum vektörü

$X(t_k)$: t_k zamanına ilişkin durum vektörü

$V(t_k)$: Hız vektörü

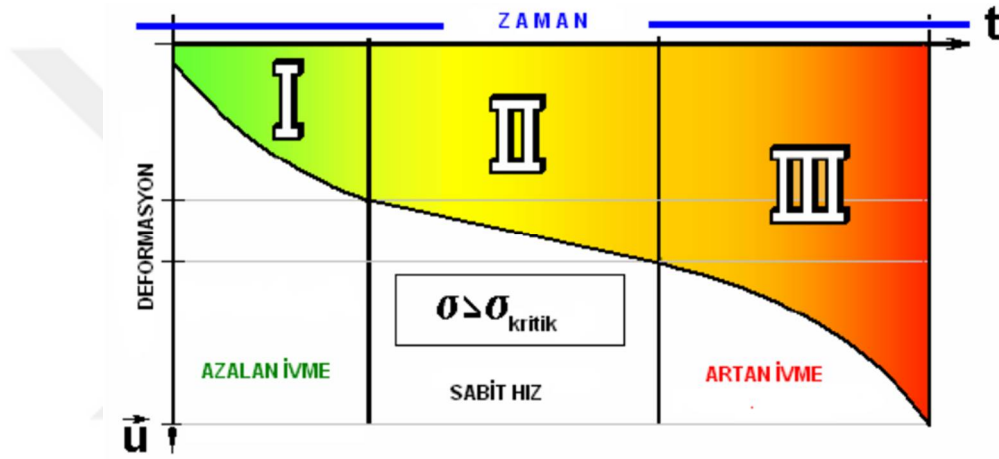
$a(t_k)$: İvme vektörü

3.6.8. Deformasyon ölçme yöntemleri

Mühendislik yapılarının inşaat çalışmaları ile sonrasında zeminde ve yapılarda oluşabilecek deformasyonların izlenmesi; hem iş güvenliği hem de inşaat alanının durağanlığı açısından büyük önem arz etmektedir. Kazı çalışmaları esnasında yapılan her ilerleme mesafesi için kayanın durağan, yapılan tahkimatın yeterli ve çalışılan ortamın güvenilirliği yapılan deformasyon ölçmeleri ile belirlenebilmektedir. Tünel yapım faaliyetlerinde ortaya çıkan en önemli problemlerden birisi de, kazının yapıldığı bölgede oluşabilecek yüzey oturmalarıdır. Gerekli tedbirlerin alınmaması durumunda tünel inşaatıyla birlikte ortaya çıkan bu yüzey oturması (tasman) yapıda çok ciddi yapısal hasarların oluşmasına neden olabilmektedir (Çeçen ve İncecik, 2008).

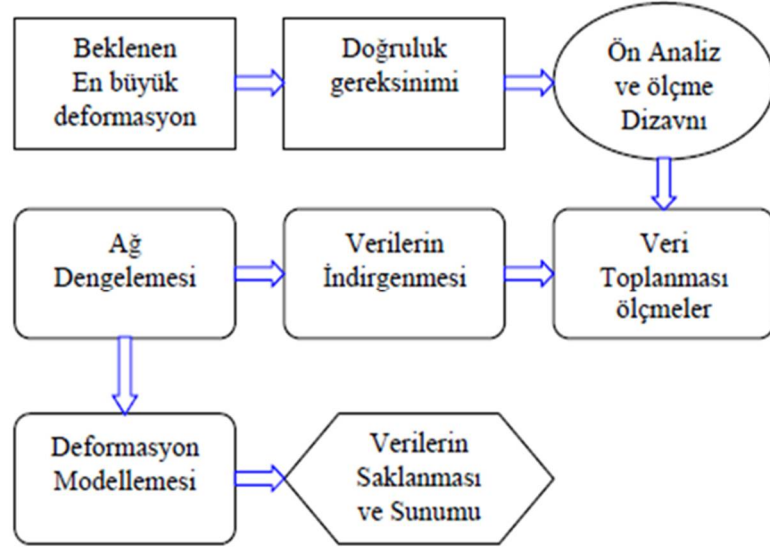
Tüm jeolojik birimler baskı sonrası yer veya şekil değiştirme eğilimindedir. Oluşabilecek değişimler deformasyon hızı ve sonucunda zeminin özelliklerine göre çeşitlilik göstermektedir. Kimi kayaç türleri artan deformasyonlara karşı koyamaz ve kazıda göçük oluşurken, kimi kayaç türlerinde dayanım kuvvetinin baskın gelmesiyle enerji sönmülenir ve oluşan deformasyon zaman içerisinde azalarak ve sonunda durmaktadır. Her kayaçta var olan kritik gerilme değerine ulaşıldığında zemin malzemesi

sabit gerilmenin etkisiyle sabit hızda harekete başlayacaktır. Kayalar zamana bağlı olarak iki farklı şekilde etki gösterebilir. Eğer kayacı etkileyen gerilme kritik gerilme kuvvetinden az ise oturmalar bir süre sonra duracaktır. Ters durumlarda, kayacı etkileyen gerilmeler kritik gerilme değerinden büyük olduğunda ise göçük meydana gelinceye dek deformasyon ve deformasyon hızında artış devam edecektir. Kayayı etkileyen gerilme değerlerinin zamanla artması söz konusu olduğunda öncelerde azalan, sonra ise sabit hızda hareket gösteren ve sonrasında artan bir ivmeli hareketin olduğu bir durum gözlemlenecektir (EMAY A.Ş., 2016). Şekil 3.50’de zaman içerisinde değişen deformasyon ilişkisi gösterilmiştir.



Şekil 3.50. Zamana bağlı olarak deformasyonların değişimi (Vardar, 2011).

Planlanan tünel güzergâhı boyunca deformasyonun belirlenebilmesi için yapılması gereken geoteknik ve mühendislik jeolojisi çalışmaları vardır. Öncelikli olarak yapılması gereken ve deformasyon belirleme çalışmalarına temel oluşturacak nitelikte işlem adımları gösterimi Şekil 3.51’de mevcuttur.



Şekil 3.51. Deformasyon belirleme çalışmaları işlem adımları

Deformasyonların belirlenmesinde sistemli ve sıralı çalışma yapmak önemlidir. Zemin bakımından kritik bölgelerin ve varsa yapıların saptanması gerekir ki bu bize karşılaşılabilecek deformasyonlar ve deformasyondan etkilenebilecek yerler hakkında bilgi sahibi olunabilsin. Yapıların ilk durumunun da belirlenmesi gereklidir. Böylece çalışma süreci boyunca meydana gelen değişimlerin tespiti ve karşılaştırma yapabilmek için altlık oluşturulmuş olunur. Deformasyon olabileceği beklenen yapılarda, maksimum değerde oluşabilecek deformasyon değerinin tahmini, yapılan işteki ölçme doğrulukları ile ölçme yöntemlerinin tespit edilmesi çalışmalarının amacına ulaşabilmesi için önemlidir. İzin verilen maksimum deformasyon oranlarının belirlenmesi tespit edilen deformasyonların istenilen aralıkta olup olmadığı ya da tehlike arz edip etmediği hakkında görüş sahibi olunmasını sağlayacak ve elde edilen sonuçları yorumlamada katkı sağlayacaktır. Sonrasında, bu ihtiyaçlara cevap verebilecek ölçme ağı tasarımı ve uygun ölçme teknikleriyle ölçülmesi çalışmanın diğer adımlarını oluşturur. Ölçülecek yapıların yerlerinin ve ölçüm çalışmalarındaki sürenin tespiti ile ölçüde kullanılacak nokta konumlarının belirlenmesi, deformasyon ölçme çalışmalarının verimli ve kısa sürede tamamlanmasını sağlayacak faktörlerdir. Planlı olarak yapılan her çalışma amaca bir adım daha yaklaştıracığı unutulmamalıdır. Ölçme yöntem ve aletlerinin seçimi, yetkin ölçüm ekibinin oluşturulması ölçü çalışmalarının doğruluğunu direk etkileyebilecek etmenler olduğu için gerekli özen gösterilmelidir. Sonraki çalışma adımları, elde edilen verilerin yorumlanması, işlenmesi ve belirlenen deformasyonların modellenerek analizi şeklinde sıralanır. Baraj, köprü ve tünel gibi mühendislik yapılarındaki inşaat

çalışmalarında, elde edilen deformasyon ölçme ve değerlendirme sonuçlarına göre çalışmalarda kademe kademe ilerleme yapılması gibi durumlar söz konusudur. Tünel çalışmalarında bunu en iyi şekilde görmek mümkündür.

Yapılardaki deformasyon belirleme çalışmalarında izlenecek işlem adımlarının farklı yapılarda benzerlikleri vardır ve aşağıdaki gibi özetleyebiliriz:

- Deformasyonu belirlenecek yapıda ilk durum belirleme çalışmalarının yapılması,
- İstenilen doğruluk ve amaca göre yöntemlerin belirlenmesi,
- Ölçme sıklığı ve yapılacak tekrar ölçmelerinin sayısı,
- Çalışmalarda kullanılması gereken cihaz ve ekipmanların belirlenmesi,
- Ölçme çalışmalarının yapılarak veri oluşturulması,
- Veri analiz ve değerlendirme çalışmalarının yapılması,
- Deformasyon modelinin oluşturulması,
- Elde edilen sonuçların rapor haline getirilmesi,

şeklinde sıralanabilir.

Çalışmaların sağlıklı bir şekilde devam etmesinde güvenlik tehlikesi oluşturabilecek herhangi bir hareketi tespit etmek amacıyla tünel kaplamalarının doğru ve sık izlenmesini sağlamak zorunludur. Tünel açmada deformasyon izleme çalışmaları genellikle aşağıdaki ölçme uygulamalarından bazılarını içerir (Dunnicliff, 1993):

- Tünel duvarlarının olası hareketlerinin izlenmesi ve genellikle kret yerleşimi ile yay hattı kapanması.
- Yüzey yapılarının oturmaları ve eğimleri dahil zemin yüzeyindeki deformasyonların tespit edilmesi.
- Tünel çevresindeki zeminde ve varsa yapılarda oluşan deformasyonlar.

Jeodezik ölçümler, hedef konumların zaman içinde mutlak koordinatlarının izlenmesini sağlarken, geoteknik ölçümler genellikle bir başlangıç durumuna göre (ilk ölçümün kaydedildiği anda) hedef konumların göreceli yer değiştirmelerini izlemeyi ve analizini sağlar (Hisatake, 1999). Jeoteknik ölçümler, hedeflerin başlangıç konumları jeodezik yöntemlerle elde edilmesiyle, üzerinde çalışılan hedef konumların zaman içinde mutlak koordinatlarını sağlayabilir. Tünel açma çalışmalarına ve kullanılan yöntemin özelliklerine bağlı olarak, deformasyon ölçümleri dijital kayıt ve telekomünikasyon sistemleri kullanılarak gerçek zamanlı olarak kaydedilebilir, işlenebilir ve değerlendirilebilir veya manuel olarak kaydedilebilir ve daha sonra bu veriler toplu olarak

işlenebilir. Kullanılan ölçme yöntemleri ne olursa olsun her deformasyon izleme adımı “dört sabit” ilkesine uygun olmalıdır (Liu, 2006). Bu "dört sabit" ilke: sabit aletler ve çubuklar, sabit gözlem personeli, sabit izleme yöntemi ve sabit izleme ortamı olarak kabul edilir.

3.6.9. Deformasyon izleme ekipmanları

Zemin hareketlerini izlemek için ekipman olarak aşağıdaki aletler kullanılmaktadır.

- İnklinometre
- Ekstanso-inklinometre
- Yüzey oturma bulonu
- Katlı ekstansometre
- Tesis izleme noktası
- Tünel içi konverjans
- Yük Hücresi (Loadcell) Ölçümleri
- Basınç Hücresi (Pressurecell) Ölçümleri
- Birim Deformasyon Ölçer (Strain Gauge) Ölçümleri
- Çatlak Ölçerler
- Gerilme Ölçerler

3.6.9.1. İnklinometre

İnklinometre aleti sondaj için açılan deliğin eksenine dik doğrultuda oluşan hareketlerin yerinin, büyüklüğünün ve 10-20°'lik sapma miktarları ile tünel içindeki yatay yönde oluşan hareketlerin ölçüldüğü bir alettir (Kalkan ve diğ. 2003). Yüzeyden itibaren belli derinliklerde oluşabilecek yatay hareketlerin izlenmesinde güvenilir bir yöntem olarak kabul edilen inklinometre ölçümleri, yatay ve düşey olarak açılmış sondaj kuyularına yerleştirilen 3 metre boyunda, sıcağa karşı dayanıklı ve yüksek sıkışma dayanımına sahip plastik veya alüminyum boruların ilksel konumlarından olan sapsmaların inklinometre cihazı aracılığıyla belirlenmesi esasına dayanır. Yerleştirilen sondaj deliklerine dik yöndeki hareketlerin belirlenmesi amacıyla kullanılmakta olan inklinometreler yardımıyla düşey doğrultudaki delik çevresinde oluşan 10-20° 'lik sapma durumları ölçülebilmekte, hareket noktası, büyüklük değeri ve yön bilgisi elde

edilebilmektedir. İnklinometreler delikteki yatay yönlü hareket bilgisini vermektedir. İnklinometrelerle yapılacak ölçme çalışmalarının aralığı da yapılan sondajlarla elde edilmiş olan veriler kullanılarak, tahmini yer değiştirme hareketinin hızına uygun olarak belirlenmelidir (Doğruoğlu, 2009).



Şekil 3.52. İnklinometre cihazının kurulum çalışması (Çeçen, 2007).

3.6.9.2. Ekstanso-inklinometre

Ekstanso-inklinometre diye tabir edilen ölçüm mekanizması, bir ekstansometre (uzama-kısalma durumlarını belirleme cihazı) ve bir inklinometre (yatayda oluşan deformasyonları belirleme cihazı)'nin bir araya gelmesinden oluşur. Ekstanso-inklinometre'nin kurulumu, inklinometre cihazının ölçme yapabilmesi için açılmış olan kuyu içerisine yerleştirilen boruların çevresine 1m'de bir konumlandırılan manyetik ringlerin kullanılmasıyla yapılmaktadır. Bu ringler sayesinde bu kuyu içerisinde herhangi bir uzamanın ya da kısalmanın ölçümünü de alınabilir hale gelmiş olur. Ringlerin bir metre aralıklarla yerleştirilmesinin nedeni ekstansometre aletinin kuyuya indirilen metal aksamı alıcı (probe) kısmının uzunluğundan kaynaklanmaktadır. Ölçüm mekanizmasının uzama-kısalma ölçüm kısmı yukarıdan aşağıya doğru probe'un salınması ve her bir metrede bir ölçüm alınması ile gerçekleşir. Kuyunun en üst noktası çökme veya şişmeye uğramamış olarak varsayılır ve aşağıya doğru her manyetik ring'in bir alt metredeki ring ile arasındaki mesafenin ne kadar değişime uğradığı ölçülebilir. Elde edilen bilgilerle toplam olarak kuyunun ne kadar çöktüğü ya da zeminde ne kadarlık bir hacim kaybı olduğu veya hangi bölgelerin aşırı sökülme maruz kaldığı gibi konular hakkında fikir sahibi olunabilir. Bu kuyu içindeki yatay deformasyon ölçümleri ise

inklinometre aleti ile aynı düzen içerisinde yapılmaktadır. Bu kuyularda ölçü çalışmaları ile elde edilen bilgilerin sağlıklı olmasını sağlayan en önemli faktör montajın itinalı ve doğru yapılmasıdır (Doğruoğlu, 2009).



Şekil 3.53. Tünel içerisinde kurulumu yapılan Ekstansometre cihazı (Yüceses, 2019).

3.6.9.3.Yüzey oturma bulonu

Yüzey oturma bulonu tünel çalışma alanının üzerindeki zeminde ortaya çıkabilecek hacim kayıplarını tespit edebilmek amacıyla kullanılır. Yüzeyin bir çanak misali sanki bir obruk oluşturmuşçasına çökeceği varsayılır. Yüzeydeki izleme noktaları yüzeyden en az 50 cm aşağı inen baş kısmı yuvarlak olan çelik bir çubuk kullanılarak test edilir. Çelik çubuk alt tarafından betonla zemine sabitlenir, böylece yüzeyle bir bütün olarak hareket etmesi sağlanır. Betonun üstünde kalan kısımdaki çelik çubuk kenarları kum ile doldurulur. Üst kısmı çelik bir yüzey koruyucusu ile muhafaza altına alınır. Bu yüzey izleme noktalarının montajından sonra her birinin koordinatları ölçülür, pafta üzerinde işaretlenir ve numaralar verilir. Ölçümleri nivelman yöntemiyle alınıp ilk okuma değerleri referans (baz) kabul edilir (Doğruoğlu, 2009).



Şekil 3.54. Yüzey oturma bulonu (URL-1).

3.6.9.4. Katlı ekstansometre

Katlı ekstansometre belirli bir derinlikteki zeminin ne kadar çöktüğünü belirlemek için monte edilir. Uzun ve serbest hareket edebilen bir borunun uç kısmında yer alan demirin zeminle birlikte hareket etmesi amaçlanır. Demirle ayrıca üstte bulunan boru içerisindeki serbest kısmının da aşağı yönlü hareketini sağlar. Montajdan sonra ve enjeksiyon prizinin sağlanmasından sonra yüzeyden kumpas yardımıyla serbest bölümün ne kadar içerde olduğu belirlenir ve bu değer referans olarak kabul edilir. Zaman içinde bu değerlerdeki değişimler kayıt altına alınır ve raporlar halinde saklanır. Mesafe değerlerindeki değişimler tünel kazısıyla ve ilerleme hızıyla bir bütün olarak yorumlanması gereklidir. Katlı ekstansometre isminden de anlaşılacağı üzere, tek katlı teşkil edilebileceği gibi, çok katlı da tesis edilebilir. Bu katların uzunlukları zemin özelliklerine ve bunların değişim gösterdiği bölgelere göre seçilir. Katlı ekstansometre tünellerin kazı çalışmalarında genellikle tünelin tam eksenine gelecek şekilde monte edilir. Eksende olacak şekilde tünel üzerine konumlandırılan ekstansometreler, en uzun katı tünelin üst kotundan 2 metre daha üstünde olacak biçimde yerleştirilir. Katlı ekstansometrelerle ekstanso-inklinometrelerin montajından sonra, kapak kısımlarından nivelman yöntemi yardımıyla kot ölçümü yapılır ve baz kotları belirlenir. Ekstansometreden kumpasla alınan ölçüm alt noktadaki demirin üst kapaktan ne kadar uzaklaştığı hakkında bilgi verir ama yüzeydeki deformasyonlar (oturmalar) göz önüne alınmalıdır (Doğruoğlu, 2009).

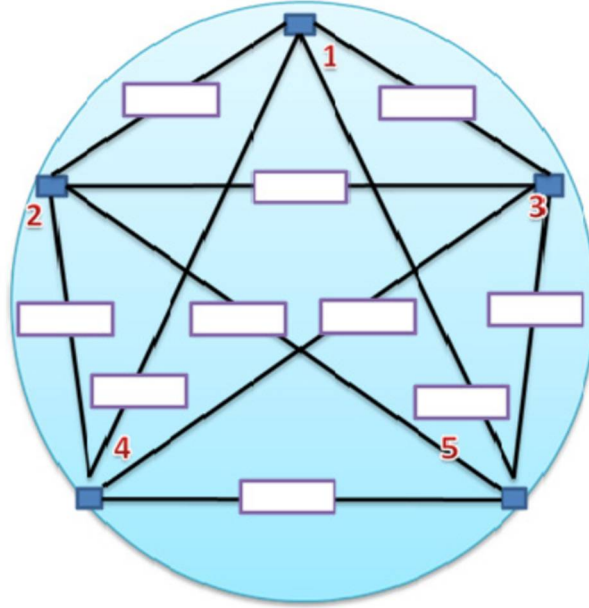
3.6.9.5. Tünel içi konverjans ölçümleri

Tünel içi konverjans ölçümü NATM tünellerde tercih edilen bir sistemdir. Tünelde kazı çalışmalarından sonra yapılan kaplama faaliyetleri sonrası montajı yapılır. Nihai beton kaplaması yapılmadan önce yöntemin uygulamasının tamamlanmış ve elde edilen sonuçlarla deformasyonun sönümlendiği belgelendirilmelidir. TBM ile yapılan çalışmalarda kaplamada ilk ya da son diye kavram yoktur, tek kaplama yapılmaktadır. Tünelde kullanılan makineler çok uzun ve de yüksek olabildiğinden kazı çalışmaları sonrası prizmaların montajı yapılamamaktadır. En önemli deplasmanlar ise kazı sonrası oluşmaktadır. Bu nedenle prizmalar çakılsa da anlamlı sonuçlar elde edilemeyecektir. Şerit ekstansometre kullanılarak konverjans ölçmeleri 0.01 mm hassasiyete sahip ölçme aletinin kullanılmasıyla tünelin tavanında ve duvarlarında relatif hareketlerin takip edebilmek için kullanılmaktadır. Ölçümler bir tanesi tavan kısmında ve ikişer tanesi de yan duvarlarında olacak şekilde toplamda beş tane toplama bulonunun kullanılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Çalışılan tünelde yaklaşık her 20-25 m’de bir ölçüm kesitleri oluşturulur. Bu mesafe tünel zeminin sağlamlığına göre yani deformasyon değerlerinin büyüklüğüne ve sıklığına göre değişebilir.

