

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KADIKÖY – KARTAL METRO İNŞAATINDA FORMASYON ve AÇIKLIK  
GEOMETRİSİNE GÖRE GEÇİCİ TAHKİMAT UYGULAMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Emrah ŞİMDİ**

**Maden Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Maden Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. C. Atilla ÖZTÜRK**

**EYLÜL 2013**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KADIKÖY – KARTAL METRO İNŞAATINDA FORMASYON ve AÇIKLIK  
GEOMETRİSİNE GÖRE GEÇİCİ TAHKİMAT UYGULAMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Emrah ŞİMDİ  
(505091016)**

**Maden Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Maden Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. C. Atilla ÖZTÜRK**

**EYLÜL 2013**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 505091016 numaralı Yüksek LisansÖğrencisi **Emrah ŞİMDİ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**KADIKÖY – KARTAL METRO İNŞAATINDA FORMASYON ve AÇIKLIK GEOMETRİSİNE GÖRE GEÇİCİ TAHKİMAT UYGULAMASI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Yrd. Doç. Dr. C. Atilla ÖZTÜRK** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Prof. Dr. Erkin NASUF** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Ataç BAŞÇETİN** .....  
İstanbul Üniversitesi

**Teslim Tarihi :** **03 Mayıs 2013**  
**Savunma Tarihi :** **17 Eylül 2013**



*Eşime,*



## ÖNSÖZ

Tüm mühendislik yapılarında olduğu gibi yeraltı yapılarının da ekonomik sınırlarda çevre ile uyumlu bir şekilde inşa edilmesi gerekmektedir. Bu da ancak ayrıntılı jeolojik etütler ve modelleme çalışmaları ile mümkündür.

Bu çalışmada amaç jeolojik formasyonların mühendislik özelliklerine göre birincil destek sistemlerinin analitik, sayısal ve nümerik yöntemler ile hesaplayarak karşılaştırmak ve tahkimat gerekliliklerini irdelemektir.

Proje süresince yardımlarını esirgemeyen ve çalışmam süresince bilgi ve deneyimlerinden had safhada faydalandığım sayın hocam Yrd. Doç. Dr. C. Atilla ÖZTÜRK' e bir kez daha teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2013

Emrah Şimdi  
Maden Mühendisi



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR .....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY.....	xix
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Projenin Tanıtılması .....	1
1.2 Projenin Kapsamı .....	2
1.3 Proje Genel Bilgileri.....	3
1.3.1 Kadıköy – Kartal metrosu 1. etap işleri .....	3
1.3.2 Kadıköy – Kartal metrosu 2. etap işleri .....	4
1.4 Projenin İstanbul Toplu Taşıma Ağına Katkısı.....	5
1.5 Uygulanan İnşaat Yöntemleri .....	5
1.5.1 Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu .....	6
1.5.2 NATM'in özellikleri.....	6
1.5.2.1 Kaya kütlelerinin doğal dayanımı .....	7
1.5.2.2 Ölçümler.....	7
1.5.2.3 Esnek Tahkimat .....	7
1.6 NATM Kazı Yöntemi.....	7
1.6.1 NATM'de tahkimat elemanları.....	8
1.6.1.1 Püskürtme beton .....	9
1.6.1.2 Hasır çelik .....	10
1.6.1.3 Kaya bulonları .....	10
1.6.1.4 Çelik iksa.....	11
1.6.1.5 Ön süren .....	11
<b>2. PROJEDE UYGULANAN TÜNEL TİPLERİ.....</b>	<b>13</b>
<b>3. TÜNEL GÜZERGÂH JEOLJİSİ.....</b>	<b>17</b>
3.1 Trakya Formasyonu .....	17
3.2 Kartal Formasyonu .....	18
3.3 Kurtköy Formasyonu .....	20
3.4 Aydos Formasyonu.....	21
3.5 Dolayoba Formasyonu.....	23
<b>4. ANALİTİK YÖNTEMLER İLE TÜNEL TAHKİMAT HESAPLARININ YAPILMASI .....</b>	<b>25</b>
4.1 Kaya Sınıflama Yöntemleri .....	25
4.1.1 Kaya Kütle Sınıflaması (RMR)sistemi .....	26
4.1.2 Q sınıflandırma sistemi.....	30
4.2 Kaya Kütle Parametreleri.....	36
4.2.1 Kaya kütle dayanımı.....	36

4.2.2 Kaya patlama olgusu .....	37
4.2.3 Ezilme olgusunun incelenmesi .....	38
<b>5. FORMASYONLARIN JEOTEKNİK ÖZELLİKLERİ ve ARAZİ GERİLMELERİ.....</b>	<b>41</b>
5.1 Kayaç Malzemelerin ve Kaya Kütlelerinin Çalışma kapsamında İncelenen Mekanik ve Fiziksel Özellikleri .....	41
5.2 Çalışma Güzergâhının Tanımlanması .....	41
5.3 Formasyonları Oluşturan Kayaç Malzemelerinin Mekanik Özellikleri.....	44
5.4 Metro İnşaatında Jeoteknik ve Yapım Özelliklerinin Jeostatistiksel İncelemesi .....	45
5.4.1 Jeostatistik uygulamalar .....	47
5.4.2 Semivariogram.....	48
5.4.3 Kestirim Probleminin Çözümü .....	50
5.5 Açıklık Etrafındaki Gerilmeler .....	53
5.6 Kaya Kütlelerinin Dayanımı .....	54
<b>6. ANALİTİK YÖNTEMLER İLE TASARIM ve UYGULAMA .....</b>	<b>55</b>
6.1 Kaya Patlama Riskinin Araştırılması .....	55
6.2 Ezilme Potansiyeli Riskinin Araştırılması .....	55
6.3 RMR'a Göre Tahkimat Tasarımı .....	56
6.4 Q'ya Göre Tahkimat Tasarımı .....	57
6.5 Açıklığa – Jeotekniğe ve Yapılmış Hesaplara Göre Tahkimat Seçimi .....	58
<b>7. NÜMERİK YÖNTEMLER İLE UYGULAMA .....</b>	<b>59</b>
7.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Tünel Tasarımı.....	59
7.2 Nümerik Yöntemler ile Tahkimat Malzemelerinin Tasarımı .....	60
7.3 Tahkimat Sistemlerinin Karşılaştırılması.....	65
<b>8. SONUÇLAR .....</b>	<b>67</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>73</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>89</b>

## KISALTMALAR

<b>NATM</b>	: Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu
<b><math>\sigma_z</math></b>	: Basınç gerilmesi
<b>B</b>	: Tünel genişliği
<b>H</b>	: Örtü kalınlığı
<b>RQD</b>	: Kaya kalite değeri
<b>RMR</b>	: Kaya Kalite Oranı
<b>g</b>	: Birim hacim ağırlık
<b>S</b>	: Gerilme faktörü (yatay gerilmelerin düşey gerilmelere oranı)
<b>Jn</b>	: Eklem takım sayısı
<b>Jr</b>	: Eklem pürüzlülük sayısı
<b>Ja</b>	: Eklem alterasyon sayısı
<b>Jw</b>	: Eklem suyu indirgeme sayısı
<b>SRF</b>	: Gerilme indirgeme faktörü
<b><math>\sigma_n</math></b>	: Kayanın basınç dayanımı
<b>n</b>	: Poisson Oranı



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1 :Tünel kesit tipleri ve özellikleri.....	15
Çizelge 3.1 : Kartal formasyonu Jeoteknik özellikleri.....	19
Çizelge 3.2 : Kartal formasyonu kaya sınıflaması.....	19
Çizelge 3.3: Kurtköy formasyonu Jeoteknik özellikleri.....	21
Çizelge 3.4: Kurtköy formasyonu kaya sınıflaması.....	21
Çizelge 3.5: Aydos formasyonu Jeoteknik özellikleri.....	22
Çizelge 3.6: Aydos formasyonu kaya sınıflaması.....	23
Çizelge 3.7: Dolayoba formasyonu Jeoteknik özellikleri.....	24
Çizelge 3.8: Dolayoba formasyonu kaya sınıflaması.....	24
Çizelge 4.1 :Günümüzde kullanılan başlıca sınıflandırma sistemleri.....	25
Çizelge 4.2 : Sınıflandırma parametreleri ve dereceleri.....	26
Çizelge 4.3 : Eklem yönelimlerine göre düzeltme.....	27
Çizelge 4.4 : Kaya sınıflamaları ve dereceleri.....	27
Çizelge 4.5 : Kaya sınıflamaları ve dereceleri.....	28
Çizelge 4.6 : Değiştirilmiş RMR sınıflamasında derecelendirme.....	28
Çizelge 4.7 : RMR'a bağlı olarak tünellerde tahkimat ve kazı.....	30
Çizelge 4.8 : Eklem takım sayısı ( $J_n$ ).....	31
Çizelge 4.9 : Eklem pürüzlülük sayısı ( $J_r$ ).....	31
Çizelge 4.10 : Eklem alterasyon sayısı ( $J_a$ ).....	32
Çizelge 4.11 : Eklem suyu indirgeme faktörü ( $J_w$ ).....	32
Çizelge 4.12 : Gerilme indirgeme faktörü (SRF).....	33
Çizelge 4.13 :ESR değerleri.....	34
Çizelge 4.14 : $\sigma_c / \delta_0$ Değeri.....	37
Çizelge 4.15 : Ezilme Davranışı Sınıflaması.....	39
Çizelge 5.1 : Tünel Tipleri ve Uzunlukları.....	41
Çizelge 5.2 :Kaya Kütle Özellikleri-1.....	43
Çizelge 5.3 :Kaya Kütle Özellikleri ve Değerleri.....	43
Çizelge 5.4 :Çalışma Yapılan Bölgeler.....	44
Çizelge 5.5: Kozyatağı İstasyon Bölgesi Q Puanlaması.....	44
Çizelge 5.6 :Kozyatağı İstasyon Bölgesi RMR Puanlaması.....	45
Çizelge 5.7 : Jeoteknik veriler.....	48
Çizelge 5.8 : Variogram parametreleri.....	49
Çizelge 5.9 : $E_r$ ve UCS için SV ve cross semivariogram parametreleri.....	50
Çizelge 5.10 : Açıklık etrafındaki bölgeselleştirilmiş gerilmeler.....	54
Çizelge 5.11 : Kaya kütlelerinin dayanım hesapları.....	54
Çizelge 6.1 : Kaya patlama olgusunun değerlendirilmesi.....	55
Çizelge 6.2 : Ezilme davranışının değerlendirilmesi.....	56
Çizelge 6.3 :RMR'dan hareketle tahkimat sisteminin kestirimi.....	56
Çizelge 6.4 : Q'dan hareketle tahkimat sisteminin kestirimi.....	58
Çizelge 6.5 : Seçilen tahkimat sistemleri.....	58
Çizelge 7.1 : Modellerde kullanılan tahkimat elemanlarının özellikleri.....	60

<b>Çizelge 7.2</b> : Modellerde kullanılan kaya bulonu özellikleri .....	61
<b>Çizelge 7.3</b> : Tahkimat sistemleri karşılaştırması.....	65

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1 : Kadıköy – Kartal metro güzergahı. ....	2
Şekil 1.2 : Kadıköy – Kartal arası istasyonlar ve hattın uzantısı. ....	2
Şekil 1.3 : NATM tahkimat elemanları .....	12
Şekil 2.1 : Geometri ve gerekli iç boyutları ile tünel kesit tipleri – 1 .....	13
Şekil 2.2 : Geometri ve gerekli iç boyutları ile tünel kesit tipleri – 2 .....	14
Şekil 2.3 : Tipik bir istasyon ve bileşenlerinin 3D gösterimi .....	15
Şekil 2.4 : Şaft, yaklaşım, makas, ve hat tünellerinin şematik görünümü.....	15
Şekil 4.1 : RMR tahkimatsız durma süresi [9].....	29
Şekil 4.2 : Eş boyut ve q değerlerine bağlı destek kategorileri [15] .....	35
Şekil 5.1 : Ana hat tünelleri şematik gösterimi .....	42
Şekil 5.2 : Güzergahın gösterimi.....	42
Şekil 5.3 : Semivariance .....	49
Şekil 5.4 : Er ve UCS arasındaki korelasyon.....	50
Şekil 5.5 : SVs of Er ve UCS ve Er and UCS arasındaki cross variogram.....	50
Şekil 5.6 : ReVs (a:RQD, b:GSI, c:UCS, d:Em, e:AR) Kriging haritaları. ....	51
Şekil 5.7 : Er'nin Cokriging haritası.....	52
Şekil 5.8 : Jeoloji ve kaya kütle sınıflamalarının jeostatistiksel uygulama sonuçları .....	53
Şekil 6.1 :RMR ve tahkimatsız durma süresi ve desteksiz açıklık ilişkisi.....	57
Şekil 6.2 : Bölgelerin Q sistemine dayalı destek kategorileri.....	57
Şekil 7.1 : Tahkimat elemanlarının programa tanıtılması .....	61
Şekil 7.2 : Modelin çalıştırılması 1. aşama.....	61
Şekil 7.3 : Hat – 1 üstyarı kazısının yapılması ve desteklenmesi 2. aşama.....	62
Şekil 7.4 : Hat – 1 altyarı kazısının yapılması ve desteklenmesi 3. aşama .....	62
Şekil 7.5 : Hat – 2 üstyarı kazısının yapılması ve desteklenmesi 4. aşama.....	62
Şekil 7.6 : Hat – 2 altyarı kazısının yapılması ve desteklenmesi 5. aşama .....	63
Şekil 7.7 : Kartal formasyonu - Kozyatağı bölgesi. ....	64



## **KADIKÖY – KARTAL METRO İNŞAATINDA FORMASYON ve AÇIKLIK GEOMETRİSİNE GÖRE GEÇİCİ TAHKİMAT UYGULAMASI**

### **ÖZET**

Kadıköy-Kartal yeraltı metro hattı İstanbul'un yoğun trafik problemine çözümün bir parçası olacaktır. Metro, yaklaşık 56,1 km uzunluğunda tamamı yeraltında bulunan iki hattan oluşur. Güzergâh üzerinde onaltı istasyon yapılmıştır. Güzergâh üzerinde geçilen jeolojik formasyonlar sırasıyla Trakya, Kartal, Kurtköy, Aydos ve Dolayoba'dır. Bu formasyonlar, jeoteknik çalışmalar ışığında daha çok zayıf ve/veya orta kaya kütle sınıfına dâhil edilebilirler. Tünellerin derinliği topolojik çeşitliliğe göre 18 m ile 44 m arasında değişmektedir. Kazılar ve yeraltı yapılarının destekleri, tüneller, makas tünelleri ve istasyonlar dâhil olmak üzere Temmuz 2008'de başlayıp Ağustos 2011'de tamamlanmıştır. Tünellerin ilk 9 km'si TBM (Tunnel Boring Machine) ile kalan kısmı ise NATM (Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu) yöntemi kullanılarak ekskavatör ve yükleyiciler yardımı ile kazılmıştır. Yeraltı açıklıklarının ana destekleme sistemleri kafes kirişler, püskürtme beton ve bulonlardır. Bu tezin amacı, metro hattının ana yapım aşamalarını ve açıklıkların geometrisine ve jeolojik formasyonun mühendislik özelliklerine göre ana hat tünellerinin birincil destek sistemlerini, analitik, sayısal ve nümerik yöntemler ile hesaplayarak karşılaştırmak ve tahkimat gerekliliklerini irdelemektir.

Tünel kazılarının akabinde, açılan boşluklarda uygulanması gerekli ilk tahkimatlara ilişkin tasarımların, ampirik ve nümerik yöntemler ile gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan jeomekanik veriler, bölgede daha önce gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve inşaat faaliyetleri sırasında elde edilen ayna raporlarının derlenmesinden elde edilmiştir. Elde edilen bu veriler, bir uzay içerisinde dağılım gösterip bölgesel değişken özelliği gösterdiğinden dolayı, jeostatistiksel yöntemler ile değişkenlerin tünel güzergâhı boyunca dağılımları araştırılmıştır. Tüm bunlar, çalışmanın nihai amacı olan tahkimat tasarımlarının farklı yöntemler ile elde edilmesi için kullanılacak verilerdeki güvenilirliği artırmak için gerçekleştirilmiştir.



# **INITIAL SUPPORT SYSTEM DESIGN BASED ON OPENING GEOMETRIES AND GEOLOGICAL FORMATIONS IN KADIKÖY – KARTAL SUBWAY CONSTRUCTION**

## **SUMMARY**

The construction of subway connects Kadikoy to Kartal with 22 km underground subway line for the transportation of nearly 923,000 people in a day to become a solution of Istanbul's heavy traffic network. Two underground main tunnels called tube-1 and tube-2 were driven in this project while the total length of main tunnels excavation is nearly 44 km. Sixteen stations were also constructed in this subway line (Fig. 1). Total length of the underground tunnels is 56.1 km with connection and switch tunnels including main tubes and shafts. The first 9 km of the tunnels were driven by tunnel boring machines (TBM), and the rest of the tunnels were opened by New Austrian Tunneling Method (NATM).

Earth Pressure Balance (EPB) type TBMs were used from Kozyatagi to Kadikoy to eliminate the difficulties of opening underground tunnels in poor soil conditions as well as to minimize the effect of underground excavations on surface structures. These machineries with average 10 m daily advance rates were used to complete excavation, concrete lining, and grout injections between ground and lining. The excavations were started on August 2007 from Kozyatagi with two EPB type TBMs and completed on June 2010 for tube-1 and July 2010 for tube-2 in Kadikoy.

Excavators with average 2 m daily advance rates accomplished the remaining excavations of the main tubes. The numbers of the working tunnel faces were arranged accompanied with the construction schedule.

The aim of the study is to give brief history of tunnel support systems based on the geotechnical properties of the geological formations driven into the tunnel construction project.

