

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ZAYIF KAYALARDA VE FAYLI ZONLARDA  
TÜNEL AÇMA TASARIM VE YAPIM  
GEREKSİNİMLERİNİN ARAŞTIRILMASI VE  
ÇÖZÜMLENMESİ**

**Mete KUN**

**Şubat, 2010  
İZMİR**

**ZAYIF KAYALARDA VE FAYLI ZONLARDA  
TÜNEL AÇMA TASARIM VE YAPIM  
GEREKSİNİMLERİNİN ARAŞTIRILMASI VE  
ÇÖZÜMLENMESİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Doktora Tezi**

**Maden Mühendisliği Bölümü, Maden İşletme Anabilim Dalı**

**Mete KUN**

**Şubat, 2010**

**İZMİR**

## DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

**METE KUN**, tarafından **PROF. DR. TURGAY ONARGAN** yönetiminde hazırlanan “**ZAYIF KAYALARDA VE FAYLI ZONLARDA TÜNEL AÇMA TASARIM VE YAPIM GEREKSİNİMLERİNİN ARAŞTIRILMASI VE ÇÖZÜMLENMESİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Turgay ONARGAN

Danışman

Prof. Dr. Halil KÖSE

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Prof. Dr. Necdet TÜRK

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Doç.Dr. Y.Dursun SARI

Jüri Üyesi

Yrd. Doç. Dr. Hayati YENİCE

Jüri Üyesi

Prof.Dr. Mustafa SABUNCU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans ve doktora çalışmalarım boyunca, bilgi ve tecrübesi ile beni yetiştirip yönlendiren, maddi ve manevi yönden her konuda desteğini esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Turgay ONARGAN'a

Doktora çalışmam boyunca çalışmalarımı yönlendiren ve katkı koyan doktora tez izleme komitesi üyeleri sayın Prof. Dr. Halil KÖSE ve Prof. Dr. Necdet TÜRK'e

Birlikte çalışmalarımızı yürüttüğümüz, fikir alışverişinde bulunduğumuz Araş. Gör. Dr. Kerim KÜÇÜK ve diğer araştırma görevlisi arkadaşlarıma,

Doktora çalışmam boyunca gerek bilgi birikimleri ve deneyimleri ile gerekse çalışmanın özünü oluşturan İzmir Metrosu II. aşama Üçyol-Fahrettin Altay güzergahı projesinde İzmir Büyük Şehir Belediyesi Raylı Sistemler Müdürlüğü çalışanları Maden Müh. Eşref KURTOĞLU, İnşaat Mühendisi Hasan AYDIN ve Maden Yüksek Mühendisi Özgür ÖNGEN'e, STFA Mühensilik çalışanlarından Jeoloji Mühendisi Yolaç YILDIZ ve Maden Mühendisi Zülal ÇOKO' ya, proje yüklenici firması Bayındır İnşaat çalışanlarından Jeoloji Mühendisi Ali ÇETORİ' ye,

Doktora çalışmam boyunca desteğini ve anlayışını esirgemeyen meslektaşım, değerli eşim Sermin KUN' a sonsuz teşekkür ederim.

Mete KUN

Not: Bu çalışma, Dokuz Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Fonu tarafından **2006-Fen 034** proje numarası ile desteklenmiştir.

# ZAYIF KAYALARDA VE FAYLI ZONLARDA TÜNEL AÇMA TASARIM VE YAPIM GEREKSİNİMLERİNİN ARAŞTIRILMASI VE ÇÖZÜMLENMESİ

## ÖZ

Gelişen dünyada gözlenen hızlı nüfus artışı beraberinde insanların; enerji, ulaşım, toplu taşımacılık, içme suyu, endüstri suyu gibi ihtiyaçlarını da hızla arttırmaktadır. Bu gereksinimlerin karşılanma zorunluluğu, kent yaşamındaki tarihsel süreç, hızlı yapılaşma ve hızlı nüfus artışının getirdiği planlama zorlukları, kentin görünen yüzü kadar görünmeyen yeraltının da, aktif olarak kullanılması zorunluluğunu getirmiştir. Bu zorlukların aşımı ancak tünellerin ve yer altı açıklıklarının kullanılması ile mümkündür.

Tünelcilik çalışmalarındaki riskli durumları, tünelin açılacağı ortam şartlarının zorluğu ve formasyonlardan kaynaklanan beklenmeyen etmenler oluşturmaktadır. Bununla birlikte özellikle şehir içi tünelcilik çalışmalarında metro ve karayolu tünellerinde, şehir üst yapısının durumu da etkin bir parametredir. Bu nedenle hazırlanan tez çalışmasında zayıf kaya ortamlarında ve fay zonlarında tünel açma, tasarım ve yapım gereksinimleri, ampirik, analitik, gözlemsel ve sayısal modelleme teknikleri kullanılarak araştırılmıştır. Araştırmalar sonucunda zayıf kayalarda ve fay zonlarında tünel açımında, hangi parametrelerin değerlendirilmesi gerektiği, ampirik, analitik ya da sayısal modellemeler kullanılarak elde edilen verilerin hangisinin yada hangilerinin daha iyi sonuç verdiği, İzmir Metrosu II. aşama Üçyol-Fahrettin Altay güzergahı ele alınarak değerlendirilmiştir.

Halen kazı ve inşaa çalışmaları devam eden tünelde değerlendirmeler yapılırken, ampirik, analitik ve sayısal modelleme teknikleri kullanılarak elde edilen veriler, gerçekleşen durumlar ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada ele alınan tünel güzergahı için, özellikle zayıf kaya ve faylı zon geçişlerinde alınması gereken önlemler ve tünel inşaa parametreleri ortaya konulmuştur.

Anahtar Sözcükler: Zayıf kaya, fay zonu, sığ tünel, İzmir Metrosu

# **INVESTIGATION AND SOLUTION OF TUNNEL BORING DESIGN AND CONSTRUCTION REQUIREMENTS IN WEAK ROCKS AND FAULTED ZONES**

## **ABSTRACT**

The rapid increase in population in the developing world also increases the need of mankind for energy, transportation, drinking water and industrial water. The obligation of meeting these needs in addition to fast urbanization, historical procedure, fast building rate and the planning predicament induced by population growth have made the utilization of underground actively as a transport medium compulsory. Besides, It is only possible to overcome these difficulties with the boring of underground openings and tunnels.

The risky situations in tunnelling are induced by the hard conditions through which the tunnel will be bored and also the unexpected factors imposed by the underground formations. Additionally, the upper structure of the city is as well an active parameter particularly in inner city tunnels and highway tunnel constructions. Therefore, in this thesis, tunnel boring, design and construction requirements have been investigated for weak rocks and faulted zones by using empirical, analytical and numerical models. As a consequence of these investigations; by investigating the route of Üçyol-Fahrettin Altay within İzmir Metro 2nd Phase, it was found that which parameters should be evaluated in boring tunnels in weak and faulted formations by using empirical, analytical and numerical modelling methods and finally it was decided that the obtained data would yield better results.

While making evaluations for the tunnel which has been under construction, the empirical, analytical and numerical modelling techniques have been employed and the obtained data have been compared with the actually encountered conditions. In this study, the measures that should be taken especially in weak rocks and faulted zone transitions and also the tunnel construction parameters have been put forward.

Key Words: Weak rock, fault zone, shallow tunnel, İzmir Metro tunnels

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ .....	iv
ABSTRACT.....	v
<b>BÖLÜM BİR – GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>BÖLÜM İKİ - TANIMLAMALAR VE LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI..5</b>	
2.1 Tünelciliğin Genel Tanımı .....	5
2.2 Tünellerin Kullanım Amaçları ve Tünel Çeşitleri .....	5
2.3 Tünelciliğin Tarihi Gelişimi.....	6
2.4 Günümüzde Tünelcilik.....	9
2.5 Tünel İnşasını Gerektiren Nedenler .....	10
2.6 Farklı Ortam Koşullarında Tünel Kazıları .....	10
2.6.1 Yumuşak Zeminlerde Tünel Açma .....	11
2.6.2 Yumuşak ve Zayıf Kayaçlarda Tünel Açma.....	12
2.6.3 Sert Kayaçlarda Tünel Açma .....	13
2.7 Tünel Açma İşlemleri.....	14
2.8 Tünel Açma Yöntemleri ve Gelişimi .....	16
2.8.1 Pasif Tahkimat Süreci .....	17
2.8.2 Eskiden Yeniye Uygulanan Tünel Açma Yöntemleri.....	19
2.8.2.1 Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin Geliştirilmesi ve Kullanımı.....	19
2.8.2.2 Fransız Yöntemi .....	23
2.8.2.3 Yeni İtalyan Yöntemi ve Gelişimi .....	24
2.8.3. Zayıf Ortam Koşullarında Yapılan Tünelcilik Faaliyetleri.....	27

<b>BÖLÜM ÜÇ - PROBLEMİN TANIMI VE İNCELENEN ÇÖZÜM</b>	
<b>YÖNTEMLERİ .....</b>	<b>35</b>
3.1 Sığ Derinlikte Tünel Açımı .....	35
3.2 Sığ Derinliklerde Oluşabilecek Riskler .....	35
3.3 Tünel Açımında Riskli Bölgelerde Uygulanan Tünel Destekleme	
Elemanları .....	39
3.3.1 Kaya Bulonu .....	39
3.3.2 Sürenler .....	41
3.3.3 Boru Kemer (Umbrella Arch) .....	41
3.3.4 Ayna ve Zemin Çivileri .....	43
3.3.5.1 Püskürtme Beton .....	44
3.3.6 Tasarım ve Projelendirme Aşamasında Tüneller .....	48
3.3.6.1 Analitik Yöntemler .....	50
3.3.6.1.1 Sığ Tünellerde Oluşan Birincil Gerilmeler .....	50
3.3.6.2 Ampirik Yöntemler .....	61
3.3.6.2.1 Değişik Araştırmacılar Tarafından Önerilen	
Kaya Kütlesi Sınıflandırma Sistemlerinin	
Değerlendirilmesi .....	65
3.3.6.3 Gözleme Dayalı Yöntemler .....	70
3.3.6.4 Nümerik (Sayısal) Modelleme Yöntemleri .....	73
<b>BÖLÜM DÖRT - ZAYIF VE FAYLI ZONLARDA TÜNEL AÇIMI,</b>	
<b>İZMİR II. AŞAMA METRO PROJESİ UYGULAMA ÖRNEĞİ .....</b>	<b>77</b>
4.1 İzmir İli Genel Jeolojisi .....	77
4.1.1 İzmir İli ve Civarı Bölgesel Tektonizma ve Diri Fay Potansiyeli .....	79
4.1.2 Çalışma Alanının Konumu ve Yakın Yerel Jeolojisi .....	82
4.1.3 Yeraltı Suyu .....	85
4.1.4 Depremsellik .....	86
4.2 İzmir Metrosu II. Aşama Proje Güzergahı Üzerinde Karşılaşılan Jeolojik	
Birimler ve Mühendislik Özellikleri .....	86
4.2.1 Alüvyon .....	95
4.2.1.1 Çakıllı Killi Kum .....	95



4.2.1.2 Çakıllı Kumlu Kil.....	95
4.2.1.3 Killi Kumlu Çakıl.....	96
4.2.2 Yamanlar Volkanitleri.....	96
4.2.2.1 Andezit.....	96
4.2.2.2 Aglomera.....	97
4.2.3 Altındağ Formasyonu.....	98
4.2.4 Bornova Karmaşığı.....	99
4.3 Güzergah Üzerinde Planlanan İstasyon Yapılarının Yakın Jeolojileri Ve Özellikleri.....	100
4.3.1 İzmirspor İstasyonu.....	100
4.3.2 Hatay İstasyonu.....	101
4.3.3 Göztepe İstasyonu.....	102
4.3.4 Poligon İstasyonu.....	102
4.3.5 Güzelyalı İstasyonu Jeolojik Yapısı.....	103
4.3.6 Fahrettin Altay İstasyonu.....	103
4.4. Metro Güzergahında Yapılan Saha ve Laboratuvar Çalışmaları.....	104
4.4.1 Saha Çalışmaları ve Uygulanan Sondaj Yöntemi.....	104
4.4.2 Yapılan Laboratuvar Çalışmaları ve Sonuçları.....	106
4.4.2.1 Zemin Deneyleri.....	107
4.4.3 Hidrojeoloji.....	112
4.5 İzmir Metro Çalışmalarında Uygulanan Tünel Tipleri ve Uygulanma Parametreleri.....	113
4.6 İzmir Metrosu Göztepe İstasyonu Yakınında Karşılaşılan Fay Zonunun Detaylı İncelenmesi.....	120
4.6.1 Sondaj Logları ve Değerlendirilmesi.....	121
4.6.2 Fay Zonu ve Yakınında Karşılaşılan Jeolojik Yapı.....	123
4.6.3 Fay Zonu ve Civarında Karşılaşılan Birimlerin Mühendislik Özellikleri.....	124
4.6.3.1 Yapay Dolgu Tabakası.....	124
4.6.3.2 Alüvyon.....	124
4.6.3.3 Miyosen Yaşlı Tortul Kayaçlar.....	125

4.6.4 Çalışma Alanında Karşılaşılan Fayın Ayna Kesitleri Üzerinde Gösterimi.....	129
4.7 İzmir Metrosu II. Aşama Göztepe İstasyonu Yakınındaki Fay Zonu Geçişinde Uygulanması Önerilen Destekleme Yöntemleri .....	133
4.7.1 Fay Zonu Yakını Tip 2 Tünel Güzergahında Yer Alan Kayaçlar İçin Kaya Tahkimat Etkileşim Analizleri ve Tasarım Önerileri .....	136
4.7.2 Fay Zonu Yakınında ve Riskli Bölgelerde Açılacak Tünellerde Uygulanacak Destekleme Yöntemi ve Elamanları .....	141
<b>BÖLÜM BEŞ - SAYISAL MODELLEME.....</b>	<b>145</b>
5.1 Phase2 Sayısal Modelleme Programı ve Kısa Tanıtımı.....	145
5.2 İzmir Metrosu II. Etap Projesi Kapsamında Göztepe İstasyonu ve Civarında Karşılaşılan Zayıf Zonda Açılan Tünellerin Nümerik Modellemeleri .....	153
5.2.1 Tip1 Tünel Modellemeleri .....	155
5.2.1.1 Tip 1 Tüneli Tahkimatsız ve Faysız Durum .....	155
5.2.1.2 Tip 1 Tüneli Tahkimatsız ve Faylı Durum.....	158
5.2.1.3 Tip 1 Tüneli Tahkimatlı ve Faylı Durum.....	162
5.2.2 Tip1 Tünel Kesiti Sayısal Modelleme Sonuçları .....	165
5.2.3 Tip2 Tünel Modellemeleri .....	168
5.2.3.1 Tip 2 Tüneli Tahkimatsız ve Faysız Durum .....	169
5.2.3.2 Tip 2 Tüneli Tahkimatsız ve Faylı Durum.....	171
5.2.3.3 Tip 2 Tüneli Tahkimatlı ve Faylı Durum.....	176
5.2.4 Tip2 Tünel Kesiti Sayısal Modelleme Sonuçları .....	178
5.3 Ayna Stabilitesini Arttırmaya Yönelik Uygulamaların Tunren V1 Sayısal Modelleme Programı İle Çözümlemesi.....	182
<b>BÖLÜM ALTI - DEĞERLENDİRME.....</b>	<b>186</b>
<b>BÖLÜM YEDİ – SONUÇLAR.....</b>	<b>203</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>214</b>
<b>EKLER</b>	

## BÖLÜM BİR

### GİRİŞ

İnsan nüfusunun giderek artan bir eğilim içerisinde olması, doğal olarak insanların günlük yaşamlarındaki gereksinimlerini de arttırmaktadır. Bu nüfus artışı beraberinde insanların özellikle; enerji, ulaşım, toplu taşımacılık, içme suyu, endüstri suyu ve sulama suyuna olan ihtiyaçlarını da arttırmıştır. Bu gereksinimlerin karşılanma zorunluluğu, insanları farklı yöntemleri kullanarak çözüme gitme arayışı içerisine itmektedir. Bu nedenle günümüzde enerji, madencilik, ulaşım, sulama gibi farklı alanlarda sık sık tünel açma işlemlerini görmek mümkündür.

Yenilenen ve gelişen kavramlar içinde, ulaşım artık bir yaşam biçimidir. Özellikle şehir yaşamında artan nüfus yoğunluğu, araç ve yaya trafiği ile şehrin görünen yüzünün değiştirilip güzelleştirilmesi, ulaşımında mümkün olduğu kadar yeraltına alınması zorunluluğunu doğurmuştur. Ayrıca kent yaşamında, tarihsel süreç, hızlı yapılaşma ve hızlı nüfus artışının getirdiği planlama zorlukları da, kentin görünen yüzü kadar görünmeyen yeraltının da aktif olarak kullanılması zorunluluğunu getirmiştir. Bu da, tüneller ve yeraltı açıklıklarının dizaynı ile mümkündür. Gelişen toplumlarda yeraltı yapıları her geçen gün daha da büyük önem kazanmakta, sayıca artmakta ve boyutça büyümektedir.

Diğer tüm madencilik alanlarında olduğu gibi, tünel açımında uygulanacak yöntemin, güvenilirliğinin tam olması, en düşük maliyetle gerçekleşmesi ve gelişen teknolojiyi takip etmesi gerekmektedir. Bu nedenle araştırma, deney-ölçüm ve gözlemler yapılmakta, değişen şartlara göre yeni tekniklerin geliştirilmesine özen gösterilmektedir. Tünel açma tekniklerinde gözlenen gelişmeler, yeni yöntemlerle birlikte yeni makine, araç ve teçhizatın tünel açımında kullanımına olanak sağlamaktadır. Tünelcilik çalışmalarının yüksek maliyetleri, yapıdan kaynaklanan beklenmeyen durumlar ve özellikle şehir içi tünelcilik çalışmalarında dikkat edilmesi gereken zaman faktörü, mühendisliğin bu dalında yeni metot ve tekniklerin yanı sıra araştırma, deney, ölçüm, gözlem ve sayısal modellemelerin önemini arttırmıştır. Bu

nedenle tünel mühendisliği çalışmalarında, mühendislik jeolojisi ve kaya mekaniği çalışmalarının önemi her geçen gün giderek artmaktadır.

Tüneller ve yer altı açıklıkları gibi kazı ve destekleme gerektiren teknik girişimlerin en belirgin özelliği, planlama, projelendirme, modelleme ve uygulama aşamalarında kayaçların durum, nitelik ve davranışlarını ayrıntılı olarak bilme zorunluluğudur. Bir yer altı açıklığının veya tünelin inşa aşamasında içinde bulunduğu koşulların iyi etüt edilmesi, zemin ve/veya kayaçların davranışını belirlenerek bu yapıyı en ekonomik, en hızlı ve en güvenli biçimde inşa edebilmek için, içinde çalışılan ortamının özelliklerinin ve olası taşıdığı risklerin iyi etüt edilip, detayları ile ele alınması gerekmektedir.

Tünel açımı ve desteklenmesi sırasında ve sonrasında, mevcut yapılaşmaların ve tünelin bulunduğu ortamın en az deformasyona uğraması, istenen en önemli durumdur. Bu nedenle tünel kazısı sırasında ya da sonrasında, oluşan veya oluşabilecek deformasyonların alt yapıya veya tünel güzergahı üzerinde bulunan yeryüzü yapılarına zarar vermeyecek kadar küçük tutulması istenir. Bunun durum; ancak iyi bir yönetim, doğru seçilmiş yöntem, nitelikli uygulama ve etkili önlemlerin alınması ile gerçekleştirilebilir.

Tünel inşası sırasında karşılaşılan fay zonları, yeraltı suyu, ayrışmış ve çok çatlaklı kayalar, vb. sorunlar projelerde başarısızlığa veya gecikmelere neden olmakta ve bunların sonucunda ek ve pahalı çözümlere gidilerek, maliyetler artmaktadır. Bu nedenle son dönemlerde planlanan tünelcilik çalışmalarında özel tekniklerin ve teknolojilerin uygulandığı yeni yöntemlerde belirgin gelişmeler sağlanmakta ve yeterli düzeyde mühendislik jeolojisi araştırmaları yapıldıktan sonra tünel kazı ve inşasına başlanılmaktadır.

Yukarıda ele alınan zorunluluklar çerçevesinde, özellikle şehir içindeki kullanımı veya gereksinimi ne olursa olsun tünel açım faaliyetleri kaçınılmaz bir durumdur. Bu bağlamda hazırlanan doktora çalışmasında genellikle şehir yaşamında (karayolu, metro vb.) tercih edilen sığ tünellerde özellikle zayıf ve faylı zonlarda tünel açma,

tasarım ve yapım gereksinmelerinin araştırılması ve çözüm önerileri üzerinde durulmuştur.

Tez çalışmasının temelini oluşturan zayıf kaya olgusu ve faylı bölgeler, ülkemiz coğrafyası düşünüldüğünde kaçınılmaz bir durumdur. Özellikle büyük şehirlerin (İstanbul, İzmir, Ankara, Bursa vb.) ulaşım sorununun çözümlenmesi için gerekli olan raylı sistem, karayolu ve metro projeleri, bu tip formasyondan kaynaklanan olumsuzluklar içinde ilerleyecek ve gelişecektir. Bu nedenle, zayıf kaya ve faylı zonlarda tünel açma, tasarım ve yapım gereksinimlerinin araştırılması ve çözümlenmesi konusu, bu araştırmadan elde edilecek veriler ışığında ilk etapta İzmir Metro inşaatı ikinci etap projesinde denenme imkanı bulacak ve buradan elde edilecek sonuçlar özellikle diğer tünelticilik faaliyetlerine de örnek bir zemin oluşturacaktır.

Tezde gerek güzergahın jeolojik yapısı gerekse şehir içi tünelticilik çalışmalarının önemli örneklerinden olan İzmir Metro inşaatı ikinci etap proje güzergahı ele alınmıştır. Planlanan güzergah üzerinde tünel inşası sırasında geçilecek olan zayıf kaya ortamları ve faylı zonlar incelenerek bunların tasarım ve yapım gereksinimlerine olan etkileri ele alınmıştır. Dolayısı ile çalışma, sadece zayıf ve faylı zonları incelemek yerine faylı ve zayıf zonların tünel açma işlemleri üzerine etkilerini, yapım gereksinimlerini, olası riskleri ve alınması gereken önlemleri irdelemektedir.

Tezde farklı tünel kesitleri için tünel kazıları yapılmadan önce, elde edilen bulgular, saha ve laboratuvar çalışmalarının sonuçları, bilgisayarda oluşturulan sayısal modeller üzerine işlenerek, tünel üzerine gelecek yükler, gerilme durumları, tünel kesitleri etrafından ve yeryüzünde oluşabilecek riskli bölgeler ile farklı kesit ve derinliklerde açılan tünellerin stabilitesi incelenmiştir.

Tünel açımı yapılmadan önce yeryüzünden ve sondajlardan elde edilen bilgilerin, tünel açımı tamamlandıktan sonraki gerçek değerleri ile karşılaştırması yapılarak, “tahmin edilen ve gerçekleşen durum” arasındaki benzerlikler ortaya konulmuştur.

Ele alınan güzergah üzerindeki zayıf kaya ortamlarında ve faylı zonlarda tünel açımı, oldukça riskli ve ek önlemlerin alınmasını gerektiren bir durumdur. İzmir Metro projesi kapsamında açılan farklı kesit alanlarındaki tüneller değerlendirilirken, öngörülen tünel projeleri baz alınmıştır. Fakat araştırma ve yapılan çalışmalar sırasında elde edilen bazı veriler, hazırlanan projenin riskli bölgelerde yetersiz kalabileceğini göstermektedir. Bu nedenle güzergah üzerindeki riskli bölgelerde yapılan gözlem, ölçüm ve sayısal modelleme verileri doğrultusunda farklı tahkimat önerileri de çalışma kapsamında sunulmaktadır.

## **BÖLÜM İKİ**

### **TANIMLAMALAR VE LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI**

#### **2.1 Tünelciliğin Genel Tanımı**

‘Tünel’ kelimesi İngiltere’nin Galler bölgesinde konuşulan Gal dilinden gelmektedir. Bu yöre insanları, sıvı maddelerin taşınmasında ‘Tonne’ adı verilen iki tarafı kapak ya da tıpa ile kapatılabilen tahtadan yapılmış ince uzun kaplar kullanırlardı. Daha sonraları ise yeraltı mahzenlerine ve bodrum gibi yerleşim yerlerine bu ad verilmiş ve 19. yüzyılın ikinci yarısından sonra yaygınlaşarak tünel kelimesi bugünkü anlamıyla kullanılmaya başlanmıştır (Köse ve diğer,2007).

Tünel; eksenin eğim açısı  $30^{\circ}$  den daha küçük olan, iki ucu açık ve boyuna göre çapı çok küçük olan yeraltı yapılarıdır. Bu tanım maden mühendisliği açısından; kazılabilen ve tahkim edilen yeraltı kaya yapıları şeklinde revize edilmiştir. Bu tanımdan çıkarılan sonuca göre tünel inşasında en önemli unsur; mevcut kayanın kazılabilme ve desteklenebilme özelliğidir.

Başka bir anlatıma göre tünel; demiryolu, karayolu, yaya yolu, kanal vb. taşınma yollarının bir kısmının yeryüzünden geçirilmesinin teknik bakımdan olanaksız olduğu ya da ekonomik bakımdan uygun bulunmadığı yerlerde, bu kısmın yeraltından geçirilmesi için başvurulmuş sanat yapılarıdır (Köse ve diğer,2007).

#### **2.2 Tünelin Kullanım Amaçları ve Tünel Çeşitleri**

Günümüzde çok değişik amaçlar için inşa edilen tünellerin, kullanım amaçlarına göre sınıflandırılması aşağıdaki şekilde yapmak mümkündür (Köse ve diğer,2007).

- Mineral ve maden yataklarına ulaşmak amacıyla açılan tüneller
- Ulaştırma amaçlı açılan tüneller

Yayalar için geçiş tünelleri  
 Demiryolu tünelleri  
 Karayolu tünelleri  
 Denizcilik amaçları için açılan tüneller  
 Metro tünelleri

- Su tünelleri
- Askeri amaçlı tüneller
- Yeraltı boşluklarına ulaşmak için açılan tüneller
- Haberleşme nakil hatları, gaz nakilleri gibi çeşitli amaçlar için açılan tüneller
- Sığınak amaçlı tüneller

### 2.3 Tünelciliğın Tarihi Gelişimi

İnsanoğlu tarih öncesi çağlarda daha ahşap ve kerpici kullanmaya başlamadan, kendisine barınak olarak mağaraları seçmiş ve ihtiyacı oldukça bu mağara barınaklarını genişleterek, farkında olmaksızın yeraltı kazıları işine başlamıştır. Bu tünellerin açılmasında, günümüze göre çok ilkel metotlar kullanılmıştır. Kayaçlar odun yakılarak ısıtılmış, ısınan kayacın üzerine su ve sirke karışımı dökülerek, kayacın dağılması sağlanmıştır. Bu yöntemle binlerce metre tünel açıldığı bilinmektedir. Yine ülkemiz topraklarında bilhassa Kapadokya bölgesinde yeraltı şehirleri inşa edilerek bugün dahi gezenleri şaşkınlığa düşürecek kadar gelişmiş bir galeriler ağı oluşturulmuştur. Bugün de bu tüneller elma, hububat, limon saklama ve depolama işlerinde kullanılmaktadır. Yeraltı kazı işleri aynı zamanda düşman ordusunu arkadan çevirmek, ya da kaçmak için kullanılan bir savaş taktiği olmuştur. Bu yöntem Türkler tarafından oldukça çok kullanılmış olup Osmanlı ordularında Lağımcılar denilen bir askeri ihtisas grubu oluşmuştur.

Ulaşım sorununu çözmek amacıyla ilk defa 1863 yılında Londra’da bir yeraltı demiryolu Metropolitan Railway adı ile işletilmeye başlatılmıştır. 1868 yılında Newyork Metrosu hizmete girmiştir. Bu metro yeni dünyanın ilk yeraltı demiryolu ulaşım sistemidir.



Tarihte bilinen ilk tüneller kanal inşaatları ile başlamıştır. Tahmini olarak bilinen ilk tünel Fransa'da 1679-1681 yılları arasında inşa edilen ve 157 metre uzunluğundaki Malpas tüneldir. Amerika' da inşa edilen ilk tünel ise, Auburn' da Schuykill kanalı üzerinde tamamlanan tüneldir. 250 metre uzunluğunda ve yaklaşık 6,5 x 5,49 m. kesitli bu tünel kötü zemin koşulları nedeni ile kısa sürede deforme olmuştur (Köse ve diğer., 2007).

Tünel yapılarındaki son gelişmeler 150 yıllık bir geçmişe sahiptir. Bu gelişmenin en önemli nedeni, demiryollarında görülen büyük ilerlemelerdir. Önce Avrupa'da saha sonra Amerika'da görülen demiryolu devrimi tünelcilik çalışmalarına hız kazandırmıştır. Demiryollarının fazla eğimli yapılamaması, hazırlık çalışmalarının ve maliyetlerin büyük olması, sarp ve engebeli arazilerin demiryolu ile geçişinin imkansızlığı, uzun ve çok sayıda tünelin yapılmasını zorunlu kılmıştır. Kaya mekaniğine uygun tünel çalışmaları 1830 yılından sonra başlamıştır. 1871 yılında Fransa'yı İtalya'ya bağlayan Mont Cenis tüneli işletmeye alınmıştır. Uzunluğu 12,7 km olan tünel 13 yıllık bir çalışma sonucunda açılabilmiştir (Köse ve diğer., 2007).

Birinci dünya savaşından 1950 yıllarına kadar ekonomik zorluklar ve savaş nedeni ile bütün alanlarda görülen durgunluk tünelcilik sektörünü de etkisi altına almıştır. 1950'li yıllardan sonra yeni tünel açma yöntemlerinin gelişmesi, ülkelerin içme suyuna ve sulama suyuna olan ihtiyaçlarının artması, şehir içi ve şehir dışı ulaşım hizmetlerinde görülen artış, tünelcilik çalışmalarını yeniden canlandırmıştır. 1970'li ve 1980'li yıllarda, çoğu Almanya'da olmak üzere, İtalya ve Japonya da yüzlerce kilometre uzunluğunda tünel açılmıştır (Duffaut, 1996a).

Özellikle son 50 yıllık süreçte tünelcilik faaliyetleri, Avrupa ülkeleri ve Amerika' da ki hızlı gelişimine paralel olarak ülkemizde de hız kazanmıştır. Ülkemizde özellikle karayolu, metro ve sulama alanlarında, tünellerden faydalanma yoluna gidilmiştir. Dünyanın ve ülkemizin en uzun sulama tünelleri olan Urfa Tünelleri iki adet 26,4 km' lik bir sistemden oluşmaktadır. Yine son dönemde tamamlanan İzmir – Aydın otobanı üzerindeki Selatinler Tüneli karayolu tünellerine güzel bir örnek

olurken, İstanbul ve İzmir metrolarının tamamlanan etapları, ulaşım alanında açılan metro tünellerinin en güzel örneklerindedir.

Tablo 2.1 Geçmişten günümüze bazı tüneller ve özellikleri. (Köse ve diğer.,2007'den düzenlenerek)

Tünel Adı	Yapım Yılı	Yeri	Amacı	Çapı (m)	Uzunluk (m)
-	MÖ 15000	Avrupa	Maden	-	-
-	MÖ 4000	Anadolu	Nakliyat	3,50x 5,40	1000
-	MÖ 2000	İtalya	Nakliyat	7,50	900
Aksıfat	MÖ 300	Anadolu	Suyolu.	0,80x 2,0	45000
-	MÖ 200	Anadolu	Nakliyat	3,80x 4,80	960
-	MÖ 36	İtalya	Ulaşım	7,60-9,15	1220
Facinus	MS 41	İtalya	Drenaj	-	5635
Mal-passe	1679-1681	Fransa	Su Yolu	7,0x 8,0	160
Thames	1807-1842	İngiltere	Ulaşım	-	-
Schuykill	1818-1820	Amerika	Suyolu	5,50x 6,10	250
Moodhead	1839-1841	İngiltere	Demiryolu	8,50x 6,70	4 843
Bergen	1850-1855	Amerika	Demiryolu	8,50x 6,40	1 281
Mont cenıs	1857-1871	Fransa-İtalya	Demiryolu	7,60x 6,10	12700
St. Godhard	1872-1881	İsviçre	Demiryolu	8,0x 7,50	14980
Simplon I	1895-1906	İsviçre	Demiryolu	5,0x 5,35	19730
Simplon II	1912-1921	İtalya	Demiryolu	-	-
Rove	1911-1922	Fransa	Deniz Tün.	-	7 118
Connaught	1913-1916	Kanada	Demiryolu	8,50x 7,90	8 052
Tanna	1918-1934	Japonya	Karayolu	-	-
Appenin	1920-1931	İtalya	Demiryolu	9,40x 8,30	18510
New cascade	1924-1927	Amerika	Demiryolu	8,0x7,50	14980
Metro	1900-	Paris	Ulaşım	7,80	15200
Metro	1937-1946	Londra	Ulaşım	14,10	4620
Metro	1934-1964	Moskova	Ulaşım	2,0x 6,0	59500
Metro	-	Chicago	Ulaşım	4,50	22500
Mest delaware	1955-1959	Amerika	Sulama	4,10	70858
E. Turnut	1954-1958	Avustralya	Sulama	7,30	22224
Harold roberst	1957-1960	Amerika	Sulama	3,95	37485
Mont blanc	1959-1965	Fransa İtalya	Demiryolu	9,0x 12,45	12650
Kadıncık I	1967-1969	Türkiye	Hidroelektrik	4,00	7128
Urfa	1977-1992	Türkiye	Sulama	9,00	2x 26400

Eyüp	1986–1987	Türkiye	Kanalizasyon	2,20	1865
Selatinler	1988-1994	Türkiye	Karayolu	12,5	2x 2950
Yahazu	1990–1993	Japonya	Karayolu	12x 7.5	2x 2000
İstanbul	1992-	Türkiye	Ulaşım	6,40	2x 6500
İzmir	1995-2001	Türkiye	Ulaşım	2x 6,5	2x 1400
İzmir	2000-2007	Türkiye	Karayolu	12	1800
İzmir	2001-	Türkiye	Ulaşım	12	5400

## 2.4 Günümüzde Tünelcilik

Günümüzde modern tünel mühendisliğinde tünel; kaya yapısının doğal dengesini bozmadan, teknik girişim ile kayayı kazmak ve sağlamlaştırmaktır. Yani, yapılan teknik girişimin doğaya olan etkileri de araştırılmakta ve jeoteknik değerlendirmeler önem kazanmaktadır.

Tüneller ile uzun mesafe taşımacılık ağları oluşturarak şehirler birbirine bağlanabilmektedir. Yine günümüzde tüneller, su ve lağım gibi atıkların taşınmasında %77 oranında, demiryolu ve metro inşasında %15 oranında, otoyollar için %8 oranında kullanılmaktadır. 1968 ve 1975 yılları arasında sadece Amerika’da uzunluğu 1530 km. olan ve toplamı 5,2 milyar \$’a mal olan tüneller inşa edilmiştir. Japonya ise 1980’e kadar 1424 km tünelin inşasını gerçekleştirmiştir. Norveç’ te toplamı 3000 km olan tünellere her yıl 150 km daha eklemektedir.

Tünellerin çap ve uzunluklarını kullanım amaçları belirlemektedir. Genellikle karayolu ve demiryolu tünelleri 3 km.’yi geçmez fakat araçların rahat hareket etmeleri ve manevra yapabilmeleri amacı ile çap geniş tutulur. Su tünelleri genellikle 24 - 40 km. uzunluğunda ve dar çaplıdır. Dünyada kayaç içinde açılmış en uzun tünel 120 km ile Paijanne tüneldir, bu tünel Helsinki şehrinin su ihtiyacını karşılamak amacı ile inşa edilmiştir.

## 2.5 Tünel İnşasını Gerektiren Nedenler

Yukarda değinilen tarihsel gelişim sürecinde tünel inşasını zorunlu kılan sebepler aşağıdaki başlıklar altında toplanabilir.

- Eğimi sınırlı olan güzergahlarda, dağlık arazide yeryüzünden aşılamayan sırt ve tepelerin geçilmesi zorunluluğunda,
- Güzergahın bir kısmında tünel inşası ile önemli bir kısalma meydana gelecekse ve tünel için gereken masraf bu kısalmadan elde edilecek ekonomi ile karşılanabilecekse,
- Dar bir vadi veya sırtın dönülmesi sırasında büyük dolgu işlemi, yarma veya köprü ve viyadüklerin yapılmasının gerekli olduğu durumda,
- İnşası ve bakım masrafları fazla olan özellikle zayıf kaya veya zeminlerde büyük yarmalardan kurtulmak istendiğinde,
- Temiz ve/veya atık suyun taşınması ya da akış yönünün değiştirilmesi gerektiğinde,
- Nüfus yoğunluğu olan büyük şehirlerde, gerek şehrin görünen yüzünün iyileştirilmesi gerekse ulaşımın daha hızlı ve kolay sağlanabilmesi gerekliliğinde,
- Her hangibir karayolu yada demiryolu kesişiminin istenmediği durumlarda

tünel inşası kaçınılmaz bir durumdur. Her ne sebeple açılırsa açılсын çağımızda tünelcilik faaliyetleri önemi giderek artan, farklı yöntem, ve gelişen teknolojiye paralel olarak farklı makine ekipman kullanımı ile giderek modernize olan bir uzmanlık dalı haline gelmiştir.

## 2.6 Farklı Ortam Koşullarında Tünel Kazıları

Tünel açma işlemleri tünelin içinde açılacağı ortama bağlı olarak üç ana grup altında toplanabilir. Bunlar; yumuşak zeminlerde tünel açma, yumuşak ve zayıf kayaç ortamında tünel açımı ve sert kayaçlar içinde açılan tüneller olarak gruplandırılabilir.

### ***2.6.1 Yumuşak Zeminlerde Tünel Açma***

Tünel açma faaliyetlerinin bu denli hızlı gelişiminde büyük payı olan hızlı şehirleşme, artan nüfus ve ulaşım sorunları, yer altı yapılarına ve tünellere olan ihtiyacı arttırmıştır. Açılma nedeni ne olursa olsun çoğu zaman bu tür yapıların ortak özellikleri yumuşak zeminlerde ve sığ derinliklerde açılmış olmalarıdır.

Bu tür inşa işlemlerinde karşılaşılan en belirgin zorluklar, zeminlerin düşük taşıma kapasiteleri, kolay deformasyona uğramaları ve yer altı su dinamiğinden kaynaklanan olumsuzluklardır. Yumuşak zeminlerde tünel içerisinde kazı işlemi başladığında tavan ve yan duvarların hemen desteklenmesi, tabanda ise oluşacak olan kabarma-ondülasyonların önlenmesi gerekmektedir.

Yer altı suyunun getireceği olumsuzlukların önlenmesi için suyun ortamdan uzaklaştırılması gerekmektedir. Pompalar yardımıyla ve uygun drenaj yöntemleri ile yer altı su seviyesi düşürülerek kazısı yapılan tünellerde, yinede ortamdaki suyun uzaklaştırılmasından doğan basınç farkı nedeniyle, tünel içerisine su girişleri devam edebilir. Bu durumda su geliri, ek drenaj önlemleri, sondaj ya da ortamdaki su miktarına göre açılacak galeriler yardımı ile uzaklaştırılmalıdır.

Eğer killi ortamda tünel kazısı yapılacaksa, öncelikle kazılacak kilin karakteristiğinin iyi belirlenmesi gerekmektedir. Yüksek plastisite özelliğine sahip olan killerde, su ile temas ettiklerinde yüksek hacim artışı gözlenmektedir. Bu durumda gerek kazı esnasında tabanda, gerekse tahkimat aşamasında tünel cidarında deformasyonlar meydana gelebilir. Böyle ortamlarda açılan tünellerde, kazı aşaması öncesinde ve sonrasında, zeminin davranışına yönelik olarak yapılan tahminler doğru çıkmazsa, gerek tünelin kendisi gerekse yer üstü yapıları zarar görebilir.

Zemin ortamında tünel açılması ile oluşacak zemin hareketlerini en aza indirmek için en etkili yol, tünel aynasının çok iyi desteklenmesi ve tünelin imalat kalitesinin en üst dereceye çıkartılmasıdır (Chou ve Bobet, 2002). Bununla birlikte tünel açımından önce ve/veya tünel açımı sırasında yapılacak zemin iyileştirme işlemleri de açılacak olan tünelin duraylılığı açısından oldukça önemlidir.

### 2.6.2 Yumuşak ve Zayıf Kayaçlarda Tünel Açma

Yeraltı ve yerüstü yapılarının inşasında zemin kavramından daha sağlam ve dayanıklı olan fakat yinede sert ya da orta sert kayaç gibi davranmayan jeolojik malzemeleri isimlendirmede farklı terimler kullanılmaktadır. Zemin ve kayaç tanımlamaları arasında geçiş özelliği olan bu oluşumlar literatürde farklı araştırmacılar tarafından, değişik sınıflamalar kapsamında isimlendirilmişlerdir. Bunların içinde yaygın olarak kullanılanları; zayıf kayaç (weak rock), yumuşak kayaç (soft rock) dır. Zaman zamanda duraysız anlamına gelen indurated terimi, çok zayıf kayaçlar için kullanılmaktadır.

Genel olarak kayaçların sınıflandırılması, kökenlerine göre yapılmaktadır. Buna göre kayaçlar aşağıdaki durumlarda zayıf kayaç olarak isimlendirilebilirler (Denek, 2003).

- Bileşenleri arasındaki bağın zayıf olması
- Kayacı oluşturan bileşenlerin bozunması
- Tektonizmaya uğramış olması
- Kayaç içerisindeki boşluk durumu

Zayıf kayaç tanımlamasında, kayaçların kökenlerine göre bir genelleme yapmak gerekirse; magmatik kökenli kayalardan, volkanik breş, tüf ve aglomeralar, metamorfik kökenli kayaçlardan, şist ve fillitler, sedimanter kökenli kayaçlardan ise, kiltası, silttası, çamurtaşı ve marn en sık karşılaşılanlarıdır.

Yumuşak ve zayıf kayaçlarda açılan tünellerin duraylılığını etkileyen temel parametreler aşağıdaki gibi sıralanabilir (Whittaker ve Frith, 1990).

- Tünel kazısının içinde gerçekleştiği kayaç birimlerinin dayanımları ve diğer jeomekanik özellikleri
- Gerçekleşen kazı sonucunda meydana gelen gerilmeler

- Tünel kazısı civarında yapılan kazılar veya daha önceki çalışmalar sonucu ortaya çıkan etkileşimler sonucu oluşan gerilmeler
- Kazı yöntemi uygulama kalitesi
- Uygulanan tahkimatın türü
- Yer altı su dinamiği

Yukarıda verilen parametreler doğrultusunda gerek tünelin açılacağı ortamın etkileri gerekse tünelcilik faaliyetlerinden (kazı, destekleme, direnaj vb.) kaynaklanan olumsuzlukların giderilebilmesi için, tünelin açılacağı güzergahta detaylı jeolojik ve jeoteknik çalışmalar yapılarak, uygun tünel açma ve destekleme yöntemleri önerilmeli, önerilen yöntem modellenerek test edildikten sonra kontrollü olarak kazı işlemine başlanmalı ve bu işlem sırasında devalı olarak alınan ölçüm, yapılan araştırma sondajları ve önceki deneyimler ile tünel kazısı kontrol altında tutulmalıdır.

### ***2.6.3 Sert Kayaçlarda Tünel Açma***

Sert kayaçlarda tünel açma işlemini, uygulanan kazı şekline göre ikiye ayırmak mümkündür. Bunlar, delme patlatma yöntemi ile açılan tüneller ve kazı makineleri ile açılan tünellerdir.

Delme ve patlama yöntemi, sert kayaçlarda açılan tünellerde vazgeçilmez bir uygulama olup, eğer açılacak tünel üzerinde yerleşim birimleri vb. yapılaşmalar yoksa tercih edilen bir durumdur. Eğer tünel üzerindeki üst yapılar bu anlamda bir risk taşıyorsa, tünel açma makineleri ya da her iki yöntem birlikte kullanılarak kazı işlemi yapılabilir.

Son yıllarda gelişen ölçüm ve kontrol teknikleri ve buna bağlı olarak yer altında yapılan gerilme ölçümleri, kayaçların belirli bir derinliğe kadar izostatik gerilmeler altında olmadığını, yatay ve düşey gerilmelerin birbirlerinden farklı olduklarını

göstermiştir. Tünellerin özellikle sığ derinliklerden geçtiği durumlarda yatay gerilmelerin düşey gerilmelerden çok daha fazla olduğu saptanmıştır.

Sert kaya ortamlarında, kayaçların yapısal özellikleri, oluşum mekanizmaları sonucu gösterdikleri davranışlar, ortamdaki aşırı kırıklılık, faylanma ve su durumu ile açılmakta olan tünel tipi ve kesit alanı gibi faktörler, tünellerde kemerlenme, kaya patlamaları, aşırı sökümler ve ani su geliri gibi parametreleri ortaya çıkarmaktadır.

Özellikle sert kayaçalarda açılan tünellerde, tünel kazısı sırasında, meydana gelen aşırı gerilmeler ile oluşan sıkışma, kaya patlaması ve aşırı sökülme gibi olaylar için, tünel açımından önce, kazısı yapılacak kaya kütlelerinin dayanımının çok iyi belirlenmesi gerekmektedir. (Özsan ve Başarır, 2003).

Yukarıda kısaca tünellerin, açılacağı ortamlara göre yapılan üç farklı sınıflamanın hepsinde ortak nokta, tünelcilik faaliyetinin yapılacağı ortamın özelliklerinin çok iyi bilinmesi gerekliliğidir. Burada amaç; tünel kazısı ya da sonrasında oluşabilecek riskler en aza indirerek, kazı işlemi başlamadan önce öngörülen durumun, yapılacak olan tünel imalatı sırasında sürprizlere neden olmasını engellemektir.

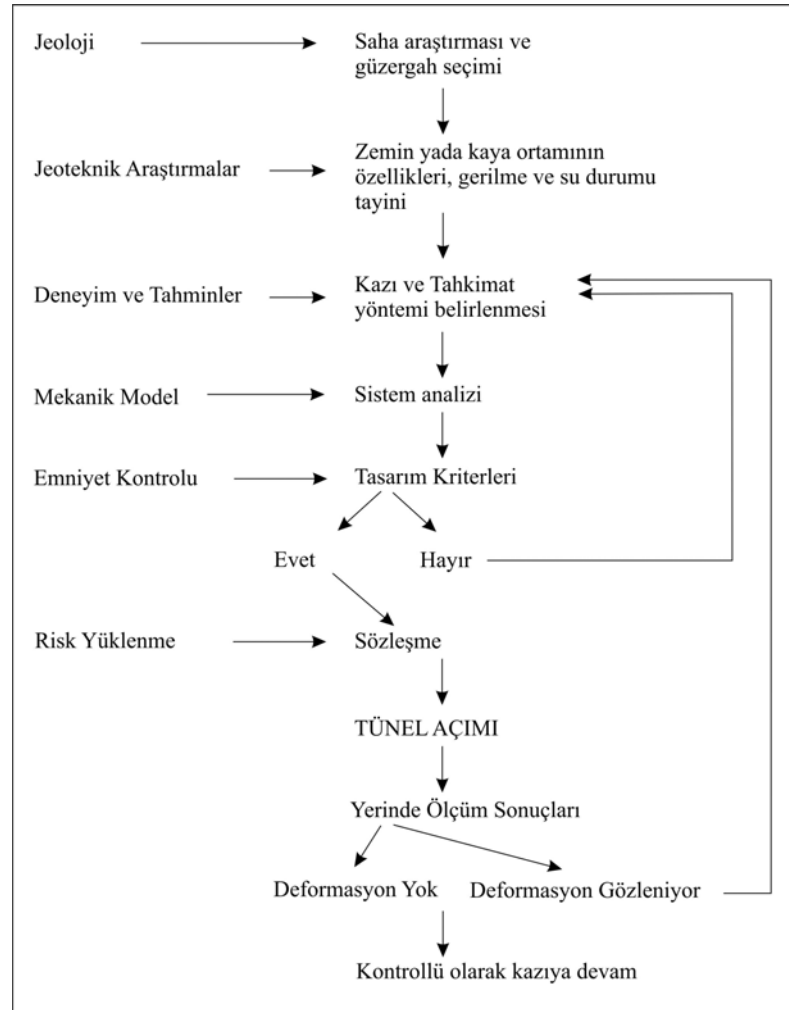
## 2.7 Tünel Açma İşlemleri

Tünel açma işlemleri sırasında başlangıçtan bitime kadar olan safhaları aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür (Bell, 1994).

- Tünelin açılacağı bölgenin jeolojik yapısı belirlenerek, tünelin konumu, güzergahı ve derinliği tespit edilmelidir.
- Belirlenen güzergah da ki kaya ya da zeminin özellikleri, dayanım parametreleri, yapısal bozukluklar ( kırık, eklem takımı, fay vb.) ve yer altı su durumu belirlenmelidir.
- Yapılan hesaplamalar ve deneyimler sonucu elde edilen verilere göre, tünel kazı kesiti, kazı yöntemi, kazını yapılacağı makine cinsi, kullanılacak tahkimat elemanları ve gerekiyorsa drenaj yöntemleri ortaya konmalı.



- Yapısal bir model oluşturulmalı ve eldeki farklı veriler farklı zemin koşulları ve farklı tahkimat elemanları kullanılarak modellere uygulanmalıdır. Bu uygulamalarda güvenlik faktörlerine önem verilmelidir.
- Gerilme ve deformasyona bağlı olarak hazırlanan sistemin güvenilirliği kontrol edilmelidir.
- Yerinde ve sürekli ölçümler tünel açımı ile paralel yapılmalı ve elde edilen deformasyon değerleri zamana ve ilerlemeye bağlı olarak değişmiyorsa imalata devam edilmelidir. Şekil 2.1' de tünel açımında izlenecek yol kısaca özetlenmektedir.



Şekil 2.1 Tünel açımı sırasında izlenecek yol ( Bell, 1994 düzenlenerek)

## 2.8 Tünel Açma Yöntemleri ve Gelişimi

Çalışma kapsamında bu bölümde, tünel açımında ve desteklenmesinde sıkça kullanılan yöntemlerin gelişim süreçleri, ortaya çıkma nedenleri ve bu yöntemler arasındaki ilişkilere örneklerle değinilmektedir. Ayrıca özellikle zayıf ortam koşullarında ve faylı zonlarda yapılan benzer tünelcilik faaliyetleri ile ilgili önceki çalışmalar da araştırılmıştır.

Tünel açma işlemi esnasında kullanılan inşaat teknikleri daima doğal ortama uygun olmalıdır. Bu nedenle, iyi bir tünel inşası ve tahkimat yöntemi, kaya kütlelerinin değişken yapısına bağlı olmalı ve salt teoriye saplanmamalıdır. 20. yüzyıl boyunca tünel duraylılığı ve tahkimatı hakkındaki fikirler 3 ana teknik farklılıkla ifade edilmektedir;

- 1920' ler de, ahşap ve taş kullanılan "pasif tahkimat" hüküm sürmüştü, daha sonra çıkan ağır çelik tahkimat ve yerinde dökülen beton ile de, daha geniş tünel boşluklarına imkan tanınmış ve tünel açımında daha yüksek ilerleme hızları elde edilmiştir.
- 1960' lar da, inşaat ve maden mühendisliğinde püskürtme beton ve kaya saplamalarının kullanımı, Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi'nin doğmasına sebep olmuştur. Bu yöntem daha sonra hem derin hem de sığ tünellerde gelişmeler göstermiştir.
- 1990' lar da ve 2000' li yılların başında ise, arının ilerisinde uygulanan yeni geliştirilmiş ön tahkimat sistemleri kullanılmış ve bu da zayıf zemin şartlarında Yeni İtalyan Yöntemi'nin kullanılmasına yol açmıştır (Duffaut, 1996a).

Tünelciğin ilk yıllarından beri, yeraltı açıklıkları ve boşluklarının kendi kendini desteklemesi, hiçbir ilave destek elemanına gerek duyulmadan yapılmıştır. Kemerlenme olarak da isimlendirilen bu temel prensip, tarih öncesinde insanoğluna düşük dayanımlı kayalar içinde bile, çok fazla süreksizlik içermemesi koşuluyla, duraylı boşluklarda barınma imkanı vermiştir.

Geçmişte kendi kendini destekleme prensibi, köprüler ve kiliseler için, çatı kemerleri inşasında kullanılmıştır. Bu tür kemerler, kendisini oluşturan bloklar tam oturtulduğu takdirde, çimentoya gerek duymadan ayakta kalabilmişlerdir. Burada kemerler; yerçekimi kuvvetlerini, kendini oluşturan elemanlarının ilerlemeli sıkıştırma etkisi ile karşılarlar. Yeraltında bu tip 3 boyutlu kemerlenmeler ve meydana gelen yükler doğa tarafından karşılanmaktadır. İnşa edilen kemerler için doğru kabul edilen her şey, doğal olarak oluşmuş veya insan eliyle açılmış tüneller ve yeraltı boşlukları için de geçerlidir (Duffaut, 1996b).

- Şayet kayaç, tünel etrafındaki teğetsel gerilmeleri karşılayacak kadar dayanımlı ise ve eğer kötü şekilde yönlendirilmiş eklem yüzeyleri içermiyorsa, boşluk herhangi bir tahkimata gerek duymadan ayakta kalacaktır. Genişliği 50 metre kadar büyük olan doğal boşluklar günümüzde oldukça yaygındır ve bugüne kadar bilinen ve kendi kendine dayanan en büyük boşluğun genişliği 400 metredir (Good Luck yeraltı boşluğu, Malezya).
- Kayacın dayanımı boşluğun çevresi boyunca aşıldığı zaman ve kaya kütlelerinin oldukça homojen olması durumunda, boşluğun etrafında fazla gerilmeyi barındıran “plastik bir halka” oluşmaktadır. Plastik deformasyon tarafından kaya kütlelerine verilecek yüksek hasar, düşük kalınlıktaki bir tahkimatla yani ince bir püskürtme beton kaplamasıyla önlenebilir.
- Kayaç kütlesi çok fazla çatlaklı ve hatta zemin malzemesi şeklindeyse, kendi kendini taşıma olayı artık geçerli değildir ve kaya kütlelerini bir bütün olarak tutmak, kuvvetlendirmek için çimentolamaya veya kaya saptamalarına ihtiyaç vardır (Duffaut, 1996b).

### ***2.8.1 Pasif Tahkimat Süreci***

Tünelciliğin ilk yıllarında, tüm tünel kesiti daha küçük kesitlere bölünerek, birinin ardından diğeri açılarak ve boşluklar yoğun ahşap tahkimat desteklenerek ilerlenmekteydi. O yıllarda tünel inşaatının İngiliz, Belçika, Fransız, Alman,

Avusturya ve İtalyan tünellerde kullanılan yöntemleri gibi birçok “ulusal” yöntemlerle anılması bir sürpriz değildi.

Bu yöntemlerde, kendi kendini desteklemenin yeri “iyi zemin” şartlarıyla veya ahşap üniteler arasındaki ufak boşluklarla kısıtlanmıştı. Kullanılan ahşap tahkimat geçici olup, uzun süre dayanabilecek taş veya tuğla kemerler ile yer değiştirmesi gerekiyordu. Bu tür yapıların başlıca dezavantajı, çevre kayaç ile dokanaklarının hem geç olması (örneğin kemerin inşası haftalar gerektiriyordu) hem de süreksiz olmasıydı. Yani düz bir yüzeye sahip kemer, pürüzlü kayaç yüzeyine tam oturmuyordu. Bu gecikme, kaya kütlelerinin aşınmasına ve gevşemesine olanak tanıyor ve yavaş yavaş kemer üzerine artan yükler gelmeye başlıyordu. İkinci Dünya Savaşı’ndan sonra, tünellerde kullanılan yöntemler konusunda iki yenilik ortaya atıldı. Bunlar;

- Geçici tahkimat olarak çelik tahkimatlar ahşap tahkimatın yerini aldı ve sonuçta daha büyük boşlukların desteklenmesi sağlandı. Terzaghi tarafından 1949’da standardize edilen bu yöntem daha sonra, AÇTM - Amerikan Çelik Tahkimat Metodu olarak isimlendirildi, (Terzaghi ve Peck, 1948).
- Nihai kaplama olarak taşın yerini, yerinde dökülen beton aldı ve bu sayede biraz geç olsa da, kaya kütleleri ve kemer arasında homojen bir dokanak sağlandı.

Söz konusu 2 yenilik, tünellerde endüstrileşmeye yol açarak, daha az insan gücüyle daha hızlı ilerleme mümkün olduğunu ortaya koymuştur. Ancak, uzun yıllar boyunca durum, pasif tahkimatın şu iki temel dezavantajını gizlemiştir;

- Oldukça uzun süren operasyon gecikmesi,
- Betonun dökülmesinden önce tahkimat ile çevre kayaç arasındaki süreksiz temas.

Sonuç olarak bu süreçte nihai kaplama, dayanımlı bir yapı olarak tasarlanmış ve bilinmeyen dış yüklerle karşı güçlendirilmiştir. Bu yüzden yapısal hesaplamalar daha çok, net olmayan ve sonucu önceden kestirilemeyen hipotezlere dayandırılmıştır.

Pasif tahkimatlara özgü bu dezavantajlar, sığ tünellerin birçoğu için göz ardı edilebilir düzeyde olmuştur. Aynı tolerans, sert kayalarda açılan derin tüneller için de geçerlidir (1875'deki Gothard demiryolu tüneli gibi). Ancak, bu dezavantajlar 1900 yılında Simplon tüneli yüksek derinlikte ufalanmış kayacı geçmek zorunda kaldığında engelleyici olmuştur. Kalınlığı ne olursa olsun, hiç bir kemer 2000 metrelik bir dağın baskısını kaldıramaz. Burada anlaşılması gereken olgu, kömür madencilerinin yaptığı gibi kayacın akmasına izin vermektir. Bu süreçte, yüksek derinliklerdeki kayaların davranışına alışılarak, kömür gibi ufalanmış ve yumuşak kayaların nasıl ele alınacağı öğrenilmiştir (Duffaut, 1996a).

Alp'lerdeki bu deneyim, İsviçre'li mühendisler Maillart ve Andrea için bir dayanak oluşturmuştur. Bu sayede püskürtme betonun verimliliği on yıllar öncesinde kanıtlanmıştır. Bu doğrultuda Maillart ve Andrea isimli araştırmacılar şu iki yorumu yapmışlardır. “taş tahkimat kaya kütle konturunu sıkıca tutmalıdır” (Maillart, 1922)., “hızlı monte edilen hafif bir tahkimat, kaya basıncına karşı en etkin yoldur” (Andrea, 1949).

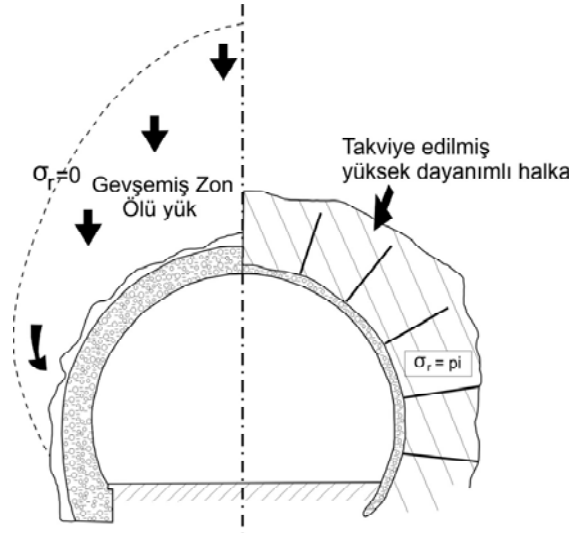
## ***2.8.2 Eski Yeniye Uygulanan Tünel Açma Yöntemleri***

### *2.8.2.1 Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin Geliştirilmesi ve Kullanımı*

1960'lar da İsviçre'li mühendislerce ortaya konmuş yukarıdaki prensipleri, Avusturyalı mühendis Von Rabcewicz pratiğe dökmüş ve uygulanabilen iki yeni teknoloji ortaya koymuştur. Kömür madencilerinden kaya saplamalarını, Amerika'dan püskürtme betonu örnek alarak, yöntemin hedefini net olarak belirlemiştir. Buna göre temel prensip, kaya basıncını bir sürü ağır elemanlar yardımıyla tahkim etmeye çalışmak yerine (Şekil 2.2) “kaya kütlelerinin kendilerini desteklemesine yardım etmektir.” (Karakuş ve Fowel, 2004).

Avusturyalı mühendisler, aynı zamanda tünel kesitinin, şeklinin ve kazı yönteminin, çevre zemine vereceği zarardan mümkün olduğunca kaçınılması gerekliliğinin önemli olduğunu anlamışlardır. Aynı zamanda tıpkı baraj mühendisleri

gibi, zamana bağlı olarak zeminin vereceği reaksiyonların da ölçülmesi gerektiğini belirtmişlerdir.



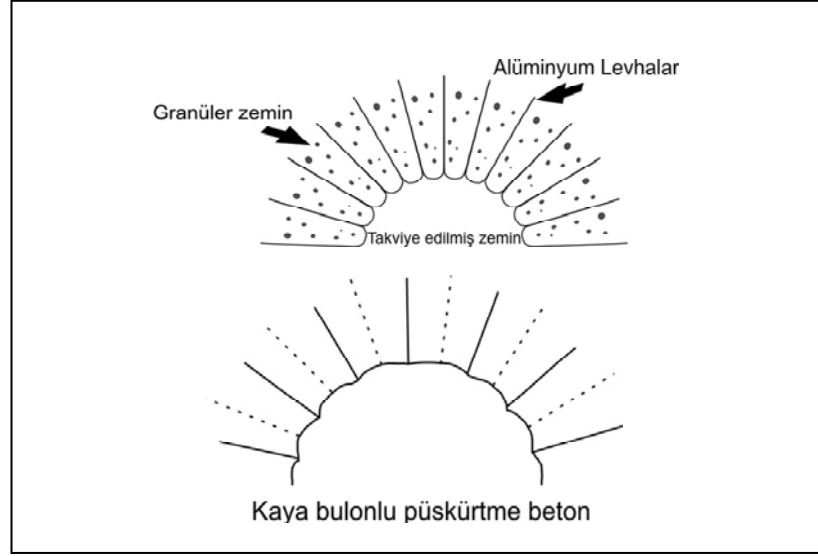
$\sigma_r$  : Radyal Gerilme

$P_i$  : Plastik zonda tahkimata etki eden tavan basıncı

Şekil 2.2 Kalın, pasif bir tahkimatla (soldaki) NATM'nin "takviye edilmiş halkasının" (sağdaki) karşılaştırılması (Duffaut, 1996a).

Kaya kütlesi, kaya saplamaları ve püskürtme beton ile oluşan yapı, örneğin taneli zemin kütlesi, metal çubuklar, panellerle takviye edilmiş zemin ile (Şekil 2.3) karşılaştırılabilir. Her iki durumda da, ana mekanik rol takviye edilmiş kaya veya zemin kütlesi tarafından üstlenilmektedir; püskürtme beton sadece bir yüzey kaplaması gibi etki göstermektedir ve asıl rolü, korunmasız açıktaki taze kaya kütlesini korumaktır.

Sonuç olarak, NATM yöntemi 20. yüzyılın ikinci yarısını kontrol eden bir tünelticilik sanatı olarak görünmektedir. Bu yöntemin temelinde, zeminin zayıflığını bazı yapay ve pahalı ekipmanlar ile gidermek yerine, zeminin yerindeki özelliklerinin iyileştirilmesi yatmaktadır (Rabcewicz,1964). Arapça'dan gelen "tahkimat" sözcüğü burada azda olsa yanıltıcı olmaktadır. Burada püskürtme beton ve kaya saplamalarının görevi asla zemini tahkim etmek değil, zemini tutmaktır.



Şekil 2.3 Püskürtme beton ve kaya saplamasından oluşan bir tünel tahkimatı ile (aşağıdaki) takviye edilmiş zemin kemeri (yukarıdaki) arasındaki benzerlik (Duffaut, 1996a).

Bu yöntemdeki tek şüphe, uygulamasının çok çabuk sürede yapılmasının gerekliliği, özenli bir iş organizasyonunun sağlanması ile gerçek ve eş zamanlı izleme işlemlerinin yapılmasıdır.

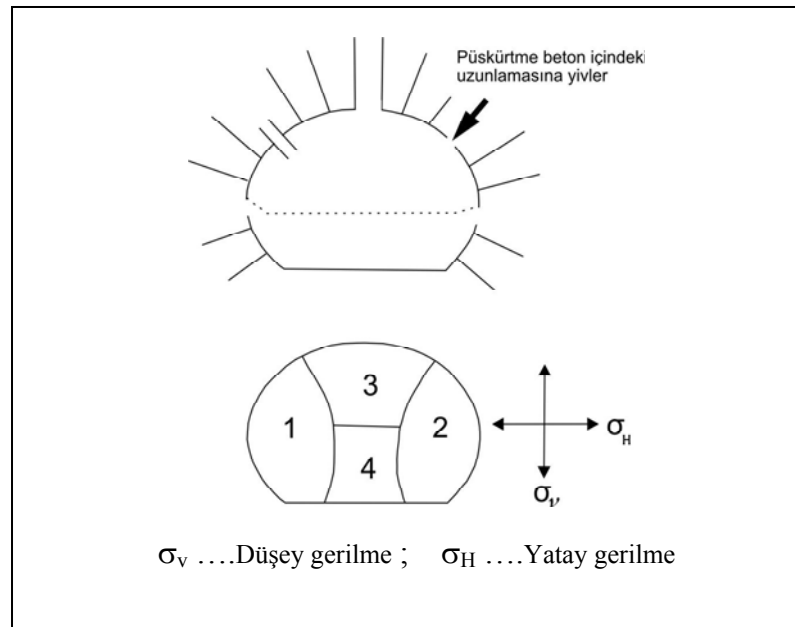
1970’li ve 1980’li yıllarda, çoğu Almanya’da, İtalya’da ve Japonya’da olmak üzere NATM yöntemi ile yüzlerce kilometre uzunluğunda tünel açılmıştır. Ancak, bazı başarısızlıklar da bildirilmiştir. En bilinen başarısızlık örnekleri, 1994 yılındaki Münih tüneli ve yine 1994 yılındaki İngiltere’deki Heathrow hava alanı altındaki tünellerdir. İlk örnekte, alüvyonlu çakıldaşımın beklenmedik şekilde derinleşmesiyle tünelin taç kısmı göçmüştür. İkinci örnekte ise; çok karamsar bir tasarım ile üç paralel tünel açılmaya çalışılmıştır. Kireçtaşı içinde açılan kanal tüneline geçerli olan bu yöntem, Londra kilinde başarısız olmuştur.

1970’ler ve 1980’ler boyunca, “güçlendirilmiş kayaç halkası” kavramı birçok ülkedeki geleneksel tünel inşasında vazgeçilmez bir unsur olmuştur. Günümüzde de hala, örtü tabakasının kalınlığına bağlı olarak uygulamaları farklılık göstermektedir:

- Derin tüneller için, kayacın alt üst olmasını önleyerek, elastik veya elasto-plastik gerilme ferahlamasına eşlik etmek gerekmektedir. Tahmin edilen

kapanma, püskürtme beton kabuğu kıracak kadar güçlü ise, kayaç kapanıma başlar başlamaz çalışacak uzunlamasına yivler yaratmak gerekmektedir (Şekil 2.4). Bu tür yivler, kaya saplamaları vasıtasıyla, kayaç kütesinden tam anlamıyla aşağıya doğru sarkmış kemerin bağımsız parçalarının sınırlarını belirlemektedir. Tauern, Karwendel, Arlberg ve Inntal tünelleri Alp dağları içinde bu yolla açılan en zor tüneller arasında sayılabilir.

- Sığ tüneller için, genellikle de zeminde veya yumuşak kayaçlarda sürülen sığ tüneller için, zemindeki geri dönülmez makaslama kuvvetini önlemek ve yüzey oturmalarını sınırlamak için her tür deformasyon önlenmelidir. 1980’li yıllarda, Avusturyalı mühendisler, üst kılavuz kazıyı, yanlarda sürülen iki sivri kemer şekilli galeri ile yer değiştirmeyi düşünmüşlerdir. Bu yapı, zemin yüzeyinde hakim olan düşük yatay gerilmelere daha uygun bulunmuştur (Şekil 2.4). Viyana’nın ve bir çok Alman şehrinin metro tünelleri, ve aynı zamanda Almanya’da inşa edilen 150 km. lik hızlı tren yolu tünelleri, gerektiğinde çimentolamadan veya yeraltı su seviyesinin düşürülmesinden sonra, bu tarzda inşa edilmiştir. Bununla birlikte, Avusturyalılara bir ihracat primi ödemek istemeyen Almanlar, metodu “püskürtülmüş beton kaplama metodu” olarak isimlendirmişlerdir.



Şekil 2.4 NATM'nin değişkenleri. Uzunlamasına yivler içeren derin tünel (yukarıda), sivri kemer şekilli yan galeriler (aşağıda),(Duffaut, 1996a).



Almanya'nın dışında ana tünelciler, İtalya ve Japonya, NATM uygulamalarını kendilerine 1970'li yıllarda uyarlamışlardır ve bunları Çin 1980'li yıllarda izlemiştir. O zamanlardan günümüze bu ülkeler sadece iki tünel açma yöntemini esas olarak kullanmışlardır; TBM (Tunnel Boring Machine) ve NATM.

### 2.8.2.2 Fransız Yöntemi

NATM' nin Fransa'da ilk kullanımı, 1970'lerde özellikle Elektrik İşleri tarafından olmuştur. Aynı süreç içinde, Fransız mühendisler Panet'in, rehberliğinde tünel dizaynına ilginç bir katkıda bulunarak "konverjans-sınırlama" yöntemini geliştirmişlerdir (Panet, 1995). Bu teori, bir tünel etrafındaki halkanın davranışını ifade etmek için matematiksel terimler kullanılmaktadır. Tahkimat üzerine gelen gerilmeler, bu halkanın giderek kapanmasıyla azalmaktadır. Yöntem iki boyutlu hesaplamalar kullansa da, üstü kapalı olarak tünel arını tarafından üstlenilen üç boyutlu rolü hesaba katmaktadır ve bunu yaparken yük boşaltma faktörünü " $\lambda$ " yı kullanmaktadır.

Pratikte, birçok Fransız şirketi NATM' yi görmezden gelmeye devam etmiş ve bu terimi Fransız terminolojisinden çıkarmışlardır. Bunu yaparken, zayıf taban koşullarında daha etkin sonuçlar veren eski iyi "pasif tahkimat" sistemini kullanmışlardır. Bu kalıplara sıkı sıkıya bağlı kalma, 1985 yılından sonra Fransız iştrakeçilerin TBM ve kalkan kullanmasıyla çelişmektedir.

1970'ler de NATM varlığı ve tam tanımı konusunda bilimsel ortamlarda tartışmalar yaşanmıştır. Bu yöntemin uygulama değişkenlerinin bazı teorisyenleri endişelendirdiği gözlenmiştir. Ancak uygulamada NATM ile açılmış bir tünel, ortak ve net birtakım ölçütlerle tanımlanmaktadır (Duffaut, 1996b). Bunlar;

- Kayacın kendini desteklemesine duyulan güven ve yuvarlak şekil,
- Püskürtme beton ve kaya saplamalarının hemen kullanılması,
- Kesitin hızlı kapanımı ve deformasyonun dikkatli bir şekilde izlenmesi.

şeklindedir.

Fransız mühendisler, NATM uygulamalarını uluslararası projelerle mükemmel şekilde bütünleştirmişlerdir. Bunun dikkat çekici bir örneği Cenevre yakınlarındaki CERN yeraltı boşluklarıdır. 20 metre açıklığa sahip bu boşlukların ayırıcı karakteristiği, ilk defa olarak duraylılık hesaplarında püskürtme beton kabuğun göz ardı edilmesidir. Aslında göz ardı edilen bu kaplama sayesinde tüneli çevreleyen kayaç gevşememekte ve orijinal özelliklerini korumaktadır.

### 2.8.2.3 Yeni İtalyan Yöntemi ve Gelişimi

Yumuşak veya zayıf zeminlerde, kırıklı veya fay zonlarında ya da örtü tabakasının çok ince olduğu durumlarda elde edilen deneyimler, açılacak tünelin sadece duvarlarının değil, aynı zamanda aynası da kazı sırasında tahkim edilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur. Bu çeşitli yollarla yapılabilir;

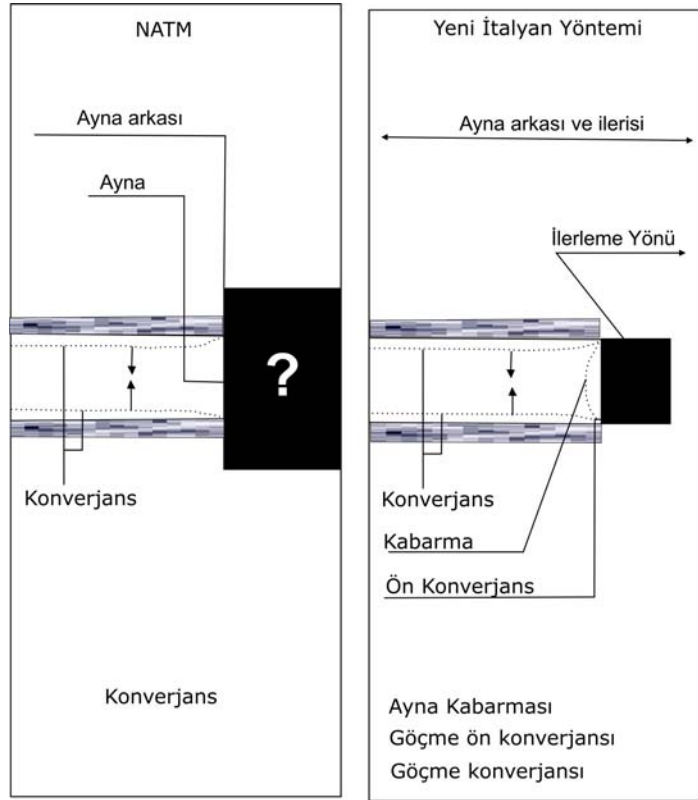
- Arının ortasında kısa bir basamak kütleli bırakarak,
- Tünel aynasına beton püskürterek,
- Aynayı fiberglass saplama ile takviye ederek,
- Gelecekteki tünel duvarları boyunca, çelik borularla ön sürenler yerleştirilerek (şemsiye kemer),
- Mekanik ön-kesme ve çimento şerbeti enjeksiyonu yolu ile tünel duvarları etrafında dayanıklı kemerler yaratarak.

Tüm bu “ön tahkimat” lı yöntemlerin amacı tünel arınının çökmesini önlemektir.

Fransa’da Lyon kentinin güneyindeki Galaure TGV tüneli, 1991-1993 yılları arasında bu tarzda açılmış bir tüneldir. Her ne kadar kesiti 150 m<sup>2</sup> olsa da, tam kesit olarak kazılmış ve tünel aynası perforex ön sürenler ve 18 metrelik kaya saplama ile duraylı halde tutulmuştur.

Bu konudaki yenilik İtalya’dan gelmiştir. Ülkede tünellerin yapıldığı zemin zayıf ya da yumuşak kayalardan oluşmakta ve sık sık kıvrımlara ve faylara rastlanmaktadır. Bu şartlar doğal olarak ön tahkimatlı yöntemlere yönelmeyi kaçınılmaz kılmıştır.

Lunardi (2000), bu teknikleri bir tünel-duraylılık teorisi altında birleştirmiştir. Bu teori, “ilerleme çekirdeği” denge şartlarına dayanmaktadır (Şekil 2.5). Bu teori, enlemesinden çok eksenel simetriyi esas almaktadır ve duraylılıktaki etkin parametre, ilerleme çekirdeğinin eksenel deformasyonudur (dışarıya itilip çıkmasıdır). Bu olay, tünel duvarlarının kapanımına sebep olmaktadır.



Şekil 2.5 Kaya kütlesinin deformasyonunun NATM'de ve Yeni İtalyan Yönteminde karşılaştırılması.

Bu teori, ADECO-RS olarak bilinmekte ve 30 yıl önce NATM de olduğu gibi tünelciliğe bazı yenilikler getirmektedir. Bunlar:

- Her şey tünel aynası etrafında oluşmaktadır. Duraysız bir aynaya sahip tünel, duvarları tahkim edilmiş olsa bile çökecektir.
- Diğer adım ise dairesel kazı kesitini mümkün olduğunca çabuk kapatmaktır. Tünel kesiti, özellikle zayıf zemin koşullarında alt parçalara ayrılmamalıdır.

şeklinde özetlenebilir.