Konverjans ölçümlerinin zamanlaması şu şekildedir:

- Kazı çalışmaları tamamlandıktan hemen sonra toplama bulonlarının konumlandırılmasıyla ve püskürtme betonunun prizini almasıyla birlikte ilk ölçmeler yapılır.
- Çalışma yüzeyi (ayna) ölçü kesitinin 10 metre ilerisine gidinceye kadar, günlük olarak ölçme çalışmaları yapılmalıdır.
- Ayna ölçü kesitinin 30 metre ilerisine geçinceye kadar da, ölçmeler gün aşırı olacak şekilde yapılmaya devam edilir. 30 metreyi aştığı durumlarda ise ölçmelerin devam edip etmeyeceği deformasyon durumuna göre belirlenir.

Konverjans ölçümünde temel olan ara mesafelerdir. İlk okumada elde edilen verilere göre ara mesafe baz alınarak daha sonra bu tünel kesitinin hareketi noktaların birbirlerine yakınlaşıp uzaklaşması ile belirlenir. Prizmaların yerel koordinatlarda yerleri tespit edilip bu noktalar arası mesafeler formüllerle vektörel olarak belirlenir. Bu sayede ölçümler daha hassas yapılabilmekte ve daha hızlı okuma yapılabilmektedir. Şekil 3.55’te 5 nokta tesis edilen ve 10 adet ara mesafe değeri bulunması gereken kesitin görünümü verilmiştir (Doğruoğlu, 2009).



Şekil 3.55. Konverjans kesiti ve ara mesafelerin görünümü (Doğruluoğlu, 2009).

Konverjans ölçümlerinin sağladığı avantajlar (Çeçen, 2007);

- Kolayca uygulanabilir olmasından dolayı hızlı çalışma yapılabilir,
- Tek bir noktadan okumaların yapılabiliyor olmasından dolayı çalışmalarda bir kişi yeterlidir,
- Ölçme duyarlılığının ve hassasiyetin yüksekliği verilere olan güveni arttırmaktadır,
- Portatif, hafif ve kolay taşınabiliridir,

Konverjans ölçmelerindeki dezavantajlar ise;

- Yalnızca göreceli ölçüm değerleri vermektedir,
- Ölçüm hassasiyetleri sıcaklık, basınç gibi faktörlerin değişmesinden etkilenmektedir.

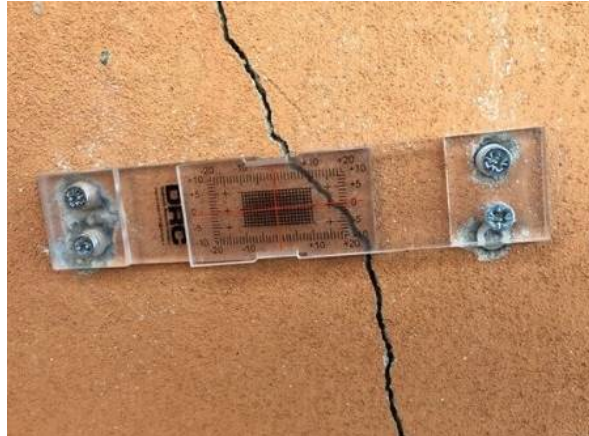
3.6.9.6.Tesis izleme noktaları

Bu yöntem şehir içi yerleşim birimlerinin olduğu metro tünel projelerinde deformasyon ve etiklerinin izlenmesi için uygulanabilir. Tünel güzergâhlarında ilk olarak tünel kazısı sonucu etkilenecek alanlar belirlenir. Bu bölge içine giren binalara tesis izleme noktaları yerleştirilerek bu binaların yatayda ve düşeyde olabilecek ya da olması beklenen eşik değerindeki hareketler izlenir. Bu deformasyonların ölçümü insanların can güvenliği açısından ve tünelde uygulanan kazı yönteminin doğruluğunun takibi açısından

hayati derecede önemlidir. Bu tarz tünel çalışmalarındaki deformasyonlarda yapıların beton ve proje kalitesi, temel sisteminin ve bölge jeolojisinin etkisi çok büyük olmaktadır. Örneğin tünel kazıları yer altı suyunun drene olmasına neden olduğu için killi zeminlerde konsolidasyon oturmalarının olması beklenen durumlardandır. Binalarda takip edilmesi gereken deformasyonlardan en önemlisi farklı oturma kriteridir. Bu doğrudan binanın temel sistemi ile bağlantılı olarak oluşan deformasyonlardır. Tesis izleme noktaları bir merkezden total station ile koordinatları alınarak tespit ve takip edilir. Yerleştirilen prizmalara total station milimetrenin % 1'i hassasiyetle otomatik bağlanabilir özellikte olması hassas çalışma yapabilme açısından önemlidir. Yeni sistemlerde bir bölgedeki prizmalar merkez bir noktaya Total Station aleti kurularak otomatik okuma moduyla istenilen aralıklarla sürekli olarak ölçülebilmektedir. Bu ölçülerin internete aktarılıp küçük paket programlar ile grafiklenip her yerden anlık takip edilebilmesi de teknolojik gelişmeleri takip etmenin çalışmalarda sağladığı kolaylıklardan birisi olmuştur (Doğruoğlu, 2009).

3.6.9.7.Çatlak ölçerler

Yüzeyde oluşan çatlakların ilerleme yönünü ve miktarını tespit edebilmek amacıyla çatlak ölçerler kullanılmaktadır. Yapılardaki çatlakların üstüne monte edilerek çatlakların yer değiştirip değiştirmediğini mm olarak tespit edilmesini ve sürekli takip ile mümkünse ilerleme hızlarının belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır (Akçay, 2019).



Şekil 3.56. YüzeYE tesis edilmiş çatlak ölçer (URL-2).

3.6.9.8. Gerilme ölçerler

Tünel içinde yapılan beton kaplamalarda oluşabilecek deplasmanlarının tespit edilmesi amacıyla kullanılır. Gerilme ölçerlerin bir çeşidi olan gömme tipi gerilme ölçerler iki ucunda flanşlar arasında gerilmiş, yüksek gerilmeye sahip olan bir telden ve paslanmaz koruyucu çelik tüpten oluşmaktadır. Gerilme ölçerler betonun içine gömüldüğü zaman beton içindeki kuvvet etkisi cihaz flanşları arasındaki rölatif hareketleri oluştururlar, sonuçta da tellerde bir gerilme değişmesi meydana gelir ve bu gerilmelerden kaynaklı oluşan deplasmanlar, teldeki olağan titreşim frekansının etkilenerek bir sinyalin ortaya çıkmasına neden olur. Ortaya çıkan sinyal, esnek olan tel yardımıyla ölçme aletine aktarılır. Gerilme ölçerler, kaplama betonun dökülmesi sırasında özenli bir şekilde kaplama betonu içerisine konumlandırılırsa, sadece bir tane uzaktan okuma ünitesinin yardımıyla yapıdaki deplasman davranışlarına dair bilgiler elde edilebilir (Güven, 2009).



Şekil 3.57. Koruma betonu içerisine tesis edilebilen gerilme ölçer (URL-3).

3.6.9.9. Yük hücresi (Loadcell) ölçümleri

Ankraj tip yük hücreleri, kaya bulonlarıyla ankrajların karşılaştıkları gerilmelerin sonucunda yük değişmelerini ölçmeye yarayan özel sensörlerdir. İstinat yapılarının üzerlerindeki jeoteknik izlemelerin yapılması sırasında muhtemel, serbest kalmadan kaynaklanan kayıpların ya da zeminin basıncından kaynaklanan artışları belirlemeye ve yorumlamayı sağlamaktadırlar. Yük hücrelerindeki titreşen hareketli teller paslanmayan çelik sensörlerdir. Hücreler herhangi bir yük etkisinde kaldığında, göstergenin gerilme

kuvvetinde değişme meydana gelecektir. Yük hücreleri çok çeşitli boyut ve ölçüm tekniklerine göre farklı farklı üretilir. Sensörlerin korunması için yapılabilecek iyi biri yalıtım ile cihazların olumsuz çevresel koşullar altında da kullanılabilmelerini sağlayacaktır.

Kullanıldıkları alanlar:

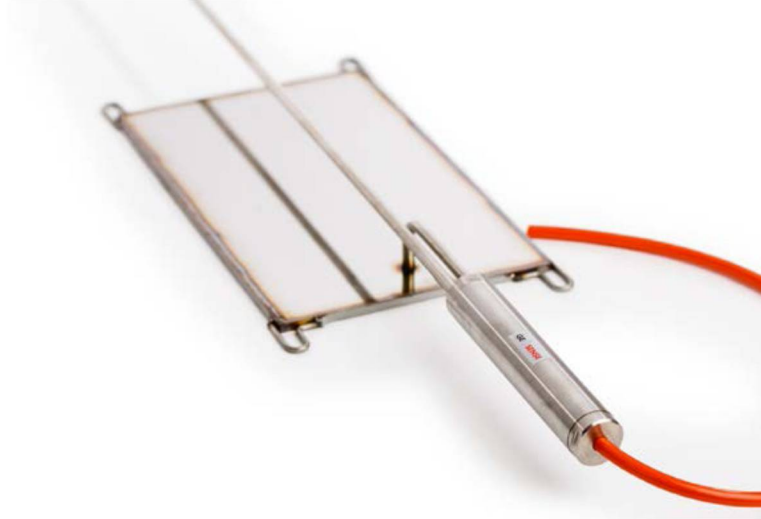
- Ankraj çeşitliliklerinin ölçüm çalışmaları için
- Tünel, baraj, köprü ve viyadük gibi yapılarda
- Zemin ivisinde ve kaya bulonlarında
- Heyelan bölgelerinde
- VW türü yk hücrelerinde



şekil 3.58. VW tipi yük hücresi (Loadcell) (Yüceses, 2019).

3.6.9.10. Basınç hücresi (Pressurecell) lmleri

Tünel içerisindeki basınçölçerler püskürtme betonunun içinde oluşan gerilme dağılımını ölçebilmek amacıyla radyal ve teğetsel olmak üzere iki basınç hücresi olarak yerleştirilirler. Bu cihazların çevresi oluşabilecek korozyon durumlarına karşı dikdörtgen paslanmaz çelikten oluşan plakalarla kaynak yapılarak kapatılmıştır. Kaynak yapılmış levhaların arasına yağ doldurulur ve bu da basınç dönüştürücü olan hücrelere bağlanır. Hassas yüzeye uygulanan kuvvet yağ basıncında artış meydana getirir. Hücre içerisindeki yağın basıncı transdüktör aracılığıyla frekans sinyali şeklinde okuma cihazına iletilerek okuma yapılır (Yüceses, 2019).



Şekil 3.59. NATM Çalışmalarında kullanılan basınç hücresi (Pressurecell) ölçer (URL-4).

3.6.9.11. Birim deformasyon ölçer (Strain Gauge) ölçümleri

Titreşen telli deformasyon ölçerler, kullanıldıkları zeminin içerisinde meydana gelen gerilmelerle ortam ısısının tespit edilebilmesinde kullanılmaları amacıyla geliştirilmiştir. VW Strain Gaugeler uç kısımlarında flanşlar bulunduran paslanmayan çelikten bir boru kullanılarak yapılmıştır. Boru içerisinde, borunun iki ucu arasında gerdirilmiş biçimde tutulan çekme bobini yanında çelik şerit vardır. Flanşlara uygulanan püskürtme betonu içerisindeki gerilimin borulara ve çelik şeride iletilmesiyle şeridin gerginliğinde de değişme meydana gelir. Gerginlik değerleri değişen çelik şeridin yanındaki bobinin frekans değerinin değiştiğini bildiren bir sinyal ortaya çıkacaktır. Bu sinyalin okuma ünitesine iletilmesinden sonra sinyal analiz edilir ve bir değer ekranda belirir (Yüceses, 2019).



Şekil 3.60. Birim deformasyon ölçer (Strain Gauge) (Yüceses, 2019).



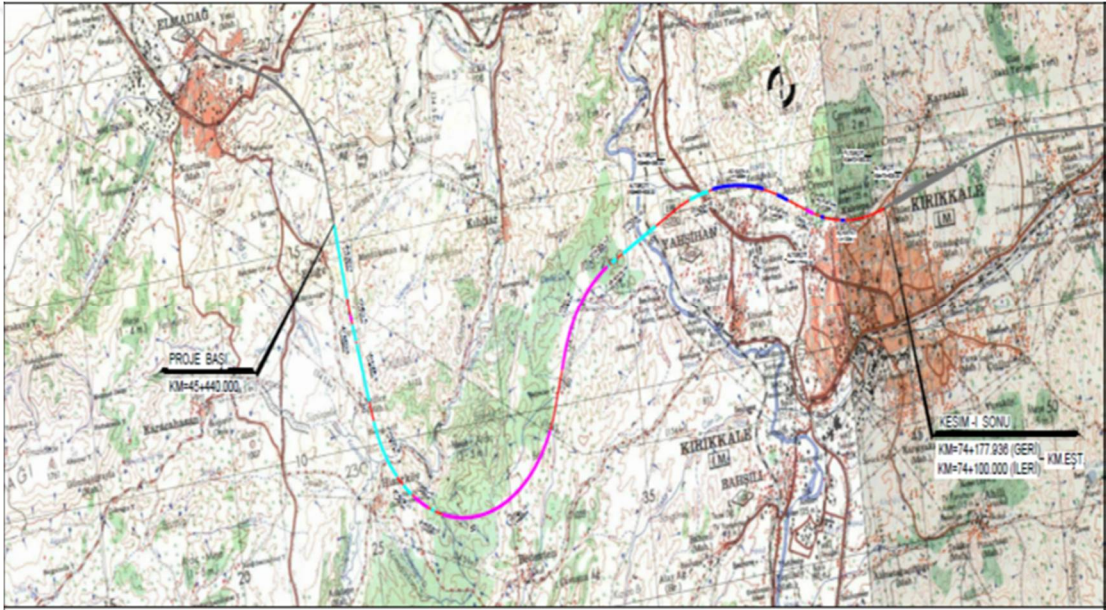
Şekil 3.61. Birim deformasyon ölçer (Strain Gauge) okuma cihazı (Yücese, 2019).



4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

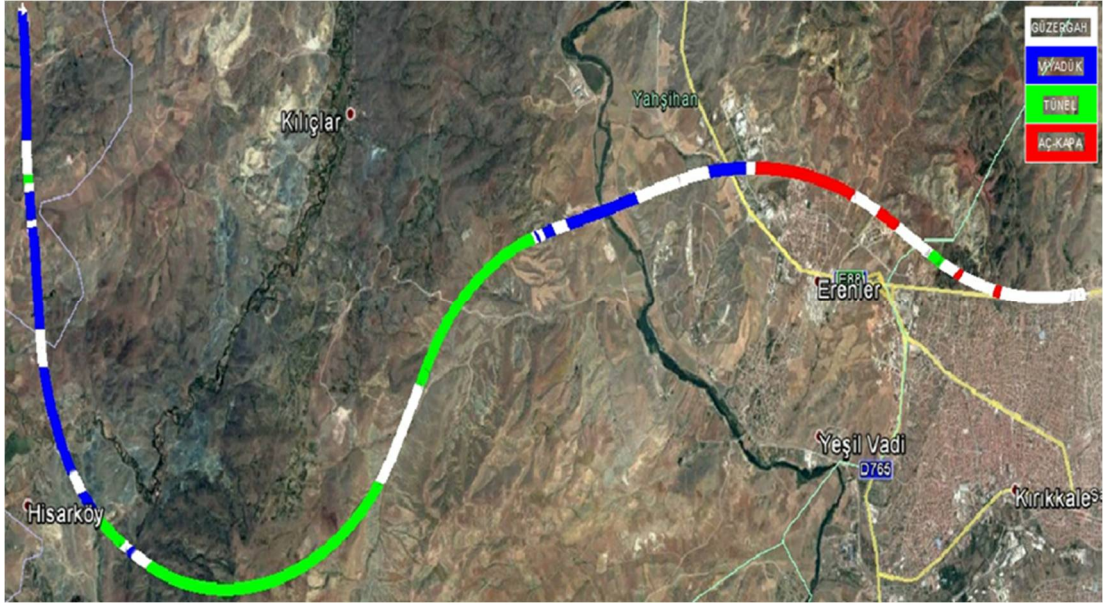
4.1. Çalışma Bölgesi ve Projenin Tanıtılması

YDA İnşaat A.Ş.'nin üstlenmiş olduğu Ankara - Sivas Demiryolu Projesi Kayaş – Kırıkkale arası Kesim 1 (Elmadağ – Kırıkkale) (Km: 45+400 – Km:74+100 = 28.660 m) arası altyapı inşaatı yapım işlerini kapsayan proje, tarihi İpek Yolu'nu modernize bir şekilde hayata geçirerek Balkanlar'ı Türkiye üzerinden Orta Asya'ya bağlayan, ülkemizin ve komşu ülkelerin ekonomilerine önemli katkılar sağlayacak olan önemli bir ulaşım projesidir.



Şekil 4.1. Ankara – Sivas YHT Projesi Elmadağ – Kırıkkale Kesim 1 Güzergâh Paftası

Ankara – Sivas Demiryolu Projesi Elmadağ – Kırıkkale arasını kültürel, turizm ve ekonomik açıdan birbirine bağlayacak olan Altyapı İnşaatı Yapım İşi uhdesinde toplamda 8.418,50 metre uzunluğunda 5 adet Tünel, 1.796,80 metre uzunluğunda 6 adet Viyadük, 2.570 metre uzunluğunda 4 adet Aç-Kapa, 66,00 metre uzunluğunda 3 adet Alt Geçit, 130,00 metre uzunluğunda 3 adet köprü ve 40 adet Menfez altyapı imalatı bulunmaktadır. Doğanın güzelliğini ve dengesini bozmadan, en ekonomik ve ergonomik şekilde ihale edilmiş olup Altyapı İnşaatı Yapım İşi Kesim 1 projesi, Km:45+440 Edige Köyü mevkiinden başlayarak Km:74+100 Kırıkkale çıkışında son bulmaktadır.

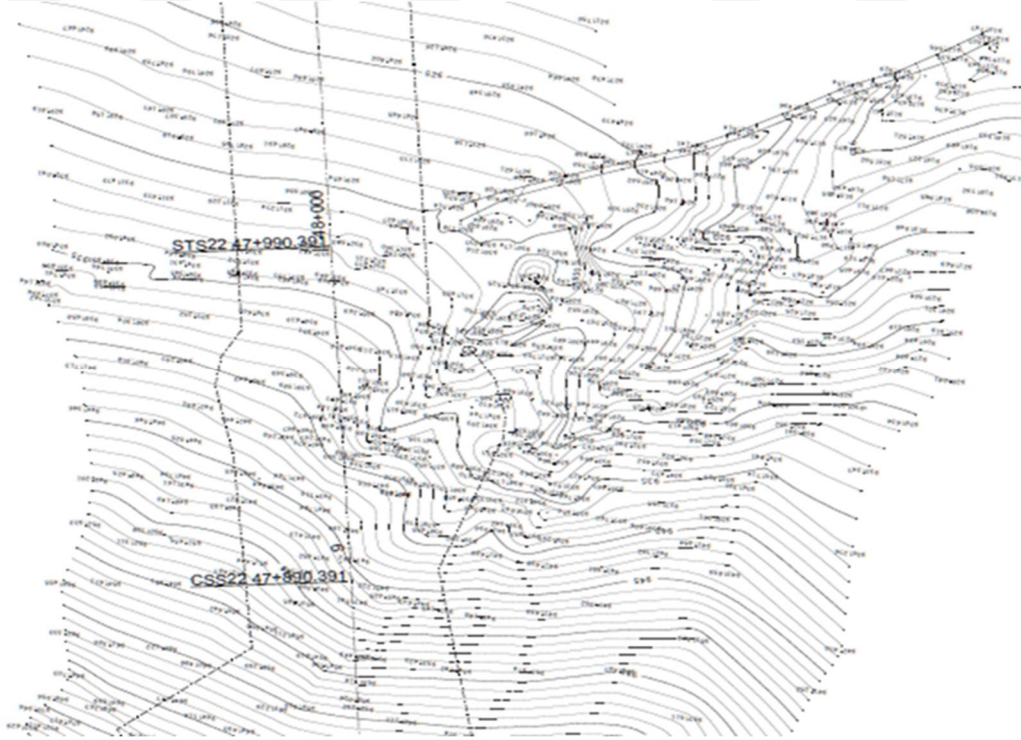


Şekil 4.2. Ankara – Sivas Demiryolu Projesi Elmadağ – Kırıkkale Kesim 1 Güzergâhı Google Earth Gösterimi

Tünel kazı çalışmalarının yönlendirilmesi en önemli çalışma adımı olup, bunun için gerekli ölçü ağının tesis edilmesi gereklidir. Tünel kazı çalışmalarına başlamadan önce yapılması gereken çalışmalara bölüm 3.2’de değinilmiştir. Tüm çalışmaların temelini oluşturacak olan ölçüm ağının oluşturulması uygulamanın ilk basamağını oluşturmuştur. Bu kapsamda bölgesinin sayısal haritalandırma çalışmaları ile nirengi ve poligon noktalarının tesisi yapılmıştır.