The geological formations of the study area differ from Kadikoy to the destination point as per Trakya, Kartal, Kurtkoy, Aydos, Dolayoba formations, respectively while the length of these formation are arranged as per 3.50 km, 8.25 km, 4.45 km, 1.30 km, and 4.50 km, as well. Brief information regarding these main formations based on prior investigations and literature.

Trakya formation is found in the first 3.5 km of the tunnel construction route. The formation mainly consists of sandstone, siltstone, and clay stone. There are two main zones in this particular formation, which called as weathered and unweathered zones. The unweathered zone is classified as medium as per rock mass classification.

Kartal Formation is the longest formation in the project area from 3.50 km to 11.75 km, and it is mainly formed by carbonate mudstone and limestone. The geotechnical studies of the formation are summarized in this study. According to the geotechnical investigation, the formation can be classified as poor and medium.

Lithology of Kurtkoy formation from 11.25 km to 16.20 km is pebbly sandstone, sandstone, and mudstone. Classification of Kurtkoy formation based on geotechnical properties is given in chapter 3, and the formation is classified as poor and medium.

Aydos formation is the shortest formation in the project area with its highly strong quartzite rocks from 16.40 km to 17.50 km. Although the intact rock material has strong strength values, due to the existence of the discontinuities rock mass is classified as poor and medium as can be seen in chapter 3.

Dolayoba formation mainly consists of strong and clay filled limestone in some places and starting with 17.50 km up to the end of the project area. Especially the karstic spaces in the formation creates problem during excavation and support of underground openings. The formation is classified as poor and medium as per the results of geotechnical studies given in chapter 3.

Laminated shales and lenticel type quartzite's shales form the lithology of Gozdagi formation. This formation is mainly faced between 17.60 km and 17.86 km. Only laminated shales are found during the excavation of this formation excluding quartzite. This formation is highly weathered due to the tectonic deformations, and in some cases it is observed that the shales are turned to dark brown clay.

The quantification of rock mass zones of the project area explained in this section 4 was obtained from Rock Mass Rating (RMR) and Q rating as can be seen in relevant chapter.

Due to the depth and the geometry of the main tubes, initial support designs are vital importance in this project. Distance between surface and the tunnel roof is 18 m while horizontal distance between the tubes is 12 m in some cases as aforementioned. On the other hand, the geotechnical classifications of the formations show that the rock mass is generally in poor conditions. In order to overcome the possible ground failure problems during the construction stage, the required support

system for the opening is selected based on geotechnical properties of the ground as well as geometry of the opening. The elements used for initial support system are explained in chapter 6.

The equipment of initial support system summarized and given in relevant chapter. It is used based on the geotechnical properties of the rock formations. The application of the support is selected based on daily site geotechnical reports as well as the records of geotechnical reports prepared prior to the construction. The details of initial support system applied to the main tubes based on the geometry and geotechnical properties of rock formation are given in chapter 6.

Numerical analysis of the initial support system design is computed from the input data given in chapter 6 and 7. Engineering properties of rock mass and support system equipment are selected as per the in-situ site conditions to model the most probable solution applied at site construction.

Because of the high cost and importance of the project, design of initial support systems is also evaluated and decided based on numerical analysis results. Numerical analysis is performed in this study and the results are given in the additional figures. Normal stress distribution ( $\sigma_1$ ), horizontal, vertical, and total displacements and Strength factor (SF) are primarily investigated to understand the suitability of designed support systems in the projected openings.

The results of numerical analysis show the applicability of designed initial support systems. The effect of the initial support systems applied for all regions and compared with the results determined for the unsupported condition given in attachments. According to the outputs of the study, the total displacements are determined 5.00 cm at roof without any support system while the value increases to 2.00 cm by applying proposed support system. The results are good to evaluate the applicability of support system as well as the numerical method as a tool for the design of support in underground constructions.

Project of Kadikoy - Kartal subway with its capacity and budget is important for Istanbul's Anatolian part transportation network. The 22 km underground line was driven in 5 different geological formations mostly they are in poor rock class as per rock mass classifications. The excavation and support of underground openings phase is completed on August 2011. The scope of this study is to investigate initial support design based on geotechnical properties of rock formations for the main tunnels which are called as tube-1 and tube-2. Firstly, each geological formation

were assessed and classified based on engineering properties of formations. RMR and Q values are used to make objective classifications. After that, different support system classes are determined as per initial support design. Lattice girder, shotcrete, rock bolt, umbrella arch, spiling, and micropile is used as support system elements if it is necessary. The suitability of these support system classes are tested from justification of the results with numerical analysis. Although the results of classification and numerical analysis are quite reasonable, it is also highly recommended in here that the suitability of support system must be checked by in-situ observations from tunnel convergence and surface settlements measurements.

After tunnel works, the initial support systems of the underground openings are designed due to the necessary geomechanical data for application with methodologies empiric and numeric. These data are obtained from the reports of tunnel faces that are made before from the experimental studies and construction works. Because the obtained data show regional distribution in space due to the variations, geostatistical methods and the distribution of the variables are investigated along the tunnel route. The ultimate aim of the study obtained by different methods is to enhance the reliability of the data.

## 1. GİRİŞ

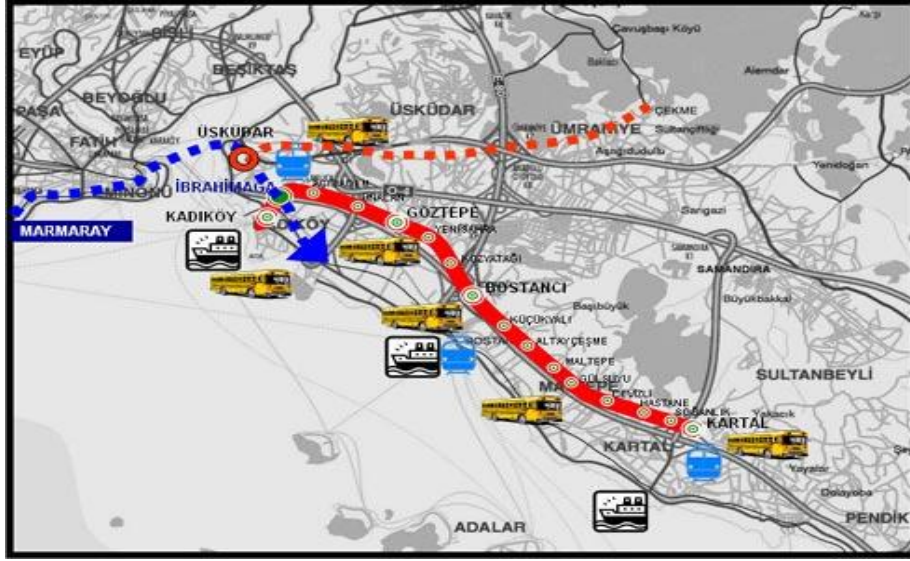
Demiryolu, metro, karayolu, yaya yolu, kanal v.b. gibi çeşitli alt yapı uygulamalarının bir kısmının veya tamamının, yer altından geçmesinin teknik veya ekonomik ihtiyaçlar doğrultusunda gerekli olduğu (kamulaştırma masrafları, hafriyat giderleri gibi) durumlarda başvurulan yer altı yapılarına tünel denir [1].

Tünel inşasını gerektiren nedenler kısaca sıralanırsa:

1. Metro ve lastik tekerlekli şehir içi yol ihtiyaçları,
2. Eğimin sınırlı olan güzergâhlarda engebeli arazilerin geçilmesi,
3. Trafik yoğun olduğu bölgelerde yolların kesişmesinin istenmemesi,
4. Büyük dolgu veya yarma işlerinin yapılmasının istenmemesi gibi durumlarda tünel yapımı gerekli olmaktadır.

### 1.1 Projenin Tanıtılması

Kadıköy – Kartal Metrosu İkmal İnşaatı ve Elektro-Mekanik Sistemler Temin, Montaj ve İşletmeye Alma İşleri isimli proje, “Kadıköy - Kartal” Yeraltı Metro Hattı İstanbul Anadolu yakasında Kadıköy’den başlayıp, Kartal’a kadar devam etmektedir. Şekil 1.1.’de de verilen 22 kilometrelik güzergâh, Anadolu yakasında “E5/D100 Karayolu” boyunca 16 istasyon ile ana yerleşim merkezlerine hizmet etmektedir. Sistem aynı zamanda, deniz yoluyla veya Marmaray hattı ile hat üzerindeki Ayrılıkçeşme (İbrahim ağa) istasyonunda Avrupa yakasından gelen yolcuların entegrasyonunu sağlayacaktır. Projede öngörülen yolcu taşıma kapasitesi 923.000 kişi/gün, işletim hızı 80 Km/saat’ tir.



Şekil 1.1 : Kadıköy – Kartal metro güzergâhı.

## 1.2 Projenin Kapsamı

Kadıköy – Kartal Metrosunda sağ ve sol hat olarak isimlendirilen iki adet yeraltı tüneli oluşturulmuştur. Sağ hatta 21.694 m, sol hatta 21.753 m olmak üzere toplam 43.447 m hat tüneli, 16 adet istasyon, 8 adet makas tüneli inşa edilmiştir. Kadıköy’den Kartal’a kadar yapılmış olan hat sırasıyla: Kadıköy, Ayrılıkçeşme, Acıbadem, Ünalın, Göztepe, Yenisahra, Kozyatağı, Bostancı, Küçükyalı, Maltepe, Huzurevi, Gülsuyu, Esenkent, Adliye, Soğanlık, Kartal istasyonlarından geçmektedir. Şekil 1.2’de Kadıköy – Kartal metro hattı, hat boyunca açılacak istasyonlar ile birlikte görülmektedir.



Şekil 1.2 : Kadıköy – Kartal arası istasyonlar ve hattın uzantısı.

### **1.3 Proje Genel Bilgileri**

Toplam tek hat tünel uzunluğu 43.326 m olup bağlantı ve merdiven tünelleri dâhil olduğunda toplam tünel boyu 56.150 m olmaktadır. Toplam ray uzunluğu 48.572 m'dir. Güzergâh uzunluğu 21.663 m'dir ve güzergâh üzerinde 16 istasyon bulunmaktadır. İstanbul'un Anadolu yakasındaki toplu taşıma talebinin gün geçtikçe artması ve mevcut yolların genişletilmesi ve ilave yollar yapılmasına rağmen trafik sıkışması problemlerinin önüne geçilememesi dolayısı ile 1990'lı yıllardan itibaren kökten bir çözüm arayışına başlanmıştır.

Yoğun araç trafiğine sahip olan Kadıköy-Kartal arasındaki D-100 karayolunun yükünü azaltmak, bu aksta hızlı ve kitlesel yolcu taşınmasını sağlamak ve iki kıta arasında ulaşımı hızlandırmak amacıyla projelendirilmiştir. Bu hat Ayrılıkçeşme (İbrahim ağa) İstasyonu'nda Marmaray Hattı ile entegre olmaktadır. Aynı zamanda Kadıköy İstasyonu vasıtasıyla deniz bağlantısı sağlanmaktadır. İnşaat aşamasında D-100 karayolunun kısmen trafiğe kapatılması, raylı sisteme ayrılacak bölüm dolayısı ile yolun kalıcı olarak daralacak olması, hafif raylı sistemin ihtiyaca tam olarak cevap veremeyecek olması gibi etkenler de göz önüne alınarak 2005 yılı Temmuz ayında sistemin tamamen yeraltında ve metro standartları ile inşasına karar verilmiştir.

İstasyonların peron boyu 200 m olacak ve 8 adet vagon dan oluşan metro trenleri her 2,5 dakikada bir aynı yöne doğru hareket edeceklerdir. Sistem, yoğun dönemlerde bir saat içerisinde aynı yöne 70.000 yolcu taşıyabilecek kapasitede olup, günde bir milyonun üzerinde yolcuya hizmet vermesi planlanmaktadır. Kadıköy-Kartal Metro su ana hat tünellerinden Kadıköy-Kozyatağı arası 2 adet EPB-TBM "Zemin Basıncı Dengeli Tünel Açma Makinesi" kullanılarak açılmıştır. Kartal - Kaynarca arasındaki hat tünellerinde de 2 adet TBM "Tünel Açma Makinesi" kullanılmıştır. İstasyon bölgesindeki, shaft, yaklaşım, peron, bağlantı, merdiven ve yaya geçiş tünelleri ile makas tünelleri ise NATM (Yeni Avusturya Tünel Metodu) ile inşa edilmiştir.

#### **1.3.1 Kadıköy – Kartal metrosu 1. etap işleri**

Yüklenici firma, Yapı Merkezi-Doğuş-Yüksel-Yenigün-Belen İnşaat ortak girişimidir. Yapılacak proje 2 etaba bölünecek olunursa; 1. etap Kadıköy-Kozyatağı arası 9 km'lik bölümü kapsamaktadır. İhale 30.12.2004 tarihinde sonuçlanmıştır ve

ihale bedeli 139574679,63 \$+KDV olarak belirlenmiştir. 2. etap için yapılan keşif çalışmalarının toplam bedeli 181447083,52 \$+KDV'dir. Sözleşme tarihi 28.01.2005 olarak belirlenmiştir. İşe başlama tarihi ise 11.02.2005'tir. 2011 Kasım ayı itibarıyla yapılan iş miktarı 179.494.554 \$+KDV'dir.Sözleşmeye göre işin süresi 24 ay olarak belirlenmiştir. İş bitim tarihi,14.09.2010 olarak belirlenmiştir. Bu tarihte işin %100'ü tamamlanabilmiştir. Hat tünelleri ana tüp olarak açılmıştır ve kazılan tünel uzunluğu 17.528 m'dir. Açılan toplam tünel boyu 19.560 m olup bu miktarın 12.331 m'si TBM ile 7.229 m'si ise NATM ile açılmıştır.

Kadıköy-Kozyatağı arası için özel olarak imal edilen 2 adet EPB-TBM makinesi ile 2007 yılı Ağustos ayında kazıya başlanılmışlardır. Bu makineler, zeminin TBM kesici kafasına uyguladığı basıncı sürekli olarak ölçüp, tünel açımı sırasında bu basıncı dengede tutarak yüzeyde ve çevre yapılarında herhangi bir deformasyona izin vermeden ilerleme sağlanmaktadır. Genellikle zayıf zemin şartlarının hâkim olduğu bölümlerde başarı ile kullanıldılar. Tünel kazısı, beton kaplama ve zemin ile tünel kaplaması arasına harç enjeksiyonu işlemlerinin tamamını otomatik olarak yapan bu makineler günde ortalama 10 m tüneli ilerlemeli gerçekleştirebilirler.

Kozyatağından Kadıköy'e doğru 2007 yılının Ağustos ayında kazı faaliyetine başlayan iki TBM makinesinden birincisi 11.06.2010 tarihinde, ikincisi de 09.07.2010 tarihinde Kadıköy bölgesi makas tüneline vararak işlemlerini tamamlamıştır. NATM ile açılmakta olan istasyon tünelleri ile makas tünelleri inşaatı için ise hidrolik kırıcılar kullanılmıştır. Bu yöntem ile her tünel aynasında günde ortalama 2 m. tünel açılmıştır. İş programı gereklerine göre shaft sayıları arttırılarak çalışılan ayna sayısı arttırılmış ve yeterli ilerleme hızı sağlanmıştır.

### **1.3.2 Kadıköy – Kartal metrosu 2. etap işleri**

Yüklenici firma, Astaldi-Makyol-Gülermak İnşaat Ortak Girişimi'dir. Proje Kadıköy-Kartal Metrosu İkmal İnşaatı ve Elektro-Mekanik Sistemler Temin, Montaj ve İşletmeye Alma İşleri olarak isimlendirilmiştir.

Her birinin uzunluğu 21,663 m olan çift hat tüneli, elektro- mekanik sistemler temin, montaj ve işletmeye alma işleri kapsamı ile tüm istasyonların (toplam 16 istasyon) ve tüm hattın,ince işleri, çevre düzenlemeleri ile demiryolu işleri, elektrik temini ve dağıtımını, sinyalizasyon, telekomünikasyon, aydınlatma, yürüyen merdiven, asansör, havalandırma, sıhhi tesisat, drenaj işleri, Acıbadem istasyonunda trafik kumanda

merkezi kurulması ve donanımının temini ile ilgili bütün sistem için ve sistemin parçaları için sistemin asgari bakım gerektirecek şekilde tasarım hizmetleri, yapım, temin, montaj, test etme ve işletmeye alma işleri ile sistemle ilgili 24 ay süreli işletme ve bakım gözetimi hizmeti verilmesi, işletme ve bakım el kitaplarının hazırlanması, 2 yıllık yedek parça ve sarf malzemeleri ile özel alet ve teçhizatların temini, iş başında ve yurt dışında eğitim verilmesi işleridir. Bu kapsam içinde ana kalemler olarak, güç temini ve cer gücü, sinyalizasyon, kontrol ve haberleşme, havalandırma ve klima, istasyon yardımcı tesisleri, yürüyen merdiven ve asansörler, istasyon mimari ve ince işleri, demiryolu işlerini kapsamaktadır. İşveren İstanbul Büyükşehir Belediyesi'dir, projenin değeri 910 milyon Euro'dur. Projenin başlangıç tarihi 21.03.2008 olup hizmete giriş tarihi 17.08.2012'dir. Bu tarihte projenin %100'ü tamamlanmıştır.