NATM yöntemi, kazılan kesitin etrafında takviye edilmiş bir kaya halkası yaratmayı planlarken; Yeni İtalyan Yöntemi, aynanın ilerisinde ve ilerideki duvarların etrafında iyi bir zemin yaratmayı tasarlamaktadır.

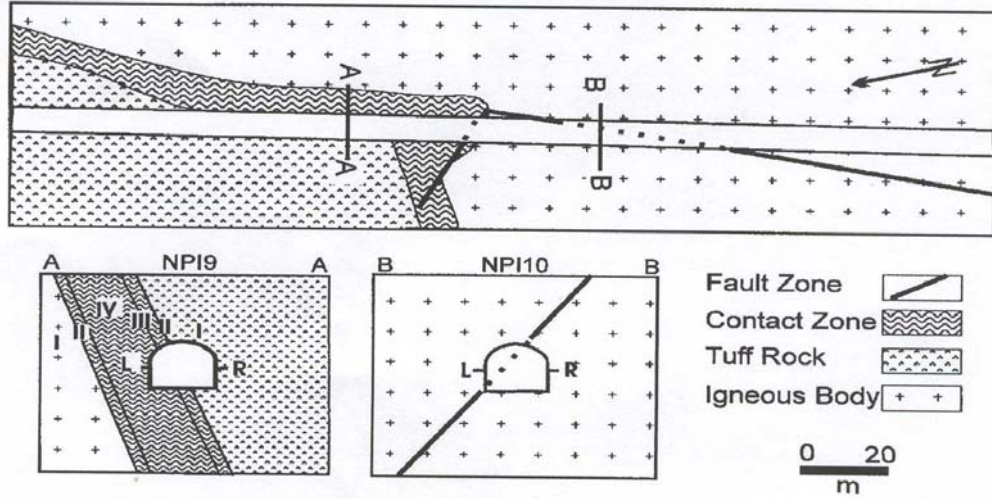
Bu yeni yöntem bu yüzden, NATM prensiplerinin üç boyutlu uygulaması olarak düşünülebilir ve özellikle yumuşak ve duraysız zemin şartlarında uygulanır. Uygulamada yöntem şu şekilde kullanılmaktadır.

- Zemin kalitesine bakılmaksızın tünel, tam kesit olarak açılacaktır; düzeltmenin ana değişkeni ön tahkimatlı yöntemlerin türü ve şiddetidir ve bunlar, tünelin ilerlemesini engellemeyecek şekilde kolaylıkla ayarlanabilir.
- Tahkimatın tamamına yakını uzunlamasına ve her 15-20 metrede bir yerleştirilir.
- Duvarların tahkimatı, püskürtme beton kemerlerle bağlı çelik tahkimattan oluşur. Bu durum nispeten rijit bir sistem olup, NATM'nin sığ tünellerdeki uygulamasına benzemektedir.
- Nihai tünel kaplaması sadece iki aşamada dökülmektedir (önce taban daha sonra üst kemer). Bu kaplama, aynadan, çapının birkaç katından daha az mesafede ve kazıdan sadece bir kaç gün sonra yapılmalıdır, beton halka neredeyse tabanda tamamen kapatılır.

Yeni İtalyan Yöntemi' nin düşük ve orta derinlikteki ve duraysız özellikteki kayaç birimlerinde açılan tünellerde evrensel boyutta kabul göreceği açıktır.

### 2.8.3 Zayıf Ortam Koşullarında Yapılan Tünelcilik Faaliyetleri

Yassaghi ve Salari-Rad, 2004; tarafından hazırlanan çalışmada, 5 km. uzunluğunda, 6 metre genişliğinde Taloun karayolu tüneli incelenmiş ve tünelin altere olmuş andezit ve tüfler içerisinde açıldığı, güzergah üzerinde tünel eksenini kesen fay zonunun varlığı ortaya konulmuştur (Şekil 2.6).



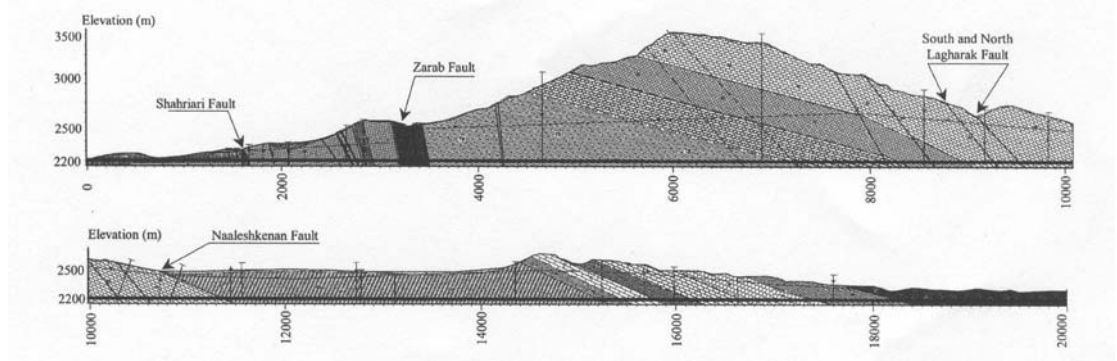
Şekil 2.6 Tünel güzergahı ve süreksizlerin konumu

Araştırmada özellikle iki önemli parametre üzerinde durulmuş olup bunlar; Kontak zon (A-A kesiti) ve fay zonu olarak gösterilen (B-B kesiti) kısımlardır.

Genel tünel güzergahında gözlenen RQD değeri %55-75 ortalama %65 iken, kontak zonda bu değer %25 lere gerilediği, tek eksenli basınç dayanımının 0,9 MPa olduğu ve bu değer yaklaşık fay zonu içinde geçerli olduğu gözlenmiştir.

Çalışmanın sonucunda oluşturulan nümerik modeller, tünel etrafındaki kayacın dayanımsızlığı nedeni ile hızlı bir destekleme ve bu desteklemeyi takiben düzgün ve kalıcı bir beton tahkimat yapılması zorunluluğunu ortaya koymuştur. Tahkimatta meydana gelebilecek olası gecikmelerin, sistemde meydana gelen gerilmelerin farklı şekillerde dağılmasına neden olacağı ve bu durumun tünel kapanımlarına neden olarak tünel yarıçapının düşmesine neden olacağı vurgulanmaktadır.

**Shahidi ve Vafaeian, 2005;** tarafından hazırlanan çalışmada, 23.4 km lik dört adet fay zonundan geçen tünel hattı incelenmiştir. İncelenen sahada çalışmayı zorlaştıran tek etmenin faylar olmadığı, bunun yanı sıra tünel güzergahı boyunca tünel hattının başlangıcında ince örtü tabakası içinde bulunan içi su dolu boşlukların olduğuna değinilmektedir.



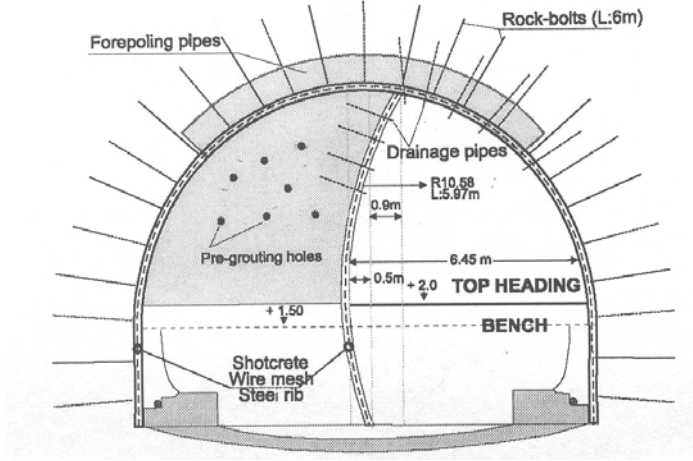
Şekil 2.7 Tünel güzergahı ve süreksizlerin konumu

Araştırmada özellikle tünelcilikte net sonuçlara ulaşabilmek, yerinde ve güvenilir sonuçlar elde etmek için bazı aşamaların önceden bilinmesi veya yerine getirilmesi gerekliliği vurgulanmaktadır. Bunlar; fizikomekanik özellikler (kohezyon, elastisite modülü...), sondajlarla tespit edilen fay zonunun özellikleri, tünelin içinde açılacağı zemin özellikleri ve tünel hattının modellemeleri olarak belirtilmiştir.

İncelen çalışmada görülmektedir ki; hat boyunca gözlenen kırıkların tolere edilmesi ve gözlenen fay zonlarından güvenli geçiş için bazı özel önlemlere ihtiyaç duyulmuştur. Tünel hattı boyunca yer değiştirmelerdeki değişim, hattın sağlam kısımları arasındaki kavşaklar (kesim noktaları) analiz ve dizayn edilerek, iki eksenli nonlinear model üzerinde açıklanmaya çalışılmıştır. Buna göre özellikle fay zonu geçişinde tam cephe 1,6 cm. kalınlığında çelik elemanlar kullanılmıştır.

**Aydın ve diğerleri, 2004;** tarafından yılında yapılan araştırmada, 55 km uzunluğunda, 13 m. genişliğinde, 112,6 m<sup>2</sup> atnalı kesitli, NATM kullanılarak açılan otoban tüneli incelenmiştir. Tünelin içerisinde açıldığı ana kayaç yapısını filiş ve altere olmuş kireçtaşlarıdır. Filişin içinde gri-yeşil kumtaşları, koyu gri kiltası-şeyl ardaşmaları gözlenmiştir. Tünel güzergahında gözlenen fay zonu incelendiğinde,

kabarma-şişme özellikleri gösteren, destek ve kazı açısından da özel destek sistemleri ve taban kazısı gerektiren bir yapı olduğu sonucuna varılmıştır (C5). Buna göre, özellikle fay zonu geçişinde tahkimat elemanları olarak; 6 m. uzunluğunda, 1,5 inçlik forepolling pipes (şemsiye borular), tel hasır, çelik iksa, 6-8 m uzunluğunda 28 mm. çapında kaya bulonu, 16 cm kalınlığında BS.20 tipinde püskürtme beton ve mini kazıklar kullanılmıştır.



Şekil 2.8. Fay zonunda kazı

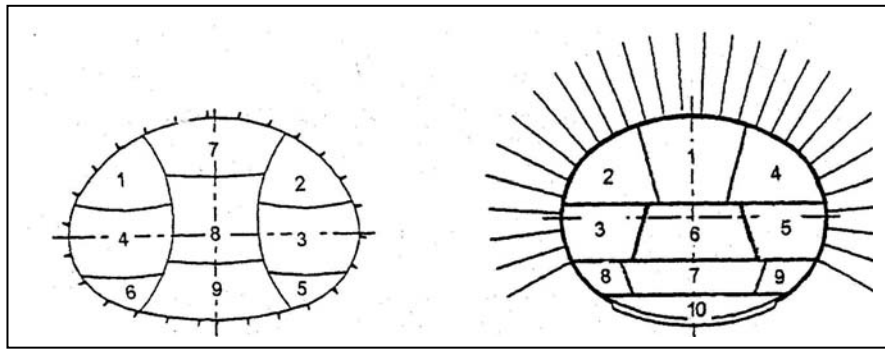
**Özbek ve diğerleri, 2003;** tarafından yapılan çalışmada Tarsus-Adana- Gaziantep karayolu üzerinde NATM ile açılan 2739 m. lik tünel incelenmiştir. Tünelin içerisinden geçeceği jeolojik formasyonlar, şeyl, kumtaşı ve kumtaşı-şeyl ardalması olarak tanımlanmıştır. Tünelin güzergahı üzerinde gözlenen faylı ve ezik zonun şeyl birimi içerisinde olduğu ve özellikle fay zonundaki şeyl in zayıf kaya kalitesinde olduğu tespit edilmiştir. Tünel güzergahı üzerinde, gerek tavanda gerekse tünel yan duvarlarında deformasyon ölçümleri yapılarak kaydedilmiştir. Bu ölçümler her 30 m. de bir yapılırken, zayıf ve ezik zonlarda bu mesafe 20 m. de bir olarak alınmıştır. Buna göre, yer değiştirme vektör değerlerinin, fay ve ezik zonların bulunduğu ve de su gelininin saptandığı zonlarda 8 mm. gibi büyük bir değere ulaştığı saptanmıştır. Ezik ve fay zondan uzak birimlerde, yatay deformasyonlar 4,31 mm ile 3,51 mm arasında değişirken, ezik ve fay zonuna yaklaşıldığında ve de özellikle kazı sırasında zayıf kayadan, sağlam kayaya doğru gidildikçe yatay deformasyon değerlerinde artış olduğu saptanmıştır. En yüksek düşey deformasyon

değerlerine de, yine faylı ve ezik zonda karşılaşmış olup, bu değer yaklaşık 5 mm civarındadır.

Çalışmada yer değiştirme vektör ve yönelimleri de araştırılmış olup en yüksek yer değiştirme 13 mm. ile yine faylı ve ezik zonda tespit edilmiştir. Bu değerün tünelin diğer adımlarında 0,0026 mm ile 11 mm. arasında değiştiği gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre riskli bölgeler belirlenmiş ve bu bölgeler tahkim edilirken ilave önlemler alınması gerekliliği vurgulanmıştır.

**Kavvadas ve diğerleri, 1996;** tarafından yapılan çalışmada, 18 km'lik tünel güzergahını kapsayan Atina Metro'su'nun 21 adet yeraltı istasyonu inşaatıyla ilgili jeoteknik sorunlar araştırılmış ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Atina Metro'su'nun geçilen formasyonlar ve karşılaşılan zorluklar açısından İzmir Metro'su ile büyük benzerlikleri vardır. Tünel güzergahının büyük bir bölümünü, Atina şisti olarak adlandırılan şistler, ince yataklanmış killi ve kalkerli kumtaşı, grovak, şeyl ve kireçtaşları oluşturur. Şist formasyonu yoğun kıvamlanmaya ve bindirmeye maruz kalmıştır. Aşırı faylanma, buralarda uzun çatlaklar oluşmasına, büyük çaplı bozunmaya ve alterasyonlara neden olmuştur.

Atina Metro kazılarının tümü yüzeyden, tünel tavan tepe noktasına 15 ve 20 m. lik sığlıktadır. Sığ derinlikte yapılan şehir tünelticiliği bakımından önemli bir örnek oluşturan tünel inşasında ana problem, açıklığı çevreleyen kaya kütlelerinin yenilmesinden çok ayna çökme ya da akmasıdır. Aşağıda şekil 2.9' da zayıf zon geçişlerinde kullanılan kazı ve destekleme tipleri gösterilmektedir.



Şekil 2.9 Atina metrosu istasyon kazılarında kullanılan kazı ve destekleme metotları.



Bu iki kazı yönteminin sayısal analizleri ikiz yan galeri yönteminin, tünelin taç kısmındaki kaya kütlelerinin daha az yenilmesine yol açtığını göstermiştir. Fakat her iki kazı yöntemi sonucu oluşan nihai çökme miktarları pratik olarak aynıdır. Sonuç olarak Kavvadas ve diğerleri, zamana bağlı olarak oluşan bu çökmenin, kazı sırasında yüksek olan fazla gözenek suyu basıncının kaybolması nedeniyle oluştuğunu ortaya koymuşlardır.

**Dalgıç, 2003;** tarafından yapılan çalışmada, toplam uzunluğu 6,5 km olan 5 m. çaplı Tuzla tüneli araştırılmıştır. Tünel yeryüzünden 15-20 m. derinde açılmış olup, tünel ana kazısı, faylı ve zayıf zonlar ile şeyl ve kireçtaşı birimleri içerisinde gerçekleşmiştir.

Tünelin içerisinden geçeceği kaya kalitesinin iyi olduğu kesimlerde, klasik yöntem olan NATM uygulanmış ve sırası ile püskürtme beton, çelik iksa, tel hasır, kaya bulonu uygulaması yapılmıştır. Killi ve breşik yapıdaki fay zonunda ise, çok zayıf ve zayıf kaya kütleleri davranışı tespit edildiğinden, buralarda 2 kat tel hasır kullanımına gidilmiş bununla birlikte 15 cm. kalınlığında atılan püskürtme beton kalınlığı bu kesimlerde 20 cm'ye yükseltilmiştir.

Özellikle faylı zonların geçişi yapılırken yukarıda sayılan destek elemanlarına ilaveten, ilaveten ek önlemlerin alındığı vurgulanmıştır. Bu önlemler; jet-grouting, forepole umbrella, drenaj, parçalı kazı, ayna destek uygulamaları olarak sayılabilir.

Tuzla tünellerinde bu sayılan destek sistemleri içerisinde kaya bulonu ve forepole umbrella yöntemi kil içermeyen fay zonlarında başarı ile uygulanmıştır. Killi fay zonunda ise; jet-grouting uygulamasını yanı sıra 2 sıra tel hasır tercih edilmiştir.

**Dalgıç, 2000;** tarafından yapılan çalışmada sığ ve gevşek zeminde açılan Beykoz tüneli incelenmiştir. 625 m. uzunluğunda, yaklaşık 10,60 m. yüksekliğinde, genellikle kumtaşı, kiltası, konglomeralar içerisinde, faylı zonda açılan ve ortalama RQD değeri %25 olan tünelde başlıca iki tip stabilite sorunu ile karşılaşmıştır.

- Kazının yapıldığı, açıkta kalan tahkimatsız bölgede gözlenen kaya düşmesi
- Desteklenen üst yarının özellikler aynanın üst yarısının çökmesi.

Gözlenen bu sorunların nedeni olarak çalışmada, fayın etkisi ile oluşan gerilmenin destek sisteminin taşıyacağı üst sınırı geçmesi ve buna ilaveten püskürtme betonun uygulama zamanı ile betonun yeterince ve çabuk katılaşmaması gösterilmektedir. Oluşabilecek risklerin ve bunları bağlı olarak tünel de meydana gelen çökmelerin nedeni olarak, kayaç litolojisi, zayıf kayanın elverişsiz durumu, alterasyon derecesi ve gözlenen zayıf jeomekanik özellikler ile tünel içerisine yer altı suyu girişi gösterilmektedir. Sayılan bu dezavantajların giderilmesi içinse, parçalı ayna kazısı, kazı adımlarının azaltılması, drenaj, aynanın desteklenmesi ve boru kemer şemsiye yöntemi kullanımı önerilmektedir.

**Guogang ve diğerleri, 2004;** tarafından yapılan çalışmada Xiaolangdi çok amaçlı baraj projesi kapsamında açılan yaklaşık 22 adet tünel incelenmiştir. Çalışmada açılan tünellerin kazı-desteklenmesi için uygulanan özel ekipman ve yöntemler ile, fay zonundaki tünel destekleme sistemi ve tünellerde meydana gelen çökmeler incelenmiştir. 3 ana fayın etkili olduğu, kırıkların ve eklem takımlarının da oldukça değişken olduğu bölgede, tünel destekleme sistemini genellikle püskürtme beton, kaya bulonu ve tel hasır oluşturmaktadır. Fakat özellikle fay zonlarında ve çökmelerin gözlemlendiği kilometrelerde püskürtme beton kalınlığının artırılması ve tahkimat aralığının düşürülmesi ile birlikte, şemsiye kemer yöntemi, kafes kirişler ve diğer tahkimat elemanları kullanılmıştır. Özellikle fay zonlarında ve civarında yapılan ilerlemelerde 5 cm. kalınlığındaki püskürtme beton ile ayna hemen kapatılmakta, çift sıra tel hasır, ikinci kat püskürtme beton ve kaya bulonları vakit kaybetmeden uygulanmaktadır.

**Yang ve diğerleri, 2006;** tarafından incelenen Wushaoling tüneli, Çin' in en uzun demiryolu tünelleri arasında olup 22,05 km. uzunluğundadır. NATM prensipleri baz alınarak açılan tünel içinde bulunduğu ortam koşulları nedeni ile karmaşık gerilme durumuna sahiptir. Yumuşak kaya ortamında ve bölgesel fayların etkisinde açılan tünelde, yaklaşık 4 adet fayın ve karmaşık jeolojik parametrelerin etkisi gözlenmektedir. Özellikle fay zonunun çok düşük dayanım parametrelerine sahip

olması, önceden belirlenemeyen deformasyonlara, göçüklere ve aynada stabilite sorunlarına neden olmuştur. Faylı zon geçişi sırasında, tünel içerisinde büyük yer değiştirmeler, tünel sağ ve sol yanlarıdaki çelik iksa ve püskürtme betonda kırılmalar ile birlikte tünel içerisinde çökmeler gözlenmiştir. Tünelde ilerleme; 4-6 m. lik kaya bulonları, 20 cm. kalınlığında püskürtme beton (C-20), çelik iksa ve süren şeklinde tamamlanmıştır.

**Kontothanassis ve diğerleri, 2005;** tarafından yapılan çalışmada NATM metodu ile açılan Atina Metrosu' nun geniş kesitli istasyon tünelleri incelenmiştir. Tünel tavanının yüzey ile mesafesi yaklaşık 18 m. olup, içerisinde açıldığı birimler konglomera, marn ve kil olarak sınıflandırılmıştır. İstasyon tüneli kesit alanları 195 m<sup>2</sup> ile 215 m<sup>2</sup> arasında değişirken, ortam hidrojeolojik koşulları kırıcı kullanımına müsait olduğundan, kazı hidrolik kırıcı ile gerçekleştirilmiştir. Sığ şehir içi tünelticiliği şartlarının geçerli olduğu sahada, kazı sırasında, kazı adımları 1 metre, sürenlerin uzunlukları 12 metre, püskürtme beton C25/30 kalitesinde ve 40 cm kalınlığında ve kaya bulonları 6 m. uzunluğunda ve 1 er metre aralıkla çakılmaktadır. Geçici invert 35 cm. kalınlığında püskürtme beton ve iki sıra tel hasır ile oluşturulurken kalıcı invertte püskürtme beton kalınlığı 40 cm. ulaşmaktadır.

Çalışmada, istasyon tünellerinin tünel ayna stabilitelerinin sağlanmasında en önemli ölçüt olarak, kaya bulonları ve sürenler gösterilmektedir. Fiberglass kaya bulonları ile sürenlerin birlikte kullanımı, tünel aynası önündeki plastik zonun ve yüzeyde karşılaşılan oturmaların kontrolü bakımından gerekli ve önemlidir. Ayrıca araştırmacılar aşağıda belirtilen önemli sonuçlara ulaşmışlardır.

- Üst yarı kazısı tepe noktasındaki sürenler üzerine gelen en büyük gerilme, kazı adımı boyuna, sürenin uygulama şartlarına ve temelde ayna dayanım parametrelerine bağlıdır.
- Aynaya fiberglas boru uygulaması, sürenlerde gözlenen sapma ve dönme momenti etkisini azaltır.

- Sürenler üzerine gelen yüklerin azaltılabilmesi için, süren kalitesinin artırılması veya aynaya uygun ilave destekleme elemanlarının uygulanması gereklidir.
- Tünelin açılacağı ortamın davranışlarının tanımlanması gerek yapım aşamaları için gerekse, yüzey oturmalarının engellenmesi veya azaltılması için oldukça önemlidir.

**Hao ve Azam, 2005;** tarafından fay zonunda tünel açıklığı etrafındaki yer değiştirmeler ve plastik zonun durumu nümerik analiz yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Analizler sonucunda araştırmacılar, fayın yer altı açıklık stabilitesini, faysız durum ya da doğal duruma göre oldukça etkilediğini, olası fayın gerek yer altı açıklığı etrafında oluşan plastik zon kalınlığını artırıcı yönde, gerekse tünel stabilitesini negatif yönde etkilediğini ortaya koymuşlardır. Bu etkilerin nedenleri olarak da, fayın dalım açısı, tünel eksenine göre tam lokasyonu, fayın kesme dayanımını göstermişlerdir.

Yapılan analizler sonucunda tünel stabilitesinin en çok etkilendiği durum, fayın yer altı açıklığının tepe noktası civarından, açıklığın merkezinden geçmesi halinde (tünel eksenini keserek), ve dalım açısı  $50^0$  civarında olduğu durumda gerçekleşmesidir. Benzer ilişki fayın açıklığın hemen yanından geçmesi, açıklık tabanı ile komşu olduğu durumda da gözlenmektedir. Bu durumda da fayın dalım açısı  $70^0$  civarındadır.

## **BÖLÜM 3**

### **PROBLEMİN TANIMI ve İNCELENEN ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ**

#### **3.1 Sığ Derinlikte Tünel Açımı**

Günümüzde sığ derinlikte açılan, geniş kazı kesitli tünellerin büyük bir bölümü, artan şehirleşme ile ihtiyaç haline gelen, metro ve karayolu tünelleri, geçitler, yer altı depoları ile içme suyu ya da kanalizasyon amaçlı tünellerden oluşmaktadır. Sayılan yer altı yapılarının ortak noktası, genellikle sığ derinliklerde açılmalarıdır. Bu tip formasyonlarda en büyük dezavantaj, formasyonun düşük taşıma gücü ve kolay deforme olabilmesidir. Bununla birlikte, sığ tünelcilikte tünelin açılacağı formasyon, yüzeye yakın oluşu nedeni ile, çoğu kez suya doymun haldedir. Bu durumda, tünelde gerek kazı gerek destekleme aşamasında ilave önlemler gerektirmektedir.

Sığ tünelcilik şartlarının geçerli olduğu kazı alanlarının üzerinde yerleşim alanları ve yerüstü tesislerinin bulunduğu göz önünde bulundurularak, yeraltı jeolojik ve jeoteknik koşulların çok iyi değerlendirilmesi, kazı ve tahkimat işlemlerinin ortam şartlarına uygun programlanması gerekmektedir. Bu amaçla güzergahta zayıf bölgelerin iyileştirilmesi ve zemindeki oturmaların oldukça hassas olarak değerlendirilmesi, yer üstü yapılarının stabilitesi ve güvenliği açısından oldukça önemlidir.

Bunlara ek olarak, çalışmaların yeryüzündeki yapı ve tesislere zarar vermemesi ve oluşacak deformasyonların emniyet sınırları içerisinde kalması bakımından kazı ve tahkimat sürelerinin çok iyi projelendirilmesi ve uygulaması kaçınılmaz bir durumdur.

#### **3.2 Sığ Derinliklerde Oluşabilecek Riskler**

Sığ derinlikte yapılan tünelcilik faaliyetlerinde, özellikle zayıf ortam koşullarında oluşabilecek riskler, genellikle jeoteknik parametreleri düşük olan, güvenli kazıya

imkan tanımayan formasyonlarda yapılan kazılarda gözlenmektedir. Bununla birlikte zayıf jeoteknik parametreler bilindiği halde, uygun olmayan ya da yeterli önlemlerin alınmadığı proje uygulamalarında da riskler oldukça fazladır. Bu türlü kazılarda olası risk unsurlarına yaklaşım iki türdür.

- Oluşabilecek risk olayının alınacak tedbirlerle önlenmesi (Örneğin fay zonlarında ekstra kazı ve tahkimat önlemleri alma v.b.) ya da
- Oluşacak risk olaylarının minimize edilmesi (Örneğin deformasyon ve kaya yenilmelerine karşı etkin kontrol içeren tünel dizaynı, yüksek su gelirine karşı uygun drenaj sistemlerinin uygulanması v.b.).

Yukarıda verilen iki unsurun uygulanması halinde dahi, tünel kazısı sırasında beklenmeyen risk olayları ile karşı karşıya kalmak her zaman mümkündür. Bunun için tünel kazı ve desteklenmesi süresince öngörülen dizayn parametrelerinin ve kaya kütle davranışlarının sürekli olarak izlenmesi ve buna göre uygulanan parametrelerde yerinde değişiklikler ve ek önlemlerin alınması gerekmektedir. Şekil 3.1 ile 3.9 arasında son yıllarda risk unsuru taşıyan tünellerde yaşanmış, önemli örnekler verilmektedir.



Şekil 3.1 Yer altı hattı, istasyon kazısında karşılaşılan durum (Güney Kore)



Şekil 3.2 Yer altı hattı shaft yakınında karşılaşılan durum (Singapur)



Şekil 3.3 Ana hat, yaklaşım tüneline meydana gelen durum (Brezilya)



Şekil 3.4 Wienerwald demir yolu tüneline inşası sırasında karşılaşılan durum (Avusturya)



Şekil 3.5 Sao Paulo otoyol tüneli inşası sırasında şaft ve tünel eksenini boyunca karşılaşılan durum (Brezilya)



Şekil 3.6 Trojane Tünel' in de ayna akması ve buna bağlı yüzeyde oluşan çökmeler. (Slovenya)



Şekil 3.7 Blisadona Tünel' i içerisine gözlenen büyük ölçekli su geliri. (Avusturya)





Şekil 3.8 İzmir Metrosu Üçyol-Üçkuyular hattı istasyon tüneli kazısında meydana gelen ayna akması (Türkiye)

### 3.3 Tünel Açımında Riskli Bölgelerde Uygulanan Tünel Destekleme Elemanları

Sığ tünelcilik şartlarının geçerli olduğu, zayıf, faylı ya da ezik zonların geçilmesi gerekliliği ve bu şartlarla birlikte kazının klasik yöntemlerle yapıldığı durumlarda, tünel içerisinde gerek kazıda gerekse destekleme aşamalarında, ek bir takım önlemlerin alınması gerekmektedir. Son yıllarda bu gibi durumlarda, gerek NATM gerekse Yeni İtalyan Yöntemi ile açılan tünellerde klasik destekleme elemanlarının yanı sıra ( tel hasır, çelik iksa, püskürtme beton vb.) kaya bulonları, sürenler, boru kemerler (umbrella arch) ve ayna çivileri kullanılmaktadır. Sayılan bu ilave destekleme elemanları tünelin taşıdığı riskler oranında yalnız, kombine yada enjeksiyon teknikleri ile birlikte kullanılmaktadırlar. Aşağıda tünel açımında riskli bölgeler uygulanan destekleme elemanlarının özelliklerine kısaca değinilmektedir.

#### 3.3.1 Kaya Bulonu

Kaya bulonu tünel kesiti çevresindeki kayanın desteklenmesinde kullanılan ana destek elemanlarından biridir. Çekme dişli standart profil donatı çeliğinden imal edilen bulonların kırılma yükleri en az 18 ton, çapı ise 24 mm. olmalıdır. Kaya bulonu, kaya bloklarının sabitlenmesinde tekil olarak kullanıldığı gibi çevredeki

kayanın dayanımının arttırılması amacıyla sistematik olarak da kullanılabilir. Kaya bulonuna ve enjeksiyona gelen yük, kayanın çatlak yapısına göre değişir.

Özellikle zayıf zonlarda, bulonun çalışmasını sağlamak için; enjeksiyonlanacak bulon deliklerinin çapına, su/çimento oranlarına ve çekme testlerinin doğruluğuna dikkat etmek gerekir. Buna göre, enjeksiyonlama yapılacak bulon deliğinin çapı, kaya bulonu çapının 1,5 katı, su/çimento oranı 0,35-0,45 arasında olmalıdır. Ayrıca bulonlar montajlarından en çok 4 saat sonra uygun aparatlar ile 5 ton (50 kN) luk yüke çekilerek gerilmelidir.

Bulonlar tünel kesiti çevresindeki kayanın tamamen yenilmesini engeller, kayanın parçalandığı alanlarda sağlam bölgeden destek sağlamasına imkân verir. Kaya bulonunun performansı kullanılan bulon ve enjeksiyonun kalitesine ile doğrudan ilişkilidir.

Son yıllarda kullanım alanı bulan bulon türleri, enjeksiyonlu bulon, swellex bulon ve kendinden delen (IBO) bulonlardır. Enjeksiyonlu bulonlar, kırıklı-çatlaklı yapıya sahip kısmen daha iyi ortam koşullarında tercih edilen bulon tipleridir. Enjeksiyon süresi dolmadan torklanamadıkları için hemen çalışan bir eleman değildirler. Swellex bulonların ise enjeksiyonlu bulonun tam tersine hemen çalışan bir yapısı vardır. Genellikle bloklu- çatlaklı kaya yapılarında tercih edilen swellex bulonlar, kaya yüzeyine yapışma (aderans) ilkesine göre çalışırlar. Yapısındaki flanşlar sayesinde delik içerisinde şişme prensibine göre çalışan swellex bulon killi, siltli veya plastik özellik gösteren ortamlarda kullanılmaz.

Kendinden delen bulon yada IBO bulon olarak adlandırılan bulonlar, delici makine üzerinde tij gibi hareket eden, delgi sonrası dışarı alınmaksızın delik içerisinde bırakılan ve yapısında ki deliklerden enjeksiyon yapılarak kullanılan bulon tipidir. 36 mm. çapında, dış cidarı yivli olarak imal edilen bu tip bulonların tercih edildiği durumlar, genellikle delik açma işinin başarısız olduğu, açılan deliğin geometrisinin korunamadığı zayıf ortam koşullarıdır. Torklama işlemi için enjeksiyonun prizlenme süresi beklendiğinden hemen çalışan bir bulon değildir.

Diğer yandan, zayıf ve ezik zonlar geçilirken, özellikle şehir içi tünelticilik çalışmalarında, kritik bina yakınlarının desteklemesinde hız büyük önem taşımaktadır. Bu durumlarda kendini delen bulon kullanılması sıkça rastlanan bir durumdur.

### **3.3.2 Sürenler**

Sürenler; tünel kazısı esnasında veya kazı sonrasında dökülme, çökme ya da kopmalara meyilli kazı ortamlarında, özellikle zayıf zonlarda (faylı, ezik, ayrışmış vb.) ve yer altı suyunun risk oluşturduğu durumlarda, ön koruma ve emniyet tedbiri olarak, tünel kesitinde boyuna yönde desteksiz kazı açıklığının kısaltılması, aşırı sökülmenin önlenmesi amacıyla, enjeksiyonlu veya enjeksiyonsuz olarak, demir çubuk veya çelik boru şeklinde kullanılan destekleme elemanlarıdır.

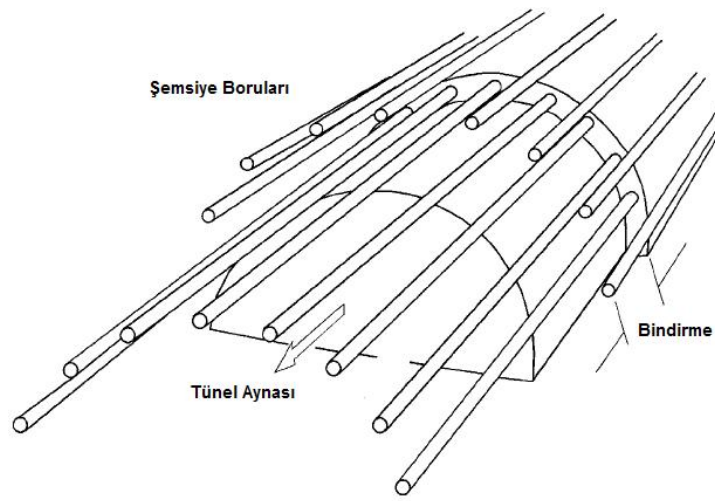
Sürenler, boyuna yönde bindirmeli olarak ilerleme adımından en az 1 metre daha uzun ve ilerleme adımının 2 -2,5 katı kadardır. Yeni ilerleme adımı için yapılacak süren uygulaması, bir önceki adımın desteklemeleri tamamlanmadan ve ortam koşullarına bağlı olarak, çelik iksa üzerinden yatayla en fazla 5 - 10<sup>0</sup> açı yapacak şekildedir.

Özellikle zayıf ortam koşullarında, kohezyonsuz zeminlerde ve zayıf kayalarda, kazı esnasında veya kazının hemen ardından, kazılan bölümün göçmemesi, diğer destekleme elemanlarının çalışabilirlik sürelerini tamamlamaları (püskürtme beton ve iksa şerbetlerinin priz süreleri ) için hem zaman hemde emniyetli bir ortam sağlayan sürenlerin genellikle metro inşaatında kullanılan uzunlukları 4 m., tünel girişlerinde ve dönüşlerde 6 m. lik olanlarıdır.

### **3.3.3 Boru Kemer (Umbrella Arch)**

Bilim ve teknolojideki gelişmeler ile devamlı süre gelen tünelticilik faaliyetlerinden elde edilen deneyimlere bağlı olarak, konvansiyonel tünelticilik yöntemlerinde, kaplama ve zeminin iyileştirilmesi konularında önemli gelişmeler gözlenmektedir. Özellikle zayıf ortam koşullarında ön kemerlenmeli yöntemler adı altında, farklı

yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler temelde, daha tünel aynasında kazı yapılmadan ileriye doğru, tünel kazı aynası etrafında bir tahkimat kabuğu oluşturulup, daha sonra bu emniyetli kabuğun altında kazı yapılarak ilerlemenin sağlanması esasına dayanmaktadır (şekil 3.9). Tahkimat kabuğu, şemsiye boruları, jet-grout kolonları veya betonlanmış ön kemer ile yapılabilir (Leca ve Clough,1992). Şekil 3.10'da ayna stabilitesinin korunması için yapılan jet grout kolonlar ve boru kemer yöntemi verilmektedir.

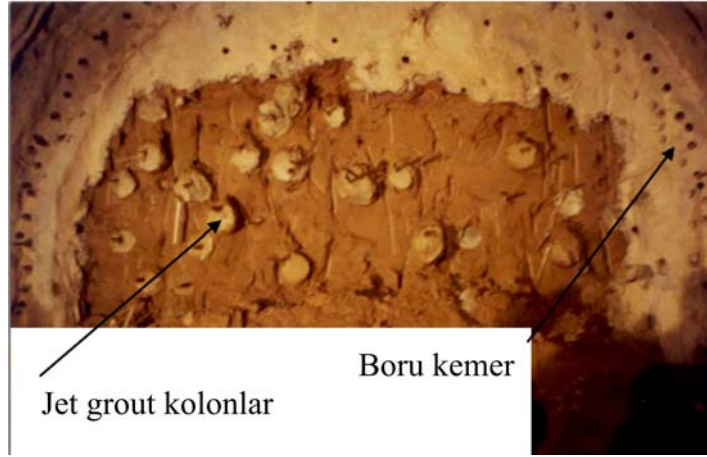


Şekil 3.9 Boru Kemer yönteminin ayna ilerlemesine göre şematik görünümü

Ön kemerlenmeli yöntemler ve boru kemer uygulaması zemin çivisi uygulaması ile birlikte ilk defa İtalya' da Caserta-Foggia demiryolu hattında San Vitale tüneline uygulanmıştır. Mevcut tünel yaklaşık 150 metre derinlikte, silt, kil, marn ve kireçtaşı ve kum içeren zemin ortamında açılmıştır ( Leca ve Clough, 1992).



(a)



(b)

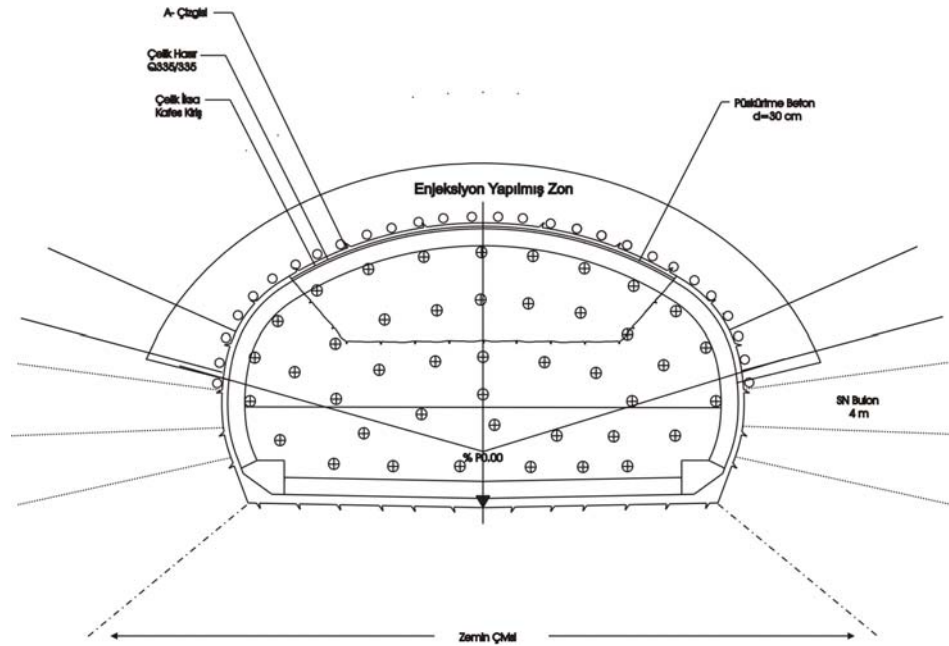
Şekil 3.10 (a) Boru kemer uygulama örneği, (b) boru kemer yöntemi ve jetgrout kolonlar ile sağlanan ayna stabilitesi

### 3.3.4 Ayna ve Zemin Çivileri

Genellikle boru kemer yöntemi birlikte kullanılan zemin çivileri, kazı öncesi yüzey oturmalarını denetleyen destek elemanlarıdır. Killi ve zayıf formasyonlarda ve sığ tünellerde yüzey oturmalarının yarısına yakını tünel daha yüzeydeki ölçüm istasyonuna gelmeden önce oluşmaktadır. Gelen yükler nedeniyle aynada plastikleşen ve dayanımını yitiren malzeme hacmi kadar yüzeyde oturmalar olacaktır. Bunların önlenmesi için tünel aynasındaki zeminin içsel parametrelerini olumlu yönde artırılması gerekmektedir (Onargan vd, 2006).

Yumuşak ve zayıf ortam koşullarında açılan tünellerde, tünel aynasının stabilitesinin sağlanması ve uygulanacak diğer ek yöntemlere destek olması bakımından zemin çivisi uygulaması geliştirilmiştir. Bu destek elemanın uygulamasında; kazı aynasına önceden belirlenen çapta ve uzunlukta delinen deliklere, uygun donatı yerleştirilir ve delik enjeksiyon ile doldurulur. Burada donatı olarak nervürlü çelik yada yüksek mukavemetli fiber glaslar kullanılmaktadır. Zemin çivisi uygulaması ilk defa 1980' li yıllarda İtalya' da geniş kesitli tünellerde kullanılmıştır (Denek, 2003)

Uygulama esnasında ayna stabilitesine bakılarak zemin çivilerinin sayısı, yeri ve boyutları değiştirilebilir. Aşağıda İzmir Metrosu II. aşama kazısında belirli bir bölge için öngörülen boru kemer ve zemin çivisi modeli verilmektedir.



Şekil 3.11 İzmir Metrosu için önerilen çelik boru kemer ve ön sağlamlaştırma sistemi en kesit görünümü (ölçeksiz)

### 3.3.5 Püskürtme Beton

Püskürtme beton tünelde, kazı yüzeyine yakın zemin/kayanın kesme dayanımını arttıran, tünel kesiti çevresindeki kayanın gevşemesini, kayadaki süreksizlikleri

doldurarak dökülmeleri ve sökülmeleri önleyen destekleme elemanıdır. Kazıdan hemen sonra oluşan gerilme ve deplasmanların bir bölümünü karşılar. Taşıyıcı eleman olarak donatılı veya donatısız olarak kullanılabilir. Püskürtme betonun etkinliği, atıldığı yüzeye yapışabilirliğine bağlıdır. Yapışma konusunda yapılan araştırmalar yüzeye beton arasındaki bağın kayacın mineral bileşimine bağlı olduğu sonucunu vermiştir. NATM ye göre bir seferde atılan püskürtme beton kalınlığı 20 cm yi geçmemelidir. Özellikle zayıf, ezik veya akıcı zonlarda gerek tünel ayna stabilitesinin hemen kontrol altına alınması, gerekse tavadan yada aynadan gelebilecek tehlikelere karşı hızlı önlem alınabilmesi bakımından ilk kat ve sonrasında atılan ikinci kat püskürtme beton uygulaması önem arz etmektedir.

Kuru ve yaş olarak uygulanabilen püskürtme beton uygulamalarında her iki yöntemin farklı avantaj ve dezavantajları göze çarpmaktadır. Kuru yöntem uygulaması; küçük ölçekli, değişen destekleme elemanlarının yer aldığı, küçük kapasiteli ve daha uygun maliyetli bir uygulama iken yaş yöntem, daha büyük ölçekli, yüksek verimli, iletim mesafesi sınırlı bir uygulamadır. Kuru uygulanan püskürtme betonun ıslak ve su gelirin fazla olduğu ortamlarda bekletilememesi ve özellikle uygulamada ıslak kum kullanılmaması gerekmektedir. Yaş yöntemde ise, hazırlanan betonun merkezi bir üniteden verimli bir karışım halinde alınması gerek zor şartlarda, gerekse uygulandığı zeminler üzerindeki performansı bakımından daha iyi sonuçlar doğurmaktadır. Aşağıda tablo 3.1’ de zayıf ortam şartlarında farklı araştırmacılar tarafından önerilen püskürtme beton parametreleri verilmektedir.



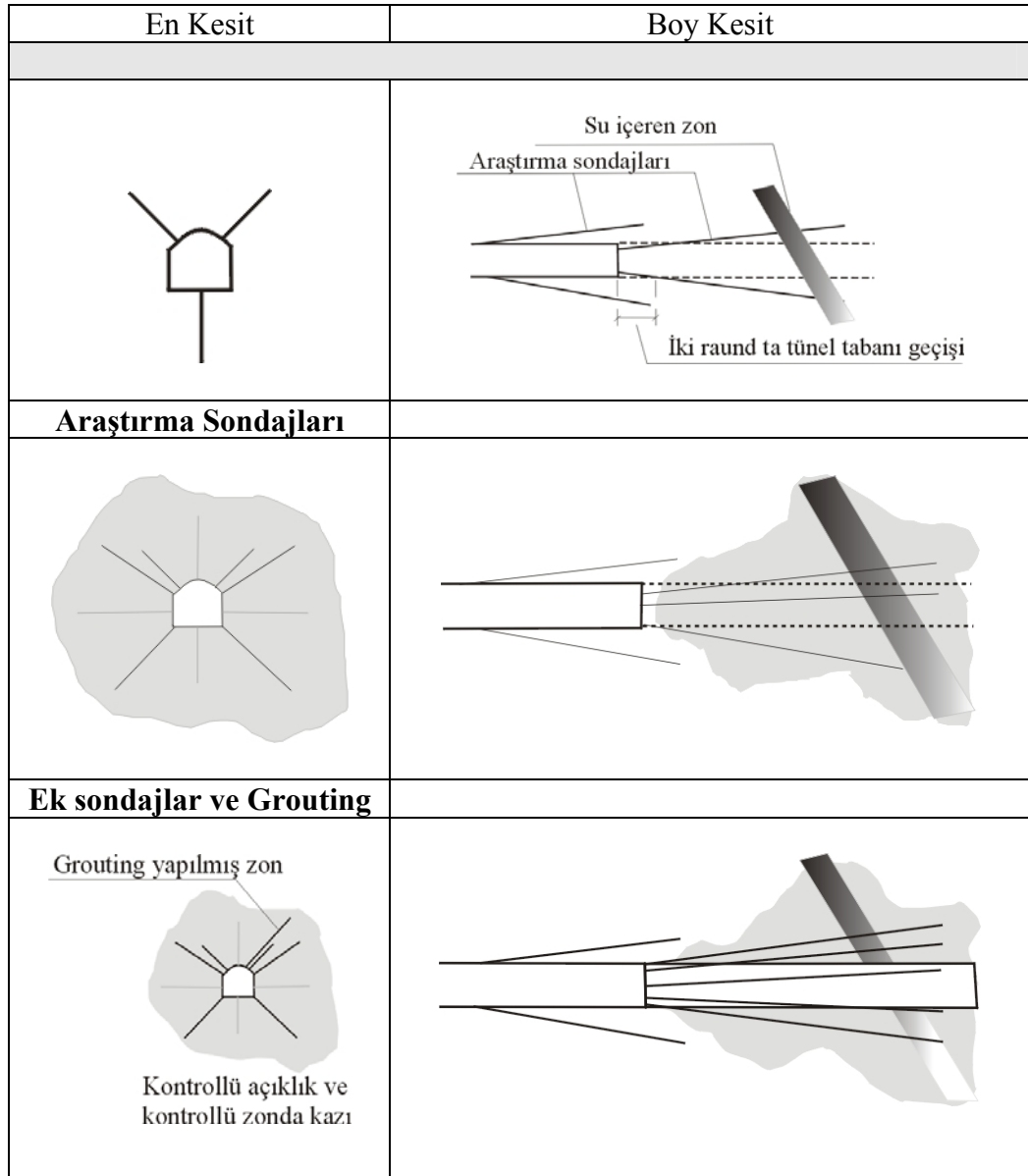
Şekil 3.12 Yaş ve Kuru Püskürtme Beton Uygulaması

Tablo 3.1 Tünel açımında, zayıf kaya kalitesinin gözlemlendiği durumda çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen püskürtme beton kalınlıkları (Torunoğlu, 2006 düzenlenerek)

Kaya Kalitesi (RQD Aralığı)	DEER, 1969 ( 4-6m Çaplı Tünellerde Geçici Tahkimat )			HEUER, 1974 ( 4,5-6m Çaplı Tünellerde Geçici Tahkimat		CONNEL, 1977
	Kazı Yöntemi	P. Beton Kalınlığı	İlave Tahkimat	Arazi Koşulları	Pükürtme Beton Kalınlığı	Pükürtme Beton Kalınlığı
Zayıf 25 - 20	Makine ile kazı  Delme Patlatma	Tavanda 10-15 cm Duvarda 1-15 cm  Tavanda > 15 cm Duvarda > 15 cm	Kaya bulunu l=1,2-1,8 m	ZAYIF ARAZİ KOŞULLARI  Tavanda ve duvarda dökülme var. P. beton kaya üzerine iyi yapışmıyor.	Tavan bölgesinde 7-10 cm,  Duvarlarda tabana kadar 7- 8 cm	Yan duvarlarda tabanda en az 7-8 cm yukarı doğru artan.  Tavanda 15 cm', yan duvarların üst kısmı ve tavanda çelik hasır
Zayıf < 25 Sıkışan Şişen formasyon hariç	Makine ile kazı  Delme Patlatma	Tavanda 15 cm Duvarda 15 cm  Tavanda > 15 cm Duvarda > 15 cm	Orta ağırlıkta	ÇOK ZAYIF ARAZİ KOŞULLARI.  Eğer arazi gevşeme davranışı gösteriyorsa	Tavan bölgesinde 10-12 cm, duvarlarda tabana kadar > 10 cm.	Taşıyıcı olarak çelik iksa + pükürtme beton, çelik iksalar betonla kaplamalı
Çok zayıf Sıkışan, Şişen formasyonlarda	Her iki yöntem	Tavanda > 15 cm Duvarda > 15 cm	Ağır tip profil çelik bağ	Arazi şişme yada aşırı gerilmelerde yenilme davranışı gösteriyorsa		



Yukarıda zayıf zonlarda tünel açma işlemlerinde kullanılan ilave destekleme elemanları kısaca tanımlanmaktadır. Bu elemanlar ile birlikte zayıf ortam koşullarının düzeltilmesi, kaya kalitesinin artırılması ve emniyetli kazı sürecinin sağlanması için, kazı ortamına enjeksiyon ve jet grouting gibi sağlamlaştırma yöntemleri de, bireysel yada kazının yapılacağı ortam koşullarına göre birlikte uygulanabilmektedir. Aşağıda şekil 3.13’ de faylı, zayıf ya da akıcı ortam koşullarında tünel kazıları için önerilen çalışma sistemi verilmektedir.



Şekil 3.13 Fay zonları ve zayıf akıcı formasyonlarda önerilen çalışma sistemi (Onargan ve diğer, 2006, düzenlenerek)

### 3.3.6 Tasarım ve Projelendirme Aşamasında Tüneller

Mühendislik yapılarının güvenilirliği, ekonomikliği, zamanında inşası ve kullanımı açısından en önemli araç mühendislik tasarımlarıdır (Ulusay ve Sönmez, 2002). Teknolojinin her alanda hızla ilerlemesi, büyük çaplı projelerde değerlendirme süresini oldukça kısaltmaktadır. Bu durum bütün bilim dallarında olduğu gibi tüneller sektöründe de kendisini göstermeye başlamıştır.

Birçok mühendislik probleminin çözümünde değişik yöntemler kullanılmaktadır. Bunların başlıcaları ;

- Analitik Yöntemler,
- Ampirik Yöntemler,
- Gözleme Dayalı Yöntemler,
- Nümerik Modelleme Yöntemleri (Gerilme-Deformasyon Analizi),

olarak sayılabilir.

Bu yöntemlerin kendi içlerinde avantajlı ve dezavantajlı yanları bulunmaktadır. Mühendislik problemlerinin çözümünde yukarıda belirtilen en az iki yöntemin birlikte uygulanması gerekmektedir. Bu sayede yapılacak hataların önüne geçilebilmekte veya elde edilen çözümlerin doğruluğunu karşılaştırma olanağı elde edilebilmektedir (Ulusay, 2001).

Genel anlamda analitik yöntemlerden, yapıların ve kazıların duraylılık koşullarının araştırılması ve kazı çevresindeki gerilme-deformasyon ilişkilerinin analizi için yararlanılırken, gözleme dayalı yöntemler, kazı alanı ve civarında yapılan inceleme ve gözlemleri, arazide, yerinde ya da laboratuvar ortamında yapılan deneyler ile deformasyon, gerilme, su geliri ve basıncı vb. konularda ilgili aletsel izleme çalışmalarını kapsamaktadır.

Mühendislik problemlerinin çözümünde son yıllarda oldukça etkin olarak kullanılan ampirik yöntemler, testler ve ölçümler sonucu elde edilen verilerin, farklı metotlar ile istatistiksel olarak değerlendirilmesi sonucunda yaşanan mühendislik deneyimlerinin esas alınarak geliştirildiği yöntemlerdir.

Mühendislik yapılarının değerlendirilmesi işlemlerinde son aşama, nümerik (sayısal) modelleme yöntemleridir. Farklı yenilme ölçütlerine göre analizlerin yapılabildiği modellemelerde, kazı öncesinde, kazı sırasında ve sonrasındaki aşamalarda, fiili durumdan önce, olası risklerin önceden tahmini yapılabilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, kurulacak modelin ortam şartlarına uygunluğu ve güvenilirliğidir.

Bu aşamada, bazı bilimsel verilerin hatırlanmasında fayda vardır. Kemerli yeraltı açıklıklarında kavisli kısımların iki tip eğrilik yarıçapı bulunmaktadır. Kemer bölgesinin eğrilik yarıçapı, köşe kısmının eğrilik yarıçapından büyük olduğu durumda gerilmeler açısından en kötü durum meydana gelmektedir (Geniş ve Gerçek, 1995). Bu tip çalışmalarda, yatay gerilmenin düşey gerilmeye oranı da  $k$  önemlidir. Ancak,  $k$  değeri sığ tünellerde oldukça yüksek değerler almaktadır (Hoek, 1998). Yüzeye yakın kesimlerde  $k$  değerinin 5'den büyük olduğu durumlarda tünel yan duvarlarında tansiyon ve makaslama yenilmelerinin olduğu tecrübelerle belirlenmiştir. Bunun yanında, genelde örtü kalınlığı maksimum tünel açıklığının 1,5 katından fazla olmadıkça, tünel çevresindeki kaya kütlelerinin kendini destekleme özelliği bulunmamaktadır (Hoek, 1998). Bu bölümlerde tünelde meydana gelecek olan yenilmelerin gerilme dağılımlarıyla birlikte, süreksizliklerin kontrolünde gelişeceği düşünülmektedir. Bu nedenle, oluşturulacak olan model arazi gerilmelerini de içerecek şekilde tam kesit olarak incelenmeli ve gravitasyonel gerilme şartlarını da içermelidir.

Son yıllarda, modelleme işlemlerinde iki boyutlu modelleme programlarının yanı sıra üç boyutlu modelleme programları sıkça kullanılmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, gelişen ortam şartları ile paralel çalışan modelin oluşturulmasıdır. Model, ister iki boyutlu, ister üç boyutlu olsun, modelleme için

gerekli olan parametrelerin ve dolayısı ile kurulan modelin çalışacağı uygun yenilme ölçütlerinin belirlenmesi ana unsurdur.

Yukarıda bir mühendislik probleminin çözümünde takip edilecek evreler ana hatları ile kısaca verilmektedir. Günümüzde özellikle risk taşıyan tünelcilik çalışmalarında, analitik, ampirik, gözleme dayalı yöntemler ve nümerik modelleme yöntemleri birlikte kullanılarak değerlendirilmekte ve projelendirme aşamasına gidilmektedir. Aşağıda, özellikle zayıf ve riskli bölgelerde, sığ tünelcilik faaliyetlerinde karar verme aşamasında kullanılan yöntemler gerekçeleri ile irdelenmektedir.

### 3.3.6.1 Analitik Yöntemler

Şehir içinde ve sığ derinlikte açılmakta olan delme tünellerin davranışları, derin ortam koşullarında açılan tünel davranışlarından farklılık göstermektedir. Sığ tünellerin stabilitesi ve davranışları, sadece açılan tünelin parametrelerine bağlı olmayıp, tünel kazısının içinde gerçekleştiği kaya/zeminin stabilitesine ve davranışına da bağlıdır. Yeryüzünde meydana gelebilecek olası deformasyonların tünelin yeryüzüne yakın olan kesimleri içindeki binalar ve alt yapılar için büyük bir önem taşıdığı da bir gerçektir. Bölüm 4' te detaylı olarak ele alınan ve çalışmanın özünü oluşturan İzmir Metrosu II. Etap metro çalışmaları bazında planlanan farklı dört tip tünelde sığ tünel niteliğinde ( $H < 2D$ ) olup 14-22 metre gibi oldukça sığ derinlikten geçmektedir. (H: Tünel Yüksekliği, D: Tünel çapı)

*3.3.6.1.1 Sığ Tünellerde Oluşan Birincil Gerilmeler.* Birincil gerilme alanının yeraltı açıklıklarının duraylılığı üzerindeki önemli rolü çok iyi bilinmektedir. Bir yeraltı açıklığı çevresinde oluşan ikincil gerilme alanının neden olabileceği aşırı gerilme ya da yenilme bölgesi; birincil gerilme alanına, açıklık geometrisine ve çevre kayacın mekanik özelliklerine bağlıdır. Tasarımcılar, seçenekleri arasında olan değişkenlerde olanaklar çerçevesinde düzenlemeler yaparak mevcut koşullardaki en uygun tasarımı gerçekleştirmek zorundadır. Bu bağlamda, açıklığın şekli ve konumu tasarım sınırlamaları arasında olmadığı zaman, mevcut birincil gerilme alanına en

uygun seçenekleri belirlemek hem kuramcılarını hem de uygulayıcıları meşgul eden konular arasındadır (Onargan ve diğer,2006).

Dünyanın çeşitli bölgelerinde yapılan birincil gerilme ölçümü sonuçlarına göre, birincil gerilmelerin asal bileşenlerinin; düşey ve yatay konumlarda olması, birbirinden farklı değerler alması ve büyüklük sıralarının değişiklikler göstermesi oldukça yaygın karşılaşılan bir olgudur (Amadei and Stephansson, 1997). Birincil gerilme alanının yönüne bağlı (anizotropik) özellikte olması durumunda düşey birincil gerilme bazen en büyük, bazen ortanca bazen de en küçük asal birincil gerilme olabilmektedir. Genelde düşey birincil gerilmenin en küçük asal birincil gerilme olduğu (İngiltere, Avustralya vb.) bazı bölgelerde yeraltı açıklığının uzun ekseninin en büyük yatay birincil gerilmeye paralel olacak şekilde konumlandırılmasının duraylılık açısından daha olumlu olacağı kuramsal çalışmalarla olduğu kadar, arazi gözlem ve deneyimleriyle de ortaya konmuştur.

Ayrıca Hoek ve Brown, 1980' de bir yeraltı açıklığının şeklinin (eksenler oranının) seçiminde birincil gerilmelerin oranının göz önünde bulundurulması gerektiğini araştırmıştır (Hoek ve Brown, 1980). Özetle, bir yeraltı açıklığının şekli ve konumunun, mühendislik sınırlamaları çerçevesinde, mevcut birincil gerilme alanına göre en uygun olacak şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

Sığ derinlikte meydana gelen birincil gerilmeler genellikle karmaşık olup gerilme büyüklükleri hakkında bilgi yok denecek kadar azdır. Literatürdeki bilgiler genelde 50 metreden daha derin mesafeler için verilmiş değerler olup sığ derinlikler için genelde yaklaşım yoluyla belirlenmeye çalışılmaktadır.

Sığ derinliklerdeki herhangi bir derinlikte meydana gelen birincil gerilme (Virgin Stress) genellikle aşağıdaki parametrelere bağlı olarak oluşmaktadır. Bunlar;

- Ayrışma
- Düzensiz topoğrafya
- Kalıcı gerilmeler
- Erozyon, buzulların erimesi v.b.

Yukarıda sayılan parametrelerden ayrışma genellikle gerilme düzeyini düşürürken, düzensiz topoğrafya gerilme yönlerinin doğrultularını etkileyebilmektedir. Kalıcı gerilmeler (residuel stress) ise genelde gerilme dağılımında düzensizliklerin oluşmasına neden olabilmektedir.

Sığ derinliklerde oluşacak olan yatay ve düşey gerilmelerin oranı, derin olan yerlere göre daha fazla olabilmektedir. Bunun bir nedeni tektonik gerilmelerin sığ derinliklerde yerçekimsel gerilmelere göre daha fazla olabilmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca erozyon, buzulların erimesi v.b. dış etkenler de yatay ve düşey gerilme oranının artmasına katkıda bulunabilmektedir.

Kaya kütlesi içerisinde oluşan gerilmeler örtü tabakasının ağırlığına ve jeolojik tariheye bağlı olarak meydana gelmektedir. Kaya kütlesi içerisinde meydana gelen birincil gerilmelerin büyüklüğü derinlikle artmaktadır. Yeraltı açıklıklarında da gerilmeye bağlı yenilmeler derinliğin artmasıyla artmaktadır. Bununla birlikte sığ derinlikte açılan açıklıklarda düşey gerilmelere karşı yüksek değerli yatay gerilmeler meydana gelebilmektedir (Amadei ve Stephansson, 1997).

Sığ derinliklerde meydana gelen birincil gerilmeler normal olarak 1 düşey gerilme ( $\sigma_v$ ) 2 adet de yatay gerilme ( $\sigma_h$ ,  $\sigma_H$ ) ile ifade edilmektedir.

$\sigma_v$ .....Düşey gerilme  
 $\sigma_h$ ..... Minimum yatay gerilme  
 $\sigma_H$ ..... Maksimum yatay gerilme

$$\sigma_v = \rho * g * z \quad ; \quad z = \text{derinlik (m)} \quad , \quad (I)$$

$\rho$  = kaya kütle yoğunluğu (MN/m<sup>3</sup>),  
 $g$  = Yer çekim ivmesi (N/sn<sup>2</sup>)

Eğer malzeme lineer- elastik ve izotropik ve tek boyutlu gerilme şartları taşıyorsa yatay gerilme ile düşey gerilme arasında aşağıdaki ilişki dikkate alınmaktadır.

$$\sigma_H = \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma_v, \quad (II)$$

$\nu$  = poisson oranı (0,15-0,40)

Yeraltı açıklıklarının açıldığı kaya/zemin kütlelerinde şistozite düzlemleri eklem ve eklem takımları, dizilim nedeniyle anizotropi sık görülen bir durumdur. Açılmakta olan tünel güzergahındaki jeolojik yapı içerisindeki kaya/zemin kütleleri de anizotropik bir yapı sunmaktadır.

Sığ derinliklerde meydana gelen birincil gerilmeler hakkında son yıllarda hidrolik çatlatma ve laboratuvar testlerine dayalı yapılan çalışmalar sonucu elde edilen bağıntılar sonucunda oluşan düşey gerilmelere karşılık meydana gelen minimum ve maksimum yatay gerilmeler derinliğe bağlı fonksiyonlarla değişik araştırmacılar tarafından ifade edilmiştir.

Tablo 3.2 Derinliğe bağlı yatay gerilmelerin değişimi (Onargan ve diğer, 2007)

Derinliğe(m) bağlı $\sigma_H$ ve $\sigma_h$ (MPa) değişimi	Ölçüm yöntemi ve derinlik aralığı	Formül No
$\sigma_H = 10,4 + 0,046*z$ $\sigma_h = 5 + 0,0286*z$	Leeman-Hiltscher lab test (0-700)	( III )
$\sigma_H = 6,7 + 0,0444*z$ $\sigma_h = 0,8 + 0,0399*z$	Leeman-tip lab test (0 – 1000)	( IV )
$\sigma_H = 2,8 + 0,04*z$ $\sigma_h = 2,2 + 0,024*z$	Hidrolik çatlatma (0-1000)	( V )

Tünel etrafında gerilme konsantrasyonunun artmasına neden olan düzensiz topoğrafya gibi etkenler sonucunda gerilmeye bağlı yenilmeler meydana gelebilmektedir. Düşük gerilme durumlarında süreksizlik içeren ve gevrek kaya ortamlarında kama ve blok düşmeleri tipinde yenilmeler meydana gelebilirken, zemin ve yumuşak kaya ortamlarında göçme, ayna akmaları ve dökümler düşük

gerilme şartlarında meydana gelebilmektedir. Yüksek gerilmelerin meydana geldiği daha derin, gevrek ve süreksizlik içeren kaya ortamlarında ise kaya patlaması, dökülme ve gerilmeye bağlı yenilmeler meydana gelebilmektedir.

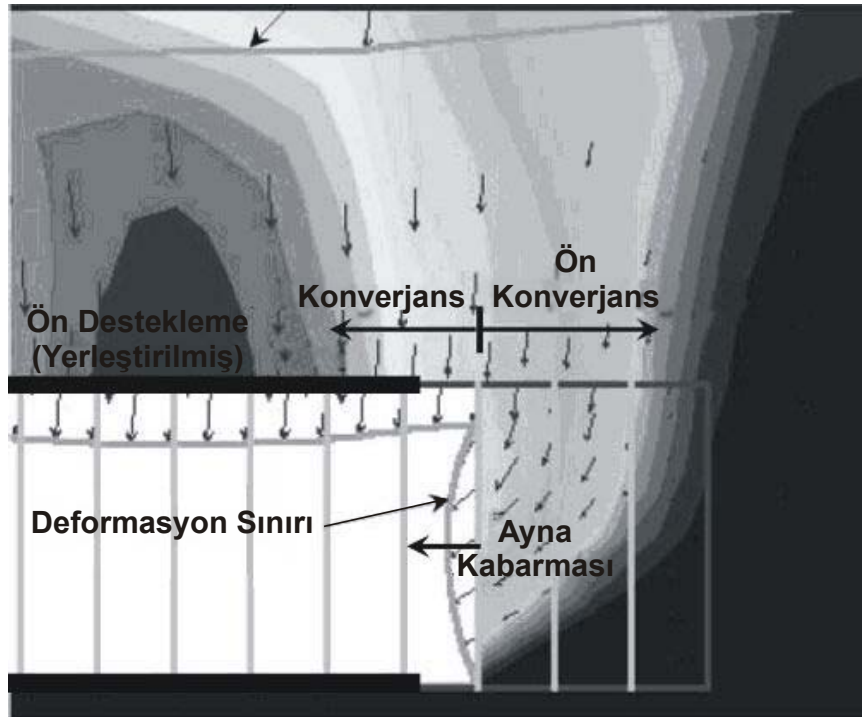
İnceleme alanı olarak belirlenen İzmir Metrosu II. Etap Üçyol-Üçkuyular metro hattı boyunca açılan tünel güzergahının sahip olduğu jeolojik ve jeoteknik koşullar düşük gerilme koşullarına uyan sığ derinlikli süreksizlik içeren zemin ve yumuşak kaya ortamı koşullarını taşımaktadır. Tablo 3.2’ de verilen fonksiyonel ifadelerden beş no’lu formül bu şartlara en uygun ve literatürde de en çok uygulama alanı bulan ifadedir.

Son yıllarda yapılan çalışmalarda sığ tünellerde kazı yönünde bir yer değiştirme vektör yönelimi değeri gözleendiğinde sağlam kaya kütleli koşullarına yaklaşıldığı, kazı yönüne karşı bir yer değiştirme vektör yönelimi değeri gözleendiğinde daha zayıf bir kaya kütleli koşuluna yaklaşıldığı şeklinde bir ön tahminde bulunulabilmektedir. Yer değiştirme vektör yönlenmeleri ile tünel kazı aynasının ilerisindeki kaya koşulları tahmin edilerek tünel inşası sırasında yerinde ve zamanında destek elemanlarının seçilmesiyle zaman, para kaybı en aza indirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Yerdeğiştirme vektör yönelimi değerlerinden yararlanılarak her zayıf kaya-sağlam kaya, sağlam kaya-zayıf kaya geçişlerini gösteren tahminler yapılmıştır (Özbek, 2005).

Kaya kütleli düşük dayanımı, yüksek deformasyona uğrama özelliği ve heterojenliği, tünel performansının tahminini zorlaştırmaktadır. Tünel inşasında tünel sıralı kazı adımları (üstyarı, altıyarı ve invert) yapılırken tünel üzerine etkiyen gerilmeler oluşan yeni şartlara uygun olarak yeniden bir dağılım gösterecektir. Oluşan yeni gerilme koşullarında tünel içerisinde oluşacak deformasyonların hızlı ve doğru bir şekilde izlenmesi, ölçülmesi ve değerlendirilmesiyle tünel üzerine etkiyen deformasyon miktarı ile tünel kazısı ilerisindeki kaya koşullarının tahminini sağlanabilmektedir (Schubert ve Steindorfer, 1995).



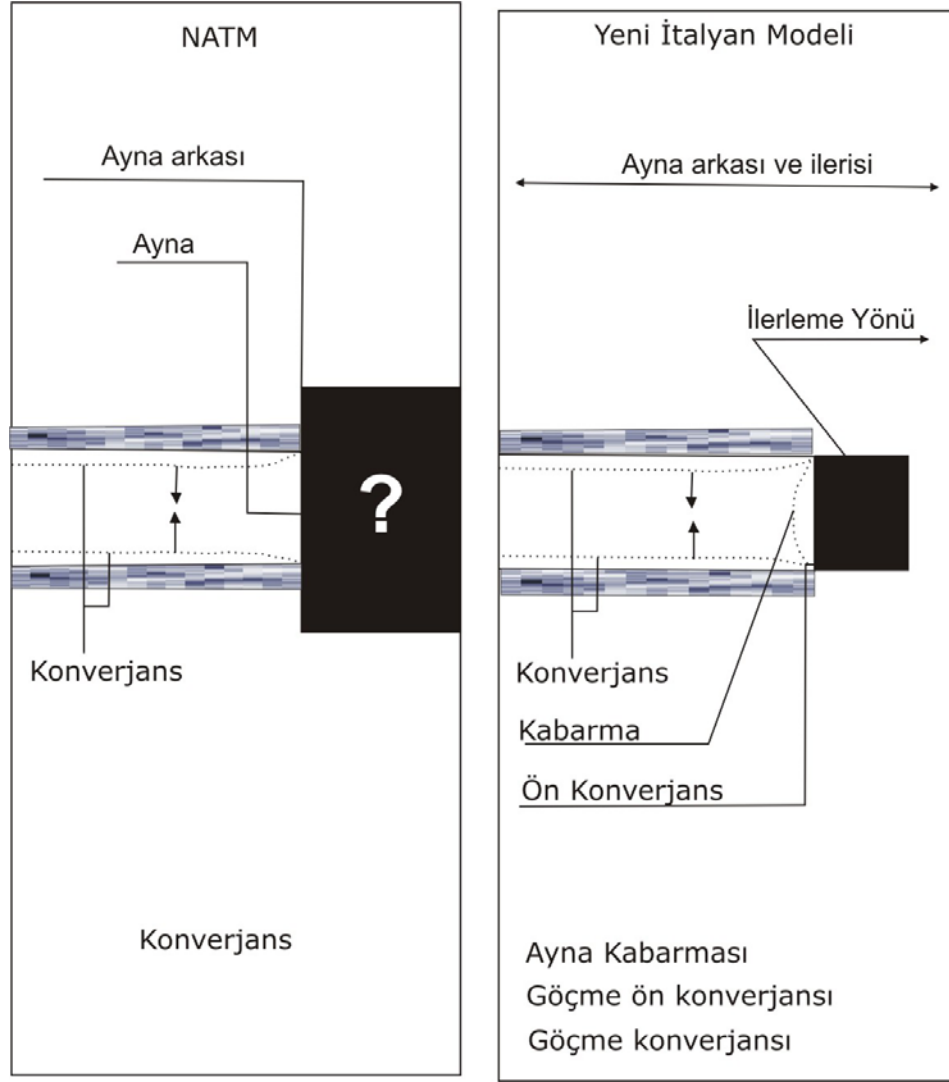
Sığ tünellerinde son yıllarda yapılan çalışmalarda açılan boşluğun hızla ön destekleme elemanları ile desteklenmesine kadar ve sonraki dönemde ayna önündeki kütlelerin ilerleme yönüne ters yönde belirli bir oranda kabarması sonucu ön konverjansların meydana geldiğini ve bu süreçte yeryüzünde de toplam sübidans miktarının % 70'inin bu dönemde oluştuğu ileri sürülmektedir (Şekil 3.14). Yapılan saha gözlemleri de bu fikri destekler niteliktedir.



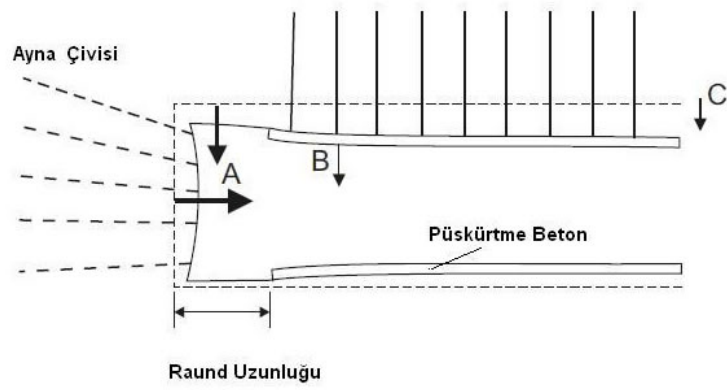
Şekil 3.14 Sığ tünellerde meydana gelen ön konverjans ve ayna kabarması

Klasik yöntem olarak bilinen Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM)'nin ana prensibi olan açıklığın açıldığı jeolojik ortamın kendi kendisini göçmeden tutabilir hale getirme düşüncesi ön destekleme elemanlarının kazıdan hemen sonra uygulanmasını gerektirmektedir. Özellikle şehir tünelleri (Urban Tunnel) niteliğindeki metro tünellerinde yapılan ön desteklemenin de, yerüstü yapılarında ve tünel üzerindeki tabakalarda deformasyona izin vermeden ilerleme yapma zorunluluğu nedeniyle yeterli olmadığı da İtalyan tünelcileri tarafından ifade edilmektedir (Şekil 3.15). Bu nedenle deformasyon önleyici tünel açma yöntemleri geliştirilmeye çalışılmaktadır. Ayna önündeki kütlelerin içsel parametrelerini arttırmak

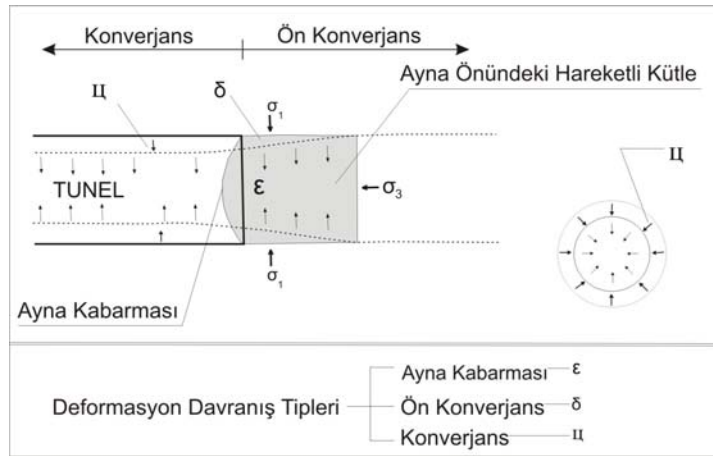
içinde ayna içerisinde zemin çivisi çakma uygulaması bu nedenle yapılmaktadır. (Onargan ve diğer, 2007). Bu durum Şekil 3.16, 3.17 ve 3.18’ de şematik olarak gösterilmiştir.