NoktaNo	Y	X	Z	NoktaNo	Y	X	Z
34031	544691.863	4414681.144	832.844	34032	544691.868	4414678.272	832.886
34033	544692.067	4414705.801	823.810	34034	544692.152	4414707.131	833.992
34035	544692.278	4414707.185	834.493	34036	544692.518	4414705.980	834.014
34037	544692.563	4414722.544	837.425	34038	544693.409	4414712.877	834.611
34039	544693.414	4414684.307	833.083	34040	544694.150	4414719.921	835.824
34041	544694.578	4414645.030	831.573	34042	544694.892	4414693.731	823.849
34043	544695.076	4414715.559	835.697	34044	544695.330	4414693.710	833.995
34045	544695.577	4414692.611	834.002	34046	544695.677	4414692.526	834.492
34047	544695.800	4414709.973	834.782	34048	544695.846	4414706.951	835.917
34049	544696.456	4414675.413	833.086	34050	544696.704	4414721.922	836.904
34051	544697.281	4414691.990	833.852	34052	544697.654	4414693.580	834.943
34053	544699.913	4414718.888	836.469	34054	544700.039	4414737.620	839.227
34055	544700.718	4414665.133	832.317	34056	544701.323	4414733.837	838.961
34057	544701.340	4414682.679	833.821	34058	544702.551	4414656.109	832.135
34059	544703.075	4414708.944	836.175	34060	544703.765	4414652.188	831.665
34061	544704.287	4414650.273	830.547	34062	544704.385	4414730.707	838.828
34063	544705.150	4414648.774	831.363	34064	544705.233	4414733.067	839.413
34065	544705.379	4414693.573	834.268	34066	544705.509	4414730.581	838.750
34067	544706.202	4414722.775	837.439	34068	544706.337	4414695.404	835.080
34069	544707.222	4414710.151	836.397	34070	544707.967	4414687.855	834.615
34071	544710.121	4414681.168	834.522	34072	544710.563	4414731.936	838.920
34073	544711.093	4414733.868	839.831	34074	544711.137	4414698.493	835.658
34075	544711.629	4414732.847	839.516	34076	544712.580	4414648.992	832.131
34077	544712.701	4414688.881	835.086	34078	544713.291	4414683.809	834.873
34079	544714.035	4414672.943	833.807	34080	544714.581	4414733.208	840.049
34081	544714.581	4414734.731	840.446	34082	544714.846	4414712.132	836.850
34083	544715.365	4414675.510	834.092	34084	544715.567	4414733.075	838.921
34085	544716.103	4414724.346	837.794	34086	544716.464	4414668.642	833.608
34087	544717.170	4414741.854	840.319	34088	544717.790	4414663.120	832.895
34089	544717.828	4414700.821	836.468	34090	544719.064	4414737.854	840.537
34091	544719.452	4414656.915	833.053	34092	544720.669	4414653.787	831.096
34093	544720.906	4414652.298	831.870	34094	544722.203	4414734.242	839.111
34095	544724.511	4414726.410	838.991	34096	544725.330	4414687.633	835.876
34097	544726.034	4414680.029	834.964	34098	544726.172	4414736.726	841.718
34099	544726.214	4414716.461	838.384	34100	544727.083	4414693.973	836.648
34101	544728.558	4414672.626	834.227	34102	544728.763	4414704.473	837.717
34103	544729.621	4414652.711	832.638	34104	544732.323	4414736.472	841.582
34105	544734.270	4414745.049	842.774	34106	544734.376	4414656.747	831.591
34107	544734.481	4414655.045	832.304	34108	544735.066	4414740.655	842.868
34109	544735.296	4414669.556	833.937	34110	544735.342	4414738.619	843.111
34111	544736.768	4414662.449	833.667	34112	544738.451	4414689.157	836.995
34113	544739.382	4414727.437	840.192	34114	544739.492	4414682.993	836.262
34115	544740.850	4414698.147	837.810	34116	544742.248	4414675.050	835.458
34117	544742.348	4414706.403	838.696	34118	544742.388	4414715.783	839.217
34119	544747.130	4414739.459	843.672	34120	544747.361	4414656.690	833.207
34121	544747.656	4414748.220	843.797	34122	544749.192	4414743.806	843.694
34123	544749.673	4414660.094	831.934	34124	544750.627	4414658.473	832.908
34125	544750.807	4414692.327	838.038	34126	544751.418	4414683.809	837.517
34127	544752.742	4414678.576	837.013	34128	544753.712	4414673.630	834.863
34129	544753.792	4414665.553	834.611	34130	544754.168	4414699.283	838.585
34131	544754.820	4414714.256	839.392	34132	544755.375	4414729.664	840.677
34133	544756.997	4414742.101	843.903	34134	544758.800	4414706.179	839.119

Şekil 4.3. Proje alanının nirengi ağının kurulması çalışmalarında oluşturulan nokta koordinatları.



Şekil 4.4. Proje alanının sayısal haritalandırma çalışmaları.

Bu çalışmada ana uygulama alanı olarak seçilen tünel Tünel-15 olup toplam uzunluğu 4.593,20 metredir. Zemin koşulları ve örtü kalınlıkları değişken olan tünel çalışma bölgesinde, tünelin hızlı bir şekilde tamamlanması için tünel giriş ve çıkış şeklinde 2 noktadan kazı çalışmalarına başlanılmış iken, Güvenlik-2 tüneline ana tünelin güzergâhına ulaşılarak sağ ve sol tüp olacak şekilde 2 yeni kazı bölgesi daha oluşturulmuştur.



Şekil 4.5. Ana tünel giriş ağzı (Tünel-15 Çıkış).



Şekil 4.6. Güvenlik tüneli giriş ağzı (Tünel-15 Güvenlik-2 Tüneli).



Şekil 4.7. Güvenlik-2 Tüneli içerisinde ana tünel çalışmalarını hızlandırmak için açılmış olan, Sağ ve Sol Tüp olarak adlandırılan iki yeni tünel ağzının oluşturulduğu T bölgesi.

Tünel tip kesiti jeolojik koşullar göz önüne alınarak taban kemersiz ve taban kemerli olmak üzere iki tip halinde geliştirilmiştir. Taban kemersiz tünel tip kesitinin B2 ve B3 sınıfı kayalarda kullanılması öngörülmüşken, taban kemerli tünel tip kesitinin C2 ve C3 sınıfı kayalarda kullanılması öngörülmüştür. Yapılan analizler sonucunda, T15 tünelinde kalıcı destek sistemi için öngörülen iç kaplama kalınlığı 40 cm olarak belirlenmiştir (beton sınıfı: C25). Tünel desteklemesi Yeni Avusturya Yöntemi (NATM) prensiplerine göre tasarlanmaktadır. Bu yöntem güvenli çalışma ortamı ve de maliyet açısından uygunluğu göz önünde bulunduran bir takım kriterleri barındırmaktadır. Kazı öncesi stabil halde olan kayadaki gerilme kuvveti tünel çalışmaları sırasında etkiler sonucu değişime uğrarken çevresine de bu gerilimi paralel bir şekilde dağıtmakta ve deformasyonları oluşturmaktadır. Kaya kütleindeki deformasyonun rijit bir destek elemanı ile önlenmesi durumu, destek elemanının fazla yük altında kırılarak kırılma, kopma gibi durumlarını beraberinde getirecektir. Bunun önüne geçebilmek amacıyla destekleme elemanlarının belirli miktarda deformasyon oluşumuna izin vereceği sünek-esnek yapıda olmaları daha uygun olacaktır. Yani amaç kayanın durağanlığının sağlamak için, hasır çelik ile püskürtme betonunun birlikte kullanıldığı, bu yapının kaya bulonları ile desteklendiği bir ince ve esnek bir destek sistemi uygun olacaktır.

Yeni Avusturya Yönteminde destekleme uygulamalarının zamanlaması çok önemlidir. Bu çalışmalar kazı sonrası hemen yapılırsa fazlaca yük ile karşı karşıya kalacağından yeterli olmayacaktır. Destek uygulamalarının yapılmasında gecikme durumunda ise salınımlar artacağından göçük meydana gelebilir. Destekleme

çalışmalarının uygun zamanda yapılabilmesi için tüneldeki kazıya paralel olarak düzenli ve sistemli oturma ve gerilme ölçmeleri yapılmasıyla elde edilen bilgilerin uzman bir ekipçe yorumlanması gerekir. Bu ölçme sonuçları ayrıca destekleme uygulamalarının projede belirtilenlere kıyasla daha zayıf ya da kuvvetli yapılabildiği yapılmamasında karar verilmesinde kullanılır.

Tünellerin durağanlık analiz çalışmalarında Plaxis sonlu eleman programında bulunan zemindeki plastik davranışları modelleyen ‘Hardening Soil’ modülünden faydalanılmıştır. Modülde ihtiyaç duyulan veri türleri; zemin birim başına ağırlık değeri, iç sürtünme açısı (ϕ), kohezyon (c), elastisite değeri (E) ve poisson oranı (ν) girilmektedir. Kazının zemin programında yer alan on beş noktadan oluşan üçgen elemanların kullanılmasıyla modelleme yapılmıştır. Bu elemanlar dokuzuncu dereceden integrasyon olanağı sağlamaktadırlar. Destekleme sistemlerini meydana getiren püskürtme betonu ve iç kaplama elemanları, program içerisinde özel plak elemanlarıyla kaya bulonlarının ise özel ankraj elemanlarıyla modellenmesi yapılmıştır. Sistemin kazı aşamalarında kullanılan zemin elemanları kaldırılarak ve gerekli destek elemanları konularak modelleme yapılabilmektedir. Modül oluşan yeni durum için dengeleninceye kadar iteratif olarak çalışmaya devam eder. Analiz sonucunda her kazı aşamasında tünelde oluşan deplasman, moment, kesme, eksenel kuvvetleri ve kaya bulonlarına gelen eksenel kuvvet değerleri hesaplanabilmektedir. Ayrıca zemin elemanlarında oluşan deplasman, efektif ve total gerilmeler ve plastikleşen bölgeler görülebilmektedir.

Tünel güzergâhında değişen tünel tipleri, kaya sınıfları ve örtü kalınlıklarını analiz edebilecek şekilde, analizlere esas sekiz adet kesit belirlenmiş ve analizler bu tip kesitler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Aşağıda her kesit için yapılan analiz sonuçları ve buna göre tünel ilerlemesini belirleyen çelik iksa aralıkları ile her kesit sınıfı için kesit tahkik sonuçları özetlenmiştir (Kayaş-Yerköy Demiryolu / Kesim 1 Tünel – 15 Hesap Raporu).

Çizelge 4.1. Km: 53+910 – 53+995, 54+035 - 54+050, 54+325 – 54+360, 54+435 – 54+480, 54+985 – 56+460, 58+285 – 58+450, 58+515 - 58+555 ve 58+665 – 58+710 Kesitleri (Kayaş-Yerköy Demiryolu / Kesim 1 Tünel – 15 Hesap Raporu)

Destekleme Sınıfı	C2
Püskürtme Betonu (cm)	25
Hasır Çelik (Püskürtme Beton)	2 X Q 589/443
Çelik İksa	I 160
Çelik İksa Aralığı (m)	1.00
İksa kurulum toleransları	Yapım toleransı 10 cm ve deformasyon toleransı 10 cm
Enjeksiyonlu Süren	ϕ 1.5'' boru süren, 30-40 cm ara ile, L=4.00 m
Kaya Bulonu Çapı (mm)	28

Kaya Bulonu Aralığı (mm)	1.00 x 1.00
İç Kaplama Betonunu (cm)	40
Hasır Çelik (İç Kaplama)	2 X Q 589/443

Çizelge 4.2. Km: 54+985 – 56+460 Kesitleri (Kayaş-Yerköy Demiryolu / Kesim 1 Tünel – 15 Hesap Raporu)

Destekleme Sınıfı	C2 (Özel Tip)
Püskürtme Betonunu (cm)	30
Hasır Çelik (Püskürtme Beton)	2 X Q 589/443 + ϕ 16/15 ek donatı (üst yarı)
Çelik İksa	I 200
Çelik İksa Aralığı (m)	1.00
İksa kurulum toleransları	Yapım toleransı 10 cm ve deformasyon toleransı 15 cm
Enjeksiyonlu Süren	ϕ 1.5''boru süren, 20 cm ara ile, L=4.00 m
Kaya Bulonu Çapı (mm)	28
Kaya Bulonu Aralığı (mm)	1.00 x 1.00
İç Kaplama Betonunu (cm)	40
Hasır Çelik (İç Kaplama)	2 X Q 589/443 + ϕ 16/15 ek donatı (üst yarı)

Çizelge 4.3. Km: 53+995-54+035 ve 58+450-58+515 Kesitleri (Kayaş-Yerköy Demiryolu / Kesim 1 Tünel – 15 Hesap Raporu)

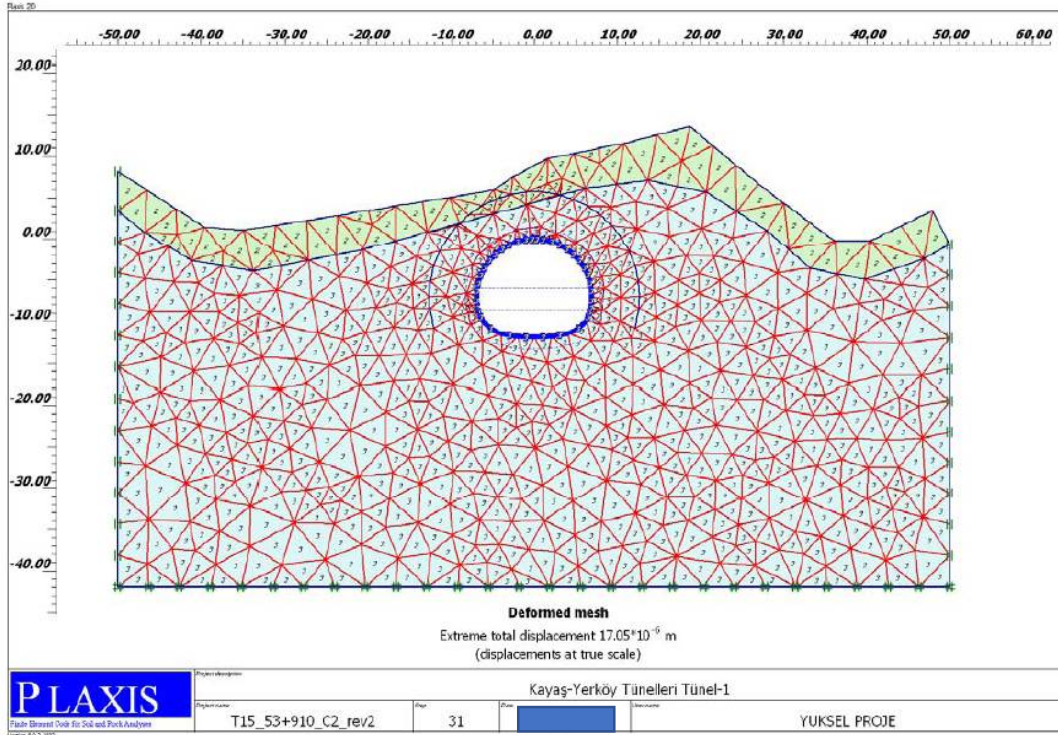
Destekleme Sınıfı	Özel Kazı Destek (C2)
Püskürtme Betonunu (cm)	25
Hasır Çelik (Püskürtme Beton)	2 X Q 589/443
Çelik İksa	I 160
Çelik İksa Aralığı (m)	0.80
İksa kurulum toleransları	Yapım toleransı 10 cm ve deformasyon toleransı 15 cm
Enjeksiyonlu Süren	ϕ 4''boru süren, 30 cm ara ile, L=9.00 m
Kaya Bulonu Çapı (mm)	28
Kaya Bulonu Aralığı (mm)	1.00 x 0.80
İç Kaplama Betonunu (cm)	40
Hasır Çelik (İç Kaplama)	2 X Q 589/443

Çizelge 4.4. Km: 57+395 – 57+725 ve 57+775 - 58+120 Kesitleri (Kayaş-Yerköy Demiryolu / Kesim 1 Tünel – 15 Hesap Raporu)

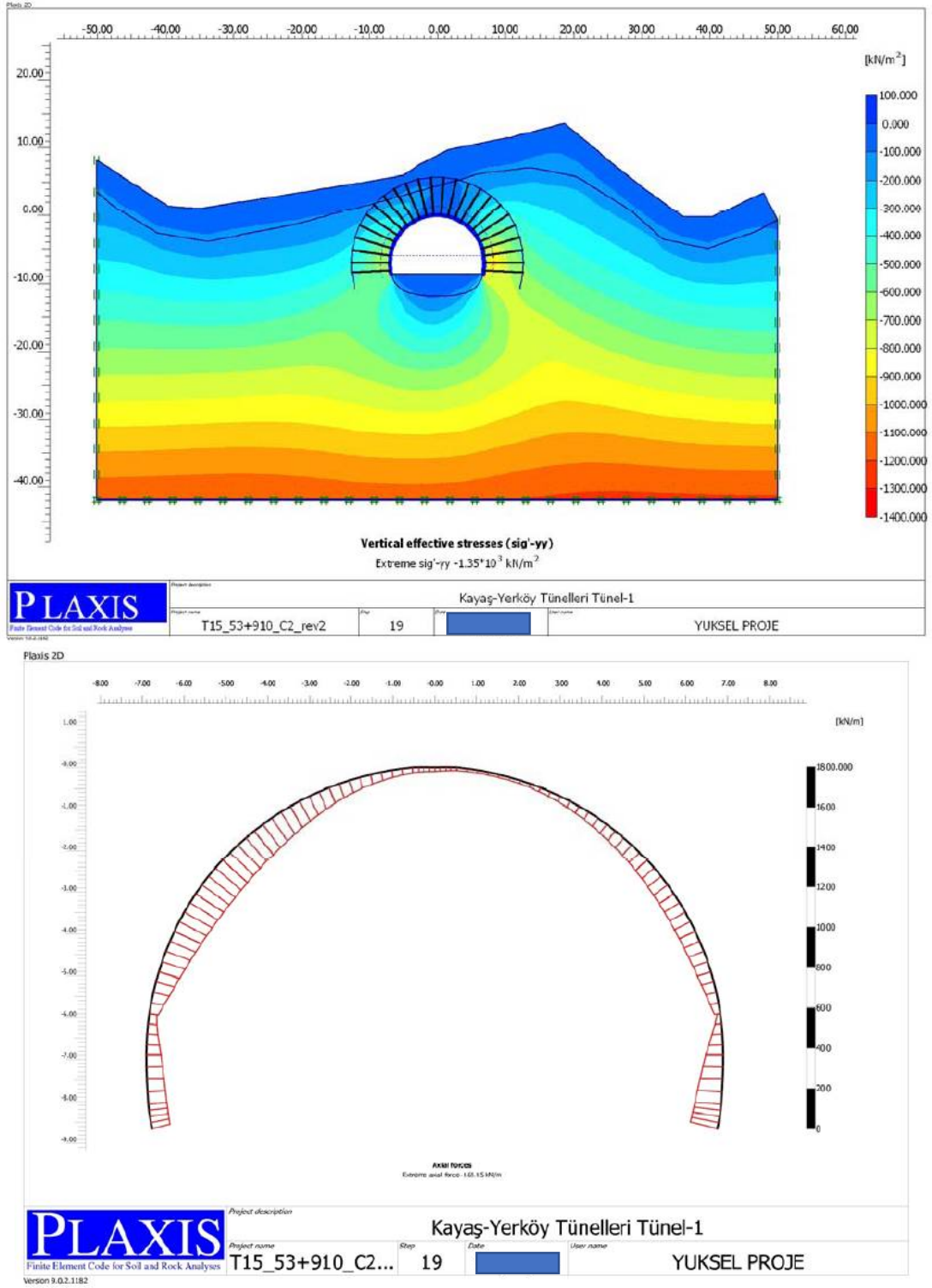
Destekleme Sınıfı	B2
Püskürtme Betonunu (cm)	15
Hasır Çelik (Püskürtme Beton)	Q 221/221
Enjeksiyonlu Süren	(Gerektiğinde) ϕ 1.5''boru süren, 30-40 cm ara ile, L=4.00 m
Kaya Bulonu Çapı (mm)	28
Kaya Bulonu Aralığı (mm)	2.00 x 2.00
İç Kaplama Betonunu (cm)	40
Hasır Çelik (İç Kaplama)	2 X Q 589/443

Çizelge 4.5. Km: 54+050 – 54+325, 54+360 – 54+435, 54+480 – 54+845, 54+895 - 54+985, 56+460 - 56+765, 56+815 - 57+395 ve 58+120 – 58+285 Kesitleri (Kayaş-Yerköy Demiryolu / Kesim 1 Tünel – 15 Hesap Raporu)

Destekleme Sınıfı	B3
Püskürtme Betonunu (cm)	20
Hasır Çelik (Püskürtme Beton)	2 X Q 221/221
Çelik İksa	I 140
Çelik İksa Aralığı (m)	1.25 – 1.50
İksa kurulum toleransları	Yapım toleransı 10 cm ve deformasyon toleransı 5-10 cm
Enjeksiyonlu Süren	(Gerektiğinde) ϕ 1.5'' boru süren, 30-40 cm ara ile, L=4.00 m
Kaya Bulonu Çapı (mm)	28
Kaya Bulonu Aralığı (mm)	1.50 x (1.25 x 1.50)
İç Kaplama Betonunu (cm)	40
Hasır Çelik (İç Kaplama)	2 X Q 589/443



Şekil 4.8. Tünel ilerleme mesafelerini belirlemek amacıyla PLAXIS sonlu eleman programı ile yapılan tünel stabilite analiz çalışmaları (Kayaş-Yerköy Demiryolu / Kesim 1 Tünel – 15 Hesap Raporu).