#### **1.4 Projenin İstanbul Toplu Taşıma Ağına Katkısı**

Güzergâh yaklaşık 21,7 km uzunluğunda olup Kadıköy Meydanı Rıhtım Caddesi'nden başlayarak ve İbrahim ağa Caddesi'ni izleyerek Koşuyolu mevkiinde E-5 karayoluna ulaşmış ve bu yol koridoruna paralel şekilde ilerleyerek Kartal mevkiinde sonlanmıştır. Güzergâh, yerleşim ve iş merkezlerinin üzerinde bulunduğu özellikle Kadıköy bölgesinde çok yoğun bir yapılaşma koridoru üzerinde yer alırken diğer bölümlerde de görece olarak yoğun trafik, kavşak yapıları ve üst geçitler, yerleşim ve ticari amaçlı yapıların yer aldığı bir koridor üzerindedir. Yapımını izleyen yıllarda metro, Kadıköy'de deniz yolu, Ünalán'da metrobüs bağlantısı ve E-5 karayolu üzerindeki iş merkezlerine ulaşım kolaylığı ve hız sağlaması sayesinde oluşturacağı çağdaş ulaşım cazibesiyle yukarıda değinilen yapılar ve bunlarla ilintili çok sayıda insana ulaşım kolaylığı getirecek, üzerinde yer alan 16 istasyon yapısı ile çevre banliyöleri de kapsayacak şekilde İstanbul ili Anadolu yakasındaki insanların %80'ine hizmet verecektir. Sistem, çağdaş metro anlayışı ve standartları gözetilerek yer altı yapıları ve tüneller ile oluşturulmuştur.

#### **1.5 Uygulanan İnşaat Yöntemleri**

Kadıköy – Kartal metro projesinin inşaatında iki tip yer altı kazı metodolojisi kullanılmıştır.

- NATM (Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu) Kozyatağı (Km:8+900) ve kartal makas (Km:20+500) arası ana hat tünelleri için,
- TBM: Kartal makas tüneli ile kaynarca makas tüneli arasındaki ana hat tünelleri için,
- Tüm platformlar, bağlantı tünelleri, yaya tünelleri ve makas tünelleri de NATM ile ekskavasyon yapılmıştır.

### **1.5.1 Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu**

Tünelin açıldığı kaya ortamına kendisini taşıması prensibi ile ortaya çıkan “Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM)” günümüzde çok yaygın kullanılan bir yöntemdir. En uygun kazı ve tahkimat yöntemleri kullanılarak kazıdan sonra oluşacak ikincil gerilme ve deformasyonların, yapılan tahkimatlar ile birlikte kayaya taşınması, yönlendirilmesidir. Tünel kesitini çevreleyen kayaç zonu ilk sağlamlığının olabildiğince korunarak, tüneli çevreleyen bölgenin kendi kendini tutarak doğal bir tahkimat oluşturması amaçlanmaktadır. Böylelikle boşluğu çevreleyen kayaç zonu yük oluşturan değil yük taşıyan bir konuma geçmesi sağlanır [1].

NATM’in Leopold Müller tarafından geliştirilen 22 prensibi olup, ana esası kayanın ilk sağlamlığını koruyarak yapılacak tahkimatla beraber çevreleyen kayacında taşıyıcı sistemde olmasını sağlamaktır. Bu sebeple tahkimat işleri en kısa zamanda tamamlanır. Kazı kesitleri ne kadar dairesel seçilirse yöntem o kadar iyi çalışmaktadır. Ele aldığımız proje dâhil olmak üzere günümüzde birçok tünelde NATM ile tünel açılmaktadır. NATM tahkimat elemanları iksa, püskürtme beton, kaya bulonları, süren ve şemsiye sürenlerdir. Projede uygulanan püskürtme beton kalınlığı 10 – 35 cm aralığında değişmektedir.

### **1.5.2 NATM’in özellikleri**

Bu yöntem kayayı kayaya taşıma prensibine dayanmaktadır. Esnek ve dinamik bir yöntem olan NATM’in en önemli parametreleri kazı aşamalarına ve kurallara kayıtsız uymaktır. Aşağıda Müller tarafından belirlenen prensiplerin en önemlileri verilmiştir.

### **1.5.2.1 Kaya kütlesinin doğal dayanımı**

Yöntem tünel kesitini çevreleyen ve tünel tahkimatının temel bileşeni olan kaya kütlesinin doğal dayanımının korunarak taşıyıcı hale getirilmesine dayanır. Kurulan ilk destek kayacın kendisini taşıyıcı eleman haline getirir. Kazıdan hemen sonra uygulanan püskürtme beton katmanı ile kazı ve kayaç kaynaklı çatlaklar kapatılarak kaya kütlesinin dayanımı artırılır[2, 3, 4].

### **1.5.2.2 Ölçümler**

Tünel kazısı devam ederken, tünelin içinde açıldığı kayaçlara ait testler periyodik olarak yapılmalı, kazı sırasında ve sonrasında oluşan deformasyonlar ve gerilmeler ölçülmelidir. Yapılan ölçümler sayesinde beklenmeyen durumlara karşı yeni kazı ve tahkimat sistemi güçlendirmeleri yapılabilir[2].

### **1.5.2.3 Esnek Tahkimat**

Kazı sonrasında ilk kaplama kayaç ile havanın temasını azaltmak amacıyla ince bir püskürtme beton katmanıdır. Tahkimat ve kazı aşamaları aşağıdaki gibi ilerler.

- Hava ile irtibatı kesmek için 2 cm püskürtme beton.
- Çelik hasır, kafes veya çelik kiriş (gerekliyse) ve 1 kat daha püskürtme beton.
- Aynaya bulon uygulaması (gerekliyse).
- Radyal bulon uygulaması.
- Süren uygulaması (bir sonraki kazı aşamasına geçmeden, gerekliyse).
- İvert yapılıp ringin tamamlanması.

Eğer tünelde yapılan ölçümler sonucu ikincil bir tahkimata ihtiyaç duyulursa ikincil kaplamaya geçilmelidir.

## **1.6 NATM Kazı Yöntemi**

Kazı yöntemi olarak delme patlatma veya yarı mekanize kazı yöntemi kullanılır. Tünelde kullanılan tahkimat elemanları, aşamaları ve kullanım amaçları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

İlk tahkimat olarak kazının hemen sonrasında açılan yan yüzeylere ve aynaya püskürtme beton uygulanır. Bu uygulama kayacın eklem ve çatlaklarını kaplayarak

dökülmeleri önler ve hava ile teması keserek duraylılığı arttırır. Kaplama kalınlığı genelde 2 – 5 cm arasındadır.

İkinci aşamada hasır çelik, çelik veya kafes iksa (gerekliyse) uygulanır. Amacı kemerlenmeyi sağlamak ve tavan kayasının bir bütün halinde kontrollü deformasyonunu sağlamaktır. Çelik kirişler, çelik profillerin (I, HEA ve HEB) tünel kesitine uygun biçimde bükülerek kaynaklanması ile kafes kirişler ise nervürlü inşaat demirlerinin bükülüp kaynaklanmasıyla oluşturulur. Kafes kirişler daha hafif, ucuz ve uygulaması kolay olduğu için daha çok tercih edilirler.

Üçüncü aşama donatılı püskürtme beton aşamasıdır. Genelde 10 – 35cm kalınlığında uygulanır. Öncelikle hasır çelik iksalar arasında arada boşluk kalmayacak şekilde bindirmeli olarak birbirine bağlanarak döşenir. Ardından iki iksa arasındaki bağlantı demirleri monte edilir ve püskürtme beton uygulanır.

Dördüncü ve son aşamada ise radyal bulon uygulaması yapılır. Amacı kazı sonrası ikincil durumlar sebebiyle oluşan plastik deformasyon bölgesini, elastik deformasyon bölgesine tutturarak, doğal dengesi bozulan kayaçları sağlamlaştırmaktadır. Çeşitli tipte kaya bulonlar ihtiyaca göre belirlenir. Bu dört ana tahkimat elemanı ile geçici destek tamamlanır[5].

### **1.6.1 NATM’de tahkimat elemanları**

Bir yeraltı kazı boşluğunun çevresindeki kayanın yük taşıma özelliğini koruması ve duraylılığının arttırılması için kaya bulonları, kablo bulonlar veya herhangi bir kaya sağlamlaştırma elemanının yerleştirilmesi ve kayanın zaten var olan direncinin de harekete geçirilmesine kaya sağlamlaştırma denmektedir. Bu işlem sayesinde NATM'in temel ilkelerinden olan kaya kütesinin kendi kendini taşıması sağlanır. Kaya sağlamlaştırma elemanları ve kaya kütesi beraber çalışarak bir bütün halinde çalışır.

Kaya desteklemesi ise; beton kaplama, çelik iksa veya diğer tür mühendislik elemanları kullanılarak kaya kütesinin hareketlerini kontrol etmektir. Kaya destek elemanları, kaya sağlamlaştırma elemanlarının aksine kaya kütesinin dışında yer alır.

Sağlamlaştırma ve destekleme elemanları olarak ön gerilmeli veya gerilmemiş kaya bulonu, çelik hasır, püskürtme beton, çelik iksadan veya inşaat demirinden yapılmış kafes kirişlerden oluşan dış kabuk ile iç betonarme kabuktan oluşur. NATM'de

birincil destekler kaya kütlesi ile beraber çalışarak kompozit bir yapı oluşturmaktadır. Kaya ve destek elemanlarından oluşan bu kompozit sistem tünel çevresinde oluşan basınçların yeniden dağılımını sağlayarak kayanın gevşeme sonucu azalmakta olan dayanımının artmasını sağlamaktadır. Tünellerde sağlamlaştırma iki aşamada gerçekleşir. Geçici sağlamlaştırma adı da verilen birincil destekleme, kafes veya çelik iksa, kaya bulonları, püskürtme beton ve hasır çelik donatıdan oluşur. Kalıcı sağlamlaştırma ise nihai betonarme kaplama sistemidir. Kaya kendini tutamayacak kadar parçalı ise gerekli görülen desteklerin aralıkları azaltılarak ve ön süren tekniği kullanılarak kazı yapılacak alanın ve çevresel taşıyıcı zonun güçlendirilmesi sağlanır. Ayrıca iç kaplama ile kaya kütlesi arasında boşluk kalması olasılıklarının önüne geçmek amacıyla kontak enjeksiyonu, yüzey oturmalarının önlenmesi amacı ile konsolidasyon enjeksiyonları yapılabilir. Aynanın stabilitesinin sağlanması amacı ile aynaya püskürtme beton, hasır çelik ve kaya bulonları ile destekleme yapılabilir.

#### **1.6.1.1 Püskürtme beton**

İnce kum, agrega, çimento, priz hızlandırıcı karışımından oluşan kuru ya da ıslak olarak pompalar yardımıyla kazı yüzeyine püskürtülen çok yönlü kullanım amacı olan bir çeşit harçtır. Püskürtme betonun en önemli özelliği karışımındaki priz hızlandırıcı kimyasallar yardımı ile erken priz alması ve mukavim olmasıdır. Püskürtme beton kayanın kesme dayanımını artırır, tünel kesiti çevresindeki kayanın gevşemesini, kayadaki süreksizlikleri doldurarak dökülmeleri ve sökülmeleri önler. Kazıdan hemen sonra oluşan gerilme ve deplasmanların bir kısmını karşılar. İksa ve çelik hasır ile kaya kütlesi arasında oluşabilecek bölgesel boşlukların minimumda kalmasını sağlar. Taşıyıcı eleman olarak donatılı ve donatısız kullanılır. Kuru karışımda su ve kuru agrega ve çimento karışımları püskürtme hortumunun ağzında birleşerek püskürtme işlemi gerçekleşir. Çimentonun agrega ile aderansının sağlanması için agreganın, ağırlığınca %3-8 oranında nem içermesi gerekmektedir. Priz hızlandırıcı katkı maddesi sıvı ise su ile birlikte kuru toz halinde ise çimento-agrega karışımı ile birlikte karışıma girmelidir [6]. Su – çimento oranı kuru karışımlar için 0,3-0,5 arasında değişir [7].

Yaş püskürtme beton karışımları normal beton karışımları gibi hazırlanarak beton pompasına verilmektedir. Karışımın yüzeye püskürtülmesi için gerekli olan 7-15

m<sup>3</sup>/dk arasındaki debi ve 7 bar hava basıncı hava püskürtme ucunda priz hızlandırıcı ile birleşerek yüzeye püskürtülmektedir [6].

### **1.6.1.2 Hasır çelik**

İki tür hasır kullanılmaktadır. Bunlar birbirine zincir şeklinde geçmeli tellerden oluşturulan hasırlar ve birbirlerine kaynatılarak tutturulan çelik hasırlardır. Hasır çelik püskürtme betonun statik özelliklerini arttırmak ve beton priz alana kadar gerekli stabiliteyi sağlamak amacı ile kullanılır. Hasır çelik püskürtme betonun kesme kuvvetine karşı mukavemetini arttırmaktadır. Çelik hasırlar püskürtme betonla birlikte kullanıldıklarında kayaca sağlamlık verir, hava ve nem etkilerine karşı korur ve bulonların sağlamlaştırma etkilerine ek olarak rijit bir diyafram oluşturarak sağlamlık etkisini geniş bir alana yayar. Hasır çelik yoğun ve hızlı işçilik gerektiren tünel gibi yapılarda işçilik kolaylığı ve küçük kaya kopmalarını tutarak oluşabilecek iş kazalarını minimuma indirir. Montaj kolaylığı ve püskürtme betonun geri sıçramasını önlemek amacı ile hasır aralığı  $\geq 100$  mm'den fazla olmalıdır. Donatı çapı  $\varnothing < 10$  mm ve pas payı  $\geq 2$ cm olmalıdır [8].

### **1.6.1.3 Kaya bulonları**

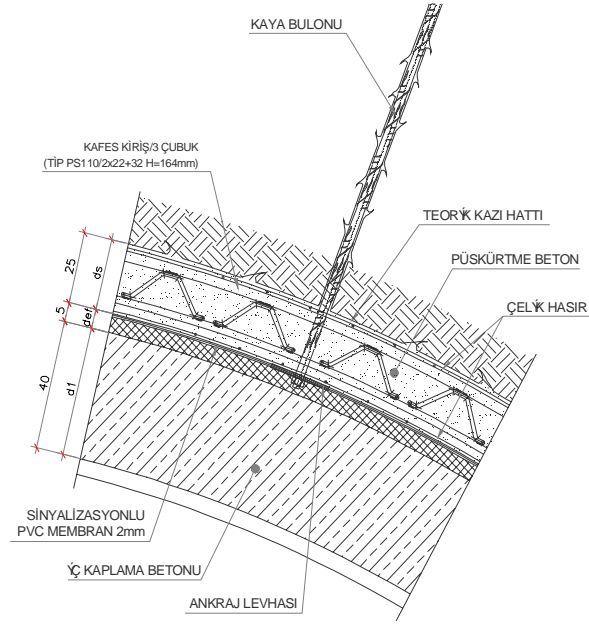
Kaya bulonları kayayı çekme gerilmelerini taşıyabilecek şekilde sağlamlaştırmak, çekme gerilmelerini ana kayaya iletmek, süreksizliklerin sürtünme direncini arttırmak veya kayada üç eksenli gerilme durumu oluşturmak için yer kabuğu içine bağlanan demir çubuklardır. Bulonlar tünel kazısı sırasında duvar ve tavanda çözülmüş, kopmak üzere olan kayaların yerlerinde kalmalarını sağlayan, güvenliği artırıcı elemanlardır. Kaya bulonları tünel kesiti çevresindeki kayanın desteklenmesinde kullanılan ana destek elemanlarından biridir. Kaya bulonu kaya bloklarının sabitlenmesinde tekil olarak kullanıldığı gibi çevredeki kayanın dayanımının artırılması amacıyla sistematik olarak da kullanılabilir [5]. Bulonlar 1,3 – 4,0 cm çaplı ve uzunlukları tünel açıklığına göre değişebilen çelik çubuklardır. Tünel tavan ve duvarlarına delinen yuvalar içine yerleştirilen bulonlar, çimento enjeksiyonu yapılarak veya alt ucundan kayaya bağlanırlar. Plaka ve somun yardımı ile kayaya doğru itilip sıkıştırılırlar. Bulonlar gerilmesiz, mekanik gerilmeli, uçtan yapışan olarak üç ana tipe ayrılır. Gerilmesiz bulonlar, enjeksiyonlu ve sürtünmeli tip olarak ikiye ayrılırlar.

#### **1.6.1.4 Çelik iksa**

Çelik iksa, kazı yapılan tünel kesitinde püskürtme beton dayanımını kazanıncaya kadar geçen sürede yapım güvenliğini sağlamak ve püskürtme betonda yük dağılımına yardımcı olmak amacıyla kullanılırlar. Uygulanan çelik iksa tipleri kaya ortamına göre I, H, TH veya U hadde profiller ve kafes kiriş olarak seçilebilir. Bu tür destekleme elemanları az eklemli kaya ortamlarında kullanılabilirdiği gibi kazıyı müteakip aşırı çatlakların oluştuğu kaya ortamlarında da kullanılabilir. Çok çatlaklı kaya ortamlarında çelik iksa ve kazı duvarı arasına çelik hasır, çelik çubuk, ağaç takoz veya çelik plakalar yerleştirilerek küçük kaya bloklarının düşmesi önlenir. Çelik takımlar kazıyı çevreleyen kaya kütlelerini güçlendirmezler. Ancak, deformasyon sonucu zayıflayan çevre kayasına destek olurlar.