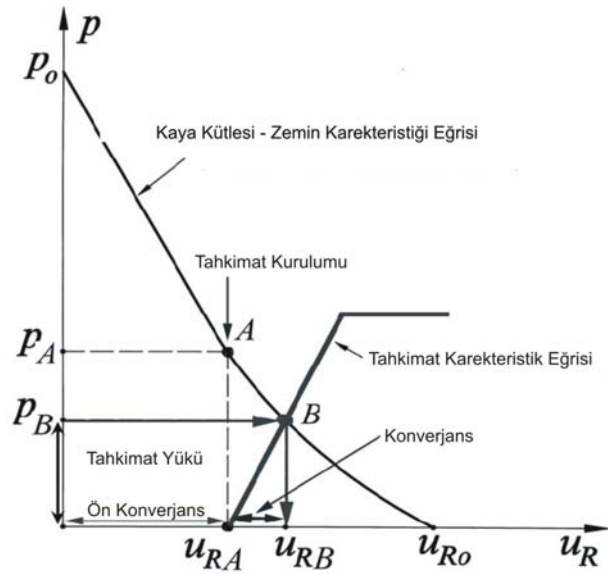
Şekil 3.15 Yeni Avusturya Tünel Açma yönteminin sığ şehir tünellerinde uygulanma zorluğu yaklaşımı



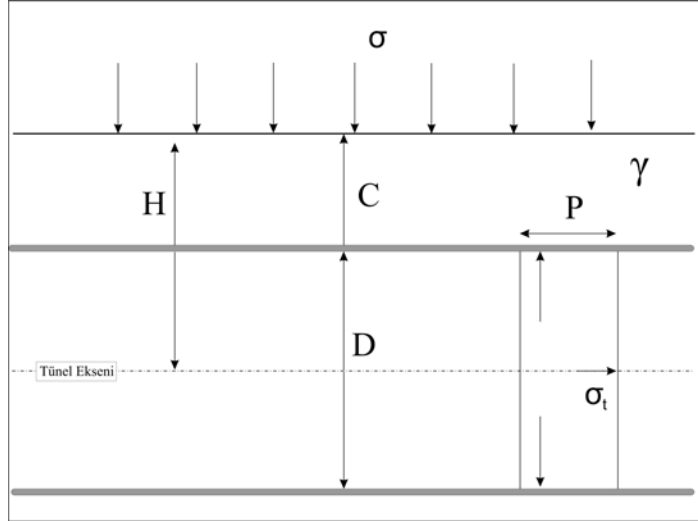
Şekil 3.16 Sığ tünellerde ayna kabarmasına karşı ayna çivisi uygulaması



Şekil 3.17 Sığ tünellerde oluşan gerilmelere bağlı deformasyon türleri ve oluşma yerleri



Şekil 3.18 Sığ tünel şartlarında kaya-tahkimat etkileşimi ve ön konverjans durumu



Şekil 3.19 Tünel derinliği ile tünel yüksekliği arasındaki ilişkinin şematik olarak gösterimi

Tünellerde tünel üst cidarının yeryüzüne olan mesafesi (C) nin (Şekil 3.19) tünel yüksekliği(D) ye oranı 2 ve altında olması durumunda ayna stabilitesinin analizinin zorunlu olduğu durum ortaya çıkmaktadır. Metro İstasyon Tünellerinde de yaklaşık olarak durum  $(C/D) < 2$  şeklindedir. Bu durumda ;

$$\frac{q^* H}{C_u} = \dots > 4 \quad (VI)$$

lokal olarak ayna yenilmeleri ve stabilite problemleri yaşanması kaçınılmaz olmaktadır. Burada  $\rho$  ort. kayaç yoğunluğu, H tünel aksının yeryüzüne olan düşey mesafesi,  $C_u$  ise killi formasyonlarda drenajsız kesme dayanımı değeri olmaktadır. Tünel içi ve üzerinde bulunan tabakaların deformasyonu sonucunda yüzeyde çökme ve kaymalar (sübsidans) sonucu oturmalar (settlement) meydana gelebilmektedir. Yeraltı açıklığının açıldığı lokasyonlarda tüm sübsidans parametrelerini (tünel geometrik boyutları, dönüm noktası apsisi,  $i_x$ , stabilite sayısı, N, hacimsel zemin kaybı yüzdesi,  $V_L$ , yüzeyde gözlenen maksimum çökme (tasman) miktarı,  $S_{max}$ ) tümünün kestiriminin zorluğu nedeniyle bazı ampirik eşitlikler türetilmiştir. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanı maksimum sübsidans ( $S_{max}$ ) ile N stabilite sayısı (N) arasındaki ilişkidir (Arıoğlu ve diğer, 2002).

$$S_{\max} = 4,9 * N^{1.29} \quad (\text{VII})$$

$S_{\max}$  : Maksimum sübsidans (mm)

N : Stabilite Sayısı

Bu formülde kullanılan stabilite sayısı birçok literatürde farklı ifadelerle tanımlansa da, en yaygın olarak kullanılanı üst örtü basıncı, tahkimat basıncı ve drenajsız kesme dayanımına bağlı hesaplanan formüldür. Buna göre;

$$N = \sigma_z / C_u \quad (\text{VIII})$$

Burada;

$\sigma_z$  = Tünel aksı üzerindeki üst örtü basıncı (MPa)

$C_u$  = Kilin drenajsız kesme direnci (dayanımı) (MPa)

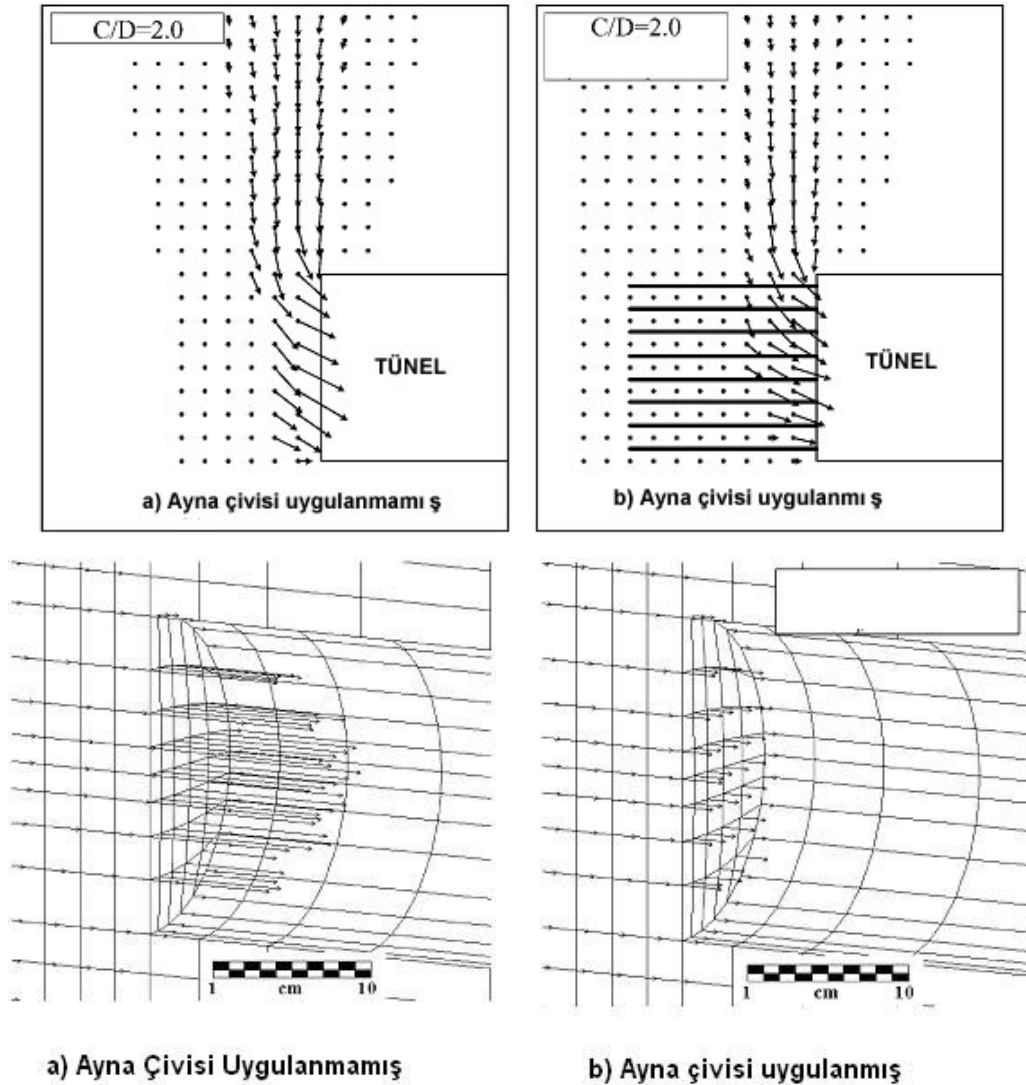
dır.

Tablo 3.3 N stabilite sayısı ile tünel stabilite durumu arasındaki ilişki

Stabilite Sayısı N	Beklenen Stabilite Durumu ve Problemler
$N \leq 3$	Tüm stabilite hakkında belirsizlik
$3 < N < 6$	Düşük oranlı sübsidans ve tünel içinde sınırlı akma problemi
$N \geq 5$	Ayna önünde göçme ve akma problemi, aşırı plastikleşme durumu
$N \geq 6$	Tümüyle stabil olmayan durum ve aynada çok ciddi stabilite problemleri

Tablodan da görüleceği üzere, stabilite sayısı N tünel stabilitesinin belirlenmesinde önemli bir faktördür. Bunun la birlikte özellikle şehir içi tünelciliğinde değerlendirme ve projelendirilme aşamasında özellikle yer üstü yapılarının etkilenme durumu da göz önüne alınmalıdır.

Yukarıda yapılan açıklamalar doğrultusunda, özellikle yer altı suyunun etkili olduğu, zayıf, akıcı, dayanım parametreleri düşük olduğu zemin veya kaya ortamlarında tünel aynası önünde göçme, akma problemi ve aşırı plastikleşme gibi olumsuzlukların meydana gelmesi olasıdır. Meydana gelebilecek olumsuzlukların önlenmesi için, özellikle tahkimat parametrelerinin artırılması birincil çözüm gibi görünse de, NATM yöntemi ile açılan sığ tünellerde ön destekleme elemanlarına (püskürtme beton, kaya bulonu, tel hasır, iksa) ek olarak özellikle riskli bölgelerde boru kemer yöntemi ile bile birlikte zemin çivisi uygulaması birlikte yapılmalıdır. Şekil 3.20'de aynada oluşan zemin çivisi uygulaması öncesi ve sonrası konverjansların değişimi verilmektedir.



Şekil 3.20 Ayna Çivisi uygulama öncesi ve sonrası aynada meydana gelen konverjansların değişimi

### 3.3.6.2 Ampirik Yöntemler

Mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılan ampirik yöntemler, gözlemler ve testlerden elde edilen verilerin istatistiksel olarak değerlendirilmesi ve önceden kazanılmış deneyimler ile pekiştirilerek kullanılması ilkesine dayanmaktadır. Mühendislik girişiminin yapılacağı ortamdaki, içerdiği farklı tip, yön, ve yapıdaki süreksizler nedeni ile tam anlamıyla örnek alınamaması, ortam davranışlarının hem kayaç malzemesi hem de içerdiği süreksizlikler tarafından kontrol edildiği olgusu, ampirik yöntemlerinin geliştirilme gereksinimlerinin başında gelmektedir. Bu nedenle, mühendislik çalışmalarının yapılacağı ortamlarda kaya kütlesinin özelliklerinin belirlenmesinde farklı ölçütler kullanılarak değerlendirmelere ve zaman içerisinde genellemelere gidilmiştir.

Kayaçlar sınıflandırılırken veya çeşitli mühendislik girişimleri için kullanılırken, (tünel, yol, köprü, baraj, maden ocakları vb.) kavramların ve çeşitli özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir ( Köse ve Kahraman, 1999). Kaya kütleleri, çeşitli jeolojik süreksizlikler (fay, eklem, tabakalanma, şistozite, makaslanma zonu vb.) tarafından ayrılmış sağlam kaya bloklarının (kaya malzemesi) birlikteliğinden oluşurlar. Kaya kütlelerindeki süreksizliklerin aralığı ya da sıklığı, farklı süreksizlik setlerinin sayısı ve planlanan mühendislik kazının boyutları, incelenen kayacın davranış türü hakkında karar verilmesinde önemli rol oynayan faktörlerdir.

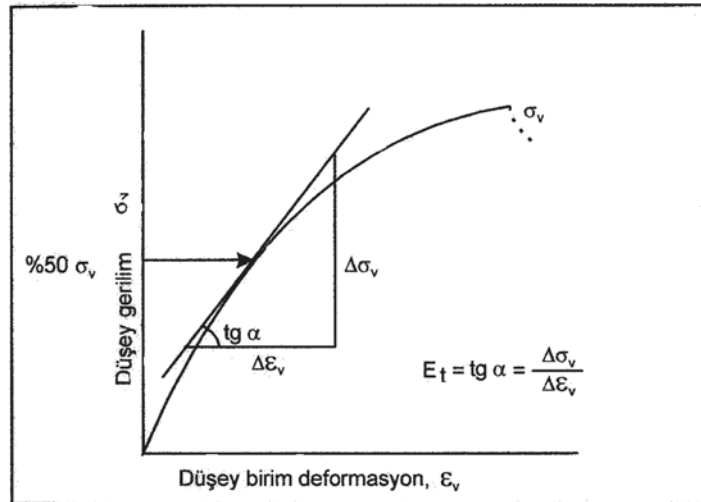
Eğer süreksizlikler geniş aralıklı veya kayacın süreksizlikler arasında kalan bölümü zayıf veya bozunmaya ya da alterasyona uğramışsa, kaya kütlelerinin genel davranışı, sağlam kayacın (süreksizlik içermeyen kısım) davranışından büyük ölçüde etkilenir. Bu koşullarda kayaç malzemesi, kaya kütlelerinin küçük ölçekteki bir örneğini oluşturabilir. Buna karşın, süreksizliklerin sayısının ve sıklığının artmasıyla, süreksizliklerle birlikte sağlam kesimi de içine alan tüm kaya kütlelerinin davranışı etkin bir faktör olacaktır. Bu durumda kayaç kütlelerinin özellikleri dikkate alınmalıdır. Değerlenen iki farklı kaya tanımı esas alınarak kaya sınıflamaları:

- Kayaç malzemesi sınıflaması
- Kaya kütle sınıflaması (Rock mass classification)

olmak üzere iki grupta değerlendirilmektedir.

Kayaç malzemesi sınıflamalarında, süreksizlik içermeyen kayaç malzemesinin sınıflandırılmasına ilişkin sistemler, kayacın özellikle tek eksenli basınç dayanımı değerleri esas alınarak hazırlanmıştır. Bu amaçla değişik araştırmacılar tarafından sadece tek eksenli basınç dayanımı esas alınarak önerilen sınıflama sistemlerinin ortak özellikleri, dayanımı 1Mpa'dan düşük olan malzemelerin toprak zemin (soil) olarak kabul edilmesidir.

Kayaçların dayanım özelliklerinin esas alındığı sınıflandırılmalar arasında Deere ve Miller sınıflaması yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu sınıflama sisteminde, kayacın tek eksenli sıkışma dayanımı  $\sigma_c$  ve modül oranı  $E_t/\sigma_c$  değerleri esas alınır. Sınıflandırma bu parametrelere bağlı olarak iki bölümden oluşur. Modül oranında kullanılan  $E_t$  teğetsel elastisite modülü, “normal gerilim-düşey birim deformasyon” ( $\sigma_v - \varepsilon_v$ ) eğrileri üzerinde, en yüksek dayanımın %50'sindeki teğetin eğimi olarak hesaplanır.  $E_t$ 'nin hesaplanmasına ilişkin  $\sigma_v - \varepsilon_v$  grafiği Şekil 3.21'de verilmiştir.

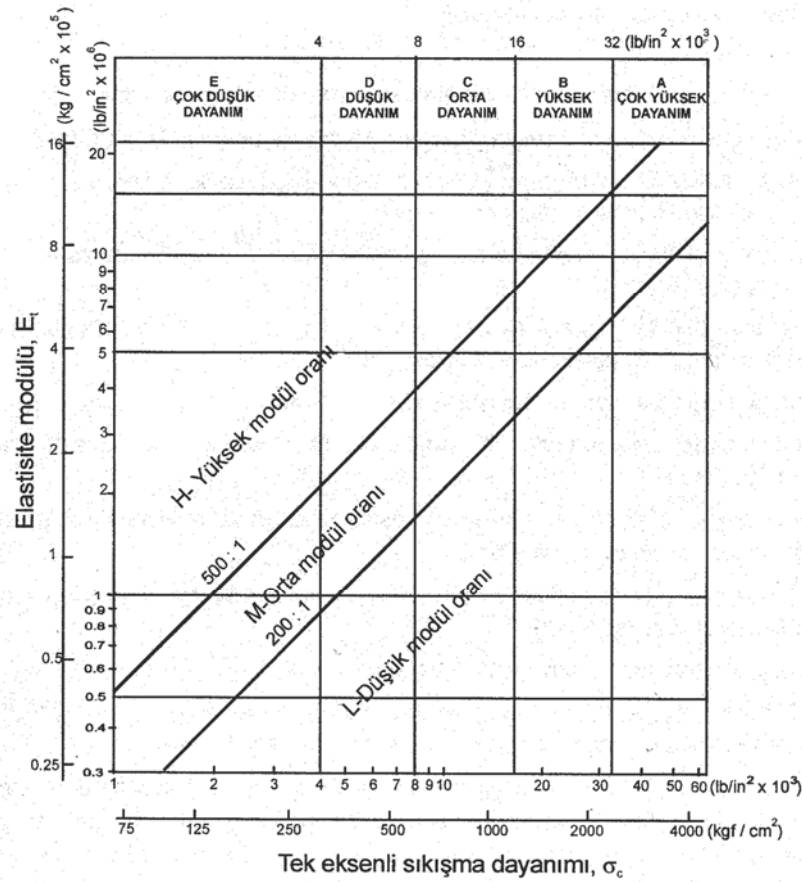


Şekil 3.21 Normal gerilim – düşey birim deformasyon ilişkisi



Bu sınıflama sisteminde, kayacın tek eksenli basınç dayanımı ve teğet modülünün tek eksenli basınç dayanımına oranı esas alınmaktadır. Bu iki parameter göz önüne alınarak yapılan sınıflandırmada, dayanımın belirlenebilmesi için tek eksenli basınç dayanımı (TEB)  $<275 \text{ kgf/cm}^2$  ve (TEB)  $>2200 \text{ kgf/cm}^2$  aralığında beşe bölünmüş ve farklı dayanım sınıfları oluşturulmuştur. Benzer şekilde oransal olarak da sınıflandırma yapılmış dayanım modülün yüksek, orta ve düşük oluşu durumuna göre sınıflandırılmıştır.

Deere ve Miller sisteminin iki bölümden oluşan sınıflaması birleştirilerek, “birleşmiş mühendislik sınıflaması” adıyla bir grafik (Şekil 3.22) şekline getirilmiştir. Laboratuvar testleriyle belirlenen  $E_t$  ve  $\sigma_c$  değerleri bu grafiğe yerleştirilerek, kayacın sınıfı belirlenmiştir (Deere ve Deere,1988).



Şekil 3.22 Birleşmiş mühendislik sınıflaması grafiği

Kayaç malzemesine ait sınıflama sistemlerin en önemli sınırlaması, mühendislik tasarımı için niceliksel olarak bir veri sağlayamamasıdır. Bu sistemler sadece

kayaçların mühendislik amaçlarıyla daha iyi tanımlanabilmesi, kayaç malzemesi özelliklerinin tartışılması ve mühendisler arasında teknik bir birliktelik sağlanabilmesi amaçlarıyla kullanılmaktadırlar.

Kaya kütlesi sınıflandırma sistemleri ise genellikle, projelerin fizibilite ya da ilk tasarım aşamasında kullanılan içersinde çalışılacak kayaç kütlesi, gerilmeler ve su durumu hakkında yeterince bilgiye sahip olunamaması durumunda başvurulmuş bir sistemlerdir. Bir başka deyişle, bu sistemler yapılacak olan madencilik işleminde başlangıç tahkimat gereksinimlerini, kaya kütlesinin dayanım ve deformasyon özelliklerinin tahmin edilebilmesi için kaya kütlesinin karakteristiğini ve bileşimini göstermek amaçlı kullanılırlar (Hoek, 1998).

Kaya kütlesi sınıflama sistemleri; kaya kütlesinin davranışını etkileyen önemli parametreleri tayin etmek, kaya kütlelerini kendi içlerinde benzer özellikler gösteren bölgelere ayırarak değişik kaya kütlesi sınıflarını belirlemek, bir sahadaki kaya koşulları ile ilgili kazanılan deneyimin diğer sahalarda karşılaşılan koşullarla karşılaştırıp ilişki kurmak, mühendislik tasarım işleri için sayısal veri ve bir klavuz elde etmek ve de mühendisler arasında ortak bir temele dayalı bilimsel ve teknik bir dil sağlamak amacı ile kullanılmaktadır (Bieniawski,1989).

1946'dan bu yana değişik araştırmacılar tarafından, değişik kaya kütlesi sınıflama sistemleri geliştirilmiş ve/veya önerilmiştir. Bu sistemlerin bir bölümü, kendilerinden önce önerilmiş olan sistemlerin, bazı faktörler dikkate alınarak yeniden düzenlenmesi (modifikasyonu) sonucunda ortaya çıkmıştır.

Bu bölümde, söz konusu sınıflandırma sistemlerinin, hesaplama yöntemlerine, tablo ve/veya grafikleri ile kullanımını gösteren abaklara değinilmemiştir. Bölümde önem verilen husus bu yöntemlerin kullanılabilirlikleri, uygulama şartları, ve araştırmanın özü ile uyumlu olarak ele alınan şartlar için yöntemlerin avantaj ve dezavantajlarının ortaya konulmasıdır.

3.3.6.2.1. *Değişik Araştırmacılar Tarafından Önerilen Kaya Kütlesi Sınıflandırma Sistemlerinin Değerlendirilmesi.* 1946'dan bu yana farklı araştırmacılar tarafından, değişik kaya kütlesi sınıflama sistemleri geliştirilmiş ve önerilmiştir. Tünelcilik faaliyetlerinde bu sınıflama sistemlerinin en çok kullanılanları; Rock Mass Rating (RMR), Q veya NGI (Norwegian Geotechnical Institute) ve Geological Strength Indeks (GSI) olarak sayılabilir. Çalışmada da, yukarıda verilen sınıflama sistemlerine uzun uzun değinmek yerine, bunların avantaj ve dezavantajları, kullanım şartları ve gerekçeleri ortaya konulmuştur.

RMR kaya kütlesi sınıflaması Bieniawski tarafından 1972-1973 arasında geliştirilmiştir (Bieniawski,1976). Sistem, 1973'ten 1989'a kadar yeni verilerle desteklenerek bazı değişikliklere uğramış ve son şeklini 1989'da almıştır (Bieniawski,1989). Tünel, büyük yeraltı açıklıkları (odalar), maden işletmeleri, şevler ve temellerle ilgili 351 değişik uygulamadan derlenen verilerin ve yapılan gözlemlerin istatistiksel olarak değerlendirilmesi, yöntemin bugünkü şeklini almasında en önemli araçlar olmuştur.

Tablo 3.4 Başlıca kaya kütlesi sınıflama sistemleri (Küçük.,2009, düzenlenerek)

Sınıflama Sisteminin Adı	Formu ve Tipi (*)	Ana Uygulama Alanları	Kaynak
Terzaghi Kaya Yüğü Sınıflama Sistemi	Tanımlayıcı ve Kaya Davranış formu, Fonksiyonel Tip	Tünelde çelik tahkimat dizaynı	Terzaghi, 1946
Lauffer Tahkimatsız Durabilme Süresi Sınıflama Sistemi	Tanımlayıcı Form, Genel Tip	Tünel dizayn verileri	Lauffer, 1958
Yeni Avusturya Tünelcilik Metodu (NATM)	Tanımlayıcı ve Kaya Davranış formu, Tünel Konsepti	Yüksek gerilimli zeminlerde kazı ve dizayn	Rabcewicz, Müller ve Pacher, 1958-64
Kaya Mekanik Özellikleri için Kaya Sınıflaması	Tanımlayıcı Form, Genel Tip	Kaya Mekanik verileri	Patching ve Coates, 1968
Kaya ve Zeminlerin Sınıflaması	Tanımlayıcı Form, Genel Tip	Komünikasyon için partükül ve blok tanımlamaları	Deere et al., 1969
Kaya Kalite Göstergesi (RQD)	Sayısal Form, Genel Tip	Karot loglaması ve diğer sistemlerde kullanılır	Deere et al., 1967
Boyut-Dayanım Sınıflaması	Sayısal Form, Fonksiyonel Tip	Kaya dayanımı ve blok çaplarını esas alır, genelde madencilikte	Franklin, 1975
Kaya Yapısı Derecesi (RSR)	Sayısal Form, Fonksiyonel Tip	Tünelde çelik tahkimat dizaynında	Wickham et al., 1972

Kaya Kütle Derecesi (RMR)	Sayısal Form, Fonksiyonel Tip	Tünel ve madencilikte	Bieniawski, 1973
Q Sınıflama Sistemi	Sayısal Form, Fonksiyonel Tip	Yeraltı madenciliği kazısında tahkimat dizaynı	Barton et al., 1974
Topolojik Sınıflama	Tanımlayıcı Form, Genel Tip	Kominikasyon	Matula ve Holzer, 1978
Tek Form Kaya Sınıflama Sistemi	Tanımlayıcı Form, Genel Tip	Kominikasyon	Williamson, 1980
Basit Jeoteknik Sınıflama	Tanımlayıcı Form, Genel Tip	Genel	ISRM, 1981
Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)	Sayısal Form, Fonksiyonel Tip	Yeraltı kazısında tahkimat dizaynı	Hoek, 1995
Kaya Kütle İndeksi (RMI)	Sayısal Form, Fonksiyonel Tip	Genel karakterizasyon, tahkimat dizaynı, TBM uygulamaları	Palmström, 1995
(*) Tanımlayıcı Form: Tanımlama için verilerin sisteme girilmesi, Sayısal Form: Karaktere göre sayısal derecelerin veri olarak kullanılması, Davranış Formu: Tünelde kaya davranışının veri olarak kullanılması, Genel Tip: Sistemin genel karakterizasyon olarak çalışması, Fonksiyonel Tip: Sistemin özel uygulamalar için yapılandırılması (Örneğin, tahkimat için)			

RMR sistemine göre kaya kütlelerinin sınıflandırılmasında altı ana parametre esas alınmaktadır. Bunlar; Kayacın tek eksenli sıkışma dayanımı ( $\sigma_c$ ), RQD (Rock Quality Designation), süreksizlik aralığı, süreksizlerin durumu (devamlılık, pürüzlülük, dolgu, bozunma, bozunma, açıklık), yer altı suyu koşulları ve süreksizliklerin yönelimi dir.Sistemin önerildiği yıllarda, yukarıdaki parametreler değişik araştırmacılar tarafından farklı değerlendirilmiş olup ISRM tarafından 1981 yılında yapılan değişiklik ile bir standartlaşmaya gidilmiştir ( ISRM, 1981)

Sistemin uygulanması için, kaya kütlesi belirli özellikleri açısından benzerlik taşıyan yapısal bölgelere ayrılır. Kaya türünün veya süreksizler arası mesafenin üniform olduğu yapısal bölgelerle yaygın olarak karşılaşılabılır. Pek çok durumda yapısal bölgenin sınırları; fay, dayk, makaslanma zonu gibi ana süreksizliklerle çakışmaktadır. Yapısal bölgeler belirlendikten sonra, kazı aynaları boyunca veya sondajlı bir çalışma yapılıyorsa her ilerlemede sınıflamanın gerektirdiği parametreler tayin edilir.

İlk önerildiği 1973'ten bu yana birkaç kez modifiye edilen sistem, 1989'da yapılan değişikliklerle (Bieniawski, 1989) son şeklini almış ve bu haliyle günümüze kadar

birçok farklı mühendislik girişimlerinde kaya kütlelerinin sınıflandırılmasında etkin rol oynamıştır.

RMR sınıflama sisteminin yaygın şekilde kullanıldığı madencilik uygulamalarında, kazı işlemlerinin oldukça dinamik süreçleri içermesi ve birbirini farklı yönlerde kesen yeraltı açıklıklarının gündeme getirebilir. Bu gibi durumlarda bazı arazi gerilimleri, patlatma, vb. gibi faktörlerin dikkate alınması ve gerekiyorsa, bu faktörler için de düzeltmelerin yapılarak RMR değerlerinin düzeltilmesi gereklidir.

RMR kaya kütle sınıflama sisteminde şartlara göre gerekli düzeltmelerin yapılmasından sonra elde edilen RMR puanı; kaya kütlesi sınıfının ortaya konulmasında, belirli boyutlardaki yer altı açıklıkları için desteksiz durabilme süresi ve kohezyonu ile içsel sürtünme açısı değerlerinin tayini, destek yükünün belirlenmesi amaçlarına yönelik olarak kullanılır.

Q veya NGI (Norwegian Geotechnical Institute) sistemi olarak bilinen sistem ise, (Barton ve diğer, 1974) tarafından geliştirilmiştir. Uzun yıllar kullanıldıktan sonra, sistemin destek sistemlerinin seçimine yönelik bölümü Grimstad ve Barton (1993) tarafından revize edilmiştir. Bu sınıflama sistemine göre, Q değerinin hesaplanması için RMR gibi benzer altı parametre dikkate alınmaktadır. Bunlar, RQD, eklem takımı sayısı ( $J_n$ ), eklem pürüzlülük sayısı ( $J_r$ ), eklem yüzeyi araştırma sayısı ( $J_a$ ), eklem su azaltma faktörü ( $J_w$ ) ve gerilim azaltma (SRF) faktörleridir. Q sisteminden de en büyük desteksiz açıklığının belirlenmesinde ( $B_{max}(m)$ ), tavan destek basıncının saptanmasında ( $P_{tavan}(kg/cm^2)$ ), etkin olarak yararlanılmaktadır.

$$B_{max}=2 (ESR)Q^{0.4}$$

$$P_{tavan}= (2/J_r)Q^{-1/3}$$

Eğer eklem sistemlerinin sayısı üçten az ise,

$$P_{\text{tavan}} = \frac{2}{3} \cdot J_n^{1/2} \cdot J_r^{-1} Q^{-1/3} \quad \text{ifadesi kullanılır.}$$

RMR veya Q sistemine göre yapılan sınıflamalarda sınıflama puanlarını farklı eşitlikler kullanılarak birbirine çevrilmeside mümkündür. Sistemler arasında geçiş yapmayı sağlayan eşitlik aşağıda belirtilmektedir.

$$\text{RMR} = 9 \ln Q + 44$$

Yukarıda değinilen eşitliğin yanı sıra, daha sonraki yıllarda RMR'dan Q değeri arasında dönüşüm yapabilmek için farklı eşitlikler de önerilmiştir. Tablo 3.5' de verilen bu eşitlikler, RMR ve Q değerleri arasında tek bir ilişkinin olmadığını göstergesidir.

Tablo 3.5 RMR ve Q arasındaki ilişkiler (Chaqaet ve Hadjigeorgiou, 1993).

İlişki	Ülke	Kazı türü
RMR= 13.5 logQ+43	Yeni Zelanda	Tüneller
RMR= 12.5 logQ+55.2	İspanya	Tüneller
RMR= 5 lnQ+60.8	G. Afrika	Tüneller
RMR= 213.89-9.19 lnQ	İspanya	Madencilik-yumuşak kaya
RMR= 10.5 lnQ+41.8	İspanya	Madencilik-yumuşak kaya
RMR= 12.11 logQ+50.81	Kanada	Madencilik- sert kaya
RMR= 8.7 lnQ+38	Kanada	Tüneller-sedimanter kaya
RMR= 10 lnQ+39	Kanada	Madencilik- sert kaya

RMR ve Q sınıflandırma sistemlerinin devamında geliştirilen, Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) sınıflama sistemi ise, zayıf ve çok zayıf kaya kütlelerinin sınıflandırılması ihtiyacı ile ortaya çıkmıştır. GSI sınıflama sistemi, Hoek, Kaiser ve Bawden tarafından, eklemli ve zayıf kaya kütlelerinin dayanım parametrelerinin laboratuvar ortamında gerçekçi olarak belirlenememesi, daha önce ortaya konan ampirik yöntemlerin genellikle sıkı kenetlenmiş, köşeli kaya parçalarından oluşan iyi ve orta kaya kaliteli kaya kütlelerinde iyi sonuçlar vermesi nedeni ile önerilmiştir.

Önerilen yöntem, farklı jeolojik koşullar için kaya kütle dayanımındaki azalmayı tahmin eden yapıdadır. Eklemlili kaya kütle için genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme ölçütü

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left( m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada  $\sigma_1$  ve  $\sigma_3$  olarak belirtilen üssel ifadeler, yenilme anındaki maksimum ve minimum efektif gerilmeleri,  $m_b$  ifadesi kaya kütle için Hoek-Brown sabiti “m” değerini, “s” ve “a” kaya kütleinin karakteristiğine bağlı sabitleri ve  $\sigma_{ci}$  ’ değeri de sağlam kayanın tek eksenli basınç değerinin göstergeleridir.

Burada “a” üstel ifadesi 0,5 alındığında, ölçüt özgün hale dönüştürülmekte yani iyi kenetlenmiş ve köşeli kaya parçalarından oluşan iyi kalitede kaya kütleinin değerlendirilmesi yapılmaktadır. Eğer ki, kaya malzemesine ait blokların arasındaki kenetlenmenin zayıf olduğu, çekme dayanımı ve kohezyona sahip olmayan kaya kütle değerlendirilecekse eşitlikte “s” değeri sıfır olarak alınmalıdır.

Başlangıçta RMR ve Q sınıflaması puanları ile ilişkilendirilen GSI, daha sonraki yıllarda yapılan değişiklikler ile tek başına bir sınıflama sistemi olarak ölçütteki yerini korumuştur. GSI değeri 85 ile (kaya malzemesinde) 10 (çok düşük kaliteli kaya kütleleri) arasında değişen değerler alabilmektedir.

Literatürde pek çok çalışmada da vurgulandığı ve ayrıca Bieniawski (1989)’ da belirtildiği üzere, herhangi bir mühendislik tasarımıyla ilgili olarak kaya kütle içerisinde ve/veya üzerinde uygulanması sırasında yapılan teknik girişim, mevcut süreksizliklerin açıklıklarının artmasına ve yeni süreksizliklerin gelişmesine neden olur. Diğer bir ifadeyle, teknik girişimin sonucunda kaya kütle daha gevşek ve zayıf bir yapı kazanır. Dolayısı ile yapılacak değerlendirmelerde kaya kütleinin kalitesinde gözlenecek bu düşüşler göz önünde bulundurulmalıdır.

### 3.3.6.3 Gözleme Dayalı Yöntemler Nümerik Modelleme Yöntemleri

Mühendislik girişimlerinin değerlendirilmesinde, ampirik ve analitik yöntemlerin başarısında ve de tek başına, saha ve laboratuvar ortamında sağlıklı verilerin elde edilmesinde en büyük pay, gözleme dayalı yöntemleridir. Gözleme dayalı yöntemler; kazı alanı ve civarında yapılan inceleme ve gözlemleri, arazide, yerinde ya da laboratuvar ortamında yapılan deneyler ile deformasyon, gerilme, su geliri ve basıncı vb. konularda ilgili aletsel izleme çalışmalarını kapsamaktadır.

Gözleme dayalı yöntemler,

- kazı yöntemi, ön ve kalıcı destek sistemlerin zeminin gerçek durumuna göre ayarlanmasında,
- mühendislik girişimi öncesinde ve devam eden süreçte, ölçümler sonrasında elde edilen verilerin eşliğinde yapılan risk analizleri sonucunda oluşabilecek tehlike ve risklerin en aza indirgenmesinde,
- girişimin olası çevreye zararlı etkilerinin önceden tahmin edilerek gerekli önlemlerin alınmasında,
- geliştirilen varsayımlarının doğrulanmasında,

etkin olarak veri akışı sağlayan yöntemlerdir. Projelendirilen girişimin aşamaları ve bu aşamaların zorunlulukları göz önüne alındığında aşağıda verilen parametrelerin ve bu parametrelerin etkilerinin inşa süresince araştırılması ve gözlenmesi gerekmektedir. Bunlar;

- Yer altı su durumu ve gözlemleri
- Sahada meydana gelebilecek deformasyonlar ve gözlenmesi
  - Yeryüzünde meydana gelebilecek deformasyonlar
  - Yapılarda meydana gelebilecek deformasyonların
- Tünel içi konverjans ve deformasyonların gözlenmesi
- Olası çevresel etkileri önlemeye yönelik gözlemler.

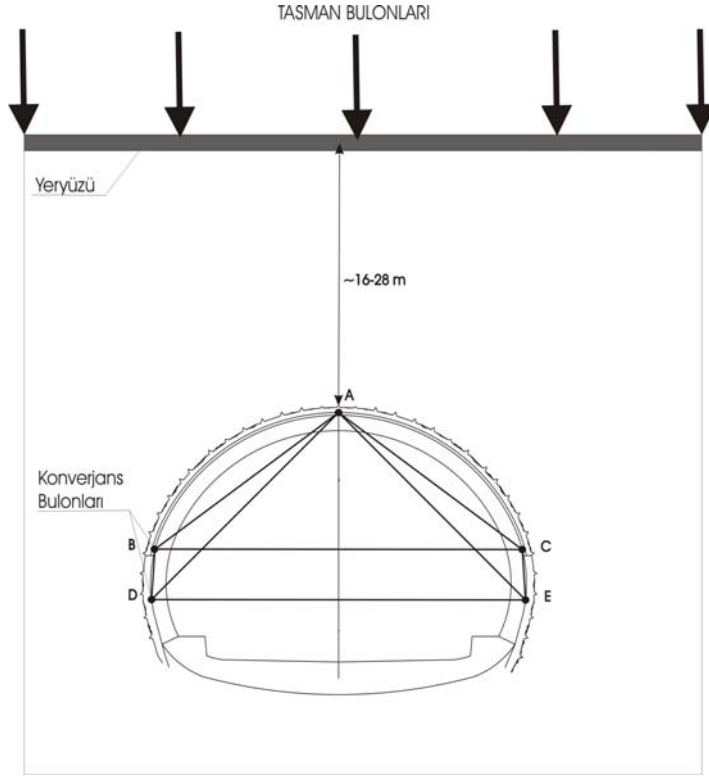


dir. Yer altı su seviyesinin proje sonuna kadar izlenmesi, özellikle tünel aynasından ve kaplamasından gelen su sızıntılarının dikkate alınması gerekmektedir. Tünelde drenaj yapılıyor ise, miktarının iyi tayin edilmiş olması yer altı suyu nedeni ile oluşabilecek riskleri en aza indirmek bakımından önemlidir.

Tünel açımının yapılacağı güzergahın üzerindeki zemin ve diğer kaya birimlerinin olası yerdeğiştirme değerleri (sübsidans) yakından takip edilerek izlenmelidir. Özellikle şehir içi sığ tünelcilik şartlarının geçerli olduğu ve projelendirilen güzergahtaki kaya kalitesinin zayıf olarak nitelendirildiği durumlarda, sübsidans değerleri kazının her aşamasında dikkatle incelenmelidir.

Tünel içerisinde oluşabilecek deformasyonların takip edilebilmesi için, tünel içinde gözlem ve ölçüm noktaları oluşturulur. Hat boyunca önceden belirlenen riskli bölgelerinin konumuna göre bu noktalar sıklaştırılarak, riskli bölge geçişleri, elde edilen daha çok veri ile kontrollü şekilde sürdürülebilir. Tünel içerisinde, zemin içi ankrajlarının yükleri, kaplamanın bozulma durumu, invertte gözlenebilecek olası kabarma, tünel etrafındaki çözülen zeminin durumu, kaplamanın radyal ve teğetsel gerilme ölçüleri, kaplamaya gelen su basıncı (kapiler basınç) gibi parametreler ölçümlerle belirlenmektedir.

Tünel güzergahı üzerinde, genellikle en kesit üzerinde gösterilen gözlem ve ölçüm noktaları, tüneli karakterize eden biçimde olmalıdır. Belirlenen bu noktaların ortak özelliği, maksimum düzeyde yorum ve bilgi sağlayacak şekilde seçilmiş olmalarıdır. Aşağıda şekil 3.23'te kesit üzerinde altı adet konverjans ölçümü verebilecek noktanın (konverjans bulonları) tünel içindeki yerleri ve yüzeyde oluşabilecek tasman değeri için ölçüm noktaları verilmektedir.



Şekil 3.23 Tasman ve Konverjans Ölçüm Noktaları

Zayıf ve riskli bölgelerde tünel açımında, kazı öncesinde ve kazı sırasında tüm kaya kütlelerinin değerlerinin gözlenmesi gerekmektedir. Kaya tünellerde düzenli (normal) enstürmanlandırma kesitindeki cihazlara ilaveten yerleşik bulon (ankraj) okumalarını gösteren basınç hücresi, ankraj yük hücresi, ekstansometre ve piyezometre de ölçümlerinin de dahil edilmesi, olası riskleri azaltacaktır.

Tünel açımı sırasında meydana gelebilecek olası çevresel risklerin de zamanında önlenmesi açısından, yer altı kazısı başlamadan önce güzergah boyunca kazı etki alanına giren yapıların durum tespiti mutlaka eksiksiz yapılmalıdır. Güzergah üzerindeki risk taşıyan yer üstü yapılarında ve civarlarında yapılan ölçümler daha sık ve hassas hale getirilmelidir. Ayrıca güzergah üzerinde zemin oturma yada kabarma durumu, yatay hareketlilik durumu mutlaka düzenli olarak incelenmelidir.

Tünel inşası sırasında ilk andan son ana kadar yapılan gözlem ve ölçümler, farklı metodlar kullanılarak elde edilen verilerin kontrolünde, tahmin edilen vede gerçekleşen zemin şartlarının değerlendirilmesinde, tahmin edilen kaya kalitelerinin

doğru yorumlanmasında, kazı yöntemi, tahkimat seçimi ve ilerleme hızının saptanmasında, önceden belirlenen kazı ve destekleme sistemlerine ek ilave yöntem yada malzeme gereksinimi durumuna ve de riskli bölgelerde olası, beklenmeyen durumlara hazırlıklı olmaya olanak sağlayan tünellerin tasarım ve projelendirilmesi aşamasında en büyük ve güvenilir veri akışını sağlayan yöntemlerdir.

#### 3.3.6.4 Nümerik (Sayısal) Modelleme Yöntemleri

Birçok mühendislik probleminin çözümünde son yıllarda özellikle bilgisayar programlama dilleri ve tekniklerinin gelişimi ile, kullanılan nümerik (sayısal) modelleme yöntemlerinde hızlı bir gelişim sağlanmıştır. 1960' lı yıllarda aktif olarak kullanılmaya başlanan ilk sayısal yöntemlerde kaya kütleleri homojen, izotrop ve elastik olarak kabul edilmiş ve bu kabuller ile yazılan algoritmaların modelleri bilgisayar ortamında çok uzun süreler almıştır.

90' lı yıllar dan itibaren geline nokta, statik gerilme durum analizlerinin yanında, termik, dinamik nedenli yada akışkan basıncından doğan gerilme ve stabilite analizleri yapılabilmektedir. Ayrıca homojen, izotrop ve elastik kaya kütlelerinin dışında süreksizlikler içeren, plastik ya da anizotropik ortamlarda sayısal modellemeler yapmak da olasıdır (Yazıcı ve Nasuf, 1993).

Nümerik modelleme yöntemleri, gerek yöntemin diğer yöntemlere nazaran düşük maliyeti gerekse son yıllardaki teknolojik gelişmeleri takiben uygulamadaki kolaylığı açısından günümüzde özellikle yer altı madenciliği konusunda başvurulan önemli bir araştırma aracıdır.

Yer bilimleri açısından nümerik modelleme problemleri genellikle verilerin tam olarak detaylandırılmadığı ve formasyonlardan kaynaklanan değişkenlerin çok olduğu bir araştırma alanıdır. Madencilik faaliyetleri açısından, yapılacak girişim hakkında ön ve detaylı bir bilgi sunan bu yöntemlerde en önemli nokta; jeolojik yapının bilinmesi, modeli oluşturmak için gerekli olan verilerin veri tabanına doğru işlenmesi ve yapılacak kabullerin ortam şartlarına uygunluğudur.

Bu aşamada tasarımcının gerekli verileri toplaması için maliyeti yüksek arazi ve laboratuvar deneyleri gerekebilir. Modellemelere sağlıklı veri toplanması amacı ile yapılan bu işlemlere fazla yatırım yapmak, yöntemin yukarıda değinilen maliyet kalemlerini arttırmaktadır. Bu durumda ne az nede çok ayrıntıya giren modeller başarılı olmuşlardır (Starfield and Cundall, 1988).

Günümüzde kullanılan nümerik modelleme yöntemleri diferansiyel ve integral yöntemleri olarak iki guruba ayrılabilir. Ayrıca son dönemlerde geliştirelen melez (hybrid) yöntemler hem diferansiyel hemde integral bazlı yöntemlerin birleştirilmesi ile oluşan ve bunların avantajlı yönlerinin kullanıldığı sistemlerdir. Bunların dışında kullanılan “ayrı elemanlar yöntemi” analizlerin diferansiyel metotlara göre yapıldığı fakat içerisinde birçok yeni kavram barındıran farklı bir gruptur. Aşağıda şekil 3.24’te günümüzde kullanılan nümerik yöntemlerin basit olarak sınıflandırılması verilmektedir.



Şekil 3.24 Nümerik (sayısal) yöntemlerin sınıflaması

Diferansiyel yöntemler olarak isimlendirilen sayısal modelleme yöntemlerinde ana unsur, modellenecek kaya kütlelerinin elemanlara ya da belirli bölgelere ayrılmasıdır. Günümüzde sonlu elemanlar ve sonlu farklar yöntemleri ile melez

yöntemler olarak isimlendirilen yöntemler yukarıda adı geçen metotlar arasında en çok tercih edilenleridir.

Sonlu elemanlar yönteminde, iki boyutlu çözülecek problemlerde seçilen bölge bir örgü (mesh) oluşturacak şekilde ve üçgen ya da dörtgen elemanlara bölünmektedir (Köse, 1980). Bitişik elemanların köşeleri aynı düğüm noktalarını (node) paylaşır. Yöntemin esasına göre, bir elemanın içinde herhangi bir noktadaki yerdeğiştirme (displacement) elemanın şekline göre düğümlerdeki yerdeğiştirme cinsinden yazılır (Yazıcı ve Nasuf, 1993). Yöntemin birçok avantajı olsa da, sonsuzdaki sınır şartlarının yaklaşık olarak hesaplanması, madencilik faaliyeti yapılan bölgelerde kayanın yenildikten sonrada yük alması ile oluşan yüksek yerdeğiştirme değerlerine erişim ve de tüm kaya kütesinin, hatta kazı alanından bir kaç cm. uzaklıkların bile, modellemenin doğruluğu açısından, elemanlara ayrılma zorunluluğu sonucu yüksek kapasiteli bilgisayar belleği ihtiyacı gibi zorunluluklar, yöntemin kullanım alanlarını kısıtlamaktadır.

Klasik sonlu farklar yöntemi sınır değer problemlerindeki diferansiyel denklemlerin sayısal olarak çözümü için kullanılmıştır (Sokohnikoff, 1956) Elastisite dahil bir çok sınır değer probleminde sonlu elemanlar, sonlu farkların yerini almıştır. Sonlu farklar yönteminin dez avantajları arasında; basit elastik problemlerin sonlu elemanlar yöntemine göre çok daha uzun zaman alması ve iterasyon zaman aralığının belirlenmesindeki deneyim sayılabilir.

Sınır elemanlar yöntemi ise ilk zamanlarda jeoteknik ile ilgili araştırmacılar tarafından daha çok ilgi gören bir yöntemdi. Bu metotta sonsuzdaki sınır şartlarının yöntemin yapısı gereği otomatik olarak bulunması, süreksizliklerin farklı bir yöntemle (yerdeğiştirme süreksizliği) ele alınabilmesi sistemi avantajlı hale getirmektedir. Fakat lineer olmayan gerilmelerin, zamana bağlı deformasyonların, aşamalı yapılan kazının ve de tahkimat elemanlarının modellemeye dahil edilmesi oldukça zordur (Hoek vd., 1989). Ayrıca farklı elastik özellik gösteren birimler farklı çözümler gerektirmektedir. Bu durumda farklı problem çeşitlerine göre program geliştirmek gerekmektedir (Crouch ve Starfield, 1983).

Ayrı eleman yönteminde diğer yöntemlerden farklı olarak, kaya kütlelerinin süreksizlik içerdiği ortamların modellemeleri için geliştirilmiş bir yöntemdir (Cundall, 1987). Bu yöntemde süreksizliklerle sınırlanmış kaya kütlesi tek bir eleman olarak kabul edilmektedir. Yöntemde süreksizlikler, kazı aşamaları, tahkimat elemanları, yerçekiminin etkisi ya da dolgu kolaylıkla ele alınabilmektedir. Bunun yanında kurulacak olan modellerin çözümü için gerekli olan zaman ve bilgisayar hafızası ile, süreksizliklerde belirlenemeyen ya da göz ardı edilen küçük bir değişimin etkilerinin tüm sonucu değiştirdiği gerçeği yöntemin dez avantajları arasında gösterilmektedir.

Melez yöntemler ya da “hibrid methods” olarak bilinen yöntemler ise genellikle sınır elemanlar yönteminin sonlu elemanlar ya da ayrı elemanlar yöntemi ile birleşmesinden oluşur (Yazıcı ve Nasuf, 1993). Hem sonsuzdaki sınır şartlarının otomatik olarak saptanması hemde bütün kaya kütlelerinin sonlu elemanlara ayrılması önlenerek zamandan vede gerekli olan bilgisayar hafızasından elde edilen kazanç yöntemin en önemli avantajlarından. Yöntemde kazı alanı etrafında sonlu elemanlar yönteminden faydalanılırken, sonsuzda sınır değer şartları otomatik olarak hesaplanmaktadır. Melez yöntemler bu nedenle günümüzde de hem sonlu elemanlar hemde sınır eleman yönteminin avantajlı yanlarına sahip olduğu için tercih edilen yöntemler arasındadır.

Tez çalışması kapsamında bölüm beş’te detayları verilen analizlerde, yukarıda kısaca değinilen sayısal modelleme yöntemlerinden melez yöntemler içerisinde sınıflandırılan bir alt yapı üzerine kurulu olarak çalışan, Phase2 v6.0 sayısal modelleme programı kullanılmıştır.

## **BÖLÜM DÖRT**

### **ZAYIF VE FAYLI ZONLARDA TÜNEL AÇIMI,**

### **İZMİR II. AŞAMA METRO PROJESİ UYGULAMA ÖRNEĞİ**

Çalışmanın bu bölümünde, önceki bölümlerde teorisine değinilen sığ derinlikteki tünencilik faaliyetlerinin farklılıkları ile faylı ve zayıf zonlarda tünel açma mekanizmaları, şehir içi sığ tünencilik parametreleri İzmir metrosu II. aşama projesi Fahrettin Altay – Üçyol hattı ele alınarak incelenmektedir. İzmir Metro II. Aşama inşaatı gerek geçtiği güzergahın karakteristiği gerekse bölge jeolojisi bakımından çalışma konusu ile birebir örtüşen bir durum arz etmektedir.

İzmir'in şehir içi ulaşımını çağdaş olanaklardan yararlanarak çözüme ulaştırmayı amaçlayan İzmir Metro sistemi II. aşama projesi, Fahrettin Altay–Üçyol arasındaki 5,46 km'lik güzergahı kapsamaktadır. İzmir'de 2000 yılında kullanıma açılan ve İzmir Hafif Raylı Sisteminin birinci aşamasını oluşturan 11,5 km'lik Bornova-Üçyol hattının, batı yönünde yaklaşık 5,6 km uzunlukta olan II. aşamasının hayata geçirilmesi ile, kullanılabilir hattın 17 km çıkartılması öngörülmektedir.

Bu iki hatta ilave olarak projelendirilme aşamasında olan yaklaşık 21,5 km. lik III. IV. ve V. aşama projeleri ile, iyileştirme çalışmaları devam eden 80 km. lik TCDD' ye ait banliyo sisteminin İzmir Hafif Raylı Sistem hattına etkenmesi sonucunda, toplamda 118 km. lik bir sistem ağı hedeflenmektedir.

#### **4.1 İzmir İli Genel Jeolojisi**

İzmir kenti ve yakın çevresi levha tektoniği kuramına göre “İzmir-Ankara Zonu” olarak tanımlanan bölgesel tektonik kuşak içinde yer alır. Batı Anadolu'nun bölgesel tektonik kuşakları incelendiğinde; doğuda metamorfik kayaçlardan oluşan Menderes Masifi, ortada İzmir-Ankara zonu ve en batıda ise Karaburun kuşağı gözlenir.

Menderes masifi, tavanda çok kalın bir mikaşist biriminden ve üzerindeki platform tipi karbonatların metamorfizması ile oluşmuş bir mermer istifinden



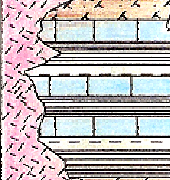
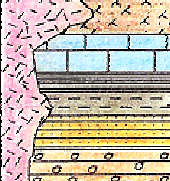
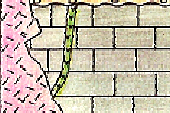
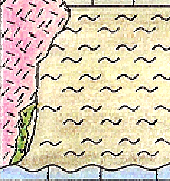
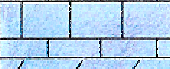
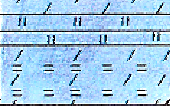
kuruludur. Üst Kretase sırasında açılmış olan İzmir-Ankara zonunda bloklu iç yapı sergileyen Bornova karmaşığı bulunmaktadır. Bu karmaşık birim fliş bir matris ile değişik boyutlu kireçtaşı bloklarından oluşur.

Bölgesel temeli oluşturan bu birimler neojen yaşlı tortul ve volkanik kayalar tarafından uyumsuz olarak örtülmüştür. Çakıltaşı, kumtaşı, kiltası, marn ve killi kireçtaşı ile temsil edilen neojen karasal çökeller Altındağ formasyonunu oluşturur.

Levha içi volkanizma ürünü miyosen yaşlı bazalt-andezit-dasit-riyolit, bunların piroklastikleri olan tuf ve aglomera birimleri Yamanlar volkanitleri olarak tanımlanmaktadır. Neojen karasal çökeller ve volkanik birimler eş yaşlı olmaları nedeniyle yanal düşey geçişlidir.

Kil, silt, kum ve çakılın değişik kompozisyonlarından kurulu kuvarterner yaşlı alüvyon diğer kayaları uyumsuz örter. Orta miyosenden itibaren bölgede geçerli olmaya başlayan neoteknik koşullar Batı Anadolu'nun tipik graben-horst yapılarının gelişmesine yol açmıştır. İzmir metrosu ikinci aşama güzergahı da bu mekanizma ile oluşmuş bir grabenin güney yükseltisi içinde yer almaktadır. Bölgenin basitleştirilmiş stratigrafisi şekil 4.1' de gösterilmektedir.



JEOLOJİK ZAMAN BİRİMLERİ		LİTOLOJİ VE AÇIKLAMALAR	
SENOZOİK	Kuaterner		Alüvyon
	PLİYOSEN		Kil, Marn, Çakıl, Gevşek. Konglomera ardalanması
			Marn, Kil, Kireçtaşı, Tüf ardalanması
	MİYOSEN		Konglomera, Kumtaşı, Marn, Kil, Kireçtaşı, Tüf ardalanması
			Gri renkli Kompakt Kireçtaşları
(Mesozoik)	KRETASE		Fliş: (Kumtaşı, şeyl arkoz, kristalin kireçtaşı, radyolarit)
PALEOZOİK			Mermerler
			Gnays, mikaşist, kuvarsit ardalanması

Şekil 4.1 Bölgenin stratigrafisi –ölçeksiz (İzmir Hafif Raylı Sistemi II. aşama II. kısım ön jeoteknik değerlendirme raporundan düzenlenerek)

#### 4.1.1 İzmir İli ve Civarı Bölgesel Tektonizma ve Diri Fay Potansiyeli

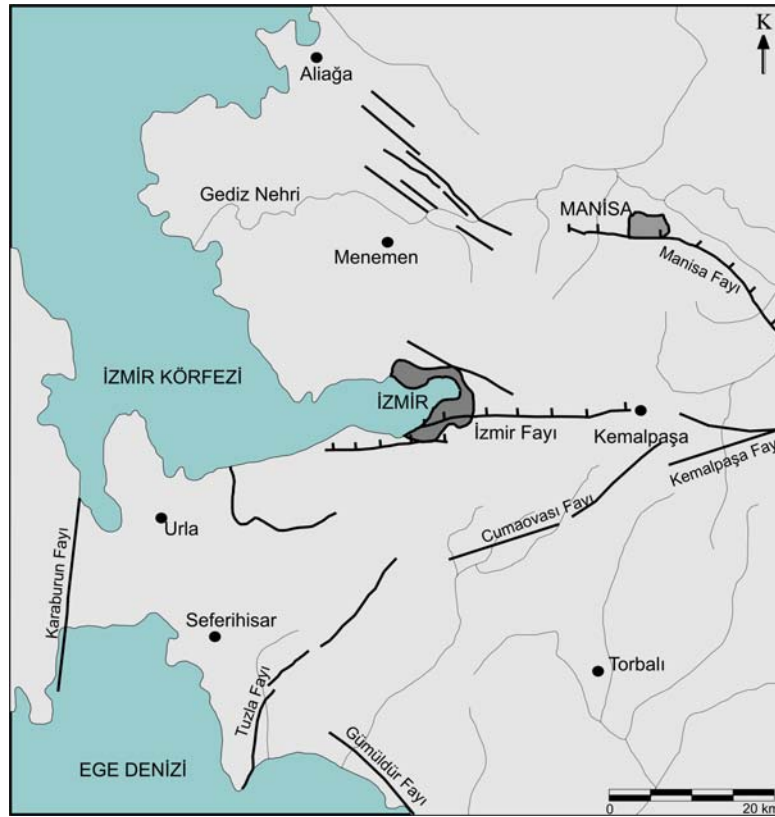
Dünya üzerindeki jeolojik konumu nedeniyle ülkemizde özellikle de Ege ve Marmara bölgelerinde çok sayıda diri fay bulunmaktadır. Gerek bölgesel fayların belirlenmesi gerekse bunların oluşturacağı zararlardan korunmak, depremsellik riski ve bölge planlaması açısından 1970 li yıllardan bu yana veriler üretilmektedir. Bu verilerin toplanmasında Maden Tetkik ve Arama (MTA) kurumu başı çekmektedir.

MTA tarafından yapılan çalışmalar kapsamında 1987 yılında ülke genelindeki diri faylara ilişkin kapsamlı bir rapor yayımlanmış (Şaroğlu ve diğerleri, 1987) ve sonrasında bu raporun eki olan Türkiye diri fay haritası kullanımına sunulmuştur (Şaroğlu ve diğer.,1992). Bu haritada İzmir çevresinde bazı diri faylar haritalanmış ve özellikleri hakkında bilgi verilmiştir. Ancak, izleyen yıllarda İzmir ve yakın çevresinde yapılan çalışmalarda bölgede bilinenden daha fazla fay ve deprem kaynağı olduğu yönünde bulgular toplanmıştır (Barka ve diğer.,1996 ; Emre ve Barka, 2000). Kentte olası deprem zararlarının azaltılması yönünde yapılacak planlama ve uygulamalara kaynak oluşturmak üzere İzmir Büyükşehir Belediyesi tarafından Boğaziçi Üniversitesi'ne "İzmir Deprem Senaryosu ve Deprem Master Planı" (İDSDMP) hazırlattırılmıştır. Bu çalışmada bölgedeki deprem kaynak zonları olan diri faylardan bazıları genel özellikleriyle tanımlanmış olup, bunun yanı sıra fayların detay jeolojik ve jeomorfolojik özellikleri tam olarak ortaya konulabilmiş değildir. MTA Genel Müdürlüğü'nce bölgenin diri fayları hakkındaki eksikliklerin giderilmesi ve Türkiye diri fay haritası'nın yenilenmesi ve veri tabanı oluşturmak amacıyla bir program başlatılmış ve bu kapsamda İzmir çevresinin güncel tektoniği ve diri fayları ortaya konulmaya çalışılmıştır (MTA, 2005).

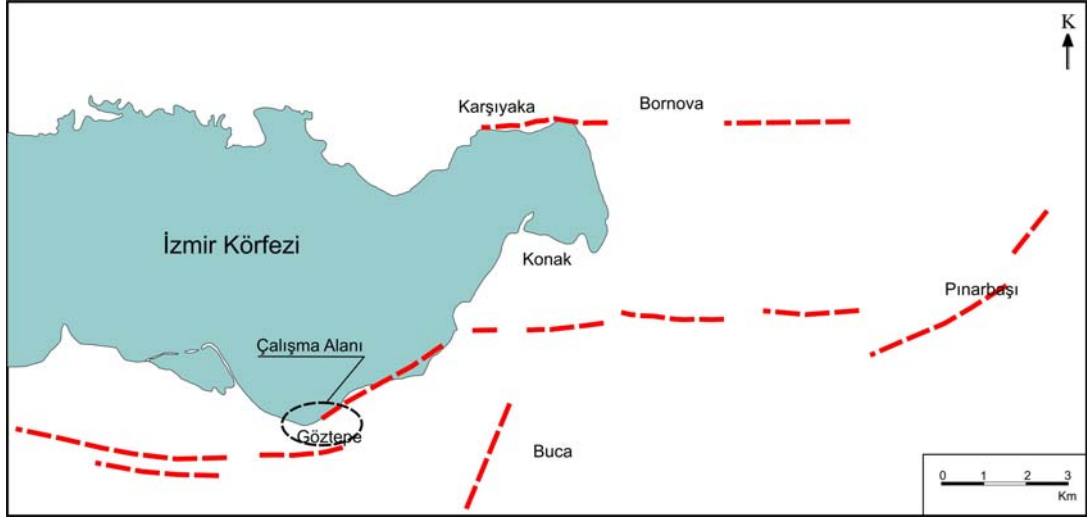
İzmir kenti merkez olmak üzere yaklaşık 50 km yarıçapındaki bir alanda büyük deprem üretme potansiyeli olan diri faylar araştırılmıştır, İzmir ve yakın çevresinde on üç adet diri fay haritalanmıştır. Bölgedeki aktif tektonik yapılar doğrultu atımlı ve normal faylardan oluşmaktadır. Diri faylar D-B, KD-GB, K-G ve KB-GD doğrultusunda uzanırlar. Normal faylar D-B genel gidişlidir. Doğrultu atımlı faylardan çoğunluğu sağ yönlü olup K-G, KD-GB ve KB-GD genel doğrultuludur. İzmir'in doğusundaki faylar Gediz graben sistemi içerisinde yer alırlar. Bu grabenin batısında İzmir fayı hariç, haritalanan fayların tamamına yakını doğrultu atımlı veya doğrultu atımı baskın oblik faylardır. Fayların niteliği ve bölgesel dağılımı, Gediz grabeninin batısında doğrultu atımlı deformasyonun egemen olduğunu gösterir. Doğrultu atımlı faylardan bir kısmı Gediz grabeninin batı ucundaki sönmelenmeyi sağlayan transfer yapılarıdır.

Tektonizma çerçevesinde gelişen bölgesel gerilmeler etkisi altında ortaya çıkan inceleme alanındaki fay, her iki tarafı birbirine göre hareket etmiş düzlemsel makro kırık hatları ve ezilmiş-parçalanmış kayaç malzemesi ile dolgulu değişik kalınlıkta zonlar şeklinde arazide görülmektedir. Genç oluşlarına ve bölgesel tektonik aktiviteye bağlı olarak bir deprem sırasında yine hareket edebilecekleri olasılığının yanısıra, fay zonundaki dolgu malzemesinin niteliğinden kaynaklanabilecek stabilite sorunları, tünel güzergahını kesen olası fay zonlarına zorunlu olarak dikkat edilmesini ve kontrollü ilerlemeyi gerektirmektedir.

İzmir körfezinin doğusunda, körfezi morfolojik olarak güneyden sınırlayan D-B yönlü fay İzmir Fayı olarak adlandırılmıştır (Emre ve Barka, 2000). Fay iki parçadan oluşur (Şekil 4.2). Gediz grabeninin batı ucundaki Kemalpaşa Fayı kuzey kolunun devamı şeklindedir Kentsel yerleşme yoğunluğu nedeniyle fayın niteliğine ve aktivitesine yorumlanabilecek veriler sınırlıdır. Bununla beraber genel jeomorfolojik karakteri normal faylara özgüdür (MTA, 2005).



Şekil 4.2 Ege Bölgesi etkin fay haritası (İzmir Hafif Raylı Sistemi II. aşama II. kısım ön jeoteknik değerlendirme raporundan düzenlenerek)



Şekil 4.3. Çalışma alanı ve civarı etkin faylar (İzmir Hafif Raylı Sistemi II. aşama II. kısım ön jeoteknik değerlendirme raporundan düzenlenerek)

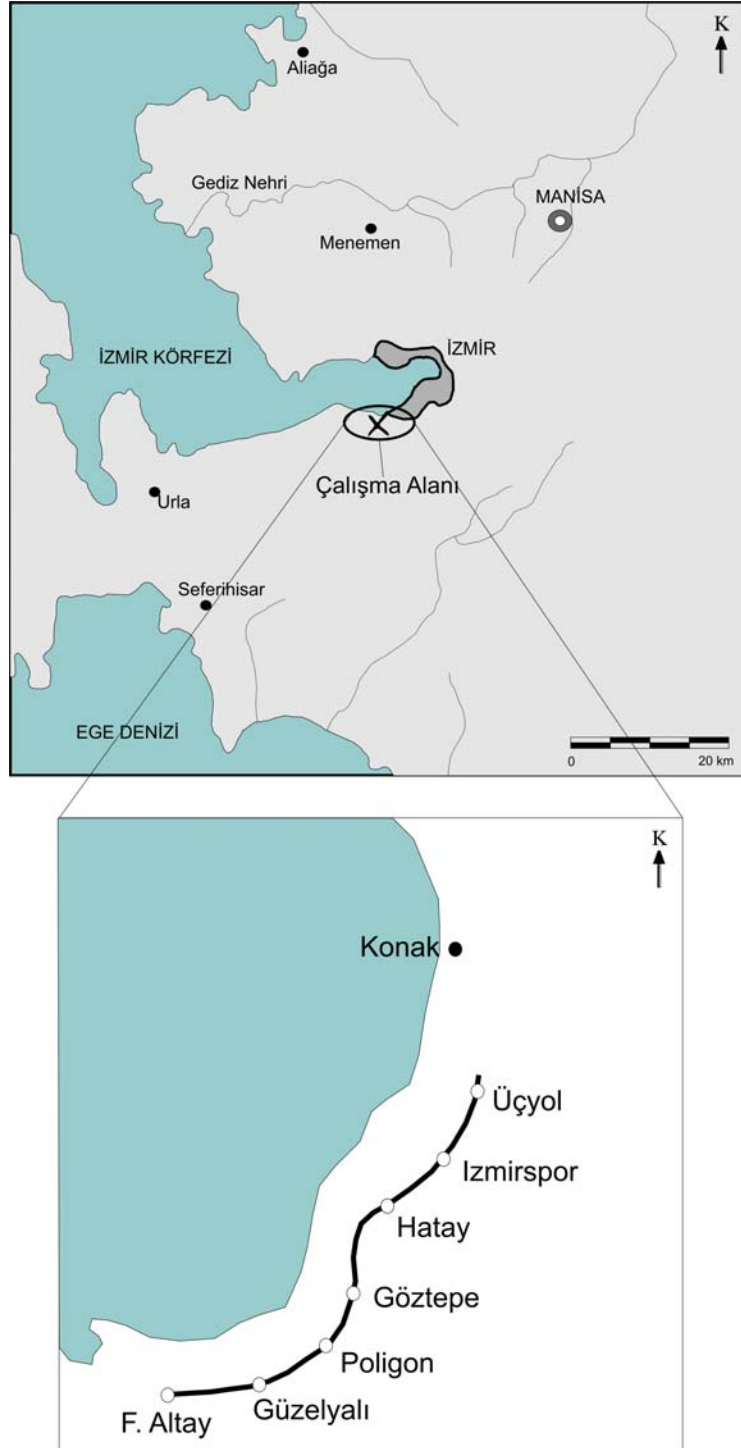


Şekil 4.4. Çalışma alanı ve civarında gözlenen temel kayaları kesen İzmir fayı. (MTA, 2005).

#### 4.1.2 Çalışma Alanının Konumu ve Yakın Yerel Jeolojisi

İzmir Hafif Raylı Sistemi II. aşama proje güzergahı, İzmir'in doğu-batı aksı üzerindeki bağlantısının kurulmasını sağlayacak şekilde, Üçyol'da ki İzmirspor kavşağındaki mevcut kazı shaftından başlayıp, İzmir'in yoğun nüfusa sahip yerleşim

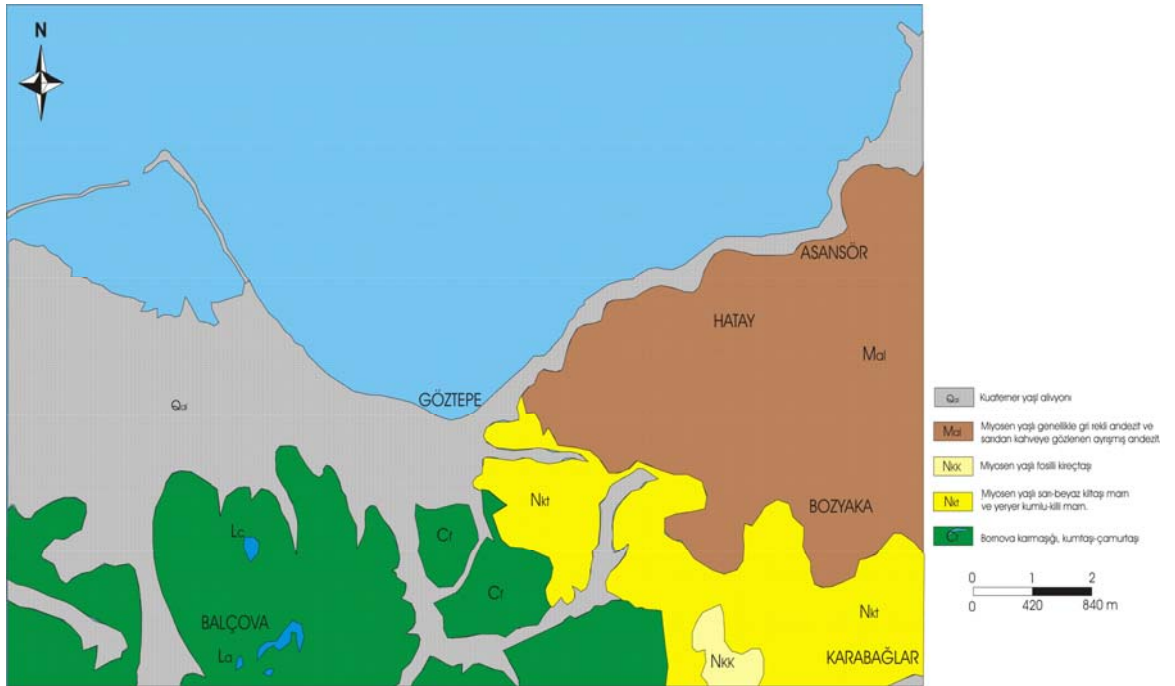
bölgelerinin ana güzergahı olan İnönü Caddesi boyunca Hatay, Göztepe ve Poligon Mahalleri'nin altından geçtikten sonra, kentin batı tarafındaki Fahrettin Altay Meydanında son bulacaktır (Şekil 4.5 ve 4.6).



Şekil 4.5 Çalışma alanı yerbulduru haritası



Şekil 4.6 İzmir Metrosu II. aşama güzargahı uydu görüntüsü



Şekil 4.7 İzmir ili çalışma alanı yakını genel jeolojisi

Tez çalışmanın temelini oluşturan jeolojik birimler, Yamanlar Volkanitleri ve alüvyon, kısmen de Altındağ Formasyonu ve Bornova Flişinden kuruludur. Bu

birimler yüzeyde yapay dolgu ile örtülüdür. Proje güzergahının sonlarına yakın bölümleri, geniş alanlar kaplayan kuvaterner yaşlı alüvyon, çakıllı killi kum, çakıllı kumlu kil ve kumlu killi çakıl seviyelerinden oluşur. Çakıllı kumlu kil; yeşilimsi kahverenkli-koyu gri, orta katı-katı, orta yüksek plastisiteli olup, yer yer organik kökenli seviyeler içerir. Çakıllı killi kum; yeşilimsi kahverenkli, ince-iri taneli, çok az çakıllı, ortasıkı-sıkı özelliktedir. Kumlu killi çakıl; kil ve kum birimleri ile birbirine girmiş olarak gözlenen çakıl birimi kahverenkli, killi, kumlu, sıkı-çok sıkıdır.

Güzergahta geniş bir yayılıma sahip miyosen yaşlı Yamanlar Volkanikleri genel olarak andezit; gri renkli, ince-orta taneli, az-orta derecede ayrılmış, orta-sık eklemler, eklemler genellikle açık, pürüzsüz ve kil dolgulu, orta dayanımlı-dayanımlı bir kayadır. Tuf matris içinde boyutları 0.5-30 cm. arasında değişen andezit çakıl ve blokları içeren aglomera; kahverenkli-kırmızı, az-orta derecede ayrılmış, orta-sık eklemler, eklemler genellikle açık, pürüzsüz-düzlemsel ve kil dolgulu, zayıf-orta dayanımlıdır.

Miyosen yaşlı Altındağ Formasyonu kıltaşı, silttaşı, kumtaşı ve konglomera ardalamasından oluşur. Genel olarak alüvyon ve yapay dolgulu ile örtülü bu formasyon, alttaki Bornova flišini olumsuz olarak yüzeyler. Eş yaşlı olmaları nedeniyle Yamanlar Volkanitleri ile düşey-yanal geçişlidir. Altındağ formasyonunu oluşturan birimler orta-çok ayrılmış, orta-sık eklemler ve orta-zayıf dayanımlıdır.

#### **4.1.3 Yeraltı Suyu**

Güzergahının Üçyol-F.Altay aralığını oluşturan birimler özgül niteliklerine bağlı olarak farklı hidrojeolojik özelliklere sahiptir. Güzergahta yer alan zemin birimleri granüler yapılarına, kaya birimleri ise litolojik özellikleriyle içermiş oldukları çatlak sistemlerinin nicelik ve niteliklerine göre yeraltı suyu dolaşımına izin verirler. Alüvyonun kil birimi geçirimsiz kum ve çakıl seviyeleri yeraltı suyu içermektedir.

Yamanlar volkanitlerine ait tuf, ayrışmış andezit ve aglomera birimleri geçirimsiz, az-orta derecede ayrışmış andezit ve aglomeralar ise çatlakları boyunca yeraltı suyu geçişine izin verebilen özelliktedir. Altındağ formasyonunun kumtaşı konglomera seviyeleri yeraltı suyu dolaşımına izin verirken kil taşı geçirimsiz olarak kabul edilir. Bornova flişinin grafit şist ve kıltaşı birimi geçirimsiz, kumtaşı geçirimli-yarı geçirimlidir.

#### **4.1.4 Depremsellik**

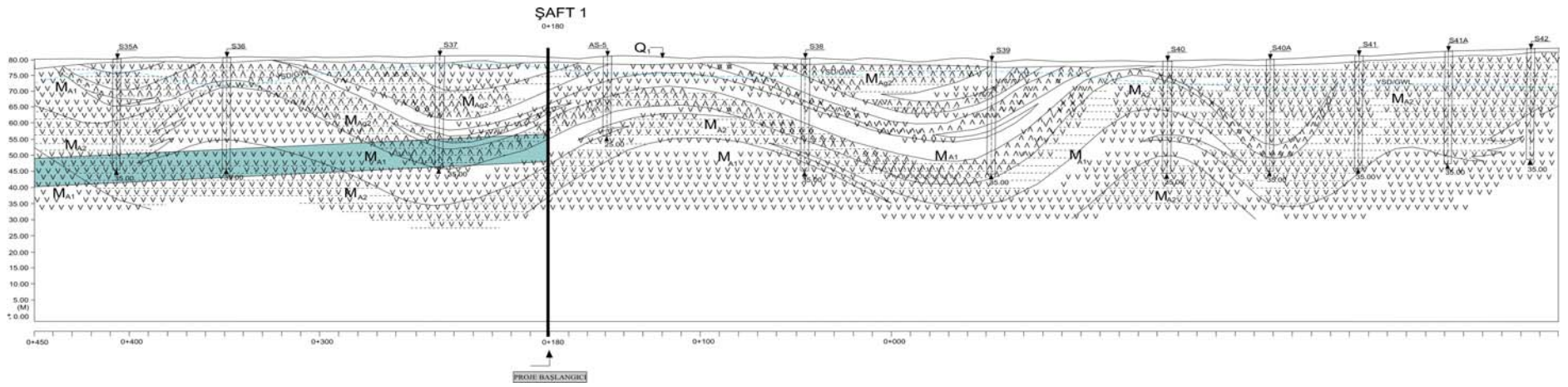
Türkiye deprem bölgeleri haritasına göre İzmir ili birinci derece deprem bölgesi içerisinde kalmaktadır. Eylül 1993 tarihinde yapılan bir çalışmada İzmir'in depremselliği risk analizi bağlamında incelenmiş ve çeşitli riskler hesaplanmıştır. Bu çalışmada belirli risklere karşılık gelen deprem magnitüdüleri hesaplanmış, azalım ilişkileri kullanılarak, belli bir uzaklıkta yüzeydeki ivme ve hızlar bulunmuştur. Bu ivme ve hızlar literatürde yer alan hasar gözlemleriyle karşılaştırılarak hasar olasılığı kestirilmeye çalışılmıştır.