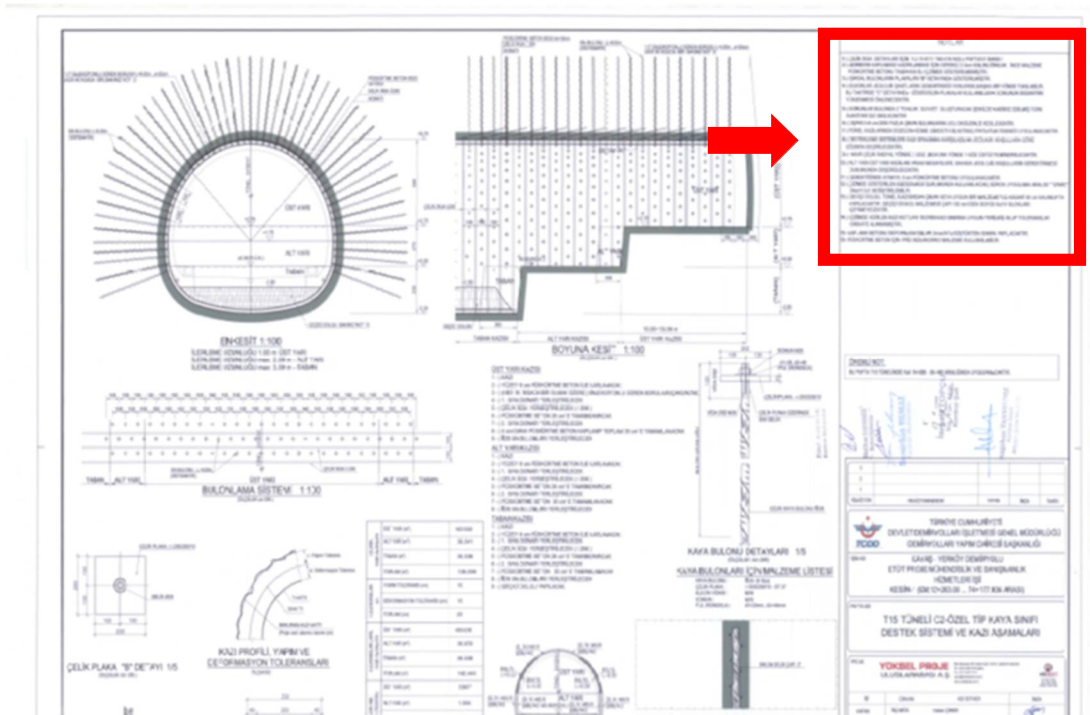


Şekil 4.9. Tünel kazı aşamalarını teknik şartnamede belirlemek ve belirtmek amacıyla PLAXIS sonlu eleman programı yapılan kesit kazı aşamaları analiz çalışması (Kayaş-Yerköy Demiryolu / Kesim 1 Tünel – 15 Hesap Raporu).

4.2. Deformasyon Ölçmeleri

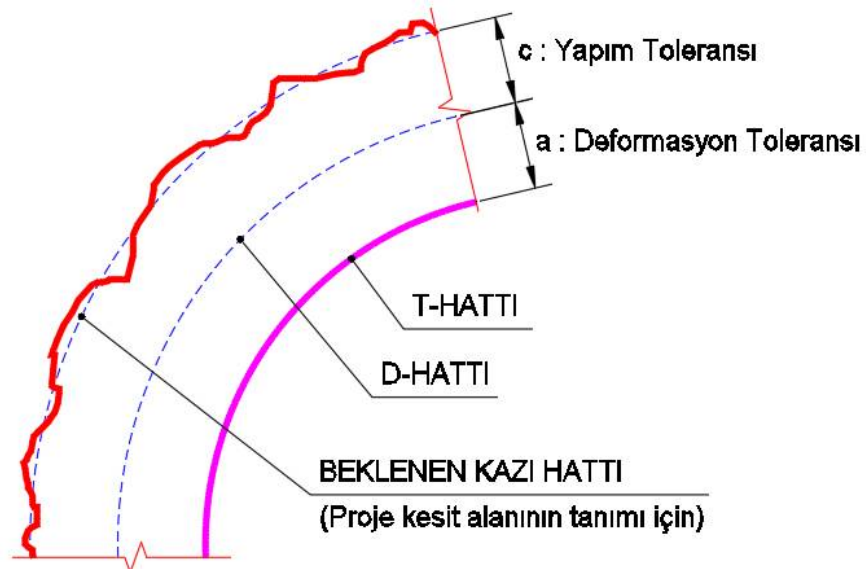
Deformasyon ölçmeleri, izlenen yapının ve/veya çevresinin davranışının beklenen deformasyon sınır değerlerine uygun olup olmadığının kontrol edilmesiyle istenmeyen deformasyon oluşumunun erken zamanda tespitinin yapılabilmesi, deformasyon oluşumuna sebep olan nedenlerin belirlenip önlem alınabilmesi, deformasyonun en doğru şekilde ifade edilebilmesi amacıyla yapılmaktadır. Tünel kazı çalışmaları esnasında, tünel bir nevi drenaj kanalı rolü üstlendiğinden bölgede var olan yeraltı suyunun seviyesinde meydana gelen değişiklik ve tüneldeki kazı ile oluşan tünel çevresindeki zeminin hareketi, zeminin jeomekanik büyüklüğüne ve tünelin yapılması istenilen geometrik yapısına bağlı olarak ana kayada oturmaların oluşmasına neden olabilmektedir. Bu tarz deplase durumları, deformasyonun belirlenmesi amacıyla tesis edilen noktaların düşeydeki değişimlerinin ölçülmesiyle belirlenebilmektedir.

Tünel açma çalışmalarında NATM ile yapılan kazılarda zemin etüt çalışmaları göre belirlenen deformasyon değerine ulaşılmadan önce tünel iç kaplama çalışmalarına başlanmaz. Yani deformasyon durdu denilmesi mümkün olmayabilir ama olması beklenen düzeye yani durağanlığa kavuştuğunda iç kaplama çalışmalarına başlanabilir. Beklenen deformasyon değeri projelerin şartnamelerinde belirtilen değerdir.

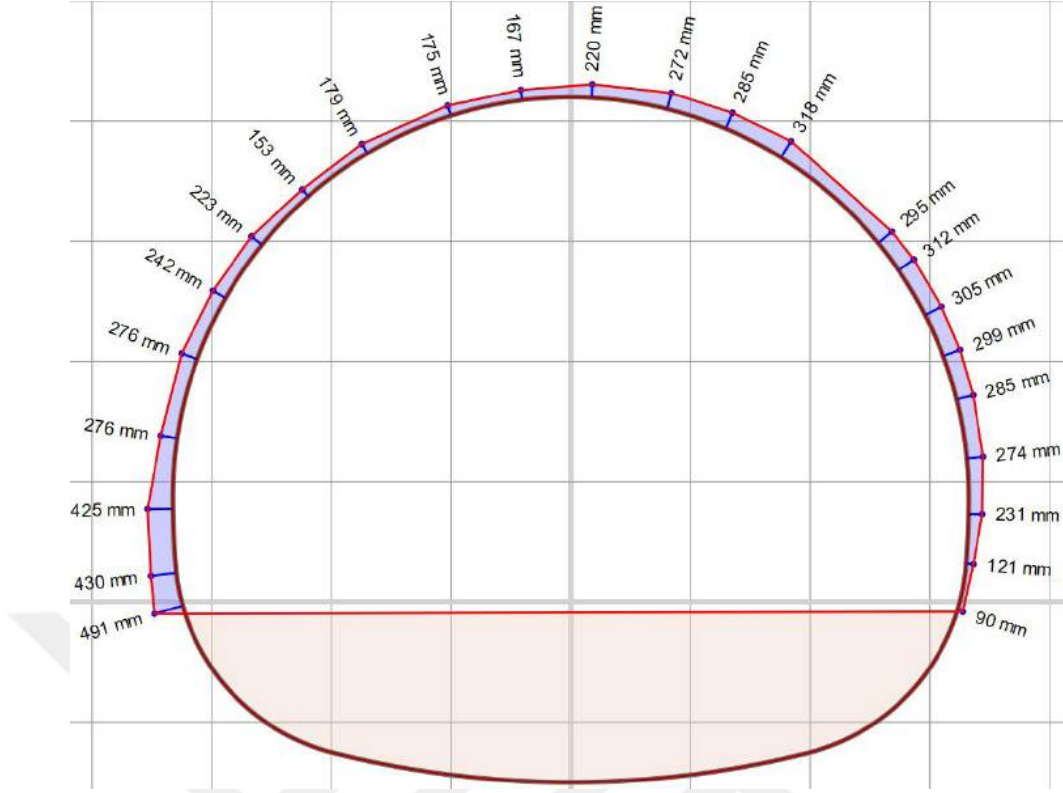


Şekil 4.10. T-15 Tüneli C2-Özel Tünel Tip Kaya Sınıfı Destek Sistemi ve Kazı Aşamaları adlı paftanın notlar kısmında; deformasyon (beklenen) değerinin 2mm/ay düzeyine gelmesinden sonra kaplama betonu yapılabileceği belirtilmiştir.

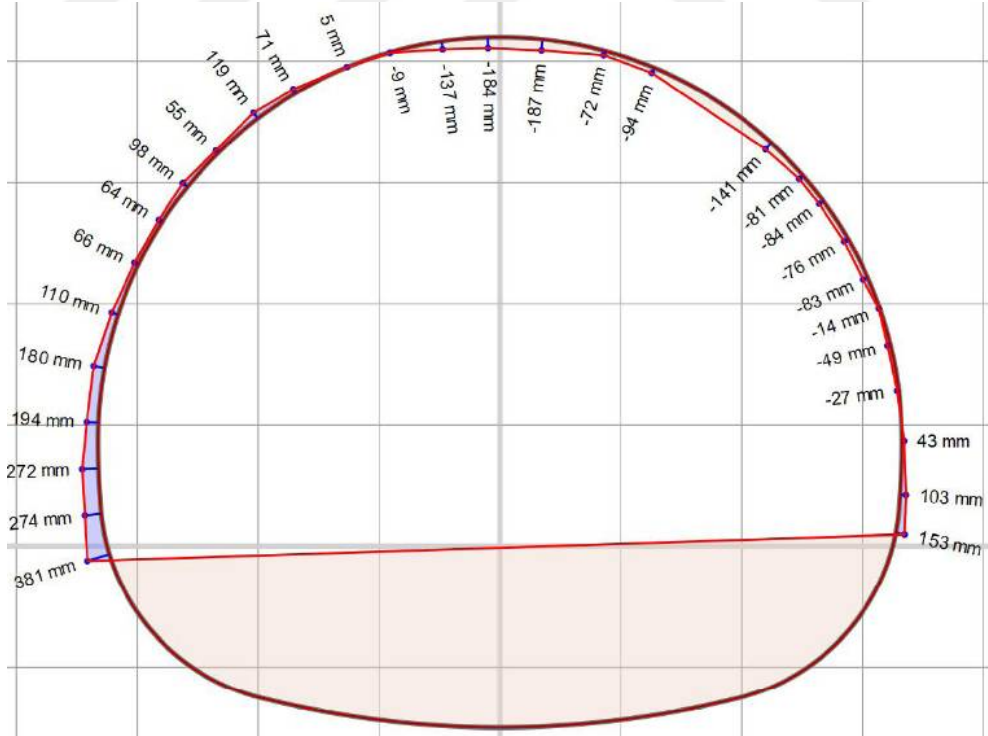
Deformasyon izlemelerindeki işlem adımları, olabilecek deformasyonun ya da deformasyon durumunda karşılaşılabilecek en üst değerlerin tahmini, istenilen ölçme doğruluğunun ve buna uygun yöntemin seçilmesi, ölçme çalışmaları için ağ tasarımının yapılıp deformasyon belirleme çalışmalarına başlanması şeklinde sıralanabilir. Ölçme uygulamalarından sonra toplanan veriler değerlendirilir ve deformasyonlar modellenir. Deformasyon tespitinde kullanılan deformasyon noktalarının tünelin geometrisini yansıtabilecek ve yapı performansında doğru bilgiyi verebilecek şekilde konumlandırılması gerekir. Olması muhtemel deformasyonların değerleri, yapı karakteristiği, ölçme noktalarının nasıl konumlandırılacağı, şekilleri, bunların isimlendirilme biçimleri ve yapılacak ölçmelerin sıklığı projelendirme aşamalarında belirlenen kurallara uygun olmalıdır. Projelendirme çalışmaları ile belirlenen önemli bir konu da, çizelge 4.1 – 4.5 aralığında belirtildiği gibi kazı sınıflarının özelliğine göre çelik iksaların kurulumu için proje kotlarına yapım toleransına ek olarak deformasyon toleransının eklenmesidir. Kurulan iksanın yüzeyi belirli aralıklarla ölçülür ve Amberg tünel programı ile incelenir. Böylece çelik iksanın olması gereken kot değerleri ile kontrol ölçmeleri sonucunda elde edilen değerler karşılaştırılarak deformasyonun meydana gelip gelmediği takip edilebilir. Deformasyon kontrol noktalarının ölçümü ve iksa kontrol ölçmeleri bize oluşan deformasyonun büyüklüğü hakkında bilgi verecek, bu değerlere göre deformasyon büyüklüğünden ve devam edip etmediğinden söz edilebilecektir.



Şekil 4.11. Tünel kazı çalışmalarında iksa kurulumu için verilen yapım ve deformasyon toleranslarının gösterimi.

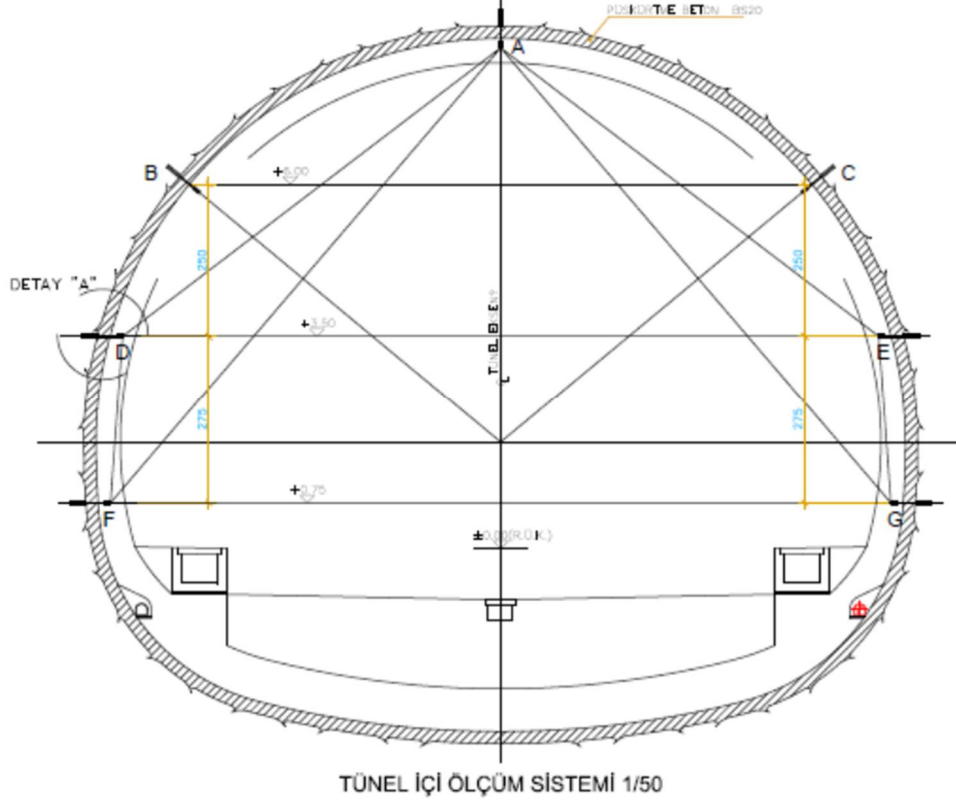


Şekil 4.12. İksa kurulumundan sonra yapılan ölçülerin Amberg programı ile incelenmesine dair ekran görüntüsü.

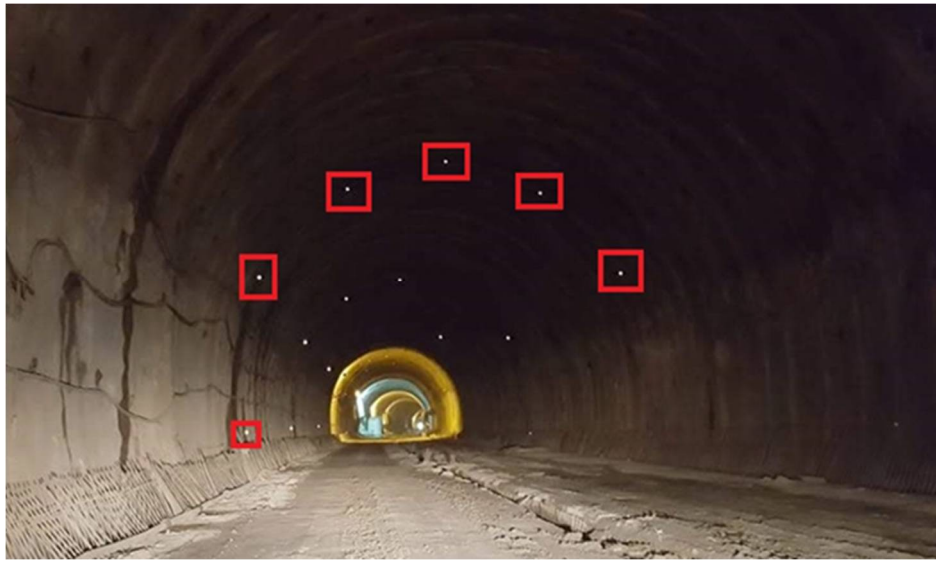


Şekil 4.13. Yapılan kontrol ölçmeleri sonucu eksen ve sağ omuz kısmında oluşan deformasyonlar sonucu kesite girmiş olan bir iksanın Amberg programdaki görünümü.

Deformasyon ölçmeleri için referans noktaları ve obje noktaları tünel geometrisine uygun olarak belirlenir ve tesis edilir. Bu noktalar ilk konumları bilinmekte olan ve değişmediği varsayılan kontrol noktalarıdır.