#### **1.6.1.5 Ön süren**

Ön süren uygulaması kazı yapılacak bölgenin önceden desteklenmesi amacı ile yapılmaktadır. Tünel ilerleme yönünde kullanılan enjeksiyonlu ön sürenler ortamı iyileştirici, kayacın dayanımını arttırıcı özelliğe sahip olduğu gibi, ayna önünde oluşan kesme gerilmelerini de kontrol etme amacı ile kullanılmaktadır. Tamamen ayrılmış ve büyük bloklar içeren zeminlerde kazı yapıldığı zaman, tahkimattan önce tünel tavanı ve aynada göçmeler meydana gelir. Bu durumun önüne geçebilmek maksadı ile kazıya başlamadan önce tünel ilerleme yönünde, kaya sınıfına göre sıklığı belirlenen delikler açılarak 6-9 m uzunluğunda 32 mm veya 51 mm çapında içi boş borular yerleştirilerek destekleme işlemi yapılır. Ucu delikli bu borular yardımıyla Parker adı verilen aletler yardımıyla 2 bar basınçla zemine çimento enjeksiyonu da yapılır. Bu işlem süren boyu ile ilişkili olarak belirli bir bindirme boyu sağlanacak ölçüde tekrarlanır.



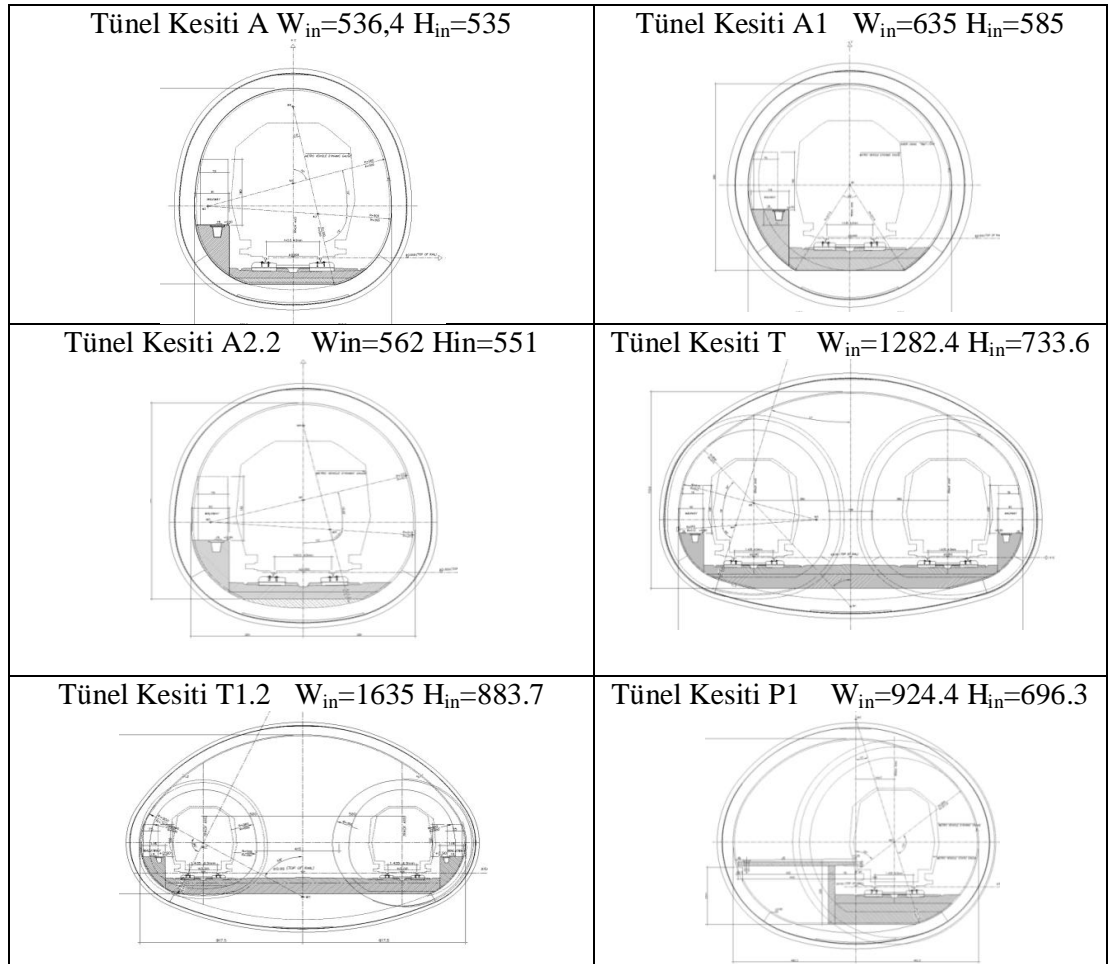
**Şekil 1.3 : NATM tahkimat elemanları.**

## 2. PROJEDE UYGULANAN TÜNEL TİPLERİ

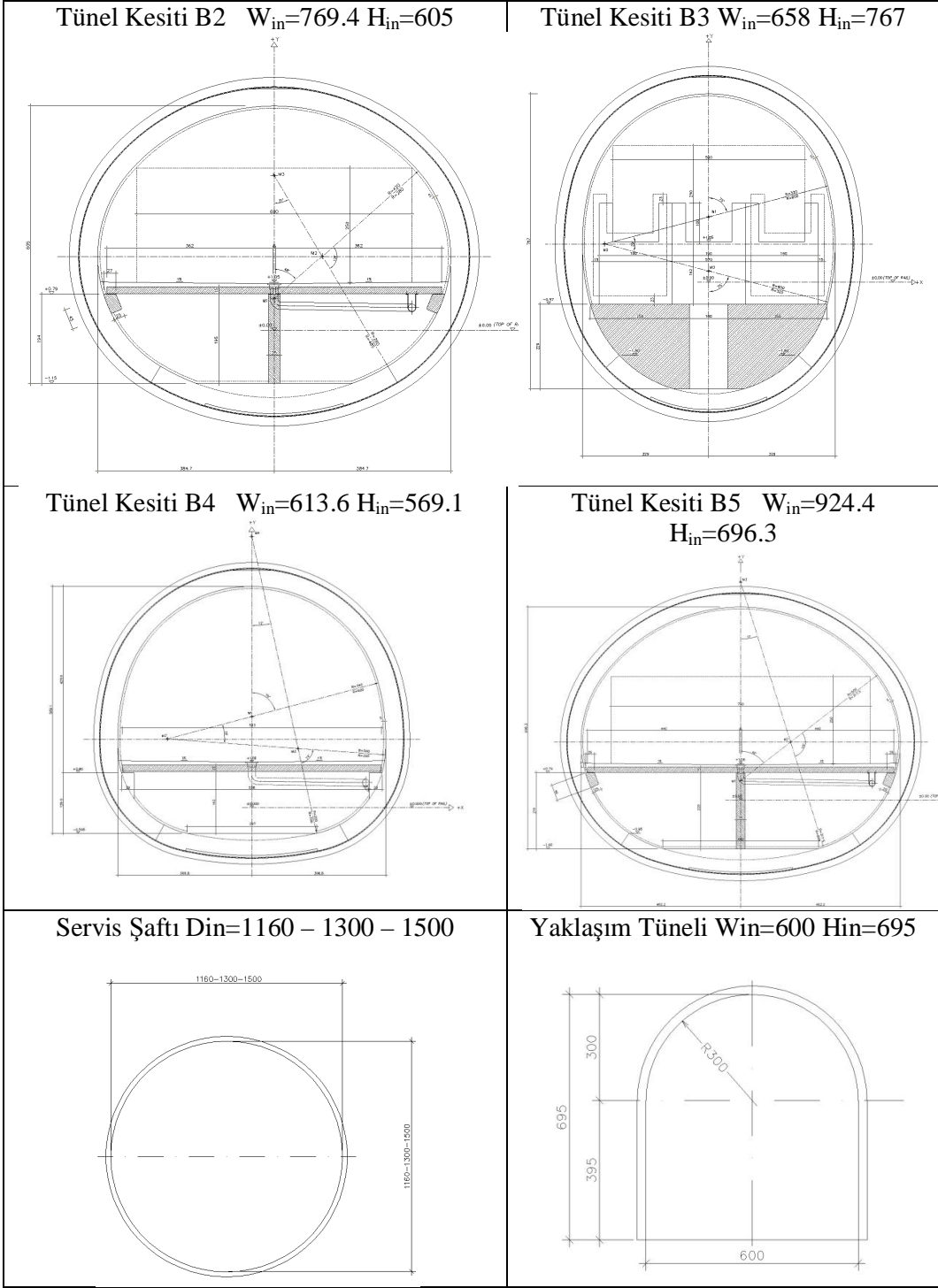
Bu bölümde proje kapsamında yerine getirilmesi gereken yer altı işlerinin karakteristiği ve genel özellikleri özetlenmiştir. NATM ile açılacak boşluklar;

- Şaft, yaklaşım tüneli, makas tüneli
- İstasyonlar: Her hatta peron tünelleri, bağlantı tünelleri, merdiven tünelleri, havalandırma ve elektrik şaftları
- Ana hat tünelleri

Aşağıda tünel tiplerine ait çizimler ve bilgileri sunulmuştur. Bütün boyutlar cm cinsinden verilmiştir.  $W_{in}$ , iç genişlik.  $H_{in}$ , iç yükseklik invert kalınlığı hariç.  $D_{in}$ , iç çaptır.



Şekil 2.1 : Geometri ve gerekli iç boyutları ile tünel kesit tipleri – 1.

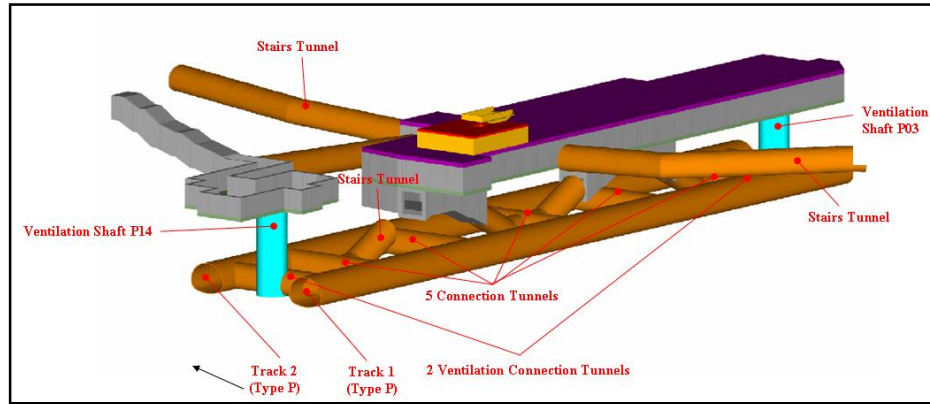


**Şekil 2.2** : Geometri ve gerekli iç boyutları ile tünel kesit tipleri – 2.

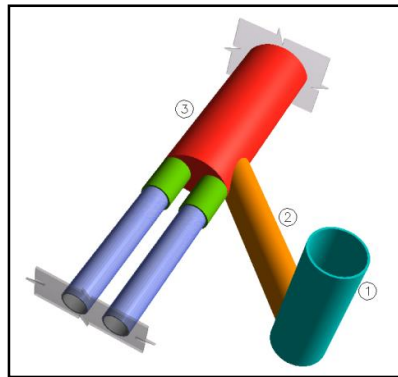
Projede kullanılan tünellerin tipleri ve boyutları çizelge 2.1’de özetlenmiştir;

**Çizelge 2.1 : Tünel kesit tipleri ve özellikleri.**

Uygulama	Kesit Tipi	İç Genişlik	İç Yükseklik	Kazı Metodu	Açıklama
Tek hat tünel	A	5.364	5.35	NATM	At nalı
Tak hat tünel	A1	6.35	5.85	NATM	Dairesel
Tak hat tünel	A2.2	5.62	5.51	NATM	At nalı
TBM tünel	-	5.70	5.70	TBM	Dairesel
Makas tüneli	T	12.824	7.336	NATM	Ovaloid
Makas tüneli	T1	15.70	8.682	NATM	Ovaloid
Makas tüneli	T1.2	16.35	8.837	NATM	Ovaloid
Makas tüneli	P	8.454	6.786	NATM	At nalı
Platform tüneli	P1	9.244	6.963	NATM	Ovaloid
Platform tüneli	P2	12.138	7.659	NATM	Ovaloid
Ana hat bağlantı	B1	3.864	3.90	NATM	At nalı
İstasyon bağlantı	B2	7.694	6.05	NATM	Ovaloid
Merdiven gal.	B3	6.58	7.67	NATM	Düşeyovaloid
Merdiven gal.	B3.1	8.36	8.424	NATM	Düşey ovaloid
İstasyon bağlantı	B4	6.136	5.691	NATM	At nalı
İstasyon bağlantı	B5	9.244	6.963	NATM	Ovaloid



**Şekil 2.3 : Tipik bir istasyon ve bileşenlerinin 3D gösterimi [9].**



**Şekil 2.4 : Şaft, yaklaşım, makas ve hat tünellerinin şematik görünümü [9].**



### 3. TÜNEL GÜZERGÂH JEOLJİSİ

Kadıköy – Kartal metro inşaatı sırasında toplam 6 farklı jeolojik yapıda inşaat çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu formasyonlara ait jeoteknik bilgiler bölgede yapılan çalışmalardan alınmış olup aşağıda bu formasyonlara ait jeolojik ve jeoteknik bilgiler verilmektedir. Tünel hattı boyunca, ilk 3+500 km de Trakya formasyonu, 3+500 km - 11+750 km arası Kartal formasyonu, 11+750 km - 16+200 km 'ler arası Kurtköy formasyonu, 16+400 km - 17+500 km 'ler arası Aydos formasyonu, 17+600 km' den sona kadar ise Dolayoba formasyonu geçilmiştir. Bu formasyonlar da kendi içlerinde jeoteknik özelliklerine göre sınıflandırılmaktadırlar. Aşağıda bunlarla ilgili bazı bilgiler verilmiştir

#### 3.1 Trakya Formasyonu

Güzergâhın Kadıköy civarındaki ilk kesimlerinden, Km. 0+00'dan yaklaşık Km. 3+500'e kadar geçilen Trakya Formasyonu Kumtaşı- Silttaşı-Kiltaşı aralanmalarından oluşmuştur. Yeşilimsi gri renkli, ayrılmış zonlarında kahverengi, yerel merceksel çakıtaşı ve kumtaşı ara tabakalı bu formasyon **Kaya (1978)** tarafından adlandırılmıştır. Genelde ince tabakalı ve paralel laminalı şeyllerden oluşmuştur. Bunlar içinde değişik stratigrafik düzeylerde sarımsı kahverengi kumtaşı, çakıllı kumtaşı ve merceksel çakıl taşı ara tabakaları bulunmaktadır. Kumtaşlarının kalınlıkları 10 cm ile 2,5 m arasında değişmektedir. Bunların alt yüzeyleri keskin, aşınmalı ve üzerlerinde oygu-dolgu ve alev izleri türünde taban yapıları ile iz fosiller bulunur. İçlerinde Bouma istifine ait dereceli tabakalaşma, paralel, mikro çapraz ve konvolüt laminasyon ile üst paralel laminasyon zonları yaygın olarak izlenir. Üstte şeyle geçiş tedricidir. Bu özellikler kumtaşı ara tabakalarının türbidit akıntılarıyla çökeldiklerini göstermektedir. İstif içinde üste doğru kumtaşı ara tabakalarının hem kalınlıkları ve hem de sayıları artar. Ayrıca, üst kesimde değişik düzeylerde merceksel çakıl taşları mevcuttur. Kefeliköy çevresinde birim içinde kalsitürbiditara tabakaları da mevcuttur. Bunlar Baykal ve **Kaya (1963)** tarafından Cebeciköy kalkerini olarak ayrılmıştır. Trakya formasyonu Yelkentepe

formasyonu üzerine uyumlu olarak gelir. Üstte ise genç birimlerle açılı uyumsuz olarak örtülür. Güzergâh başlangıcı olan Kadıköy İstasyonu'nda alüvyon tabakasının altında saptanan birim Acıbadem üst geçidi öncesine kadar devam eder.

Birimin mostraları Yeldeğirmeni Acıbadem arasında gözlenir. Tünel kotunda km 0+000 ile 1+610 ve km 1+710 ile 2+745 ve 3+300 ile 3+560 ve 4+050 ile 4+130 arasında bu birim güzergâhı kesmektedir.

Trakya formasyonu ayrışmadığı kesimlerde orta-sağlam kaya özelliğindedir. Çoğunlukla birkaç eklem takımı içermekte olup, eklem aralıkları değişkendir. Eklemler ayrışma zonu içerisinde bazen açık bazen de kil, kalsit ve kuvars dolguludur. Ayrışmamış kesimlerde ise kapalı veya kalsit dolguludur. Birimin şeyl seviyeleri ise yine aynı renklerde, ince taneli, ince-orta-kalın tabakalı, ayrışmamış kesimlerinde orta sağlam karakterindedir. Eklem aralıkları sık olup kumtaşlarına göre ayrışma dereceleri daha fazladır[10, 11].

### **3.2 Kartal Formasyonu**

Güzergâhın Kozyatağı civarındaki kesimlerinde, km. 3+500'den yaklaşık Km. 11+750' ye kadar karşılaşılması beklenen Kartal Formasyonu karbonatlı çamur taşı ve kireçtaşı litolojileri ardalanmasından oluşmuştur. Sarımsı kahve-gri renkli, iyi yapraklanmalı, bol brakyopod, mercan ve bryozoa fosilli, seyrek silttaşı ile kumtaşı ara tabakalı şeyllerden ve kireçtaşı seviyelerinden oluşan bu birim, Önalın (1982) tarafından adlanmıştır. Kartal, Pendik, Tuzla, Yakacık, Beykoz-Çengelköy arası ve İstinye kuzeyinde geniş alanlarda mostra verir. Kartal çevresinde yaklaşık 750 m kalınlığa ulaşır. Şeyller dilinimli, genelde silt boyutlu kuvars, feldispat ve mikalıdır. İnce orta kum boyutlu kuvars, feldispat ve serizit-muskovit türü mikalar başlıca taneler olup matriks ile sıkı tutturulmuştur. Matriks içinde çörtleşme, serizit iğneleri ve illit bileşimli kil minerali gelişmeleri yaygındır. Formasyon dalga tabanı altındaki düşük enerjili ve açık-derin denizel koşullarında çökelmıştır. Çeşitli araştırmalarda içerisinde derlenen fosillere göre Kartal formasyonu'nun alt-orta Devoniyen yaşında olduğu saptanmıştır. Formasyon güzergâh boyunca Acıbadem İstasyonu'ndan sonra alüvyonların altından başlar ve Bostancı İstasyonu'ndan sonra Çamaşırıcı Deresi vadisine kadar devam eder. Yaklaşık km 4+300 ile yaklaşık km 10+800 arasında zaman zaman Belgrat formasyonu'nun altında izlenen birim doğu sınırında faylı geçişlidir. Km 4+300 civarında batı sınırında Denizli formasyonu

uyumlu bir dokanağa sahip olan birim doğu sınırında şaryajın altındaki formasyon olarak uyumsuz faylı bir geçişle arkozlar tarafından üzerlenir Kartal formasyonu tektonik etkiler sonucu çok kıvrımlı ve kırıklı bir yapı kazanmıştır.