Sonuç olarak; gömülü yapıların özellikle kaya içindeki tünellerin depremden hemen hemen hiç etkilenmediği görüşüne varılmıştır. Ayrıca; 17 Ekim 2005 tarihinde olan ve daha sonrasında da ardı ardına devam eden depremler sonrasında inşa halinde bulunan tünellerde hiçbir çatlak, deformasyon ya da farkı bir olumsuzluk gözlenmemiştir (Onargan vd. 2006). Bununla birlikte yapılacak olan yeraltı yapılarının inşasında mutlaka deprem riskleri göz önünde bulundurulmalıdır.

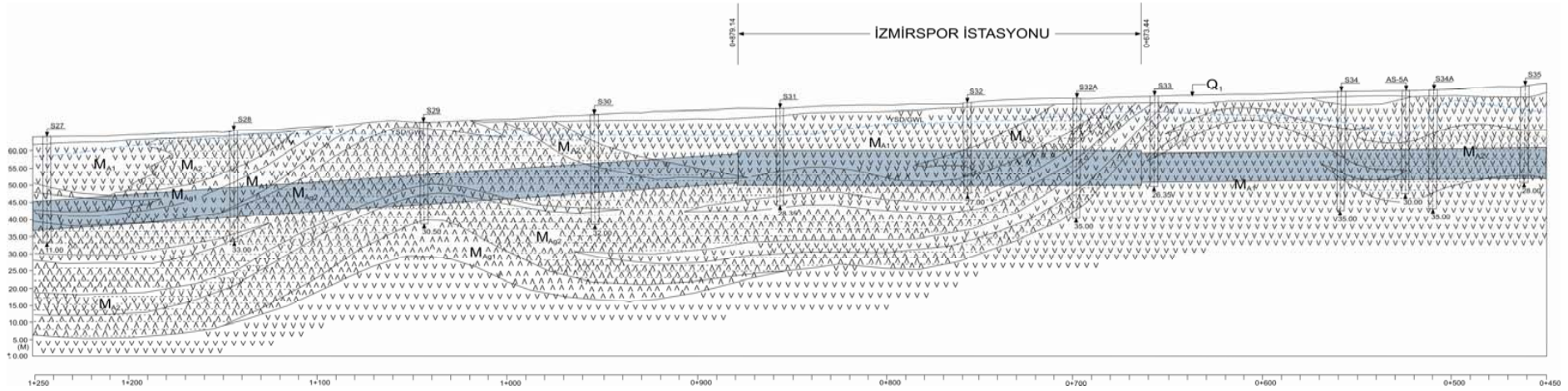
#### **4.2 İzmir Metrosu II. Aşama Proje Güzergahı Üzerinde Karşılaşılan Jeolojik Birimler ve Mühendislik Özellikleri**

İzmir Metrosu II. aşama projesi kapsamında Üçyol-Fahrettin Altay semtleri arasında yaklaşık 5,6 km lik güzergahta geçilen birimler farklılık göstermektedir. Şekil 4.8 ile 4.15 arasında tünel güzergahının boyuna kesitleri, yapılan sondajlar ve arazi çalışmalarının sonuçları detaylı olarak verilmiştir.

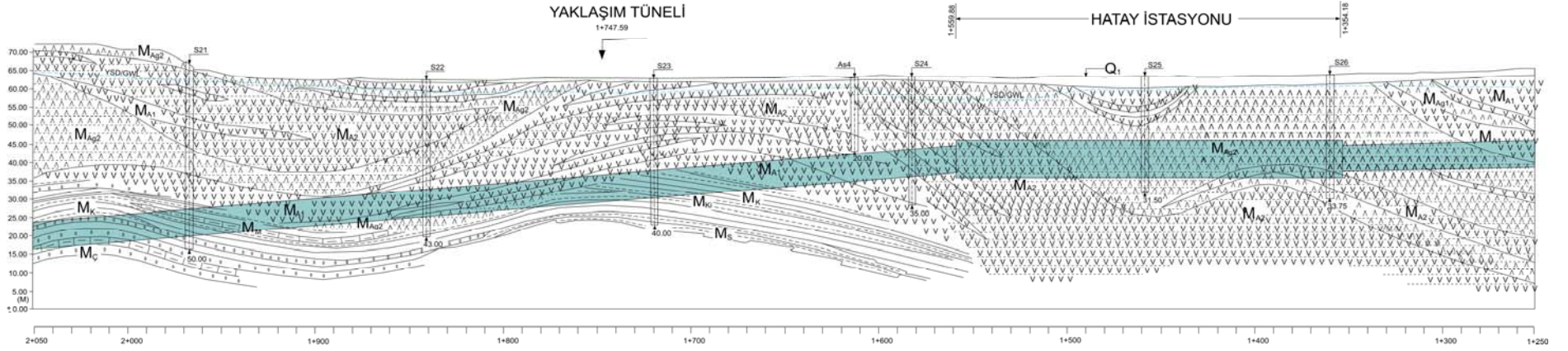




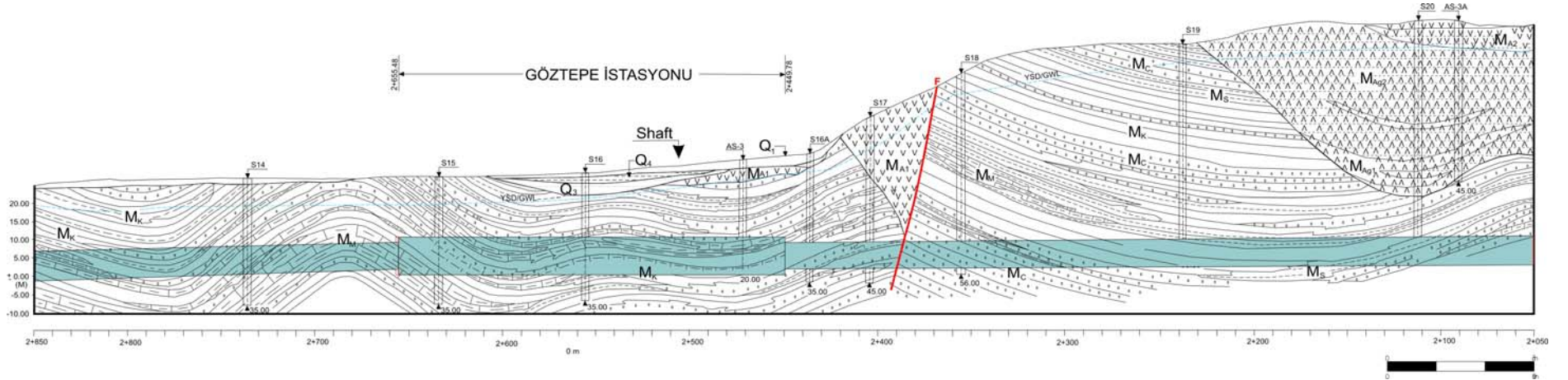
Şekil 4.8 Üçyol İstasyonu ve civarı jeolojisi, mevcut sondaj noktaları ve tünel hattı



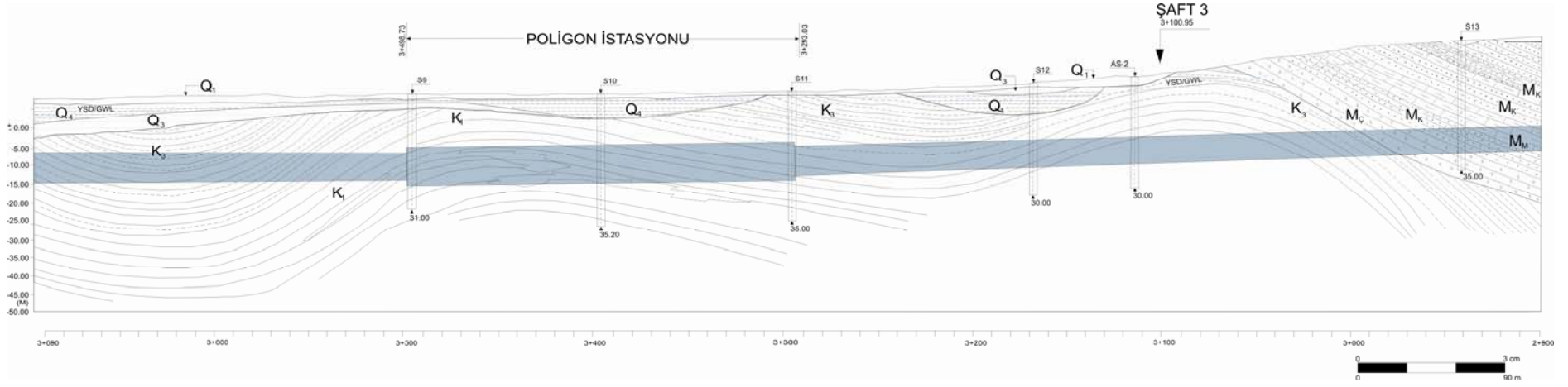
Şekil 4.9 İzmirspor İstasyonu ve civarı jeolojisi, mevcut sondaj noktaları ve tünel hattı



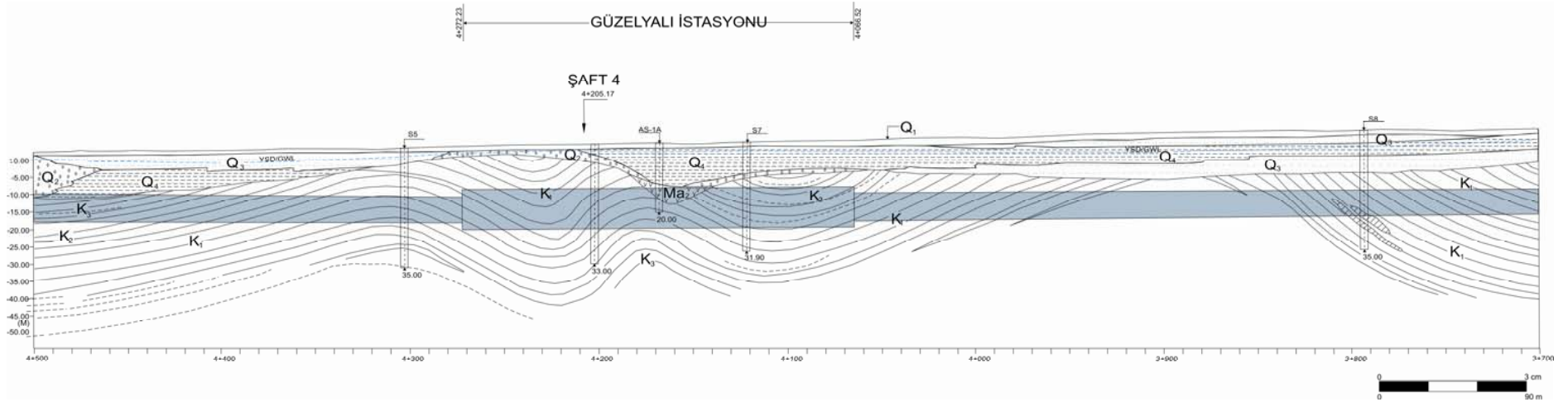
Şekil 4.10 Hatay İstasyonu ve civarı jeolojisi, mevcut sondaj noktaları ve tünel hattı



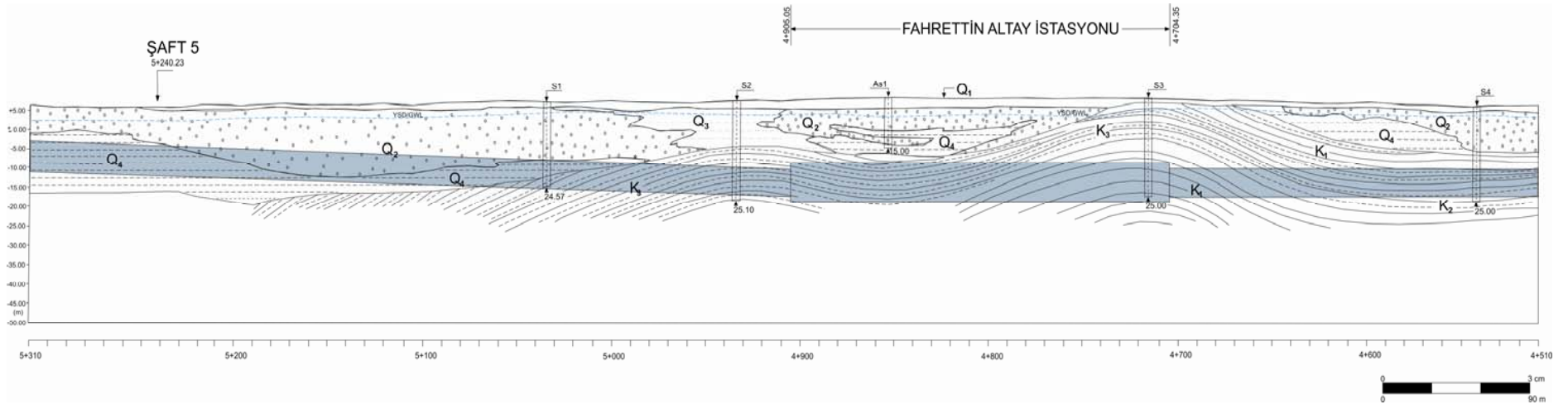
Şekil 4.11 Göztepe İstasyonu ve civarı jeolojisi, mevcut sondaj noktaları ve tünel hattı



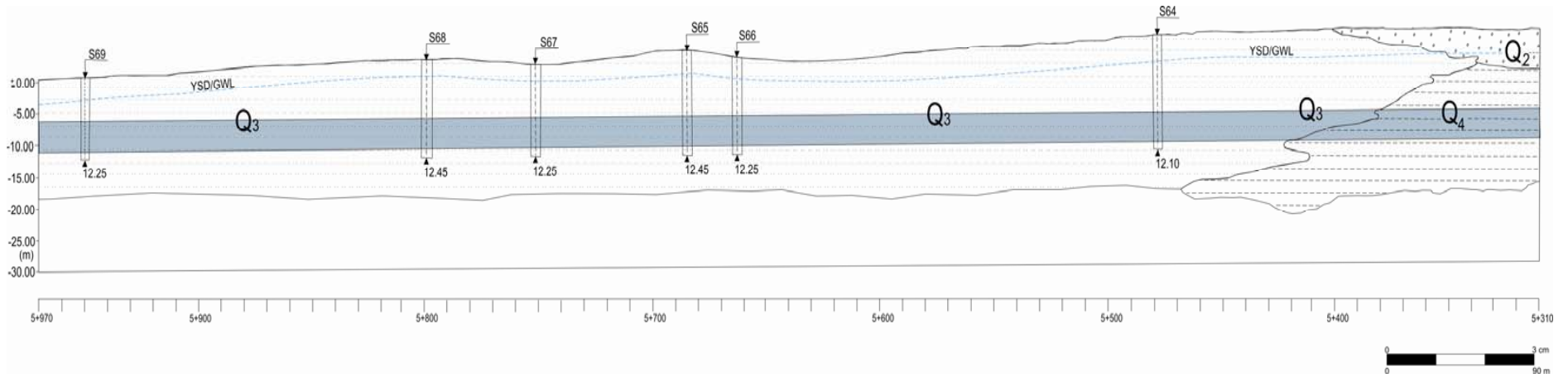
Şekil 4.12 Poligon İstasyonu ve civarı jeolojisi, mevcut sondaj noktaları ve tünel hattı



Şekil 4.13 Güzelyalı İstasyonu ve civarı jeolojisi, mevcut sondaj noktaları ve tünel hattı



Şekil 4.14 Fahrettin Altay İstasyonu ve civarı jeolojisi, mevcut sondaj noktaları ve tünel hattı



Şekil 4.15 Tünel sonu uzatma hattının jeolojisi ve güzargah üzerindeki sondaj noktaları.

Q <sub>1</sub>		Yapay dolgu	M <sub>A1</sub>		Az ayrılmış andezit
Q <sub>2</sub>		Çakıl	M <sub>A2</sub>		Orta-çok ayrılmış andezit
Q <sub>3</sub>		Kum	M <sub>Ag1</sub>		Az ayrılmış aglomera
Q <sub>4</sub>		Kil	M <sub>Ag2</sub>		Orta-çok ayrılmış aglomera
K <sub>1</sub>		Kumtaşı	M <sub>Ç</sub>		Konglomera
K <sub>2</sub>		Silttaşı	M <sub>K</sub>		Kumtaşı
K <sub>3</sub>		Kiltaşı	M <sub>Ki</sub>		Kiltaşı
M <sub>M</sub>		Marn	M <sub>S</sub>		Silttaşı

YSD/GWL : Yeraltı su düzeyi

Şekil 4.16 Kesitlerde kullanılan kısaltmalar ve anlamları

**Km:0+000–0+673,439:** Yapımı tamamlanmış birinci aşama tünel ile İzmirspor İstasyonu arasında projelendirilen tünel egemen olarak andezit, kısmen de aglomera birimi içerisinde yer almaktadır. Bu bölümde kayalar değişik kaya sınıfı içinde yer alır. Andezit birimi zayıf–orta, aglomera ise zayıf–çok zayıf kaya koşulları sergiler. Tünelin yaklaşık km:0+130–0+300 aralığı aglomera, geri kalan kısmı andezitten oluşur. Buna göre bu birimlerin kazı içindeki oransal dağılımı yaklaşık;

- Aglomera : % 35
- Andezit : % 65

olarak belirlenmiştir. Aglomera geçirimsiz, andezit ise yarı geçirimli özelliklere sahip kayalar olduğundan tünel içine önemli bir su geliri beklenmemektedir.

**Km:0+881,518–1+354,177:** İzmirspor İstasyonu ile Hatay İstasyonunu birbirine bağlayan bu bölümü temsil eden zemin profili Yamanlar Volkanitleri' ne ait andezit ve aglomera birimlerinden oluşur. Bu birimler ortalama kalınlığı 2 m olan yer yer 3,6 m'ye ulaşan yapay dolgu ile örtülüdür. Bu kesimde yapılacak kazı sırasında karşılaşılması olası birimlerin oransal dağılımı şöyledir;

- Yapay dolgu : % 14
- Tümüyle ayrılmış kaya : % 2
- Andezit : % 36
- Aglomera : % 48

Güzergahın bu bölümünde çatlak düzlemleri boyunca gelebilecek yeraltı suyu ve yüzeydeki sızıntı sulardan kaynaklanacak önemli bir yeraltı suyu problemi beklenmemektedir.

**Km:1+559,877–2+449,779:** Güzergahın en uzun tüneli özelliğindeki bu bölümün zemin profilini oluşturan Yamanlar Volkanitleri üyesi aglomera ve andezit ile Altındağ Formasyonuna ait kıltaşı–silttaşı–kumtaşı–konglomera ardalanmasının oransal dağılımı ise aşağıda verilmektedir.

- Andezit : % 8
- Aglomera : % 44
- Kıltaşı, silttaşı, kumtaşı, konglomera ardalanması : % 48

Farklı kaya sınıfında dahil edilen birimlerden andezit iyi, aglomera zayıf ve ardalanmayı oluşturan kayalar zayıf kaya koşulları sergiler. Hidrojeolojik açıdan aglomera, silttaşı ve kıltaşı geçirimsiz, andezit, kumtaşı ve konglomera yarı geçirimli özelliklere sahiptir. Kazı sırasında çatlak sistemleri boyunca tünel içine boşalabilecek yeraltı suyu gelirinin önemli sorunlara yol açması beklenmemektedir. Ancak km:1+940 civarındaki volkanik-tortul kayaç dokanağı ile km:2+345 civarındaki olası fay hattı boyunca su boşalımı risk oluşturmaktadır.

**Km:2+655,483–3+293,017:** Göztepe İstasyonu ile km:2+940 arasındaki bölüm tümüyle Altındağ Formasyonu içerisinde açılacaktır. Kıltaşı–siltaşı–kumtaşı–konglomera ardalması ile temsil edilen bu formasyon yüzeyde kalınlığı 1-2 m arasında değişen yapay dolgu ile örtüldür. Bu bölümde kazı sırasında önemli bir su geliri beklenmemektedir.

Güzergahın km:2+940 ile Poligon İstasyonu arasındaki bölümde temel kayayı temsil eden Bornova Filişi genel olarak alüvyon ile örtüldür. Alüvyon çakıllı kumlu kil ve çakıllı killi kumdan oluşur. Ana kaya Bornova Filişi ise kumtaşı–kıltaşı–grafit şist ardalması ile temsil edilir. Bu birimler ortalama 1,5 m kalınlık sergileyen yapay dolgu ile örtüldür. Kazı sırasında karşılanması olası birimlerin oransal dağılımı şöyledir;

- Yapay dolgu : % 12
- Killi kumlu çakıl : % 1
- Çakıllı killi kum : % 8
- Çakıllı kumlu kil : % 13
- Bornova Filişi : % 66

**Km:3+498,726–4+066,527 ve Km:4+272,227-4+708,197:** Poligon İstasyonu ile Güzelyalı İstasyonu'nu ve Güzelyalı İstasyonu ile Fahrettin Altay İstasyonu'nu birbirine bağlayan tüneller alüvyal çökeller ve Bornova Filişinden oluşur. Alüvyon çakıllı kumlu kil, çakıllı killi kum ve killi kumlu çakıl, Bornova Filişi ise kumtaşı, kıltaşı ve grafit şist birimleri ile temsil edilir. Genel olarak alüvyon tarafından örtülü temel kayası özelliğindeki Bornova Filişi fazla engebeli olmayan bir yeraltı topografyasına sahiptir. Alüvyon ve Bornova Filişi yüzeyde kalınlığı 1-1,5 m arasında değişen yapay dolgu ile örtüldür. Kazıda karşılanması olası birimlerin oransal dağılımı şöyledir;

- Yapay dolgu : % 10
- Killi kumlu çakıl : % 3
- Çakıllı kumlu kil : % 40

- Çakıllı killi kum : % 18
- Bornova Filişi : % 29

Görüleceği gibi kazının yaklaşık %61'i alüvyal çökellerden oluşmaktadır. Çakıl ve kum ağırlıklı seviyeler akifer özelliği gösterirken çakıllı kumlu kilin permeabilitesi görece olarak daha düşüktür. Bu bölümde yeraltı suyu seviyesi kazı kotunun üzerinde kalmaktadır. Tabanda geçirimsiz Bornova Filişi ile sınırlı olan akiferin kuzey yönünde beslenme alanı çok geniştir. Buradaki alüvyal çökeller genelde dökülen ve sıkışan zemin özellikleri göstermektedir.

**Km:4+904,976–5+639,484:** Proje sonu ile Fahrettin Altay İstasyonu arasındaki bölüm tümüyle alüvyal çökellerden oluşur. Alüvyon üstte çakıllı killi kum, temel seviyesinde ise çakıllı kumlu kil ile temsil edilir. Alüvyal çökeller 1,5–2,8 m arasında kalınlık sergileyen yapay dolgu ile örtülüdür. Kazıda karşılaşılabilecek birimlerin oransal dağılımları şöyledir;

- Yapay dolgu : % 14
- Çakıllı killi kum : % 60
- Çakıllı kumlu kil : % 26

Sondaj verilerine göre yeraltı suyu seviyesi kazı kotunun üzerindedir. Geniş bir beslenme alanına sahip alüvyon akifer özelliği gösterir ve temelin 8-9 m altında geçirimsiz Bornova Filişi ile sınırlanır.

Yukarıda 5,6 km. lik güzargah üzerinde rastlanan birimlerin özellikleri ve oransal dağılımları verilmektedir. Kilometre bazında yapılan bu incelemenin ardından aşağıda, kazıda karşılaşılabilecek yada karşılaşılabilecek birimler detaylı olarak incelenmiş, birimlere ait mühendislik parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır.



#### 4.2.1 Alüvyon

Güzergahta yaklaşık km:2+300 den itibaren yüzeylenen ve proje sonuna kadar çeşitli aralıklarla geniş bir yayılıma sahip alüvyal çökellerin sondaj ve laboratuvar verilerine dayalı olarak özgül nitelikleri aşağıda özetlenmiştir.

##### 4.2.1.1 Çakıllı Killi Kum

Alüvyal çökeller içinde egemen birim niteliğindeki çakıllı killi kum; yeşilimsi kahverenkli-koyu gri, ince taneli, orta sıkı-sıkı ve kötü derecenlenmelidir. %5-60 oranında içerdiği çakıllar; köşeli- yarı yuvarlak, 0.2-2cm çapında, çoğunlukla andezit ve kuvars kökenlidir. Bu birimin içerdiği ince malzeme oranı ise %5-30 arasında değişir. Çakıllı killi kum ile ilgili zemin parametrelerinin ortalama değişim aralıkları şöyledir:

- Doğal su içeriği (W<sub>n</sub>) : % 8.70-19.67
- Likit limit (LL) : % 0-29.8
- Limit basınç (PI) : 13.6kg/cm<sup>2</sup>

##### 4.2.1.2 Çakıllı Kumlu Kil

Alüvyonun diğer önemli bir üyesi çakıllı kumlu kil; yeşilimsi kahverenkli-koyu gri, orta katı-katı, orta-yüksek plastisitelidir. Bu birim %5-30 oranında çakıl ve silt, %10-25 oranında kum içerir. Çakıllı kumlu kil birimine ait zemin parametrelerinin ortalama değişim aralıkları şunlardır.

- Doğal su içeriği (W<sub>n</sub>) : % 1.83-51.77
- Likit limit (LL) : % 22.9-54.6
- Limit basınç (PI) : 6.50 kg/cm<sup>2</sup>

#### 4.2.1.3 Killi Kumlu Çakıl

Alüvyonun diğer üyeleriyle yanal-düşey geçişli bu birim; açık kahverenkli, sıkı-çok sıkı ve kötü derecelenmelidir. Genellikle %15-20 oranında kum ve %10-15 oranında kil içerir. Bu birime ait zemin parametrelerinin ortalama değişim aralıkları şöyledir.

- Doğal su içeriği (W<sub>n</sub>) : % 10.53-19,45
- Likit limit (LL) : % 0-39.7
- Limit basınç (PI) : 13 kg/cm<sup>2</sup>

#### 4.2.2 Yamanlar Volkanitleri

Güzergahta geniş bir yayılıma sahip volkanitler genel olarak andezit ve aglomeradan kurulu olup yer yer tüf seviyeleri içerir.

##### 4.2.2.1 Andezit

Yamanlar volkanitlerinin diğer üyeleri aglomera ve tüf ile yanal ve düşey geçişler gösteren andezit birimi; gri-pembe renkli, değişik ayrışma dereceli, volkano sedimenter yapısına bağlı olarak akma düzlemlili, soğuma ve tektonik çatlaklıdır. Bu birim ince-iri kristalli, gözenekli, az-orta derecede ayrışmış, orta-sık eklemli, orta dayanımlı-dayanımlıdır.

Andezit içerisinde gözlenen akma düzlemleri dolgusuz veya ortalama 0.1-1.0 cm kil dolgulu, orta-az pürüzlüdür. Soğuma çatlakları ise 0.1-1.0 cm kalınlığında kil dolgulu ve pürüzsüzdür. Tektonik çatlaklar ise pürüzlü yüzeyli ve ortalama 0.2 cm kalınlığında kil dolguludur. Andezitin kazı kotundaki ortalama RQD değerleri %25-72 arasında değişmektedir.

Kaya kütle sınıflamasına göre bu birime ait değerler ; Q = 0.30-2.76 ve RMR = 35-62 arasında bulunmuş olup “zayıf”-“iyi” kaya sınıflarına karşılık gelmektedir.

#### 4.2.2.2 Aglomera

Alt ve üst dokanaklarında andezitle sınırlanan aglomera birimi kendi içinde yersel andezit seviyeleri içerir. Yamanlar volkanitlerinin önemli bir üyesi niteliğindeki aglomeralar; kahverenkli-kırmızı ve değişik ayrışma sergileyen tuf matris içinde boyutları ortalama 0,5-3,0 cm arasında değişen ve yer yer iki metreye ulaşan andezit blok ve çakıl içerir. Bu birim az-orta derecede ayrışmış, orta-sık çatlaklı, çatlaklar genellikle açık, az pürüzlü-düzlemsel, süreksizlik düzlemleri ortalama 0,1-0,5 cm kil dolgulu, zayıf-orta dayanımlıdır.

Farklı aşınma ve ayrışma nedeniyle bu birimde yapılması planlanan kazıların uzun süre atmosferik koşullar ve su etkisi altında bırakılmaması önerilmektedir. Kaya kütle sınıflamasına göre aglomeranın Q sınıflaması puanı 0,04-0,61, RMR puanı ise, 12-32 arasında olup bu değerler “zayıf”-“çok zayıf” kaya sınıflarına karşılık gelmektedir. Ayrıca aglomeranın kazı kotundaki ortalama RQD değerleri %3-46 arasında bulunmuştur.



Şekil 4.17 Yamanlar volkaniti ve volkanitler içindeki kumtaşlarının genel görünümü. (MTA, 2005).

### 4.2.3 Altındağ Formasyonu

Güzergahın önemli bir bölümünü oluşturan Altındağ formasyonu kıltaşı, silttaşı, kumtaşı ve konglomera ardalaması ile temsil edilir.

Kiltaşları; açık yeşilimsi gri, açık sarı, gri ve sarımsı kahverenkli, orta-çok ayrıışmış, orta-sık eklemli ve zayıf dayanımlıdır. Gevşek dolgulu ve suya doygun olduğundan orta plastisitelidir.

Silttaşları; yeşil, sarımsı kahverenkli gri, orta-çok ayrıışmış ve orta-zayıf dayanımlıdır. Çimentosu killi veya karbonatlı olan bu birim iyi pekleşmiş bir yapıya sahiptir. Pürüzsüz yüzeyli süreksizlikler dolgusuz veya kil dolguludur.

Kumtaşı; açık gri-yeşilimsi gri, açık sarı ve sarımsı kahve renkli, çoğunlukla ince elemanlı, sert yapılı, orta-çok ayrıışmış ve orta-zayıf dayanımlıdır. Karbonat çimentolu bu birimdeki çakılların boyları 0,4-4 cm arasında değişmektedir. Genelde dolgusuz ve pürüzlü yüzeye sahip çatlaklarda yer yer 0,5 cm' ye varan kil dolgulara rastlanır.

Konglomera; gri-açık gri, orta derecede ayrıışmış, orta-zayıf dayanımlıdır. Çimentosu killi, siltli, kumlu ve karbonatlı olan konglomera birimindeki çakılların çapları 0.5-5cm arasında değişir. Süreksizlik düzlemleri genel olarak dolgusuzdur.

Altındağ formasyonunu oluşturan birimlerin kazı kotundaki ortalama RQD değerleri %12-47 arasında değişmektedir. Kaya kütle sınıflamasına göre ardalamanın Q değeri 0,12-0,70, ve RMR değeri 22-35 arasındaki "zayıf" kaya sınıfına karşılık gelmektedir.



Şekil 4.18 Altındağ Formasyonu'nun temel kazı alanında görünümü (MTA, 2005).

#### 4.2.4 Bornova Karmaşığı

Güzergahın yaklaşık 2 km. lik bir kısmında izlenen ve genel olarak alüvyal çökellerle örtülü Bornova karmaşığı; kiltası, kumtaşı ve grafit şistten oluşmaktadır.

Kumtaşları; açık gri-sarımsı kahve renkli, ince taneli, yerel budinajlı ve merceksi yapılı, az-orta ayrışmalı ve orta dayanımlıdır. 5-10cm arasında katmanlanma oluşturan bu birimin süreksizlikleri çoğunlukla pürüzlü yüzeyli ve dolgusuzdur. Yer yer izlenen kil-kalsit-kuvars dolgularının kalınlığı 0,1-7cm arasındadır.

Kiltaları; kahve renkli-gri, az-orta derecede ayrışmış, orta-zayıf dayanımlı, ortasık çatlaklı, eklemler genellikle açık ve pürüzsüzdür.

Grafit şist; koyu gri-siyah, ince-orta taneli, az-orta derecede ayrışmış, yer yer kuvars çakıllı, orta-zayıf dayanımlıdır.



Şekil 4.19 Bornova Karmaşığı'nın yüzeylenen genel görünümü. (MTA, 2005).

Bornova flišine ait birimlerin kazı kotundaki RQD değerleri %0-39 arasında değişmektedir. Kaya kütle sınıflamasına göre; Q değeri 0,10-0,38 ,RMR puanı da 19-25 arasında değişkenlik gösteren bu birim, genel olarak “zayıf” - “çok zayıf” kaya sınıfına dahil edilebilir.

### **4.3 Güzargah Üzerinde Planlanan İstasyon Yapılarının Yakın Jeolojileri ve Özellikleri**

İzmir Metrosu delme tünelleri, ilerleyen bölümlerde detaylı olarak anlatılacak olan dört farklı tünel tipini içermektedir. İstasyon tünelleri, toplam kazı yüzeyinin fazlalığı bakımından en büyük ölçekli tünel tipidir. Bu nedenle aşağıda güzergahtaki istasyonlar baz alınarak hattın tamamını içeren değerlendirmeler yapılmıştır.

#### **4.3.1 İzmirspor İstasyonu**

Güzergahın Km 0+673,44 – 0+879,14 aralığında projelendirilen İzmirspor istasyonundaki zemin profili egemen olarak andezit ve kısmen de aglomeraden oluşmaktadır. Bu birimler yüzeyde 1,0-1,60 metre arasında kalınlık sergileyen yapay

dolgu ile örtülmüştür. Kazı derinliğinin 15.5-16.5 metre arasında değiştiği istasyon alanında kazıda karşılaşılabilecek olası birimlerin dağılımı yaklaşık olarak ;

- Yapay dolgu : % 9
- Aglomera : % 25
- Andezit : % 66

olarak belirlenmiştir. İstasyon temelleri andezit birimine otururken kazı şevleri aglomera ve andezitten oluşmaktadır. Yeraltı suyu seviyesi 4.10-8.50 metre arasında değişmektedir. Ortalama RQD değerleri %27-46 arasındadır. Zemin koşulları ve yapılaşma dikkate alınarak dik olarak açılacak kazı şevlerinin beton kiriş ve ankrajla desteklenmesi gerekmektedir.

#### **4.3.2 Hatay İstasyonu**

Güzergahın Km 1+354,18 – 1+559,88 aralığını kapsayan Hatay istasyonunda kazı derinliği ortalama 15 metre civarındadır. Kazıda karşılaşılabilecek olası birimlerin dağılımı şöyledir ;

- Yapay dolgu : % 29
- Tümüyle ayrılmış kaya : % 11
- Andezit : % 5
- Aglomera : % 55

Kazı şevlerinin heterojen bir yapı sergilediği bu kesimde en üstte kalınlığı 3.70 metreye ulaşan yapay dolgu ve ortalama 2.0 metre kalınlığında tümüyle ayrılmış kaya birimi bulunmaktadır. İki birimin kazı içindeki oranı toplam %40'dır. Yapay dolgu ile formasyon arasında izlenen suyun sızıntı su olduğu tahmin edilmektedir. İstasyon temelleri aglomeraya oturacaktır. Bu birime ait RQD değeri %46'dır.

Düşey olarak açılacak kazı şevleri, beton kiriş ve ankrajlarla desteklenmelidir. Ancak üst kottaki zemin birimlerinden oluşacak dökülmelerin önlenmesi için söz

konusu seviyelerin Berlin Duvarı ile desteklenmesi güvenli kazı ortamı için gereklidir.

#### **4.3.3 Göztepe İstasyonu**

Güzergahın Km 2+449,78 – 2+655,48 aralığında yer alan Göztepe istasyonu egemen olarak Altındağ formasyonu ve kısmen de alüvyal birimler içinde açılacaktır. Bu birimler, yüzeyde kalınlığı ortalama 1 metreye varan yapay dolgu ile örtülüdür. Kazı derinliğinin ortalama 15 metre olduğu istasyon alanında kazı sırasında karşılaşılabilecek birimlerin oransal dağılımı aşağıda belirtildiği gibidir.

- Yapay dolgu : % 3
- Alüvyon (çakıllı kumlu kil, çakıllı killi kum) : % 16
- Altındağ formasyonu : % 81

Sondaj verilerine göre yeraltı suyu seviyesi alüvyon dokanağının altındadır. Kiltası-konglomera ardalaması ise yarı geçirimli özellikte olduğundan kazı sırasında sadece çatlak düzlemleri boyunca su belirlenir. Kiltası-konglomera ardalamasının kazı kotundaki ortalama RQD değeri %60 olup temel bu birime oturacaktır. Düşey olarak açılacak kazı şevleri genel olarak beton kiriş ve ankrajdan oluşan bir sistemle desteklenecektir. Ancak üst kotlarda izlenen alüvyal birimler ve yapay dolgudan oluşabilecek yersel dökülmeleri önlemek için bu seviyeler yine Berlin Duvarı ile desteklenmelidir.

#### **4.3.4 Poligon İstasyonu**

Güzergahın Km 3+293,03 – 3+498,73 aralığında yer alan Poligon istasyonu egemen olarak alüvyal birimler, kısmen olarak ta Bornova flišinden oluşmaktadır. Bu birimler yüzeyde 1.5 metre kalınlığında yapay dolgu ile örtülüdür. Kazı derinliği 15.0 – 16.0 metre arasında değişmektedir. Kazıda karşılaşılabilecek birimlerin oransal dağılımı şöyledir ;



- Yapay dolgu : % 10
- Alüvyon : % 51
- Bornova flişi (kiltaşı, kumtaşı, grafit şist) : % 39

Hidrojeolojik verilere göre çakıllı killi kum birimi akifer özelliğine sahiptir ve kazı sırasında önemli sayılabilecek bir su geliri beklenmektedir. Kazının kuru bir ortamda yapılabilmesi için kazı çevresinde geçirimsiz perde duvar yapımı gerekli görülmektedir. Bu bağlamda kesişen kazık veya diyafram duvar uygulaması ile geçirimsizlik sağlanabilir. Söz konusu yapıların temelleri alttaki ana kayaya girecek şekilde projelendirilmesi daha uygun olacaktır.

#### ***4.3.5 Güzelyalı İstasyonu Jeolojik Yapısı***

Güzergahın Km 4+066,52 – 4+272,23 aralığında projelendirilen dolgu kalınlığının fazla olduğu istasyon kesitinde çakıl ve kil, dolgunun temel bileşenleridir. Bunun yanı sıra egemen olan formasyon kumtaşı ve kilttaşları ile bunların ardalanmasından oluşan birimdir. Güzelyalı istasyonunda bunları ilaveten orta-çok ayrılmış andezit sokulumlarına da sondajlardan elde edilen bilgiler doğrultusunda rastlamak olası bir durumdur.

#### ***4.3.6 Fahrettin Altay İstasyonu***

Güzergahın üzerindeki son istasyon niteliğindeki Fahrettin Altay istasyonu Km 4+704,35– 4+905,05 bölümünde yer almaktadır. Zeminin profili alüvyona ait çakıllı killi kum ve çakıllı kumlu kil ile Bornova flişine ait kilttaş ve kumtaşı ardalanmasından oluşmaktadır. Bu birimleri yüzeyleyen yapay dolgunun kalınlığı 1.5 – 2.0 metre arasındadır. Kazı derinliği ortalama 15 metre olup, kazıda karşılaşılması olası birimleri oransal dağılımı aşağıda belirtilmektedir.

- Yapay dolgu : % 12
- Alüvyon (çakıllı killi kum, çakıllı kumlu kil) : % 55
- Bornova flişi (kilttaş, kumtaşı ardalanması) : % 33

Kazının önemli bir bölümünün akifer niteliği taşıyan alüvyonda yapılacak olması, yer altı suyu problemini beraberinde getirmektedir. Buna karşılık kazının yaklaşık %33'ü yarı geçirimli kumtaşı-kiltaşı ardalamasında gerçekleştirilecektir. Bu bağlamda kazı çevresinde diyafram perde duvar inşa edilerek kazı çukurunun geçirimsizliğinin sağlanması olası görülmektedir. Diyafram duvarın, alüvyal birimlerinden sonra ana kayaya sabitlenmesi, sistemin başarısı için gereklidir. Öte yandan, istasyon temelleri çakıllı kumlu kil ve kiltaşı-kumtaşı ardalamasına oturacaktır. Bu nedenle oluşabilecek farklı oturma problemleri hesaplamalarda dikkate alınmalıdır.

#### **4.4 Metro Güzergahında Yapılan Saha ve Laboratuvar Çalışmaları**

İzmir Metrosu II. aşama projesi kapsamında güzergah tesbiti ve güzergahtaki birimlerin tanınabilmesi amacı ile proje başlangıcında yaklaşık 90 adet sondaj çalışması yapılmıştır. Bunlara ilaveten, gerekli görülen lokasyonlarda ek sondajlar yapılmış ve bu sondajlardan elde edilen veriler aşağıda yorumlanmaya çalışılmıştır.

Yapılan sondajlar BW tij kullanarak örselenmemiş örnek ve karot alabilen Crealius D-750, Crealius D-500, Sprago 40C tipli sondaj makinası ile yapılmıştır. Zeminlerin delinmesinde rotary sondaj yöntemi kullanılmış olup, bu sistemde açılan deliklerde standart penetrasyon değerinin etkilenmemesi amacıyla şahmerdanın hareket alanı içerisinde AW tij kullanılmıştır.

##### **4.4.1 Saha Çalışmaları ve Uygulanan Sondaj Yöntemi**

Sondajların delinmesi için seçilen rotary sondaj yöntemi, yüksek hızla dönen matkabın sert zemin veya kayayı kesme, yontma ve öğütme yoluyla ufalaması ve kırıntıların, pompalanan su veya sondaj çamuru ile delik dibinden, sondaj boruları boyunca yukarı çıkarılıp incelenmesi veya karot ve numune alınması ilkesine dayanır. Tünel inşası kapsamında açılan sondajlarda rotary sistem ile kayada ve zeminde sondajlar açılmıştır. Karotlu sondajda örnek çapı 62 mm olup sondajlar sırasında triplex tipi çamur pompaları kullanılmıştır. Karotiyerler, tijler, muhafaza boruları standartlar ölçüsündedir. Projede karot veriminin yüksek olması amacı ile

çift tüplü karotiyerler kullanılmıştır. Sondaj kuyusunda yıkıntı ve çökme yapan yerlerde muhafaza borusu ile ilerlenmiştir.

Açılan sondajlardan elde edilen tüm numuneler etiketlenmiş ve etiket üzerine proje adı, sondaj numarası, numune derinliği ve sıra no'su yazılarak muhafaza edilmiştir. Karotlu numuneler ise 1,50 m boyunda 5 sıra karot olacak şekilde sandıklanarak, sandıklar üzerine sondaj yeri, proje adı, manevra derinliği yazılmıştır.



Şekil 4.20 Karotlu sondaj çalışmalarında alınan karotlar

Yapılan zemin sondajlarında sondaj kuyusu çalışmalarında her kuyu için sondaj logu tutulmuştur. Sondaj loglarında proje adı, yeri, sondaj metodu, makine tipi, sondaj numarası, başlangıç ve bitiş tarihi, yeraltı su seviyesi, SPT değerleri, delinen tabaka kotları ve tanımları, günlük ilerleme, yerinde gerçekleştirilen deneylerin derinlikleri, tipleri ve sonuçları, vb. bilgiler bulunmaktadır.

Kayada yapılan sondajlarda da, yukarıda belirtilen bilgilere ek olarak her karot alma işleminin başlangıç ve bitiş kotları (manevralar), çıkarılan karotların RQD ve CR % değeri tespit edilmeye çalışılmıştır.

Ayrıca sondaj kuyularının açılması sırasında su seviye ölçümleri yapılmıştır. Bu amaçla piyeziometre boruları kuyulara yerleştirilmiştir.

Proje kapsamında güzargah üzerinde önceden yapılan sondajlara ek olarak belirsizliklerin yaşandığı bölgelerde ortalama 20 metre derinliğinde 7 adet ilave sondaj yapılmıştır. Yapılan sondajlar yardımıyla çalışma alanından örnekler alınmış ve bu örnekler laboratuvarında incelemelere tabii tutularak geçilecek formasyonlar hakkında daha detaylı bilgiler elde edilmiştir.

#### ***4.4.2 Yapılan Laboratuvar Çalışmaları ve Sonuçları***

Sondaj çalışmaları sonucunda alınan karot örneklerinin doğallıklarının bozulmaması, şekil, su içeriği, vb.. özelliklerini kaybetmemeleri için örneklerin taşınması ve hazırlanması aşamasında dikkat edilmiş, bununla birlikte örneklerle uygulanan tüm deneyler TSE standartları baz alınarak gerçekleştirilmiştir.

##### **Arazi Deneyleri**

Zeminlerde numune alma

Standart Penetrasyon Deneyi (SPT)

Örselenmiş örnekler her 1.5 metrede, ayrıca zemin tipinin her değişiminde alınmıştır. Alanda her bir kuyuda Standart Penetrasyon Testi yapılmıştır. Böylece temel zemininin sıklığı ve sertliği hakkında bilgi edinilmiştir.

Kuyu tabanı, deney öncesi iyice temizlenmiştir. Tij üzerine 15 cm.lik üç bölüm (45 cm) işaretlenmiştir. 63.5 kg (140 pound) ağırlığındaki şahmerdana bağlı sıızal halat, kedi başı etrafında üç döngü ile sarılmıştır. Şahmerdan, topaç başlığından 76.2cm (30 inç) yukarıdan serbest düşmeye bırakılarak SPT tüpü çakılmaya başlanmıştır. Her 15 cm.lik parçaya ait darbe sayıları ayrı ayrı kaydedilmiştir. Ancak her bölümdeki darbe sayıları 50 vuruşun üstüne çıktığında bu Reflu kabul edilerek çakma işlemi durdurulmuştur. Ayrıca elde edilen örnekler hava almayan litrelik kavanozlarda ağız kısımları parafinlenerek laboratuvara getirilmiştir.

#### 4.4.2.1 Zemin Deneyleri

Sondajlarda karşılaşılan CL tipi zemin özelliği gösteren formasyonların zemin sınıflarına göre yoğunluk, içsel parametreleri ve uygulanan test sonuçları çizelgeler halinde aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

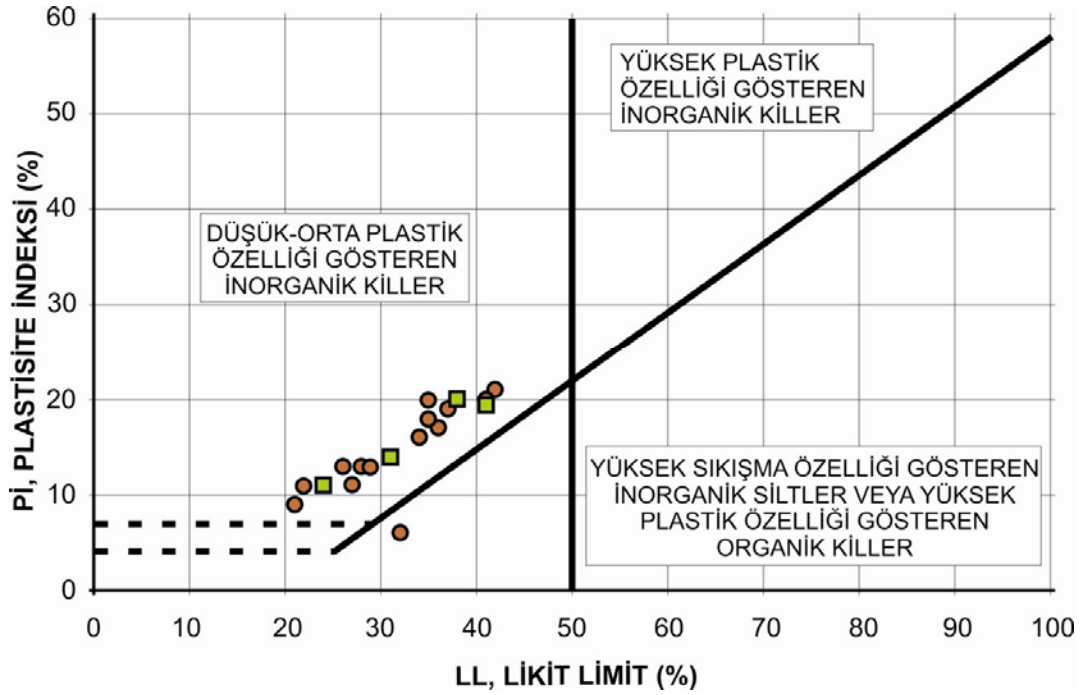
Tablo 4.1 Zemin Deneyleri Sonuçları

CL BİRİMİ İÇİN	KUMTAŞI-ÇAMURTAŞI ARDALANMASI
$\emptyset : 14^0$	$\emptyset : 18,17$
$\gamma : 2,00 \text{ g/cm}^3$	$\gamma : 2,63 \text{ g/cm}^3$
$c : 1,03 \text{ kg/cm}^2$	$c : 6,52 \text{ kg/cm}^2$

\* CL : Zemin özelliği gösteren Sarımsı kahverengi, az çakıllı Kumlu Kil (İzmir Hafif Raylı Sistemi II. aşama II. kısım ön jeoteknik değerlendirme raporundan düzenlenerek

#### Atterberg Limitleri

Kaya özelliği gösteren formasyona kadar alüvyon özelliğindeki çökellerde zemin mekaniği indeks özellikleri, doğal nem içeriği ve elek analiz deneyleri uygulanarak zemin özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Zemin özelliği gösteren Sarımsı kahverengi, az çakıllı Kumlu Kil (CL), Sarımsı kahverengi, Kumlu Killi Çakıl (GC), Sarımsı kahverengi, Çakıllı Siltli Killi Kum (SC), zemin gruplarının zemin indeks değerlerini belirlemeye yönelik test sonuçlarına göre karşılaşılan zeminlerde Likit Limit (LL) değerlerinin 21-41 arasında değerler aldıkları, Plastik Limitlerinin (PL) 11-21 arasında değiştiği, Plastisite İndislerinin (PI) ise 9-20 arasında değiştiği belirlenmiştir. Kıvam limitleri yapılabilen örneklerin hepsi kil davranışı göstermiştir. Birleştirilmiş zemin sınıflandırma tablosuna göre zemin sınıfları genelde CL-GC-SC olan killi zeminlerin “Düşük-Orta Plastik Özelliği Gösteren İnorganik Killer” grubuna girdiği belirlenmiştir. Elek analizi sonuçların göre Çakıl % 0,29-43,30 ; Kil-Silt % 30,93-69,38 ve Kum % 17,00-60,78 oranında sınıflandığı, doğal nem içeriklerinin de % 13,40-20,65 aralığında değiştiği belirlenmiştir.



Şekil 4.21 Alüvyal çökellerin plastisite kartındaki dağılım grafiği (Onargan ve Aksoy, 2006)

#### 4.4.2.2 Kaya Karot Örneklerine Uygulanan Deneyler

Kaya koşullarında açılan sondajlarda sürekli karot alınarak ilerleme yapış olup, kesici uç tipi ve durumu, sondaj besleme sistemi ve ilerleme herhangi bir sondaj manevrasında % 100 karot verimi elde edilecek şekilde ayarlanmıştır.

Karotlar çıkarılırken karotiyer yatay konumda tutulmuştur, bu durum karotlara zarar vermeyecek biçimde, titreşim yapmadan sabit bir hidrolik basınçla sağlanabilmiştir. Karot çekiç darbeleriyle veya havalı karot tıkaç kullanarak, ya da karotiyer başlarından su basıncı tatbik edilerek çıkarılmamaya özen gösterilmiştir.

Tablo 4.2 Atterberg Limitleri Deney Sonuçları (Onargan ve diğer, 2006 düzenlenerek)

SONDA NO	ALINDIĞI DERİNLİK m	LİTOLOJİ	Zemin Türü	LİKİT LİMİT LL %	PLASTİK LİMİT Pİ %	PLASTİSİTE İNDEKSİ, Pİ %
SK-1B	1.50-1.95	Sarımsı kahverengi, çakıllı Killi Kum	SC	21	12	9
SK-1B	3.00-3.45	Sarımsı kahverengi, çakıllı Killi Kum	SC	28	15	13
SK-1B	4.50-10.95	Sarımsı kahverengi, az çakıllı Kumlu Kil	CL	42	21	21
SK-1B	6.00-6.45	Sarımsı kahverengi, az çakıllı Kumlu Kil	CL	41	21	20
SK-1B	7.50-7.95	Sarımsı kahverengi, Çakıllı Killi Kum	SC	27	16	11
SK-1B	10.50-10.95	Sarımsı kahverengi, siltli çakıllı kumlu	SM	NP	NP	NP
SK-1B	12.00-12.45	Sarımsı kahverengi, az çakıllı Kumlu Kil	CL	32	16	06
SK-2B	1.50-1.95	Sarımsı kahverengi, az çakıllı Kumlu Kil	CL	36	19	17
SK-2B	6.00-6.45	Sarımsı kahverengi, Kumlu Killi Çakıl	GC	35	17	18
SK-2B	10.50-10.95	Sarımsı kahverengi, Kumlu Killi Çakıl	CL	21	12	09
SK-3B	1.50-1.95	Yeşilimsi-gri, Az Kumlu Siltli Kil	CL	38	18	20
SK-4B	4.50-4.95	Sarımsı kahverengi, Az Çakıllı Kumlu Kil	CL	35	15	20
SK-4B	6.00-6.45	Sarımsı kahverengi, Çakıllı Siltli killi kum	SC	28	15	13
SK-4B	7.50-7.95	Sarımsı kahverengi, Az Kumlu Killi Çakıl	GC	22	11	11
SK-5B	1.50-1.95	Sarımsı kahverengi, Çakıllı Siltli killi kum	SC	29	16	13
SK-5B	6.00-6.45	Sarımsı kahverengi, Kumlu Killi Çakıl	GC	26	13	13
SK-7B	1.50-1.95	Sarımsı kahverengi, Çakıllı Siltli killi kum	SC	37	18	19
SK-7B	7.50-7.95	Yeşilimsi kahverengi, Kumlu Killi Çakıl	GC	24	13	11
SK-8B	1.50-1.95	Sarımsı kahverengi, Çakıllı Siltli killi kum	SC	34	18	16
SK-8B	6.00-6.45	Yeşilimsi kahverengi, Kumlu Killi Çakıl	CL	41	21	20
SK-8B	9.00-9.45	Yeşilimsi kahverengi, Kumlu Killi Çakıl	SC	31	17	14
Kıvam limitleri yapılabilen örneklerin hepsi kil davranışı göstermiştir. Birleştirilmiş zemin sınıflandırma tablosuna göre zemin sınıfları CL-GC-SC ' dir.						
<b>Düşük-Orta Plastik Özelliği Gösteren İnorganik Killer</b>						

TS: TS-1900, ASTM: D 4318

Tablo 4.3 Elek analizi deney sonuçları (Onargan ve diğer, 2006 düzenlenerek).

SONDAJ NO	ALINDIĞI DERİNLİK m	LİTOLOJİ	Zemin Türü	ÇAKIL %	KİL-SİLT %	KUM %
SK-1B	1.50-1.95	Sarımsı kahverengi, çakıllı Killi Kum	SC	24,39	36,45	39,19
SK-1B	3.00-3.45	Sarımsı kahverengi, çakıllı Killi Kum	SC	14,67	43,84	41,49
SK-1B	4.50-10.95	Sarımsı kahverengi, az çakıllı Kumlu Kil	CL	8,64	56,07	35,29
SK-1B	6.00-6.45	Sarımsı kahverengi, az çakıllı Kumlu Kil	CL	1,67	68,00	30,33
SK-1B	7.50-7.95	Sarımsı kahverengi, Çakıllı Killi Kum	SC	15,71	47,78	36,51
SK-1B	10.50-10.95	Sarımsı kahverengi, siltli çakıllı kumlu	SM	36,65	18,50	44,85
SK-1B	12.00-12.45	Sarımsı kahverengi, az çakıllı Kumlu Kil	CL	7,74	58,49	33,76
SK-2B	1.50-1.95	Sarımsı kahverengi, az çakıllı Kumlu Kil	CL	4,25	67,21	17,00
SK-2B	6.00-6.45	Sarımsı kahverengi, Kumlu Killi Çakıl	GC	43,30	31,18	25,53
SK-2B	10.50-10.95	Sarımsı kahverengi, Kumlu Killi Çakıl	CL	18,26	52,55	29,18
SK-3B	1.50-1.95	Yeşilimsi-gri, Az Kumlu Siltli Kil	CL	0,48	69,38	30,14
SK-4B	4.50-4.95	Sarımsı kahverengi, Az Çakıllı Kumlu Kil	CL	13,19	60,05	26,76
SK-4B	6.00-6.45	Sarımsı kahverengi, Çakıllı Siltli killi kum	SC	14,29	35,22	50,49
SK-4B	7.50-7.95	Sarımsı kahverengi, Az Kumlu Killi Çakıl	GC	41,08	35,86	23,06
SK-5B	1.50-1.95	Sarımsı kahverengi, Çakıllı Siltli killi kum	SC	23,73	42,15	34,12
SK-5B	6.00-6.45	Sarımsı kahverengi, Kumlu Killi Çakıl	GC	34,59	41,35	24,05
SK-7B	1.50-1.95	Sarımsı kahverengi, Çakıllı Siltli killi kum	SC	16,13	30,93	52,94
SK-7B	7.50-7.95	Yeşilimsi kahverengi, Kumlu Killi Çakıl	GC	36,70	36,38	26,93
SK-8B	1.50-1.95	Sarımsı kahverengi, Çakıllı Siltli killi kum	SC	8,86	30,37	60,78
SK-8B	6.00-6.45	Yeşilimsi kahverengi, Kumlu Killi Çakıl	CL	0,29	66,36	33,34
SK-8B	9.00-9.45	Yeşilimsi kahverengi, Kumlu Killi Çakıl	SC	18,00	37,35	44,65

ASTM: D 422-63\1990



Tablo 4.4 Su içeriği deney sonuçları (Onargan ve diğer, 2006 düzenlenerek).

SONDAJ NO	ALINDIĞI DERİNLİK m	LİTOLOJİ	Zemin Türü	SU İÇERİĞİ %
SK-1B	1.50-1.95	Sarımsı kahverengi, çakıllı Killi Kum	SC	13,65
SK-1B	3.00-3.45	Sarımsı kahverengi, çakıllı Killi Kum	SC	11,86
SK-1B	4.50-10.95	Sarımsı kahverengi, az çakıllı Kumlu Kil	CL	19,14
SK-1B	6.00-6.45	Sarımsı kahverengi, az çakıllı Kumlu Kil	CL	17,04
SK-1B	7.50-7.95	Sarımsı kahverengi, Çakıllı Killi Kum	SC	17,35
SK-1B	10.50-10.95	Sarımsı kahverengi, siltli çakıllı kumlu	SM	11,59
SK-1B	12.00-12.45	Sarımsı kahverengi, az çakıllı Kumlu Kil	CL	22,67
SK-2B	1.50-1.95	Sarımsı kahverengi, az çakıllı Kumlu Kil	CL	16,55
SK-2B	6.00-6.45	Sarımsı kahverengi, Kumlu Killi Çakıl	GC	13,59
SK-2B	10.50-10.95	Sarımsı kahverengi, Kumlu Killi Çakıl	CL	18,14
SK-3B	1.50-1.95	Yeşilimsi-gri, Az Kumlu Siltli Kil	CL	18,65
SK-4B	4.50-4.95	Sarımsı kahverengi, Az Çakıllı Kumlu Kil	CL	19,81
SK-4B	6.00-6.45	Sarımsı kahverengi, Çakıllı Siltli killi kum	SC	16,40
SK-4B	7.50-7.95	Sarımsı kahverengi, Az Kumlu Killi Çakıl	GC	14,71
SK-5B	1.50-1.95	Sarımsı kahverengi, Çakıllı Siltli killi kum	SC	13,40
SK-5B	6.00-6.45	Sarımsı kahverengi, Kumlu Killi Çakıl	GC	14,26
SK-7B	1.50-1.95	Sarımsı kahverengi, Çakıllı Siltli killi kum	SC	20,65
SK-7B	7.50-7.95	Yeşilimsi kahverengi, Kumlu Killi Çakıl	GC	14,48
SK-8B	1.50-1.95	Sarımsı kahverengi, Çakıllı Siltli killi kum	SC	15,41
SK-8B	6.00-6.45	Yeşilimsi kahverengi, Kumlu Killi Çakıl	CL	19,84
SK-8B	9.00-9.45	Yeşilimsi kahverengi, Kumlu Killi Çakıl	SC	13,98

TS: TSE-1900-1

Tablo 4.5 Açılan sondajlarda Çamurtaşı\Kumtaşı örneklerinde belirlenmiş nokta yük dayanım indeks değerleri (Onargan ve diğer, 2006 düzenlenerek).

Sondaj No.	Örnek Sayısı	Derinlik (m)	Litoloji	Ayrışma Derecesi	$I_s$ (Mpa)
SK-2B	12	14,00-15,00	Çamurtaşı \ Kumtaşı	Tamamen Ayrışmış	0,26
SK-2B	12	17,00-18,00	Çamurtaşı \ Kumtaşı	Çok Ayrışmış	0,33
SK-3B	12	03,00-04,50	Çamurtaşı \ Kumtaşı	Orta-Çok Ayrışmış	0,22
SK-3B	12	06,00-07,00	Çamurtaşı \ Kumtaşı	Orta-Çok Ayrışmış	0,24
SK-3B	12	11,70-13,50	Çamurtaşı \ Kumtaşı	Az-Orta Ayrışmış	0,45
SK-4B	12	13,00-14,00	Çamurtaşı \ Kumtaşı	Tamamen Ayrışmış	0,26
SK-4B	12	16,00-17,00	Çamurtaşı \ Kumtaşı	Çok Ayrışmış	0,31
SK-5B	12	11,00-12,00	Çamurtaşı \ Kumtaşı	Tamamen Ayrışmış	0,24
SK-5B	12	20,00-22,00	Çamurtaşı \ Kumtaşı	Çok Ayrışmış	0,31
SK-7B	12	09,00-12,00	Çamurtaşı \ Kumtaşı	Çok Ayrışmış	0,29
SK-7B	12	15,00-17,00	Çamurtaşı \ Kumtaşı	Tamamen Ayrışmış	0,31

Hazırlanan doktora çalışması kapsamında, saha ve laboratuvar çalışmaları sonucunda elde edilen daha birçok veriye tüm tünel güzergahı için değinmek yerine, güzergah üzerinden detaylı olarak incelenen Göztepe İstasyonu ve civarındaki ve fay zonu geçisi ve bu zonun sayısal modellemesi esnasında, gerek ortaya konan detay çalışmada, gerekse uygulanacak modellemelerin özünü oluşturan, formasyon verilerin girilmesi kısmında değinilmesi uygun bulunmuştur.

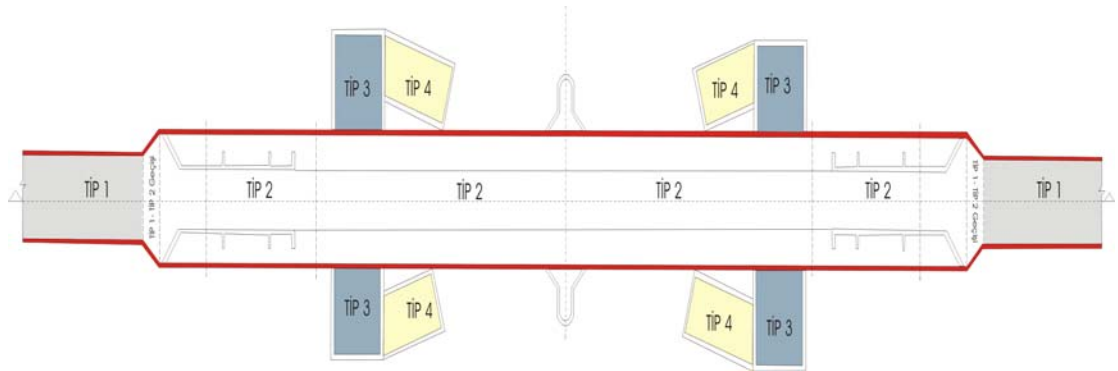
#### 4.4.3 Hidrojeoloji

Yeraltı su seviyesinin belirlenmesine yönelik olarak yapılan incelemeler sonucunda önceki sondaj verileri ve ilave olarak yapılan sondaj verileri değerlendirildiğinde, yeraltı su seviyesi kotunun planlanan “ray kotu” nun üzerinde olduğu görülmektedir. Geçilen formasyonların çakıllı, siltli-killi içerikli ve çatlaklı olması, tamamen ve-veya çok ayrılmış özellikte olması nedeniyle yeraltı şebeke kaçaklarından gelebilecek sularında dikkate alınması sonucu, yeraltı su gelirinin çatlaklar ile kontrol edileceği varsayılarak, kazı sırasında uygun drenaj önlemlerinin alınmasında gerekmektedir.

Yapılan sondajlardan elde edilen veriler, gözlem yapılan süre ve meydana gelen değişikliklerde dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Bu duruma göre güzergahta gözlenen ortalama yer altı su seviyesi 2,5 metre ile 10 m arasında değişmektedir. Ayrıca, yeraltı suyunun çatlak düzlemleri boyunca süzülerek kazı alanına boşalacağı tahmin edilmektedir. Bu durumda açılacak tünelde lokal olarak ani su gelirlerinin olması beklenmelidir. Böyle durumlarda kazıya paralel olarak drenaj tedbirlerinin de ön sağlama çalışmaları sırasında alınmasında yarar vardır.

#### 4.5 İzmir Metro Çalışmalarında Uygulanan Tünel Tipleri ve Uygulanma Parametreleri

İzmir Metrosu ikinci aşama, Fahrettin Altay-Üçyol arasındaki 5,6 km'lik güzergahta Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu ve bu metodun iyileştirilmesi olarak da tanımlanabilecek Yeni İtalyan Yöntemi ilkelerine göre açılmakta olan tüneller, projelendirilme aşamasında dört tip altında toplanmıştır (şekil 4.22).



Şekil 4.22 İzmir metrosu ikinci aşama projesi tünel tipleri

Tip 1, tip 2, tip 3 ve tip 4 olarak adlandırılan tünellerde farklı yüzey alanları kazılmaktadır. Tip 1 olarak isimlendirilen tünellerde yaklaşık  $64 \text{ m}^2$  kazı yüzeyi oluşturulurken bu değer tip 2 de  $113,10 \text{ m}^2$ , tip 3 kazısında  $64 \text{ m}^2$  ve tip dört kazısında ise  $35,40 \text{ m}^2$  kazı yüzeyi oluşturulmaktadır.

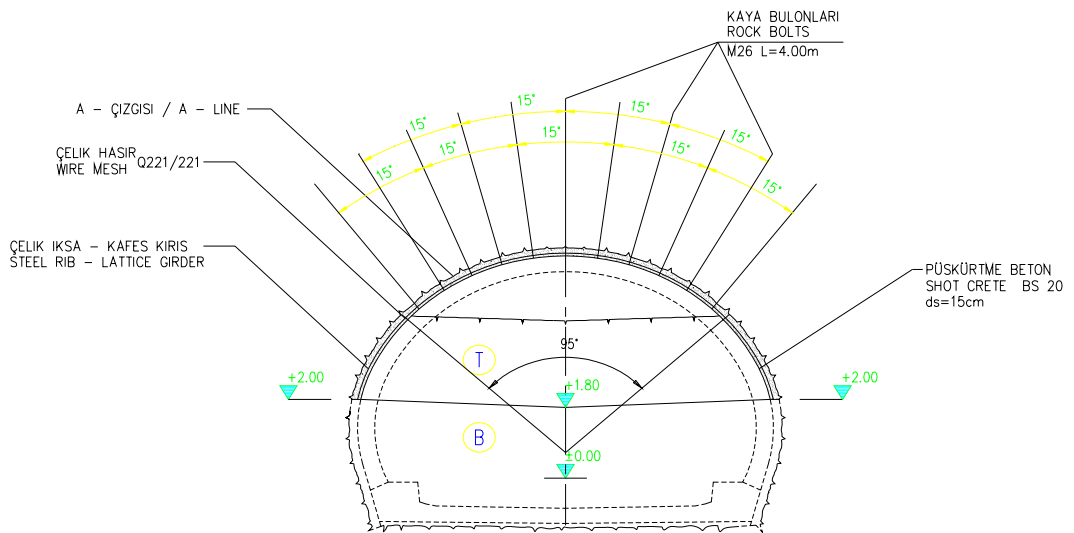
Tip 1 olarak adlandırılan tünellerde, ilerlemelerde kullanılan tahkimat sistemine göre;

- Tip 1 – B1 : Kazı alanı : 65,580 m<sup>2</sup>
- Tip 1 – B2 : Kazı alanı : 64,100 m<sup>2</sup>
- Tip 1 – B3 : Kazı alanı : 64,820 m<sup>2</sup>
- Tip 1 – C1 : Kazı alanı : 66,160 m<sup>2</sup>

olarak sınıflandırılmışlardır. Yukarıda belirtilen tünel tiplerinden tip 1 (ana hat tüneli) ve tip 2 (istasyon tüneli) olarak isimlendirilen tüneller güzargahdaki toplam tünel kazısının % 90' nın dan fazlasını oluşturmaktadır. Tip 3 ve tip 4 tünelleri “merdiven tünelleri” olarak adlandırılan, istasyonlara ulaşım için kullanılacak tünellerdir. Bu tünellerin geometrisi tip 1 olarak isimlendirilen tüneller ile benzerlik arz etmektedir. Bu nedenle çalışma kapsamında yapılan araştırma, ölçüm ve bunlara dayalı olarak yapılan modellemeler, tip 1 - tip 2 tünel geometrisine göre hazırlanmıştır.

### ENİNE KESİT / CROSS SECTION

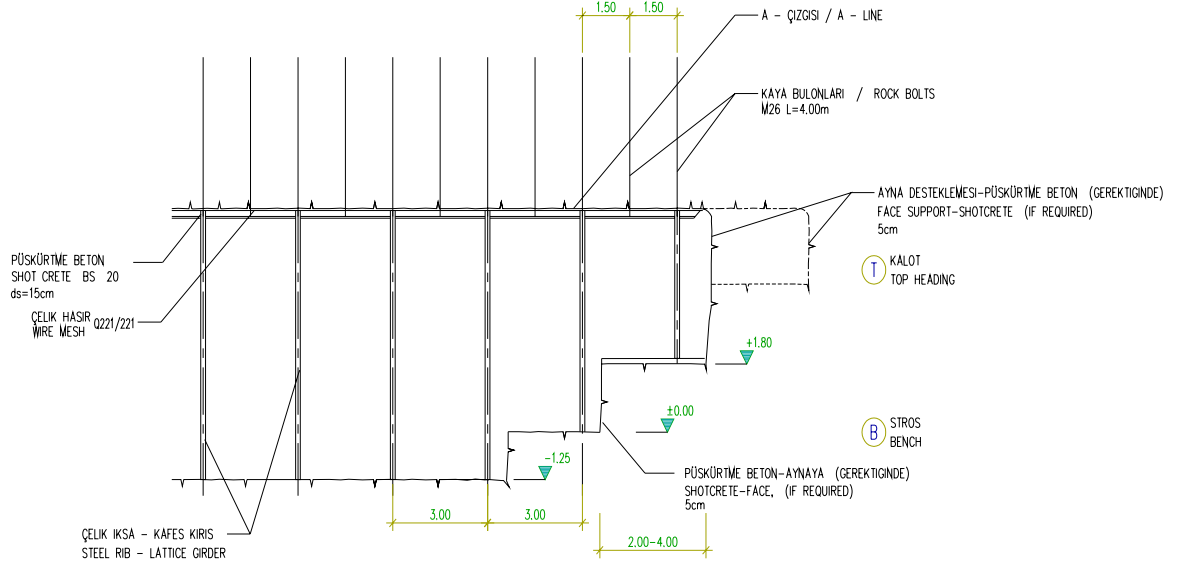
ÖLÇEK / SCALE =1/100



Şekil 4.23 Tip 1 tünel enine kesiti - Ana hat tüneli (İzmir Büyük Şehir Belediyesi İzmir Hafif Raylı Sistemi geoteknik bilgilendirme çizelgesinden düzenlenerek)

## BOYUNA KESİT / LONGITUDINAL SECTION

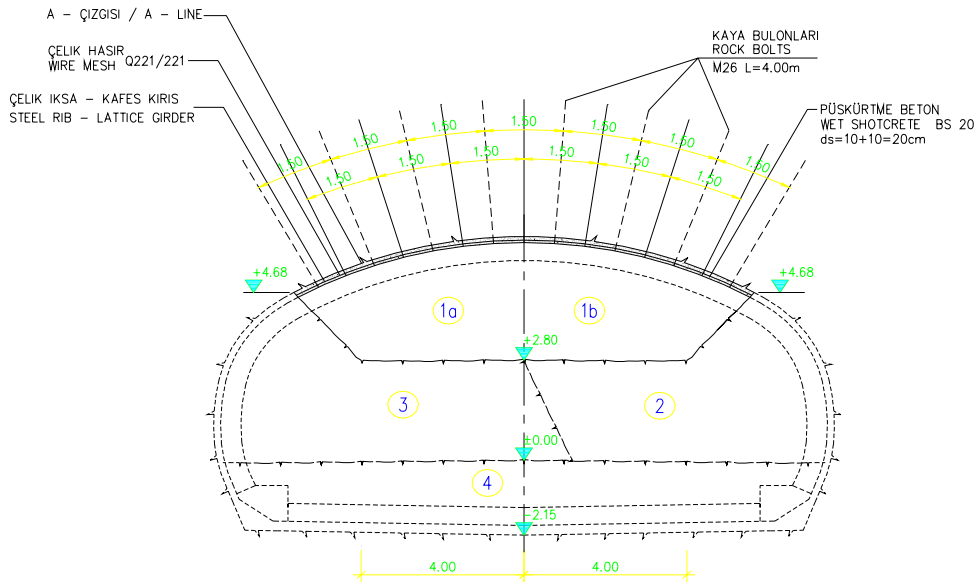
ÖLÇEK / SCALE =1/100



Şekil 4.24 Tip 1 tünel boyuna kesiti (İzmir Büyük Şehir Belediyesi İzmir Hafif Raylı Sistemi geoteknik bilgileme çizelgesinden düzenlenerek)

## ENİNE KESİT / CROSS SECTION

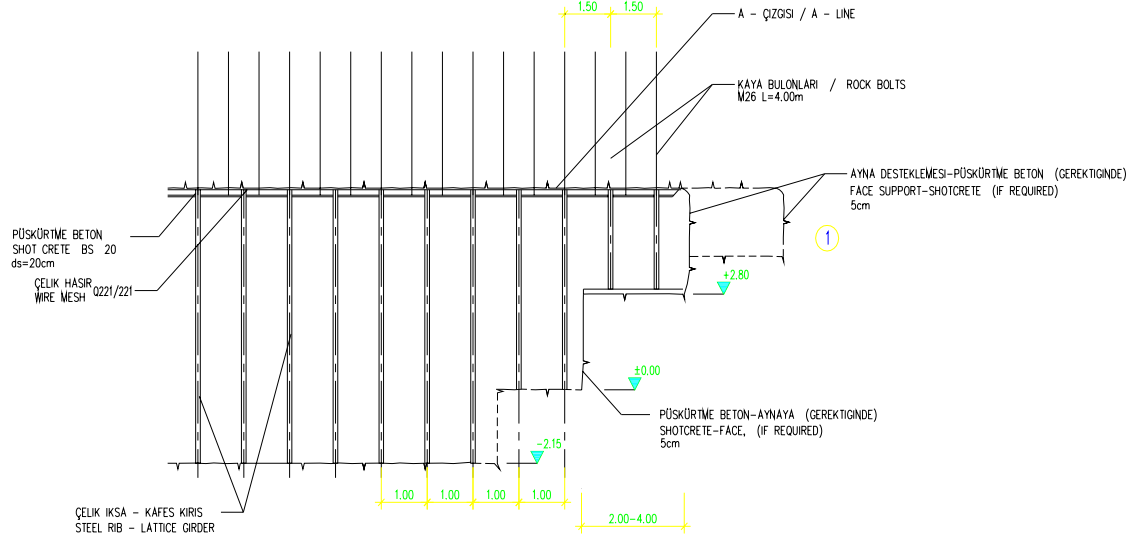
ÖLÇEK / SCALE =1/100



Şekil 4.25 Tip 2 tünel enine kesiti - İstasyon tüneli (İzmir Büyük Şehir Belediyesi İzmir Hafif Raylı Sistemi geoteknik bilgileme çizelgesinden düzenlenerek)

## BOYUNA KESİT / LONGITUDINAL SECTION

ÖLÇEK / SCALE =1/100



Şekil 4.26 Tip 2 tünel boyuna kesiti (İzmir Büyük Şehir Belediyesi İzmir Hafif Raylı Sistemi geoteknik bilgileme çizelgesinden düzenlenerek)

Tüm tünel kazılarında, kazı işlemi için darbeli tünel açma makinası kullanılmakta olup, tünellerde yapılan ilerlemeler üst yarı kazısı, alt yarı kazısı ve taban kazısı şeklinde gruplandırılabilir. Tünel kazılarının tamamında 200 kw lik bir güce sahip darbeli tünel açma makineleri kullanılmaktadır (şekil 4.27).