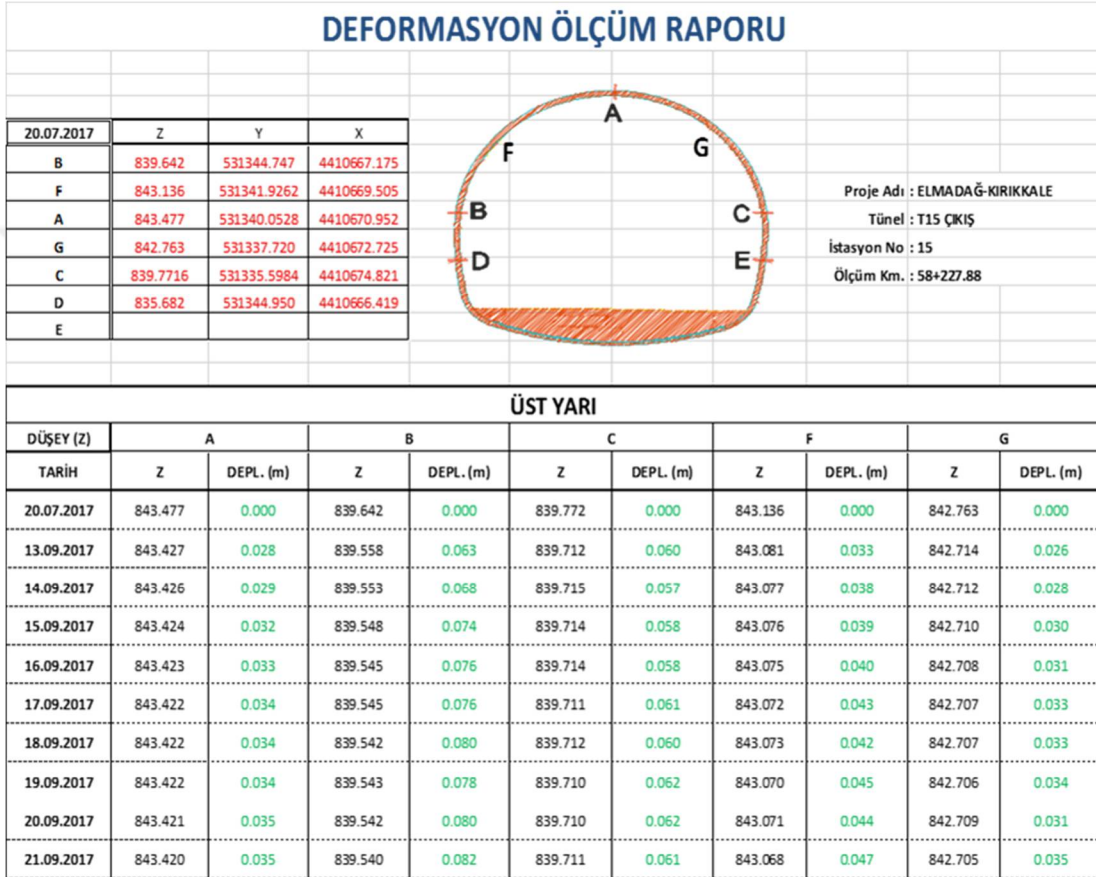


Şekil 4.14. Şartnameye göre deformasyon hedef konumlarını gösterir tip kesit (Ankara-Sivas Demiryolu Projesi T-15 Tüneli).



Şekil 4.15. Tünel içerisinde teknik şartnameye uygun olarak tesis edilmiş deformasyon ölçü noktaları (Ankara-Sivas Demiryolu Projesi T-15 Tüneli).

Deformasyon kontrol noktalarından elde edilen konum bilgileri bilgisayar ortamında deformasyon takip raporu adı altında saklanır. Belirli aralıklarla yapılan ölçülere göre konumdaki değişme değerleri ve bunun devam edip etmeme durumu bize deformasyon varlığına dair karar vermemizi sağlar. Şekil 4.16'da tünel içerisindeki bir deformasyon takip istasyonlarında yapılan ölçülerin bilgisayar ortamına aktarılması ile oluşturulan deformasyon ölçüm raporu gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Tünel deformasyon takip rapor örneği.

Tünellerdeki deformasyonun belirlenmesine yönelik ölçme çalışmaları, kazını ve destekleme çalışmalarından sonra, deformasyon kesitinin oluşturulmasıyla başlanır. Tüm kazı kesitinde çalışmalar tamamlandıktan sonra deformasyonun sonlandığına kanaat getirilse de bir süre daha ölçme çalışmalarına devam edilir ve deformasyonun durduğu kesinleştiğinde iç kaplama çalışmalarına onay verilir. Yapımın tamamlanmasıyla düzenli aralıklarla ölçme çalışmalarına devam edilmesi projenin kullanım amacına göre belirlenir. Yapılacak ölçmelerin sıklık durumu, çevresel koşullar ve jeoteknik şartlara bağlı olarak değişebilir. Yapıdaki deformasyon ölçmelerinde kazı çalışmalarında kullanılan yöntemlere göre farklı teknik ve donanım kullanılabilir. Uygulanan

ölçme yöntemleri ve kullanılan aletlere göre jeodezik ve geoteknik ölçmeleri olarak iki farklı yöntem uygulanmıştır. Bu yöntemlerin kendilerine özgü olumlu ve olumsuz yanları olabilmektedir.

Jeodezik ölçme yönteminde, konumu bilinmekte olan deformasyon noktalarının kullanılmasıyla yapılan ölçme çalışmalarında, noktaların ilk konumlarına göre tespit edilen yer değiştirmelerinin tespit edilmesi temeline dayanmaktadır. Yüzeydeki tasmanı ifade eden düşey yönlü deformasyonların tespitinde geometrik ve trigonometrik nivelman yöntemleri de kullanılabilir. Trigonometrik nivelman yönteminde total station kullanılarak mesafe ve düşey açı ölçmeleriyle yükseklik farkları belirlenir. Bu teknik tünel kesitinin büyük olduğu ve deformasyon noktalarına ulaşımın zor olduğu durumlarda ölçme çalışmalarını kolaylaştıran kullanışlı bir yöntemdir. Elde edilen doğruluk düzeyi cihazın hassasiyetine bağlıdır ve kullanılacak aletlerin sahip olması gereken özelliklerde proje şartnamelerinde yer alır. Geometrik nivelman ise yükseklik farkının doğrudan ölçülmesi çalışmalarıdır.



Şekil 4.17. Tünel içerisinde total station ile yapılan ölçüm çalışmaları. a) Ayna kazısının yönlendirilmesi b) İnvart kalıp kurulumu ve beton üst kotu belirlenmesi c) Tünel iç kaplama kalıbının yerleştirilmesi d) Deformasyon ölçme noktalarının projeye konumuna uygun tesis edilmesi için yer gösterimi

Tünel açma yöntemi olarak NATM seçilen tüneller için deformasyon takibi üç boyutlu (3B) konum verisinin üretilmesi şeklinde yapılmaktadır. Üç boyutlu konum verisi yersel ölçmeler aracılığıyla elde edilmektedir. Yersel ölçme çalışmaları ekonomiktir ve uygulama bakımından değerlendirildiğinde tünel içerisindeki deformasyonların takip edilmesine uygun bir yöntem olup, istenilen ölçme doğruluğu da sağlanabilmektedir.

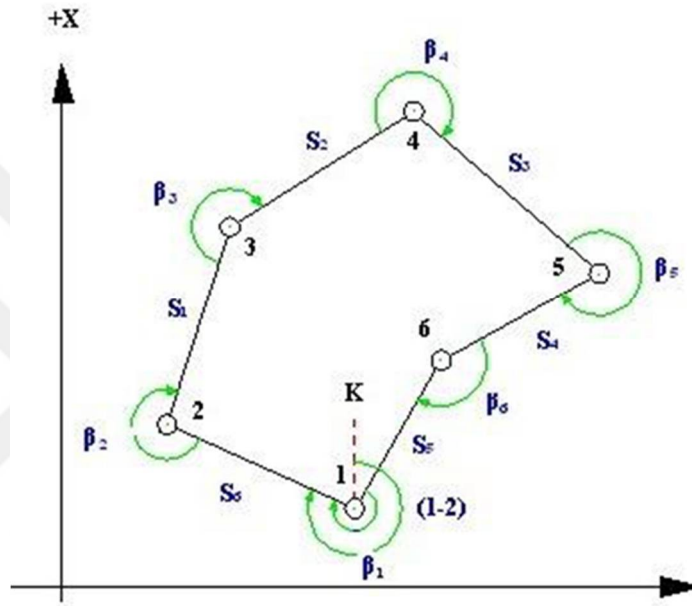
Teknolojideki gelişmelere paralel olarak jeodezik yersel ölçme aletlerinde de gelişmeler olmuştur. Deformasyonların takibinde yeni teknoloji total station, hassas nivo, lazer tarayıcılar şeklinde farklı jeodezik cihazlar kullanılabilir. Günümüzde, total station cihazlarının kullanımındaki kolaylık, ölçme sonuçlarının hassas, doğru ve güvenilir olmasına ek zamandan tasarruf sağlaması bu cihazları daha tercih edilebilir bir hale getirmiştir. Gelişmiş total station, otomatik olarak hedefi tanıyabilme ve takip edebilme özelliğine sahiptirler. Reflektörün kullanıldığı ölçüm faaliyetlerinde hassasiyet $\pm(1,5 \text{ mm}+2 \text{ ppm})$, reflektörün olmadığı ölçme çalışmalarında ise hassasiyet $\pm(2 \text{ mm} +2 \text{ ppm})$ değerlerine sahip olup, reflektörün olmadığı ölçümlerde okuma mesafesi 400 m, 500 m ve 1000 m'ye kadar çıkmaktadır. Nokta yüksekliklerini, geliştirilen yeni tasarıma sahip ergonomik yapıdaki, kullanımları daha basit ve hassas dijital nivolar aracılığıyla yüksek doğrulukta tespit edilebilmektedir. Deformasyon ölçmeleri açık arazideki poligon görevini yerine getiren, tünelin yan duvarlarında sabit konsol olarak monte edilmiş jeodezik referans noktalarından aldıkları konum bilgisine göre yapılmaktadır (Şekil 4.18). Bu kontrol noktaları tünel içi jeodezik ağ dizaynını oluşturmaktadır.



Şekil 4.18. Konsol (Ankara-Sivas Demiryolu Projesi T-15 Tüneli).

Jeodezik referans noktalarında oluşabilecek yer değiştirme durumları sistematik bir şekilde yapılacak kontrol ölçmeleri ile düzenli olarak takip edilmektedir. Konumu bilinen tünel içerisindeki bu poligon noktaları proje alanının tamamını kapsayacak şekilde tesis edilmiş olan açık sahadaki nirengi noktalarından konum bilgisinin taşınması şeklinde oluşturulur. Belirli aralıklarla tünel içerisindeki çalışmalardan etkilenip etkilenmediklerinin kontrolleri yapılır. Bunun için yapılan çalışmalarda Kapalı Poligon Hesabı kullanılır. Aynı zamanda bu ölçmelere “rasat ölçümleri” de denilmektedir. Kapalı

poligon geçkisi, koordinatları bilinmekte olan bir nirengi veya poligon noktasından başlanarak, son noktaya kadar durulan-bakılan ölçümleri tamamlanır ve geri dönüş okumaları da aynı şekilde yapılarak ilk başladığı nirengi veya poligon noktasında ölçme işlemi sona erer. Şekil 4.19’da örnek kapalı poligon geçkisi gösterilmiştir. Kapalı poligon hesabının, açık poligon hesabından farkı açı ve koordinat kontrolüne imkân vermesidir. Dayalı poligon hesabından farkı ise, başlangıç olarak kullanılan poligon noktasına tekrar dönülmesidir.



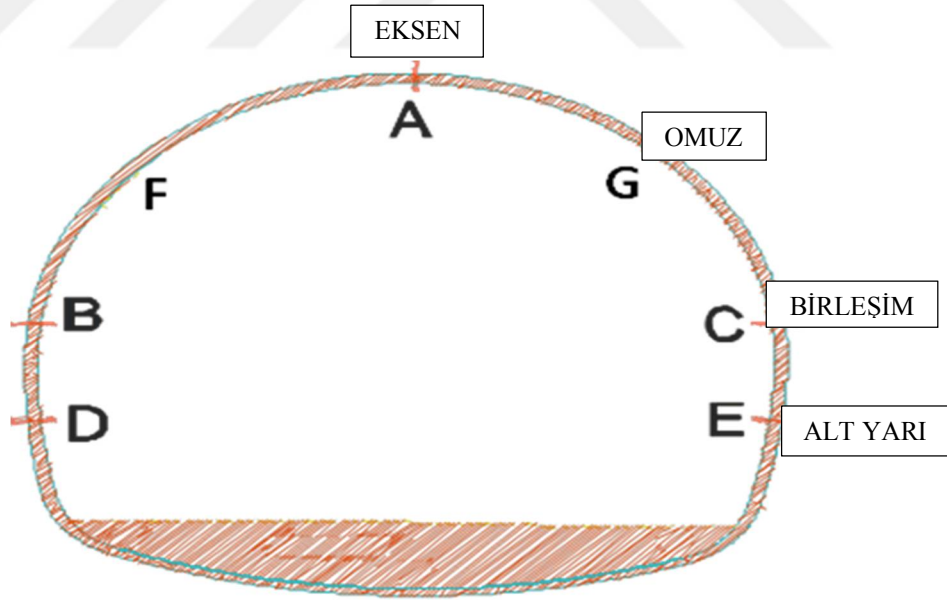
Şekil 4.19. Kapalı poligon geçkisi (URL-5)

Sistematik hataların minimum seviyeye getirilebilmesi için ölçme aletlerinin düzenli bir şekilde kontrollerinin ve periyodik olarak kalibrasyonlarının yapılması gerekmektedir. Tünel gibi büyük inşaat yapılarında belirli aralıklarla, kullanılan cihazların kalibrasyon belgeleri kontrol birimlerine beyan edilmek zorundadır. Tünel içerisinde yapılan deformasyon belirleme çalışmalarına aşağıda sırasıyla değinilmiştir.

4.2.1. Jeodezik ölçmeler

Tünel içerisinde jeodezik olarak deformasyonların belirlenebilmesi amacıyla, kazı aşamalarını takiben, belirli aralıklarla oluşturulan deformasyon istasyonlarındaki kesitlerin tavan ve yan duvarlarına tesis edilen referans noktalarından (deformasyon noktaları) yararlanılır. Bu noktalar belirli zaman aralıklarında jeodezik yöntemlerle

ölçülerek periyotlar arası yer değiştirme vektörleri elde edilmektedir. Kazının ilerlemesini de takip ederek, tünel kesitine ve projeye uygun belirlenen istasyonlarda tavan (eksen), taban ve yan duvarlara tesis edilecek obje noktaları 3 boyutlu koordinatları total station ile ölçülür. Şekil 4.21’de deformasyon ölçmelerinde kullanılan Total Station ve Şekil 4.15’te tünel kesitine uygun olarak çakılmış obje (deformasyon) noktaları gösterilmiştir. Proje kapsamında deformasyon takibinin daha sağlıklı yapılması amacıyla kullanılan deformasyon noktalarının kesite nasıl yerleştirilmesi gerektiği şartnamelerde belirtilmiştir. Tünel-15’te obje noktalarının tip kesit üzerindeki gösterimi Şekil 4.20 ve kullanılmakta olan hedef levhasının fotoğrafları Şekil 4.22 gösterilmiştir. Objelerinin tesisi, kaya klaslarına uygun aralıklarla gerçekleştirilmiştir. Üst yarı kazısının ve destekleme çalışmalarının tamamlanmasının sonrasında 3 tane referans noktası tesis edilir. Daha sonrasında alt yarı kazı ve desteklemesinin tamamlanmasıyla sağ ve sol tarafa birer olmak üzere üst yarı ve alt yarı birleşim noktalarına 2 adet daha nokta tesis edilir. Alt yarıda hareketlilik olup olmadığının izlenebilmesi içinde sağ ve sol tarafa birer izleme noktası daha eklenmesiyle toplamda 7 adet obje noktası tesis edilmektedir.



Şekil 4.20. Deformasyon hedef konumlarının tünel içinde temsil ettiği yerler.

Tünel yüzeyinde belirlenen obje noktalarının montaj işlemlerinin ardından sıfır (başlangıç) okuması olarak adlandırılan ilk okumaları gerçekleştirilmektedir. Böylece ilerleyen zamanlarda yapılan okumalardaki koordinatlar arası farklar zeminin

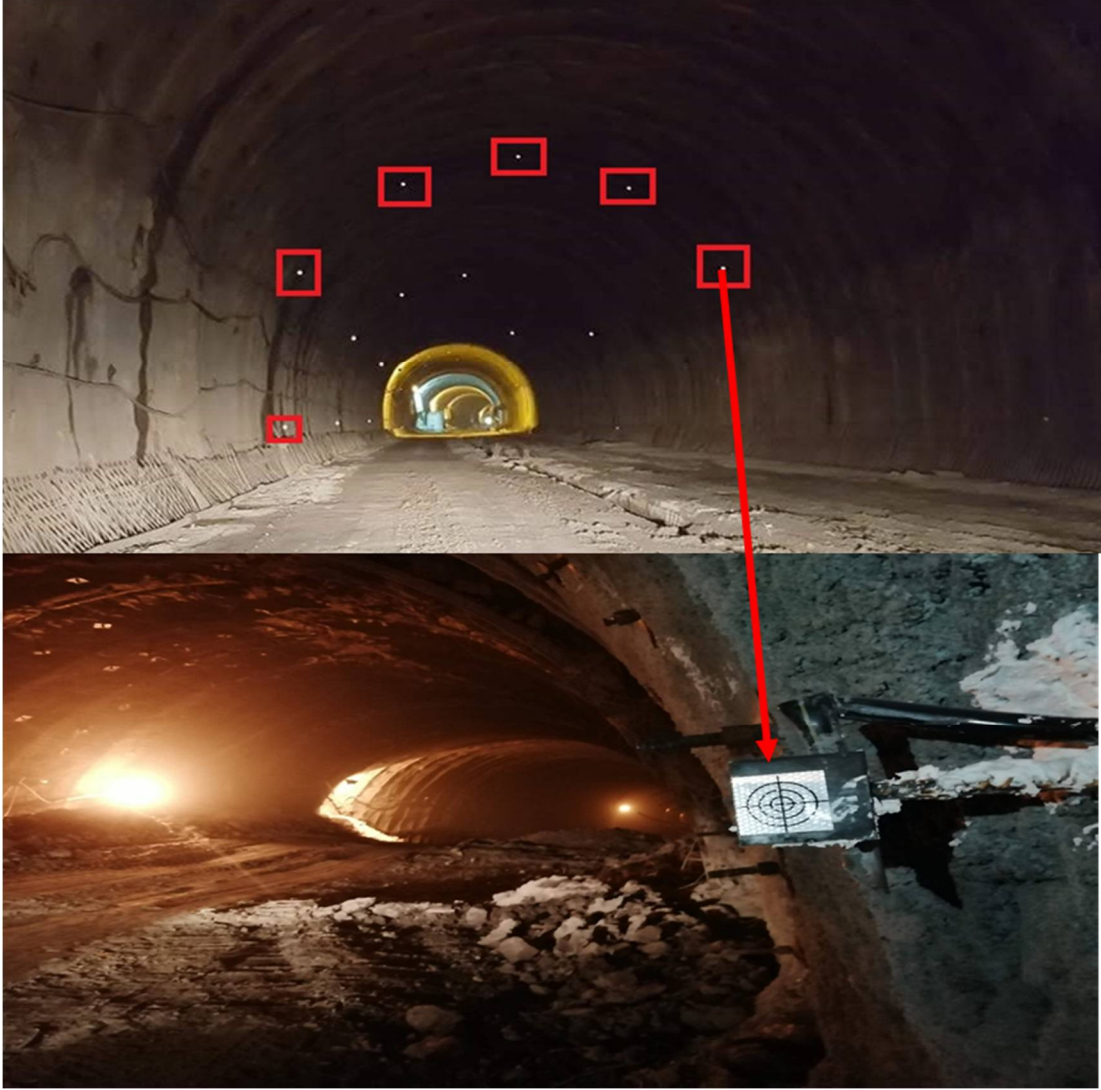
hareketliliği hakkında da bilgi verecektir. Bu okumalar proje şartnamesinde belirtilen seviyeye ulaşip ve istenilen sürede de aynı değerlerde kalması durumunda, sonraki aşamalar olan tünel içi yalıtım ve iç kaplama çalışmalarına geçilir.



Şekil 4.21. Tünel deformasyonlarının ölçülmesi çalışmaları (Ankara-Sivas Demiryolu Projesi T-15 Tüneli).

Çizelge 4.6: Çalışmalarda kullanılan total station'un özellikleri.

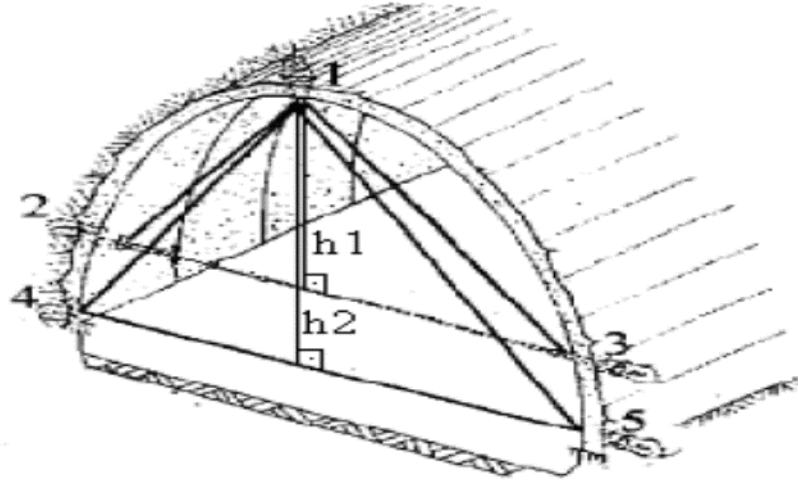
Marka:	Leica TS16 P
Açı Ölçümü:	1" (0.3 mgon), 2" (0.6 mgon), 3" (1 mgon), 5" (1.5 mgon)
Mesafe Ölçümü:	Prizma ile 0.9 m ila 3,500 m Prizmasız 0.9 m ila > 1,000 m
Görüntüleme:	5 megapiksel CMOS sensör – 19.4° Görüş alanı
Otomatik Hedefleme:	Dairesel prizma ile 1,500 m / 1,000 m
İşletim Sistemi:	Windows EC7
İşlemci:	TI OMAP4430 1GHz Çift çekirdek ARM® Cortex™ - A9 MPCore™
Çalışma Menzili / Doğruluk:	5 – 150 m / 100 m'de tipik 5 cm
Mesafe Doğruluğu:	1.0 mm (1 Sigma)
Ölçüm Teknolojisi:	Sistem analizörü – Eş eksenli, görünür kırmızı lazer



Şekil 4.22. Tünel deformasyon izleme hedefleri (Ankara-Sivas Demiryolu Projesi T-15 Tüneli).