Bu tektonik deformasyonun yarattığı süreksizliklerin de etkisi ile birim yüzeyde kalınlığı 1-2 m arasında olan bir zon boyunca ayrıışmış olarak görülür. Birimin makaslı, kırık ve ezik kesimleri kolay kazılır niteliktedir. Bu birime ait genelleştirilmiş kütsel özellikler Çizelge 3.1’de özetlenmiştir. Çizelge 3.2.’de ise Kartal formasyonuna ait kaya sınıflaması değerleri bulunmaktadır [10, 11].

**Çizelge 3.1 : Kartal formasyonu Jeoteknik özellikleri [10, 11].**

<b>Birim</b>	<b>Tanım</b>
Litoloji	Karbonatlı çamurtaşı – killi, kırıntılı kireçtaşı
Süreksizlik Aralığı	100 – 600, çamurtaşı seviyelerinde yer yer <100
Süreksizlik Özellikleri	Sistematik 3, ve rastgele süreksizlik takımları, orta devamlı FeO boyalı, kireçtaşında yer yer 1-5 mm açık Mineral dolgulu, düzlemsel, az pürüzlü-düz (f≈18-37)
Süreksizlik Doğrultuları	KD-GB, KD-GD baskın, saçılmış
RQD (%)	40 – 100
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	10 – 40, daha az oranda 60 – 70
Ayrıışma Derecesi	W1 - W2, daha az oranda yüzeyde W3
Su Geliri ve Kaya Kütlesine Etkisi	Az- yarı geçirimli, Damlama-sızma yerel olarak süreli akış, az-orta etkili

**Çizelge 3.2 : Kartal formasyonu kaya sınıflaması [10, 11].**

<b>Parametre</b>	<b>Değerler</b>	<b>Puan</b>	<b>Kaynaklar</b>
Kaya Dayanımı	10 – 70 MPa	2 – 7	Deney Sonuçları
RQD	40 – 100	8 – 20	Sondaj Raporları
Süreksizlik Aralığı	100 – 600 mm.	8 – 10	Sondaj ve Saha Gözlemleri
Süreksizlik Özelliği	Az pürüzlü – düz, dar FeO Boyalı	10 – 20	Saha Gözlemleri
Yeraltı Suyu Koşulları	Nemli, Yer yer ıslak	4 – 10	Saha Gözlemleri
Süreksizlik Düzeltmesi	Değişken	-10	Saçılmış Süreksizlikler
Genel RMR Değer Aralığı		22 – 57	Zayıf – Orta Kaya

### 3.3 Kurtköy Formasyonu

Kurtköy formasyonu inceden iriye arkozik çakıltası-kumtaşı-çamur taşı aralanmalarından oluşmuştur. Güzergahta yaklaşık Km 11+250 – 16+200 aralığındadır. İstanbul grubunun görülür en alt birimi olan bu birim formasyon Haas (1968) tarafından Kurtköy tabakaları, Önalın (1982) tarafından ise Kurtköy formasyonu olarak adlanmıştır. Birim mor renkli çakıl taşı, kumtaşı ve çamur taşından oluşur. Formasyonun egemen litolojisi mor renkli, çoğunlukla kaotik içyapılı, tabakalanması belirsiz parça çakıl taşlarıdır. Bunlar içerisinde seyrek olarak paralel laminasyon ve çapraz tabakalanma izlenmektedir. Çakıl taşının taneleri genellikle kuvars, volkanik ve düşük dereceli metamorfitten oluşur. Tane boyu maksimum 10 cm'dir. İçerisinde çamur intraklastları bulunur. Alüvyon yelpazesi ortamında gelişmiş olan bu çakıl taşları mor renkli, çapraz tabakalı kumtaşı –çamur taşı aralanması ve çamur taşları ile yanal ve düşey geçişlidir. Çamur taşları daha koyu mor renklidir ve paralel, dalgalı paralel ve küçük ölçekli çapraz laminasyon gibi yaygın sedimanter yapılar içerirler. Menderesli akarsu ortamında çökelmiş olan bu istif yaklaşık 150 m kalınlıktadır. Petrografik olarak %75 kuvars, %20 ayrıışmış ortoz türü feldispat, %2-3 mika, %1-2 opak minerallerinden oluşmaktadır. Kurtköy formasyonu ile üzerindeki Aydos formasyonu arasında bazı bölgelerde merceksel geometrili, baskın olarak kuvars çakıllarından yapılmış, kanal çakıl taşları mevcuttur. Kurtköy formasyonu'nun altı görülmez. Üstte ise Aydos formasyonu ile tedrici geçişlidir. Formasyonun önceki araştırmalara orta Ordovisiyen'den daha yaşlıdır. Kurtköy formasyonu proje güzergâhı boyunca yaklaşık km10+800'den başlar ve yaklaşık km 17+260'e kadar gözlenir. Batıda Çamaşırcı Deresi'nin doğu sırtlarında mostra veren formasyon, Kartal formasyonuna bindirmeli olarak başlar. Küçükyalı civarındaki E-5 yarmaları boyunca iyi mostra veren Kurtköy formasyonu üzerine güzergâh boyunca genellikle sırtların üzerinde görülen Belgrat formasyonu uyumsuz olarak bulunur. Çizelge3.3.'te Kurtköy Formasyonu'nun jeoteknik özellikleri verilmiştir[10, 11].

**Çizelge 3.3 : Kurtköy formasyonu jeoteknik özellikleri [10, 11].**

<b>Birim</b>	<b>Tanım</b>
Litoloji	Çakıtaşı-Kumtaşı (Arkoz), daha az Çamurtaşı,
Süreksizlik Aralığı	300 >1000
Süreksizlik Özellikleri	Sistematik 2-3, ve rastgele (belirsiz tabaka) süreksizlik takımı, genelde kapalı-az devamlı, pürüzlü-çok pürüzlü, FeO boyalı, mineral dolgulu, (f=-25-65)
Süreksizlik Doğrultuları	NNW-SSE, daha az oranda yaklaşık E-W
RQD (%)	50-100, daha az oranda 0-50
Tek Eksenli Basınç Dayanımı	Genelde 25-80, yer yer >100
Ayrışma Derecesi	W1 - W2
Su Geliri ve Kaya Kütlesine Etkisi	Az-yarı geçirimli, yerel olarak geçirimli, damlama-yerel olarak akış, az etkili

**Çizelge 3.4 : Kurtköy formasyonu kaya sınıflaması [10, 11].**

<b>Parametre</b>	<b>Değerler</b>	<b>Puan</b>	<b>Kaynaklar</b>
Kaya Dayanımı	25 – 80 MPa	4 – 7	Deney Sonuçları
RQD	50 – 100	8 – 17	Sondaj Raporları
Süreksizlik Aralığı	100 – 1000 mm.	10 – 15	Sondaj ve Saha Gözlemleri
Süreksizlik Özelliği	Pürüzlü – boyalı, darFeO Boyalı	20 – 25	Saha Gözlemleri
Yeraltı Suyu Koşulları	Kuru, Yer yer ıslak	7 – 15	Saha Gözlemleri
Süreksizlik Düzeltmesi	Paralel	-12 – -10	Saçılmış Süreksizlikler
Genel RMR Değer Aralığı		37 – 69	Zayıf – Orta Kaya

### 3.4 Aydos Formasyonu

Aydos formasyonunun kuvarsit birimi oldukça sağlam ve aşındırıcı haliyle proje alanında kısa bir kesimde, 16+400-17+500 km'ler arasında yer alır. Kurtköy formasyonu üzerinde yer alan ve başlıca mostraları Aydos tepesi, Kayışdağı, Yakacık, Çamlıcalar, Kurtköy ve Beykoz çevresinde görülen bu istif önceki çalışmalarda esas kuvarsit horizonu, orta kuvarsit formasyonu, Ayazma tabakaları, Aydos kuvars arenit birimi, kuvarsit gibi isimler altında incelenmiştir [10, 11]. Birim Önalın(1982) tarafından formasyon mertebesinde adlandırılmıştır. Aydos formasyonu, Kurtköy formasyonu üzerinde ince-orta tabakalı, küçük ölçekli çapraz tabakalı şeyl ya da silttaşı ara tabakalı kuvars arenitlerle başlar.

Bu birim üzerine krem-pembe bej renkli, kalın-çok kalın tabakalı ve büyük ölçekli çapraz tabakalı, feldspatça zengin kuvars arenitler gelir. Daha üstte ise pembe-mor alacalı renkli, yerel kuvars çakıltışı mercekli, dalgalı paralel lamine ve küçük-büyük ölçekli tekne tipi çapraz tabakalı kuvars arenitler ve beyaz renkli, orta kalın tabakalı yer yer şeyl ara katkılı, çapraz tabakalanmalı kuvars arenitler bulunur. %95 ya da daha fazla oranda kuvars tanelerinden yapılmış olan bu birim silis çimento ile tutturulmuştur. Bu nedenle de çok sert, aşındırıcı ve dayanımlıdır. Maksimum kalınlığı 300 m olan Aydos formasyonu alttaki Kurtköy ve üstteki Gözdağ formasyonlarıyla tedrici geçişlidir. Orta Ordovisiyen-Landoveriyen yaşlı Gözdağ formasyonunun uyumlu olarak altında bulunması nedeniyle Orta Ordovisiyen yaşlı olmalıdır. Aydos formasyonu Kartal-Kadıköy raylı toplu taşıma sistemi güzergâhında Belgrat formasyonunca örtülü olmasından dolayı mostra vermez. Ancak yapılan sondajlarda bütün özellikleriyle ayırtlanmıştır. Aydos formasyonu yaklaşık km 17+260 ile yaklaşık km 17+600 arasında bulunmaktadır. Cevizli istasyonu çevresinde yapılan sondajlar ile birim tanımlanmıştır[10, 11].

Birim doğuda Kurtköy batıda Gözdağ formasyonlarının arasında uyumlu olarak bulunmaktadır. Geçirmiş olduğu deformasyonlar sebebiyle de oldukça çatlaklı bir yapı gösterir. Orijinalde son derece dayanımlı olmasına rağmen yapısal kırıklarla yer yer daha zayıf bir nitelik kazanabilmiştir. Çizelge 3.5.'te Aydos formasyonu jeoteknik özellikleri, Çizelge 3.6.'da Aydos formasyonu kaya sınıflaması verilmiştir.

**Çizelge 3.5 : Aydos formasyonu jeoteknik özellikleri [10, 11].**

<b>Birim</b>	<b>Tanım</b>
Litoloji	Kuvarsit,
Süreksizlik Aralığı	100 – 300
Süreksizlik Özellikleri	Az pürüzlü-pürüzlü, FeO boyalı, bazen 1-2 mm ikincil silis dolgulu (f~20-55)
Süreksizlik Doğrultuları	Yeterli mostra olmadığından gözlenememiştir.
RQD (%)	0 – 100
Tek Eksenli Basınç Dayanımı	50 – 80
Ayrışma Derecesi	W1, W2 (FeO Boyalı süreksizlikler)
Su Geliri ve Kaya Kütlelerine Etkisi	Yarı geçirimli- geçirimli, sızıntı-akış, az-orta etkili

**Çizelge 3.6 : Aydos formasyonu kaya sınıflaması [10, 11].**

<b>Parametre</b>	<b>Değerler</b>	<b>Puan</b>	<b>Kaynaklar</b>
Kaya Dayanımı	50 – 100 MPa	4–7	Deney Sonuçları
RQD	0 – 80	3–17	Sondaj Raporları
Süreksizlik Aralığı	100 – 300 mm.	8–10	Sondaj ve Saha Gözlemleri
Süreksizlik Özelliği	Pürüzlü, dar FeO Boyalı	20–25	Saha Gözlemleri
Yeraltı Suyu Koşulları	Nemli, Yer yer ıslak	7–15	Saha Gözlemleri
Süreksizlik Düzeltmesi	Paralel	-12–10	Yüksek eğimli eklemler, dayklar
RMR Değer Aralığı		27–56	Zayıf – Orta Kaya

### **3.5 Dolayoba Formasyonu**

Dolayoba formasyonu kireçtaşları genelde sağlam kaya özelliğinde olup, bazı seviyeleri killi kireçtaşıdır. Birim güzergâhta yaklaşık Km 17+500 ile proje sonuna kadar olan kesimde yer almaktadır. Gözdağ formasyonunun kuvars arenit mercekli şeylleri ile girik, koyu mavi-mavimsi koyu gri renklerde ve çeşitli karbonat fasiyeslerinden oluşan bu birim Kartal-Pendik ve Tuzla çevresi ile Beykoz ve İstinye dolaylarında yaygın olarak mostra verir.

Birim, Gözdağ formasyonu ile geçiş bölgelerinde genellikle resifal karbonatlar ile başlar. Resifal fasiyes üzerinde bazı bölgelerde kalınlığı 500 m'nin üzerinde olan ince şeyllere tabakalı koyu mavimsi gri-pembemsi gri renklerde, çapraz laminalı, dalgalı- mercekli ve flaser tabakalı kireçtaşları gelir. Resif önu platformunda çökelmiş olan bu birimin daha üstünde ince paralel laminalı, koyu mavimsi gri mikrit ve ince pembemsi renkli laminalı çamurtaşı ardalanmasından oluşan, dalga taban altı ve düşük enerjili platform içi derin çukurluk koşullarını yansıtan bir diğer fasiyes yer alır.Önalın (1982) tarafından Sedef Adası Formasyonu olarak adlandırılmış bu birim mercekler şeklindedir. Formasyonun üst seviyeleri ise şeyl-mikrit ardalanmasından oluşur. Kireçtaşı ara tabakaları bu dinajlanma sonucu iri yumrular haline dönüşmüştür. 10 m kadar kalın bu zonun üzerinde ise Kartal formasyonunun sarımsı kahverenkli şeyllere geçilir. Formasyon içinde gözlenen değişik türde kireçtaşları ileri derecede diyajenez ile bazen tümüyle yeniden kristallenmesi ve dolayısıyla, birincil dokusal özelliklerini geniş ölçüde yitirmişlerdir. Neomorfizma olarak tanımlanabilecek bu rekrizalasyonun yanı sıra; basınç erimeleri ile gelişmiş stilolitleşme, ikincil dolomitleşme ve daha sonra didolomitleşme bu kireçtaşlarını sert kaya haline getiren başlıca diyajenetik olaylar olarak sayılabilir.

Yalnız, daha sonra gelişen karstlaşma ile birim bazı yerlerde ileriderecede tahrip olmuştur. Alttaki Gözdağ formasyonu ile girik, üstteki Kartal formasyonu ile geçişli olan formasyon fosil bulgularına göre Alt Silüriyen-Alt Devonyen yaşındadır.

Bu birim Kadıköy–Kartal raylı toplu taşıma sistemi güzergâhının son kesimlerinde yaklaşık km 17+860 ile 21+658 arasında gözlenmektedir. Cevizli İstasyonu’ndan sonra Belgrat formasyonunun altından başlayan Dolayoba formasyonu Hastane İstasyonu’ndan sonra mostra vermeye başlar ve proje sonuna kadar bu birim devam eder. Birim doğuda uyumlu bir dokunakla Gözdağı formasyonunu üzerler. Dolayoba formasyonu genel olarak çok sert kaya niteliğinde olmakla birlikte karstik boşluklar nedeniyle mühendislik açısından sorunlu kesimleri de bulunmaktadır. Çizelge 3.7.’te Aydos formasyonu jeoteknik özellikleri, Çizelge 3.8.’de Aydos formasyonu için yapılan kaya sınıflaması verilmiştir [10,11].