Şekil 4.27 Tünel kazılarında kullanılan darbeli kırıcı

Tünel açma işlemlerinde, zeminden ya da tünelin içerisinde açılacağı kaya ortamından kaynaklanan bir risk yok ise, güzargah üzerinde önceden yapılan araştırma sondajları ile geçilecek formasyonların özellikleri tam olarak ortaya konabiliyor, kazı ya da destekleme aşamasında ilave önlemlere gerek duyulmuyorsa, aşağıda verilen imalat sırası uygulanmaktadır.

- Kazı
- Birinci kat püskürtme beton
- Çelik hasır
- Çelik iksaların yerleştirilmesi
- İkinci kat püskürtme beton
- Kaya bulonları

Yukarıda verilen imalat sırasına göre uygulanan tip 1 kazısı üç kademede gerçekleşmektedir. 1. kademe yüksekliği 3,40 m, 2. kademe yüksekliği 1,80 m, 3. kademe yüksekliği 1,25 m'dir. Toplam tünel yüksekliği 6,45 m'dir. Kademeler arasındaki uzaklık zemin koşullarına bağlı olarak belirlenir. Fakat kademeler arasındaki uzaklık 5-6 raundu (iki iksa arası mesafe) geçmemelidir. Tip 1 kazısında raunt aralıkları, uygulanacak tahkimat sistemine göre farklılık göstermektedir. Tip 1 kazısının tahkimat uygulamaları kaya sınıflandırma sistemine göre B1, B2, B3, C1 olmak üzere dörde ayrılmıştır. Ancak İzmir Metro II. aşama inşaatında şu ana kadar B2, B3, C1 zemin tiplerine göre tahkimat sistemleri uygulanmaktadır.

B1 tahkimat sisteminde; iki iksa arası 3 m. olup bir kat çelik hasır kullanılır. Püskürtme beton kalınlığı 15 cm'dir. Püskürtme beton iki aşamada uygulanır. Kazı işlemi tamamlandığında hemen 5 cm'lik beton uygulanır. Çelik hasır ve iksalar yerleştirildikten sonra ise, 10 cm'lik ikinci kat püskürtme beton uygulanır. Bulonlar yatayda ve düşeyde 1,5 m ara ile şerhbeş düzeninde yerleştirilirler. 1. kademede ilk sıra 5, ikinci sıra 6 olmak üzere bir rauntta toplam 11 bulon çakılmaktadır. 2. kademede ilk sıra 5, ikinci sıra 5 olmak üzere 10 bulon ve 3. kademede ilk sıra 2 ve ikinci sıra 2 olmak üzere 4 bulon çakılmaktadır. Böylece bir rauntta toplam 25 adet

bulon çakılmış olur. B1 tahkimat sisteminin kullanılmamasının nedeni uygulanan çelik tahkimatın kalınlığının 12-13 cm civarında olmasıdır.

B2 tahkimat sisteminde, iki iksa arası 2 m olup bir kat çelik hasır kullanılır. Püskürtme beton kalınlığı ise 20 cm'dir. Püskürtme beton iki aşamada uygulanır. İlk olarak kazı tamamlandığında 5 cm'lik püskürtme beton atılır. Daha sonra çelik hasır ve iksalar yerleştirildikten sonra 15 cm'lik ikinci kat püskürtme beton uygulanır. Gerekliğinde aynaya da püskürtme beton uygulaması yapılabilir. Bulonlar yatayda ve düşeyde 1,5 m ara ile şerşbeş düzeninde yerleştirilirler. 1. kademedeki ilk sıra 5, ikinci sıra 6 olmak üzere bir rauntta toplam 11 bulon çakılmaktadır. 2. kademedeki ilk sıra 5, ikinci sıra 5 olmak üzere 10 bulon ve 3. kademedeki ilk sıra 2 ve ikinci sıra 2 olmak üzere 4 bulon çakılmaktadır. Böylece bir rauntta toplam 25 adet bulon çakılmış olur. Kazı alanı 64,100 m<sup>2</sup>'dir.



Şekil 4.28 Kademe kazısında çelik hasırın yerleştirilmesi

B3 tahkimat sisteminde, iki iksa arası 1,5 m olup bir kat çelik hasır kullanılır. Püskürtme beton kalınlığı ise 20 cm'dir. Püskürtme beton iki aşamada uygulanır. İlk olarak kazı tamamlandığında 5 cm'lik püskürtme beton atılır. Daha sonra çelik hasır ve iksalar yerleştirildikten sonra 15 cm'lik ikinci kat püskürtme beton uygulanır.



Gerektiğinde aynaya da püskürtme beton uygulanır. Bulonlar yatayda 1m, düşeyde 1,5 m ara ile şeşbeş düzeninde yerleştirilirler. 1. kademede ilk sıra 5, ikinci sıra 6 olmak üzere bir rauntta toplam 11 bulon çakılmaktadır. 2. kademede ilk sıra 5, ikinci sıra 5 olmak üzere 10 bulon ve 3. kademede ilk sıra 2 ve ikinci sıra 2 olmak üzere 4 bulon çakılmaktadır. Böylece bir rauntta toplam 25 adet bulon çakılmış olur. Kazı alanı 64,820 m<sup>2</sup>'dir.

C1 tahkimat sisteminde, iki iksa arası 1 m olup bir kat çelik hasır kullanılır. Püskürtme beton kalınlığı ise 25 cm'dir. Püskürtme beton iki aşamada uygulanır. İlk olarak kazı tamamlandığında 5 cm'lik püskürtme beton atılır. Daha sonra çelik hasır ve iksalar yerleştirildikten sonra 20 cm'lik ikinci kat püskürtme beton uygulanır. Gerektiğinde aynaya da püskürtme beton uygulanır. Bulonlar yatayda 0,75 m, düşeyde 1,5 m ara ile şeşbeş düzeninde yerleştirilirler. 1. kademede ilk sıra 5, ikinci sıra 6 olmak üzere bir rauntta toplam 11 bulon çakılmaktadır. 2. kademede ilk sıra 5, ikinci sıra 5 olmak üzere 10 bulon ve 3. kademede ilk sıra 2 ve ikinci sıra 2 olmak üzere 4 bulon çakılmaktadır. Böylece bir rauntta toplam 25 adet bulon çakılmış olur. Kazı alanı 66,160 m<sup>2</sup>'dir.

Tip 2 kazısı dört kademede yapılır. 1. kademe kazısı 2,38 m, 2. ve 3. kademe kazısı 2,80 m, 4. kademe kazısı 2,15 m olup toplam tünel yüksekliği 7,73 m'dir. Kazı alanı 113,100 m<sup>2</sup>'dir. Tip 2 kazısında iksalar birer metre ara ile yerleştirilmektedir. Püskürtme beton yine iki adımda tamamlanmaktadır. İlk kat, kazıdan hemen sonra 5 cm, ikinci kat, çelik tahkimattan sonra 15 cm. şeklindedir. Gerektiğinde aynaya da püskürtme beton uygulaması yapılmaktadır. Bulonlar yatayda 1 m, düşeyde 1,5 m ara ile şeşbeş düzeninde yerleştirilir. İlk kademede 15, ikinci ve üçüncü kademe 14 bulon yerleştirilir. Son kademe taban kazısı olduğu için bulonlama yapılmaz.

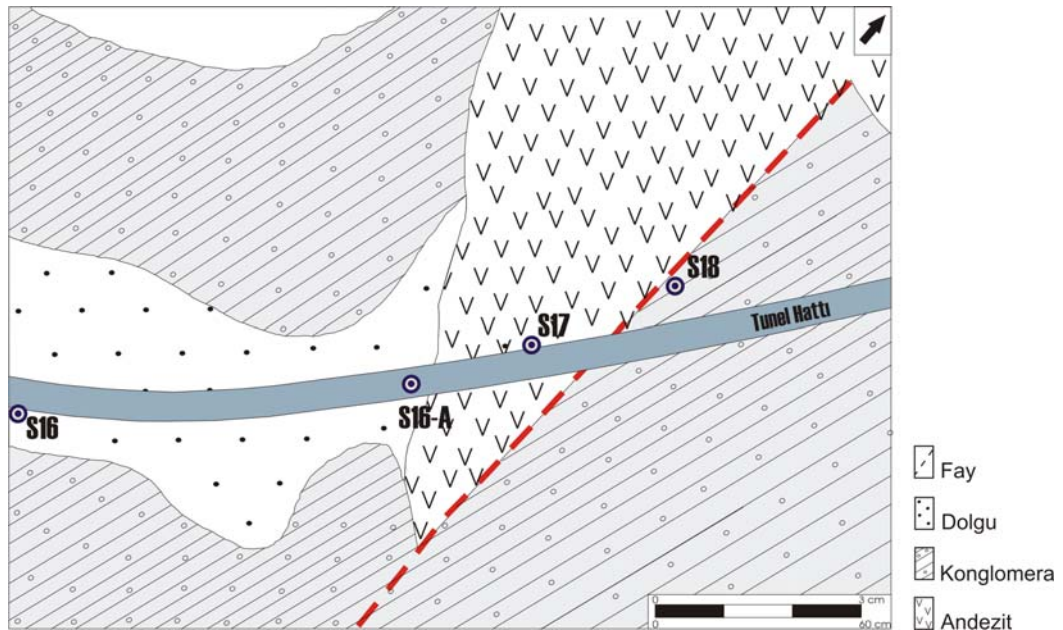
Tünel açma işlemlerinde, zeminden yada tünelin içerisinde açılacağı kaya ortamından kaynaklanan bir risk varsa, yukarıda anlatılan işlevlerin yanısıra, bölüm üç' te verilen ilave tünel destekleme elemanlarında tünel imalatına dahil edilir.

İzmir Metrosu ikinci aşama tünelinin güzergah tesbiti sırasında yüzeyden ve sondajlar ile yapılan çalışmalar sonucunda Göztepe İstasyonu civarında, güzergahın 2+449.25' inci km. sinde olası bir fay zonu gözlenmiştir.

Tünel açımı sırasında da, her ne kadar tünel açımından önceki beklenen durumdan farklı bir yapı gösterse de aynı fay gözlenmiş ve tünel içerisinde işaretlenmiştir. Bu nedenle bu bölge gerek şehir içi tünellerin faaliyetleri gerekse tünel açım-destekleme parametreleri açısından riskli bölge olarak kabul edilmiş ve riskli bölgelerde uygulanan tünellerin parametrelerinin bölüm 3 de değinildiği gibi bu kilometrelerde uygulanması öngörülmüştür.

#### 4.6 İzmir Metrosu Göztepe İstasyonu Yakınında Karşılaşılan Fay Zonunun Detaylı İncelenmesi

Güzergahın 2+447,75 – 2+655,48 km. aralığında yer alan Göztepe istasyonu ve civarı tünel kazıları esas olarak Altındağ Formasyonu ve alüvyon içinde açılmıştır. Ele alınan bölge ve civarında 5 adet sondaj açılmış (S15, S16, S16-A, S17 ve S18) ve bu sondajlardan bölgenin jeolojik durumu ile ilgili net bilgiler toplanmıştır. Buna göre istasyon civarında hakim olan birimler esas olarak Altındağ Formasyonu ve alüvyon dur.



Şekil 4.29 Faylı zon ve civarında açılan sondajların şematik gösterimi

Açılan 5 adet jeoteknik amaçlı sondaj kuyularından elde edilen formasyon bilgileri aşağıda detaylı olarak açıklanmaktadır.

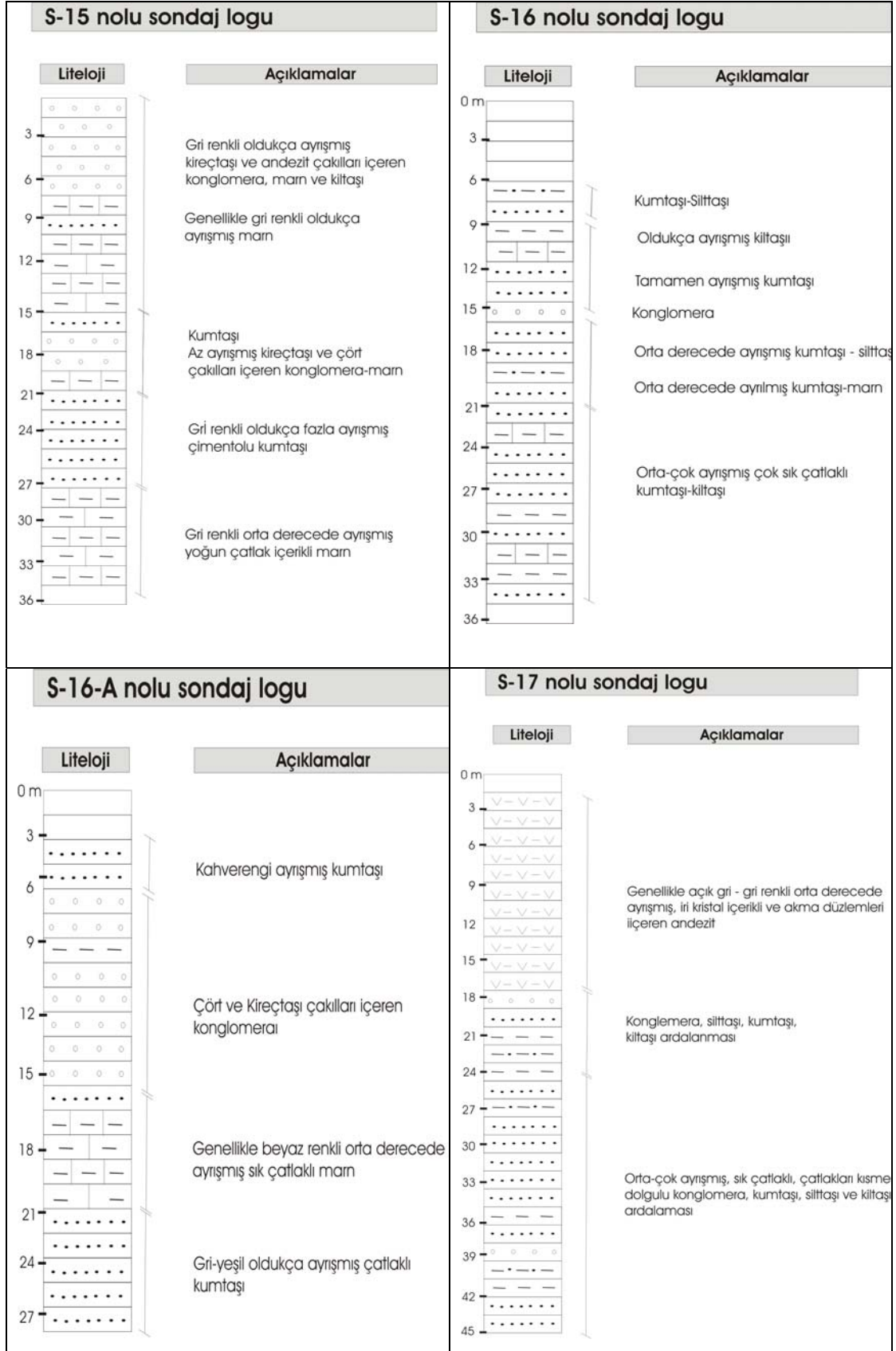
#### 4.6.1 Sondaj Logları ve Değerlendirilmesi

S15 nolu sondaj 2+632. metre yakınında olup, tam olarak tünel hattı üzerinde açılmıştır. Sondaj egemen olarak konglomera, marn ve kumtaşı birimlerini kesmektedir. Birimlerin RQD değerleri oldukça değişken olup genellikle konglomeralarda % 10, kumtaşlarında %20-40 ve marn da %10-40 arasında değişim göstermektedir.

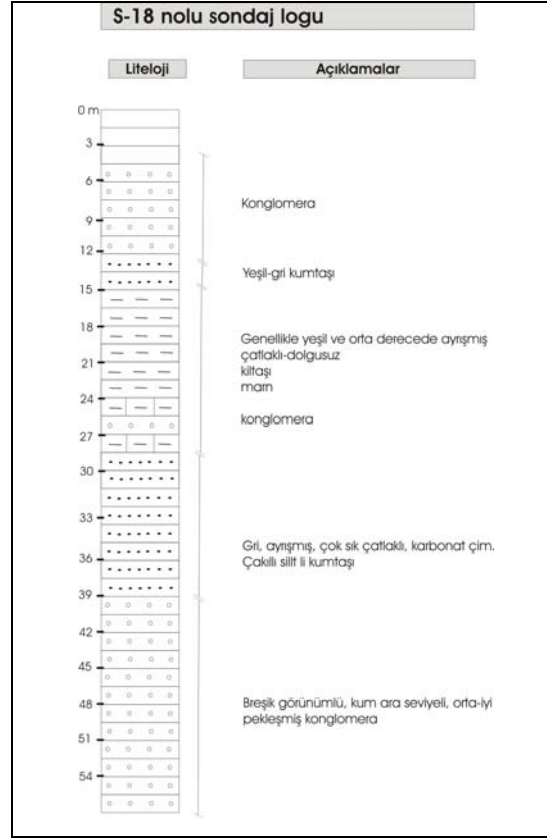
S16 nolu sondaj 2+555. metre yakınında olup, Göztepe istasyonu olarak planlanan bölgenin içerisinde yer almaktadır. Sondajda egemen birimler, orta – çok ayrılmış çatlaklı kumtaşı, kiltası birimleri ile silttaşlarıdır. Silttaşlarının RQD değerleri % 10-50 arasında değişirken kumtaşlarında bu değer %20-30 arasında değişmektedir.

S16-A sondajı 2+440. metre yakınında olup egemen birimler, çört ve kireçtaşı çakıllı konglomeralar, orta derecede ayrılmış marn ve ayrılmış kumtaşı olarak gözlenmektedir. Birimlerin RQD değerleri kumtaşlarında % 30 - 60, marnlarda ise %10-45 arasında değişim göstermektedir.

S17 nolu sondaj 2+400. metre yakınında olup yaklaşık 50 metre olarak açılmıştır. Karşılaşılan birimler, orta derecede ayrılmış, bol çatlaklı andezit ve konglomera-silttaşı, kumtaşı – kiltası ardalanması olarak gözlenmektedir. Yüzeyden yaklaşık 17 metre derine kadar inen ayrılmış andezitlerde RQD değerleri %30-60 lar civarında iken, kumtaşı-kiltası ardalanmasında yaklaşık %25 dir. 33. metreden sonra karşılaşılan silttaşı-kiltası ardalanmasında ise bu değer %50-60 lar civarındadır.



Şekil 4.30 Fay zone ve civarında açılan sondajlar ve değerlendirilmesi



Şekil 4.30 (Devamı) Fay zonu ve civarında açılan sondajlar ve değerlendirilmesi

S18 nolu sondaj 2+350. metre yakınında olup yaklaşık 60 metre olarak açılmıştır. Karşılaşılan birimler incelendiğinde bölgenin tipik özellikleri göze çarpmaktadır. Ayrışmış kiltaları, çakıllı konglomeralar, çimentolu kumtaşı ve oldukça ayrışmış kiltası silttaşı egemen birimler olarak gözlenmektedir. Konglomeralarda %30 civarında olan RQD değeri, kumtaşlarında %40 - 45 ve kiltalarında % 15-18 civarındadır.

#### 4.6.2 Fay Zonu ve Yakınında Karşılaşılan Jeolojik Yapı

Çalışmanın ilerleyen bölümlerde detaylı olarak ele alınan, fay zonu ve civarında karşılaşılan jeolojik birimler bölüm 4.2'de verilen Altındağ Formasyonu olarak tanımlanan birim ve andezit birimidir. Bu iki birim dışında, fay zonu ve civarında tünelin genel değerlendirmesinde ve de sayısal modellemelerde kullanılan diğer birim ise Alüvyon birimidir.

Güzergahta sık sık yüzeyleyen ve proje sonuna kadar çeşitli aralıklarla geniş bir yayılıma sahip alüvyal çökelleri, çakıllı killi kum, çakıllı kumlu kil ve killi kumlu çakıl şeklinde, üç farklı tipte gözlenmektedir. Doğal su içerikleri %1,83 den %51,77 ye kadar değişim gösteren alüvyon tabakası genellikle orta-sıkı, sıkı ve kötü derecenlenmelidir.

#### ***4.6.3 Fay Zonu ve Civarında Karşılaşılan Birimlerin Mühendislik Özellikleri***

Altındağ Formasyonunu oluşturan birimlerin kazı kotundaki ortalama RQD değerleri % 12-47 arasında değişmektedir. Formasyon, kaya kütle sınıflamasına göre;

$$Q = 0,12 - 0,70 \text{ (Çok Zayıf) ,}$$

$$RMR = 22 - 35 \text{ (Zayıf Kayaç)}$$

puanları ile zayıf kaya sınıfına karşılık gelmektedir. Sondaj açımında karşılaşılan birimler sırası ile; yapay dolgu, alüvyon ve miyosen yaşlı tortul kayalar olarak sayılabilir. Fay zonu yakınlarında tespit edilen bu birimlerin mühendislik özellikleri aşağıda sırasıyla verilmektedir.

##### ***4.6.3.1 Yapay Dolgu Tabakası***

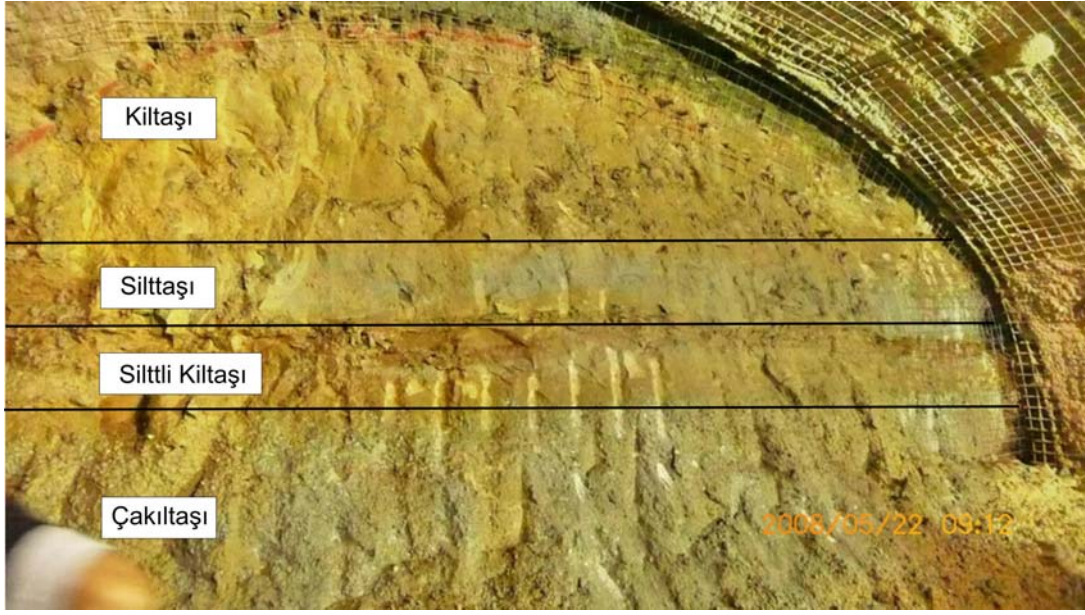
Kazı alanında en üstte 2-3 metre kalınlığında dolgu tabakası yer almaktadır. Dolgu tabakasının mühendislik parametreleri ; birim hacim ağırlığının  $13 \text{ N/m}^3$ , koheyzonu  $0,065 \text{ MPa}$  ve içsel sürtünme açısı değeri de  $17^0$  olarak tespit edilmiştir.

##### ***4.6.3.2 Alüvyon***

Yüzeydeki yapay dolgunun hemen altında yaklaşık 5 m. kalınlığında kesilen Alüvyon yer almaktadır. Boyutları değişen ayırık tanelerden oluşan ve taneler arası çimentonun bulunmadığı alüvyon, daha yaşlı tüm kayalar üzerinde açılı uyumsuzdur. Üzerinde genellikle güncel dolgu malzemesi bulunmaktadır.

#### 4.6.3.3 Miyosen Yaşlı Tortul Kayaçlar

S16 sondajında yüzeydeki yapay dolgunun ve alüvyon biriminin hemen altında; S-15 sondajında değişik kalınlıklarda kesilen kıltaşı-silttaşı-kumtaşı-konglomera yer almaktadır. Sondajlardan elde edilen bilgilerin yanısıra 2+400 – 2+450. km arasında tünel açımı esnasında çekilen ayna fotoğraflarında bu düzeyler açıkça gözlenmektedir (şekil 4.31).



Şekil 4.31 Çalışma alanında aynada gözlenen jeolojik birimler

Miyosen yaşlı tortul kayaçlar için CR, RQD ve Kaya Kalitesi tanımlaması tablo 4.6' da verilmektedir. Tablo 4.7' de ise kayaçların nokta yük dayanım indisleri gösterilmektedir.

Tablo 4.6 Miyosen yaşlı Tortul Kayaçlara yönelik CR, RQD ve Kaya Kalitesi Tanımlamaları

SK NO	Ray Kotu	Litoloji	CR	RQD	Kaya Kalitesi
S15	10.00	Çakıltaşı-Marn-Kumtaşı	10-100	0.0-40	Çok kötü-kötü
S16	10.00	Kumtaşı-Kıltaşı	60-78	0.0-10	Çok kötü

Tablo 4.7 Miyosen yaşlı Tortul Kayaçlara için belirlenmiş nokta yük dayanım indeks değerleri

S. No.	Örnek	Derinlik	Örnek Türü	Ayrışma Derecesi	$I_s$
S15	2	29.50	Kiltaşı	Çok	3.06
S16	3	25.40	Kumtaşı	Az	4.62

Burada kaya kütle sınıflamasına göre Miyosen yaşlı Tortul Kayaçlardan;

#### Kumtaşları

$Q = 0,021$  RMR = 5 Çok Zayıf Kaya (V. Grub: Çok Zayıf Kaya)

#### Kiltaşları

$Q = 0,002$  RMR = 2 Çok Zayıf Kaya (V. Grub: Çok Zayıf Kaya)

değerleri ile “Çok Zayıf Kaya” sınıfına karşılık gelmektedir. Miyosen yaşlı Tortul Kayaçların kazı kotundaki ortalama RQD değerleri % 0- 48 arasında bulunmuştur.

Aşağıda fay zonu yakınında karşılaşılan bazı kayaçların mühendislik özelliklerinden, kuru birim hacim ağırlığı değeri (KBHA) ve Tek Eksenli Basınç Dayanım (TEB) değeri tablo halinde verilmektedir.

Tablo 4.8 Bölgede karşılaşılan Miyosen yaşlı Tortul Kayaçların Mühendislik Özellikleri

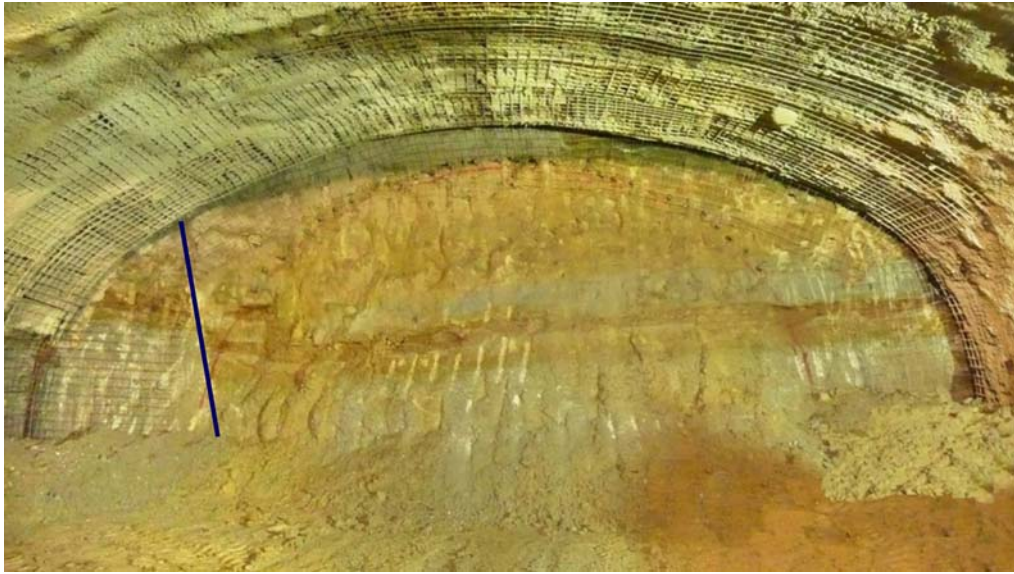
Örnek Türü	Ayrışma Derecesi	KBHA (gr/cm <sup>3</sup> )	TEB kg/cm <sup>2</sup>
Silttaşı	Çok	2,32	230,1
Kumtaşı	Az-Orta	2,19	207,8
Kiltaşı	Çok	2,06	160,8

Ayrıca bölüm 5’te (Sayısal Modelleme) tip1 ve tip2 olarak isimlendirilen iki farklı tünel geometrisi üzerinde tahkimatlı ve tahkimatsız, fay ın etkilerinin belirlenmesi amacı ile analizler yapılırken kullanılan, laboratuvar ortamında elde edilen formasyonlara ait değerler detaylı olarak verilmektedir.



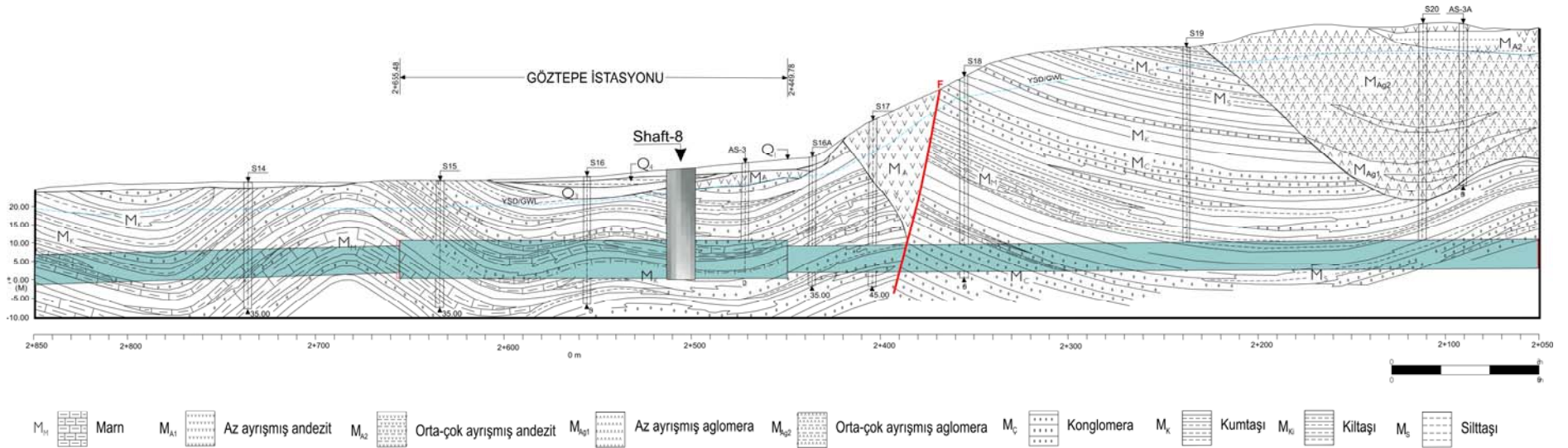
Güzargah üzerinde yapılan S17 ve S18 nolu sondajlar arasında belirlenen, Göztepe İstasyonuna yaklaşık 80 metre mesafedeki fayın, miyosen yaşlı kumtaşı-kiltaşı, çakıltası ve koglomera ar dalanması içinde olduğu, bölge yerleşimi ve şehir üst yapılanması düşünüldüğünde, bütünü ile örtülü olan fayın daha net olarak ancak tünel açımı sırasında gözlenebileceği açıktır.

Bu bağlamda, Göztepe İstasyonu civarında 2+449.25' inci km. de Tip 2 (istasyon tüneli) kesitinde karşılaşılan fayın tünel aynasındaki görünümü şekil 4.32'de verilmektedir.

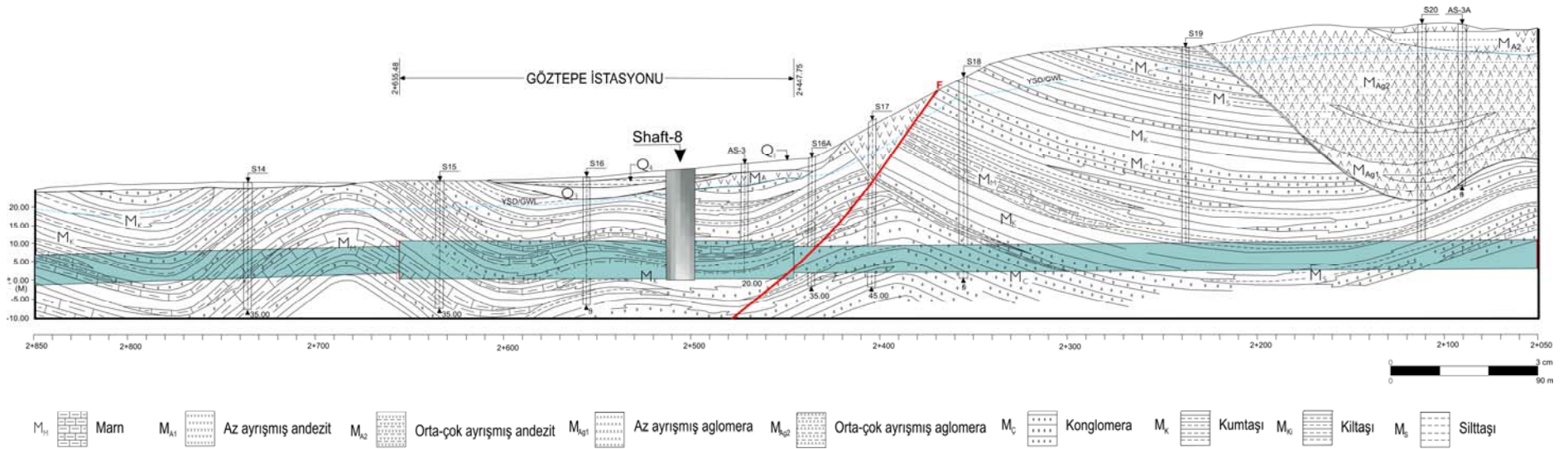


Şekil 4. 32 Tip 2 kesitinde tünel aynasında gözlenen fay

Tünel kazısı sırasında daha önceden varlığı tespit edilen ve tünel açımı sırasında 2+449,25 km de karşılaşılan fay zonunun şekil 4.33 ve şekil 4.34'de tünel açımı öncesinde beklenen olası durumu ile tünel açımı sonrasında gerçekleşen fiili durum ,tünelin çizilen boyuna kesitleri üzerinde aşağıda gösterilmektedir.



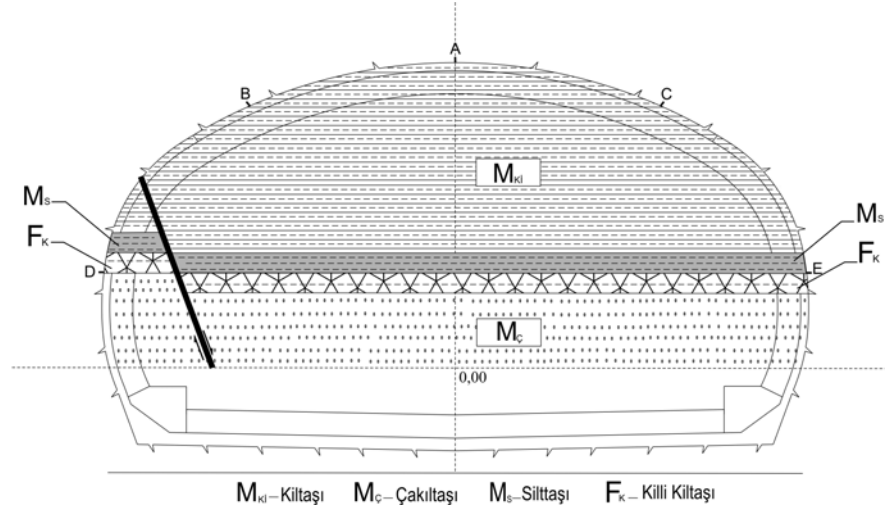
Şekil 4.33. Fay zonu civarı jeolojik yapı ve tünel açımı gerçekleşmeden önceki fayın öngörülen olası konumu



Şekil 4.34. Faylı zon civarı jeolojik yapı ve tünel açımı gerçekleştik sonraki fayın konumu

#### 4.6.4 Çalışma Alanında Karşılaşılan Fay' ın Ayna Kesitleri Üzerinde Gösterimi

Göztepe İstasyonu civarında 2+449.25' inci km. de tip2 kesitinde Kuzeydoğu-Güneybatı doğrultulu  $60^0$  Güneydoğu eğimli normal atımlı fay ile karşılaşılmış olup faylı zon geçişindeki aynanın görünümü aşağıda şekil 4.35' de verilmektedir.



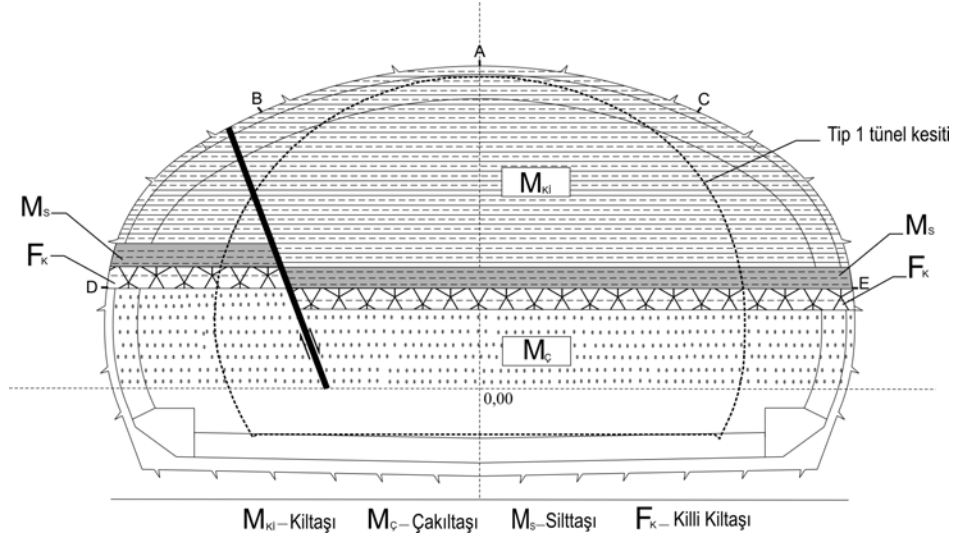
Şekil 4.35 Göztepe İstasyonu civarı 2+449.85' inci km. de Tip-2 kesitinde karşılaşılan fay ve ayna kesiti

2+449.85' inci km. de tip2 kesitinde aynada üst kısımda  $M_{KI}$  olarak isimlendirilen sarımsı yeşilimsi renkli, orta sert ve orta bozunmuş, kuru, düzgün istifli kıltaşı, hemen altında gri renkli orta sert, orta bozunmuş kuru ve stabil kumlu silttaşı birimi, hemen altında kahverengi renkli, zayıf, yüksek derecede bozunmuş, kuru fay kili-kıltaşı ( $F_K$ ), ve ray kotuna yakın bölgede gri renkli zayıf-orta sert, yüksek derecede bozunmuş, kuru kumlu çakıltaşı ( $M_C$ ) gözlenmiştir.

Göztepe İstasyonu civarında 2+447.75' inci km. de tip2 kesitinde Kuzeydoğu-Güneybatı doğrultulu  $60^0$  Güneydoğu eğimli normal atımlı fay ve aynanın görünümü aşağıda şekil 4.36'da verilmektedir.

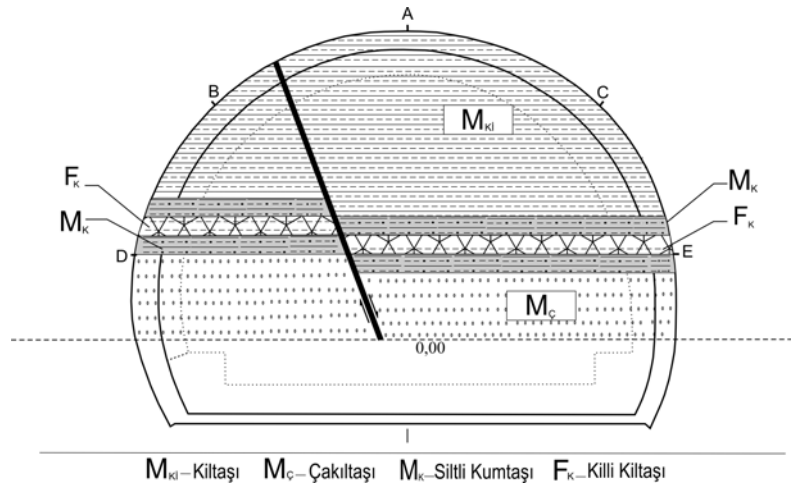
Aynanın üst kesiminde sarımsı, yeşilimsi-gri renkli, zayıf-orta sertlikte, orta bozunmuş, kuru, kayma düzlemi nadir olan, düşük derecede silt içerikli kıltaşı gözlenmiştir. Kıltaşının hemen altında gri renkli, orta sert, 30-60 cm kalınlığında silttaşı birimi yer almaktadır.  $F_K$  olarak isimlendirilen, kahverengi renkli, zayıf,

yüksek derecede bozunmuş, kuru killi çakıltaşı birimi gözlenmiştir. Ray kotu seviyesinde ise yine gri renkli, bozunmuş, kuru, yer yer ezilmiş çakıltaşı birimi bulunmaktadır.



Şekil 4.36. Göztepe İstasyonu civarı 2+447.75' inci km. de Tip-2 kesitinde karşılaşılan fay ve ayna kesiti

Göztepe İstasyonu civarında 2+445.75' inci km. de tip1 kesitinde Kuzeydoğu-Güneybatı doğrultulu  $60^0$  Güneydoğu eğimli normal atımlı fay ile karşılaşılmış olup fay zonu geçişindeki aynanın görünümü aşağıda şekil 4.37' de verilmektedir.

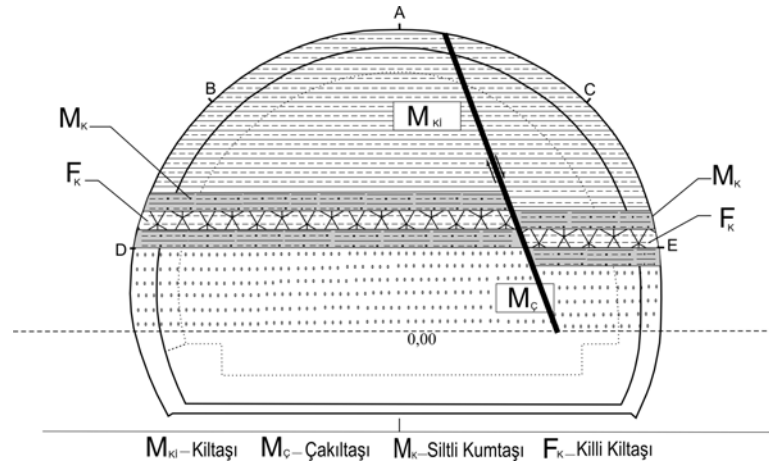


Şekil 4.37 Göztepe İstasyonu civarı 2+445.75' inci km. de Tip-1 kesitinde karşılaşılan fay ve ayna kesiti

Şekil 4.37' de belirtilen km. de aynanın üst kısmında  $M_{Kİ}$  olarak isimlendirilen sarımsı-yeşilimsi gri renkli, zayıf orta-sert, bozunmuş, dayanımı stabil, kuru, kayma ve kopma düzlemleri nadir olan az siltli kıltaşı,  $M_K$  olarak isimlendirilen gri renkli, orta sert, orta bozunmuş, dayanımlı, 30-60 cm kalınlığında düzgün istifli siltli kumtaşı, kumtaşının hemen altında kahverengi renkli, zayıf, yüksek derecede bozunmuş, kayma düzlemleri kuru fay kili-kıltaşı ve hemen altında  $M_C$  olarak isimlendirilen gri renkli zayıf, bozunmuş, kuru, yer yer ezik kumlu çakıltaşı gözlenmiştir.

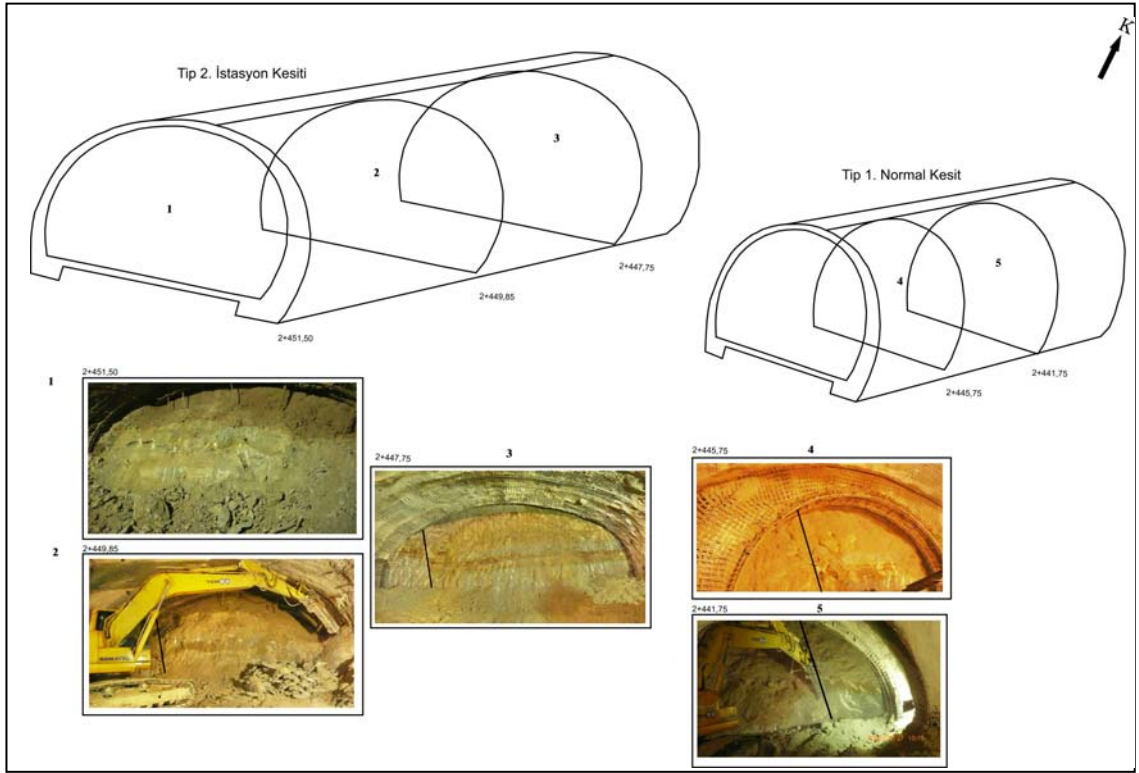
Göztepe İstasyonu civarında 2+441.75' inci km. de tip1 kesitinde Kuzeydoğu-Güneybatı doğrultulu 600 Güneydoğu eğimli normal atımlı fay ile karşılaşmış olup fay zonu geçişindeki aynanın görünümü aşağıda şekil 4.38' de verilmektedir.

2+441.75' inci km. de tip1 kesitinde aynada üst kısımda  $M_{Kİ}$  olarak isimlendirilen sarımsı yeşilimsi renkli, orta sert ve orta bozunmuş, kuru, düzgün istifli kıltaşı zaman zaman silttaşı birimi gözlenmiştir.

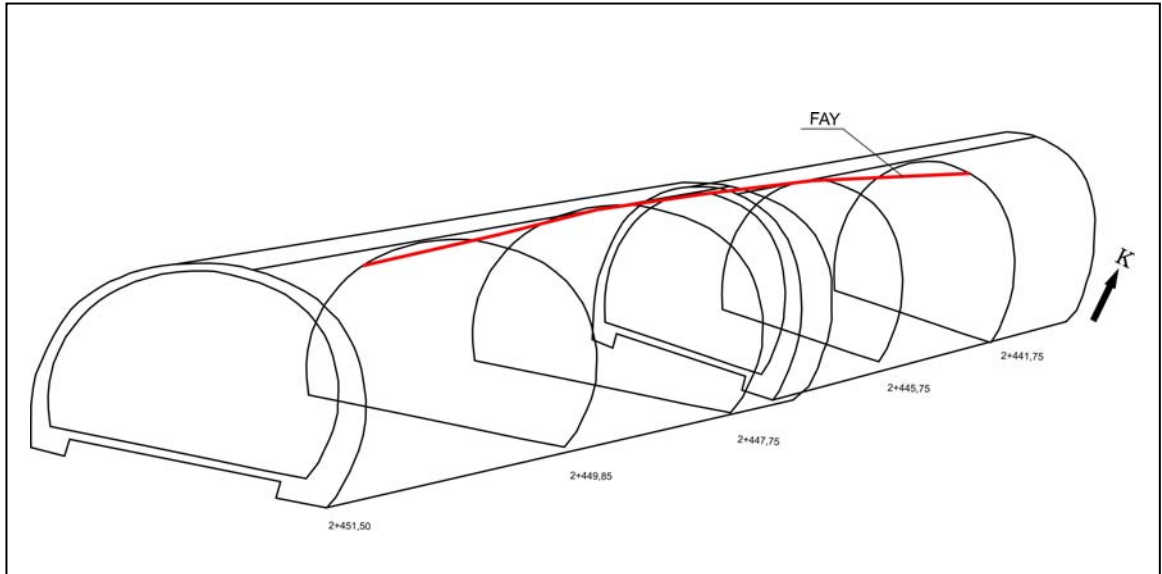


Şekil 4.38 Göztepe İstasyonu civarı 2+441.75' inci km. de Tip-1 kesitinde karşılaşılan fay ve ayna kesiti

Bu birimin altında gri renkli orta sert, orta bozunmuş kuru ve stabil kumlu silttaşı birimi, hemen altında kahverengi renkli, zayıf, yüksek derecede bozunmuş, kuru kıltaşı ( $F_K$ ), ve ray kotu civarında gri renkli zayıf-orta sert, yüksek derecede bozunmuş, kuru çakıltaşı ( $M_C$ ) gözlenmiştir.



Şekil 4.39 Tip2 ve Tip1 tünellerinde karşılaşılan fay zonunun ayna kesitleri üzerinde gösterimi.



Şekil 4.40 Tip2 ve Tip1 tünellerinde karşılaşılan fayın 3 boyutlu gösterimi.

#### 4.7 İzmir Metrosu II. Aşama Göztepe İstasyonu Yakınındaki Fay Zonu Geçişinde Uygulanması Önerilen Destekleme Yöntemleri

Metro tünellerinde destek tipinin belirlenmesinde bir takım parametreler vardır. Kayanın stabilitesi, tünel üstündeki örtü kalınlığı, tünel güzergahı üzerindeki yapıların veya yapılaşmanın niteliği ve projelendirme aşamasında tünel içerisindeki gerilmelerin yoğunlaştığı bölgeler; deformasyonların durumu (tünel içi konverjanslar ve tünel üstü bina oturma/dönmeleri ve bunları saptamaya yönelik ölçümler) tünel aynasının jeolojik koşulları (fay zonu, ezik bölümler, çatlak sıklığı, tabaka kalınlığı, aşırı sökülme durumu vb.) kayanın jeomekanik özellikleri, kazılabilirlik, gözlemsel veriler ve deneyim, kazı destekleme tipinin belirlenmesinde temel unsurlardır (Onargan ve Aksoy, 2006).

Tünel stabilitesini, kazı aynası ve üzerinde yer alan kayaç formasyonlarının kütleli ve yapısal özellikleri belirler. Eğer kaya stabilitesi düşükse buna bağlı olarak destekleme tipi ağırlaştırılır. Aynı şekilde tünel üzerine yük olarak gelen örtü kalınlığı da destekleme ile ters orantılıdır.

Belirlenen güzergahtaki tünellerin şehir içinde açılması nedeniyle yüzeyde oluşabilecek deformasyonların binalara, yerüstü ve yeraltı tesislerine zarar verme riski oldukça yüksektir. Bu durumda, destekleme elemanlarının maksimum emniyeti sağlayacak şekilde artırılması kaçınılmazdır. Tünellerin giriş çıkış ağızları ile bağlantı tünel kesişim bölgeleri kazı kesit alanının büyük olması nedeniyle ağır destekleme yöntemleri kullanılmalıdır. Örtü kalınlığının az olması durumunda (tünel çapı D kabul edilirse, örtünün 1,5-2 D dolaylarında olması durumu) kaya şartlarına bakılmaksızın en ağır destekleme tipinin kullanılması bu tip tünelticilik faaliyetlerinde sıkça karşılaşılan bir durumdur.

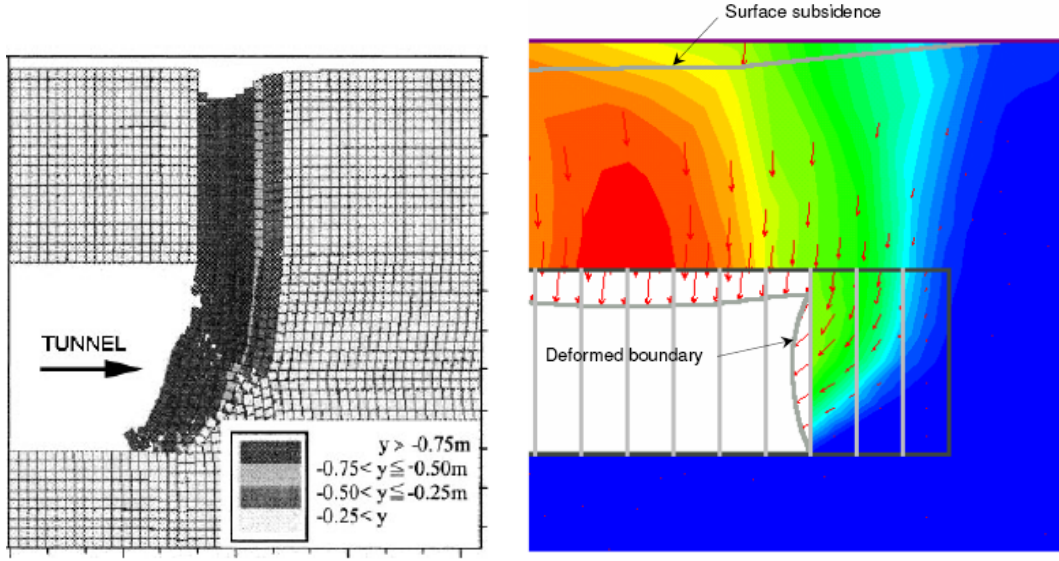
Detaylı araştırmaları yapılan tünelin bu bölümünde örtü kalınlığı, tünel yüksekliğinin yaklaşık 1,8 katı, tünel genişliğine ise yaklaşık olarak eşit görülmektedir. Tünelin aynı şekilde, binalar ve yerüstü tesislerinin altından geçeceği

düşünüldüğünde (yapı temeli ile tünel üst kotu arasındaki örtü kalınlığı 1,5-2 D değerinden az ise), sağlam kaya şartlarında 15-20 m önce, zayıf kaya şartlarında ise 30 m önceden ağır destekleme tipine geçilmesi uygundur. (Onargan ve Aksoy, 2006).

Literatürde bu konuda farklı sınıflandırma sistemleri kullanılmakta olup, burada seçilecek tahkimat tipinin belirlenmesinde, gerek İzmir Metrosu I. aşama projesinde olduğu gibi, gerekse İstanbul ve Ankara illerindeki metro kazılarında baz alınan “Karayolları Teknik Şartnamesi” olarak da bilinen şartname ve içerisinde geçen ÖNORM B220 standartları göz önüne alınmıştır. Sınıflamada “A” olarak gösterilen kaya kütleleri genellikle stabil olup elastik davranış gösterirlerken “B” olarak gösterilen kaya kütlelerinin davranışı, yapısal kenetlenme ve/veya çekme mukavemeti azlığından ötürü hızlı gevşeme ve ayrışmaya meyillidir. C sınıfı olarak gösterilen kaya kütlelerinin davranışı genellikle, kaya basıncının yeniden dağılımı süreci ve/veya deplasman sınırlamaları sonunda meydana gelen gerilmelerin kaya mukavemetinden daha büyük olduğunu göstermektedir. Kaya kütlelerinin aşırı gerilmelere maruz kalması ile kabuk atma, burkulma, kesme ve boşluğa doğru plastik hareket gibi zafiyet mekanizmaları oluşturmaktadır (Şekil 4.41). İncelenen Fay zonu ve yakını, bu tip davranış gösterebilecek kazı ortamlarına sahiptir.

C sınıfı olarak adlandırılan sınıflama, iyiden kötüye doğru giden C1 den C5 e kadar farklı bir görünüm sunar. İzmir Metrosu II. aşama güzergahında açılan tünellerin sığ tünel olması, bölgedeki binaların çoğunlukla 20-25 yıllık ve 5-9 katlı olması ve günümüz yönetmeliklerine ve kontrol sistemlerine uygun inşa edilmemiş olması, tünellerdeki konverjansların ve binaları etkileyebilecek oturmaların kontrol altına tutacak bir kazı-destekleme sistemini zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle özellikle çok daha zayıf olan zonların geçişinde kullanılacak kaya sınıfları büyük önem kazanmaktadır.





Şekil 4.41 Sığ tünellerde zayıf formasyonlarda karşılaşılan boşluğa doğru plastik hareket

İnceleme alanında gözlenen kazıda geçilecek kaya ve zemin formasyonları genelde “C4” sınıfına kadar olan kazı ortamı şartları göstermektedir. Düşük kohezyon ve dayanıma sahip kaya kütlelerini içeren güzergahta, kaya kütlelerinin plastik davranışı kısa süre desteksiz bırakılan bölünmüş kazıda bile, tünel içine malzeme akışına sebep olabilecek yapıdadır. Düşük kohezyon kazıda birçok alt bölünmeyi gerektirecektir. Önceden süren montajı yapılmadan veya süren ve kazı ile birlikte püskürtme beton kaplaması yapılmadan, zeminin kendini tutma süresi güzergahın büyük bölümünde olanaksız görülmektedir.

Akıcı “C4” yer yer ise baskılı ve çok baskılı “C2-C3” kaya kütlesi davranışında bulunabilecek olan kazı ortamları içerisinde özellikle Göztepe İstasyonunun, Altındağ Formasyonu içerisinde yer alan litolojik birimlerde, fay zonuna çok yakın mesafede açılacağı görülmektedir. Tip 2 tünel kazılarının hemen hemen tümünde karşılaşılabilecek formasyonlar, davranış ve özelliklerinde önemli etkisi olabilecek su sızıntıları ve konsantre su akışları görülebilecek nitelik arz etmektedirler. İstasyon kazılarında açılacak olan Tip 2 istasyon tünel kazılarının tümünde, aynada stabilite problemleri ve yeryüzünde zemin oturmaları sonucu yapılarda deformasyon meydana gelme olasılığı yüksektir. İncelenen güzergahta yer altı suyu dinamiği, kazı ortamı, formasyonların mühendislik özellikleri ve zamana bağlı davranışları

tamamen yeryüzünde ve tünel içerisinde deformasyona uygun gerilme koşulları oluşturabilecek bir yapı sunmaktadır.

#### **4.7.1 Fay Zonu Yakını Tip 2 Tünel Güzergahında Yer Alan Kayaçlar İçin Kaya Tahkimat Etkileşim Analizleri ve Tasarım Önerileri**

Çalışmanın bu bölümünde Rocscience (Geomechanics Software & Research) firmasına ait RocSupport programı kullanılmıştır. Bu program özellikle zayıf kayaçlarda kaya tahkimat etkileşim analizleri ve deformasyon analizleri yapan bir programdır. Tünel tasarım parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan bir program özelliğini taşıyan yazılım deterministik ve olasılık esaslı simülasyon yapabilen bir program özelliğindedir.

Programın kullanılmasında sahada ve laboratuvarında yapılan analiz sonuçları kullanılmış olup elde edilen analiz sonuçları tahkimat tasarım parametrelerinin belirlenmesinde etkin rol oynamıştır. Kaya tahkimat etkileşimine dayalı yapılan analizlerde; yumuşak kayaçlar için izostatik ve sulu ortamlar için hidrostatik gerilim koşulları baz alınarak dairesel açıklık etrafında oluşan plastik zonun kalınlığı ve zemin reaksiyon eğrilerinin elde edilmesi esasına dayalı yaklaşımlar temel alınmıştır.

Bu analizlere göre açıklık ilerlemesine bağlı olarak kayanın yenilme (failure of the rock) durumları ve projede öngörülen ve uygulanmakta olan tahkimat sisteminin stabilite açıdan irdelemesi tip 2 tünelleri için gerçekleştirilmiştir.

Analizlerde açıklık ömrü 100 yıl ve üzeri varsayılarak ele alınmıştır. Metro tünellerinin özgün yapısı dikkate alınarak hesaplanan yük ve yenilme koşullarında güvenlik faktörlerinin minimum 10 alınması gerektiği düşünülmüş ve tasarımlar bu güvenlik sayısına göre yapılmıştır. Analizler yapılırken mevcut projede öngörülen tasarım parametreleri ve uygulama koşulları da göz önünde bulundurulmuştur.

Tablo 4.9 Kaya tahkimat etkileşim analizinde incelenen tahkimat parametreleri

Tahkimat Türü	Tahkimat Çeşitleri
Çelik Set	Çelik Kafes Kiriş İksa Profil 32 kg/m
Kaya Bulonu	20 mm, 17 mm 20 mm Rebar
Püskürtme Beton	28 günlük dayanım 21 Mpa, kalınlık 20 cm

Altındağ Formasyonu (Kiltaşı-Silttaşı-Çakıltası-Konglomera) ve Bornova Karmaşığı (Çamurtaşı-Kumtaşı-Kiltaşı-Silttaşı) formasyonlarını içeren ve Güzargah üzerindeki dört istasyon tüneli için (Göztepe-Poligon-Hatay ve F.Altay Tip 2 tünellerini temsilen) analiz verilerine göre yapılan analiz sonuçlarına göre, çelik tahkimat olarak “Çelik Kafes Kiriş İksa” seçilmiş ve halen uygulanmakta olan “Çelik Kafes Kiriş İksa Sistemi” nin yeterli olabileceği düşünülmüştür. Ancak, çelik tahkimat ile birlikte mutlaka “Çelik Hasır” kullanılmalı, ayrıca “Püskürtme Beton” uygulamasının yapılması önerilmektedir. Sistem gereği “Kaya Bulonu” kullanılması da zorunlu görülmektedir. En uygun civata türü olarak yeraltı suyu etkisi nedeniyle 20 mm çaplı reçineli (tüm kolon boyunca ankraj) kaya saplaması kullanılmıştır. Analiz edilen sistem için elde edilen maksimum güvenlik faktör sayısı da aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çalışmada analiz edilen tahkimat sistemi;

- Çelik Kafes İksa- Kaya Bulonu ve Püskürtme Beton Tahkimat Sistemi

olarak verilmiştir.

Tablo 4.10 Kaya tahkimat etkileşim analizi veri ve sonuçlar Çizelgesi (1)

Özellikler	Simge	Değer
Güvenlik Faktörü	$u_p$	9,09
Tahkimat Basıncı		0.189 MPa
<b>Tahkimatlı Durumda:</b>		
Plastik Zon Yarıçapı		11,9 m
Yan Duvar Yer Değiştirme Miktarı		11 mm
Tünel Konverjansı		0,2 % (20 mm)
<b>Tahkimatsız Durumda :</b>		
Plastik Zon Yarıçapı	$r_p$	17,2 m
Yan Duvar Yer Değiştirme Miktarı	$u_p$	26 mm
Tünel Konverjansı		0,3 % (30 mm)
<b>Tünel Aynasında Meydana Gelecek Deformasyon :</b>		
Tünel Yan Duvarlarında		8 mm
Tünel Konverjansı		0,1 % (10 mm)
<b>Tünel ve Kaya Parametreleri:</b>		
Tünel Yarıçapı	$r_o$	7,5 m.
Yerinde Birincil Gerilme	$p_o$	0.38 MPa (Tünel derinliğine ve ortalama kayaç yoğunluğuna göre hesaplanmıştır.)
Tünel Derinliği	<b>H</b>	15 m
Kayaç Türü		Çamurtaşı-Kiltası-Silttaşı
Kaya Kütlesi Birim Hacim Ağırlığı	$\gamma$	0.023 MN/m <sup>3</sup>
Young's Modülü (x)	<b>E</b>	446 MPa
Kaya Kütlesinin Yerinde Basınç Dayanımı (x)	$\sigma_{cm}$	0,19 MPa
İçsel Sürtünme Açısı	$\phi$	16.75°
Poisson Oranı	$\mu$	0.3
Jeolojik Dayanım İndeksi	<b>GSI</b>	22
Intak Kaya Numunesi Tek Ek. Basınç Dayanımı	$\sigma_{ci}$	5 MPa
Kaya Kütle Sabitesi	$m_j$	4

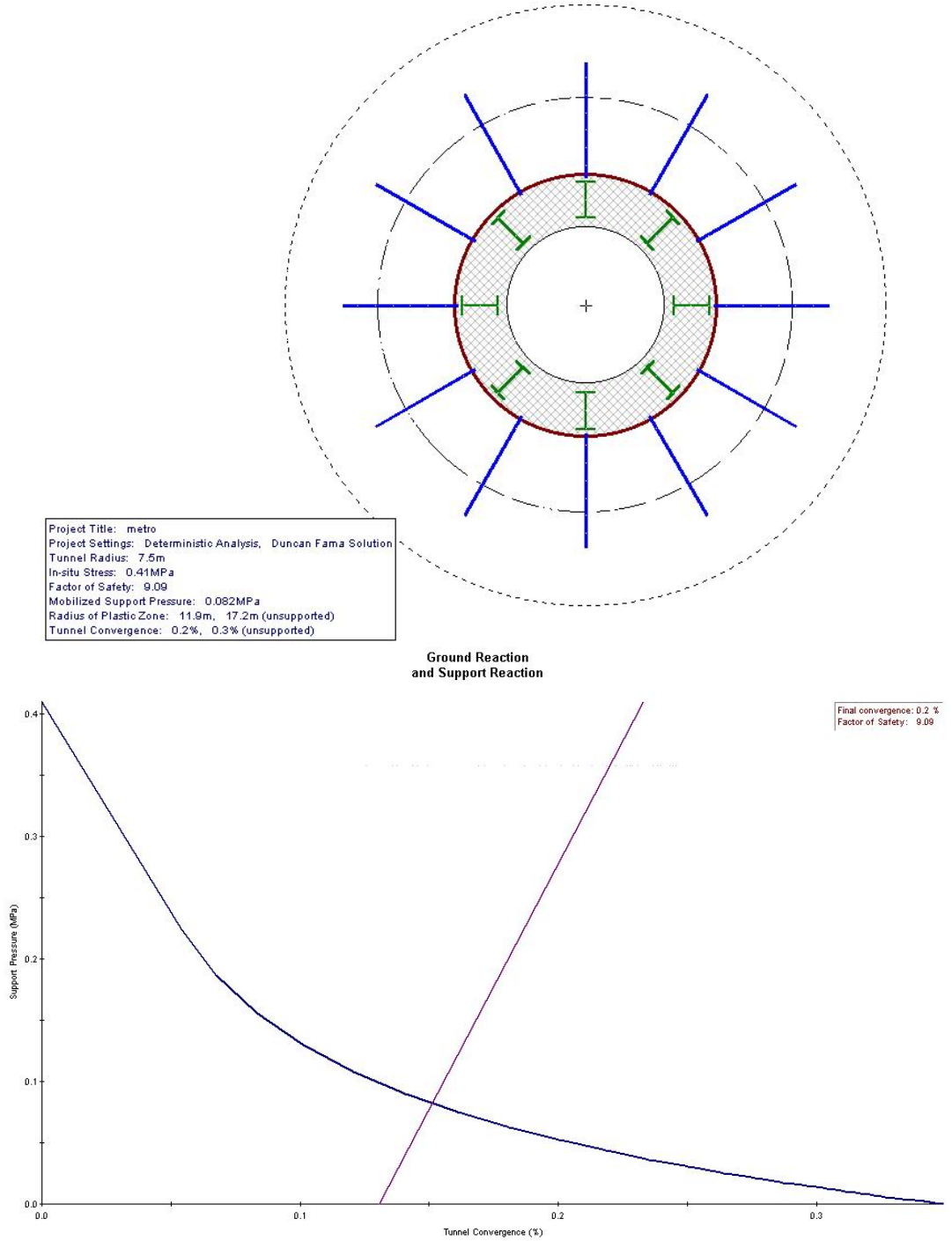
x Hoek-Brown kriterine göre belirlenmiştir.

Tablo 4.11 Kaya tahkimat etkileşim analizi veri ve sonuçlar çizelgesi (2)

Özellikler	Değer
<b>Tahkimat Parametreleri</b>	
<b>Kombine Tahkimat Sistemi (Çelik Set + Kaya Civatası + Şatkrit)</b>	
Maksimum Tahkimat Basıncı	0.747 MPa
Maksimum Ortalama Gerilim	0.187 %
Tünel Aynasından Olan Mesafe	2 m
Başlangıçta Oluşacak Tünel Konverjansı	0.1 % (10 mm)
Başlangıçta Oluşacak Tünel Yan Duvar Yerdeğiştirme	10 mm
<b>Kaya Civatası :</b>	
Tipi	19-20 mm Kaya Civatası
Maksimum Tahkimat Basıncı	0.184 MPa
Maksimum Ortalama Gerilim	0.2 %
Kaya Civatası Paterni	1 x 1 m <sup>2</sup>
<b>Çelik Set Tahkimat Sistemi :</b>	
Tip	Kafes Çelik İksa
Özellikler	Ağırlık = 32 kg/m
Maksimum Tahkimat Basıncı	0.303 MPa
Maksimum Ortalama Gerilim	0.26 %
Çelik Set Aralığı	1 m
<b>Şatkrit :</b>	
Özellikler	Kalınlık : 20 mm 28 Günlük Dayanım 20 MPa
Maksimum Tahkimat Basıncı	0.26 MPa
Maksimum Ortalama Gerilim	0.1 %

Göztepe-Poligon-Güzelyalı-F. Altay İstasyonlarını içeren Tip 2 tünel kazısı kaya-tahkimat etkileşim analiz sonuçlarına göre çelik kafes İksa+çelik hasır+kaya bulonu+püskürtme beton tahkimat sisteminin kullanılması halinde, 9 güvenlik faktörü ile oluşacak tünel konverjanslarının 20 mm civarında gerçekleşeceği belirlenmiştir. Etkin kontrollü drenaj önlemleri alınsa ve tünel içerisinde yeraltı su akışı önlenirse bile sistem yerüstü yapıları bakımından güvenli görülmektedir.

Tünelin bu kesimleri için ön sağlamlaştırma ve yer üstü yapılarında da etkin sağlamlaştırma önlemleri alınması uygun görülmektedir.



Şekil 4.42 Açılacak Tip 2 tünelleri için kaya – tahkimat etkileşim analizi sonucu elde edilen etkileşim grafiği

Bu aşamadan sonra, tünel güzergahında yapılan laboratuvar çalışmaları, yerinde ölçümler ve daha önceki tünelcilik faaliyetlerinden kazanılan deneyimler sonucu İzmir Metrosu II. aşama projesinde, özellikle geniş kesit istasyon tünellerinde, fay zonu yakınlarında, tünelin açılacağı ortam parametrelerine bağlı olarak ilerleyen bölümlerde yapılacak sayısal modellemeler de baz alınarak uygun ve güvenli destekleme yöntemi geliştirilmesi hedeflenmektedir.

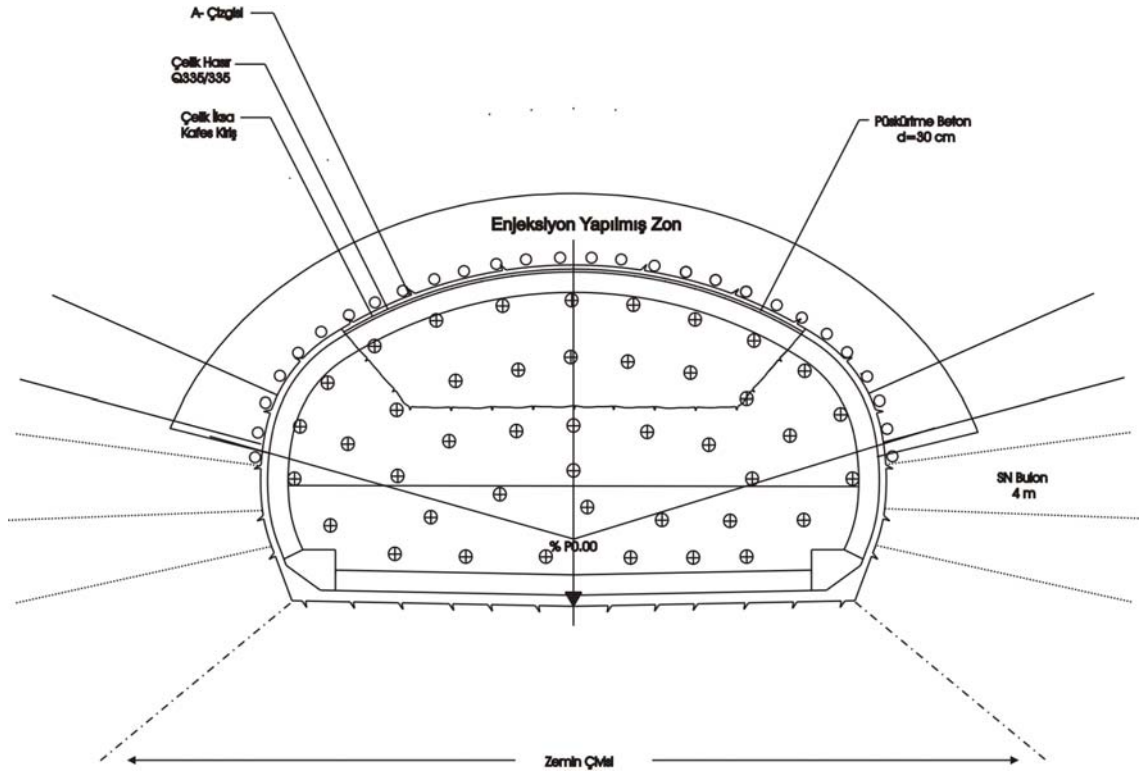
#### **4.7.2. Fay Zonu Yakınında ve Riskli Bölgelerde Açılacak Tünellerde Uygulanacak Destekleme Yöntemi ve Elemanları**

Yukarıda yapılan analizler, tünelin açılacağı ortamın düşük mühendislik parametreleri fay zonu yakınlarında ya da risk oluşturan tünelin diğer bölgelerinde ilave önlemler alma zorunluluğu doğurmaktadır.

Yumuşak zemin koşullarında açılan tünellerde, tünel aynasının duraylılığını sağlamak amacıyla uygulanan bir kaç yöntem bulunmaktadır. Bunlar, zemin çivileri, fibergROUT kolonları, jetgROUT kolonları ve aynaya pÜSKÜRTME beton uygulaması şeklindedir. Bu yöntemlerden zemin çivileri, fibergROUT kolonları, jetgROUT kolonları aynaya önceden belirlenen deliklerin delinmesi sonrasında delik içerisine belirli basınçta çimento (gerekli ise kimyasal katkı) enjekte edilmesiyle yapılır. Bu yöntemlerden zemin çivisinin uygulaması ise, delinen delik içerisine nervürlü donatı yerleştirildikten sonra uygun kıvamda çimento enjekte edilerek yapılmaktadır. Bu yöntem sayesinde klasik yöntemle olumlu sonuç alınamayan zemin koşullarında tünel ve yüzey emniyeti, verimlilik ve ilerleme hızı gibi performans verileri en üst düzeye çıkabilmektedir. Uygulanmakta olan proje kapsamında önerilen çelik boru süren yöntemi ve elemanlarının en kesiti Şekil 4.43'de verilmektedir. Ancak, yinede kullanılacak destekleme elemanlarının karakteristikleri yerinde yapılacak gözlemler ölçüm ve uygulamalar esnasında revize edilebilir.