4.2.2. Geoteknik ölçmeler

Geoteknik ölçmelerle, zemin özelliklerinin kesin olarak belirlenemediği ve derin kazıları gerektiren tünel inşaatlarında zemin mekaniğinin tespit edilmesinde, yapı malzemelerinde temelin ilettiği yapının yükünü taşımakta olan destek elemanlarının incelenmesinde tercih edilen bir yöntemdir. Tünel inşaatı çalışmaları sırasında tünel içerisinde oluşabilecek deformasyonların büyüklüklerinin tespit edilmesi ve bu deformasyonların zaman içerisinde olan veya oluşabilecek değişimlerinin izlenip yorumlanmasına bağlı olarak tünel inşaatının devam edip etmemesine, ek önlemler konusuna yön verme amacıyla iki üçgen oluşturacak şekilde toplam 5 tane Koverjans bulonu tünel yüzeyine çakılır.



Şekil 4.23. Tünel kesitinde Koverjans bulonlarıyla oluşturulmuş üçgenler (Yaşar, 2007).

Oluşturulan üçgenlere ait yüksekliklerin hesabı, üçgen alanlarının hesabına ilişkin iki farklı bağıntının birbirine eşitlenmesiyle aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır. Şekil 4.23'deki 123 üçgeninin 1-2, 1-3 ve 2-3 kenarları sırasıyla x, y, z olarak tanımlanırsa üçgenin alanı Heron bağıntısına göre;

$$u = \frac{1}{2}(x + y + z) \quad (4.1)$$

olmak üzere,

$$A = \sqrt{u * (u - x) * (u - y) * (u - z)} \quad (4.2)$$

ayrıca 123 üçgeninin h_1 yüksekliğini de içeren diğer bir üçgen alan hesap bağıntısı

$$A = \frac{1}{2} * (a * h) \quad (4.3)$$

olur.

123 üçgeninde $a=z$ kenarı z olarak alınırsa (3) eşitliğinin (2)'ye eşitlenmesi ile;

$$z * \frac{h}{2} = \sqrt{u * (u - x) * (u - y) * (u - z)} \quad (4.4)$$

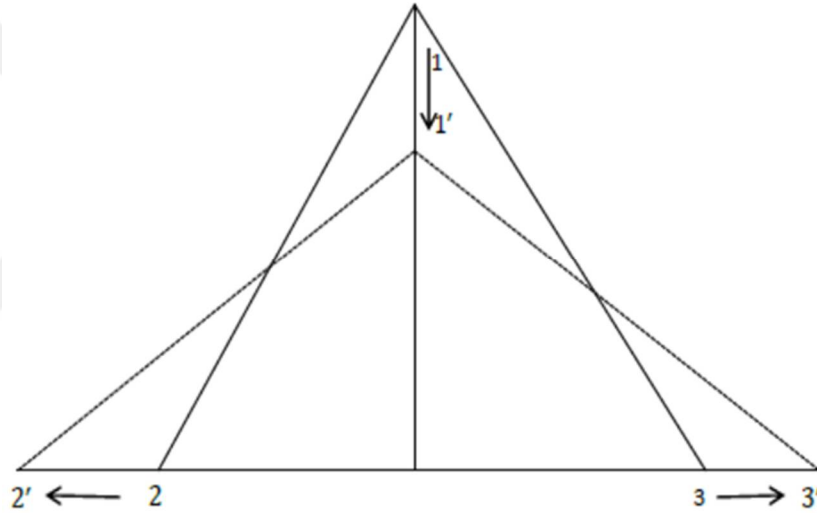
elde edilir. Buradan üçgenin yükseklik değeri,

$$h = 2 * \sqrt{u * \frac{(u-x)*(u-y)*(u-z)}{z}} \quad (4.5)$$

olarak bulunur.

4.2.2.1.Koverjans ölçmelerinden düşey ve yatay deformasyonların belirlenmesi

Koverjans bulonlarının periyodik ölçmeleri sonucunda her bir bulonda ki toplam deformasyonun belirlenebilmesi için son günlük ölçme değeri ile ilk günlük ölçme değeri arasındaki farkın alınması gerekir. Tünel ekseninde deformasyon olmayacağı öngörüsü çerçevesinde ilk günlük ölçmelerden elde edilen üçgen ile aynı bulonlara ait son günlük ölçmelerden elde edilen üçgenin yatay kenar ve yükseklikleri üst üste çakıştırılırsa tünel tavanındaki çökme miktarı ve buna bağlı olarak da yan duvarlardaki yatay deformasyonlar belirlenebilir (Şekil 4.24). 123 üçgeni Koverjans bulonlarının tesis edildiği ilk günlük ölçmelerinden elde edilen verilerden oluşturulmuştur. 1'' 2'' 3'' üçgeni Koverjans bulonlarının son günlük ölçmelerinden elde edilen verilerden oluşturulmuştur.



Şekil 4.24. Düşey ve yatay deformasyonların belirlenmesi (Yaşar, 2007).

4.2.2.2.Koverjans ölçmelerinden tünel kesitindeki deformasyonun alan farkları yöntemiyle belirlenmesi

Koverjans ölçmeleri sonucunda tünel kesitinde Koverjans ve Diverjans olmak üzere iki farklı yönde deformasyon meydana gelebilir. Bunlar;

Koverjans (Kov.): Tünel kesitindeki şekil bozukluğu tünel içine doğrudur ve tünel kesitinde daralma meydana gelir.

Diverjans (Div.): Tünel kesitindeki şekil bozukluğu tünel dışına doğrudur ve tünel kesitinde genişleme meydana gelir şeklinde tanımlanmaktadır.

4.2.3. Yüzey okumalarıyla deformasyon izleme yöntemi

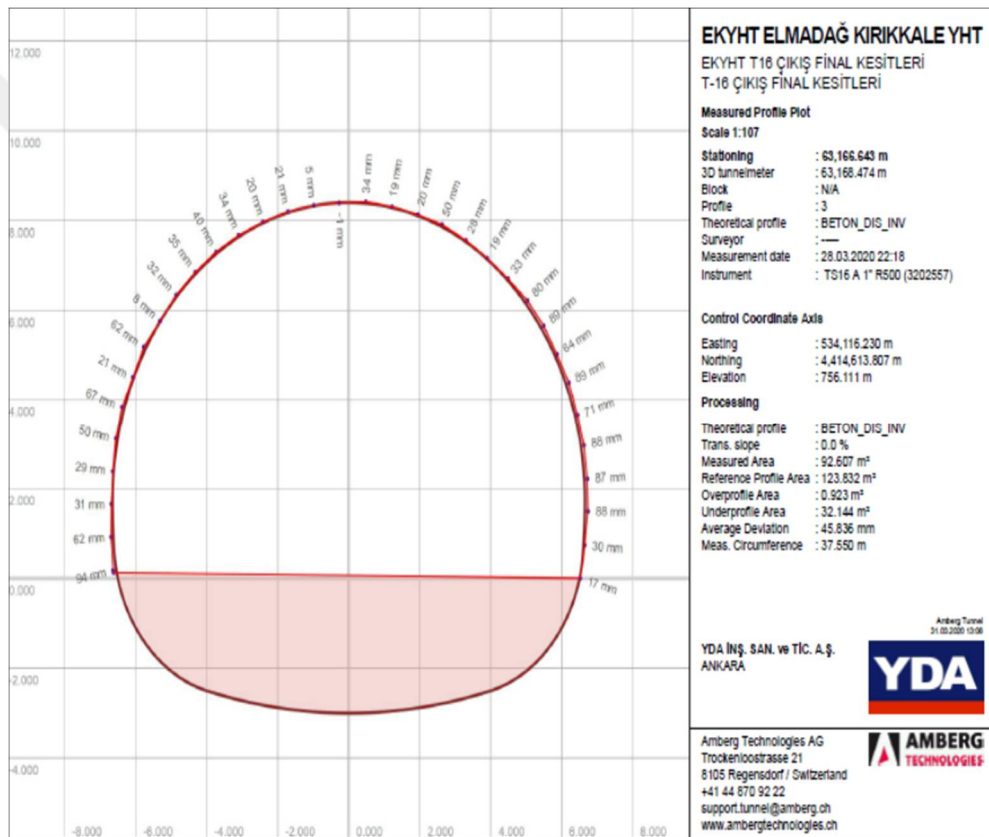
Çalışmalarda uygulanan jeodezik yöntemlerden bir diğeri de yüzey okumalarının yapılarak deformasyon belirlenmesi yöntemidir. Yöntemin uygulanmasında çoğunlukla çalışma alanına en uygun cihazlar ve bunlara uygun programlar kullanılmaktadır. Tez çalışmalarında kullanılacak olan veriler Leica TS16 robotik Total Station kullanılarak elde edilmiştir. Total station aletine kurulmuş olan yol ve tünel uygulamaları yazılımları kullanılarak kontrolü yapılmak istenilen kesitlerde yüzey okumaları kolayca yapılabilmektedir. Ayrıca bu yüzey okumaları için tünelin duvarlarına çakılması gereken özel objelere de gerek yoktur. Bu çalışmalar için tünel içerisine tesis edilmiş olan poligon noktalarına bağlantılar yapılarak cihazda yüklü olan yazılım aracılığıyla durulan noktanın projedeki konumu, kilometresi ve projede belirtilen kaya sınıflarına göre belirlenmiş tahkimat sistemleri bilgisi de görülebilmektedir. Total station aleti bu uygulamalar için özenle seçilmiş bir ölçme aletleridir ve standart koşullar altında $\pm(2+2\text{ppm})$ kenar ve $\pm 0.3\text{mgon}$ açı ölçme doğruluğuna sahiptirler. Tünel içerisinde yapılan çalışmalarda çekilmiş fotoğrafa Şekil 4.25'te yer verilmiştir.



Şekil 4.25. Yüzey okuma çalışmalarına ait saha fotoğrafları (Ankara-Sivas Demiryolu Projesi T-15 Tüneli).

Tünel içerisinde yapılan ölçme çalışmalarıyla elde edilen veriler AMBERG Tunnel yazılımının kullanılmasıyla işlenmektedir. AMBERG Tunnel yazılımına projeye

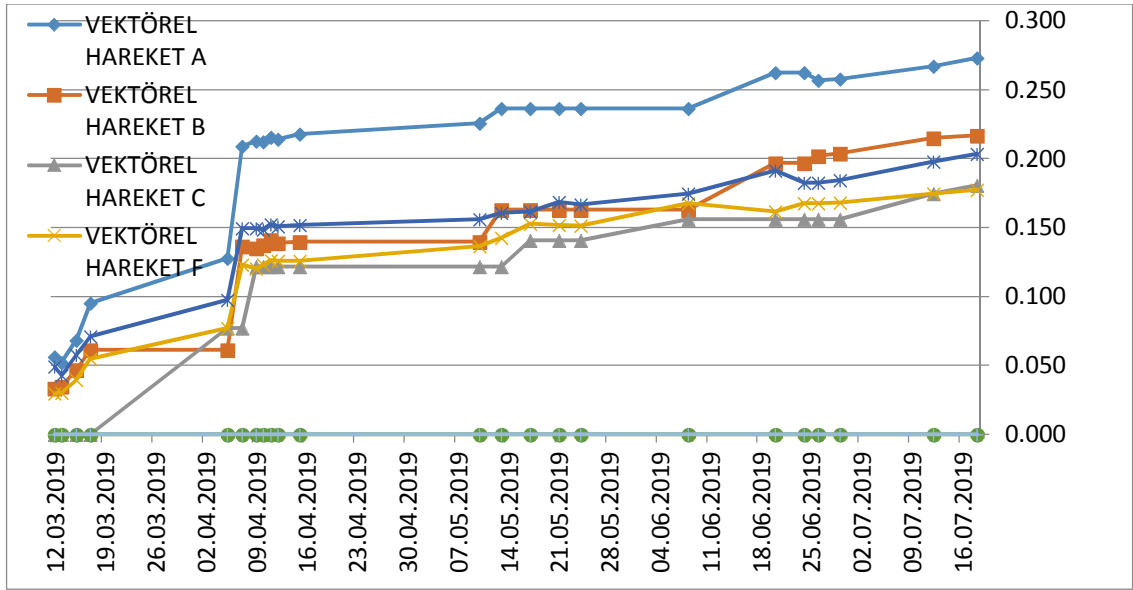
ait güzergâhı, tip kesit, dever vb. tüm projenin temel bilgileri yüklenir. Bu bilgiler revizyon imalatlar ve ihtiyaca göre yapılan yeni projeler doğrultusunda güncellenmelidir. Programda tünel içerisinde yapılan ölçmelerin işlenmesiyle elde edilen sonuca ilişkin ekran görüntüsü Şekil 4.26’da gösterilmiştir. Veriler işlenirken yüzey okuma çalışmaları ile elde edilen kesit bilgileri olması gereken kesit olarak varsayılan proje kesitleriyle karşılaştırılır. Bunun sonucunda proje hattından ne kadar içeriye girildiği, sapmanın olup olmadığı gibi sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Program ile oluşturulan kesitlerin diğer CAD programları üzerinde de çakıştırılmasıyla kesitin mevcut durumu, önceki ölçmelerle kıyaslanması ve zamana bağlı olarak değişimlerinin görülebilmesi sağlanmaktadır.



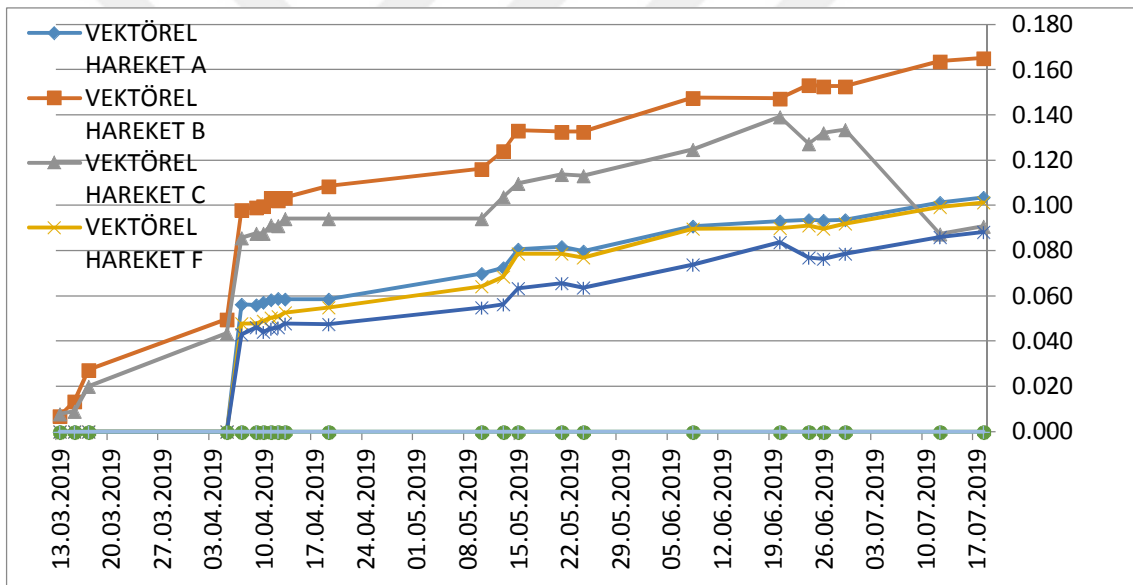
Şekil 4.26. AMBERG yazımıyla işlenmiş yüzey okuması örneği.

Ankara-Sivas Demiryolu Projesinin Elmadağ-Kırıkkale Kesim-1 hattı olan Tünel-15 çalışma bölgesinde aynı anda üst yarıda, alt yarıda ve invertte olabilecek şekilde birçok farklı noktada kazı çalışması yapılabilmektedir. Bu durum tünel içerisinde birden fazla ölçü istasyonunda deformasyon ölçmelerinin yapılmasını ve takip edilmesini gerektirmektedir. Bu gibi fazla sayıdaki ölçme çalışmalarının yapılabilmesi için, doğrudan yapılacak jeoteknik ölçmeler yerine, konum bilgisinin üretilmesi sistematığına dayanan ölçme yöntemleri tercih edilmektedir. Deformasyonun belirlenebilmesinde

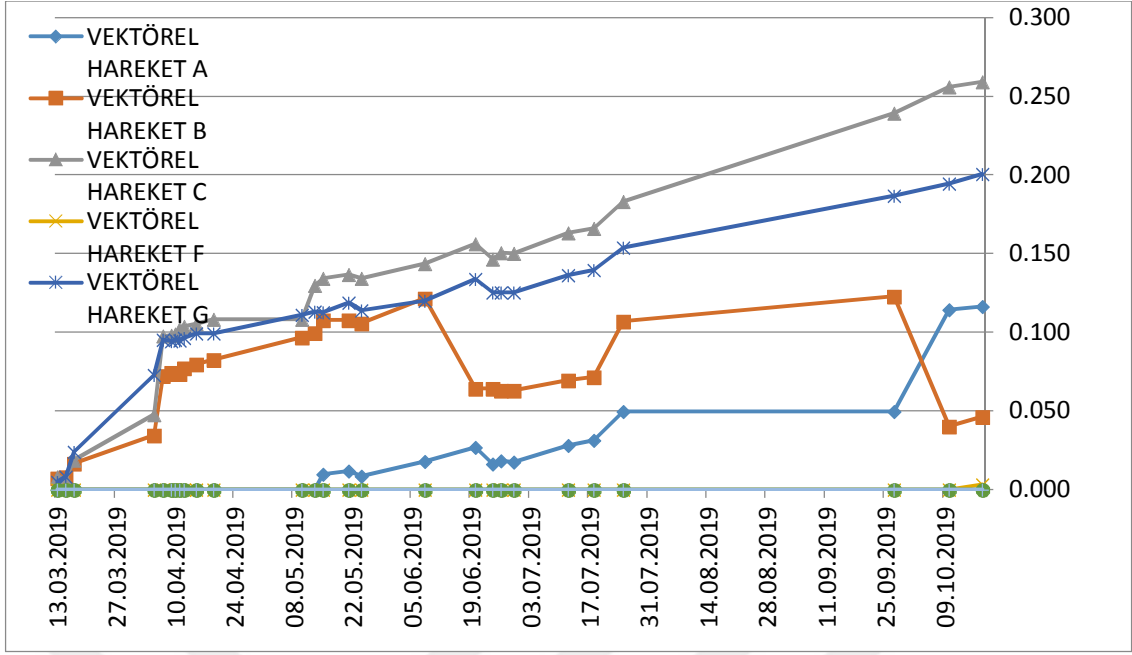
kullanılan deformasyon noktalarının, tünel geometrisini ve yapı performansını yansıtabilecek şekilde proje şartnamesine göre tesis edilen noktalardır. Tüm tünel tiplerine göre deformasyon noktaları yerleri, uygulama yerleri ve tesis tipleri, projelendirilmiş ve ihale ekleri ile yüklenici firmaya verilmiştir. Tüm bu veriler ışığında deformasyon ölçmeleri düzenli olarak yapılmış ve gerekli bilgiler tünel çalışmalarında görev alan tüm birimlerle paylaşılmıştır. Tünel deformasyon ölçmeleri ve takibi yaşanabilecek olumsuz durumların önüne geçilmesinde önemli bir faktördür. Bunun en önemli örneği Tünel-15 Çıkış olarak adlandırılan tünelde 22.10.2019 tarihinde km 57+692,50'de meydana gelen göçük ile görülmüştür (Tünel-15 Çıkış ilerleme yönü km azalana doğrudur). Düzenli olarak yapılan ölçmelerin takibinde 07.04.2019 tarihinden itibaren deformasyon değerlerinde bir artış olduğu tespit edilmiş ve bu tarihten sonra 57+762,80 kilometresinden itibaren bu bölgedeki deformasyon istasyonları arasındaki mesafe kısaltılıp okuma sıklığı artırılmıştır. Devam eden tarihlerdeki okumalarda deformasyon değerlerindeki artışın sürdüğü görüldüğünden, o bölgedeki çalışmaların bunlar göz önünde bulundurularak yapılması gerektiği bilgisi ilgililerle paylaşılmıştır. Tünel çalışma bölgesinde artan deformasyon değerleri nedeniyle aynada yapılan kazı çalışmaları durdurulmuş ve geriden aynaya doğru güçlendirme çalışmaları ile geçici invert uygulamaları yapılması kararı deformasyon ölçmelerinin takibi sonucu alınmıştır. Devam eden deformasyon ölçmelerinde deformasyon değerlerinin yatayda 15 cm, düşeyde 43 cm kadar olduğu tespit edilmiştir. Beklenen deformasyon değerlerinin çok üzerinde olan bu duruma ait deformasyon ölçüm değerlerinin deformasyon takip raporlarına işlenmesiyle elde edilen, göçük bölgesine yakın istasyonlara ait deformasyon vektörel değişim grafikleri Şekil 4.27 – 4.32 arasında verilmiştir.