**Çizelge 3.7 : Dolayoba formasyonu Jeoteknik özellikleri [10, 11].**

<b>Birim</b>	<b>Tanım</b>
Litoloji	Kireçtaşı (yerel kuvararenit merceği)
Süreksizlik Aralığı	200 – 600 yer yer >600
Süreksizlik Özellikleri	Sistematik 3 ve rastgele süreksizlik takımı, genelde kapalı, mineral dolgulu-sağlamlaşmış, pürüzsüz-az pürüzlü, yer yer kil dolgulu ve kayma izli süreksizlikler. Yer yer küçük erime boşluklu(f≈15-55)
Süreksizlik Doğrultuları	Yaklaşık E-W, daha az oranda da NW-SE
RQD (%)	60-100 daha az oranda 10-50
Tek Eksenli Basınç Dayanımı	25 – 70
Ayrışma Derecesi	W1 - W2
Su Geliri ve Kaya Kütlesine Etkisi	Az geçirgen, Damlama, nadiren yerel olarak küçük ölçekli akış

**Çizelge 3.8 : Dolayoba formasyonu kaya sınıflaması [10, 11].**

<b>Parametre</b>	<b>Değerler</b>	<b>Puan</b>	<b>Kaynaklar</b>
Kaya Dayanımı	25 – 70 MPa	4-7	Deney Sonuçları
RQD	60 – 100	13-20	Sondaj Raporları
Süreksizlik Aralığı	200- >600 mm.	10-15	Sondaj ve Saha Gözlemleri
Süreksizlik Özelliği	Düz, darFeO Boyalı Kalsit dolgu	7-15	Saha Gözlemleri
Yeraltı Suyu Koşulları	Kuru, Yer yer ıslak	7-15	Saha Gözlemleri
Süreksizlik Düzeltmesi	Paralel	-12-- 10	Yüksek eğimli eklemler, dayklar
RMR Değer Aralığı		42-72	Zayıf – Orta Kaya

## 4. ANALİTİK YÖNTEMLER İLE TÜNEL TAHKİMAT HESAPLARININ YAPILMASI

### 4.1 Kaya Sınıflama Yöntemleri

Kazılarda yapılan gözlemler ve elde edilen verilerin genellikle istatistiksel olarak değerlendirilmesi sonucunda mühendislik deneyimi esas alınarak geliştirilmiş yöntemlerdir. Örnek zemin veya kaya üzerinde yapılan ölçümlere ve arazi verilerine dayanarak geliştirilmiştir. Önceki tünel kazılarından, bunların tünel çevresinde oluşturdukları deformasyon ölçümleri ile kaplama tipi seçimleri incelenerek hesaplarda kullanılır. Kazı sırasında yapılan ölçümlere göre değişen değerler de göz önünde tutularak tünel dizaynı yapılabilir.

Kaya sınıflama sistemlerinin yapılmasında kayanın iki mekanik özelliği esas alınır. Bunlardan birincisi basınç dayanımı  $\sigma_c$ 'dir. İkincisi ise elastisite modülü  $E_t$ 'dir. Kaya sınıflandırmalarının amacı kayaların birbirine göre ne kadar sağlam olduğunun anlaşılması olarak deformasyon özelliklerinin karşılaştırılmasının sağlanabilmesidir [12].

**Çizelge 4.1** : Günümüzde kullanılan başlıca sınıflandırma sistemleri [13].

Sistem Adı	Geliştirenler	Uygulama Alanları
Kaya Yüğü	Terzaghi 1946	Çelik destekli tüneller
Desteksiz Durma Süresi	Lauffer, 1958	Tünelcilik
NATM	Rabcewicz, 1963	Tünelcilik
RQD	Deere v.d. , 1967	Karot loglama, Tünelcilik
RSR	Wickham v.d. 1972	Tünelcilik
RMR	Bieniawski, 1973	Tüneller, madenler, şevler, temeller
Q	Barton, v.d. 1974	Tüneller, madenler

İlerleyen bölümlerde Çizelge 4.1' deki RMR ve Q sınıflama sistemleri detaylı olarak açıklanacaktır.

#### 4.1.1 Kaya Kütle Sınıflaması (RMR)sistemi

Bieniawski tarafından 1973 – 1989 yılları arasında geliştirilen bu yöntem, tüneller, temeller, şev yamaçları ve diğer yer altı inşaatlarında uygun tahkimat önlemlerinin seçiminde yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Sistem 1989'a kadar yapılan çeşitli araştırmalar ve gözlemler neticesinde bazı değişikliklere uğramıştır [13]. Kayayı mühendislik yönünden sınıflamada birçok yöntem vardır. Ancak jeomekanik RMR sınıflaması bunların en yararlılarından biridir. 1972'deki ilk halinde kaya davranışında aşağıda belirtilen bazı parametreler gözetilir ve sınıflandırma bu parametrelere verilen puanlara göre yapılır. Bunlar; kayanın tek eksenli basınç mukavemeti, RQD değerleri yer altı suyunun durumu, eklem sıklığı eklem durumu ve yönlenimidir.

**Çizelge 4.2 :** Sınıflandırma parametreleri ve dereceleri [14].

Parametre		Değer Aralıkları						
1	Sağlam kayanın dayanım (MPa)	Nokta yük indeksi	> 10	4-10	2-4	1-2	Tek eksenli basınç deneyini kullan	
		Tek eksenli basınç mukavemeti	> 250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5 <1
	Derecelendirme		15	12	7	4	2	1 0
2	RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	< 25	
	Derecelendirme		20	17	13	8	3	
3	Eklem sıklığı (m)		> 2	0,6-2	0,2-0,6	0,06-0,2	<0,06	
	Derecelendirme		20	15	10	8	5	
4	Eklem durumu	Çok kaba yüzler sürekli değil ayrılma yok eklemeli sert duvar kayası	Az kaba yüzler ayırım <1mm eklemli ser duvar kayası	Az kaba yüzler ayırım <1 mm eklemli yumuşak duvar kayası	Sürtünme izli yüzler veya fay kili <5mm veya 1-5mm açık eklemli sürekli eklemli	Yumuşak fay kili > 5 mm. kalınlık veya açık eklemli >5mm. sürekli eklemli		
	Derecelendirme		30	25	20	10	0	
5	Yeraltı suyu	Tünelin 10m.kısmında gelen su Lt/dk	Yok	< 10	10-25	25-125	> 125	
		Eklemdeki su basıncı	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5	
		Asal gerilme						
		Genel koşullar		Kuru	Nemli	Orta basınç	Önemli suprob.	
	Derecelendirme		15	10	7	4	0	

RMR sınıflamasına ilişkin sistem ile ilgili ayrıntılar Çizelge 4.1’de görülmektedir. Sınıflama parametreleri ve dereceleri Çizelge 4.2’ye göre belirlendikten sonra, tünel, yamaçlar ve temellere göre Çizelge 4.3 yardımı ile düzeltilir. Jeomekanik sınıflamayı uygulamak için, mühendis önce kaya kütesini yapısal sınıflara ayırır, her sınıfın yalnız tek tip tahkimat gerektirecek özellik ve benzer niteliklere sahip olması gerekmektedir. Sahada ölçümlerden her bir yapısal bölge için önemli derecelendirmeler seçilir. Kaya sınıflamaları ve derecelerine Çizelge 4.2 yardımı ile ulaşılır. Uygulama alanında kullanılan jeomekanik sınıflamada dikkat edilecek husus, düşünülen mühendislik projesine bakılmaksızın önce kaya kütesinin niteliği hakkında genel bir değerlendirmeye ulaşılmasıdır. Bu da sınıflama parametrelerinin ilk beşini kullanmak suretiyle elde edilir. Daha sonra değerlendirmeler tünel, yamaç veya bir temel durumuyla ilgili olup olmamasına bağlı olarak eklemelerin doğrultu ve eğim yönlerine göre düzeltilir [14].

**Çizelge 4.3 :** Eklem yönelimlerine göre düzeltme [14].

Eklemlerin doğrultu eğim ve yönleri		Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil
Derecelendirme	Tüneller	0	-2	-5	-10	-12
	Yamaçlar	0	-2	-7	-15	-25
	Şevler	0	-5	-25	-50	-60

**Çizelge 4.4 :** Kaya sınıflamaları ve dereceleri [14].

Derecelendirme	100-81	80-61	60-41	40-21	< 21
Sınıflama no	I	II	III	IV	V
Tanımlama	Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta kaya	Zayıf kaya	Çok zayıf kaya

Sınıflama parametrelerinin önemli derecelendirmeleri oluşturulunca Çizelge 4.2’deki beş parametre toplanır, önce kaya kütesi için yerindeki değerler saptanır. Yüksek değerler en iyi kaya koşullarına işaret etmektedir. Bu basit değerlendirmeden sonra son olarak Çizelge 4.3’e göre eklem yönelimine göre düzeltme yapılır. Çizelge 4.4 son değerlendirmeleri beş kaya sınıfı halinde toplamaktadır. Bu sınıflandırma ardından Çizelge 4.5’e göre kaya yorumlanır [10].

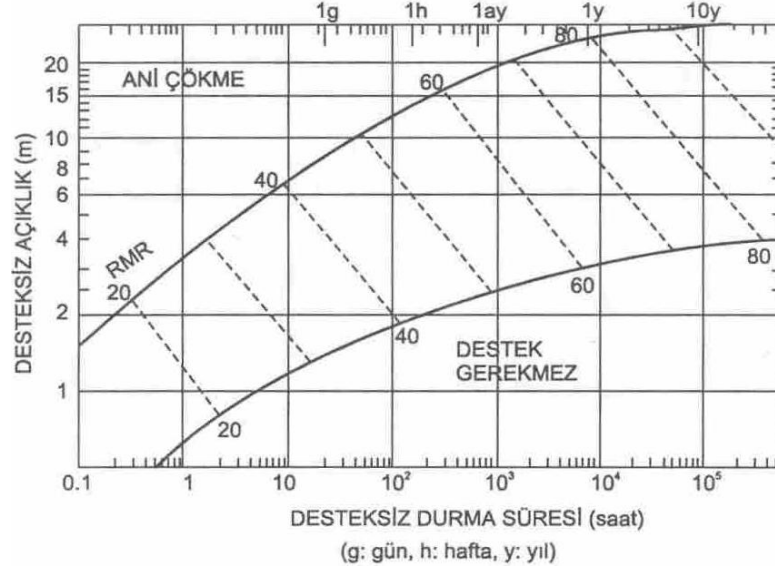
**Çizelge 4.5 : Kaya sınıflamaları ve dereceleri [14].**

Sınıflama No	I	II	III	IV	V
Ortalama Dayanım süresi	15 m açıklık İçin 20 yıl	10 m açıklık	5 m açıklık için 1 hafta	2.5 m Açıklık İçin 10 saat	1 m açıklıkta 10 dakika
Kaya kütlelerinin kohezyonu (kPa)	> 400	300-400	200-300	100-200	<100
Kaya kütlelerinin Sürtünme açısı	>45	35-45	25-35	15-25	<15
Malzemenin Kazılabilirliği	Çok zor	Kolaylıkla büyük parçalar Çıkmaz	Orta	Kolaylıkla Kazılır İyi parçalanma	Çok iyi

RMR sistemi 1989 yılına kadar Bieniawski tarafından geliştirilmiştir. 1989 yılındaki değişiklikler ile birlikte sistem son halini almıştır. Değiştirilmiş RMR sınıflandırma sistemine ilişkin veriler Çizelge 4.6'da verilmiştir. Şekil 4.1'de ise RMR sınıflandırma sisteminde tahkimatsız durma süresi grafiği verilmektedir.

**Çizelge 4.6 : Değiştirilmiş RMR sınıflamasında derecelendirme [15].**

Parametre		Değer Aralıkları								
1	Sağlam kayanın mukavemeti(MPa)	Nokta yük indeksi	> 8	4-8	2-4	1-2	Tek eksenli basınç deneyini kullan			
		Tek eksenli basınç mukavemeti	> 200	100-200	50-100	25-50	10-25	3-10	1-3	
Derecelendirme		15	12	7	4	2	1	0		
2	Sondaj karot kalitesi RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	< 25			
		Derecelendirme	20	17	13	8	3			
3	Eklemleri sıklığı (m)		> 3	1-3	0.1-1	0.05-0.3	<0.05			
		Derecelendirme	30	25	20	10	5			
4	Eklemleri durumu		Çok kaba yüzler sürekli değil ayrılma yok eklemeli sert kaya	Az kaba yüzler <1mm açıklıklı eklemli sert kaya	Az kaba yüzler <1 mm açıklıklı eklemli yumuşak kaya	Sürtünme izli yüzeyler veya fay kili <5mm veya 1-5mm açık eklemli sürekli eklemli	Yumuşak fay kili > 5 mm. kalınlık veya açık eklemli > 5mm. sürekli eklemli			
		Derecelendirme	25	20	12	6	0			
5	Yeraltı suyu	Tünelin ilk 10m. kısmından gelen su lt/dk	Yok	<25	25-125	> 125				
		Oran	Eklemlerde ki su basıncı	0	0.0-0.2	0.2-0.5	>0.5			
		Genel koşullar	Ana asal gerilme	Tamamen kuru		Yalnızca Nemli	Orta basınç altında su	Önemli su problemleri		
		Derecelendirme		10	7	4	0			



**Şekil 4.1** : RMR, tahkimatsız durma süresi ve açıklık arasındaki ilişki [13].

RMRsınıflama sisteminden yararlanılarak kaya yükü yüksekliği denklem 4.1'den faydalanılarak hesaplanır [12, 13, 16]. Bu ifadeye yer alan P tahkimat sistemine gelen basıncı ( $\text{kN/m}^2$ ),  $\gamma$ , kayacın birim hacim ağırlığını ( $\text{kN/m}^3$ ) ve B tünelin genişliğini (m) göstermektedir. Burada verilen SR parametresi gerilim faktörü olup yatay gerilmenin düşey gerilmeye oranı olarak tanımlanmıştır.

$$P = \left( \frac{100 - RMR}{100} \right) \cdot \gamma \cdot B \cdot S_R \quad (4.1)$$

RMR sınıflama sistemine bağlı olarak, 10 m açıklıklı at nalı tipi yeraltı kaya tünellerinde, kazı şekli ve sağlamlaştırma esaslarına ilişkin tablo Çizelge 4.7'de verilmektedir.

**Çizelge 4.7 : RMR'a bağlı olarak tünellerde tahkimat ve kazı [13]**

Kaya Kütle Sınıfı	Kazı	Tahkimat		
		Kaya Saplama	Püskürtme Beton	Çelik Bağlar
Çok iyi kaya	Tam cepheli, 3 m ilerleme	Genellikle rassal kaya saplama ve püskürtme dışında başka bir tahkimata gereksinim duymaz		
İyi kaya	Tam cepheli, 1,0-1,5 m ilerleme, Aynaya 20 m mesafede tam tahkimat	Tavan kemerinin 3 m gerisine 2,5 m aralıklarla tel örgü ile birlikte kaya saplama uygulanır	Gerektiğinde tavana 50 mm kalınlığında beton püskürtülür	Yok
Orta kaya	Tavan ve tabandan ilerleme, tavandan 1,5-3 m ilerleme, tam tahkimat aynaya 10 m mesafede tam tahkimat.	4 m uzunluğunda 1,5-2 m aralığında sistematik kaya saplama yerleştirilir ve tel örgü kullanılır	Tavana 50-100 mm duvarlara 30 mm kalınlığında	Yok
Zayıf kaya	Tavan ve tabandan ilerleme, tavandan 1,0-1,5 m ilerleme, tam tahkimat aynaya 10 m mesafede kazı ile uyumlu olarak yerleştirilmeli	4-5 m uzunluğunda 1-1,5 aralıklarla sistematik saplama tavan ve duvarlara uygulanır yapılır. Tel örgü kullanılır.	100-150 mm tavanda 100 mm duvarda	Gerekli yerlere 1,5 m aralıklarla hafif orta profiller
Çok zayıf kaya	Tavan ve taban birlikte kazılır ve tavanda 0,5-1 m ilerleme sağlanır. Kazıyı müteakiben destek yerleştirilir ve derhal püskürtme beton uygulaması yapılır.	5-6 m uzunluğunda sistematik kaya bulonları tavan ve duvarda 1-1,5 m aralıklarla uygulanır ve tel örgü ile birlikte kullanılır.	150-200 mm tavanda 150 mm duvarda ve 50 mm aynada püskürtme yapılır.	Orta ağır profiller 0,75 m aralıklar ile birlikte yerleştirilir.

#### 4.1.2 Q sınıflandırma sistemi

Q veya NGI (Norveç jeoteknik Enstitüsü) sistemi olarak adlandırılan sistem, 1970'lerde Barton ve arkadaşları tarafından tünel tahkimatı için geliştirilmiştir. Kaya tünellilik kalitesi olarak da adlandırılan yaygın adıyla Q sistemi kayanın 6 farklı parametresi kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu hesaplama eşitlik 4.2 ile yapılmaktadır.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (4.2)$$

Bu bağlamda;

RQD: Kaya kalitesi,

$J_n$ : Eklem takım sayısı,

$J_r$ : Eklem pürüzlülük sayısı,

$J_a$ : Eklem alterasyon sayısı,

$J_w$ : Eklem suyu indirgeme sayısı,

SRF: Gerilme indirgeme faktörüdür.

Hesaplanan Q değeri yardımı ile kaya sınıflamasına ek olarak yer altı mühendislik yapılarında kullanılacak destekleme tipleri konusunda öneriler yapılabilmektedir. Bu sistem önceden yapılmış olan 1000'den fazla tünele ait veriler ışığında değerlendirilerek geliştirilmiştir. Olası Q değerlerinin aralığı (0.001 – 1000) çok sıkışabilir ortamdan, eklemsiz sağlam kayaya kadar olan kaya niteliği tanımlarını kapsar.

Eklem takımlarının sayısını belirleyen  $J_n$  parametresi genellikle yapraklanma, şistozite ve tabakalanma tarafından etkilenir. Bunların belirgin şekilde birbirine paralel olarak gelişenleri bir eklem takımı olarak kabul edilmelidir. Fakat karotlarda bu özelliklerinden dolayı yer yer çatlaklar veya az sayıda eklemler var ise bunlar, gelişigüzel eklemler olarak değerlendirilmelidir. Q sınıflama sisteminde eklem takım sayısı ( $J_n$ ) değeri puanlaması Çizelge 4.8'de verilmiştir. Eklem pürüzlülük sayısı ( $J_r$ ) puanlaması Çizelge 4.9'da verilmiştir.