Boru kemer yönteminde kullanılan destekleme elemanları genel olarak klasik yöntemle benzerlik göstermektedir. Bunlar, bulonlar, çelik hasır, iksa, pÜSKÜRTME

beton uygulamalarıdır. Bununla beraber, uygulama klasik yöntemden bazı farklılıklar gösterir. Örneğin klasik yöntemde bulonlar homojen veya daha önceden belirlenen bir geometride çakılır iken, bu yöntemde şemsiye boruların olduğu bölgelere bulon çakılmaz.



Şekil 4.43 Projeye önerilen çelik boru kemer ve ön sağlamlaştırma sistemi en kesit görünümü

İzmir Metrosu II. aşama projesi kapsamında uygulanması önerilen boru kemer yönteminde, başlangıçta şemsiye borularının çakılması için gerekli olan genişletme kazısı yapılmalıdır. Bu kazılarda 3 metrelik bir ilerleme içerisinde, tünelin normal kesitinin 50 cm. dışına genişlemesi sağlanmalıdır. Şemsiye borular uygulanan yapıldığı bölgede, tünel aynasının çevresine 30 cm aralıklarla çakılmalıdır. Burada kullanılan çelik boruların çapı  $\phi = 130$  mm, et kalınlığı 6,3 mm olup, eğimi 5-8<sup>0</sup> baş yukarı olacak şekildedir. Amaç kazı yapılacak bölgenin üst kısmında bir kemer oluşumu sağlanmasıdır.



Boru kemer yönteminde ile birlikte kullanılan zemin çivileri kazı öncesi yüzey oturmalarını denetleyen destek elemanlarıdır. Zayıf formasyonlarda ve sık tünellerde yüzey oturmalarının yarısına yakını, tünel daha yüzeydeki ölçüm istasyonuna gelmeden önce oluşmaktadır (Onargan ve diğer., 2006). Gelen yükler nedeniyle aynada plastikleşen ve dayanımını yitiren malzeme hacmi kadar yüzeyde oturmalar olacaktır. Bunların önlenmesi için tünel aynasındaki zeminin içsel parametrelerini olumlu yönde arttırmak gereklidir. Bu amaçla gerekli görülen yerlerde, tünel aynasında 12 m uzunluğunda,  $10^0$  baş aşağı eğimde alt yarıda 4 m<sup>2</sup>/adet, üst yarıda 2 m<sup>2</sup>/adet,  $\phi=130$  mm deliklerin delinmesi ve içerisine  $\phi= 14$  mm ST-3 donatı yerleştirilmesi uygundur. Daha sonra delik içleri enjeksiyon şerbeti ile doldurulacak ve zemin çivileri çakılacaktır. 12 m boyunda olan kolonların 6 m'si kazı esnasında kırılacaktır. Kalan 6 m'lik bölüm ise bir sonraki ilerleme turunda çakılarak zemin çivileri bindirme yapacaktır. Uygulama esnasında ayna stabilitesine bakılarak zemin çivilerinin sayısı, yeri ve boyutları revize edilebilecektir.

Şemsiye boruları ve zemin çivisi elamanlarının yanında gerektiğinde jetgrout ya da fibergROUT kolonlar kullanılabilir. Gerektiğinde kullanılacak olan jetgrout kolonlarının boyları 9-12 m. arasında olup şemsiye borularının çakılması işleminden hemen sonra enjeksiyon yapılarak, hem borunun içerisi hem de boru ile delik arası kalan boşluk, basınçlı çimento ile doldurulmalıdır. Bu yöntemde kolonlar, kazı ile destekleme arasında geçen sürede, bir ucu konsolide edilmiş aynaya, bir ucu iksaya basan kiriş olarak çalışıp, üzerine gelen yükü deformasyona imkan vermeden mukavemet sağlayacaktır. Ayrıca, desteklemesi bitmiş bölgedeki yük dağılımının homojen olması da bu sayede sağlanacaktır.

Enjeksiyon ve Jet-grouting uygulamalarında en çok kullanılan malzemeler; portland çimento, çok ince çimento (microfine cement), bentonit, sodyum silikat-çimento, lignin grout, ure reçine grout, acrylate grout (AC-400) olarak sayılabilir. Bunlardan hangisinin ve/veya hangilerinin kullanılacağı her zeminde yapılacak etütler ile mümkün olabilmektedir. İncelenen bölümde her ne kadar tünel kazısı kaya özelliğindeki formasyonda açılrsa da, tünelin üzerinde yer alan formasyonlar zemine yakın ve zemin özelliği gösteren litolojik birimler içermektedir. Bu tip kazı koşulları

için enjeksiyon malzemesi olarak mikro çimento, polüreten veya koloidal silika bazlı enjeksiyon sistemlerinin daha uygun olacağı düşünülmektedir.

Sonuçta, çelik boru kemeri yapılıp, zemin çivileri çakılan kazı ve desteklemesi yapılmış bölümlerde, tünel içerisine yeraltı suyu girişinin miktarına göre belirlenecek çimento/su oranı, mikro çimento kullanımı veya poliüretan-kimyasal enjeksiyon ile çözümlenerek tünel su girişinin de kontrolü mümkün olacaktır. Enjeksiyon çalışmaları ve püskürtme beton ile zemin kontağındaki boşluklar ve destekleme öncesi oluşmuş gevşemiş bölümler doldurulacağından, deformasyonlar minimuma inecektir. Bu da hem tünel emniyetini hem de tünel ve etrafında oluşacak deformasyonların yeryüzüne minimum seviyede iletilmesini sağlayarak emniyetli bir çalışma alanı yaratacaktır.

## **BÖLÜM BEŞ**

### **SAYISAL MODELLEME**

Çalışmanın bu bölümünde, İzmir Metrosu II. Etap projesi kapsamında sığ tünel koşullarında açılmakta olan tüneller etrafında oluşacak deformasyonların ve buna bağlı olarak gelişen toplam yerdeğiştirmelerin bilgisayar destekli sayısal analizleri yapılarak elde edilen sonuçlar yorumlanmaya çalışılmıştır.

Yapılan analizlerde Phase2 v6.0 programından yararlanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre yapılan değerlendirmelerde, özellikle güncel çalışmalarda ve literatürde baz alınan Strength Factor (güvenlik faktörü), Total Displacement (toplam yerdeğiştirme) ve gerilme durumu gibi parametreler üzerinde detaylı olarak durulmuştur. Analizler sonucunda elde edilen bulgular, yer yer güzargah üzerinde elde edilen ölçüm sonuçları ile karşılaştırılarak, analizlerin doğruluk dereceleri ve bu analizlere bağlı olarak alınması gerekli önlemler hakkında da yorumlar yapılmıştır.

#### **5.1 Phase2 Sayısal Modelleme Programı ve Kısa Tanıtımı**

Phase2 sayısal (nümerik) modelleme programı, sınır elemanları yöntemi, sonlu elemanlar yöntemi ve bu iki yöntemin tekniklerini birlikte kullanan karma yöntemlerden istenilen herhangi birini kullanarak , tünellerin gerilme ve deformasyon analizini değerlendiren bir yazılımdır. Program Hoek. E. Yönetimindeki Toronto Üniversitesi Kaya Mühendisliği Grubu tarafından, tünellerin Hoek E. ve Brown E.T.' nin önerdiği yöntemlere göre tasarımı için özel olarak geliştirilmiştir. (Hoek ve Brown,1995) Sonlu elemanlar ile sınır elemanları yöntemlerinin tekniklerini birleştiren melez (hibrid) yöntemler içerisinde sınıflandırılan bu metod özellikle yeraltı kazılarında tercih edilen bir yöntemdir.

Bu yöntemde, kazıyı çevreleyen kaya kütlesi sonlu elemanlar, kazı çeperi ile kazıya uzak olan bölge ise sınır elemanları ile modellenir. Böylece, doğrusal

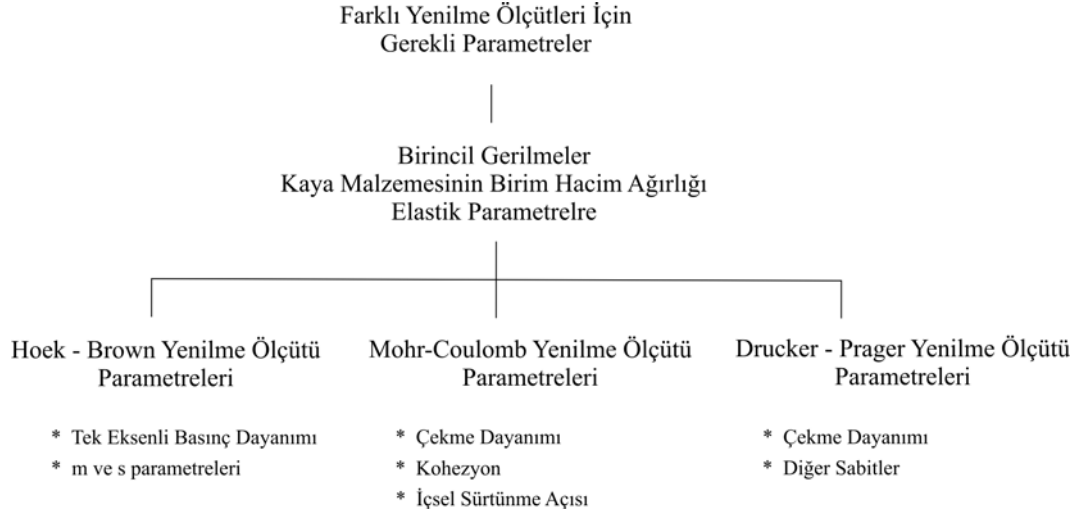
olmayan (elasto-plastik) ve heterojen davranış gösteren kaya kütlesi, gerektiğinde süreksizlik düzlemleri ile birlikte ele alınabilir. Modellemede kullanılan her eleman düğüm noktalarının koordinatları ile tarif edilen değişik geometriye, izotropik ve ortotropik malzeme özelliklerine sahip olabilir. Bu analizler için gerekli bilgiler ise; birim hacim ağırlık, elastisite modülü, poisson oranı, zeminin içsel sürtünme açısı ve kohezyon olarak verilmektedir.

Değişik sonlu elemanlar aynı modelde, hertürlü geometriyi tanımlayacak ve yapısal süreksizliği sağlayacak şekilde bir araya getirilebilir. Modelde kullanılan nokta, eleman, malzeme sayısı, yükleme ve sınır koşulları ile ilgili hemen hiçbir sınırlama yoktur. Analizde kullanılacak modelin büyüklüğü tamamen programın kullanıldığı bilgisayarın kapasitesine bağlıdır. Program, elemanlarda oluşan genel (global) gerilmeler ile asal gerilmeleri ve deformasyonları, istenen kırılma kuramına göre plastikleşme bölgelerini ve güvenlik katsayılarını, her türlü yükleme ve kazı aşaması için ayrı ayrı olmak üzere, bilgisayar çıktısı ve grafik çizimler halinde verebilmektedir.

Çalışmada kullanılan Phase2 sayısal modelleme programı genellikle 2 boyutlu modellemelerde kullanıldığı gibi bazı kesitler için 3 boyutlu analizler yapmak olasıdır. Program üç farklı yenilme ölçütüne göre sayısal modelleme yapabilmektedir. Bunlar ;

- Hoek – Brown Yenilme Ölçütü
- Mohr – Coulomb Yenilme Ölçütü
- Drucker – Prager Yenilme Ölçütü

olarak verilmektedir. Aşağıda şekil 5.1’de yukarıda verilen yenilme ölçütlerine göre yapılacak modellemelerde, programa girilmesi gereken veri grupları gösterilmektedir.



Şekil 5.1 Farklı yenilme ölçütleri için Phase2 sayısal modelleme programına veri olarak girilmesi gerekli olan parametreler.

Tasarımı yapılacak olan tünelin sayısal modeli Phase2 programına, topografik yüzey veya etkili yük yüksekliği, tünel kesitinin son kazı sınırı, kazı aşamalarını gösteren iç sınırlar ve malzeme sınırları olarak tanımlanır. Destek sisteminde yer alan püskürtme beton veya iç kaplama farkı bir malzeme sınır ile, bulonlar ise enjeksiyonlu (fully bonded), 3 ankrajlı veya ön germeli olarak, kazı çevresi ve tünel eksenı boyunca iki yönlü uygulama aralıkları ile birlikte tanımlanabilmektedir. Destek sisteminin alacağı yük toplam yükün yüzdesi olarak tanımlanabilmekte, ancak burada yükün % de olarak ne kadarını destek sistemine taşıttırılacağıın bilinmesi son derece zor bir karardır.

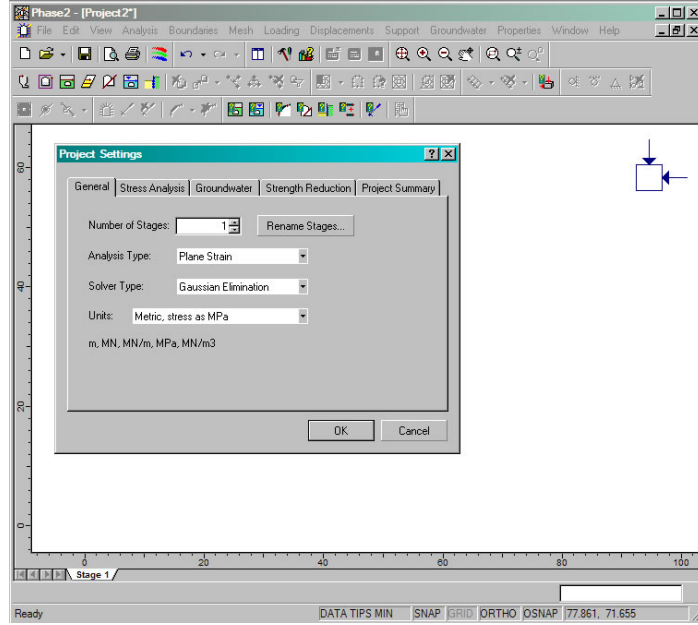
Phase2 programı doğrudan iksa kullanımına izin vermemektedir. Ancak programın çalışma prensibinde kullanılan destek malzemesinin elastisite modülü ( $\epsilon$ ), malzemenin kesit alanı ile çarpılarak ( $\epsilon \times A$ ) şeklinde yükleme kabul ederek buna bağlı olarak kesitin kalınlığı programa girilmektedir. Bu giriş şeklinde çeliğin elastisite modülü değiştirilemeyeceği için kesitin alanı ve buna bağlı kesitin kalınlığı değiştirilmiştir. İksa 100 cm lik bir bölüm için hesaplanmaktadır. Burada kullanılan NPI 120 çelik iksanın alanı ilgili tablodan bulunarak bu alan 100 cm lik kısım için kesitin kalınlığı bulunmuştur. NPI 120 alanı =  $14,20 \text{ cm}^2$  ( $0,1420 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} = 14,20 \text{ cm}^2$ ).

Programın dataları kısmında da görüleceği üzere 0,00142 m. kesitin kalınlığı alınmıştır. İksanın elastisite modülü ise 210.000 Mpa olarak kullanılmıştır. Ankraj hesaplamalarında Ø 26 mm. çapında S420 donatı çeliği kullanılmıştır. Ø 26 mm için dış dibi çapı 20.319 mm dir. Kaya bulonunun taşıyacağı maksimum yük  $F = 7,88$  ton olarak belirtilemektedir. Hesaplarda bu değer Phase2 programına girdi olarak sağlanmıştır.

Ayrıca modellemelerin gerçek yapıyı tam olarak yansıtması bakımından, açılacak tünel güzergahı üzerindeki ilave yükler göz önüne alınmıştır. Tünelin şehir üst yapılarının altından geçeceği ve sığ tünel şartlarının egemen olması nedeni ile “sürşarj yükü” tanımlaması yapılması zorunludur (Güzergah üzerinde hemen hemen her yerde bina ve diğer muhtemel yükler mevcuttur). Burada sürşarj yükü olarak  $1,50 \text{ t/m}^2$  yük kabul edilmiş olup, bu yük zemin üzerindeki yapılardan gelen yük olarak modelde yerini almıştır. Literatürde ve genel uygulamalarda beş katlı ve normal statüde inşa edilmiş bir binanın sürşarj yükü yaklaşık  $1 \text{ t/m}^2$  olarak alınmaktadır fakat güzergah üzerindeki binaların 7- 9 katlı oluşu, inşa tarihlerinin yaklaşık 20-25 yıl öncesine dayanması ve çoğunun temel yapılarının tam olarak bilinmemesi nedeni ile sürşarj yükü  $1,5 \text{ t/m}^2$  olarak alınmıştır. Bahsedilen bu değer programa 0,015 Mn olarak girilmiştir.

Phase2 programı sayısal modelleme aşamaları ve kullanımına yönelik kısa açıklamalar aşağıda verilmektedir (şekil 5.2).

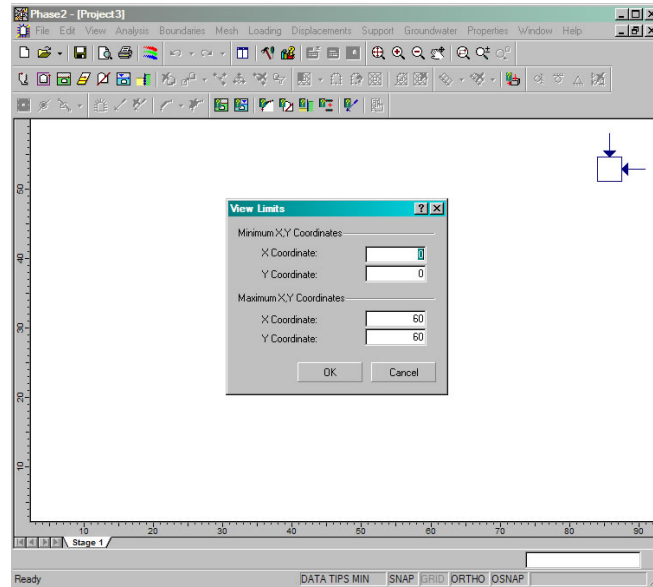
İlk olarak modellenecek açıklık geometrisi programa girilir ve, oluşturulan modelin ekrandan takip edilebilmesi için alan sınırlamaları yapılır.



Şekil 5.2 Phase 2 sayısal modelleme programı ana menü ekranı

### **View : Limits (Sınırlar)**

Programın “ View ” menüsünden yapılan işlemde, yer altında açılacak açıklığın etkilerinin tam olarak gözlenebilmesi için uygun çizim alanı sınırları seçilmelidir.



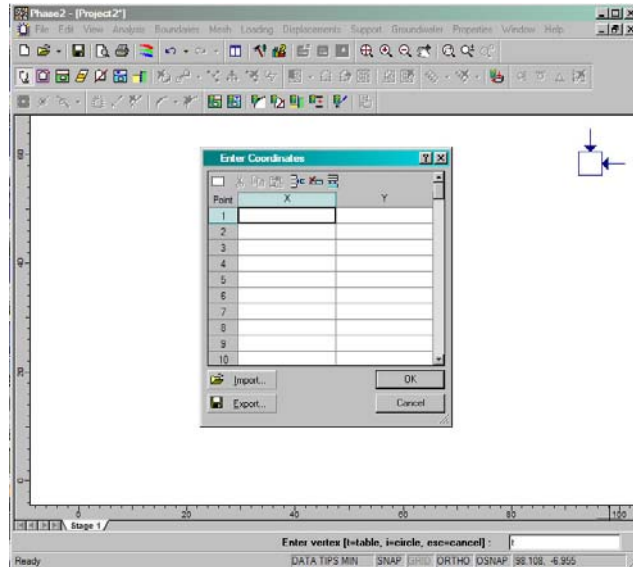
Şekil 5.3 Phase2 sayısal modelleme programı alan sınırlama menüsü

**Boundaries : Add Excavation (Kazı Geometrisi Sınırı)**

Modellemesi yapılacak yer altı açıklığının geometrisi bu aşamada girilir. Kazı geometrisi kabaca elle çizilebildiği gibi, dairesel ya da farklı geometrik şekiller halinde koordinatlar bazında girilebilmektedir.

**Boundaries : Add External ( Dışsal Sınırlar)**

Modellemesi yapılacak yer altı açıklığının açıklık çevresi ve dış sınır şekli bu aşamada belirlenerek (dikdörtgen, daire ya da özel açıklık geometrisi) model analizi yapılacak alan, programda tanımlanmalıdır.

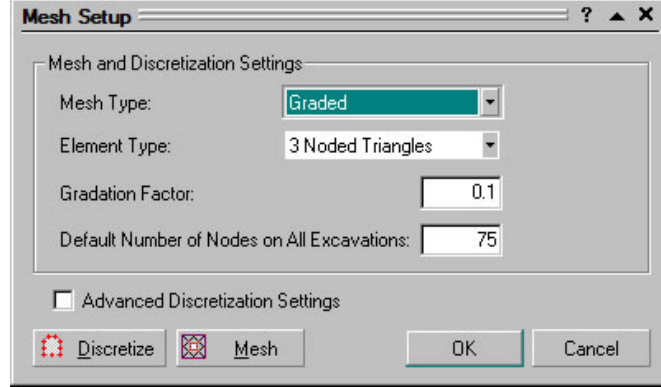


Şekil 5.4 Phase2 sayısal modelleme programında sınırların belirlenmesi

**Mesh : Setup (Ağ Örgüsü)**

Programda dizaynı yapılan açıklığın çevresinde bağlantı noktalarının “ ağların” oluşturulduğu basamaktır. Burada açıklık çevresinde oluşturulacak ağ üçgen olarak seçilmiştir. Aşağıdaki arayüz ile ağın şekli, büyüklüğü ve sayısı programa girilmekte, ”Discretize” ve “ Mesh” komutları ile de daha önce tanımlanmış alanda sonlu eleman ağı oluşturulmaktadır.

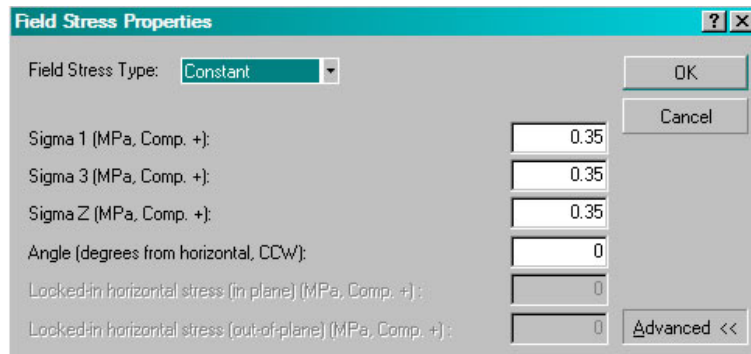




Şekil 5.5 Phase2 sayısal modelleme programı ana menü ekranı

### **Loading:** Fieldstress (Doğal Gerilmeler)

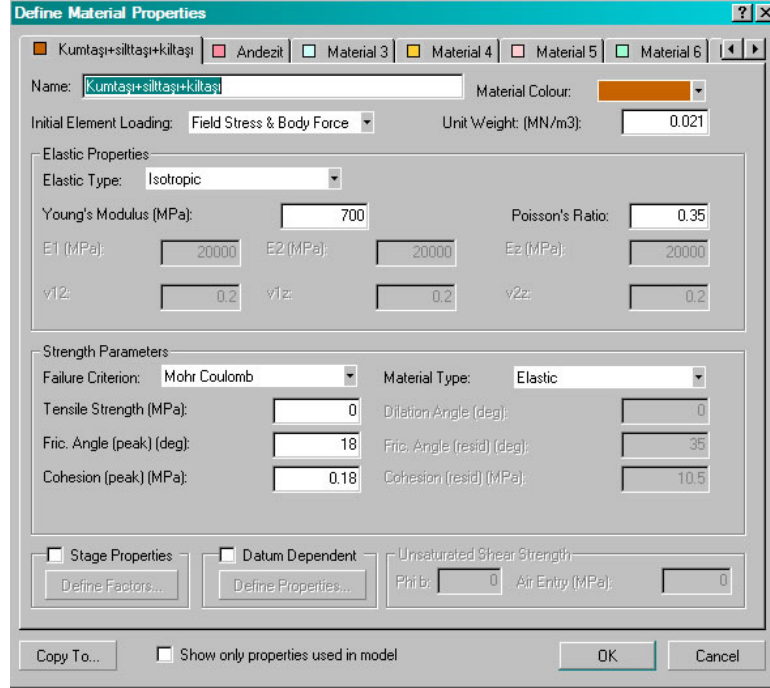
“Loading” menüsü bir sonraki “material properties “ menüsü ile birlikte Modelleme aşamalarının temelini oluşturur. Bu menüde, doğal gerilme bileşenlerin büyüklükleri, biliniyorsa açılı aşağıdaki arayüz kullanılarak programa girilebilmektedir.



Şekil 5.6 PHASE 2 programı ana menü ekranı

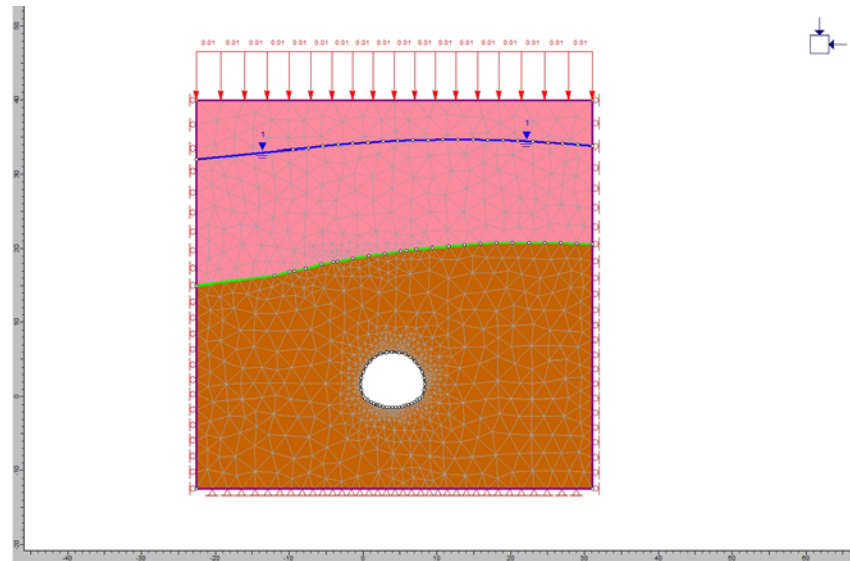
### **Properties :** Define Materials (Malzeme Tanımlamaları)

“Define Materials ” menüsü, modellemede yer alan açıklık ve çevresindeki kaya kütlelerinin özelliklerinin, ortamdaki farklı materyallere göre ayrı ayrı girişinin yapıldığı bölümdür. Bu bölümde yapılacak olan tanımlamalar ve girilen değerler modelin özünü oluşturmaktadır. Şekil 5.7’ de farklı zemin yada kaya birimlerinin mühendislik parametrelerinin girişlerinin yapıldığı ara yüz detaylı olarak verilmektedir.



Şekil 5.7. Kazı alanındaki ortam özelliklerinin tanımlamalarının programa işlenişi

Ortam parametreleri tanımlandıktan sonra oluşturulan yeraltı açıklığının, kazısı yapılan boşaltılmış bir alan olduğunun tanımlanabilmesi için “excavate” butonu kullanılır. Bu aşamadan sonra kurulan sayısal modelin son durumu, şekil 5.8’de gösterildiği gibidir. Ayrıca bu aşamada, varsa ortamdaki mevcut yeraltı su durumu da kurulan sayısal modele işlenir.



\* *Mavi ile işlenen hat yer altı su seviyesini göstermektedir.*

Şekil 5.8 Kazı alanındaki ortam özelliklerinin tanımlamalarının programa işlenişi.

Kurulan model son aşama olarak kaydedildikten sonra çözümleme aşamasına geçilir. Programdaki “*File Compute*” (Hesapla) ve “*File Interpret*” (Çevir) menüleri yardımı ile sayısal modelleme analizi gerçekleştirilerek, açıklık çevresinde gerilme dağılımları, yerdeğiştirmeler ve açıklık etrafındaki güvenlik faktörünün durumu ve pek çok farklı parametre ortaya konulabilmektedir.

## 5.2 İzmir Metrosu II. Etap Projesi Kapsamında Göztepe İstasyonu ve Civarında Karşılaşılan Zayıf Zonda Açılan Tünellerin Nümerik Modellemeleri

İzmir metrosu II. etap projesi kapsamında bölüm 4’ te detayları verilen Göztepe İstasyonu ve civarında karşılaşılan zayıf zonlarda ve fay ortamında açılacak olan hat tüneli (tip 1) ve geniş kesit istasyon tüneli (tip 2) geometrileri ele alınarak oluşturulan sayısal model üzerinde analiz edilmiştir.

Modellemelerde tüneller üzerinde öncelikle, zayıf zonun tahkimatlı ve tahkimatsız analizleri yapılarak değerlendirilmekte ve daha sonra inceleme alanında karşılaşılan fayın, model üzerine kurgusu yapılarak değerlendirmeler yapılmaktadır. Aşağıda hat tünelleri ve geniş kesit istasyon tünellerinin modellemesinde kullanılan tünellere ait parametreler ile geçilecek formasyonlara ait laboratuvar ortamında elde edilen içsel parametreler tablo halinde verilmektedir.

Tablo 5.1 Programa veri olarak girilen tünel ve kazı ortamı parametreleri

Tünel Parametreleri		
Tünel Yüksekliği	Tip 1	6,45 m.
	Tip 2	7,73 m.
Tünel Kazı Alanı	Tip 1	64 m <sup>2</sup>
	Tip 2	113 m <sup>2</sup>
İksa Parametreleri (NPI 120)		
Materyal Tipi	Elastik	
Young Modülü	210.000 Mpa	

Poisson Oranı	0,2	
Kalınlık	0,00143 m.	
Püskürtme Beton Parametreleri		
Materyal Tipi	Elastik	
Young Modülü	7000	
Poisson Oranı	0,25	
Kalınlık	0,15 m.	
Kaya Bulonu Parametreleri		
Uzunluk	4 m.	
Bulon arası mesafe	1 m.	

Phase2 sayısal modelleme programı kullanılarak hazırlanan modelde, bölgenin hakim birimleri bölüm 4' te de değinildiği gibi genellikle, ayrılmış andezitler ile kumtaşı-silttaşı ve kiltası ardalanmasından meydana gelen Altındağ Formasyonu olarak adlandırılan formasyonlardır. Aşağıda formasyonlara ait program girdilerinde kullanılan ve değerleri laboratuvar ortamında elde edilen mühendislik parametreleri tablo 5.2' de verilmektedir.

Tablo 5.2 Göztepe istasyonu civarı ve faylı zon yakını formasyonların mühendislik özellikleri

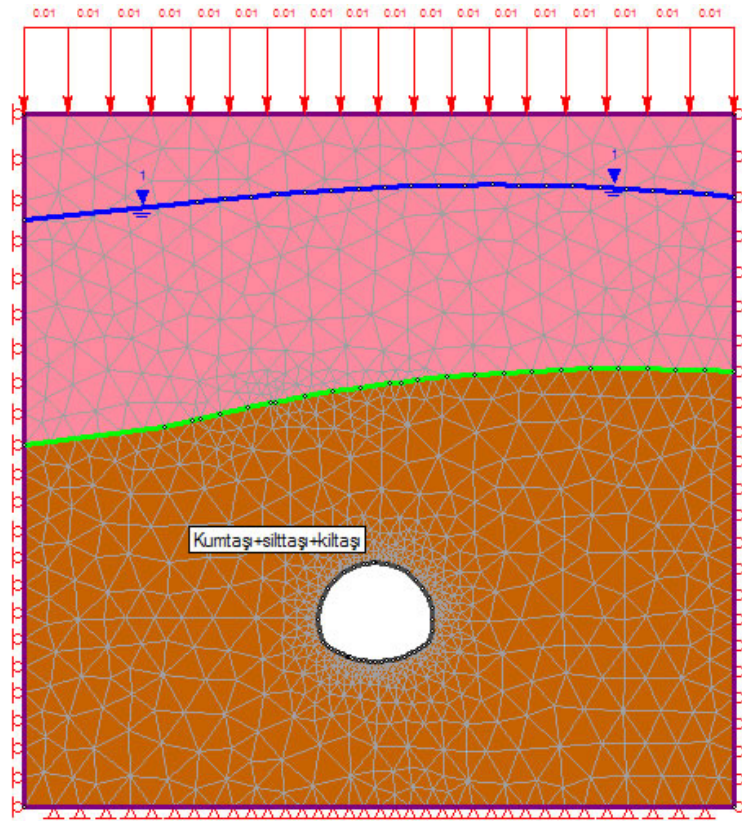
Formasyon	Andezit	Kumtaşı-Silttaşı-Kiltası - Çakiltası Ardalanması (Altındağ Formasyonu)
Young modülü (MPa)	64.000	700
Poisson oranı	0,30	0,35
İçsel sürtünme açısı ( $^{\circ}$ )	42	18
Kohesyon (MPa)	0,30	0,18

Tip1 ve tip2 olarak adlandırılan tüneller yukarıdaki veriler doğrultusunda sayısal olarak modellenmiştir. Modellemeler yapılırken tünellerdeki olası yer değiştirmeler, gerilme durumları ve güvenlik faktörü, tünelin içerisinde açıldığı ortamın faylı ve faysız olma durumu ile, tünelin tahkimatsız ve tahkimatlı olma durumları ayrı ayrı ele alınmıştır.

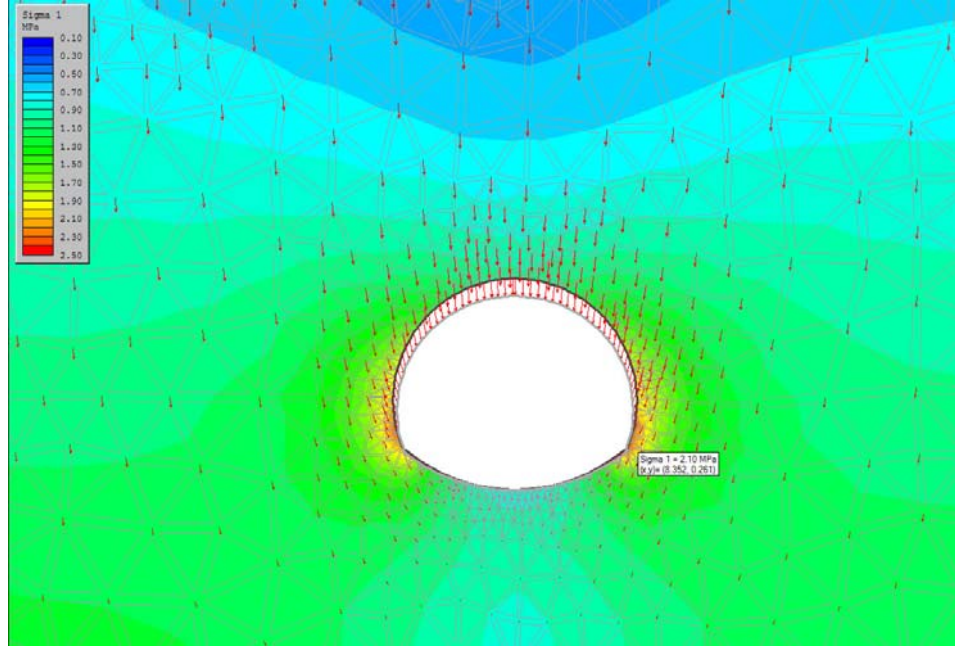
### 5.2.1 Tip1 Tünel Modellemeleri

Tip 1 olarak isimlendirilen yaklaşık  $64\text{m}^2$  kazı kesit alanına sahip tünel, riskli bölge olarak ele alınan ve ayrıntıları bölüm dört de değinilen faylı zon ve yakınından geçerken modellenmiş ve modellemelerden elde edilen sonuçlara aşağıda yer verilmiştir. Çalışma kapsamında incelenen tip1 tünelleri, tüm tünel uzunluğu dikkate alındığında yaklaşık güzargahın  $2/3$  ünü oluşturur niteliktedir.

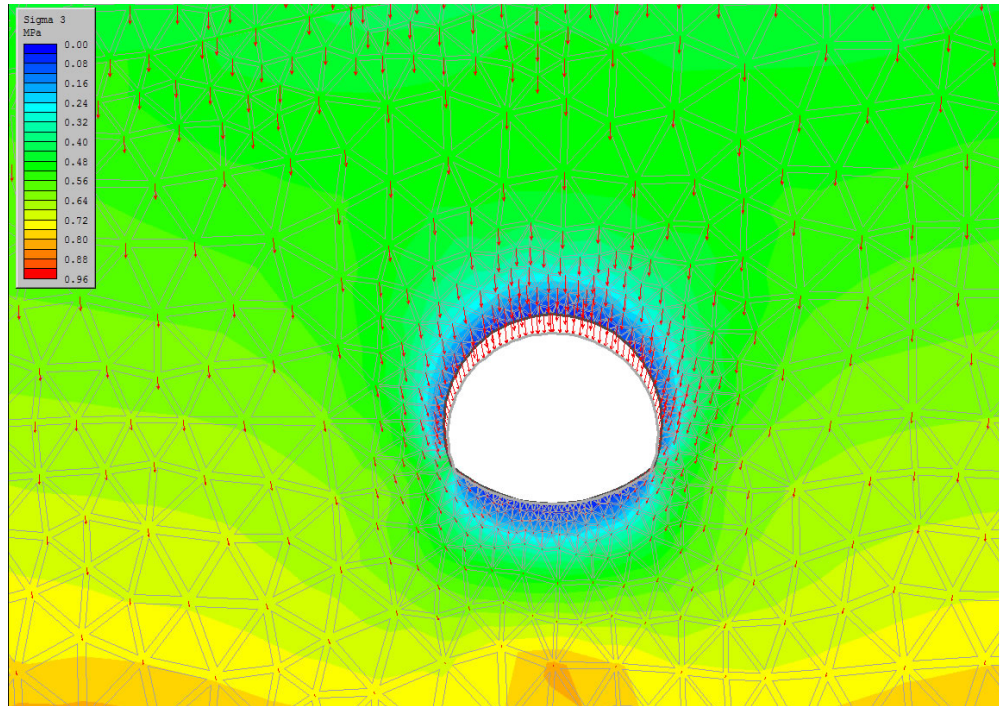
#### 5.2.1.1 Tip 1 Tüneli Tahkimatsız ve Faysız Durum



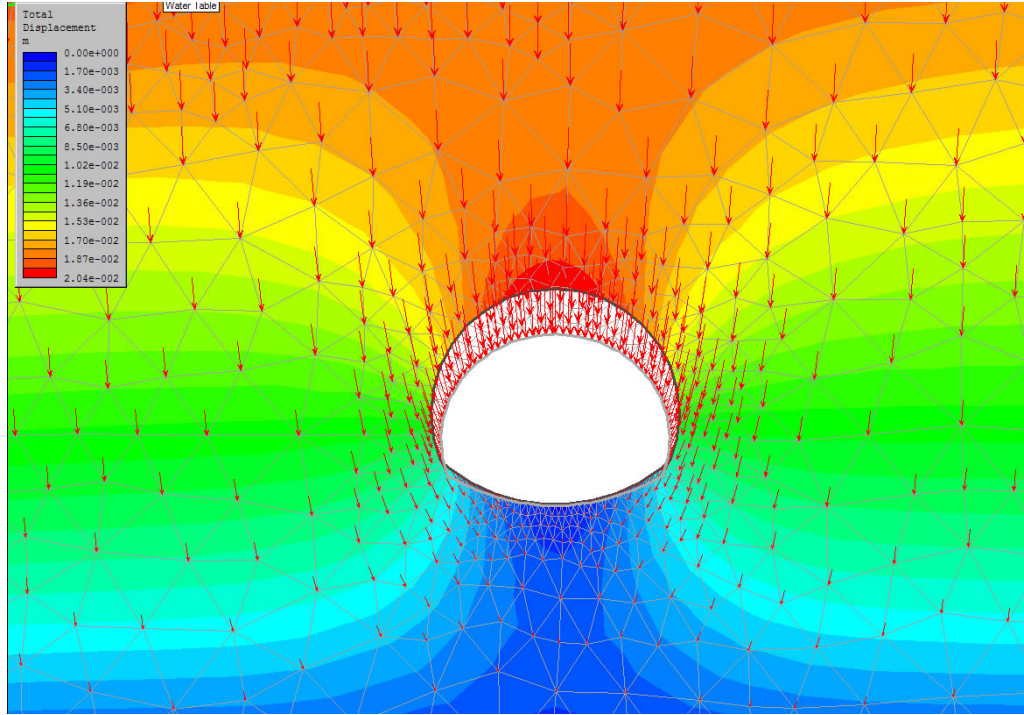
Şekil 5.9 Faylı zon yakını Tip1 tünel modeli



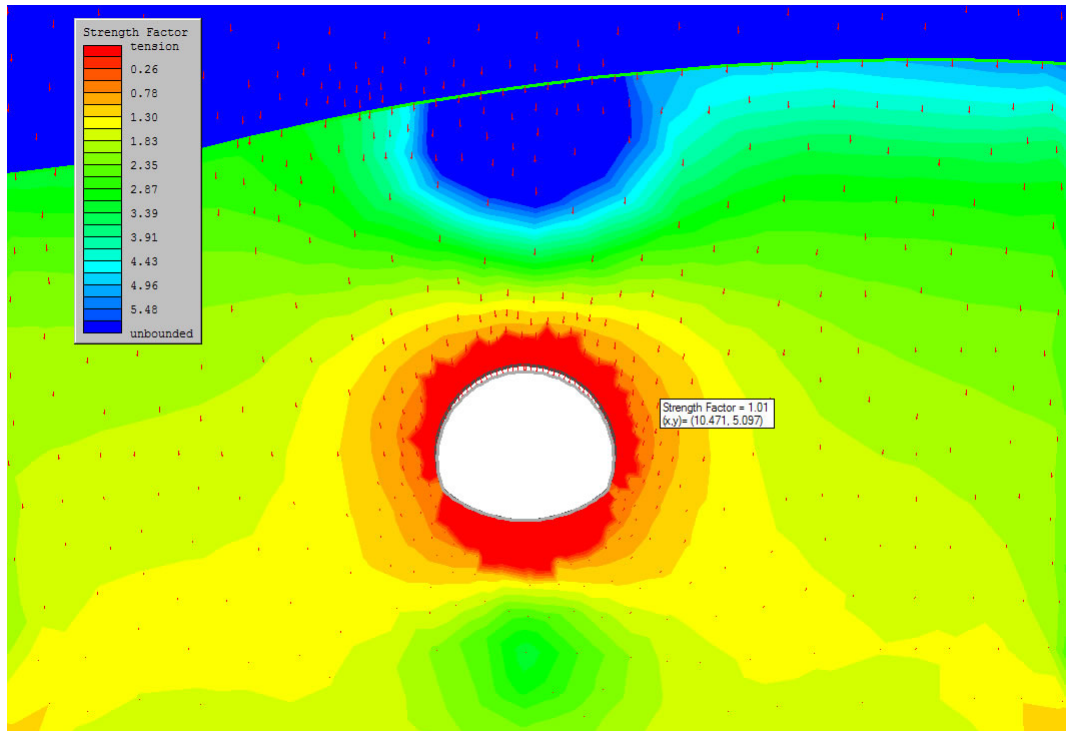
Şekil 5.10 Tip1 tüneli etrafındaki  $\sigma_1$  lerin dağılımı



Şekil 5.11 Tip1 tüneli etrafındaki  $\sigma_3$  lerin dağılımı



Şekil 5.12 Tip1 tüneli etrafındaki toplam yerdeğişmeler ve dağılımları



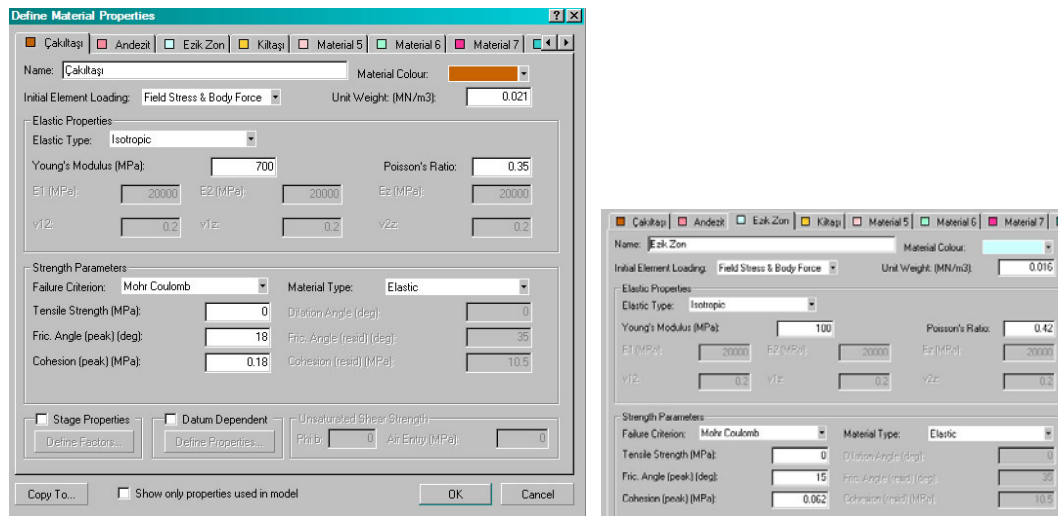
Şekil 5.13 Tip1 tüneli etrafındaki güvenlik faktörü dağılımı

### 5.2.1.2 Tip 1 Tüneli Tahkimatsız ve Faylı Durum

Bu aşamada kurulan sayısal modele, hem ortam parametreleri hemde karşılaşılan fay ile ilgili parametreler girilmiştir. Oluştural modelin gerçekleşen yapıya uygunluğu bakımından, kazı aynasında gözlenen ve çalışma esnasında da kaydedilen fayın, yaklaşık 70 cm sağı ve solu, ezik (deforme olmuş) zon olarak tanımlanmış ve modelde de açık mavi renk ile gösterilmiştir (şekil 5.16).

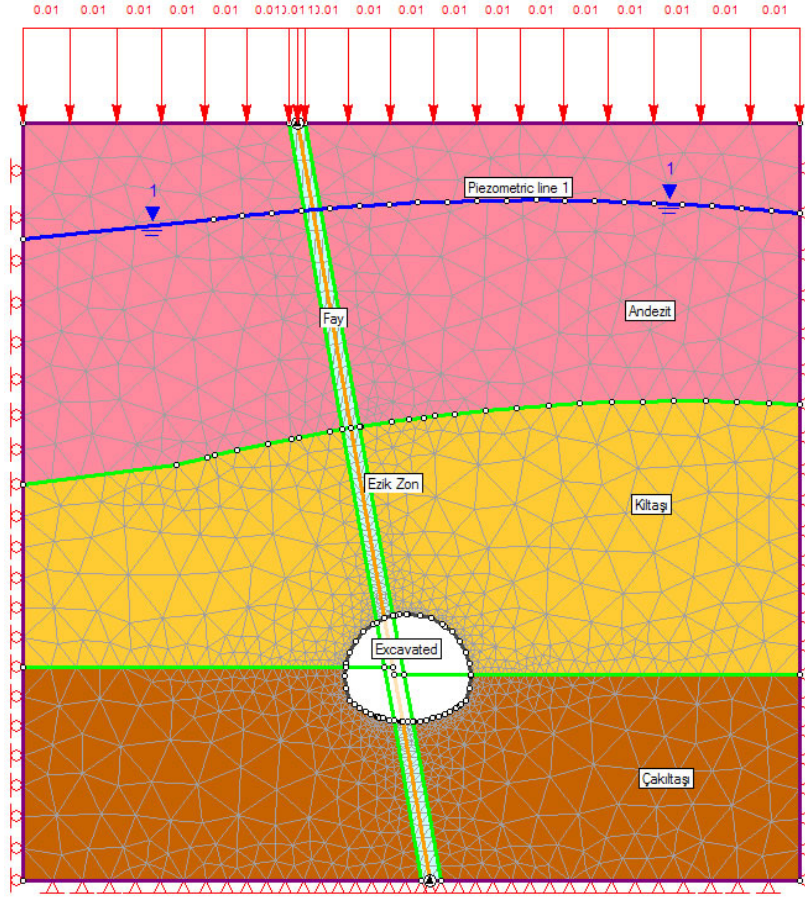
Bu aşamada, tünel aynasının kazı kesitlerinden yararlanılmış ve birebir kazı aynası, oluşturulan modele işlenmiştir. Bu nedenle aslında tamamı Altındağ Formasyonu (kumtaşı, kıltaşı, silttaşı, çakıltaşı) birimi içinde açılan tip1 tüneli, tünel açımı sırasında gözlenen yapı ele alınarak, kendi içinde tekrar alt birimlere ayrılmış ve modelin, gerçekleşen durum ile tam olarak ötrüşmesi sağlanmıştır.

Modelde, Altındağ Formasyonu içerisinde değerlendirilen çakıltaşı birimi koyu kahve rengi ile, kıltaşı birimi sarı renk ile, üst kotlardaki andezit birimi pembe renk ile ve tünel içerisinde rastlanan fayın etki alanındaki ezik zon da, açık mavi renk ile gösterilmektedir. Şekil 14' te belirlenen formasyonlara ait parametreler verilirken şekil 15 ve şekil 16 da oluşturulan modelin yapısı ile fay ve ezik zonun durumu gösterilmektedir.

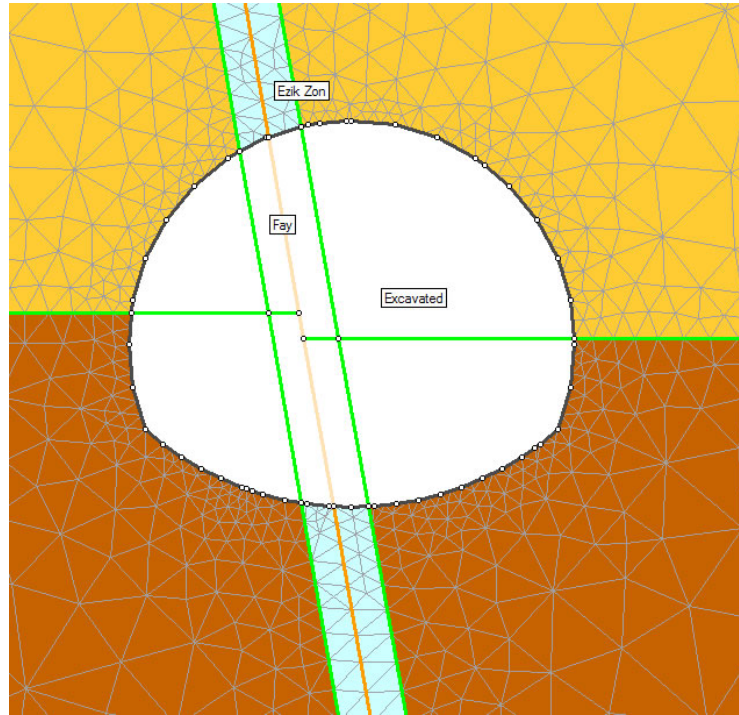


Şekil 5.14 Tip1 tüneli tahkimatsız durumdaki model parametreleri

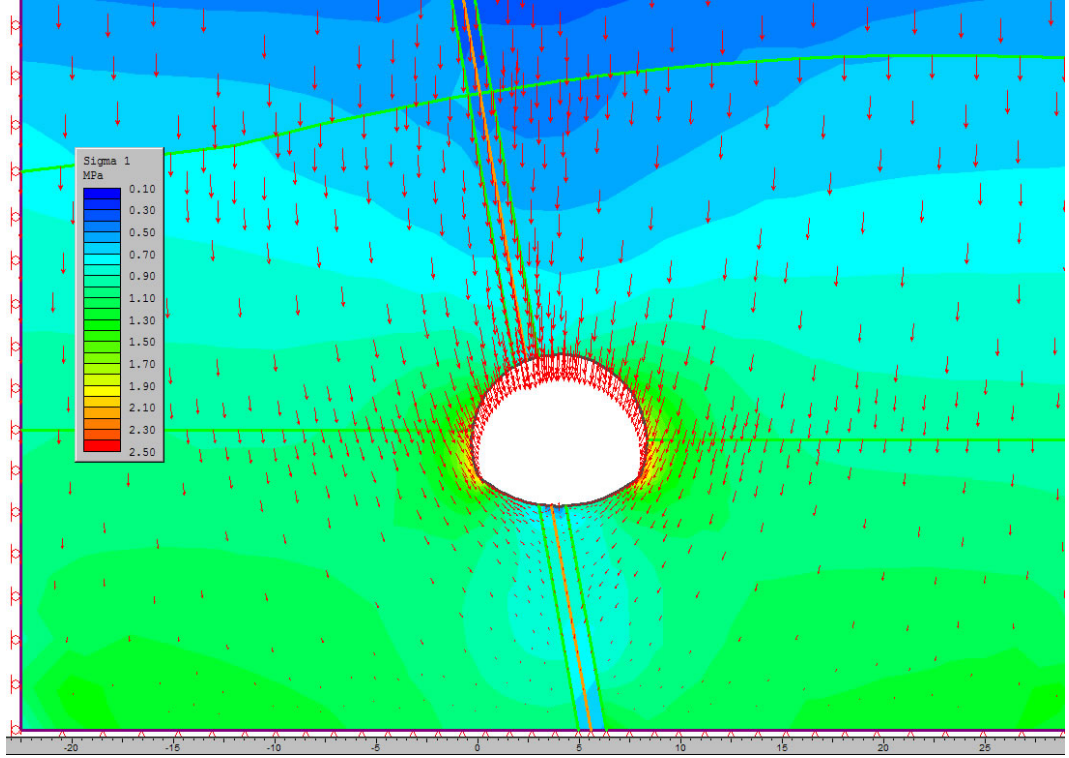




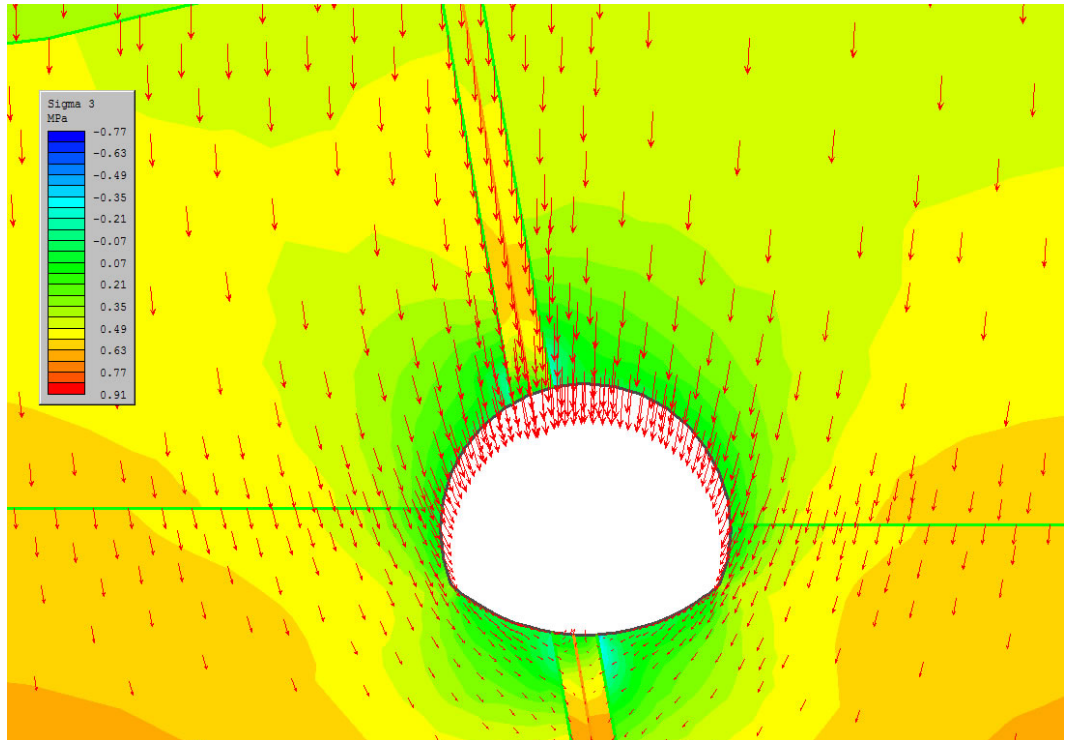
Şekil 5.15 Tip1 tüneli kazısında karşılaşılan fay durumu



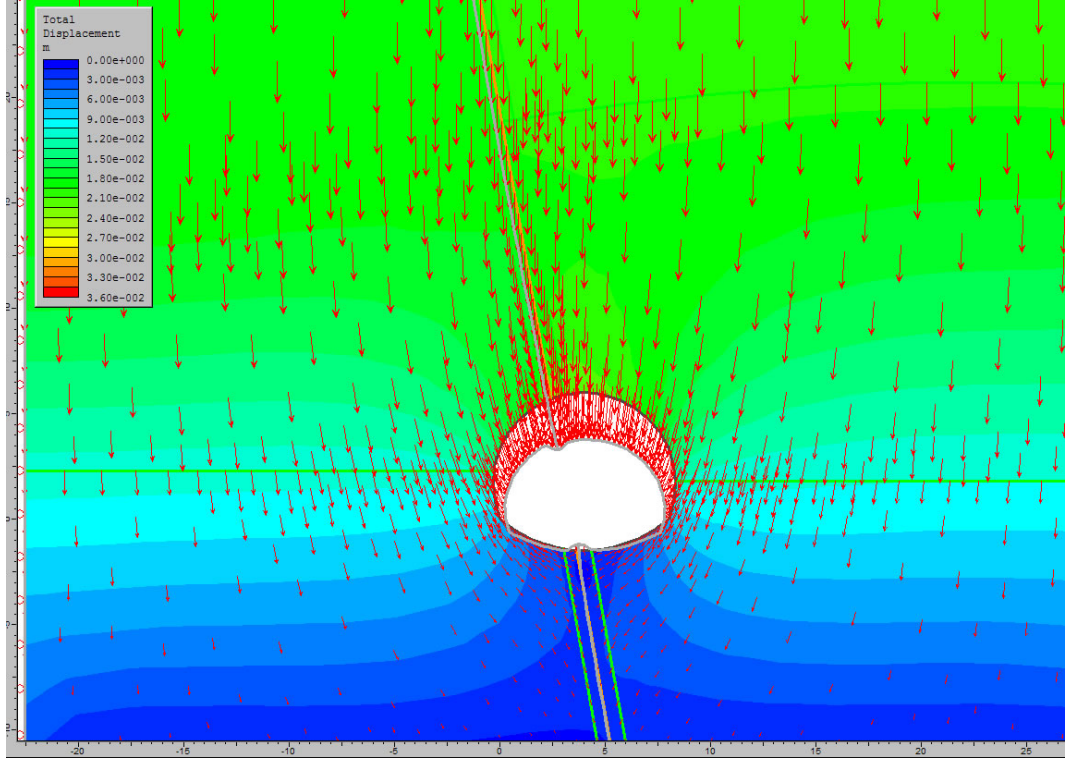
Şekil 5.16 Tip1 tüneli kazısında karşılaşılan fay ve ezik zon



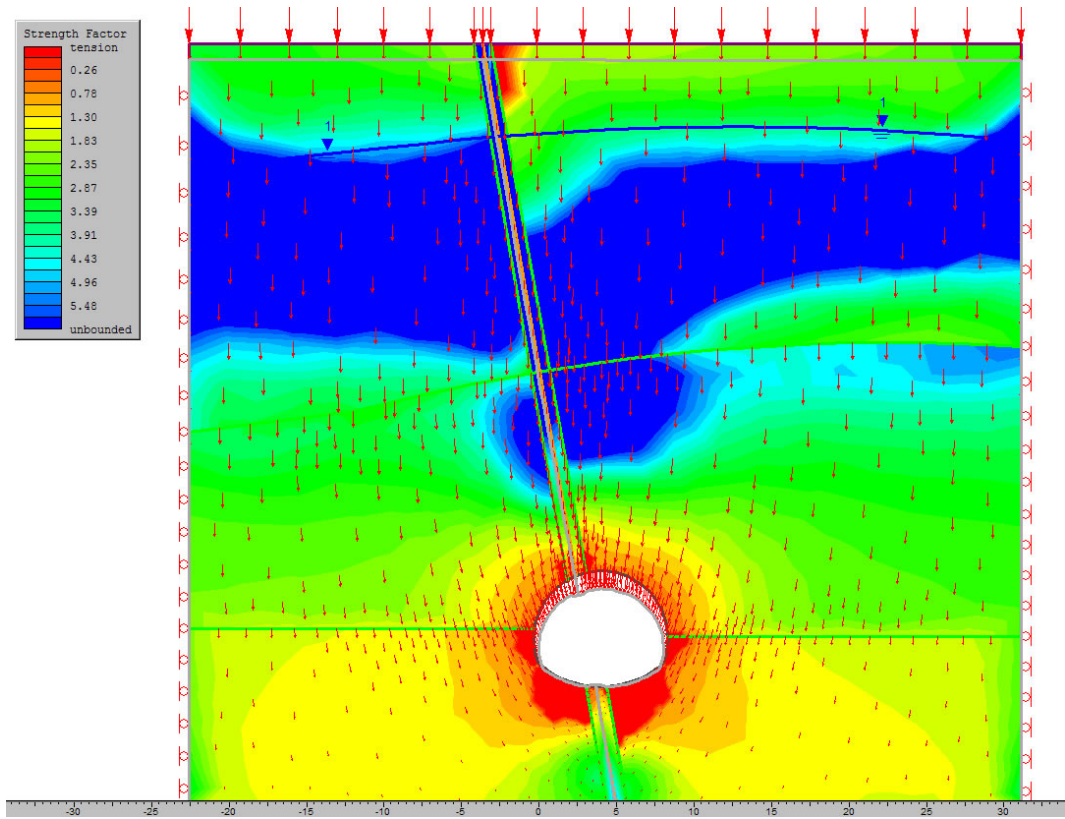
Şekil 5.17 Faylı durumda Tip1 tüneli etrafındaki  $\sigma_1$  lerin dağılımı



Şekil 5.18 Faylı durumda Tip1 tüneli etrafındaki  $\sigma_3$  lerin dağılımı



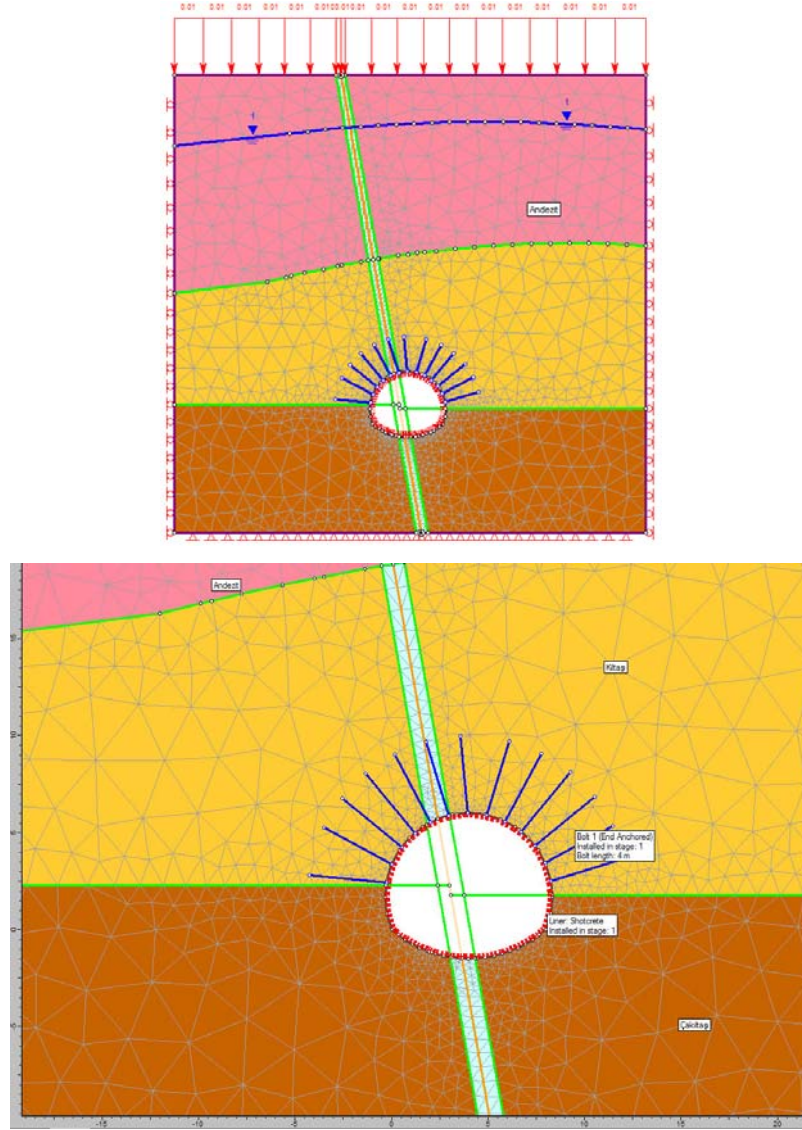
Şekil 5.19 Faylı durumda Tip1 tüneli etrafındaki toplam yerdeğişmeler ve dağılımları



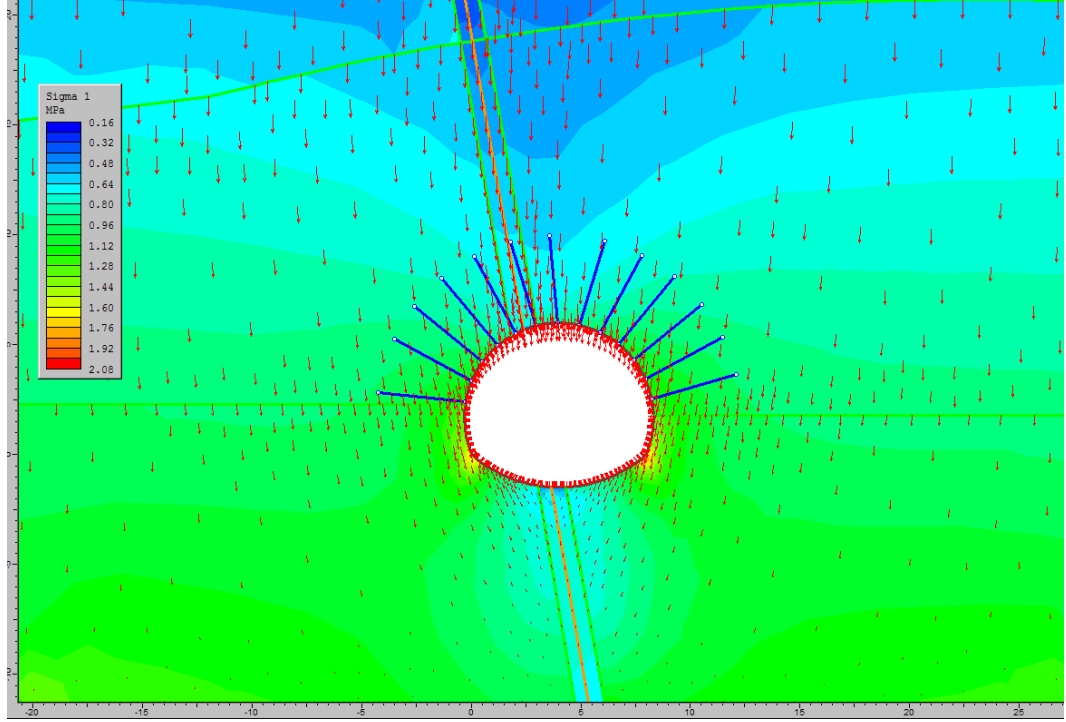
Şekil 5.20 Faylı durumda Tip1 tüneli etrafındaki güvenlik faktörü dağılımı

### 5.2.1.3 Tip 1 Tüneli Tahkimatlı ve Faylı Durum

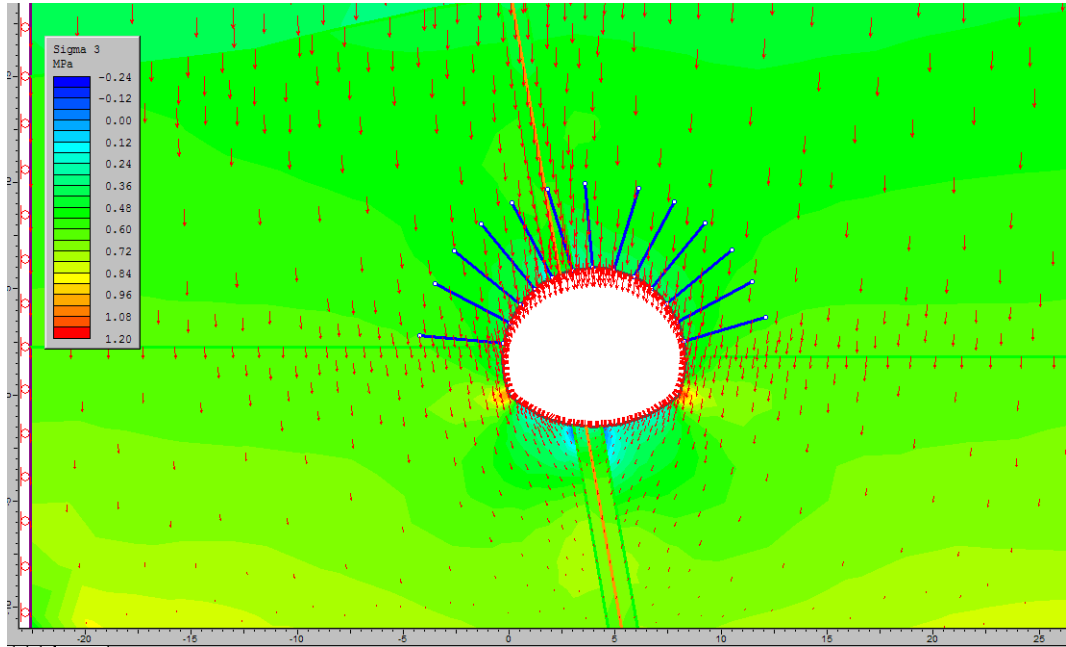
Tip1 tüneli ile ilgili hazırlanan son sayısal modelde , tünelin içerisinde açılacağı ortam parametreleri, fay ve ezik zon ile ilgili parametreler ile tünelde kullanılan tahkimat parametreleri programa girilerek analizler yapılmıştır. Analizlerde yine, modellemenin gerçekçiliği bakımından, kazı aynasında gözlenen ve çalışma esnasında da kaydedilen fayın, yaklaşık 70 cm sağı ve solu, ezik (deforme olmuş) zon olarak tanımlanmıştır. Tünel destekleme sisteminde kullanılan kaya bulonları (4 m.) ve püskürtme beton parametreleri de sisteme girilmiştir. Aşağıda şekil 5.21’ de sisteme girilen kaya bulonları (bolt) lacivert renk ile, püskürtme beton ise kırmızı kesikli çizgi ile gösterilmektedir.



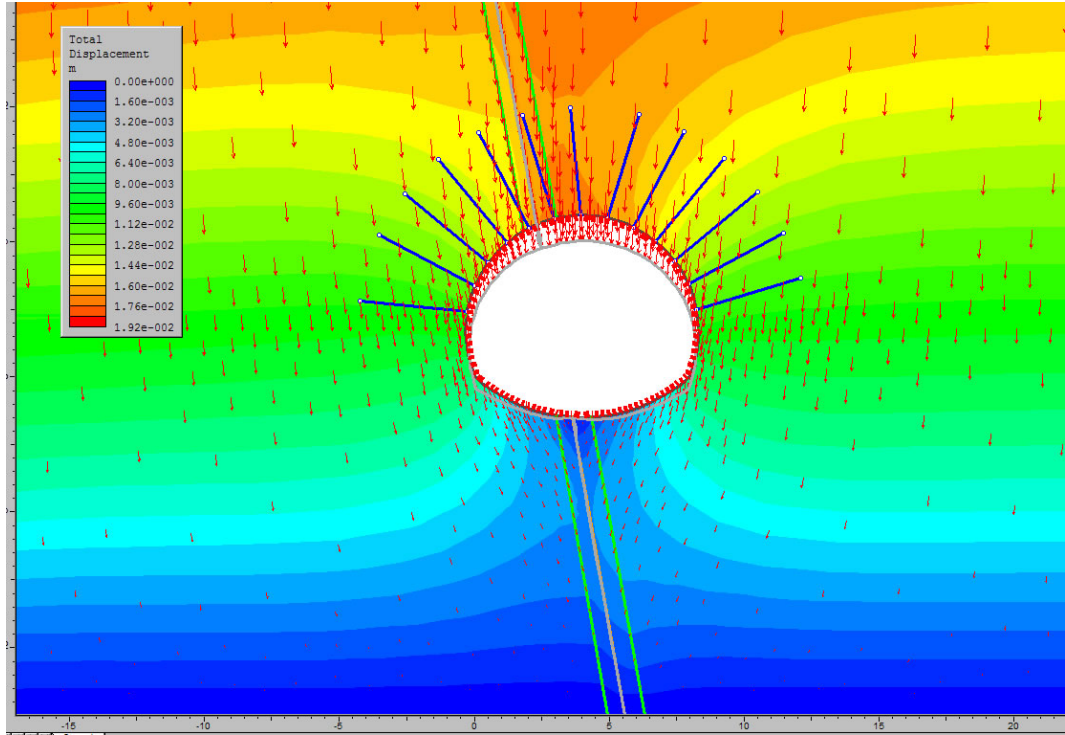
Şekil 5.21 Tahkimatlı ve faylı durumda hazırlanan Tip1 tüneli modeli ve detayı



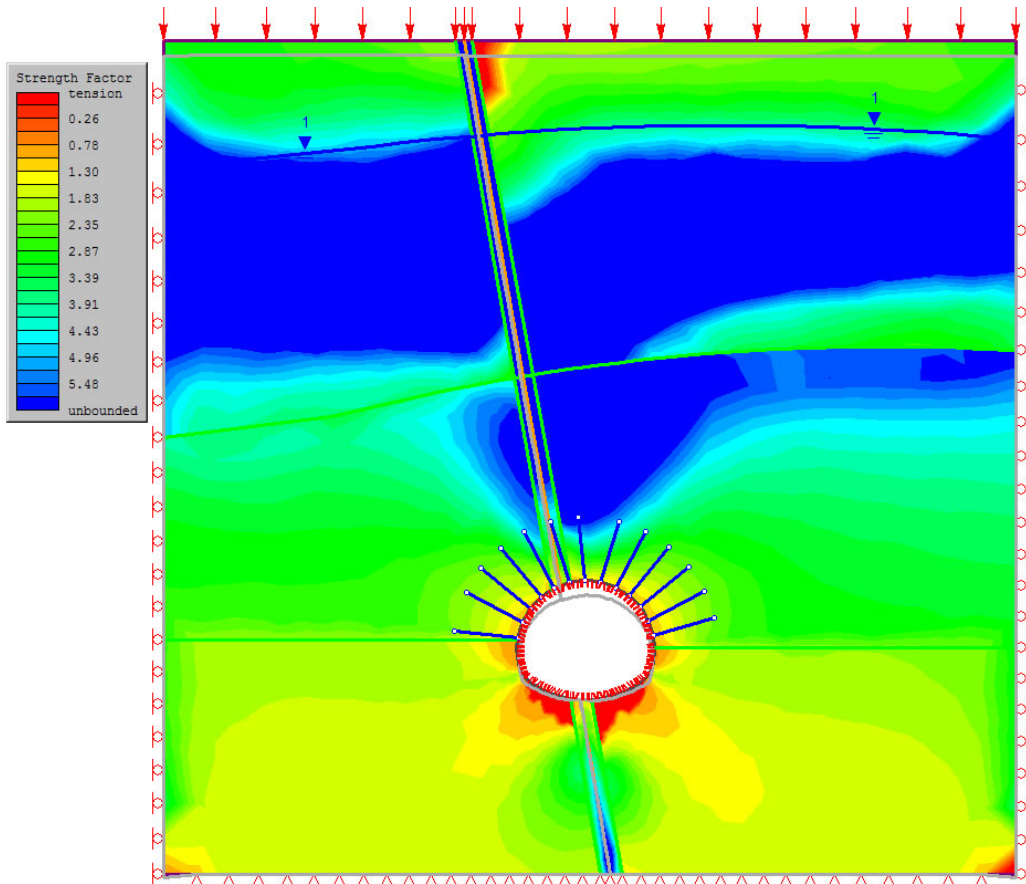
Şekil 5.22 Tahkimatlı ve faylı durumda Tip1 tüneli etrafındaki  $\sigma_1$  lerin dağılımı



Şekil 5.23 Tahkimatlı ve faylı durumda Tip1 tüneli etrafındaki  $\sigma_3$  lerin dağılımı



Şekil 5.24 Tahkimatlı ve faylı durumda Tip1 tüneli etrafındaki gözlenen toplam yerdeğişmeler



Şekil 5.25 Tahkimatlı ve faylı durumda Tip1 tüneli etrafındaki güvenlik faktörü dağılımı

### 5.2.2 Tip1 Tünel Kesiti Sayısal Modelleme Sonuçları

İzmir Metro İnşaatı II. Etap projesi kapsamında açımı devam eden ve Tip1 olarak isimlendirilen 6,45 metre yüksekliğinde, yaklaşık 64 m<sup>2</sup> kazı alanına sahip delme tüneller yukarıda detayları verilen Phase2 sayısal modelleme programı kullanılarak modellenmiştir.