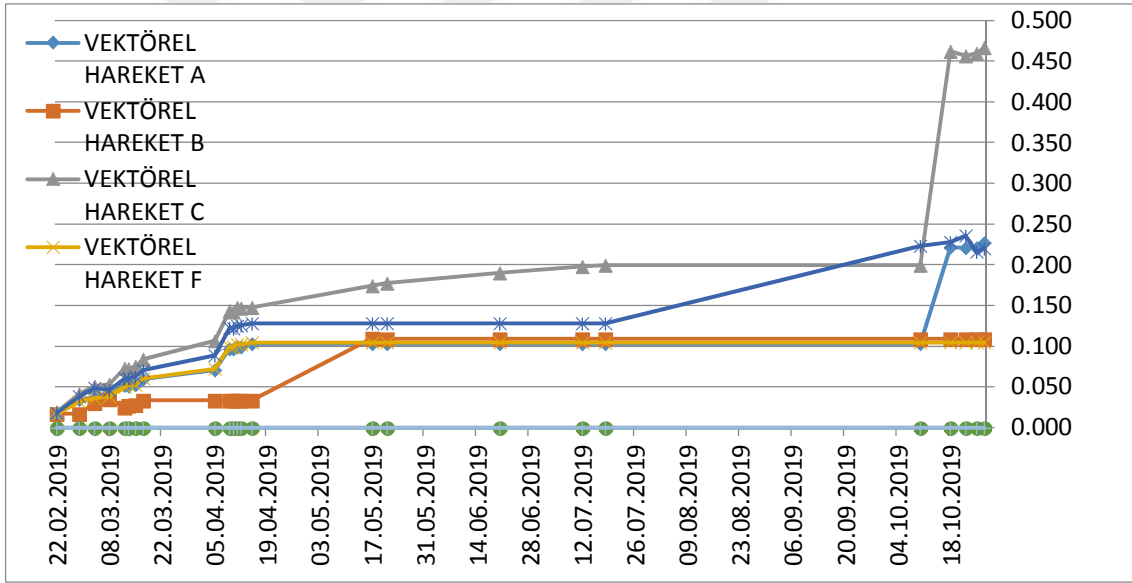
Şekil 4.27. İstasyon-37'deki deformasyon vektörel değişim grafikleri (değerler cm'dir). Km: 57+703.50



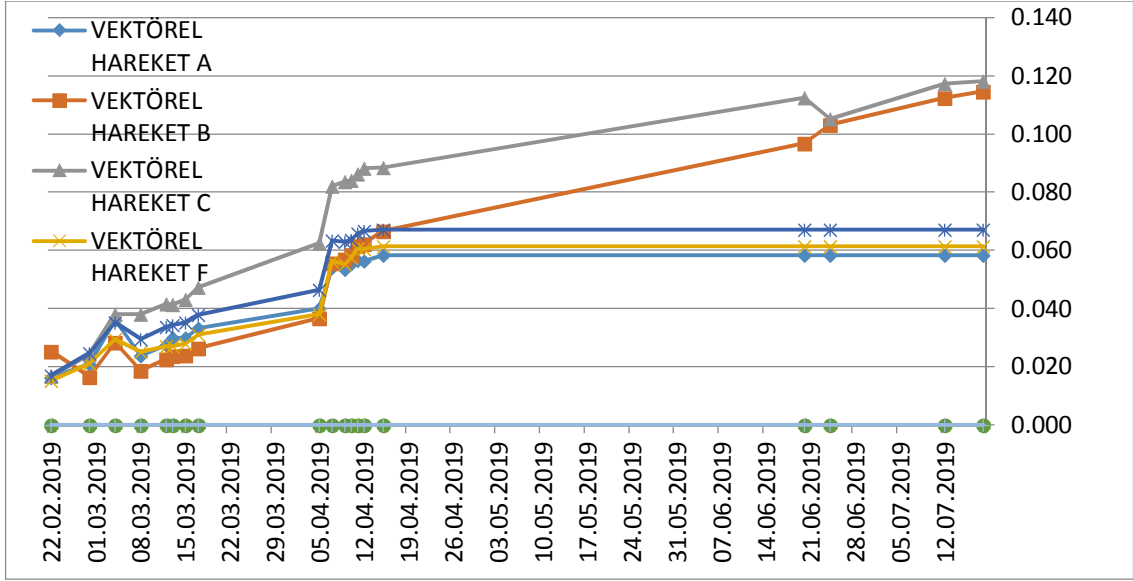
Şekil 4.28. İstasyon-38'deki deformasyon vektörel değişim grafikleri (değerler cm'dir). Km: 57+714.70



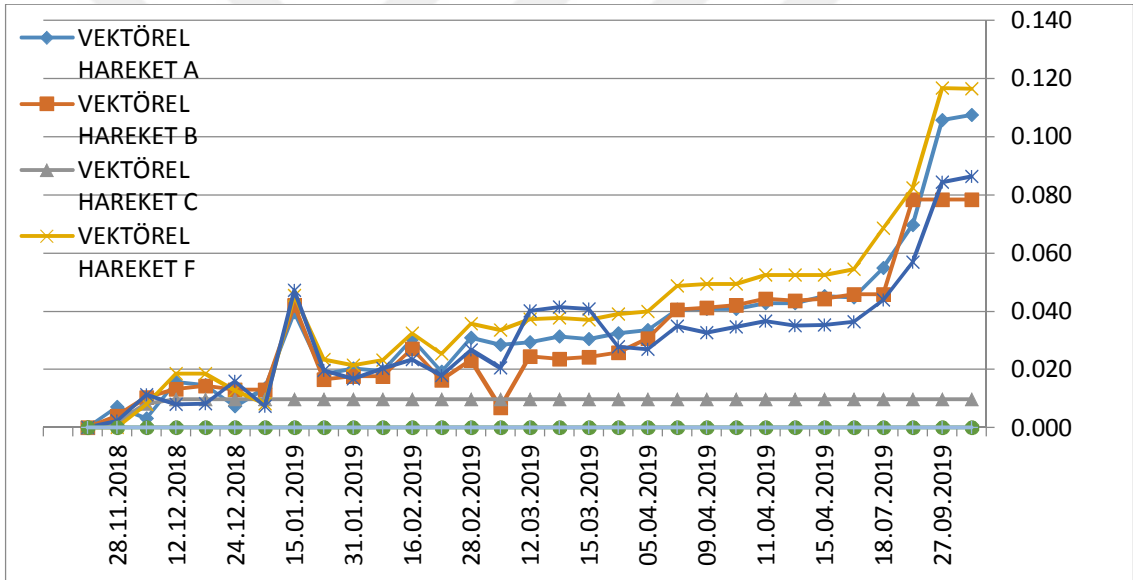
Şekil 4.29. İstasyon-39'daki deformasyon vektörel değişim grafikleri (değerler cm'dir). Km: 57+726.50



Şekil 4.30. İstasyon-40'daki deformasyon vektörel değişim grafikleri (değerler cm'dir). Km: 57+736.20



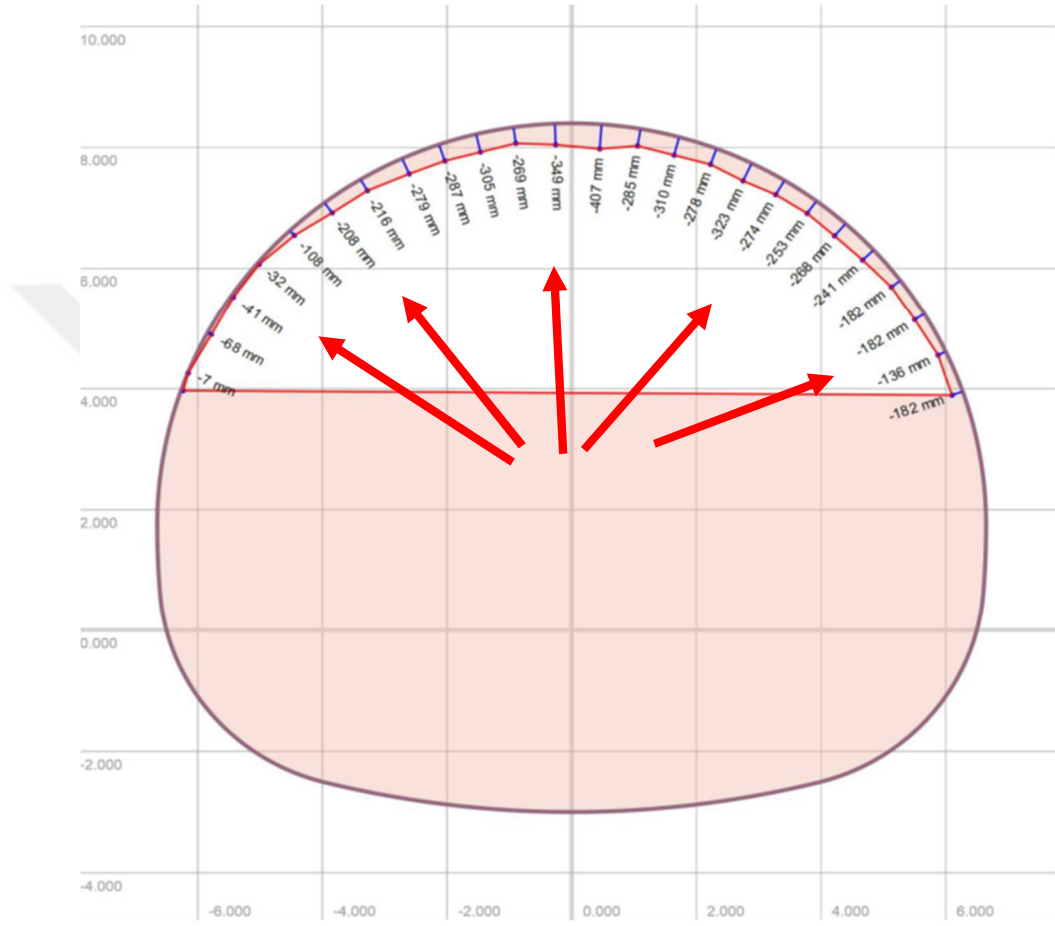
Şekil 4.31. İstasyon-41'deki deformasyon vektörel değişim grafikleri (değerler cm'dir). Km: 57+750.00



Şekil 4.32. İstasyon-42'deki deformasyon vektörel değişim grafikleri (değerler cm'dir). Km: 57+759.50

Deformasyonun beklenen durumdan fazla ve sürekli hareketlilik içerisinde olduğunun belirlenmiş olması, 22.10.2019 tarihinde meydana gelen göçükte herhangi bir çalışanın zarar görmemiş olmasının en önemli başarısıdır. Burada deformasyon belirleme yöntemlerinden yüzey okumalarıyla deformasyon belirlenmesi ve deformasyon hedef noktalarının ölçülmesi çalışmaları birlikte uygulanmıştır, daha detaylı inceleme imkânı sağlanmıştır. Olması gereken tünel kesiti ile yapılan ölçüler sonucu yüzeyi kesitin karşılaştırmalı gösterimi mantığına dayalı olan yüzey okumalarıyla deformasyon belirlenmesi yöntemi, zemin yüzeyindeki mevcut baskı değerlerini göstermektedir.

Deformasyonun yoğun olduğu ve durmayan zemin baskısı sonucu göçüğün meydana geldiği tünel ayna km'si olan 57+692.50 ye en yakın noktada yapılan yüzey okumalarına ait sonuçlardan bir örnek Şekil 4.33 ile gösterilmiştir. Son ölçme tarihi olan 18.10.2019 tarihinden 4 gün sonra deformasyonun yoğun olduğu bölgede meydana gelen göçüğe ait fotoğraflar Şekil 4.34 ve Şekil 4.35'te verilmiştir.



Şekil 4.33. Yüzey okumaları ile elde edilen değerlerin Amberg yazılımı ile gösterimi.

Şekil 4.33'te görüldüğü üzere göçük oluşmadan önce aynaya yakın bölgede eksen kısmında 40 cm ile 35 cm arasında deformasyonun olduğu görülmektedir. Kesit boyunca sağ ve sol omuzlara doğru 30 cm ile 20 cm değerleri arasında değişen deformasyon değerleri tespit edilmiştir.



Şekil 4.34. Tünel-15 Çıkış Km:57+692.50'de oluşan göçük.



Şekil 4.35. Göçük temizleme çalışması (Ankara-Sivas Demiryolu Projesi T-15 Tüneli).

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Ankara - Sivas Demiryolu Projesi, Kayaş – Kırıkkale arası Kesim-1 (Elmadağ–Kırıkkale) (Km: 45+400–Km:74+100 = 28.700 m) Altyapı İnşaatı Yapım işleri Projesinde bulunan ve bu metinde kısaca T15 şeklinde anılacak olan “Tünel-15” tünelinin yapım çalışmaları incelenmiştir. Buna göre T15 tüneli giriş portalı km:53+963,40 ve çıkış portalı km:58+556,60 olup T15 tünel uzunluğu 4593,20 m’dir.T15 tüneli, Del-Patlat yöntemi ve NATM (Yeni Avusturya tünel metodu) prensiplerine göre yapımı devam eden bir tüneldir. İnceleme ve tez çalışmaları süresince dikkate alınan iş konuları; tünel metodolojisi, tünel (zemin kazı yüzeyi) ayna çizimleri, konumsal yönlendirmeler, tahkimat(kazı-destek) elemanlarının montaj ölçü kontrolü, tünel iç(nihai beton) kaplama kalıbının yerleştirilmesi ve tünel yapımının başlangıçtan iş teslimine kadar geçen süre boyunca deformasyon (tünel teknik şartnamesinde belirtilmiştir) ölçme faaliyetleri konularıdır. Bu iş konuları Harita Mühendislerinin görev ve sorumlulukları çerçevesinde gözlemlenmiştir. İnceleme ve gözlemler neticesinde elde edilen veriler, tünel inşaatında ihtiyaç duyulan her türlü teknik bilgiler, kullanılan terimler, yardımcı elemanlar ve bunlarla ilgili verilen detaylar, tez çalışmamızın bir parçası olmakla birlikte Tünel inşaatı yapım işlerinde görev alacak Harita mühendislerine bir kaynak oluşturması da amaçlanmıştır.

Tünel açma faaliyetleri birçok önemli kararın alınmak zorunda kalınabildiği, farklı meslek gruplarının bir arada olduğu çalışmalardır. Tünel yapım maliyetinin yüksek ve içerisinde risk barındıran çalışmalar olması, birden fazla meslek grubunun yer aldığı bu yapı projelerinin özenle planlanmasını, gereken ön hazırlıkların yapılmasını ve konusunda uzman kişilerle çalışılmasını gerektirmektedir. Tünel projelerindeki ölçme işleri diğer mühendislik projelerindeki ölçme işlerine göre bazı farklılıklar ve zorluklar içermektedir. Aşırı emek ve titizlik gerektiren jeodezik ölçüm faaliyetlerinin, tünelin yapılmasında görev alan diğer meslek gruplarıyla ortak paydaları bulunmaktadır. Harita mühendisi, temel veriler olarak kabul edilen konum bilgilerinin üretilmesi ve paylaşılması başta olmak üzere, inşaat faaliyetlerinin tüm etaplarında dizayn, çalışma şemasının oluşturulması ve veri üretimi konusunda önemli görevleri yerine getirmektedir. Harita mühendisleri, konusu ile ilgili ölçme tekniğine hakim olmalı ve teknolojiyi yakından takip edip olası değişimlerin uygulayıcısı da olmalıdır

Tünel yapıları hassas çalışma isteyen, oluşacak aksi durumların maliyetinin fazla olacak olmasından dolayı istenilen doğruluk değerlerinin sağlanabilmesi için tünel kazı

faaliyetlerine başlanılmadan önce yüzeyde kontrol ağları oluşturulmuş ve gereken testlerin yapılmış olması gerekir. Projenin güzergâh yatay ve düşey aplikasyonunun yapılabilmesi ve yönlendirilebilmesi için nirengi ağının oluşturulması, jeodezik altyapı için gereken iyileştirmelerin belirlenmesi, yapılması ve kontrol edilmesi, kazının doğru konumda sürdürülmesi, muhtemel ek kazı-dolgu çalışmalarının kübaj hesaplarının yapılması, tünelde çalışma güvenliği için en temel uygulamalardan olan deformasyon ölçmeleri ve analiz konuları; tünel faaliyetleri içerisinde Harita Mühendislerinin sorumluluğundadır.

Tünel projelerinin planlanan sürede tamamlanabilmesi için tünel giriş ve çıkış aynası (portal) dışında birden çok sayıda ayna (kazı zemin yüzeyi) sayısı olması ve tünel çalışmasının bu aynalarla eş zamanlı olarak yürütülmesi gerekmektedir. Bu çalışmaların tünel güzergâhı üzerinde bir noktada hatasız bir şekilde birleşmesi ölçme çalışmalarının doğruluğuna bağlıdır. Hem yatay hem de düşey yönde gerekli olan yüksek konumsal doğruluk; tecrübeli eleman, kaliteli ölçme aletleri ve hassas sonuçlar üreten ölçme tekniklerinin kullanılmasını gerektirmekte bu da maliyeti ve ölçme işleri için gerekli zamanı artırmaktadır. Tünel doğrultu hatasını en aza indirmeyi amaçlayan jeodezi çalışmaların, belli zamanlara sıkıştırılması nedeniyle oluşabilecek hatalar sonucunda telafisi olmayan kayıplar yaşanabilmektedir. Bu nedenle ölçme çalışmalarının sonucunda elde edilecek doğru veriler her zaman sorgulanmalı ve belirli periyotlarda kontrol ölçmeleri yapılmalı, yapım işlerinin yanı sıra tünellerde yapılacak jeodezi çalışmalarına da gereken süre verilip ilerleme adımlarını belirten çalışma planlarında yer verilmesi, projelendirme işlemlerinin ideal yapılması ve bu tür çalışmaların yapılabilmesi için işletme bünyesinde mutlak suretle Harita Mühendislerinin bulunması şarttır.

Uygulanacak olan ölçüm teknikleri seçilirken; doğruluk, zaman ve ekonomi gibi faktörlerin dikkate alınması gerekir. İstenilen doğruluk değerlerinin karşılanabilmesi tünel çalışmalarındaki en önemli parametresi iken bu doğruluk değerlerinin elde edilebileceği ölçme yöntemlerinin ve tekniklerinin belirlenip tercih edilmesinde zaman ve maliyet kriterleri ön planda olacaktır. Tünel açma verilerindeki doğruluk değerlerini direkt olarak etkileyebilen sistematik hatalar, tüneldeki ölçme çalışmalarında dikkat edilmesi gereken önemli sorundur. Burada bahsedilen sistematik hatalar refraksiyon etkisi ve çekül sapması hatasıdır. Sistematik hatalara karşı tünelde yapılan tüm ölçme çalışmalarında dikkat edilmeli ve bunların minimum düzeye indirgenmesinde sorumluluk ve yetki Harita Mühendisinde olmalıdır.

Mekanize tünel açma çalışmalarındaki gelişmelerle birlikte kazı makinelerinin navigasyonu, yönlendirilmesi ve kontrolünün yapılması önem arz etmektedir. Doğruluğu yüksek yönlendirme sistemlerinin oluşturulması, kazı makinelerini yönlendirme çalışmaları ve bunların kontrolü yine Harita Mühendislerinin tünel açma çalışmalarındaki görev ve sorumlulukları içerisinde yürütülmesi gerektirmektedir. Ayrıca yapılan tüm bu işlerin raporlarının ve dokümanların oluşturulması, alınmış kararların belgelenmesi, tüm bilgilerin ulaşılabilir olması açısından dikkatle uygulanması gereken çalışmalardır.