**Çizelge 4.8 :** Eklem takım sayısı ( $J_n$ ) [17].

Tanım	Değerlendirme	Not
Masif, eklem çok az veya hiç yok	0.5-1	
Bir eklem takımı	2	i-Kesişme olan
Bir eklem takımı ve gelişigüzel eklemler	3	tüneller için
İki eklem takımı	4	$3J_n$ değeri
İki eklem takımı ve gelişigüzel eklemler	6	kullanılır.
Üç eklem takımı	9	ii-Giriş ve çıkış
Üç eklem takımı ve gelişigüzel eklemler	12	portallarında
Dört veya daha fazla eklem takımı, gelişigüzel çok sayıda eklemler, küp şeker görünümünde	15	( $2xJ_n$ ) kullanılmamalıdır.
Parçalanmış kaya, toprak görünümünde	20	

**Çizelge 4.9 :** Eklem pürüzlülük sayısı ( $J_r$ ) [17].

Tanım	Değerlendirme	Not
a) Kaya duvar dokanağı		
b) 10 cm'lik kesmeden önce duvar dokanağı		
Süreksiz eklemler	4	* ilgili eklem
Pürüzlü ya da düzensiz dalgalı	3	takımlarının ortalama
Düz, dalgalı	2	ara mesafesi 3
Kaygan dalgalı	1.5	metreden büyük ise
Pürüzlü veya düzensiz düzlemsel	1.5	1.0 ilave edilir.
Düz, düzlemsel	1	* lineasyon içeren
Kaygan düzlemsel	0.5	düzlemsel fay aynalı
c) Kesmeden sonra kaya duvar dokanağı yok		eklemler için,
Kaya duvar kontakını önleyebilecek kalınlıktaki kil mineralleri içeren zon	1	lineasyonların uygun
Kaya duvar kontakını önleyebilecek kalınlıktaki kumlu, çakıllı, ezilmiş zon	1	olması koşulu ile
		$J_r=0.5$ alınabilir.

Eklem alterasyon sayısı ( $J_a$ ) puanlaması Çizelge 4.10'da verilmiştir.

**Çizelge 4.10** : Eklem alterasyon sayısı ( $J_a$ ) [17].

Tanım	Değerlendirme		Not
	Değer	$\phi_r$	
Kaya duvar kontağı	0.75	-	$\phi_r$ değerleri, mevcut ise alterasyon ürünlerinin mineralojik özellikleri yaklaşık olarak göstermek için verilmiştir.
Sıkıca bağlanmış, sert, yumuşamaz geçirimsiz dolgu	1	25-35	
Altere olmamış eklem yüzeyleri, yumuşamayan mineral kaplamaları	2	25-35	
Hafif altere olmuş eklem yüzeyleri, yumuşamayan mineral kaplamaları	3	20-25	
Siltli veya kumlu kil kaplamaları, düşük kil oranı (yumuşamayan)	4	8-16	
Yumuşamayan veya düşük sürtünmeli kil mineral kaplamalı Ayrıca az miktarda şişen killer (1-2mm) veya daha az kalınlıkta kesikli kaplamalar	4	25-30	
Kum taneleri, kil içermeyen kaya parçaları	6	16-24	
Aşırı konsolide olmuş yumuşamayan kil mineral dolguları (kesiksiz, kalınlık 5mm'den az)	8	12-16	
Orta ve yüksek derecede konsolide olmuş, yumuşamayan kil mineral dolgulu (kesiksiz, kalınlık 5mm'den az)	8-12	6-12	
Şişen kil dolgulu (kesiksiz, kalınlık 5mm'den az)	-	-	
Kaya duvar kontağı yok	6,8	-	
Dağılmış veya ezilmiş kaya kil zonları veya bantları	veya 12	6-24	
Siltli veya kumlu kil zonları veya bantları, küçük kil par.	5	-	
Sürekli, kalın kil zonları veya bantları	10,13-20	6,24	

Q sınıflama sisteminde eklem suyu indirgeme faktörü ( $J_w$ ) puanlaması Çizelge 4.11'de verilmiştir.

**Çizelge 4.11** : Eklem suyu indirgeme faktörü ( $J_w$ ) [17].

Tanım	Değerlendirme		Not
	Değer	Su basıncı	
Kuru kazılar veya su gelişi 5 lt/dk'dan az	1	<1	Drenaj yapıldığında $J_w$ artırılmalıdır
Orta dereceli su gelişi veya basıncı, genellikle eklem dolgularının yıkanması (5 lt/dk yerel)	0.66	1-1.25	
Dolgunsuz, dayanımlı ve eklemli kayada çok su gelişi veya yüksek su basıncı	0.5	2.5-10	
Çok miktarda su gelişi veya yüksek su basıncı ile eklem dolgularının fazlaca yıkanması	0.33	2.5-10	
Patlatma ile çok fazla su gelişi, zamanla azalma	0.2-0.1	<10	
Zamanla azalmayan çok fazla su gelişi veya basıncı	0.1-0.05	>10	

Q sınıflandırma sisteminde gerilme indirgeme faktörü (SRF) değeri puanlaması Çizelge 4.12’de verilmiştir.

**Çizelge 4.12 : Gerilme indirgeme faktörü (SRF) [17].**

Tanım	Değerl.	Not
a) kazıyı kesen ve tünel kazılırken kaya kütlelerinin gevşemesine neden olabilecek zayıflık zonları		
Kil veya kimyasal olarak ayrılmış kaya kapsayan birden fazla zayıflık zonu, çevre kaya çok gevşek (herhangi bir derinlikte)	10	
Kil ve kimyasal olarak ayrılmış kaya kapsayan tek bir zayıflık zonu (kazı derinliği <50m)	5	
Kil ve kimyasal olarak ayrılmış kaya kapsayan tek bir zayıflık zonu (kazı derinliği >50m)	2.5	
Sağlam kayada çoklu makaslama zonları kil yok çevre kaya çok gevşek (kazı derinliği <50m)	7.5	* Kazıyı etkileyen fakat kesmeyen zayıflık zonu var ise SRF değerlerini %25-50 azaltınız.
Sağlam kayada çoklu makaslama zonları kil yok çevre kaya çok gevşek (kazı derinliği >50m)	5	* kazı derinliğinin kazı genişliğinden az olduğu durumlarda SRF’yi 2.5’ten 5’e çıkartınız.
Sağlam kayada çoklu makaslama zonları kil yok (kazı derinliği >50m)	2.5	
Gevşek, açık eklemeler, çok fazla eklemeli veya küp şeker görünümlü (herhangi bir derinlikte)	5	
b) Sağlam kaya gerilme problemleri	$\sigma_v/\sigma_1$	$\sigma_1/\sigma_1$
Yüzeyle yakın düşük gerilme	2.5	
Orta gerilme	1	
Yüksek gerilme (çok sıkı gerilme)	0.5-2	
Orta şid. (masif) kaya patlaması	5-10	
Yüksek şid. (masif) kaya patlaması	10-20	
c) Sıkışan kaya, yüksek basınç altında sağlam olmayan kayanın plastic akışı		
Orta miktarda sıkışan kaya basıncı	5-10	
Yüksek miktarda sıkışan kaya basıncı	10-20	
d) Şişen kaya; suyun varlığına bağlı kimyasal şişme		
Orta miktarda şişen kaya basıncı	5-10	
Yüksek miktarda şişen kaya basıncı	10-15	

Yer altı açıklıklarının duyarlılığı ve tahkimat gereksinimleri için, Q sınıflandırma sisteminde  $D_e$  adı verilen eşdeğer boyut parametresi kullanılmaktadır. Bu parametre denklem 4.3 yardımı ile hesaplanır. Denklemdaki ESR değeri yer altı açıklığının duraylı kalabilmesi için gerekli olan bir güvenlik katsayısıdır [13]. Barton ve arkadaşların tarafından 1974 yılında geliştirilen ve 1994 yılında güncellenmiş ESR değerleri Çizelge 4.13’de verilmiştir.

$$D_e = \frac{\text{Tünel çapı (m)}}{\text{Kazı destek oranı (ESR)}} \quad (4.3)$$

**Çizelge 4.13 : ESR değerleri [13].**

<b>Kazı Türü</b>	<b>ESR 1994</b>
Geçici maden kazıları	3 – 3,5
Uzun süreli kazılar, su tünelleri, pilot tüneller, geniş yer altı kazıları	2,5 – 2
Geniş yer altı depolama alanları, su arıtma tesisleri, küçük karayolu-demiryolu tünelleri yaklaşım tünelleri vb.	1,2 – 1,3
Santral binaları ana kara ve demiryolu tünelleri, sivil savunma sığınakları giriş çıkış ağızları, kesişme bölgeleri	0,9 – 1,1
Yeraltı nükleer santralleri, metro istasyonları, fabrikalar ve sosyal tesisler	0 – 0,8

Destek kategorilerinde bulon uzunlukları verilmemiştir. Bulon uzunlukları aşağıda belirtilen yöntemler ile belirlenebilir. 20mmçaplı boş cıvata için 10 tonluk aktif bir yük kabul edilirse, destek basıncı aşağıdaki gibidir.

$$P = 1/a^2 \quad (4.4)$$

P = Destek basınç kapasitesi (kg/cm<sup>2</sup>)

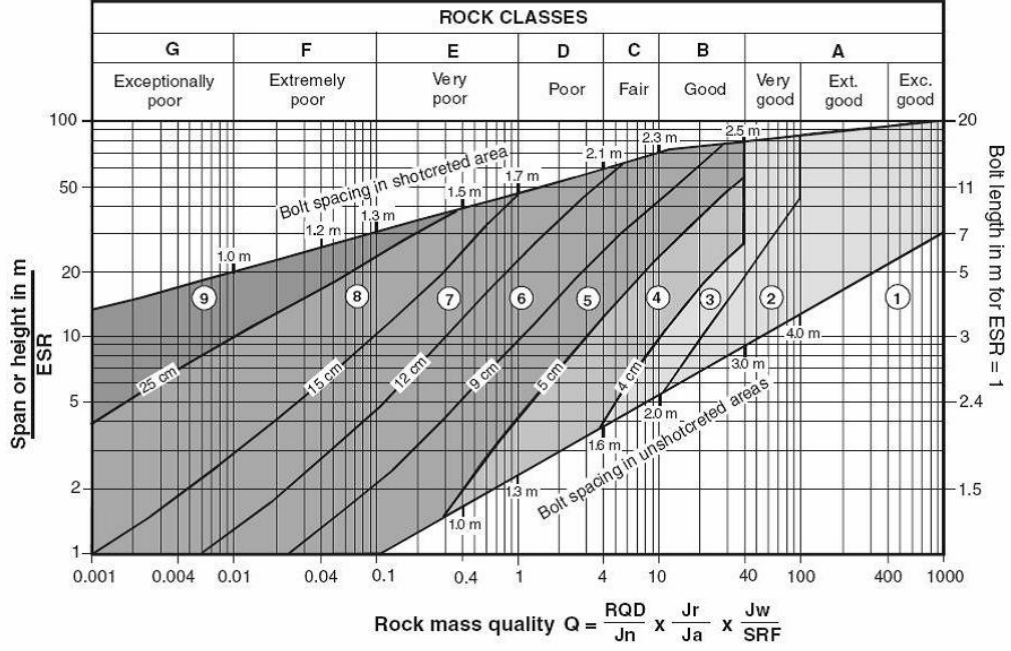
a = Bulon açıklığı (m)

Bulon ve ankraj uzunlukları kazı boyutlarına bağlıdır. Tavanda kullanılan bulonların uzunluğu genellikle kazı enine, duvarlarda kullanılan bulon uzunlukları ise kazı boyuna bağlıdır. Bulon uzunluğu / kazı eni oranı kazı eni arttıkça azalma eğilimi gösterir. Buna göre aşağıdaki eşitlikler, inşaat sırasında duruma göre değiştirilebilme kaydıyla önerilir [7].

$$\text{Tavan; Bulon } L = 2 + 0.15B/ESR \quad (4.5)$$

$$\text{Duvarlar; Bulon } L = 2 + 0.15H/ESR \quad (4.6)$$

Bu ifadede L uzunluk (m), B kazı eni (m), H kazı yüksekliği (m), ESR kazı destek oranıdır. Şekil 4.2’de eş boyut ve Q değerlerine bağlı destek kategorileri abağı görülmektedir [18].



**REINFORCEMENT CATEGORIES:**

- |   |   |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Unsupported</li> <li>2) Spot bolting</li> <li>3) Systematic bolting</li> <li>4) Systematic bolting, (and unreinforced shotcrete, 4 - 10 cm)</li> <li>5) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 5 - 9 cm</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>6) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 9 - 12 cm</li> <li>7) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 12 - 15 cm</li> <li>8) Fibre reinforced shotcrete, &gt; 15 cm, reinforced ribs of shotcrete and bolting</li> <li>9) Cast concrete lining</li> </ol> |
|---|---|

**Şekil 4.2 :** Eş açıklık ve Q değerlerine bağlı destek kategorileri [18].

Şekil 4.2’de tahkimat bölgeleri 1’den 9’a kadar numaralandırılmışlardır. Bu numaralara karşılık gelen tahkimat tipleri aşağıda verilmiştir.

- 1) Tahkimat gerekmez
- 2) Noktasal kaya bulonu
- 3) Sistematik kaya bulonu
- 4) Sistematik kaya bulonu ve 4-10 cm kalınlığında donatısız püskürtme beton
- 5) Fiber katkıli püskürtme beton 5-9 cm kalınlığında ve kaya bulonu
- 6) Fiber katkıli püskürtme beton 9-12 cm kalınlığında ve kaya bulonu
- 7) Fiber katkıli püskürtme beton 12-15 cm kalınlığında ve kaya bulonu
- 8) Donatılı püskürtme beton >12 cm ve kaya bulonu
- 9) Yerinde dökme beton kaplama

## 4.2 Kaya Kütle Parametreleri

Güvenli tünel tasarımı için kaya kütle parametrelerinin en önemlileri kaya deformasyon modülü ( $E_{mass}$ ), kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı ( $\sigma_{mass}$ ) ve Hoek-Brown sabitleridir.

Güzerghah boyunca çeşitli kaya kütlelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri, porozite, birim hacim ağırlık, tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı ve kesme dayanımı parametreleri (c ve f) laboratuvar testleri ile bulunmuştur. Formasyonlara ait sonuçlar sonraki bölümde detaylı olarak hesaplanmış ve incelenmiştir.

### 4.2.1 Kaya kütle dayanımı

Güvenli yer altı yapıları ve tünel tasarımları için kaya kütle davranışı ve yenilme mekanizmasının anlaşılması önemlidir. Bununla beraber kaya kütle özelliklerinin tahmini açılmış boşlukların stabilizasyonu için gereklidir. Kaya özelliklerinde anizotropiye neden olan zayıf tabakaların varlığı bu tahmini zorlaştırır.

Ana amaç kaya kütlelerinin dayanım ve deformasyon niteliklerinin tahmin edilerek güvenli tasarım için tahkimat gerekliliklerinin sağlanmasıdır.

Buna göre aşağıdaki eşitlikler yardımı ile ( $\sigma_{mass}$ ) değerleri hesaplanmıştır.

Bhasin ve Grimstad'ın önerdiği ( $\sigma_{ci} > 100 \text{MPa}$  ve  $Q > 10$ ) olması durumunda kullanılacak eşitlik [19];

$$\sigma_{mass} = \left(\frac{\sigma_{ci}}{100}\right) 7\gamma Q^{\frac{1}{3}} \text{MPa} \quad [19] \quad (4.7)$$

Bu ifadeye  $\gamma$  kaya kütlelerinin birim hacim ağırlığı ( $t/m^3$ ) alınmıştır.

Singh vd. denklemini  $Q < 10$  değeri için revize etmiştir [20];

$$\sigma_{mass} = 7\gamma x Q^{\frac{1}{3}} \text{MPa} \quad [20] \quad (4.8)$$

Trueman, ( $\sigma_{mass}$ ) değerini RMR puanını kullanarak aşağıdaki gibi hesaplamıştır.

$$\sigma_{mass} = 0.5e^{0.06RMR} \text{MPa} \quad [21] \quad (4.9)$$

Barton, Q değerlerini normalize ederek kaya kütle dayanımı aşağıdaki gibi ortaya koymuştur. Birim hacim ağırlığı  $t/m^3$  tür [22];

$$\sigma_{mass} = 5\gamma \left(Q \frac{\sigma_c}{100}\right)^{\frac{1}{3}} \text{MPa} \quad [22] \quad (4.10)$$

#### 4.2.2 Kaya patlama olgusu

Kaya patlaması, özellikle derin kotlarda çalışan ( $h > 600\text{m}$ ) madenler ile özel amaçlı açılan yer altı açıklıklarında (yeraltı depoları ve elektrik santralleri gibi) sert kristalin kayalarda görülmesine rağmen, sığ tünellerde ve az kırılğan kayalarda da gözlenebilmektedir.

Kaya patlaması genellikle; gnays, kuvarsit, volkanik kayalar ve silisli kumtaşı gibi sert kayaların şiddetli kırılğan (gevrek) yenilmesi ile ilişkilidir. Kaya patlaması uzun süredir madencilikte iyi bilinen bir duraysızlık olgusudur. Sert kayaların tek eksenli basınç dayanımı deneyi sırasında, kaya malzemesi dayanımının aşılması durumunda yenilen parçalar fırlayabilmektedir. Yenilme yüzeyi genellikle uzama birim deformasyonu ile ilişkilidir. Yeraltı kazılarında kaya patlaması laboratuvar koşullarına oldukça benzer olup kaya parçaları çevre kayadan kopmakta ve şarapnel parçaları gibi şiddetli bir şekilde açıklığa doğru fırlamaktadır. Kaya patlamasının en düşük derecesi çevre kayacın kavlaklanıp dökülmesi şeklinde olmaktadır [23].

Tek eksenli basınç dayanımı ( $\sigma_c$ ) ile maksimum teğetsel gerilme ( $\delta_\theta$ ) oranına göre karşılaştırmalı kaya patlama olgusunun incelendiği Çizelge 4.14 aşağıda verilmiştir.