Modellemelerde, tünelin içerisinde açıldığı formasyonların içsel parametreleri için laboratuvar ortamında elde edilen değerler kullanılırken, tünelin tahkimat tasarımında, daha önceden tünel projesi ile belirlenen “tahkimat dizayn parametreleri” kullanılmıştır. Örneğin kaya bulonlarının uzunlukları 4 metre, bulonlar arası mesafe 1 metre, püskürtme beton kalınlıkları 0,15 metre olarak alınmıştır. Bu değerler halen açılan ve açılmakta olan tüneller için imalatta kullanılan değerlerdir.

Tip1 tünel kesiti üzerinde Karma (Hibrid) yöntem esasına dayalı olarak yapılan sayısal modellemeler üç ayrı durumda gerçekleştirilmiştir. Tünelin tahkimatsız durumu, tahkimatsız ve fay zonunun gözlemlendiği durum ve de fay zonun tünel içerisinde gözlemlendiği ve tünelin tahkim edildiği durumlar ayrı ayrı analiz edilmiştir. Bu çalışmaların sonuçları şekil 5.9 ve 5.25 arasında detaylı olarak verilmektedir. Buna göre ;

Güzergahın 2+447,75 – 2+655,48 km. aralığında yer alan Göztepe istasyonu ve civarında açılan Tip1 tünel kesitinde, fay zonunun gözlenmediği ve tahkimatsız durumda tünel tepe noktasında (tavanda) yaklaşık 18,6 mm bir yerdeğiştirme değeri saptanmıştır. Bu değer tünel tavanından yeryüzüne doğru 5 er metre aralıklarla okunmuş ve 18,5, 18,7 ve yeryüzünde 19 mm lik düşey yönde bir yerdeğiştirme değeri saptanmıştır.

Tünelde fay zonunun gözlemlendiği ve tahkimatın henüz yapılmadığı durumda ise tepe noktasındaki değer 24 mm’ ye yeryüzündeki oturma miktarı da 19,6 mm değerine çıkmaktadır.

Tahkimatın tamamlandığı faylı zon geçişinde ise tünel tavanındaki toplam yerdeğiştirme miktarı 17 mm yeryüzünde oluşacak toplam yerdeğiştirme miktarında 18 mm civarında olduğu saptanmıştır. Değerler aşağıda tablo 5.3’de verilmektedir.

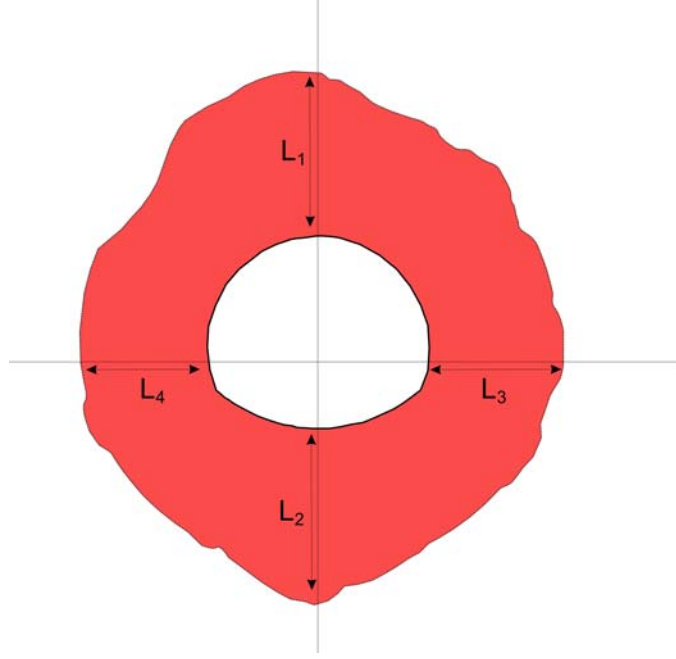
Tablo 5.3 Tip 1 tünel kesitinde kazısı sonrasında meydana gelen toplam yerdeğiştirme değerleri

Tünel Tepe Noktasından Yeryüzüne Uzaklık (m)	0	5	15	20	25
Toplam Yerdeğiştirme Değerleri (mm)					
Tip 1 Tüneli Tahkimatsız Fay Zonu Gözlenmemiş	18,6	18,5	18,7	19	19
Tip 1 Tüneli Tahkimatsız Faylı Zonu Gözlenmiş	24	19,5	19,6	19,6	19,6
Tip 1 Tüneli Tahkimatlı Faylı Zonu Gözlenmiş	17	16,7	17,5	18	18

Analizler sonucu elde edilen “Strength Factor” yani güvenlik faktörü değeri tünelin deforme olmadan ayakta durabilmesi yani stabilitesi hakkında bilgi vermektedir. Tünel etrafında güvenlik faktörünün 1 den küçük olması durumu, tünelin deforme olacağına bir kanıttır. Analiz sonuçlarında tip1 tünel kesiti için açığa çıkan veriler, şekil 5.13, 5.20 ve 5.25’de gösterilmektedir. Şekillerde güvenlik faktörünün 1 den küçük olduğu bölgeler kırmızı renk ile belirtilmiştir. Sayısal analizlerden daha net bilgilere ulaşılması bakımından değerlendirme aşamasında tünel etrafındaki riskli bölgeler tavan, taban ve tünel yanları olmak üzere dört farklı açıdan incelenmiştir. Tavandaki riskli bölge mesafesi  $L_1$ , tabandaki riskli bölge mesafesi  $L_2$  ve yanlardaki riskli bölgelerin mesafeleri de  $L_3$  – $L_4$  olarak tanımlanmıştır (şekil 5.26). Buna göre;

- tip1 tünel kesitinde fayın gözlenmediği ve tahkimatın yapılmadığı durumda  $L_1$  mesafesi 2,15 metre,  $L_2$  mesafesi 2,93 metre,  $L_3$  – $L_4$  mesafeleri yaklaşık 2,90 metre olarak ,





Şekil 5.26 Tip1 tünel kesiti etrafındaki riskli bölgelerin gösterimi

- tip1 tünel kesitinde fay zonunun gözlemediği ve tahkimatın yapılmadığı durumda  $L_1$  mesafesi 2,41 metre,  $L_2$  mesafesi 3,97 metre,  $L_3$  mesafesi 2,70 metre ve  $L_4$  mesafeleri yaklaşık 3,76 metre olarak,
- tip1 tünel kesitinde fay zonunun gözlemediği ve tahkimatın tamamlandığı durumda  $L_1$  mesafesi 0 ,  $L_2$  mesafesi 2,95 metre,  $L_3$  ve  $L_4$  mesafeleri 0,7 metre olarak bulunmuştur. Aşağıda tablo 5.4'te toplu sonuçlar verilmektedir.

Tablo 5.4 Kazı sonrası Tip1 tünel kesiti etrafında meydana gelen riskli bölgelerin tünel cidarından uzaklıkları

Riskli Bölge Mesafeleri (metre)	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$
Tip 1 Tüneli Tahkimatsız Fay Zonu Gözlenmemiş	2,15	2,93	2,90	2,76
Tip 1 Tüneli Tahkimatsız Faylı Zonu Gözlenmiş	2,40	3,97	2,70	3,67
Tip 1 Tüneli Tahkimatlı Faylı Zonu Gözlenmiş	0	2,95	0,70	0,70

### 5.2.3 Tip2 Tünel Modellemeleri

Tip2 olarak isimlendirilen yaklaşık 113 m<sup>2</sup> kazı kesit alanına sahip tünel, riskli bölge olarak ele alınan ve ayrıntıları bölüm 4’ te değinilen faylı zon ve yakınından geçerken modellenmiştir. Modellemelerde tip2 tünelinin içerisinde açılacağı ortam parametreleri dikkate alınmıştır. Buna göre tip2 tüneli, fay öncesinde ve faylı zondan geçerken içinde bulunduğu ortam şartlarına göre değerlendirilmiştir. Tünel üstte 3-5 metrelik bir güncel dolgu tabakasının altında tamamen kumtaşı, silttaşı, kiltası ve çakiltası ardalması (Altındağ Formasyonu) içinde açılmaktadır. Altındağ Formasyonu için tablo 5.2 ‘ de verilen değerler kullanılmış olup modelde açık mavi ile gösterilen alüvyon dolgunun mühendislik parametreleri de aşağıda şekil 5.27’ de verilmektedir.

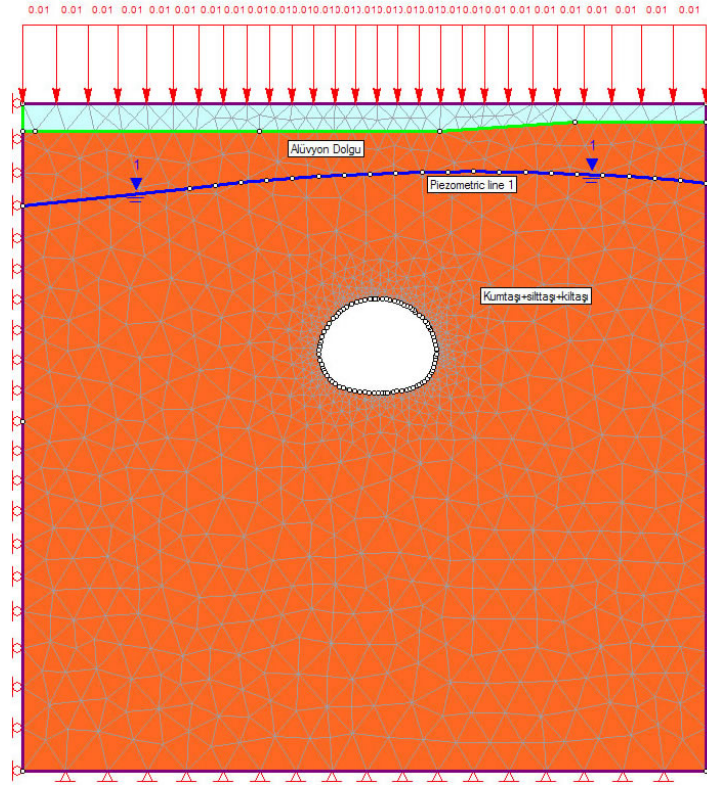
The screenshot shows the 'Define Material Properties' dialog box with the following settings:

- Name:** Alüvyon Dolgu
- Material Colour:** Cyan
- Initial Element Loading:** Field Stress & Body Force
- Unit Weight: (MN/m3):** 0.013
- Elastic Properties:**
  - Elastic Type:** Isotropic
  - Young's Modulus (MPa):** 115
  - Poisson's Ratio:** 0.36
  - E1 (MPa):** 20000
  - E2 (MPa):** 20000
  - Ez (MPa):** 20000
  - v12:** 0.2
  - v1z:** 0.2
  - v2z:** 0.2
- Strength Parameters:**
  - Failure Criterion:** Mohr Coulomb
  - Material Type:** Elastic
  - Tensile Strength (MPa):** 0
  - Dilation Angle (deg):** 0
  - Fric. Angle (peak) (deg):** 17
  - Fric. Angle (resid) (deg):** 35
  - Cohesion (peak) (MPa):** 0.065
  - Cohesion (resid) (MPa):** 10.5
- Stage Properties:**  (Define Factors...)
- Datum Dependent:**  (Define Properties...)
- Unsaturated Shear Strength:**
  - Phi b:** 0
  - Air Entry (MPa):** 0

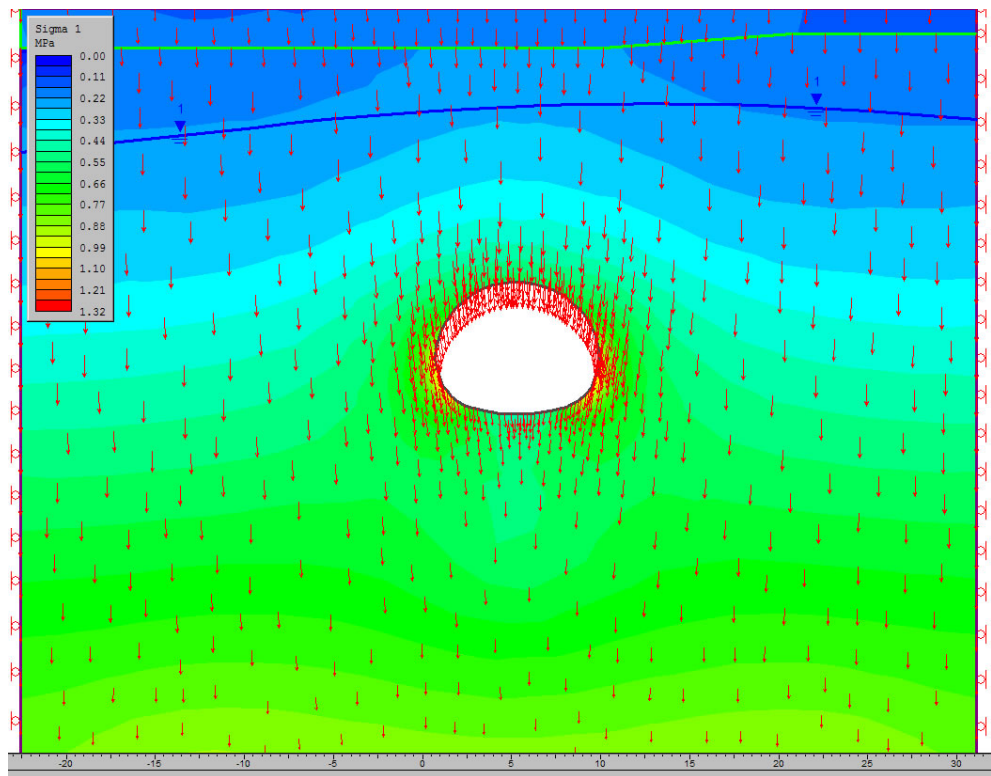
Buttons at the bottom: Copy To...,  Show only properties used in model, OK, Cancel.

Şekil 5.27 Tip2 tünel modelinde kullanılan Alüvyon Dolgu parametreleri

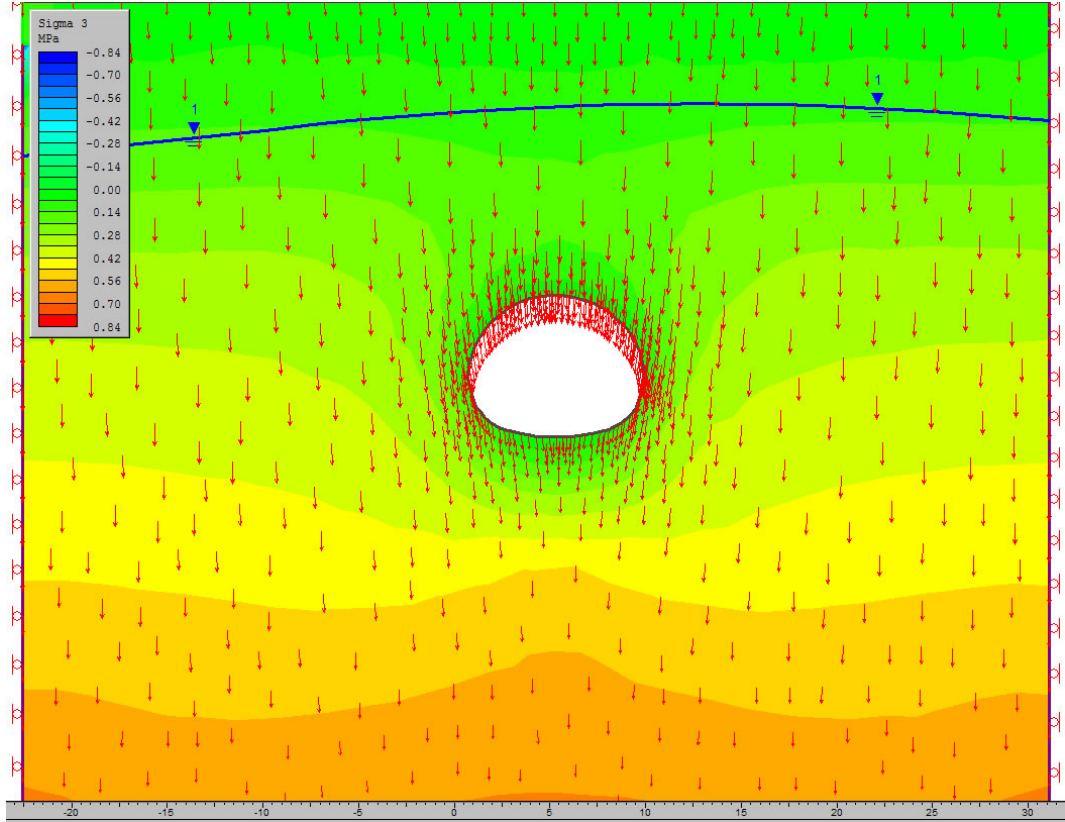
### 5.2.3.1 Tip 2 Tüneli Tahkimatsız ve Faysız Durum



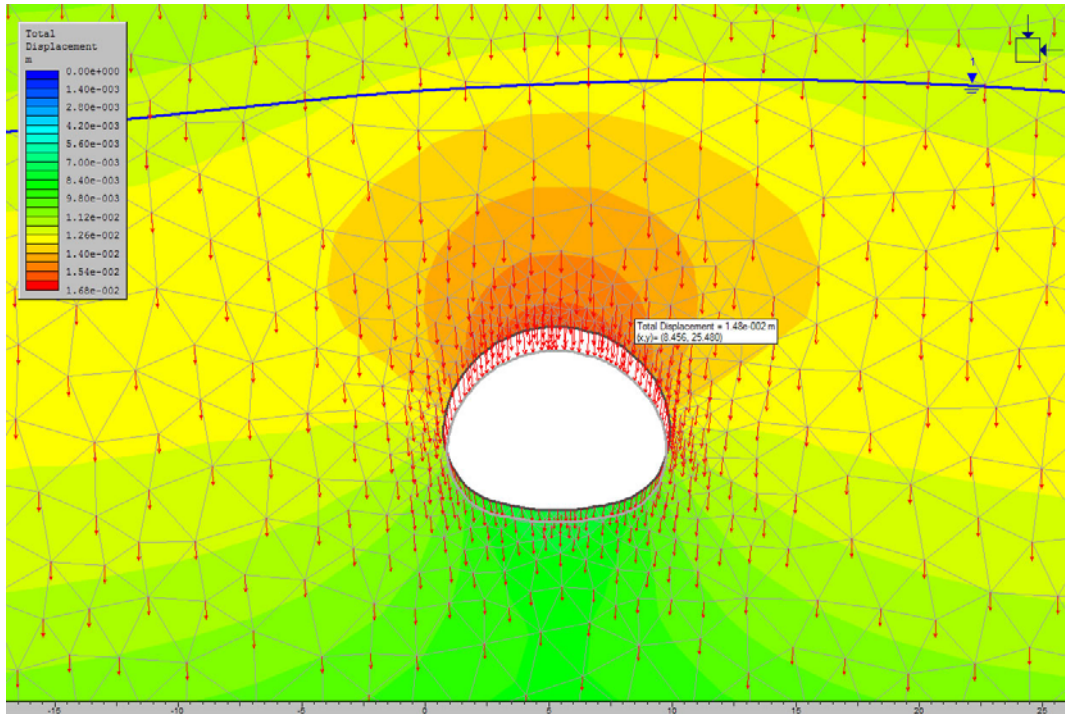
Şekil 5.28 Tip2 tünel modeli



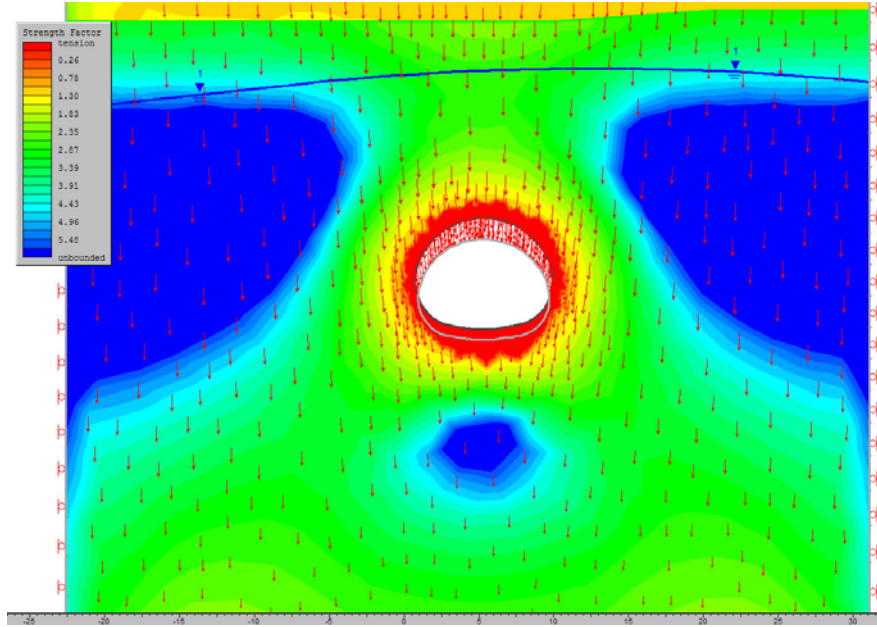
Şekil 5.29 Tip2 tüneli etrafındaki  $\sigma_1$  lerin dağılımı



Şekil 5.30 Tip2 tüneli etrafındaki  $\sigma_3$  lerin dağılımı



Şekil 5.31 Tip2 tüneli etrafındaki toplam yerdeğiştirmeler ve dağılımları



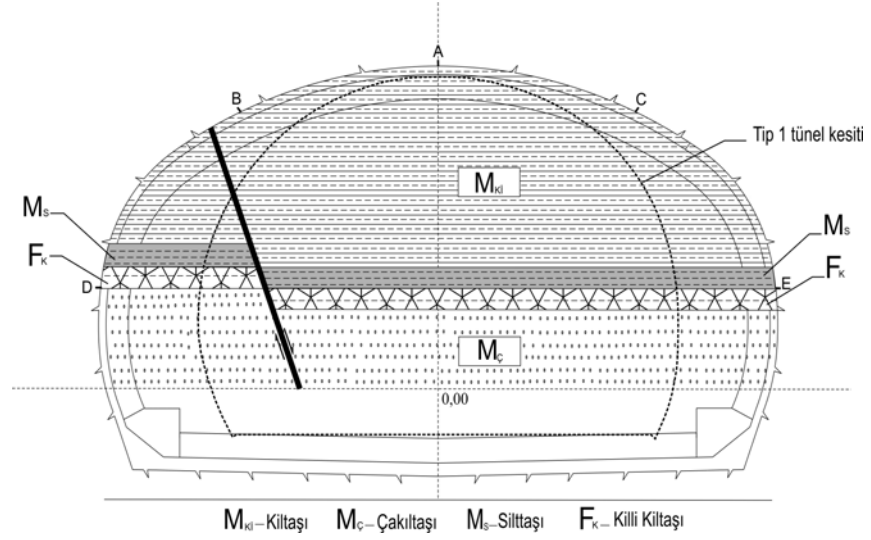
Şekil 5.32 Tip2 tüneli etrafındaki güvenlik faktörü dağılımları

#### 5.2.3.2 Tip 2 Tüneli Tahkimatsız ve Faylı Durum

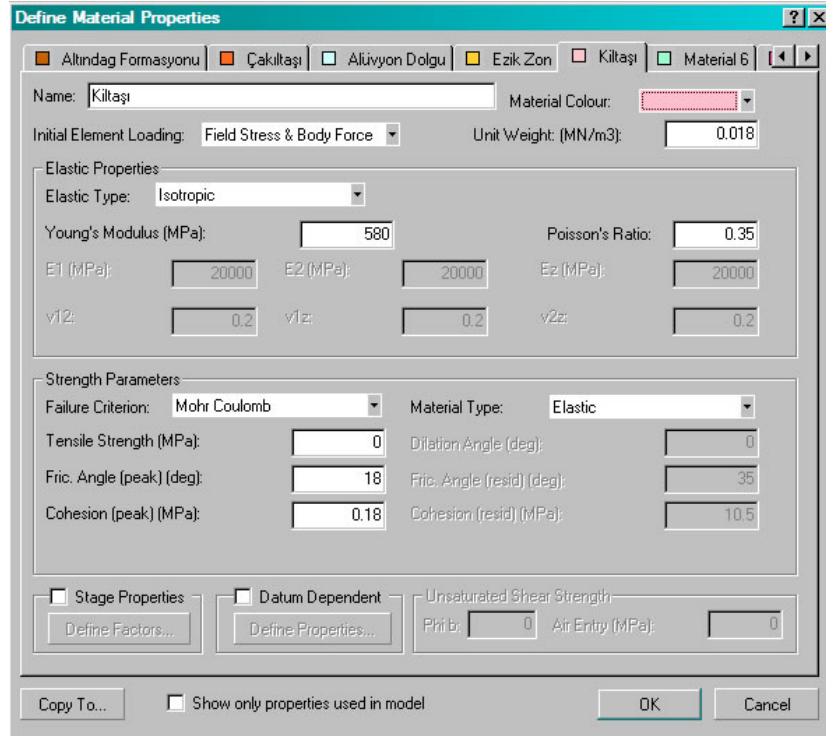
Tünel açımı sırasında tespit edilen fay modellenirken bölüm 4' te de ayrıntılı olarak verilen ayna kesitlerinden yararlanılmıştır. Ayna kesitlerinden de görüleceği gibi, hem tip1 olarak isimlendirilen tünel ayna kesitinde hemde tip2 tünel ayna kesitinde gözlenen normal atımlı fay modellerde açıkça belirtilmiştir.

Bu aşamada sayısal modelin oluşturulması sırasında, tünel aynasının kazı kesitlerinden yararlanılmış ve birebir kazı aynası, oluşturulan modele yansıtılmıştır. Bu nedenle aslında tamamı Altındağ Formasyonu ( kumtaşı, kıltaşı, çakıltaşı) birimi içinde açılan tip2 tüneli, tünel açımı sırasında gözlenen yapı ele alınarak kendi içinde tekrar alt birimlere ayrılmış ve modelin gerçekleşen duruma tam uygunluğu sağlanmıştır.

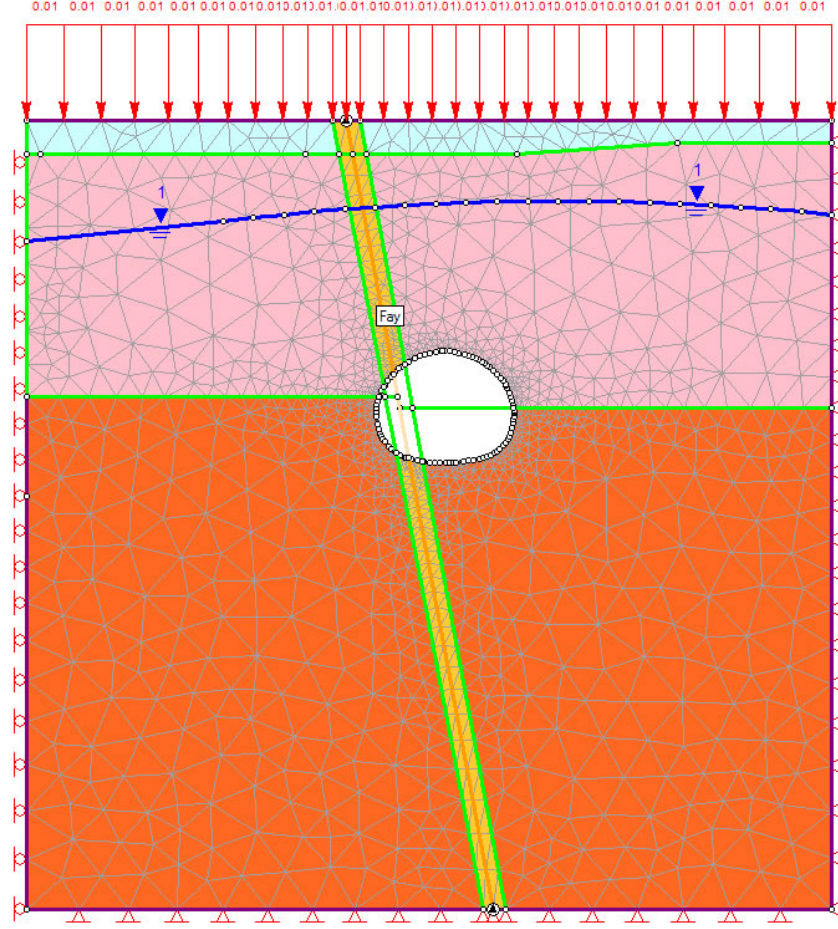
Şekil 5.33' te verilen faylı zon geçişinde gözlenen ayna kesiti modellenirken, fay ve etrafındaki ezik zon modele işlenmiş, aynadaki hakim birimler, kıltaşı ve çakıltaşı birimi birbirinden ayrılmış ve azda olsa fayın meydana getirdiği atım göz önünde bulundurulmuştur. Şekil 5.34' te modele veri olarak girilen değerler ve ele alınan farklı birimler verilmektedir.



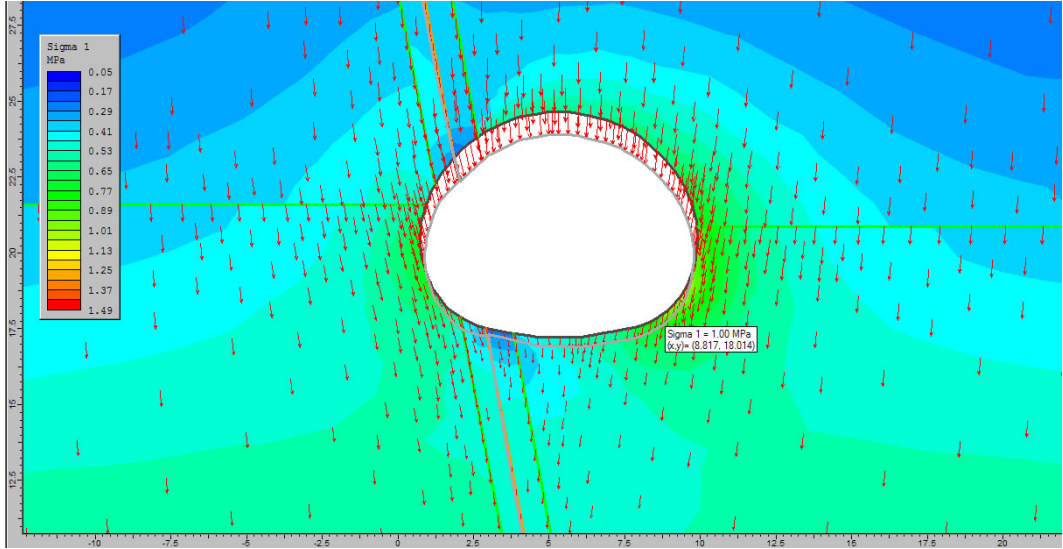
Şekil 5.33 Tip-2 kesitinde karşılaşılan fay ve ayna kesiti



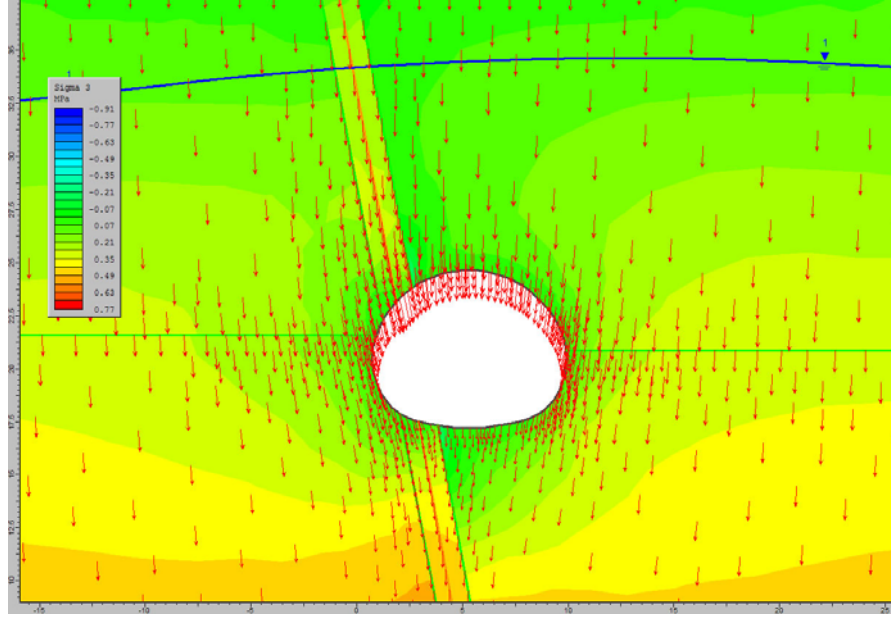
Şekil 5.34 Modelde ele alınan farklı birimler ve mühendislik parametreleri



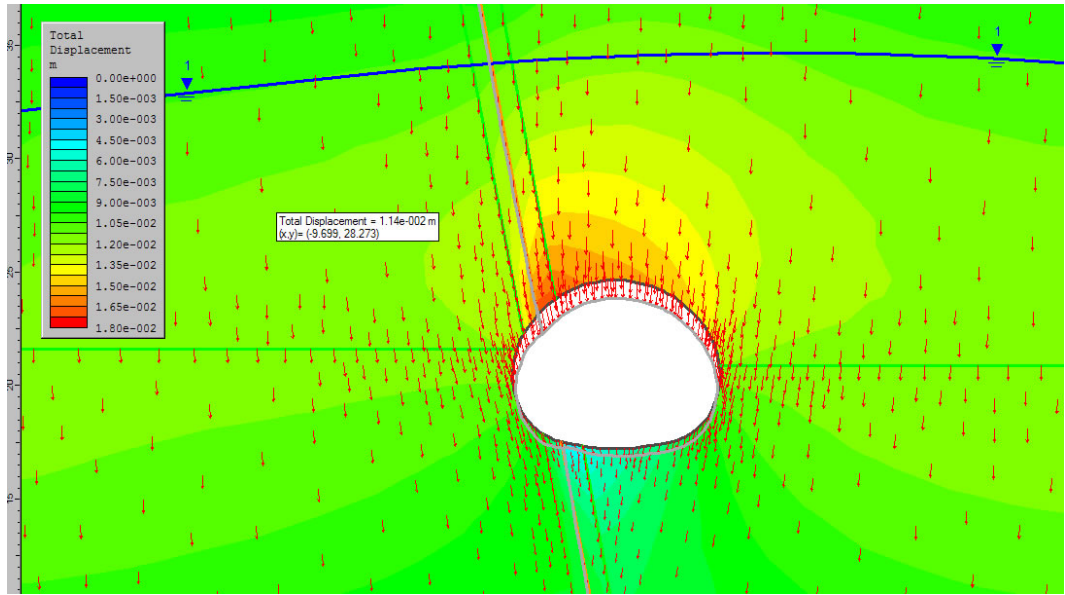
Şekil 5.35 Tip2 tüneline gözlenen fay ve etrafındaki ezik zon.



Şekil 5.36 Faylı durumda Tip2 tüneli etrafındaki  $\sigma_1$  lerin dağılımı

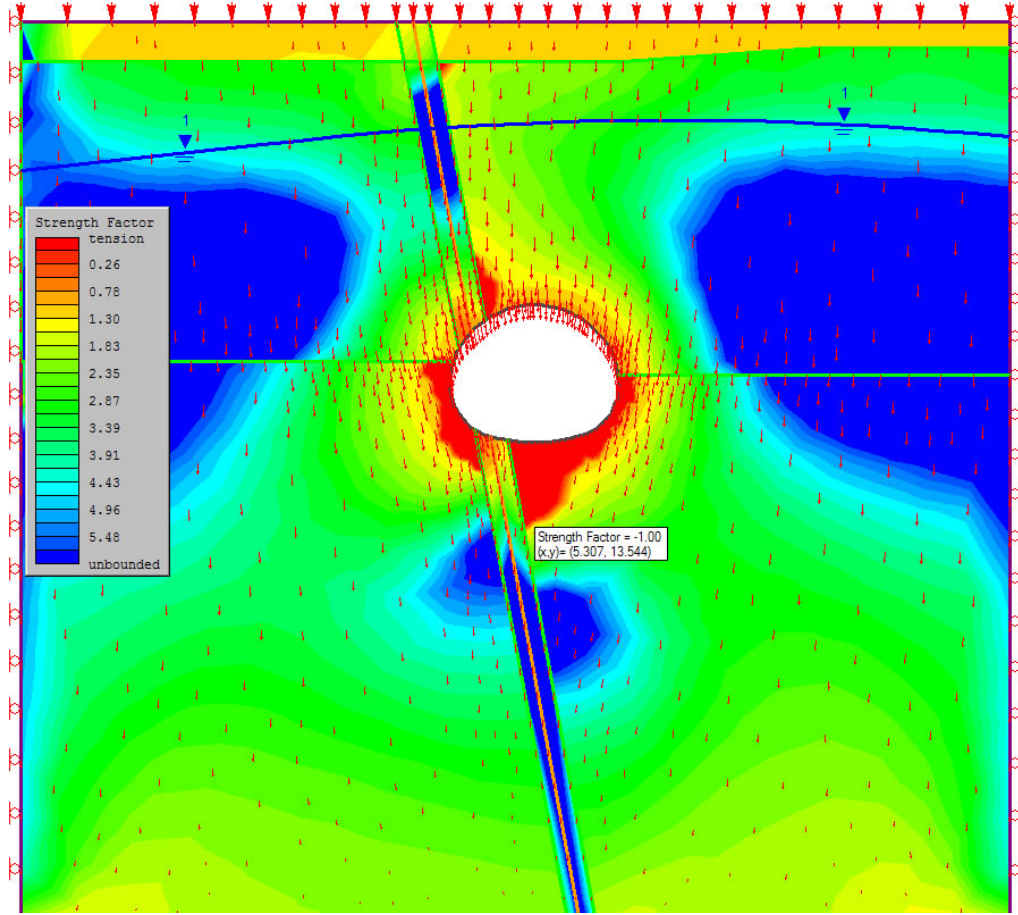


Şekil 5.37 Faylı durumda Tip2 tüneli etrafındaki  $\sigma_3$  lerin dağılımı



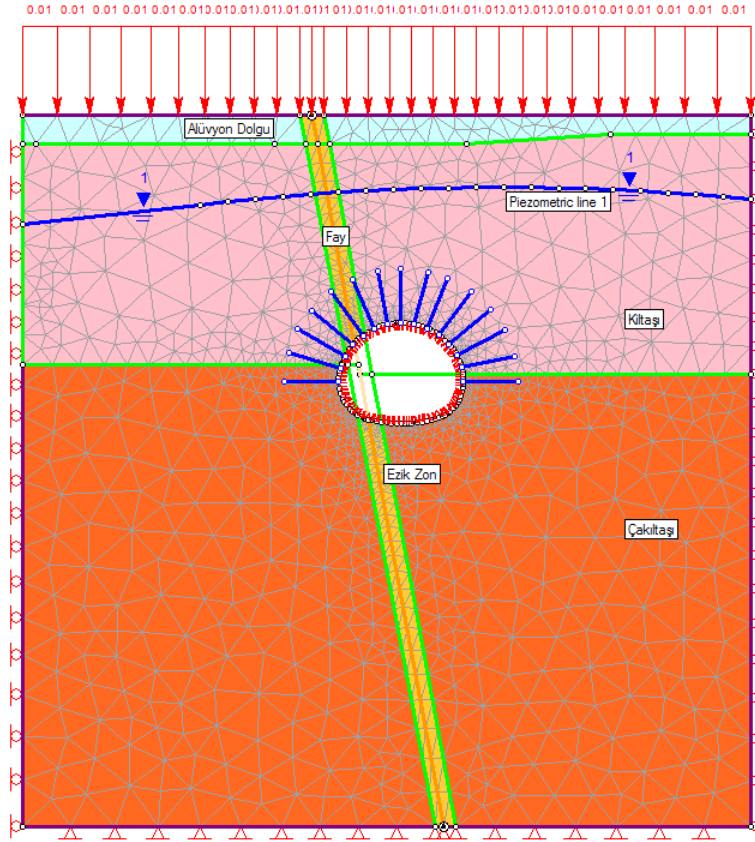
Şekil 5.38 Faylı durumda Tip2 tüneli etrafındaki toplam yerdeğişmeler ve dağılımları



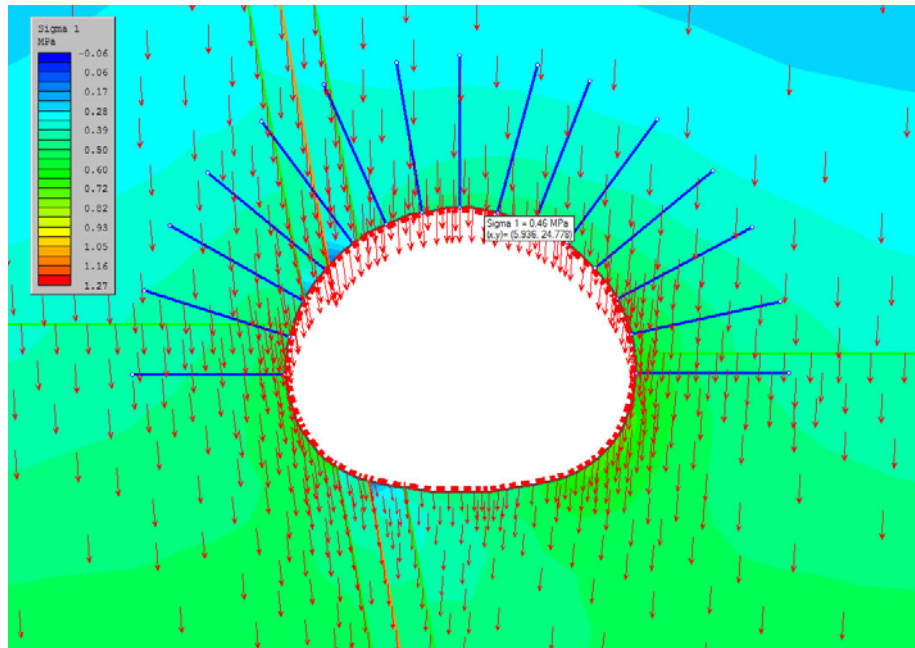


Şekil 5.39 Faylı durumda Tip2 tüneli etrafındaki güvenlik faktörü dağılımı

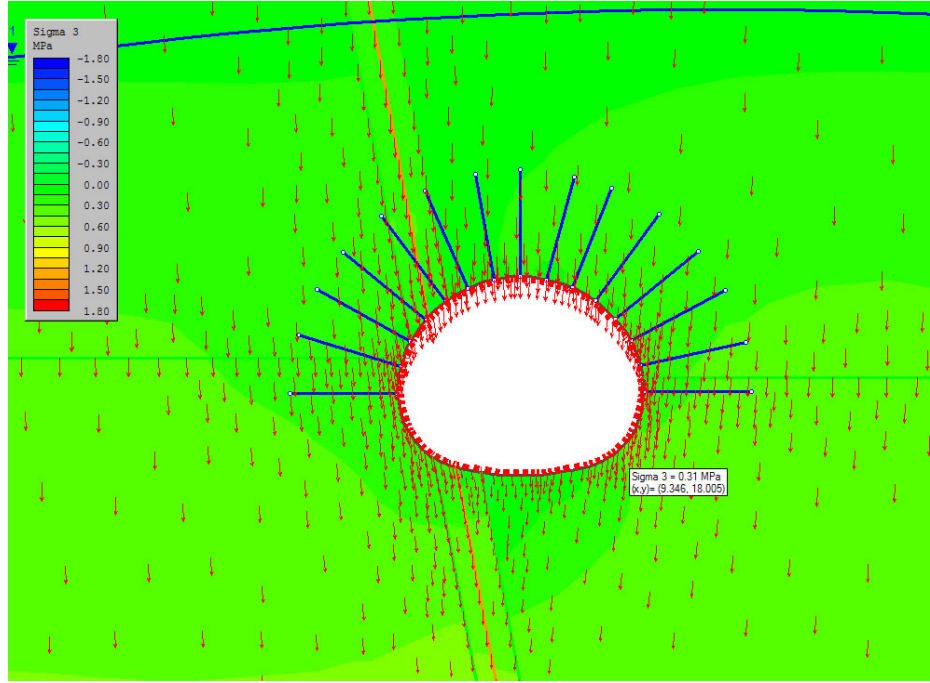
### 5.2.3.3 Tip 2 Tüneli Tahkimatlı ve Faylı Durum



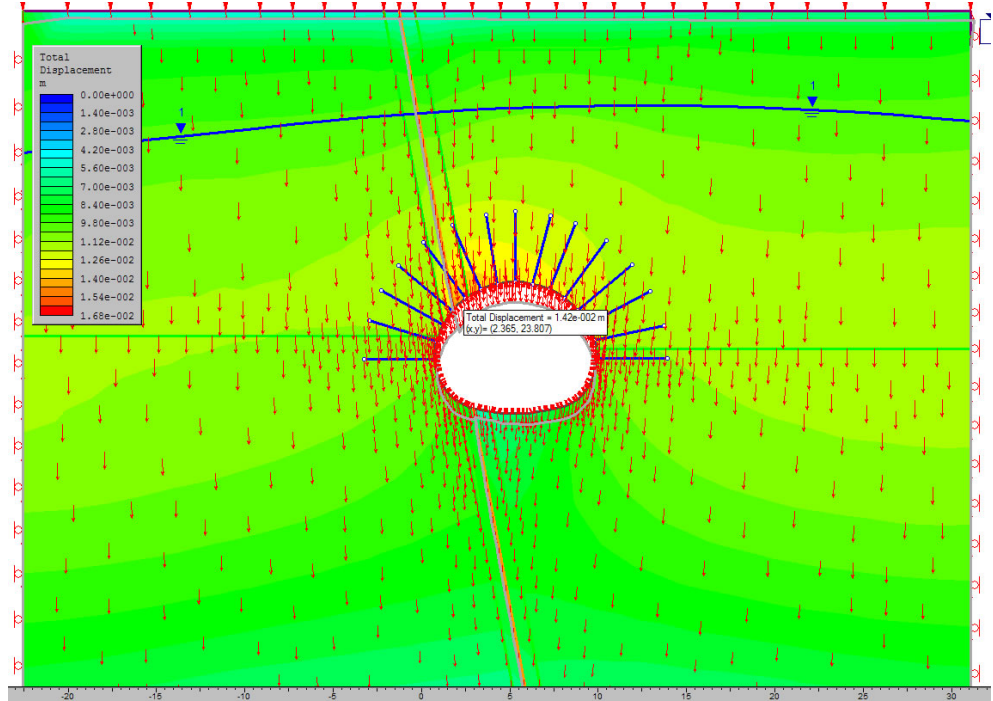
Şekil 5.40 Faylı ve tahkimatlı durumda Tip2 tünel modeli



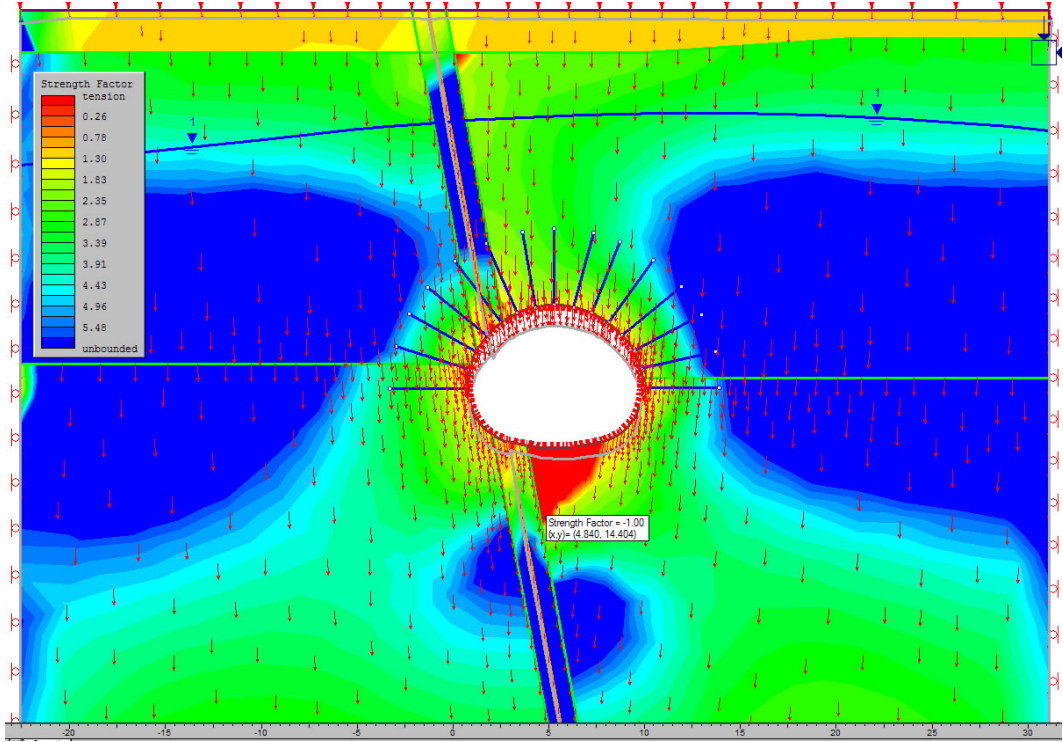
Şekil 5.41 Faylı ve tahkimatlı durumda Tip2 tüneli etrafındaki  $\sigma_1$  lerin dağılımı



Şekil 5.42 Faylı ve takimatlı durumda Tip2 tüneli etrafındaki  $\sigma_3$  lerin dağılımı



Şekil 5.43 Faylı ve takimatlı durumda Tip2 tüneli etrafındaki toplam yerdeğiştirmelerin dağılımı



Şekil 5.44 Faylı ve takimatlı durumda Tip2 tüneli etrafındaki güvenlik faktörü dağılımı

#### 5.2.4 Tip2 Tünel Kesiti Sayısal Modelleme Sonuçları

İzmir Metro İnşaatı II. Etap projesi kapsamında açımı Yeni Avusturya Tünel Açma yöntemi prensiplerine göre devam eden ve Tip2 olarak isimlendirilen 7,73 metre yüksekliğinde, yaklaşık 113 m<sup>2</sup> kazı alanına sahip delme tüneller Phase2 sayısal modelleme programı kullanılarak modellenmiştir.

Ele alınan bölgede Tip2 tüneli, üst bölümünde plastik kemerlenmeyi sağlayacak bir örtü kalınlığına sahip olmadığı için (tünel yüksekliğinin 2-3 katından fazla bir örtü tabakası olmaması ve tünel üstündeki formasyonun çok zayıf olması nedeni ile) sığ tünel niteliğindedir. Bu nedenle modellemelerde birebir ortam şartlarına uygunluk sağlanmıştır.

Tip2 tünel kesiti üzerinde Karma (Hibrid) yöntem esasına dayalı olarak yapılan sayısal modellemeler tipl kesitinde olduğu gibi yine üç ayrı durumda gerçekleştirilmiştir. Tünelin tahkimatsız durumu, tahkimatsız ve fay zonunun gözlemlendiği durum ve de fay zonun tünel içerisinde gözlemlendiği ve tünelin tahkim

edildiği durumlar ayrı ayrı analiz edilmiştir. Bu çalışmaların sonuçları şekil 5.27 ve 5.44 arasında detaylı olarak verilmektedir. Buna göre ;

Güzergahın 2+447,75 – 2+655,48 km. aralığında yer alan Göztepe istasyonu ve civarında açılan Tip2 tünel kesitinde, fay zonunun gözlenmediği ve tahkimatsız durumda tünel tepe noktasında (tavanda) yaklaşık 15 mm bir yerdeğiştime değeri saptanmıştır. Bu değer tünel tavanından yeryüzüne doğru 5 er metre aralıklarla okunmuş ve 14,2 , 13 ve yeryüzünde yaklaşık 10 mm lik düşey yönde bir yerdeğiştirme değeri saptanmıştır.

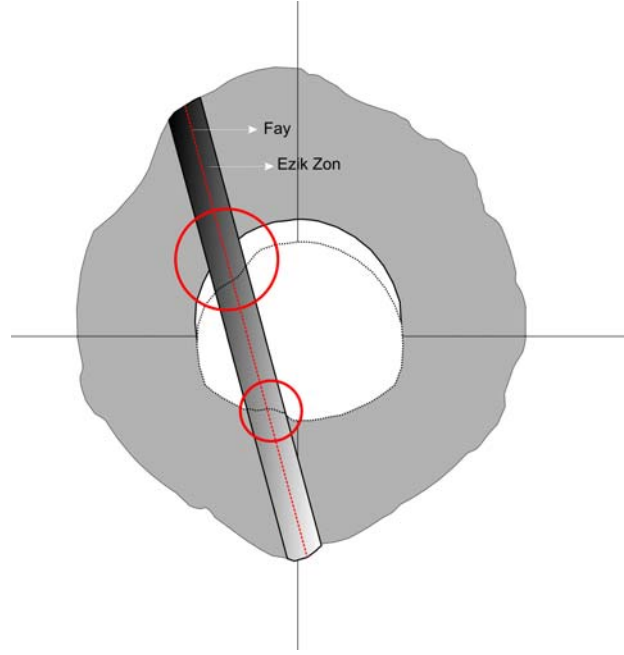
Tünelde fay zonunun gözlendiği ve tahkimatın henüz yapılmadığı durumda ise tepe noktasındaki değer 16 mm' ye yeryüzündeki oturma miktarı da yaklaşık olarak 9 mm değerine çıkmaktadır.

Tahkimatın tamamlandığı faylı zon geçişinde ise tünel tavanındaki toplam yerdeğiştime miktarı 13 mm yeryüzünde oluşacak toplam yerdeğiştirme miktarında 6,98 mm civarında olduğu saptanmıştır. Değerler aşağıda tablo 5.5' de verilmektedir.

Tablo 5.5 Tip 2 tünel kesitinde kazısı sonrasında meydana gelen toplam yerdeğiştirme değerleri

Tünel Tepe Noktasından Yeryüzüne Uzaklık (m)	0	5	15	20
Toplam Yerdeğiştirme Değerleri (mm)				
Tip 2 Tüneli Tahkimatsız Fay Zonu Gözlenmemiş	15	14,2	13	9,7
Tip 2 Tüneli Tahkimatsız Fay Zonu Gözlenmiş	16	13,5	11,5	8
Tip 2 Tüneli Tahkimatlı Fay Zonu Gözlenmiş	13	11,9	10,4	6,98

Burada dikkat edilmesi gereken esas nokta tünelin yukarıda tablo 5.5'de verilen mertelerdeki yer değıştirmelerinin yanı sıra fay zonunun tüneli kestiği noktalardaki yerdeğiştirme değerleridir. Şekil 45'de bu bölgeler kırmızı daire içerisinde gösterilmektedir.



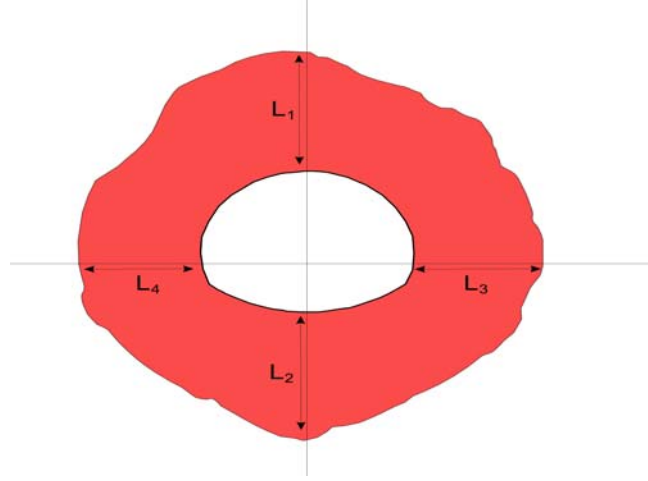
Şekil 5.45 Fay zonunun tüneli kestiği noktalarda gözlenen maksimum yerdeğiştirmeye bölgeleri

Tip2 tünel kesitinin geniş kesit olması, tünel üst örtü tabaka kalınlığının düşük ve oldukça dayanımsız oluşu, fayın etkilerinin bu kesit üzerinde daha net gözlenmesine olanak sağlamıştır. Tahkimatsız ve fay zonunun gözleendiği kesitte, tünel tepe noktası yakınında, şekil 5.45’ te işaretlenen bölgede fayın etkisi ile oluşan yerdeğiştirmeye yaklaşık 19 mm’ye çıkmış, aynı noktadaki yerdeğiştirme değeri tahkimatlı durumda 12-13 mm arasına gerilemiştir.

Analizler sonucu elde edilen “Strength Factor” güvenlik faktörü değeri, tünelin deforme olmadan ayakta durabilmesi yani stabilitesi hakkında bilgi veren ve elde edilen değerin “1” den büyük ya da küçük olması durumuna göre değerlendirilen bir olgudur.

Analiz sonuçlarında tip2 tünel kesiti için açığa çıkan veriler, şekil 5.32, 5.39 ve 5.44’te gösterilmektedir. Şekillerde güvenlik faktörünün 1 den küçük olduğu bölgeler kırmızı renk ile belirtilmiştir. Sayısal analizlerden daha net bilgilere ulaşılması bakımından değerlendirme aşamasında risk taşıyan bölgeler tip1 tünellerine benzer biçimde şekil 5.45’ de ki gibi işaretlenmiştir. Buna göre;

- tip2 tünel kesitinde fayın gözlenmediği ve tahkimatın yapılmadığı durumda  $L_1$  mesafesi 1,35 metre,  $L_2$  mesafesi 2,70 metre,  $L_3$  - $L_4$  mesafeleri yaklaşık 1,17 metre olarak ,



Şekil 5.45 Tip1 tünel kesiti etrafındaki riskli bölgelerin gösterimi

- tip2 tünel kesitinde fay zonunun gözlendiği ve tahkimatın yapılmadığı durumda  $L_1$  mesafesi 3,43 metre,  $L_2$  mesafesi 4,8 metre,  $L_3$  mesafesi 1,00 metre ve  $L_4$  mesafeleri yaklaşık 1,72 metre olarak,
- tip1 tünel kesitinde fay zonunun gözlendiği ve tahkimatın tamamlandığı durumda  $L_1$  mesafesi 0 ,  $L_2$  mesafesi 3,98 metre ,  $L_3$  ve  $L_4$  mesafeleri 0 olarak bulunmuştur. Aşağıda tablo 5.6’da toplu sonuçlar verilmektedir.

Tablo 5.6 Kazı sonrası Tip2 tünel kesiti etrafında meydana gelen riskli bölgelerin tünel cidarından uzaklıkları

Riskli Bölge Mesafeleri (metre)	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$
Tip 2 Tüneli Tahkimatsız Fay Zonu Gözlenmemiş	1,35	2,70	1,17	1,16
Tip 2 Tüneli Tahkimatsız Faylı Zonu Gözlenmiş	3,43	4,90	1,00	1,72
Tip 2 Tüneli Tahkimatlı Faylı Zonu Gözlenmiş	0	2,98	0	0

Tip1 ve tip2 kesitleri için sayısal modellemeler sonucunda elde edilen “L” değerlerden hareketle tünel tahkimat parametleri hakkında yorum yapmak

mümkündür. Örneğin tünel tahkimatında kullanılacak kaya bulonlarının boylarının belirlenmesinde ve bulonların etki mesafelerinin tayininde bu verilerden yararlanmak mümkündür.

### **5.3 Ayna Stabilitesini Arttırmaya Yönelik Uygulamaların Tunren V1.05 Sayısal Modelleme Programı İle Çözümlemesi**

Zayıf formasyonlarda ve sığ tünellerde ayna stabilitesinin artırılmasına yönelik, ayna zemininin güçlendirilmesi uygulamasının gerekli olup olmadığının önemli bir konudur.

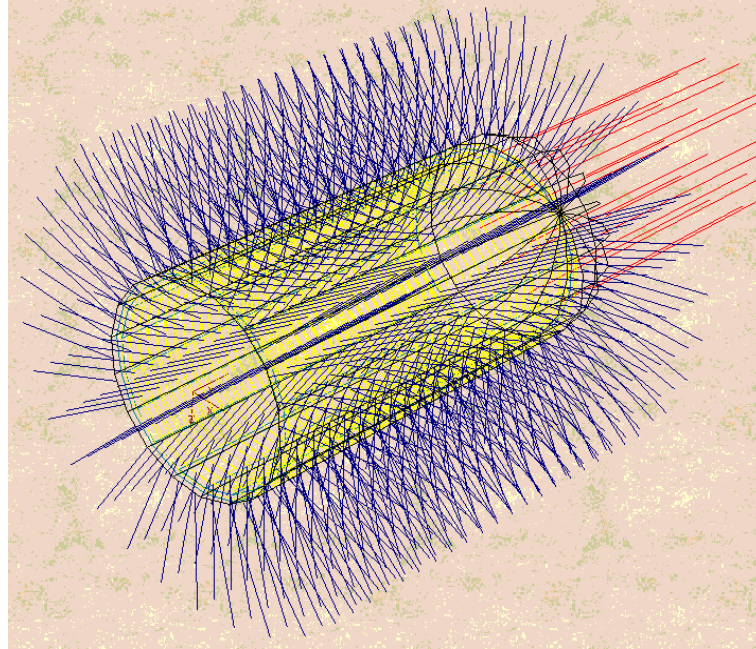
Özellikle sığ tünellerde, zayıf ortam şartları ile birlikte yüzey oturmalarının yarısına yakını, tünel daha yüzeydeki ölçüm istasyonuna gelmeden önce oluşmaktadır. Gelen yükler nedeniyle aynada plastikleşen ve dayanımını yitiren malzeme hacmi kadar yüzeyde oturmalar olacaktır. Bunların önlenmesi için tünel aynasındaki zeminin içsel parametrelerini olumlu yönde arttırmak gereklidir.

Genellikle boru kemer yöntemi ile birlikte bu amaca yönelik olarak kullanılan zemin çivileri, kazı öncesi yüzey oturmalarını denetleyen destek elemanlarıdır. Bazı uygulamalarda zemin çivisi yerine yukarıda değinildiği gibi fiberglas boru ve jet-grout kolon uygulamaları da yapılabilmektedir. Bu bölümde İzmir Metro Projesi II. aşama Üçyol-F.Altay tüneli yapımında, kazı aynasının zemin stabilitesi açısından güçlendirmesine gerek olup olmadığı *Tunren V 1x* programı yardımıyla araştırılmaya çalışılmıştır.

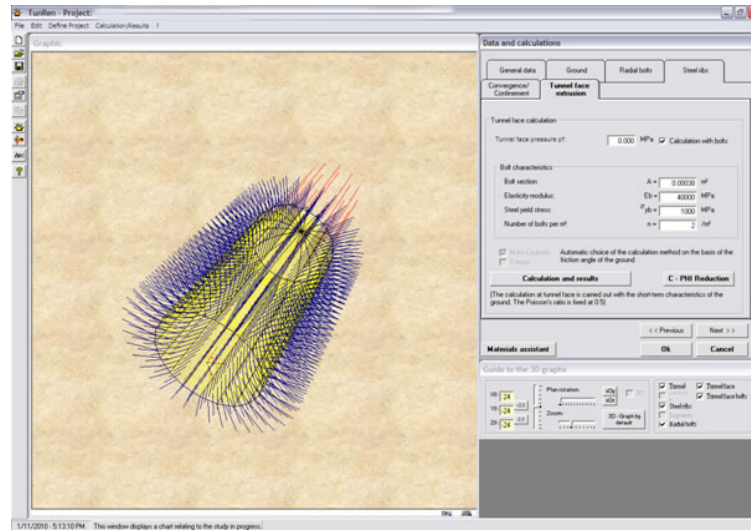
Bu program ile Mohr-Coulomb yenilme ölçütü esasına dayalı ampirik eşitliklerle oluşturulmuş olan yazılım yardımıyla ayna güçlendirmesi olmadığı durumda ve ayna güçlendirmesi olduğu durumda tünel-zemin davranışı çözümlemesi yapılarak ayna deformasyonu ve güvenlik faktörleri hakkında değerlendirme yapma olanağı vermektedir. Burada yazılım çıktılarında elde edilen değerlerin



sadece sonuçları verilecek ayrıntılar proje ekinde program çıktıları olarak eklenecektir (Ek-1).



(a)



(b)

Şekil 5.46 (a) Tunren V 1x programı ile oluşturulan model, (b) Programa veri giriş menüsü

Analiz kısa ve uzun vadeli tünel ayna stabilitesinin belirlenmesine yönelik olarak gerçekleştirilmiştir. Tip2 tünel geometrisi için, ayna çivisi kullanılmadığı durumda yapılan analiz sonucunda meydana gelecek ayna konverjansı 0,02320 m. yani 23 mm. olarak belirlenmiştir. Ayna çivisi kullanılmadığı durumda açıklık etrafındaki radyal ve teğetsel gerilmeler, tünel cidarından 25-30 m sonra ilksel duruma geri dönmektedir

Ek-1 de verilen tünel aynasındaki kabarmanın, kohezyon ve poisson oranına göre değiştiği grafikte, güvelik katsayısının 2,5 ve 5 aralığında, kabarma/yarıçap oranının yaklaşık 2,30 - 5 aralığındaki değeri ortalama 140 mm ile 300 mm arasında değişmektedir. Bunun anlamı tünelin içerisinde açılacağı ortam şartlarının 3,5 ile 4,2 kat kötüleşmesi durumunda, ortaya çıkacak ayna kabarmasının ifadesidir. Grafikte;

C-PHI Reduction	: Kohezyon-Poisson oranı azalımı
Extrusion ( $u_f$ , mm)	: Kabarma
$U_f/R$ (%)	: Ayna kabarması/Yarıçap

olarak ifade edilmektedir.

Tünel aynasına çivi uygulaması yapıldığı durumda yapılan analiz sonucunda meydana gelecek ayna konverjansı 0,01836 m. yani 18 mm. olarak belirlenmiştir. Ayna çivisi kullanılmadığı durumda açıklık etrafındaki radyal ve teğetsel gerilmeler, tünel cidarından yine 25-30 m aralığında ilksel duruma geri dönmektedir.

Bu durumdaki tünel aynasındaki kabarmanın, kohezyon ve poisson oranına göre değiştiği grafikte, meydana gelen yaklaşık 18 mm lik kabarma, azaltma faktörü olan F nin 1,75 katına kadar sabit kalmaktadır. Yani ortam şartları 1,75 kat kadar daha düşürülse bile aynadaki kabarma miktarı değişmeyecektir.

Sonuç olarak tünelde, ayna çivisi kullanılmadığı durumdaki ayna kabarma miktarı ile ayna çivisi kullanıldığı durum arasındaki ayna kabarma miktarının çok fazla değişmediği gözlenmiştir. Güzergahın ele alınan bu kesiminde, tünelin içerisinden açılacağı formasyonun içsel parametrelerinden dolayı ayna çivisi kullanımı gerekli değildir. Güzergah üzerinde, farklı kilometrelerde yapılan analizler, ayna çivisi uygulamasının daha akıcı ve plastik özellik gösteren formasyonlarda etkin halde kullanılabilirliğini ortaya koymuştur.

## **BÖLÜM ALTI**

### **DEĞERLENDİRME**

Tez çalışmasının bu bölümünde, İzmir Metrosu II. aşama projesi kapsamında sığ tünel koşullarında açılmakta olan tünel tipleri etrafında oluşacak gerilmelerin, sübidans miktarlarının ve bunların yerüstü yapılarına olan etkilerinin değerlendirilmeleri yapılmıştır.

Hazırlanan tezde, yeryüzünde meydana gelebilecek sübidans (çökme) hesaplamaları hem Phase2 sayısal modelleme yazılımı ile, hemde ampirik yaklaşımlarla tahmin edilmiş ve elde edilen veriler belirlenen lokasyonlardaki gözlem noktalarından alınan veriler ile karşılaştırılmıştır.

Sığ derinliklerde açılan tünellerde meydana gelen birincil gerilmeler için, düşey gerilmelere karşılık gelen minimum ve maksimum yatay gerilmeler derinliğe bağlı olarak geliştirilen fonksiyonlar ile ifade edilmektedir. Açılan tüneller etrafında gerilme şartlarının artmasına neden olan düzensiz topografya, fay ve kırık zonları gibi etkenler sonucunda, tünellerde yenilmeler meydana gelmektedir. Düşük gerilme durumlarında, süreksizlik içeren ve gevrek kaya ortamlarında kama ve blok düşmeleri tipinde yenilmeler meydana gelirken, zemin ve yumuşak kaya ortamlarında ayna akmaları ve tünel tavanında dökülmeler en çok karşılaşılan yenilme türleridir.

İnşası devam eden İzmir Metrosu II. aşama Fahrettin Altay-Üçyol tünel güzergahının neredeyse tamamının sahip olduğu jeolojik ve jeoteknik koşullar düşük gerilme koşullarına uyan, sığ derinlikli ve süreksizlikler içeren zemin ve zayıf kaya ortamı koşullarıdır. Bu nedenle bölüm üç'te açıklanan ve tablo 3.2' de detayları ayrıntılı olarak verilen, derinliğe bağlı olarak değişen yatay gerilme bağıntılarından, gerek ortam şartlarına uygunluğu gerekse benzer formasyonlar için farklı çalışmalarda kullanılması nedeni ile beş nolu bağıntı seçilmiştir.

Ayrıca tip1 kesitli, yaklaşık 27-30 metre derinlikte açılan ve tip2 kesitli, 15-18 metre derinlikte açılan tünellerde meydana gelecek düşey ve yatay gerilmeler (Onargan ve diğer, 2006)' ya göre hesaplanmış ve elde edilen değerler aşağıda belirtilmiştir.

Tablo 6.1 Tip1 tünel kesitinde oluşabilecek düşey ve yatay gerilmelerin değişimi

Gerilme Türü (MPa)	Kullanılan Formül	Derinlik Değişimi (m)	Maksimum Değer (MPa)	Maksimum Değer (MPa)
$\sigma_V$	$\sigma_V = \gamma \cdot g \cdot z$	27 -30	0,52	0,58
$\sigma_H$	$\sigma_H = 2,8 + 0,04 Z$	27-30	3,88	4
$\sigma_h$	$\sigma_h = 2,2 + 0,024 Z$	27-30	2,8	2,92

Tablo 6.2 Tip2 tünel kesitinde oluşabilecek düşey ve yatay gerilmelerin değişimi

Gerilme Türü (MPa)	Kullanılan Formül	Derinlik Değişimi (m)	Maksimum Değer (MPa)	Maksimum Değer (MPa)
$\sigma_V$	$\sigma_V = \gamma \cdot g \cdot z$	15-18	0,29	0,35
$\sigma_H$	$\sigma_H = 2,8 + 0,04 Z$	15-18	3,40	3,52
$\sigma_h$	$\sigma_h = 2,2 + 0,024 Z$	15-18	2,56	2,63

Yukarıda verilen formüllerden hesaplanan değerler, Phase2 sayısal modelleme programından elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır. Hazırlanan modelde Tip1 tünel geometrisi için tahkimatsız ve fayın olmadığı durumda, tünel tavanında meydana gelecek maksimum  $\sigma_V$  değeri 1,06 MPa civarında bulunurken bu değer tünel tabanında 0,85 MPa' a gerilemektedir. Fay zonunun geçildiği ve tahkimatın tamamlandığında durumda tavandaki gerilmenin büyüklüğü 0,93 MPa' a, tabandaki değer ise 0,52 MPa gerilemektedir. Aşağıda tip1 tünel geometrisinde, farklı üç durum için sayısal modelleme verilerine göre, tünel tavanından başlanarak yeryüzüne kadar oluşan gerilme durumu verilmektedir.

I.Durum: Tahkimatsız –Fay zonu gözlenmemiş

II. Durum: Tahkimatsız –Fay zonu gözlenmiş

III. Durum: Tahkimatlı – Fay zonu gözlenmiş

Tablo 6.3 Tip1 tünel kesitinde tünel tavanında oluşan düşey gerilme ( $\sigma_v$ ) durumu.

Tünel tavanından yeryüzüne uzaklık (metre)	I.Durum $\sigma_v$	II.Durum $\sigma_v$	III.Durum $\sigma_v$
0	1,06	1,02	0,93
5	0,96	0,66	0,60
10	0,53	0,52	0,53
15	0,46	0,42	0,45
20	0,40	0,35	0,35

Tablo 6.4 Tip1 tünel kesitinde tünel tavanında oluşan için yatay gerilme durumları ( $\sigma_H$ ) durumu.

Tünel tavanından yeryüzüne uzaklık (metre)	I.Durum $\sigma_H$	II.Durum $\sigma_H$	III.Durum $\sigma_H$
0	0,06	0,04	0,37
5	0,49	0,41	0,54
10	0,47	0,48	0,50
15	0,44	0,38	0,36
20	0,35	0,31	0,35

Tünel tavanından yeryüzüne kadar farklı derinliklerde meydana gelen bu gerilme dağılımlarının yanı sıra, tünel tabanında; I. durumda 0,85 MPa lık bir düşey gerilme, 0,04 MPa' lık yatay gerilme değerleri, II. durumda 0,45 Mpa' lık düşey gerilme, 0,20 MPa' lık yatay gerilme değeri ve III. durumda ise, 0,52 MPa' lık düşey gerilme ile 0,35 MPa' lık yatay gerilme değerleri saptanmıştır.

Tahkimatsız ortamda yapılan analizler sonucunda, tünellerde yatay gerilmenin düşey gerilmeye oranı (k)' nin , 6,89-10,05 arasında değiştiği saptanmıştır. Bu nedenle tünel yan duvarlarında tansiyon ve makaslama yenilmelerinin oluşması mümkün görülmektedir.

Bu gerilme değerlerinin yanısıra toplam yerdeğiştirme değerleri incelendiğinde, tip1 tünel geometrisi için üç durumda da analizler yapılmış ve bölüm beş' te detaylı olarak verilen sonuçlara ulaşılmıştır. Buna göre tip1 tünel geometrisinde, üç durum için hesaplanan ortalama yerdeğiştirme değeri 18-19 mm. mertebesindedir.

Tip2 tünel geometrisi için ise, tahkimatsız ve fayın olmadığı durumda, tünel tavanında meydana gelecek maksimum  $\sigma_v$  değeri 0,60 MPa civarında bulunurken bu değer tünel tabanında 0,44 MPa' a gerilemektedir. Fay zonunun geçildiği ve tahkimatın tamamlandığında durumda, tavadaki gerilmenin büyüklüğü 0,47 MPa, tabandaki değer ise 0,47 MPa olarak hesaplanmıştır. Aşağıda tip2 tünel geometrisinde, farklı üç durum için (tahkimatsız ve faysız durum, tahkimatsız ve faylı durum, tahkimatlı ve faylı durum) sayısal modelleme verilerine göre, tünel tavanından yeryüzüne, oluşan gerilme durumu verilmektedir.

Tablo 6.5 Tip2 tünel kesitinde tünel tavanında oluşan düşey gerilme ( $\sigma_v$ ) durumu.

Tünel tavanından yeryüzüne uzaklık (metre)	I.Durum $\sigma_v$	II.Durum $\sigma_v$	III.Durum $\sigma_v$
0	0,60	0,62	0,47
5	0,34	0,32	0,29
10	0,26	0,25	0,24
15	0,18	0,19	0,18

Tablo 6.6 Tip2 tünel kesitinde tünel tavanında oluşan için yatay gerilme durumları ( $\sigma_H$ ) durumu.

Tünel tavanında yeryüzüne uzaklık (metre)	I.Durum $\sigma_H$	II.Durum $\sigma_H$	III.Durum $\sigma_H$
0	0,02	0,04	0,17
5	0,15	0,10	0,13
10	0,11	0,07	0,09
15	0,03	0,03	0,03

Tünel tavanından yeryüzüne kadar farklı derinliklerde meydana gelen bu gerilme dağılımlarının yanı sıra, tünel tabanında; I. durumda 0,44 MPa lık bir düşey gerilme, 0,01 MPa' lık yatay gerilme değerleri, II. durumda 0,52 Mpa' lık düşey gerilme, 0,03 MPa' lık yatay gerilme değeri ve III. durumda ise, 0,47 MPa' lık düşey gerilme ile 0,06 Mpa' lık yatay gerilme değerleri saptanmıştır.