Deformasyon ölçmeleri ve izlenmesi tünel çalışmalarındaki en önemli ve hayati çalışma faaliyetlerindedir. Deformasyonların izlenmesindeki amacın ve gerekliliğin çalışmada görev alan herkes tarafından benimsenmiş olmalıdır. Deformasyon ölçme çalışmaları, oluşan deformasyonun sayısal ayrıca grafiksel olarak gösterildiği çalışmalar olduğundan, deformasyon değerlerinin belirlenmesi en kritik çalışma adımını oluşturmaktadır. Yer değiştirmelerin tümü deformasyon olarak yorumlanmamalı, hareketliliğe sebep olabilecek nedenler göz önünde bulundurulmalıdır. Tünel inşaat çalışmalarında, tünelin deformasyon ölçüm raporları ile ayna yüzeyinin jeolojik harita (jeolojik ayna haritası) tutanaklarından elde edilen verilerin, tünel aynasının kazı ilerlemesinde uygulanacak tahkimat elemanlarının ve oluşan deformasyonun tünel yapısında veya varsa üst yapıda herhangi bir zarara yol açmayacak seviyede tutulmasında büyük öneme sahiptir. Deformasyon ölçümleri, ilgili bölgenin deformasyon analizinden ve belli bir süreçte oluşturulan deformasyon grafiğinden ayrıca uygulamaya yönelik ve deneysel işlemlerden oluşmaktadır. Yani deformasyon ölçümleri, yapımı devam eden veya yapılmış projelerde çalışma güvenliği, sürdürülebilirlik ve yapının dayanıklılığı için bir zorunluluktur. Konum bilgisinin elde edilmesinde ve bu bilgilerin işlenerek sonuçlar organizasyonun oluşturulmasında, saklanmasında ve yeniden erişilebilir olmasında veri yönetim araçları ve şema yazılımları da kullanılarak tüm bilgiler diğer mesleklerle de paylaşılmalıdır. Böylece deformasyon ölçü ve analizlerinin sonucunda tehlikeli bir durum söz konusu olduğunda tüm tünel çalışmaları, teknik heyet ve yetkililer tarafından gözlenecek ve tünel için birlikte karar alınması sağlanacaktır. Harita Mühendislerinin yapmış olduğu bilgilendirmeye, Jeoloji mühendislerinin zemin bilgisi eklenecek ve İnşaat mühendislerince de ek tahkimat sistemleri devreye sokulacaktır.

Yeni Avusturya Tünel Metot'unda önem arz eden prensip; az sayıda tahkimat sistemi elemanlarıyla doğru tahkimat sistemini oluşturarak kazıyı yapabilmektir. Deformasyon ölçme çalışmaları ile elde edilen veriler kullanılarak yapılan analizler

sayesinde hem doğru tahkimat sistemleri belirlenerek, yerinde ve zamanında önlemler alınır hem de; hız, verim ve ekonomi doğru bir şekilde kullanılmış olur.

Planlanan ve uygulanması istenen tünel yapım projelerinde, tünel açma faaliyetlerinin öncesinde ve yapım aşamasında Harita Mühendisleri aktif olarak görev aldıklarından yerinin bir başka meslek dalından kişilerce doldurulması mümkün değildir. Tüm çalışmalarında olduğu gibi tünel yapım çalışmalarında da nirengi ağı, poligon ağları talep edilen doğruluğa uygun tesis edilmeli, tünel içerisine taşınan poligonların muhafazası iyi şekilde yapılmalıdır. Ölçme faaliyetleri sonucunda elde edilecek verilerin birçok çalışmada altlık olarak kullanılacağı unutulmamalıdır. Ayrıca çalışmaların yönlendirilmesinde hatayı en aza indirmek için doğru ölçme yöntem ve aletleri seçilmeli, kullanılan poligon noktaları düzenli aralıklarla kontrol edilmelidir. Çalışmalar süresince araştırılan bir diğer konu deformasyonların belirlenmesi faaliyetleri olmuştur. Tüneldeki deformasyon ölçümlerinin düzenli aralıklarla yapılması, alınan ölçüm kalitesinin her zaman en yüksek seviyede tutulmasına özen gösterilmesi, hata oranlarının azaltılması, ölçüm aralıklarının sıklaştırılması, deformasyon ölçmeleri ve analizleri iyi değerlendirilmesi, bu gibi projelerde oluşabilecek riskli durumların önceden fark edilmesini sağlayacaktır. Bu çalışma süresince her bir kazı aşamasının oluşturduğu kısa süreli deplasman miktarları incelenmiş, bu deplasmanların miktarlarının veya yüzdelerinin büyük oranda beklenen değer aralıklarında olduğu gözlenmiştir. Oluşan deformasyonların nedeni tünel açma çalışmaları sırasında aynada meydana gelen yüksek titreşimler, del-patlat yöntemi ile oluşan patlatma kuvvetinin etkisi, tahkimatlar arasında geçen sürelerin değişkenliği, zeminin jeolojik yapısı gibi sebeplerin olabileceği göz ardı edilmemelidir.

Sonuç olarak güzergâhın doğru yönlendirilmesinde, maliyet hesaplarının yapılabilmesinde ve güncellenmesinde, tahkimat elemanlarının yerleştirilmesinde ve deformasyonun belirlenmesinde titizlikle görevini yerine getiren Harita mühendisine ve ekibine daima ihtiyaç vardır. Yapımında görev almakta olduğum ve tünel uygulamalarına bu çalışmamda yer vermek için seçmiş olduğum Tünel-15'te yapılan tünel açma faaliyetlerinin tamamında Harita Mühendisliğinin önemini görmem, böyle bir mesleğim olduğu için bir kez daha şahsım ve meslektaşlarım adına gurur verici bir durum olmuştur.

KAYNAKLAR

- Ademoğlu, Y., 2008, Modern tünencilikte jeodezik çalışmaların yöntemi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Akçay, E., 2019, İstanbul grovaklarında Natm ile açılan ikiz tünellerin neden olduğu yüzey deplasmanlarının tahmini, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Aktaş, S. Ő., 2009, Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntem ile inşa edilen bir tünelin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizi ve değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Angelakis, A. N., Mays, L. W., Koutsoyiannis, D., Mamassis, N., 2012, Evolution of water supply through the millennia, *IWA Publishing*, 85-87.
- Arioğlu, E., Yüksel, A., Yılmaz, A. O., 2008, Püskürtme beton bilgi föyleri - özümlü problemler, *TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayın No: 142*, İstanbul.
- Arslan, E., 2005, Ülke ölçmeleri ders notları, *İstanbul Teknik Üniversitesi*, İstanbul.
- Ayan, T., 1982, Jeodezik ağlarla deformasyon analizine genel bakış, *İTÜ Dergisi*, 40/1, İstanbul.
- Ayaydin, N., 1987, Tünel açma yöntemlerinin karşılaştırılması, *Türkiye İnşaat Mühendisliği Kongresi, Bizim Büro Basımevi*, Ankara, 405-422.
- Ayhan, M.E., Lenk, O., Demir, C., Kılıçoğlu, A., Kahveci, M., Türkezer, A., Ocak, M., Açıkgöz, M., Yıldırım, A., Aktuğ, B., Őengün, Y.S., Kurt, A.İ., Fırat O., 2001, *Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı – 1999 (TUTGA-99), Teknik Rapor, HGK*, Ankara.
- Baykal, O., Tarı, E., oşkun, M. Z., Erden, T., 2005, Kutupsal koordinatlarla nokta aplikasyonunda doğruluk, *2. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, 23-25 Kasım 2005*, İstanbul.
- Bozkurt, M., 1987, Tüneller ders notları, *İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası*, İstanbul.
- Butkus, C., Fluker, T. ve Gardiner, T., 1999, Tunneling, USA.
- Cecil, O. S., 1970, Correlation of rock bolt - shotcrete support and rock quality parameters in scandinavian tunnels, Ph.D. thesis, *University of Illinois*, Urbana.
- Chapman, D., Metje N. & Stark A., 2018, Introduction to tunnel construction, *Boca Raton, FL. : CRC Press*.
- Clough, R.W., 1960, The finite element method in plane stress analysis, proceedings of American society of civil engineers, *2nd Conference on Electronic Computations*, 23: 345–378.

- Demir, C., Kılıçoğlu, A., Fırat, O., 2016, Türkiye temel gravite ağı-1999 (TTGA-99), *Harita Genel Komutanlığı*, Ankara.
- Çeçen, E. E., İncecik, M., 2008, Metro tünellerinde uygulanan şemsiye-kemer yönteminin sayısal analizi, *İTÜ Dergisi/d*, 7 (4), İstanbul, 72-82.
- Çeçen, Ö., 2007, İstanbul metrosu koska tünelleri yüzey deformasyon analizi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Çelimli H., Irak S.A., Özer H., Şallı R., Uçar B., 2008, “Tüneller, tünel açma teknikleri, tünel açımında kullanılan makineler, kullanıldığı yerler”, Dönem Ödevi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*, Adana.
- Demir, C., 1999, Türkiye ulusal düşey kontrol ağı-1999 (TUDKA-99)’un dengelenmesi, *Jeodezi Dairesi Başkanlığı, HGK*, İç Rapor No : Jeof-99-2, Ankara.
- Demirel, H., 1993, Deformasyon ölçülerinin analizi, Lisansüstü Ders Notları, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Denek, H., 2003, İstanbul metrosu tünellerinde uygulanan klasik Yeni Avusturya ve boru kemer yöntemlerinin tünel içi ve yüzey deformasyon sonuçlarına göre karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Doğan, U., 2002, 17 Ağustos 1999 İzmit depreminden kaynaklanan deformasyonların kinematik modellerle araştırılması, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Doğruluoğlu, M. T., 2009, TBM metodu ile açılan ikiz tünellerde meydana gelebilecek deformasyonların sonlu elemanlar metodu ve numerik hesaplarla tahmini, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Dunncliff, J., 1993, Geotechnical instrumentation for monitoring field performance, *John Wiley & Sons Inc.*, USA.
- EMAY Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş., 2016, T3 (Çamlık) tüneli kesin proje jeolojik-jeoteknik raporu, *Rapor No: KMO3-K-4-T03-1F-T-001*, İstanbul.
- Emiroğlu, A., 2010, İstanbul (4. Levent-Hacıosman arası) metro tüneline mühendislik uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana.
- Erdoğan, A.O., Bakıcı, S., TUSAGA-AKTİF, 5. Mühendislik ölçmeleri sempozyumu, 2010, ZKÜ, Zonguldak.
- Eren, M., 2014, İki farklı yöntemle (Natm-Tbm) ile açılan bir tünelde düşey deformasyon/deplasmanların belirlenmesi: M5 metro örneği, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

- Featherstone W.E., 1999, The use and abuse of vertical deflections, *Sixth South East Surveyors' Congress Fremantle, November 1-6* West Australia.
- Fowler, S., 2006, Design and preanalysis of underground control networks for tunnel construction, License Thesis, *OTAGO, Survey Department*, New Zealand.
- Gengeç, N. E., 2010, Tünel açma çalışmalarında yatay yönlendirme doğruluğunun belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Gülal, E., 2004, Yüksek Lisans Ders Notları, *Yıldız Teknik Üniversitesi*, İstanbul.
- Gürdal, M.A., 2004), Sayısal nivoların teknolojisi ve tarihsel gelişimi, *Harita Genel Komutanlığı, Harita Dergisi*, Ankara.
- Güven, G., 2009, İstanbul metrosu Otogar-Kirazlı 1 arasının mühendislik jeolojisi ve tünel kazılarına bağlı oluşan deformasyonların değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Harris, C. S., Hart, B. M., Varley, P. M. & Warren, C. D., 1996, Engineering geology of the channel tunnel, *ENG : Thomas Telford Publishing*, London, UK.
- Hemphill, G.B., 2013, Practical tunnel construction, *NJ. : Jon Wiley & Sons*, Hoboken.
- Hisatake, M., 1999, Direct estimation of initial stresses of the ground around a tunnel, *Proceedings of the Numerical Methods in Geomechanics*, 373–377.
- HKMO, 2018, Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği, Ankara.
- Holt, P., 2000, The site surveyor guide to surveying underwater, Technical Report, *3H Consulting Ltd*, USA.
- Hoşbaş, R.G., 1992, Baraj deformasyonlarının belirlenmesinde jeodezik yaklaşımların irdelenmesi, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Hoşbaş R. G., 2004, Barajlarda deformasyon ölçmeleri lisans ders notları, *Yıldız Teknik Üniversitesi*, İstanbul.
- Hüdaverdi, T., Kuzu, C., 2005, Madencilik faaliyetlerinde patlatma kaynaklı çevresel etkilerin ölçülmesi ve analizi, *Madencilik ve Çevre Sempozyumu*, Ankara.
- İnal, C., 2000, Lisans ve Yüksek Lisans Ders Notları, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*, Konya.
- İstanbul Metrosu 4. Levent-Ayazağa Kesimi, Depo Sahası Ve Bağlantı Hatları İnşaatı İş Raporu, 2005.
- Kahyaoğlu, H., 2008, TAG otoyolu özelinde tünel işleri ve Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi, *İnşaat Mühendisleri Odası*, Ankara.

- Kalkan, Y., Baykal, O., Alkan, R.M., Yanalak, M. ve Erden, T., 2003, Heyelanların jeodezik ve geoteknik yöntemlerle izlenmesi: Ambarlı liman bölgesinde bir uygulama., *I. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, 30-31 Ekim 2003*, İstanbul.
- Karaoğlan, H., 2002, Kaya zeminde tünel tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Kayaş-Yerköy Demiryolu / Kesim 1 Tünel – 15 Hesap Raporu, 2011, *Yüksel Proje A.Ş.*, Ankara.
- Kolymbas, D., 2005, Tunneling and tunnel mechanics, *Springer*, Germany.
- Köse, E., 2018, Tünel çalışmalarında harita mühendisliği uygulamaları: Yeni Zigana Tüneli örneği, Yüksek Lisans Tezi, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Gümüşhane.
- Köse, H., Gürgen, S., Onargan, T., Yenice, H., Aksoy, C. O., 2007, Tünel ve kuyu açma, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları No:256*, İzmir.
- Köse, Z. 2018, Obruk barajındaki düşey deformasyonların hassas nivelman yöntemi ile belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon.
- Kun, M., 2010, Zayıf kayalarda ve faylı zonlarda tünel açma tasarım ve yapım gereksinmelerinin araştırılması ve çözümlenmesi, Doktora tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.
- Liu, S., 2006, Deformation measurements during the construction of large dam projects, *Chinese Journal of Underground Space and Engineering* 06(Z2),1346–1348.
- Lunardi, P., 2000, Design and construction tunnel – ADECORS approach, *Tunnels & Tunnelling International Special Supplement*.
- Mahar, J. W., Parker, H. W., Wuellner, W. W., 1975, Shotcrete practice in underground construction, Final Report, *Dept. Of Civ. Eng., University of Illinois*, USA.
- Maidl, B., Schmid, L., Ritz, W. & Herrenknecht, M., 2008, Hardrock tunnel boring machines, *DEU : Ernst & Sohn*, Berlin.
- Maidl, B., Thewes, M., Maidl, U., 2013, Handbook of tunnel engineering volüme I: structures and methods, *Ersnt & Sohn*, Berlin.
- Matsebula, J. S. M., 1988, A History of Swaziland. *Longman*.
- Niemeier, W., Tengen, D., 1990, PANDA the software package for precise engineering networks, *Presented Paper Second Accelerator Workshop DESY, Sept.*, Hamburg.

- Nurnur, H., 2016, Büyük kesitli tünel kazısı sırasında çevre yapılarında meydana gelen oturmaların sayısal modelleme ile analizi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Osmanoğlu, D., 2007, Tünellerde zemin iyileştirilmesi ve stabilitenin sonlu elemanlar yöntemi ile Plaxis programında analiz edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Önalp, A., 1983, İnşaat mühendislerine geoteknik bilgisi, *Cilt II Karadeniz Üniversitesi Yayın No: 3*, Trabzon, 1225s.
- Özaydın, İ. K., v.d., 2006, Evaluation of the movements of the dam embankments by means of geodetic and geotechnical methods, *Journal of Surveying Engineering, ASCE, 132(1)*, 31-39
- Özer, S. C., 2011, Tünel kazılarında optimum çelik boru kemer boyutunun nümerik modelleme ile tayini, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.
- Özgen, M., 2013, Türkiye tünelticilik semineri, Ankara.
- Özhan, N. N., 1994, Deformasyon ölçü yöntemleri ve İstanbul metrosunda yapılan deformasyon ölçmeleri, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Öztürk, E., Serbetçi, M., 1992, Dengeleme hesabı cilt III, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Basımevi*, Trabzon.
- Polat, D., 2010, NATM metodu kullanılarak tünel tasarımı ve modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Sandström, G. E., 1963, The history of tunnelling : underground workings through the ages, *ENG. : Barrie and Rockliff*, London.
- Satıcı, Ö., Topal, T., 2015, Tünel açma yöntemlerinin mühendislik jeolojisi ve kaya sınıflama sistemleri ile değerlendirilmesi, *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 39, 45-57.
- Satır, B., 2007, Tünel deformasyonlarının jeodezik, geoteknik ve sonlu eleman yöntemleri ile belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.
- Seydanlıoğlu, A., 2009, Metro tünellerinde deformasyon ölçmeleri 4.Levent-Ayazağa metro hattı örneği, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Şeker, Ö., 2008, Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi prensiplerine göre tünel kaplama tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Şekercioğlu, E., 1993, Yapıların projelendirilmesinde mühendislik jeolojisi, Ankara

- Telford, T., 1996, Sprayed concrete linings (NATM) for tunnels in soft ground, ENG : Thomas Telford Publishing, London.
- Tonon F., 2010, Sequential excavation, NATM and ADECO: what they have in common and how they differ, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25, 245–265.
- Türkezer, A., 1995, Ankara sabit GPS istasyonu, *Harita Dergisi*, Sayı:114, Ocak 1995, *Harita Genel Komutanlığı*, Ankara, 70-76.
- Ulusal jeodezik gözlem sistemleri ve değerlendirme çalışmaları, 2016, *Türkiye Ulusal Jeodezi ve Jeofizik Birliği (TUJJB) TUJK Bilimsel Toplantısı 04 Mart 2016 Bildirisi*, Ankara.
- Uğurel, Ş., 2010, Türkiye’de metro projeleri yatırımlarının geri dönüşüm süresinin belirlenmesi ve bu sürenin optimizasyonu için öneriler, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Ünal, A., 2017, Türkiye karayolları tünellerinin tarihçesi ve tünel güvenlik kriterleri, *Yüksel Proje, (Yayınlanmamış Rapor)*, Yalova.
- Ünlütepe, A., 2002, Monitoring vertical and horizontal displacements during the Construction Izmir LRTS “NATM” and “EPBM” Tunnels, Doktora Tezi, *Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Ünlütepe, A., 2003, Tünel inşaatları sırasında uygulanan ölçme yöntemleri ve bu yöntemlerin değişik tünelcilik metodları için karşılaştırılması, *1. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, Yıldız Teknik Üniversitesi*, İstanbul.
- Ünlütepe, A., Messing, M., 2005, Tünel ölçme uygulamalarında son yenilikler, *2. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, 23-25 Kasım 2005, İstanbul Teknik Üniversitesi*, İstanbul, 148-160.
- Vardar, M., 1979, Yeraltı kaya yapıları mekaniğinde Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin ana ilkeleri, ankrajlar ve boyutlandırılması, *6. Mühendislik Jeolojisi Konferansı, 10-17 Haziran 1979, Yalova*, 4-16.
- Vardar, M., 2011, Kaya yapıları mekaniği yüksek lisans ders notları, *İstanbul Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Maden Fakültesi*, İstanbul.
- Vardar, M., Müller, L., Sauer, G., 1978, Dreidimensionale spannungsumlagerungsprozesse im bereich der ortsbrust, *Rock Mech. Suppl.*, 9, 67-85.
- Verbundplan Ges.m.b.H., 1987, The New Austrian Tunnelling Method (NATM), Vienna, Austria.
- Yaşar, E., 2007, Taksim-Kabataş funiküler hattında deformasyon ölçmeleri, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Yüceses, O., 2019, Karayolu tünellerinde jeodezik ve jeoteknik yöntemlerle deformasyon analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Çanakkale.



İnternet Kaynakları

URL-1:

<https://www.shopier.com/ShowProductNew/products.php?id=1276781&sid=WVpJZFFxOVB2WljRGxQeDBfNF8gXyA> [Ziyaret Tarihi: 5 Nisan 2021].

URL-2:

<https://www.baytekin.com.tr/urun/beton-test-cihazlari/drc-catlak-olcer-duz> [Ziyaret Tarihi: 10 Nisan 2021].

URL-3:

<http://www.sangari.com.tr/tr/38217/Beton-Siva-Ustu-Gerilim-Olcer> [Ziyaret Tarihi: 5 Nisan 2021].

URL-4:

<https://artigeoteknik.com.tr/basinc-hucresi-pressure-cell/> [Ziyaret Tarihi: 5 Nisan 2021].

URL-5:

http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Poligon%20Hesaplar%C4%B1.pdf [Ziyaret Tarihi: 18 Mayıs 2021].