Bu gerilme değerlerinin yanısıra toplam yerdeğiştirme değerleri incelendiğinde, tip2 tünel geometrisi üç durumda da analiz yapılmış ve önceki bölümlerde detaylı olarak verilen sonuçlara ulaşılmıştır. Buna göre tip2 tünel



geometrisinde, üç durum için hesaplanan ortalama yerdeğiştirme değeri 11,5 -12 mm. mertebesindedir.

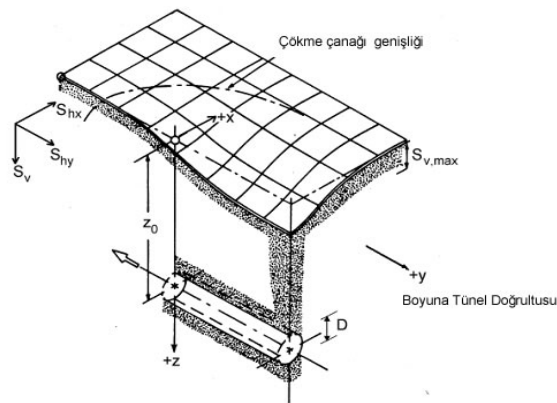
Fakat bu değer tünelin tepe noktası için geçerli kapanım değeridir. Gözlenen fay zonunun tüneli kestiği tepe noktasında, oluşturulan sayısal model verilerine göre II. durum için 18 mm, III. durum için ise 13 mm.' lik kapanma değerleri elde edilmiştir.

Günümüzde özellikle şehir içi metro, karayolu yada farklı amaçlar için kullanılmak üzere yapılan tünel kazılarında, kazı sonrasında tünel duvarlarında oluşan konverjans değeri ile yeryüzünde oluşan, yeryüzündeki yapılara zarar verebilecek, hatta yıkımlara neden olabilecek tasmanın müsaade edilebilir değerler arasında tutulması oldukça önemlidir.

Kazı sırasında oluşabilecek çökme çanağının genişliği, derinliğin bir fonksiyonu olarak tanımlanmış ve aşağıdaki fonksiyonel bağıntı ile ifade edilmiştir.

$$i = 0,43z_0 + 1,1$$

Bağıntıda  $i$ , çökme çanağı parametresi,  $z_0$  değeri ise, kazısı yapılan tünelin yeryüzüne olan mesafesini (derinlik) göstermektedir. Oluşacak çökme çanağının genişliği de, çökme çanağı parametresinin 2,5 - 3 katı kadardır. Bu değer pratikte  $i = K.z_0$  olarak kullanılmakta ve  $K$  değeri 0,5 olarak alınmaktadır. (Onargan ve diğer, 2007)



Şekil 6.1 Tünel kazısı kaynaklı oturma geometrisi ve çökme çanağı genişlikleri

Buna göre güzergah üzerinde ele alınan bölgeler için yapılan hesaplamalarda öngörülen çökme çanağı parametresi ( $i$ ), tip1 tünel derinliği için 11,85 m., tip2 tünel derinliği için 9,7 m. olarak hesaplanmıştır (tip1 tünel kesiti derinliği ortalama 25 metre, tip2 tünel kesiti derinliği ortalama 20 metre olarak alınmıştır). Her iki durumda oluşacak çökme çanağının genişliği ise;

$$\begin{array}{ll} \text{Tip1 tüneli için} & 11,85 \times 3 = 35,55 \text{ metre,} \\ \text{Tip2 tüneli için} & 9,7 \times 3 = 29,1 \text{ metre} \end{array}$$

olarak hesaplanmaktadır.

Ayrıca kazı alanında oluşacak maksimum sübsidans (çökme) miktarı ( $S_{\max}$ ), stabilite sayısı ( $N$ ) ile ilişkilendirilmiştir. Pratik kullanımda

$$S_{\max} = 4,9 * N^{1,29}$$

$S_{\max}$  : Maksimum sübsidans (mm)

$N$  : Stabilite sayısı

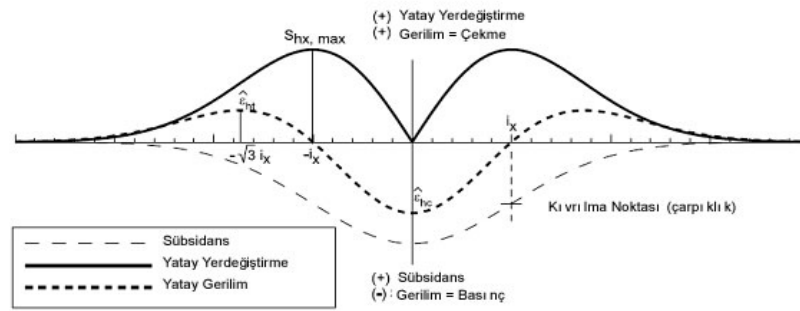
formülü ile ifade edilen bu değer stabilite sayısı ile doğrudan ilişkilidir. Tez kapsamında bölüm üç, tablo 3, 2' de stabilite sayısının tünel stabilite durumu ile ilişkisi gösterilmiştir. Buna göre çalışmada  $N$  değeri, ayna önünde gözlenen göçme ve akma problemi ile aşırı plastikleşme durumu göz önünde bulundurularak hesaplanmalı ve değerlendirilmelidir. Literatürde  $N$  değeri aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$N = \frac{\sigma_z}{C}$$

Burada " $\sigma_z$ " tünel aksı üzerindeki üst örtü basıncını, " $C$ " değeri ise kohezyonu simgelemektedir. Tünel güzergahının ele alınan bölümünde yer alan Altındağ Formasyonu için laboratuvar ortamında yapılan testler sonucu belirlenen ortalama  $C$  değeri 0,18 MPa ve  $\sigma_z$  değeri ise tip1 kesitli tünel geometrisi için 0,36 MPa,

tip2 kesitli tüneller için ise 0,45 MPa dır. Bu durumda stabilite sayısı “N” tip1 tünelleri için 2,5 değerini, tip2 tünelleri için 2 değerini almaktadır. Tablo 3.2’ de verilen tanımlamalara göre  $N < 3$  olduğundan, güzargahın ele alınan kısmında stabilite açısından bir belirsizlik söz konusudur.

Bu durumda  $S_{max}$  değeri tip1 tünel geometrisi için 15,978 mm., tip2 tünel geometrisi için ise, 11,90 mm. olarak hesaplanmaktadır. Şekil 6.2’ de çökme çanağı boyunca yeryüzünde meydana gelen oturmalar ve yatay yer değiştirmeler şematik olarak verilmektedir.



Şekil 6.2 Çökme çanağı boyunca yeryüzünde meydana gelen oturmalar, yatay yer değiştirmeler

Çökme çanağının hacim kaybı cinsinden fonksiyonel ifadesi ise;

$$S_v(x) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{V_L D^2}{4i_x} e^{-\frac{x^2}{2i_x^2}}$$

şeklinde dir. Burada :

D: Tünel çapı (m)

$V_L$ : D çaplı tünelde meydana gelen hacimsel kayıp (%)

olarak tanımlanmıştır. Bu durumda :

$$V_L = 0,343 * N^{1,81} = 0,343 * 2,5^{1,81} = \% 1,8$$

- tip1 kesitli yaklaşık D=9,7 m. çaplı tünel geometrisi için  $S_{max}$  değeri

$$S_{max} = 3,14 * 10^{-3} * (D^2 / i) * V_L ; V_L = \% 1,8 , D = 9.7 \text{ m} , i = 11,85 \text{ m}$$

$$S_{\max} = 44,88 \text{ mm}$$

- tip2 kesitli yaklaşık D=12 m. çaplı tünel geometrisi için  $S_{\max}$  değeri

$$S_{\max} = 3,14 * 10^{-3} * (D^2 / i) * V_L ; V_L = \% 1,2 , D = 12 \text{ m} , i = 9,7 \text{ m}$$

$$S_{\max} = 55,94 \text{ mm}$$

olarak hesaplanmaktadır. Pratik formüllerden ve ampirik ifadelerden hesaplanan  $S_{\max}$  değerleri ortalama olarak kullanılabilirdiği gibi, tez çalışmasında tünel güzargahının emniyeti ve güvelik faktörleri göz önünde bulundurularak, ampirik formüllerden hesaplanan değerler olarak alınmıştır.

$S_{\max}$  değerine bağlı olarak hesaplanan “açısal çarpıklık değeri” ve maksimum eğim olarak tanımlanan terim, çökme çanağı eğrisinde dönüm noktasındaki eğimin büyüklüğü olarak ifade edilmekte olup, bu değer yapılarda meydana gelen hasarların büyüklüğünde önemli bir parametre olarak kabul edilmektedir (Onargan ve diğer, 2007).

Literatürde  $(\frac{d_s}{d_x})_{\max}$  ifadesi ile tanımlanan bu ifade, yapı hasar değerlendirme analizlerinde, yapısal hasarların “başlangıç hasar limit büyüklüğü” değeri olarak kabul edilmektedir.  $S_{\max}$ ' in bir fonksiyonu olarak hesaplanabilen bu değer, değerlendirme aşamasında tablo 6.7' de verilen sınır değerler ile karşılaştırılarak yorumlanmaktadır.

Bu değerın tespitinde kullanılan ampirik ifade;

$$(\frac{d_s}{d_x})_{\max} = \frac{0,606 * S_{\max}}{i}$$

şeklinde. Buna göre İzmir Metrosu II.aşama Üçyol-Fahrettin Altay arasında kazısı yapılan zayıf karakterli ve faylı formasyonda açılan özellikle geniş kesit (tip2) tünelleri için açısal çarpıklık değeri;

$$\left(\frac{d_s}{d_x}\right)_{\max} = \frac{0,606 \times 55,94}{9700} = 3,49 \times 10^{-3} = \frac{1}{286}$$

olarak hesaplanmaktadır.

Bu durum metro tünelinin güzergahı üzerinde bulunan binalarda ve farklı yerüstü yapılarında hasar olma ihtimalinin olduğu sonucunu ortaya koymaktadır. Açısal çarpıklık değerinin değerlendirilmesine yönelik açıklama tablo 6.7' de verilmektedir.

Tablo 6.7 Açısal çarpıklık değeri ile hasar durumu arasındaki ilişki (Onargan vd, 2007 düzenlenerek)

Açısal Çarpıklık Değeri (ds/dx) (m/m)	Hasar Durumu
1 / 100	Yapısal hasarların meydana geldiği sınır değer. h/ L < 0.25 özellikli esnek tuğla duvarlar için güvenlik sınırı. Tuğla duvarlarda çatlaklar meydana gelebilir.
1 / 250	Yüksek rijit binalarda eğrilik oluşması için limit değer
1 / 300	Yeryüzü yapılarında zeminde diklikten şaşma ve bina hasarları için hasar limiti

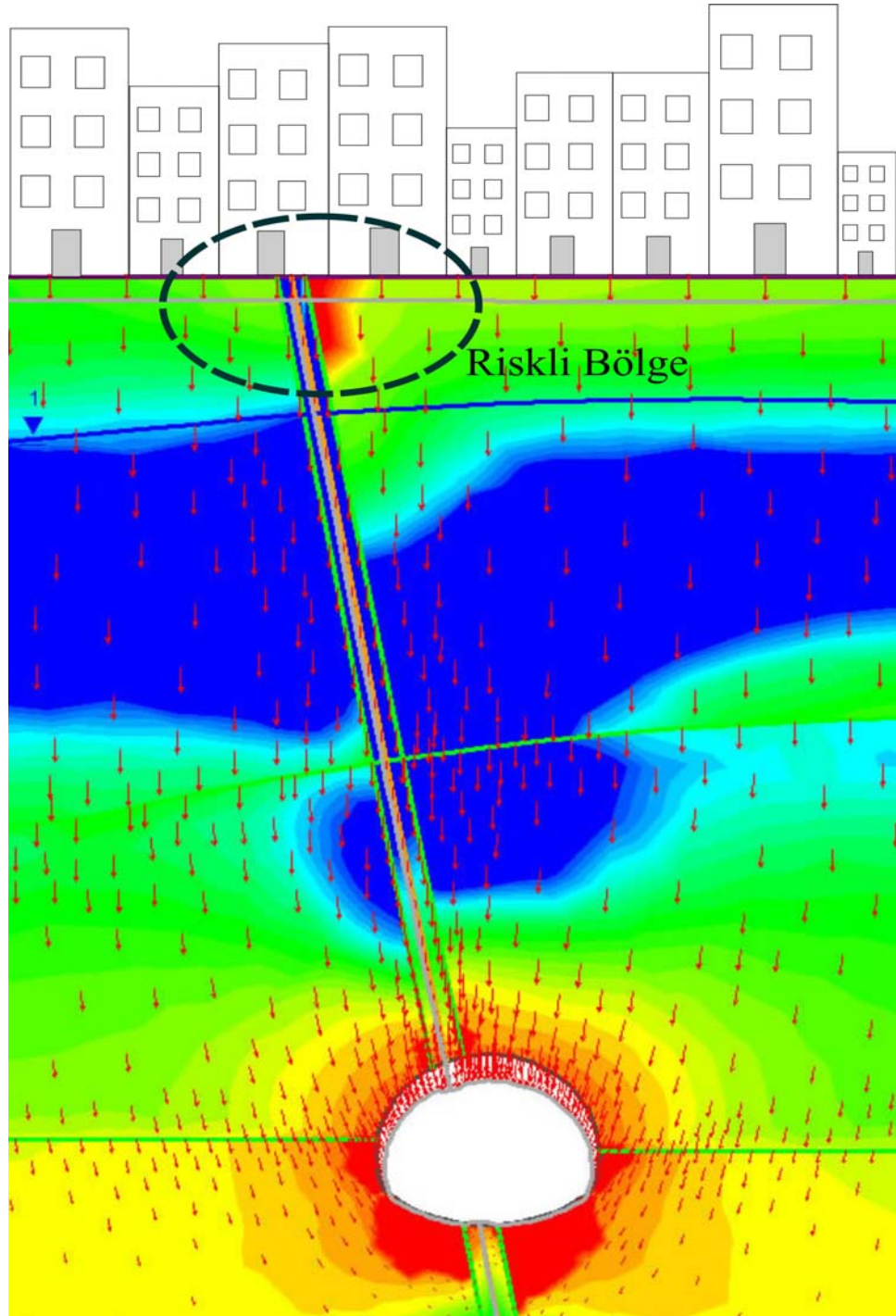
Elde edilen değer tablodaki 1/250 ve 1/300 değerlerine oldukça yakın olduğundan, güzergah üzerindeki yüksek binalarda diklikten şaşarak, eğrilikler in oluşması beklenmektedir. Tablo 6.8' de elde edilen sonuçlar ve bunların yorumlanmasında kullanılan sınır değerler toplu halde verilmektedir.

Tablo 6.8 Tünel kazı ve desteklenmesi esnasında öngörülen sübsidans parametreleri ve sınır değerleri (Onargan ve diğer, 2007 düzenlenerek)

	Tip1	Tip2	Sınır Değerler
Çökme çanağı genişliği , m	11,85	9,7	-
Stabilite Sayısı (N)	2,5	2	< 2
Maksimum Sübsidans Miktarı (Smax), mm	16 - 45	12-56	10
D çaplı tünelde meydana gelen hacimsel kayıp, %	1,8	1,2	0,50

Tünel inşaa işlemleri sırasında üst yapılarının hasara uğraması istenmeyen fakat zaman zaman gözlenen bir durumdur. Üst yapının hasara uğraması durumunda karşılaşılabilecek risk kategorileri farklılıklar göstermektedir. Bu süreçte oturma miktarının büyüklüğü kadar, binanın yapım şartları, temel yapısı ve bulunduğu lokasyonda meydana gelecek açılma çarpıklık değeri de büyük önem taşımaktadır.

Aşağıda şekil 6.3' de güzargah üzerinde riskli görünen bölgede hesaplamalarla ve bölüm beş' te yapılan sayısal modellemeler ortaya konan risklerin, üst yapıya etkisi gösterilmektedir. Şekilde riskli bölge olarak isimlendirilen bölgede, sayısal analiz yardımı ile bulunan güvenlik faktörü değerinin "1" den küçük olduğu yerler gösterilmektedir (kırmızı renk ile belirlenen alan). Bu durumda gerek açılan tünelin tamamen etrafı, gerekse yeryüzünün belirli bir kısmı risk oluşturmaktadır. Şekil 6.4' te güzargah üzerinde, bazı riskli bölgelerdeki üst yapının durumu verilmektedir.



Şekil 6.3 Tünel etrafındaki ve yeryüzündeki riskli bölgeler



Şekil 6.4 Güzargah üzerindeki üst yapılarında oluşan çatlaklar ve diklikten sapsmalar

Tez çalışması içerisinde, tip1 ve tip2 olarak adlandırılan farklı kesit ve derinliklerdeki tüneller için sayısal modelleme yöntemi kullanılarak, tünel içerisinde ve yeryüzünde meydana gelebilecek yerdeğiştirme yada çökme değerleri, ampirik yaklaşımlardan yararlanılarak güzergahın kayaç kalitesinin



tayini, analitik yöntemler kullanılarak güzergahın ele alınan kısmı için oluşabilecek en büyük oturma miktarı ve bunun sonucu olarak üst yapılarda meydana gelebilecek riskli durumlar incelenmiştir.

Bir mühendislik girişiminin gereği olarak, ele alınan mühendislik girişiminde son nokta hesaplanan değerler yada öngörülen durumlar ile, eğer mümkün ise gerçekleşen durumun karşılaştırılmasıdır. Bu nedenle inceleme alanı olarak ele alınan İzmir Metrosu II. aşama Üçyol-F.Altay metro güzergahı ve özellikle bu hat üzerindeki Göztepe İstasyonu ve yakınındaki fay zonu içeren bölge ve civarında meydana gelen yeryüzü deformasyonlarının sayısal değerleri incelenmiştir.

Bu değerler alınırken takip edilen yöntem, bölüm üç şekil 3.23' te de gösterilen tasman bulonları yöntemidir. Güzergah üzerinde belirli aralıklarla çakılan tasman bulonlarının zaman içerisinde tekrar okunması sonucu, tünel kazısının yeryüzüne etkisi anlaşılabilir. İzmir Metro çalışmasında da bu yöntem aşağıdaki şekilde uygulanmaktadır (detaylı gösterim ek2 de sunulmuştur).



Şekil 6.5 Güzergah üzerinde alınan ölçüm noktaları

Metro kazısı için planlanan güzergah, bazı virajlar hariç şehir üst yapısının sıkışıklığı nedeni ile karayolunun tam olarak altından ilerlemektedir. Bu nedenle

şekil 6.5’ de yeşil renk ile belirtilen ölçüm noktaları karayolu üzerinde alınmış olup, bir ölçüm hattı için dört ya da beş adettir.

İncelemesi yapılan Göztepe İstasyonu yakını faylı zon ve civarı ölçülen yeryüzü deformasyon değerleri tip1 ve tip2 tünel geometrileri için, aşağıda tablo 6.9 ve tablo 6.10’ da ayrı ayrı verilmektedir.

Tablo 6.9 Tip1 tünel kesiti yeryüzü deformasyon değerleri

Nokta No	İlk Okuma (m)	Son Okuma (m)	Değer (m)
1.1	28,083	28,062	-0,021
1.2	27,953	27,931	-0,022
1.3	28,032	28,013	-0,019
1.4	27,949	27,931	-0,018
1.5	28,166	28,146	-0,017
<b>Ortalama</b>			<b>-0,019</b>

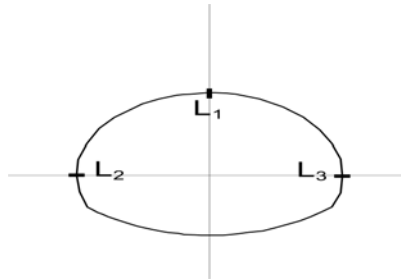
Tablo 6.10 Tip2 tünel kesiti yeryüzü deformasyon değerleri

Nokta No	İlk Okuma (m)	Son Okuma (m)	Değer (m)
1.1	28,677	28,653	-0,024
1.2	28,463	28,436	-0,027
1.3	28,511	28,478	-0,033
1.4	28,445	28,421	-0,024
1.5	28,631	28,604	-0,027
<b>Ortalama</b>			<b>-0,027</b>

Tablolardan da anlaşılacağı gibi tip1 tünel geometrisi ve derinliği için yüzeyde ortalama 19 mm lik bir deformasyon değeri okunurken, tip2 tünel kesiti için bu değer ortalama 27 mm. olarak belirlenmiştir.

Belirlenen bölge ve civarında gelişen tünel içi deformasyon değerleri ise geçen süre ile farklılık göstermektedir. Okuması yapılan L<sub>2</sub> ve L<sub>3</sub> olarak isimlendirilen

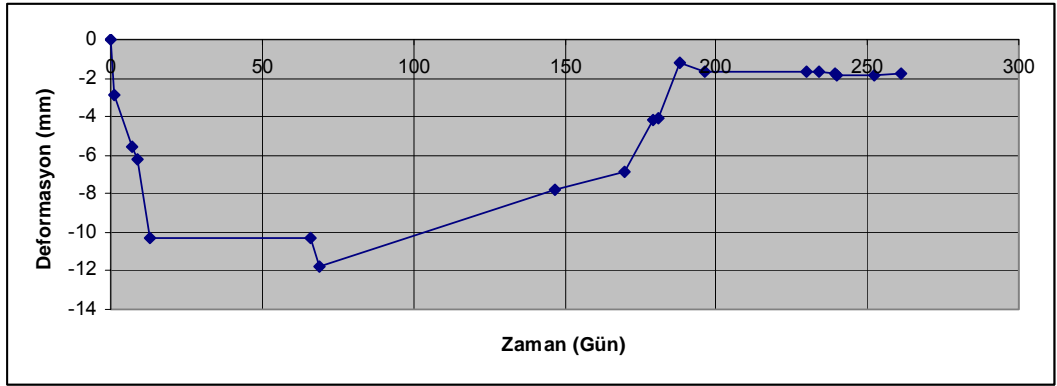
tünel mesafesinin yaklaşık dört ay boyunca ölçülen deformasyon değerleri tablo 6.11' de verilmektedir.



Şekil 6.6 Tünel yan duvarlarında oluşturulan deformasyon ölçüm noktaları

Tablo 6.11 Tip2 tünel geometrisi için tünel kapanım değerleri

Tarih	Geçen Süre (Gün)	$L_2-L_3$	$L_2-L_3$ (mm)	Sıcaklık ( $^{\circ}$ )
03.05.2008	0	14584,90	0,00	18
04.05.2008	1	14582,06	-2,84	28
10.05.2008	7	14579,38	-5,52	30
12.05.2008	9	14578,68	-6,22	30
16.05.2008	13	14574,60	-10,30	32
08.07.2008	66	14480,40	-10,30	35
11.07.2008	69	14478,92	-11,79	37
27.09.2008	147	14482,94	-7,77	27
20.10.2008	170	14483,82	-6,89	27
29.10.2008	179	14486,55	-4,16	26
31.10.2008	181	14486,61	-4,10	26
07.11.2008	188	14489,53	-1,18	26
15.11.2008	196	14489,06	-1,64	25
19.12.2008	230	14488,96	-1,64	24
23.12.2008	234	14488,90	-1,71	22
28.12.2008	239	14488,86	-1,75	20
29.12.2008	240	14488,80	-1,81	20
10.01.2009	252	14488,76	-1,85	21
19.01.2009	261	14488,82	-1,79	20
<b>Ortalama</b>			<b>-4.63</b>	26



Şekil 6.7 Zamana bağlı tünel yan duvarlarında meydana gelen deformasyon değerleri

Tablo 6.11' deki değerlere göre çizilen şekil 6.7' de, dokuz aylık süre zarfında tip2 tüneline meydana gelen kapanım değerlerini gösterilmektedir. Tablodaki değerlere göre tip2 tüneline oluşan, ortalama yanal kapanma miktarı yaklaşık 5 mm. civarında olup, geçen süre zarfında bu değer yaklaşık 1,85 mm. değerinde sabitlenmiştir.

Tip2 tünel geometrisi için kurulan sayısal model verilerinde, tünel içindeki kapanma miktarı ( $L_2-L_3$  hattında) fay zonunun gözlemlendiği ve tahkimatın tamamlandığı durumda 3-7 mm. mertebesindedir.

## BÖLÜM YEDİ

### SONUÇLAR

Bir tünelin veya yeraltı açıklığının inşası aşamasında, içinde bulunduğu koşulların iyi değerlendirilmesi, zemin ve/veya kayaçların davranışlarının belirlenerek bu yapıyı en ekonomik, en hızlı ve en güvenli biçimde inşa edebilmek için, içinde çalışılan ortamının özelliklerinin ve olası taşıdığı risklerin iyi etüt edilip, detayları ile ele alınması gerekmektedir.

Tüneller ve yeraltı açıklıkları gibi kazı ve destekleme gerektiren teknik girişimlerin en belirgin özelliği, planlama, projelendirme, modelleme ve uygulama aşamalarında kayaçların durum, nitelik ve davranışlarının ayrıntılı olarak bilinmesi zorunluluğudur. Özellikle zayıf kayalarda ve sığ derinliklerde açılacak olan tünel ya da yer altı açıklıklarında, yukarıda bahsedilen yapıdan kaynaklı riskler daha da önem kazanmaktadır. Bu nedenle hazırlanan doktora çalışmasında özellikle zayıf kaya ortamlarında ve fay zonu içeren formasyonlarda yapılan tünelticilik faaliyetlerine yer verilmiştir.

Tez kapsamında Phase2, TunRen, Rock Support gibi farklı nümerik (sayısal) modelleme programları ve bilgisayar yazılımları kullanılmıştır. Phase2 sayısal modelleme yazılımı ile, çalışma alanında önceden belirlenen riskli bölgelerin gerilme durumları, tünel stabiliteleri ve tünel kazısının yeryüzüne olan etkileri değerlendirilirken, TunRen programı yardımı ile tünel ayna stabilitesi yorumlanmaya çalışılmıştır. Rock Support yazılımı kullanımı ile de, kaya-tahkimat etkileşim analizi yapılarak sonuçları değerlendirilmiştir.

Hazırlanan çalışmada bir tünel açma faaliyetinin değerlendirilmesi aşamasında izlenecek yol ortaya konmaya çalışılmış, özellikle sığ derinliklerde, zayıf kaya ve fay zonu gibi kavramların neden olduğu, risk parametreleri üzerinde durulmaya özen gösterilmiştir. Bu çerçevede yapılan bir tünelticilik faaliyeti için birden çok değerlendirme kriteri kullanılarak sonuca gidilmesi gerektiği vurgulanırken, bu

kriterlerden ampirik, analitik, gözlemsel ve nümerik modelleme teknikleri üzerinde durulmuştur.

Özellikle sığ derinliklerde ve zayıf karakterli formasyonlarda tünel açımında dikkat edilmesi gereken özelliklerden bazıları şu şekilde sıralanabilir. Tünel aynasından radye kapanımına kadar olan serbest ilerleme anosu boyu 25 metreyi aşmamalıdır. Yüzeğe yakın yerlerde özellikle zayıf kayaaç formasyonlarından geçilirken serbest ano boyu 20 metreye kadar düşürülmelidir. Yapılan analizlerde tünelin ilerleme yönünde ve gerisinde 20 metrelik mesafenin riskli olduğunu ortaya koymuştur. Bununla birlikte tünel kazı kesit alanında ring (halka) 4 gün, en geç 7 gün içerisinde kapatılmış olmalı ve kazıyı takiben en geç yarım saat içerisinde çelik hasır ve püskürtme beton uygulanması mutlaka yapılmalıdır.

Eğer varsa ortamdaki suyun olumsuz etkilerinden korunmak ve tahkimat ayaklarının sağlamlığı açısından, tabanda invert beton öncesi 20-30 cm lik grebeton dökümü çalışma alanına gelen suyun drene edilmesini sağladığı gibi, özellikle fay zonu ve yakınında, sığ geçişlerde iş organizasyonunu hızlandıracaktır.

Kazı sırasında çatlaklardan gelecek olan yeraltı ve yüzey sularının uygun drenaj yöntemleri ile drene edilmesi gerekmektedir. Tünel kazısı sırasında yada nihai kaplama ile dış kaplama arasında meydana gelebilecek su gelirlerine karşı yalıtım, jeomembran ve jeotekstiller ile sağlanabilir.

Gerek Q gerekse RMR değerlerine göre belirlenen kayaa sınıflaması tünel kazısının parçalı şekilde yapılmasını gerektirmektedir. Kritik yer üstü bina ve tesislerinin bulunduğu bölgelerin geçişinde bir dizi önlemlerin alınması, kontrollü olarak kazı yöntemi uygulanması, jeolojik belirlemelerin ve jeoteknik ölçümlerin özenle yapılması büyük önem taşımaktadır. Kazı kritik binalara yaklaştıkça, aynadan ilerleme yönüne doğru deneme amaçlı kılavuz sondaj delikleri açılmalıdır. Söz konusu kritik kısımlarda kayaa bulonlarının çakılmasına özel itina gösterilmeli, geometrileri, uzunlukları ve yönleri ayarlanmalıdır.

Jeolojik durum ve jeoteknik ölçüm değerlendirmelerine göre kazı ve desteklemede; kazı adımlarının küçültülmesi, ayna kazı kesitinin daha küçük parçalara bölünerek açılması, süren çubukların aralıklarının küçültülmesi, püskürtme betonu kalınlığının artırılması, radyenin daha çabuk ve kısa mesafede (3-4 m) kapatılması, eğer bu konuda zorlukla karşılaşılır ise üst yarıda geçici radye yapılması ve çok zayıf zemin koşullarında aynadan ilerleme yönüne doğru sistematik olarak enjeksiyon uygulaması v.b. gibi önlemlere başvurulmalıdır.

Zayıf ve ezik zonlar geçilirken, özellikle kritik bina yakınlarında destekleme çalışmalarında hız, büyük önem taşımaktadır. Bu durumlarda belirlenen mesafelerde, kendini delen bulon (IBO) kullanılması daha uygundur. IBO bulonlar, ön sürgü çubuğu olarak kullanılabilirdiği gibi enjeksiyon yapımında da etkilidir. Bununla birlikte özellikle şehir içi tünelticiliğinde, risk unsurunun yüksek görüldüğü yerlerde ilerleme yapılırken yüzeyden ya da tünel içerisinden jet grouting yapılarak tünelin içerisinde açılacağı formasyonun güçlendirilmesi gerekmektedir.

Tünel kazı işlemleri, hat üzerinde ve yakınında binaların bulunduğu önlem alınacak bölgeye henüz ulaşmadan önce binaların mevcut durumu hakkında tespitler yapılmalıdır. Bu tespitlerde binanın yapısal özellikleri (betonarme, yığma, ahşap vb.) yapım kalitesi, mevcut çatlaklar, oturmalar araştırılmalı ve kaydedilmelidir. Bu ilk tespitler daha sonra meydana gelebilecek çatlama ve oturmaların kontrolü için gerekli ve önemli birer veridir.

Tez çalışması kapsamında yukarıda yapılan sığ tünelticilikte şartları ile ilgili değerlendirmelerin ve karşılaştırmaların ışığında, özellikle zayıf kayalarda, sığ derinliklerde ve de şehir içi tünelticiliğinde güvenli tünel açma parametreleri, İzmir Metrosu örneğinden yola çıkılarak yorumlanmıştır.

Çalışmada, İzmir Metro İnşaatı II. aşama kapsamında Göztepe - Fahrettin Altay istasyonları arasındaki 5460 metre uzunluğunda, çift hat tek tüp delme tünel araştırma sahası olarak belirlenmiştir. Sahada dört farklı kazı kesiti uygulanmaktadır. Tip1 tünel kesiti kazı alanı 62,580 m<sup>2</sup> ile 66,160 m<sup>2</sup> arasında

farklılık göstermektedir. Bu kazı kesit alanlarının farklı olması, tünelin geçtiği formasyonun özellikleri ve bu formasyonların içsel parametreleri ile ilişkilidir. Tip2, tip3 ve tip4 ile adlandırılan tünel tipleri de, istasyon kazıları ve bu çerçevede oluşturulan merdiven tüneller gibi, detay mühendislik açıklıklarını ifade etmektedir. Tip2 kazısının kazı alanı yaklaşık 113,100 m<sup>2</sup>, tip3 kazısının kazı alanı 64,100 m<sup>2</sup>, tip4 kazısının kazı alanı ise 35,400 m<sup>2</sup>'dir. Projede belirlenen 5460 km. lik tünel inşasının yaklaşık %80-85'i tip1 ve tip2 tünel kesit geometrileri olduğundan, doktora çalışmasında bu iki tip tünel kesitine yer verilmiştir.

İnşası devam eden güzergahta, saha bilgileri, sondajlardan elde edilen veriler, laboratuvar çalışma sonuçları, analitik ve ampirik yaklaşımlarla elde edilen veriler ve bilgisayar destekli modelleme çalışmaları ile belirlenen veriler ışığında, güzergahın güvenli olarak geçilebilmesi için gerekli parametreler incelenmiştir.

Elde edilen tüm sondajlı saha verileri, laboratuvar test sonuçları, ampirik ve analitik yöntemlerle elde edilen sonuçlar, güzergahın bilgisayar destekli sayısal modelleme sonuçları, çalışma sonunda bir bütün olarak değerlendirilmiş ve güzergah üzerinden alınan sayısal değerler (yerüstü sübidans okumaları, tünel kapanım değerleri, vb.) ile karşılaştırılmıştır.

Metro güzergahında ilerleme yapılacak kayaç formasyonları için ampirik kaya kütle sınıflama sistemlerinden, eklemlili kaya kütlelerinin jeomekanik sınıflaması "RMR" ve NGI tünel destekleme tasarımı için kaya kütlelerinin mühendislik sınıflaması "Q" kullanılarak kaya kütlelerinin kaliteleri belirlenmiş ve bu kaya kalitelerine göre tahkimat önerileri sunulmuştur.

Çalışma alanında yeraltı su seviyesi kotunun, planlanan "ray kotu" 'nun üzerinde olduğu görülmektedir. Geçilen formasyonların çakıl, kil, kum, silt içerikli ve çatlaklı oluşu, tamamen ve/veya çok ayrılmış özellikte olması ve yeraltı şebeke kaçaklarından gelebilecek sularında dikkate alınması sonucu, yeraltı su gelirinin çatlaklar ile kontrol edileceği varsayılarak, kazı sırasında uygun drenaj önlemlerinin alınması gerekmektedir. (Güzergahın 1+730 – 1+750.



km.lerinde tünel içine giren suyun % 45–50’ ye yakınının şebeke kaçağı olduğu yapılan analizler ile tespit edilmiştir.)

Güzergah kazıları sırasında karşılaşılabilecek kırık, çatlak ya da fay zonlarında kazı alanı içerisine su boşalımları beklenmektedir. Benzer şekilde İzmir Metrosu I. aşama Konak- Üçyol hattında gözlenen su problemleri (güzergahın yerleşim yerleri altından geçmesi nedeni ile karşılaşılan kör ya da keson kuyular ve I. aşamada meydana gelen ani su boşalımları) nedeni ile drenaj sisteminin önemi göz ardı edilmemelidir.

Kazıya paralel olarak drenaj tedbirlerinin, ön sağlamlaştırma çalışmaları sırasında alınması gerekmektedir. Ayrıca, güzergahın tümünün tünel ayna kesitleri incelendiğinde Göztepe-Fahrettin Altay istasyonları arasında yeraltı suyu nedeniyle bazı lokasyonlarda tünel tavanında formasyon akması (overbreak) yaşanması mümkündür. Bu gibi olumsuz olayları önleyebilmek için kılavuz sondajlar (5-6 m) açılarak durumun önceden tespit edilmesi gerekmektedir.

Yapılan analiz ve hesaplamalar sonucunda RMR sisteminde tünel kotunda kazı işleminin yapılacağı kayaç formasyonlarında kaya kaliteleri genelde “zayıf-çok zayıf” olarak tanımlanmış ve RMR değerleri 12-25 arasında değişmiştir. RMR-Kaya Kütle Sınıflama Sistemi’ne göre kazıda karşılaşılan kaya kalitesi “V. Grup” olarak belirlenmiştir. Q- Kaya Kütle Kalite Sınıflama Sistemi’ne göre yapılan analizlerde ise Q kalite değerleri 0,088 ile 0,0044 arasında değişkenlik göstermiştir. Q sisteminde tünel kotunda kazı işleminin yapılacağı kayaç formasyonlarında kaya kaliteleri genelde “aşırı derecede zayıf - olağan üstü zayıf” olarak tanımlanmıştır.

İzmir Metrosu II. aşama kazılarının sığ tünel şeklinde planlanan bölümlerin de yapılacak çalışmalarda, güzergah üzerinde yerleşim alanları ve yerüstü tesislerinin bulunduğu göz önünde bulundurularak, yeraltı jeolojik ve jeoteknik koşulların çok iyi değerlendirilerek kazı ve tahkimat işlemlerinin programlanması gerekmektedir. Aksi takdirde yeraltı tünel kazısı ve desteklenmesi sırasında yüzeyde ve bina temellerinde oturmaların oluşması olasıdır. Literatürde,

oluşabilecek bu yüzey oturmaları için belirlenen değer maksimum 10 mm. dir. (Attewell ve diğer. 1986)' da benzer şartlar altında, hiçbir yerde ve hiçbir doğrultuda 10 mm'ye kadar meydana gelecek oturmaların hasar vermeyeceği belirtilmektedirler.

Onargan ve diğerleri tarafından 2006 yılında yapılan çalışmada, seçilen güzergahın üzerinde bulunan şehir üst yapısının eski oluşu, bölgenin çeşitli fay zonu, kırık, çatlak ve yoğun eklem takımları içermesi, yörenin deprem kuşağında yer alması nedeni ile, bu bölgede pratikte 10 mm.' den çok daha küçük deformasyonlar oluşmayacak şekilde çalışma yapılmasının daha uygun olacağını belirtilmiştir.

Seçilen güzergah üzerinde, ele alınan bölge için yapılan sayısal modelleme sonuçları tip1 tünel geometrisi için tahkimatsız ve fay zonunun gözlenmediği durumda yüzeyde 19 mm. lik, fay zonunun gözlendiği ve tahkimatın tamamlandığı durumda ise 18 mm.lik bir çökme (sübsidans) değeri ortaya koymaktadır.

Tip2 tünel geometrisi için, fay zonunun gözlenmediği ve tahkimatsız durumda tünel tepe noktasına karşılık gelen yüzey sübsidansı, 9,7 mm, fay zonunun gözlendiği ve tahkimatın tamamlandığı durumda ise 6,98 mm. civarındadır. Fakat tünelin fay zonunu kestiği noktada, yüzeyde hesaplanan değerler tahkimatın tamamlanmadığı durumda 18-19 mm, tahkimatın tamamlandığı durumda ise 12-13 mm. olarak elde edilmiştir.

Sayısal analizler ile hesaplanan bu değerler, güzergah üzerinde yüzeyden alınan ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Buna göre ;tip1 tünel geometrisi için, fay zonunun geçildiği ve tahkimatın tamamlandığı bölge ve civarında 19 mm., tip2 tünel geometrisi için de ortalama 27 mm. lik bir sübsidans değeri ölçülmüştür.

Gerek sayısal modelleme çalışmalarından elde edilen sonuçlar, gerekse gerçekleşen değerler, şehir içi tünellerde çalışmaları için izin verilen maksimum

değer olan 10 mm. nin üzerinde olup, bölgede daha önce yapılan çalışmalarda emniyetli çalışma şartları için belirtilen deformasyon sınırlarının üzerinde olduğu belirlenmiştir.

Tünel yapısının stabilitesi incelendiğinde, yapılan analizler sonucu tünelin her iki kesit geometrisinin büyük riskler taşıdığı açıktır. Bölüm beş'te ayrıntılı olarak verilen sayısal modelleme sonuçları ve tünel etrafının güvenilirliğini belirleyen, güvelik faktör (strength factor), tüneli ve etrafındaki 2,5-3 metrelik formasyonu, riskli olarak tanımlamaktadır. Bu değerler tahkimat tasarım parametreleri üzerinde etkilidir. Örneğin tahkimatta kullanılacak kaya bulonu uzunluğunun en az 4-6 metre olarak belirlenmelidir.

Tünel açma çalışmalarında hali hazırda kullanılmakta olan tahkimat sistemi, her iki tünel geometrisi için de 15 cm kalınlığında püskürtme beton, çelik iksa, tek sıra tel hasır ve kaya bulonudur (1 m. x 1m.). Ayrıca ortamda su bulunması ve formasyonun düşük kalitesi nedeni ile gerektiğinde, tahkimat ayaklarının bulunduğu bölgelere topuk vazifesi gören beton atımı yapılmaktadır.

Yapılan sayısal modellemeler sonucunda oluşturulan modellerde, tahkimatsız ortamda tünellerde yatay gerilmenin düşey gerilmeye oranı (k), 6,89-10,05 arasında değiştiği hesaplanmıştır. Bu nedenle tünel yan duvarlarında çekme ve makaslama yenilmeleri beklenmelidir. Bunu önlemek için desteklemenin amacına uygun ve zamanında yapılması gerekmektedir.

Kohezyonu oldukça düşük formasyonların geçildiği güzergahta orta ağır-ağır ve kısa zamanda bir destekleme gerekmektedir. Bu amaçla güzergahta oldukça zayıf bölgelerin iyileştirilmesi ve zemindeki oturmaların oldukça hassas olarak değerlendirilmesi, güzergahın yerleşim birimlerinden geçiyor olması nedeniyle oldukça önemlidir. Ayrıca, tünel aynasındaki malzemeyi tutabilmek ve dolayısıyla tavandan ve aynadan olası akmaları engellemek için gerekli yerlerde aynaya destek (ayna çivisi, vb.) uygulaması yapılmalıdır.

Bu verilere dayanarak;

İzmir Metrosu II. aşama Üçyol-Fahrettin Altay güzergahının, sığ tünel şeklinde açılmasında, Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi' nin bir ölçüde modifikasyonu olan Yeni İtalyan Yöntemi, gerekli önlemlerin ve tedbirlerin alınması durumunda uygulanabilir bir yöntemdir. Uygulanması devam eden tahkimat ve parametrelerinin, özellikle riskli bölgelerde etkin bir yöntem olmadığı görülmektedir. Bu nedenle uygulanmakta olan tahkimat modeline ek olarak bazı iyileştirmelere gerek duyulmaktadır. Tahkimat üzerinde yapılması öngörülen bu iyileştirmelerden bazıları aşağıda verilmektedir.

İlk aşamada 10-15 cm kalınlığındaki püskürtme beton yeterli gibi görünse de, desteklemede en az 3,25-4,5 kg Fe/m<sup>2</sup> 'lik 2 sıra çelik hasır kullanılmalıdır. 60-85 cm aralıklarla tavan, omuz ve ayakları saracak şekilde çelik iksa kullanılması tünel stabilitesi bakımından gereklidir. Sayısal analizler ile belirlenen riskler ve yüzeyden alınan sübidans değerleri 100 cm aralıklı yerleştirilen iksaların yeterli olmadıklarını ortaya koymaktadır. Kayacın içsel parametrelerini arttırmak ve ön sağlamlaştırmayı sağlamak amacıyla kazı güzergahı boyunca tavan ve omuzlarda, nümerik analizler sonucu elde edilen, tünelin 2,5-3 metre etrafının zayıf zonu oluşturması nedeni ile buralarda kullanılacak kaya bulonları (rock bolts) en az 4-6 m' lik seçilmelidir. Ayrıca çok zayıf, olağan üstü zayıf kaya kalitesi olan lokasyonlarda, fay zonu ve yakınındaki kazılarda, tünel yan cidarlarında ayakları bağlayacak şekilde 2 sıra halinde en az 4 metre boyunda kaya civataları kullanılması daha uygun olacaktır.

Yapılan çalışmalar sonucu elde edilen verilere göre, Q sistemine göre zayıf – aşırı zayıf, RMR' a göre V. sınıf kaya kalitesi içeren formasyon, T.C. Karayolları Teknik Şartnamesi' (ÖNORM B2203 Ekim 1994 sonrası)' ne göre C-4 “akıcı” kaya sınıfına kadar yükselmektedir.

Buna göre önerilen tahkimat şekli;

- Akıcı olmayan ve aşırı gerilme problemi olmayan kaya formasyonlarında;

Püskürtme beton : Yan Duvarlarda 15- Kemerde 15- 20 cm ,  
(28 günlük, 35 MPa)

Çelik hasır : 2 sıra Q221/221

Kafes kiriş-Çelik İksa: (m/m 0,6-0,8 m)

Kaya bulonu : L=4,0 m. 1.00 m/m

Süren : Q 26 L = 5-6 m (gerektiğinde)

- Akıcı – aşırı zayıf – ayrışmış – gerilme problemleri olan - fay zonu ve yakınındaki kaya formasyonlarında (Göztepe – F.Altay ist. arası)

Püskürtme beton : Aynada 5- Yan Duvarlarda 15- Kemerde 20 cm  
(28 günlük, 21 MPa)

Çelik hasır : 2 sıra Q221/221

Kafes kiriş-Çelik İksa:(m/m 0,6-0,8 m)

Kaya bulonu : L=5,0-6,0 m., 1,00 m/m

Süren : Q 26 L =5-6 m e=30 cm

Gerektiğinde Jet grout veya enjeksiyon ile ön sağlamlaştırma Boru Kemer (Umbrella Arch)

uygulamalarının yapılması daha uygun görülmektedir. Bu gereklilikler bölüm 5'te yapılan mevcut tahkimat sistemi analiz sonuçları ile de pekiştirilmiştir.

Göztepe, Poligon, Güzelyalı ve F. Altay İstasyonlarında açılacak özellikle geniş kesit tip2 tünelleri için mevcut tahkimat uygulamasının yeteri kadar güvenli olmadığı gerekçesi ile güzergah üzerinde karşılaşılabilecek C2, C3 ve C4 kaya sınıfları için önerilen tahkimat elemanlarının detayları aşağıda tablo 7.1' de verilmektedir.

Özellikle tünellerin açılacağı riskli bölgelerin geçilmesi sırasında tünel stabilitesinin sağlanması amacıyla yönelik olarak değerlendirilen boru kemer yöntemi, genellikle bu yöntem ile kullanılan ayna çivileri vb. uygulamalar, gerektiğinde belirli km. içinde olsa mutlaka yapılmalıdır. Aşağıda tablo 7.1’ de İzmir Metro II. aşama tünel kazıları için önerilen tahkimat parametreleri verilmektedir.

Tablo 7.1 C2, C3 ve C4 kaya klaslarında uygulanması önerilen destekleme elemanları

KAYA KLASI	PRENSİP ŞEKLİ	DESTEK ELEMANLARI
C2		<p><b>P. Beton</b> = 30 cm (28 Günlük 21 MPa)  <b>Çelik Hasır</b> = 2-3 Sıra (Q221/221)  <b>Fore Polling</b>= 64 mm 1,5’ (10-14 m Kemerde)  <b>Taban Betonu</b>= Donatılı 30 cm P. Beton  <b>Bulonlar</b>= Üst Kemer PG+Round Ortası SN</p>
C3		<p><b>P. Beton</b>= 30 cm (28 Günlük 21 MPa)  <b>Çelik Hasır</b>= 2-3 Sıra (Q335/335)  <b>Çelik Boru Kemer</b>= Üst kemerde.  <b>Taban Betonu</b>= Donatılı 30 cm P. beton  <b>Bulonlar</b>= Çelik boru kemer bitiminde PG+yan ayaklarda SN  <b>Ayna Sağlamaştırma</b>=Karşılaşılabilecek formasyona bağlı olarak zemin çivisi, jet grout kolonları veya fiber kolonlar</p>
C4		<p><b>P. Beton</b>= 30 cm (28 Günlük 21 MPa)  <b>Çelik Hasır</b>= 2-3 Sıra (Q335/335)  <b>Çelik Boru Kemer</b> = Yan ayaklara kadar  <b>Taban Betonu</b>= Donatılı 30 cm P. beton  <b>Bulonlar</b>= Çelik boru kemer bitiminde PG+yan ayaklarda SN  <b>Ayna Sağlamaştırma</b>=Karşılaşılabilecek formasyona bağlı olarak zemin çivisi, Jet Grout kolonları veya Fiber Kolonlar</p>

Tüm güzergah boyunca NATM yöntemi ile açılmakta olan tip1 ve tip2 tünelleri, üst bölümünde plastik kemerlenmeyi sağlayacak bir örtü kalınlığına sahip olmadığından dolayı (tünel yüksekliğinin 2-3 katından fazla bir örtü tabakası olmaması ve tünel üstündeki formasyonun çok zayıf olması) sığ tünel niteliğindedir. Bu durum kaya-tahkimat etkileşim grafiğinden de açıkça görülebilmektedir. Tüm tünel kazılarında ana ilke olarak “yüzey oturmalarını ve tünel içi konverjanslarını olabildiğince küçük tutabilmek için deformasyon önleyici şekilde tünel açımı” prensibi ile tasarım ve inşaa koşullarının sağlanma zorunluluğu bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar, sığ tünelin NATM ile açılabilirliğini ancak gözlemlerin devamlı suretle ve tavizsiz sürdürülmesi gerektiğini göstermektedir.

İzmir Metrosu II. aşama tünel inşasında; risk unsurlarına yaklaşım, oluşabilecek risk olayının alınacak tedbirlerle önlenmesi (fay zonlarında ekstra kazı ve tahkimat önlemleri alma v.b.) ve oluşacak risk olaylarının minimize edilmesi (deformasyon ve kaya yenilmelerine karşı etkin kontrol içeren tünel dizaynı, yüksek su gelirine karşı uygun drenaj sistemlerinin uygulanması v.b.) şeklinde olmalıdır. Bunların uygulanması halinde dahi, tünel açımı sırasında beklenmeyen risk olayları ile karşı karşıya kalmak her zaman mümkündür. Bunun için tünel inşası süresince öngörülen dizayn parametrelerinin ve kaya kütle davranışlarının sürekli olarak izlenmesi ve buna göre parametrelerde uygun değişiklikler ve ek önlemlere yönelmesi daha emniyetli sonuçlar doğuracaktır.

## KAYNAKLAR

- Amadei, B., Stephansson, O. (1997). *Rock stress and its measurement*. London: Chapman and Hall.
- Andrea, C. (1949). *Les grands souterrains transalpins*. Zurich : Ed. Lehman.
- Arıoğlu, B., Yüksel, A., Arıoğlu., E. (2002). İzmir Metro Projesi Nenehatun Tünelindeki Geoteknik Çalışmalar ve Değerlendirilmesi. *ECAS 2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu, Ankara*.1-11
- Aydın, A., Özbek, A., Cobanođlu, I. (2004). Tunneling in difficult ground: a case study from Dranz tunnel, Sinop, Turkey. *Engineering Geology*. 74, 293-301
- Barka, A.A., Altunel, E., Akyüz, S., Şaroğlu, F., Emre, Ö., Kuşçu, İ. (1996). Güneybatı Anadolu'nun aktif fayları ve kireçtaşı fay şevlerinin incelenmesi, 1995 Dinar depremi ve Saros Körfezinin tektonik yapısı: *TÜBİTAK Ulusal Deniz Jeolojisi ve Jeofiziđi Programı. YDABÇAG-237/G No.lu Proje Raporu, Ankara*.
- Barton., N.R., Lien, R., Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *International Journal of Rock Mechanics*. 6 (4), 189–239.
- Bell, F.G. (1994). *Engineering in Rock Mass*. Great Britain: Butterworths.
- Bieniawski, Z.T. (1976). Rock Mass Classification in Rock Engineering. *Exploration for Rock Engineering, Proceedings of the Symposium, Rotterdam: Balkema*, 97–106.
- Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering Rock Mass Classification*. NY: Mc Graw Hill.



- Chou, W., Bobet, A. (2002). Prediction of ground deformations in shallow tunnels in clay, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 17, 3-19.
- Choquet, P., J. Hadjigeriou. (1993). The Design of Support for Underground Excavations. In: *Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice, and Projects*. Pergamon Pres. 4, 313-345.
- Crouch.S. L., Starfield,A.M. (1983). *Boundary Element Methods in Solid Mechanics*. London: George Allen and Unwin.
- Cundall, P.A. (1987). *Distinct element models of rock and soil structure*. London: Analytical and Computational Methods in Engineering Rock Mechanics edited by E.T. Brown, Allen and Unwin.
- Dalgıç, S. (2000). The influence of weak rocks on excavation and support of the Beykoz Tunnel, Turkey. *Engineering Geology*. 58, 137-148.
- Dalgıç, S. (2003). Tunneling in fault zones, Tuzla tunnel, Turkey., *Tunneling and Underground Space Technology*. 18, 453-465.
- Deere, D. U., Deere, D. W. (1988). The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice”, *In Rock Classification System In Engineering Purpose*, L. Kirkaldie (Ed) ASTM Publication STP 984, Philadelphia, 91-101.
- Denek, H. (2003). *İstanbul metrosu tünellerinde uygulanan klasik Yeni Avusturya ve boru kemer yöntemlerinin tünel içi ve yüzey deformasyon sonuçlarına göre karşılaştırılması*. İstanbul: Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü yüksek lisans tezi.
- Duffaut, P. (1996a). Creuser et soutener, servitudes et certitudes des travaux souterrains, *Travaux*, 270, 9-16.

- Duffaut, P. (1996b). About some erroneous concepts in rock tunnelling. *Gallerie*, 48, 16-22.
- Emre, Ö. ve Barka, A. (2000). Gediz Grabeni – Ege Denizi arasının (İzmir yöresi) aktif fayları. *Batı Anadolu'nun Depremselliği Sempozyumu (BADSEM 2000). Bildiriler Kitabı. 131–132, İzmir.*
- Geniş, M., Gerçek, H. (1995). *Kavisli Rijit Çelik Galeri Bağlarının Boyutlandırılmasında Önemli Hususlar*, Türkiye 14. Madencilik Kongresi. Ankara. 1-5
- Grimstad, E., Barton, N. (1993). *Updating the Q-System for NMT. Proc. Int. Symp. On Sprayed Concrete-Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support*”, Fagernes, Kompen, Opsahl, and Berg (Ed), Oslo, Norwegian Concrete Assoc.
- Guogang, Xu., Guoyan, M., Qinbo, L., Zhifang, C. (2004). Underground excavation in Xiaolongdi project in Yellow River. *Engineering Geology*. 76, 129-139
- Hao, H. Y., Azam R. (2005). The plastic zones and displacements around underground openings in rock masses containing a fault. *Tunneling and Underground Space Technology*. 20, 49-61
- Hoek, E., Brown, E.T. (1980). *Underground Excavations in rock*. London: England.
- Hoek, E. (1998). Tunnel support in weak rock. *Proc. Regional Symp. on Sedimentary Rock Engineering*. Taipei, Taiwan. 1-12
- Hoek E., Brown E.T. (1995). Underground exc. in rock , institution of mining and metallurgy. London : 1980-Hoek., at all, Support of Underground Exc. in Hard Rock, Rotterdam.

ISRM (International Society for Rock Mechanics).(1981). *Testing and monitoring*. Portekiz: ISRM Suggested Methods, Pergamon Pres.

İzmir Büyük Şehir Belediyesi İzmir Hafif Raylı Sistemi jeoteknik bilgileme çizelgesi. (1993). İzmir Büyük Şehir Belediyesi.

İzmir Hafif Raylı Sistemi II. aşama II. kısım ön jeoteknik değerlendirme raporu. (1997). İzmir Büyük Şehir Belediyesi.

Küçük, K. (2009). *Mermer sahalarından alınabilecek blok boyutlarının belirlenmesinde yeni bir kayaç kütle sınıflama yönteminin geliştirilmesi*. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, doktora tez çalışması.

Karakuş, M., Fowel, R.J. (2004). An insight into the New Austrian Tunnelling Method. *Kayamek'2004 – VII. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, Sivas*.

Kavvadas, M., Hewison, L.R., Laskaratos, P.G., Seferoglou, C. and Michalis, I. (1996). Experiences from the construction of the Athens Metro. *Proc. Intern. Symp. on the Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, City University, London, 273- 278.

Konthanassis, P., Koronakis, N., Karinas, A., Massinas, S., (2005). Design and Construction of NATM Underground Station Tunnel by Using the Forepoling Method in Difficult Conditions for Athens Metro, *Proceedings of the 31st ITA-AITES World Tunnel Congress, Istanbul*, 265-270.

Köse, H. (1980). Finite Element Yönteminin Kaya Mekaniği Dalındaki Problemlerin Çözümünde Kullanılışı", *Madencilik*. 9 (3), 26-34.

Köse, H., Kahraman, B., (1999). *Kaya Mekaniği*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları.

- Köse, H., Gürgen, S., Onargan, T., Yenice, H., Aksoy, C. O. (2007). *Tünel ve Kuyu Açma*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yayınları No:145.
- Leca, E., Clough, G.W. (1992). Preliminary design for NATM tunnel support in soil. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 118 (4), 558-575
- Lunardi, P. (2000). Design and construction tunnels-ADESCO-RS approach, *Tunnels and Tunnelling International Special Supplement*, (<http://www.rocksoil.com/>).
- Maillart, R. (1922). Uber Gebirgsdruck, *Schweizriche Bauzeitung*. 14, 168-171
- MTA Raporu. (2005). *İzmir yakın çevresinin diri fayları ve deprem potansiyelleri*. MTA Genel Müdürlüğü Jeoloji Etütleri Dairesi. Ankara. Rapor no 10754.
- Onargan, T., Aksoy, O. C. (2006). *İzmir metrosu II. aşama inşaatı tip2 istasyon tünel kazıları değerlendirme ve uygulama projesi öneriler raporu*. İzmir: DEÜ Mühendislik Fakültesi döner sermaye projesi.
- Onargan, T., Aksoy, C. O., Güngör, T., Küçük, K., Kun, M. (2006). *İzmir Metrosu Göztepe –F.Altay istasyonları arası delme tünel kazı ortamı ve tahkimat sistemi değerlendirme etüdü*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi döner sermaye projesi.
- Onargan, T., Aksoy, C.O., Küçük, K., Kun, M. (2007). *İzmir Hafif Raylı Sistem 3. aşama Bornova Metro tünel inşası ön ve nihai destekleme projesi*, D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Maden Müh. Bölümü döner sermaye projesi, İzmir.
- Özbek, A. (2005). Monitoring of the displacement vector in underground openings (tunnels) and estimation of the environments ahead of the tunnel face” *İstanbul Üniv. Mühendislik. Fakültesi Yerbilimleri Dergisi*. 18 (2), 171-181.

- Özbek, A., Türkmen, B., Gül, M. (2003). The Deformation Evulation of Kızlaç T3A Tunnel. *Engineering Geology*. 67, 309-320
- Özsan, B., Başarır, H. (2003). Support Capacity Estimation of a Diversion Tunnel in Weak Rock, *Enginerring Geology*, 68, 319-331
- Panet, M. (1995). *Le calcul des tunnels par la methode convergence-confinemen*. Paris:Presses des Ponts et Chaussees.
- Phase Vx6 Rocscience Inc, Canada.
- Rabcewicz, L., (1964). *The New Austrian Tunneling Method*. Water Power,19-24, 453-457
- RocSupport, Rocscience Inc, Canada.
- Schubert, W. and Steindorfer, A. (1995). Advanced monitoring data evaluation for tunnels in poor rock. *8th Congress on Rock Mechanics, Balkema*.1420-1424
- Shahidi, R.A., Vafaeian, M. (2005).Analysis of longitudinal profile of the tunnels in the active faulted zone and designing the flexible lining ( for Koohrang-III tunnel), *Tunneling and Underground Space Technology*. 20, 213-221
- Sokolnikoff, I.S. (1956). *Mathematical Theory of Elasticity*. NY: Mc Graw Hill Book Company.
- Starfield, A.M., Cundall,P.A. (1988). Towards a methodology for rock mechanics modelling. *Int. Journal of Rock Mech. and Min. Sci. and Geo*. 24 (3), 99-106
- Şaroğlu, F., Emre, Ö., Boray, A. (1987), Türkiye'nin diri fayları ve depremsellikleri. *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Jeoloji Etüdlere Dairesi Başkanlığı, Ankara*, III+394 s.+11 harita.

- Şaroğlu, F., Emre, Ö., Kuşçu, İ., (1992). Türkiye diri fay haritası.1:2,000,000 ölçekli, *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.*
- Terzaghi,K.,Peck,B.R. (1948). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. NY: John Wiley and Sons Inc.
- Torunoğlu, O. (2008). *İzmir Metrosu II.etap projesi detay incelemesi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Bitirme Projesi.
- Tunren-Terrasol 2002 Vx1, Fine Ltd., Zaverka 12, 16900 Praque6, Czech Republic.
- Ulusay, R. (2001).Uygulamaları Jeoteknik Bilgiler. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası yayınları. Ankara. 128-169.
- Ulusay, R., Sönmez, H. (2002). Kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası yayınları. Ankara. ISBN 975-395-466-2
- Whittaker, B. N., Frith, R. C. (1990). *Tunneling, Design, Stability and Construction*. London: The Institution of Mining and Metallurgy Press.
- Yang, S.J, Yan, L., Deng, J.S., Li, L.G. (2006). Interactions of for tunnel driven in squeezing fault zone of Wushaoling Tunnel, *Tunneling and Underground Space Technology*. 21, 359
- Yassaghi, A., Salari-Rad, H. (2005). Squeezing rock conditions at an igneous contact zone in the Taloun Tunnels, Tehran-Shomal freeway, Iran. *International Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42, 95-108
- Yazıcı, S., Nasuf, E. (1993). Arazi kontrolünde sayısal modelleme, *Madencilik*, 32 (3-4), 5-14

# EKLER

EK-1



# Calculation at tunnel face

Mohr-Coulomb Criterion

## Data: ground and tunnel

$p_r = 0$  MPa  
 $E_0 = 70.000$  MPa  
 $R = 6$  m

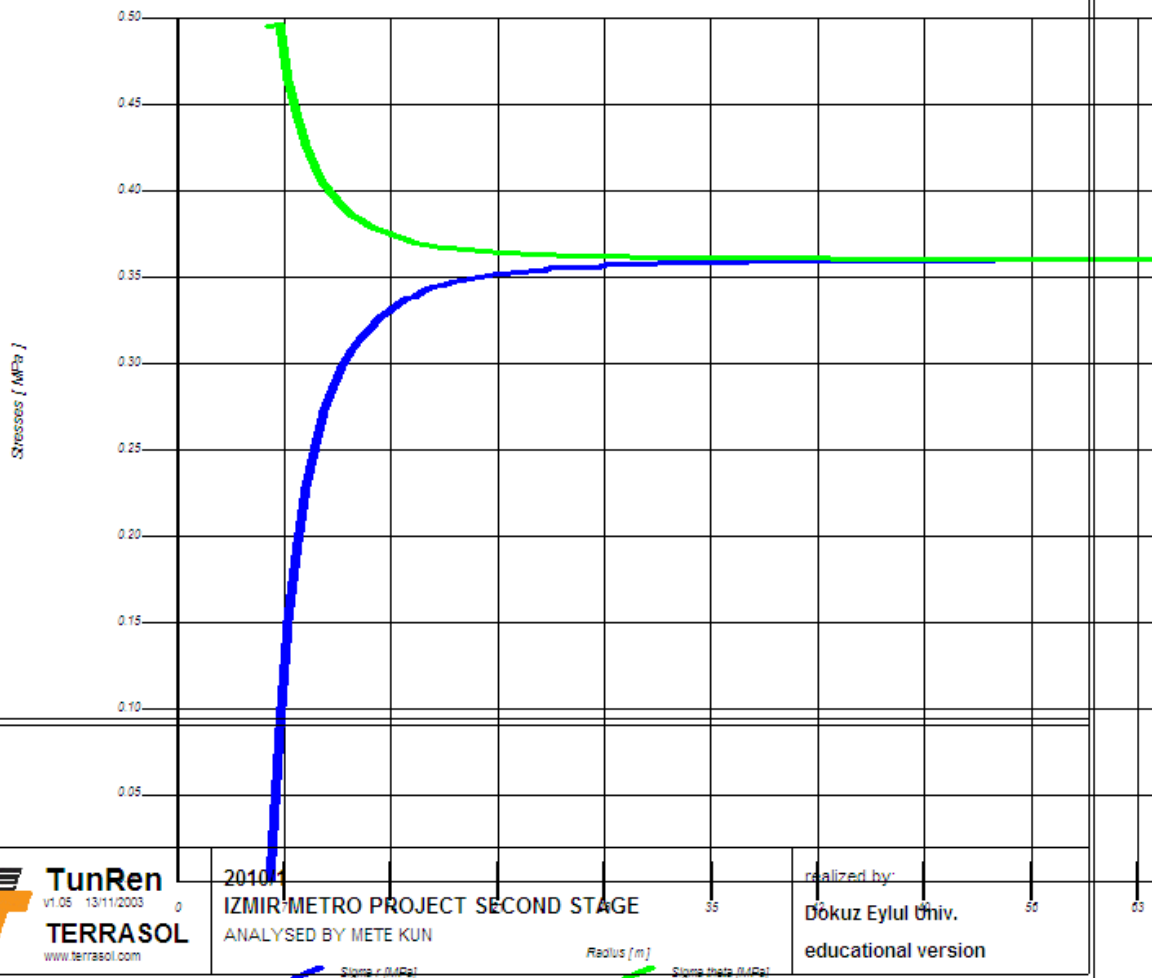
$\phi_0 = 18^\circ$   
 $\sigma_c = 0.360$  MPa

$c_0 = 0.180$  MPa  
 $\nu_0 = 0.5$

$\psi_0 = 5^\circ$   
 $\sigma_{\infty} = 0.495$  MPa

## Calculation without bolts

Stress =  $f(R)$  for a pressure at the tunnel face = 0



EK-2



EK-3

# ***Phase2 Analysis Information***

## **Document Name**

Izmir Metrosu II. Aşama Üçyol-Fahrettin Altay Hattı Tip1 Tünel Geometrisi Model Detayları

## **Project Settings**

### **General**

Project Title: Tip1 Tahkimatsız Durum  
Single stage model  
Analysis Type: Plane Strain  
Solver Type: Gaussian Elimination  
Units: Metric, stress as MPa

### **Stress Analysis**

Maximum Number of Iterations: 500  
Tolerance: 0.001  
Number of Load Steps: Automatic

### **Groundwater**

Method: Piezometric Lines  
Pore Fluid Unit Weight: 0.00981 MN/m<sup>3</sup>

## **Field Stress**

Field stress: constant  
Sigma one: 0.35 MPa (compression positive)  
Sigma three: 0.35 MPa (compression positive)  
Sigma Z: 0.35 MPa (compression positive)  
Angle from the horizontal to sigma 1: 0 degrees (counter-clockwise)

## **Mesh**

Mesh type: graded  
Element type: 3 noded triangles  
Number of elements: 2495  
Number of nodes: 1396

## **Mesh Quality**

53 of 3301 Elements ( 1.6 % of elements) are poor quality elements  
1 of 3301 Elements ( 0.0 % of elements) are poor quality elements because of the side length ratio  
47 of 3301 Elements ( 1.4 % of elements) are poor quality elements because of the minimum interior angle  
9 of 3301 Elements ( 0.3 % of elements) are poor quality elements because of the maximum interior angle  
(elements can be of poor quality for more than one reason)

### **Mesh Quality Statistics**

The worst element has (ratio = 11.68), (min angle = 4.91) (max angle = 135.48)  
10.0% of elements have: (ratios > 1.7), (min angles < 34.8) (max angles > 89.6)  
20.0% of elements have: (ratios > 1.6), (min angles < 39.1) (max angles > 83.9)  
30.0% of elements have: (ratios > 1.5), (min angles < 42.3) (max angles > 80.2)  
40.0% of elements have: (ratios > 1.4), (min angles < 44.7) (max angles > 77.2)  
50.0% of elements have: (ratios > 1.3), (min angles < 46.8) (max angles > 74.8)

60.0% of elements have: (ratios > 1.3), (min angles < 48.5) (max angles > 72.5)  
70.0% of elements have: (ratios > 1.2), (min angles < 50.2) (max angles > 70.4)  
80.0% of elements have: (ratios > 1.2), (min angles < 51.9) (max angles > 68.4)  
90.0% of elements have: (ratios > 1.1), (min angles < 53.5) (max angles > 66.6)  
100.0% of elements have: (ratios > 1.1), (min angles < 55.4) (max angles > 64.7)

Poor quality elements are those with:  
(maximum side length) / (minimum side length) > 10.00  
Minimum interior angle < 20.0 degrees  
Maximum interior angle > 120.0 degrees

## **Material Properties**

### **Material: Çakıtaş**

Initial element loading: field stress & body force  
Unit weight: 0.021 MN/m<sup>3</sup>  
Elastic type: isotropic  
Young's modulus: 700 MPa  
Poisson's ratio: 0.35  
Failure criterion: Mohr-Coulomb  
Tensile strength: 0 MPa  
Peak friction angle: 18 degrees  
Peak cohesion: 0.18 MPa  
Material type: Elastic  
Piezo to use: 1  
Hu Type: Auto

### **Material: Andezit**

Initial element loading: field stress & body force  
Unit weight: 0.027 MN/m<sup>3</sup>  
Elastic type: isotropic  
Young's modulus: 64500 MPa  
Poisson's ratio: 0.3  
Failure criterion: Mohr-Coulomb  
Tensile strength: 0 MPa  
Peak friction angle: 42 degrees  
Peak cohesion: 0.3 MPa  
Material type: Elastic  
Piezo to use: 1  
Hu Type: Custom  
Hu value: 1

### **Material: Ezik Zon**

Initial element loading: field stress & body force  
Unit weight: 0.016 MN/m<sup>3</sup>  
Elastic type: isotropic  
Young's modulus: 100 MPa  
Poisson's ratio: 0.42  
Failure criterion: Mohr-Coulomb  
Tensile strength: 0 MPa  
Peak friction angle: 15 degrees  
Peak cohesion: 0.062 MPa  
Material type: Elastic  
Piezo to use: None  
Ru value: 0

### **Material: Kiltas**

Initial element loading: field stress & body force  
Unit weight: 0.018 MN/m<sup>3</sup>  
Elastic type: isotropic  
Young's modulus: 580 MPa  
Poisson's ratio: 0.35  
Failure criterion: Mohr-Coulomb  
Tensile strength: 0 MPa  
Peak friction angle: 18 degrees  
Peak cohesion: 0.18 MPa  
Material type: Elastic  
Piezo to use: None  
Ru value: 0

### **Liner Properties**

#### **Liner: Shotcrete**

Liner Type: Beam  
Formulation: timoshenko  
Geometry:  
Thickness: 0.2 m  
Elastic properties:  
Young's modulus: 7000 MPa  
Poisson's ratio: 0.25

### **Joint Properties**

#### **Joint: Fay**

Normal stiffness: 250000 MPa/m  
Shear stiffness: 100000 MPa/m  
Initial joint deformation: allowed  
Pressure from Groundwater Analysis: Included  
Additional Pressure Inside Joint: Not Included  
Mohr-Coulomb slip criteria  
Tensile strength: 0 MPa (tension positive)  
Cohesion: 0 MPa  
Friction angle: 20 degrees

### **Bolt Properties**

Bolt name: Bolt 1  
End anchored bolt  
diameter: 19 mm  
Young's modulus: 200000 MPa  
Tensile capacity: 0.1 MN  
Residual Tensile capacity: 0 MN  
Pre-tensioning: 0 MN  
Pre-tensioning force constant in install stage  
Out-of-plane spacing: 1 m

# **Phase2 Analysis Information**

## **Document Name**

Izmir Metrosu II. Aşama Üçyol-Fahrettin Altay Hattı Tip2 Tünel Geometrisi Model Detayları

## **Project Settings**

### General

Project Title: Tip2 Tahkimatlı Durum  
Single stage model  
Analysis Type: Plane Strain  
Solver Type: Gaussian Elimination  
Units: Metric, stress as MPa

### Stress Analysis

Maximum Number of Iterations: 500  
Tolerance: 0.001  
Number of Load Steps: Automatic

### Groundwater

Method: Piezometric Lines  
Pore Fluid Unit Weight: 0.00981 MN/m<sup>3</sup>

## **Field Stress**

Field stress: constant  
Sigma one: 0.35 MPa (compression positive)  
Sigma three: 0.35 MPa (compression positive)  
Sigma Z: 0.35 MPa (compression positive)  
Angle from the horizontal to sigma 1: 0 degrees (counter-clockwise)

## **Mesh**

Mesh type: graded  
Element type: 3 noded triangles  
Number of elements: 2376  
Number of nodes: 1330

## **Mesh Quality**

55 of 3186 Elements ( 1.7 % of elements) are poor quality elements  
5 of 3186 Elements ( 0.2 % of elements) are poor quality elements because of the side length ratio  
53 of 3186 Elements ( 1.7 % of elements) are poor quality elements because of the minimum interior angle  
23 of 3186 Elements ( 0.7 % of elements) are poor quality elements because of the maximum interior angle  
(elements can be of poor quality for more than one reason)

### Mesh Quality Statistics

The worst element has (ratio = 92.14), (min angle = 0.00) (max angle = 180.00)  
10.0% of elements have: (ratios > 1.8), (min angles < 33.6) (max angles > 91.6)  
20.0% of elements have: (ratios > 1.6), (min angles < 38.4) (max angles > 84.5)  
30.0% of elements have: (ratios > 1.5), (min angles < 41.5) (max angles > 80.5)  
40.0% of elements have: (ratios > 1.4), (min angles < 43.9) (max angles > 77.6)



50.0% of elements have: (ratios > 1.3), (min angles < 46.1) (max angles > 74.9)  
60.0% of elements have: (ratios > 1.3), (min angles < 47.9) (max angles > 72.8)  
70.0% of elements have: (ratios > 1.2), (min angles < 49.8) (max angles > 70.7)  
80.0% of elements have: (ratios > 1.2), (min angles < 51.5) (max angles > 68.7)  
90.0% of elements have: (ratios > 1.2), (min angles < 53.4) (max angles > 66.9)  
100.0% of elements have: (ratios > 1.1), (min angles < 55.3) (max angles > 64.7)

Poor quality elements are those with:  
(maximum side length) / (minimum side length) > 10.00  
Minimum interior angle < 20.0 degrees  
Maximum interior angle > 120.0 degrees

## **Material Properties**

### **Material: Çakıltaş**

Initial element loading: field stress & body force  
Unit weight: 0.021 MN/m<sup>3</sup>  
Elastic type: isotropic  
Young's modulus: 700 MPa  
Poisson's ratio: 0.35  
Failure criterion: Mohr-Coulomb  
Tensile strength: 0 MPa  
Peak friction angle: 18 degrees  
Peak cohesion: 0.18 MPa  
Material type: Elastic  
Piezo to use: 1  
Hu Type: Custom  
Hu value: 1

### **Material: Alüvyon Dolgu**

Initial element loading: field stress & body force  
Unit weight: 0.013 MN/m<sup>3</sup>  
Elastic type: isotropic  
Young's modulus: 115 MPa  
Poisson's ratio: 0.36  
Failure criterion: Mohr-Coulomb  
Tensile strength: 0 MPa  
Peak friction angle: 17 degrees  
Peak cohesion: 0.065 MPa  
Material type: Elastic  
Piezo to use: None  
Ru value: 0

### **Material: Ezik Zon**

Initial element loading: field stress & body force  
Unit weight: 0.016 MN/m<sup>3</sup>  
Elastic type: isotropic  
Young's modulus: 100 MPa  
Poisson's ratio: 0.42  
Failure criterion: Mohr-Coulomb  
Tensile strength: 0 MPa  
Peak friction angle: 15 degrees

Peak cohesion: 0.062 MPa  
Material type: Elastic  
Piezo to use: None  
Ru value: 0

**Material: Kilitaşı**

Initial element loading: field stress & body force  
Unit weight: 0.018 MN/m<sup>3</sup>  
Elastic type: isotropic  
Young's modulus: 580 MPa  
Poisson's ratio: 0.35  
Failure criterion: Mohr-Coulomb  
Tensile strength: 0 MPa  
Peak friction angle: 18 degrees  
Peak cohesion: 0.18 MPa  
Material type: Elastic  
Piezo to use: None  
Ru value: 0

**Liner Properties**

**Liner: Shotcrete**

Liner Type: Beam  
Formulation: timoshenko  
Geometry:  
Thickness: 0.2 m  
Elastic properties:  
Young's modulus: 7000 MPa  
Poisson's ratio: 0.25

**Joint Properties**

**Joint: Fay**

Normal stiffness: 200000 MPa/m  
Shear stiffness: 100000 MPa/m  
Initial joint deformation: allowed  
Pressure from Groundwater Analysis: Included  
Additional Pressure Inside Joint: Not Included  
Mohr-Coulomb slip criteria  
Tensile strength: 0 MPa (tension positive)  
Cohesion: 0 MPa  
Friction angle: 20 degrees

**Bolt Properties**

**Bolt name: Bolt 1**

End anchored bolt  
diameter: 19 mm  
Young's modulus: 200000 MPa  
Tensile capacity: 0.1 MN  
Residual Tensile capacity: 0 MN  
Pre-tensioning: 0 MN  
Pre-tensioning force constant in install stage  
Out-of-plane spacing: 1 m