**Çizelge 4.14 :  $\sigma_c / \delta_\theta$  Değeri.**

Russenenes (1974)	Hoek ve Brown (1980)	Grimstad ve Barton (1993)	Palmstrom (1996)	Açıklama
		>100		Yüzeye yakın, düşük gerilim, açık eklemler
>4	>7	100-3	>2.5	Dökülme yok / Duraylı / Orta gerilme gerilme koşulları / Stabilitiyi düşüren gerilme yok
4-3	7-3	3-2	2.5-1	Düşük Dökülme / Önemsiz Dökülme / Yüksek gerilim, çok esnek yapı / Yüksek gerilim hafif çözülme
3-1.5	3-1.7	2-1.5	1-0.5	Orta Dökülme / Şiddetli Dökülme / 1 saat sonra orta kavlaklanma / hafif kaya patlaması veya dökülmesi
<1.5	1.7-1.4	1	<0.5	Yüksek Dökülme / ağır tahkimat gerekir / kavlaklanma ve kaya patlaması / Kuvvetli kaya patlaması
-	<1.4	<1		Kuvvetli kaya patlaması / Şiddetli kaya patlaması

Formasyonlara ve incelenen bölgelere ait hesaplamalar bölüm 6.1' de yapılmış ve değerlendirilmiştir.

#### 4.2.3 Ezilme olgusunun incelenmesi

Kaya ezilmesi, gerilme yoğunluğu ve malzeme özelliklerine bağlı olarak tünel etrafında oluşan büyük deformasyon sürecidir ve yer altı kazılarında kaya davranışının ön görülebilmesi için büyük bir faktördür. Bu olgu genellikle yüksek basınç altındaki zayıf kayalarda meydana gelir. Ezilme olgusu özellikle tek eksenli basınç dayanımının 20 MPa değerinin altında olduğu ortamlarda araştırılmalıdır. Ezilmenin bir sonucu olarak, zayıf kayalarda açılan yer altı boşlukları ve tünellerin etrafında büyük deformasyonlar meydana gelir.

Büyük deformasyonlar, düşük kayma mukavemeti ve yüksek yerinde gerilmeler, tünel ayna ve duvarlarında stabilite ve konverjans üzerindeki en büyük faktörlerdir.

Tünel konverjansının büyüklüğü, tünel çevresindeki deformasyon oranı ve akma bölgesi kapsamı kaya kütle özelliklerine ve tünel çevresindeki kritik zona bağlıdır.

Genellikle kaya tipi, kaya kütle dayanımı, zemin suyu akışı, gözenek basıncı, gerilme durumu ve tahkimat teknikleri ezilme olgusunun en etkili ve önemli faktörleridir.

Buna göre Singh vd. (1992) Kaya kütle kalitesi(Q) değeri ve Katman derinliğini (H) (m) kullanarak aşağıdaki denklemi tanımlamıştır [24].

$$H = 350Q^{\frac{1}{3}} \text{ (m)} [24] \quad (4.11)$$

Goel vd. (1995)  $Q_n$ 'i kullanarak basit bir ampirik yaklaşım önermiştir. Eşitliğin sol tarafı sağ tarafından büyük ise ezilme gerçekleşir [25].

$$H = (275xQ_n^{0.33})B^{-0.1} \text{ (m)} [25] \quad (4.12)$$

Burada üst örtü derinliği H (m), tünel genişliği B (m),  $Q_n$  kaya kütle numarasıdır. Eğer eşitliğin sağ tarafı sol tarafından büyük veya eşit ise ezilme gerçekleşir.

ISRM'ye göre ezilmenin derecesi maksimum teğetsel gerilmenin ( $\sigma_\theta$ ) kaya kütle dayanımına ( $\sigma_{mass}$ ) oranı ile elde edilebilir [26].

$$\frac{\sigma_\theta}{\sigma_{mass}} [26] \quad (4.13)$$

Teğetsel gerilme ( $\sigma_\theta$ ) (MPa), Kaya kütle dayanımı ( $\sigma_{mass}$ ) MPa. ( $\sigma_\theta$ 'nın 1'den küçük olduğu durumlarda ezilme şartları oluşmaz.

Jethwa vd. (1984) ezilme derecesini tanımlamak için kaya kütleinin tek eksenli basınç dayanımı ve üst örtü derinliği ile kaya kütleinin yoğunluğunu kullanarak aşağıdaki eşitliği önermiştir [27].

$$N_c = \frac{\sigma_{cm}}{\gamma x H} [27] \quad (4.14)$$

Farklı yaklaşımlara göre yapılan kaya ezilme davranışı sınıflandırması Çizelge 4.15'te verilmiştir. (D) tünel çapı (m).

**Çizelge 4.15** : Ezilme davranışı sınıflaması [24,26,27].

<b>Eşitlik Numarası</b>	<b>4.11</b>	<b>4.13</b>	<b>4.14</b>
Ezilme yok	-	<1	>2
Hafif ezilme	(1% -3%) D	1-2	0.8-2
Orta ezilme	(3%-5%) D	2-4	0.4-0.8
Aşırı ezilme	(>5%) D	>4	<0.4



## 5. FORMASYONLARIN JEOTEKNİK ÖZELLİKLERİ ve ARAZİ GERİLMELERİ

### 5.1 Kayaç Malzemelerin ve Kaya Kütlelerinin Çalışma kapsamında İncelenen Mekanik ve Fiziksel Özellikleri

Güzergâh üzerindeki formasyonlarda, birim hacim ağırlığı ( $\gamma$ ), kaya kalite tanımı (RQD), jeolojik dayanım indeksi (GSI), tek eksenli basınç dayanımı (UCS), sağlam kayaçların ( $E_m$ ), ve kaya külesinin ( $E_r$ ), elastisite modülü, kohezyon ( $c$ ), içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ), poisson oranı ( $\nu$ ) jeoteknik parametreler olarak laboratuvar çalışmaları ve saha etütleri ile saptanmıştır. İncelenen aralıklara ait mekanik ve fiziksel özellikler formasyonlara ve bölgelere ayrılarak verilmiştir.

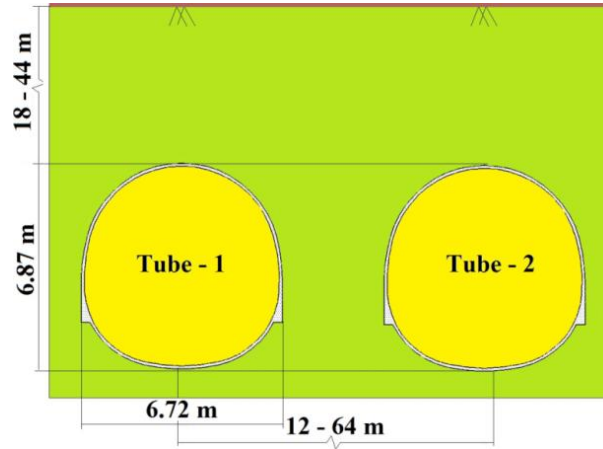
### 5.2 Çalışma Güzergâhının Tanımlanması

Proje 2 ana hattın (hat-1 ve hat-2), şaftlardan, yaklaşım, makas ve bağlantı tünellerinden oluşmaktadır. Bu yer altı yapılarının detayları Çizelge 5.1'de verilmektedir.

**Çizelge 5.1 : Tünel tipleri ve uzunlukları.**

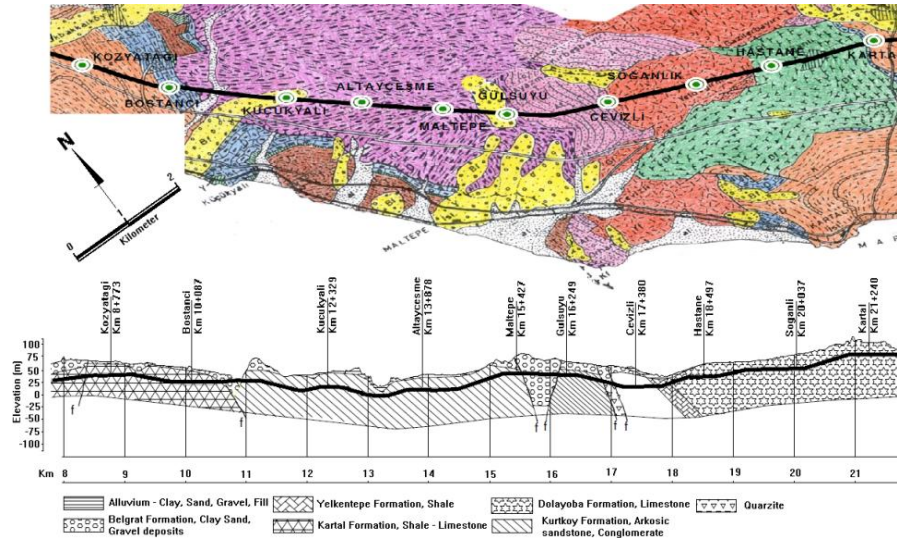
İnşaat Yöntemi	Yapı Tipi	Genişlik (m)	Yükseklik (m)	Uzunluk (m)
NATM	Şaft	11.60	11.60	833
	Yaklaşım Tüneli	6.00	6.95	1,292
	Hat – 1	5.62	5.51	19,139
	Hat – 2	5.62	5.51	9,533
	İstasyon	9.24	6.96	7,993
	Makas Tüneli	16.35	8.84	3,181
	Bağlantı Tüneli	-	-	10,685
TBM	Hat – 1 / Hat – 2	5.70	5.70	13,020
<b>Toplam Tünel Uzunluğu (m)</b>				<b>56,100</b>

Üst örtü malzemesinin kalınlığı topolojik çeşitliliğe göre 18 ile 44 m. arasında değişmektedir.



Şekil 5.1 : Ana Hat Tünelleri Şematik Gösterimi.

Bu çalışmada NATM ile kazılan 8+000 ile 21+000 km'leri arasında odaklanmıştır. Bu 13 km'lik tüneldeki ana jeolojik formasyonlar Kartal, Kurtköy ve Dolayoba formasyonlarıdır. Aydos ve Gözdağı formasyonları da bu 13 km'lik zona dâhildir. Jeolojik kesitler Şekil 5.2'de gösterilmiş ve bu jeolojik formasyonların açıklamaları aşağıda verilmiştir [28].



Şekil 5.2 : Güzergahın gösterimi [28].

Kartal 0+003,50 km'den 0+011,75 km'ye kadar en uzun formasyondur ve karbonatlı çamurtaşı ve kireçtaşıdan oluşur. Jeolojik araştırmalara göre, formasyon zayıf ve orta olarak sınıflandırılmıştır. 0+011,25 ile 0+016,20 km'leri arasındaki Kurtköy formasyonu çakıllı kumtaşı, kumtaşı ve çamurtaşı olarak sınıflandırılır. Bu formasyon da zayıf ve orta olarak sınıflandırılmıştır. Aydos 0+016,40 km ile 0+017,50 km'leri arasında bulunur, en kısa formasyondur ve çok güçlü kuvarsitten

oluşur. Kaya malzemesi yüksek dayanım indeksine sahip olmasına rağmen, kaya kütlesi, süreksizliklere bağlı olarak zayıf ve orta şeklinde sınıflandırılır. Dolayoba formasyonu, zayıf ve orta olarak sınıflandırılır, bazı yerlerde kil dolgululu sağlam kireçtaşından oluşur ve 0+017,50 km'den projenin sonuna kadar devam eder. Formasyondaki karstik boşluklar yeraltı açıklıklarının kazılmasında ve desteklenmesinde sorunlara neden olmuştur. Gözdağı formasyonunun litolojisi laminalı şeyller ile onlar üzerinde kuvarsit mercekli şeyllerden oluşur. Özellikle 0+017,60 km ile 0+017,86 km'ler arasında yer alır. Sadece laminalı şeyller (kuvarsit hariç) bu formasyonun kazısı sırasında bulunmuştur. Bu formasyon tektonik deformasyonlarla oldukça yıpranmıştır; bazı yerlerde, şeyl koyu kahverengi kile dönüşmüştür[29].Bu formasyonların jeoteknik özellikleri Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3'te her jeolojik formasyondan alınan RMR ve GSI değerleri ile özetlenmiştir [30, 31].

**Çizelge 5.2 : Kaya kütle özellikleri – 1 [30, 31].**

Formasyon	UCS (MPa)	RQD (%)	Aralık (mm)	Pürüzlülük	Açıklık	Su Durumu	Düzeltilme	RMR Min/Mak	Kaya Kütle Sınıfı
Kartal	10-70	40-100	100-600	Az pürüzlü	Dar	Nemli /Islak	Değişken /-10	22 / 57	Zayıf /Orta
Kurtköy	25-80	50-100	100-1000	Pürüzlü	Dar	Kuru /Islak	Paralel /-12 -10	37 / 69	Zayıf /Orta
Aydos	50-100	0-80	100-300	Pürüzlü	Dar	Nemli /Islak	Paralel /-12 -10	27 / 56	Zayıf /Orta
Dolayoba	25-70	60-100	200-600	Düz	Dar	Kuru /Islak	Paralel /-12 -10	42 / 72	Zayıf /Orta

**Çizelge 5.3 : Kaya kütle özellikleri ve değerleri [30, 31].**

Formasyon	GSI			Kaya Sınıfı (Min. / Mak.)
	Minimum	Maksimum	Ortalama	
Trakya	5	57	26	I-II
Kartal- 1	5	61	29	I-II
Kartal - 2	10	85	55	II-III
Kurtköy	10	88	50	II-III
Aydos	10	88	50	SZ. III
Dolayoba	33	80	58	III

### 5.3 Formasyonları Oluşturan Kayaç Malzemelerinin Mekanik Özellikleri

Çalışılan güzergâh üzerindeki formasyonların bölgeselleştirilmiş özellikleri aşağıdaki çizelgeler ile açıklanmıştır. Bu çizelgelerdeki bilgiler laboratuvar ve saha çalışmalarından toplanmış olup kaya kütle sınıflamaları ve tahkimat tasarımı için gerekli parametreleri sağlamıştır.

13 km. uzunluğundaki hat 9 ayrı bölümde incelenmiştir. Aynı formasyonda birden fazla çalışma bölgesi seçilmesinin sebebi farklı fiziksel özelliklere sahip bölgelerin mevcut olmasıdır. Çalışma yapılan bölgeler için Çizelgeler ekler bölümünde verilmiştir.

**Çizelge 5.4 : Çalışma yapılan bölgeler.**

Bölge No.	Bölge Adı	İncelenen Km.
1	Kozyatağı İstasyonu	9+500
2	M19-M24 & Bostancı İstasyonu	10+500
3	Küçükyalı İstasyonu	12+500
4	M25-M30 Makası	13+400
5	Maltepe İstasyonu	14+200
6	Huzurevi İstasyonu	15+100
7	M31-M34 Makası & Gülsuyu İstasyonu	16+100
8	Hastane İstasyonu	18+600
9	M35-M40 Makası - Kartal İstasyonu	20+500

Önceki bölümde tanıtilen formasyonların bir alt basamağı olan bölgeselleştirilmiş kaya kütle özelliklerinden hareketle hesaplanan RMR ve Q değerleri bu bölümde verilecektir. Bu çalışma ayna raporları ve saha gözlemleri dikkate alınarak yapılmıştır. Kozyatağı istasyonu bölgesine ait bilgiler Çizelge 5.5 ve 5.6'da diğer bölgelere ait bilgiler ise ekler bölümünde verilmiştir.

**Çizelge 5.5 : Kozyatağı istasyon bölgesi Q puanlaması.**

Parametre	Açıklama	Puan	Q Değeri
RQD	Orta	60	
Jn	İki çatlak takımı	4	
Jr	Parlak, Dalgalı	1,5	
Ja	Siltli veya kumlu kil kaplaması, küçük kil parçaları var (yumuşak olmayan)	3	1,980
Jw	Orta akış veya basınç, arada bir çatlak dolgularının yıkanması söz konusudur.	0,66	
SRF	Düşük Gerilme Yüzeye Yakın	2,5	

**Çizelge 5.6 : Kozyatağı istasyon bölgesi RMR puanlaması [30].**

Parametre	Açıklama	Değer	Puan	RMR	Sınıfı
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	Deney Sonuçları	29,4	4	29	Zayıf Kaya
RQD (%)	Sondaj verileri	60	13		
Süreksizlik Aralığı	Sondaj raporları ve saha gözlemleri	60-200	8		
Süreksizlik Özelliği	Ayna raporları	Sürtünme İzli yüzeyler	10		
Yeraltı Suyu Koşulları	Az – Orta Etkili	Islak	4		
Süreksizlik Düzeltmesi	Saçılmış Süreksizlikler	Değişken	-10		

#### 5.4 Metro İnşaatında Jeoteknik ve Yapım Özelliklerinin Jeostatistiksel İncelemesi

Jeostatistik metodolojinin amacı, herhangi bir örneklenmemiş bölge için ReVs'nin büyüklüğünü bulmaktır. SV fonksiyonu, ReV'nin, Eşitlik 1'de belirlenmiş uzaklık ve büyüklükle olan bağımlı ölçmek için kullanılır; burada  $\gamma(h)$  semivariogram, N çiftlerin sayısı,  $Z(x)$  ReV'in büyüklüğü,  $Z(x+h)$   $Z(x)$  ten h kadar uzaklıkta olan ReV'nin büyüklüğü. Deneysel bir SV fonksiyonu aşağıda verilen eşitlikten elde edilebilir [32, 33].

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [Z_{(x+h)} - Z_{(x)}]^2 \quad (5.1)$$

Teorik SV fonksiyonunun deneysel SV fonksiyonuna uyması gereklidir ki bilinmeyen karakteristiklerin en iyi tarafsız tahminini sağlayan kriging matrisle tahmin edilmesi probleminde fonksiyon uygulanabilir olsun. Bir örneklenmemiş bölge Eşitlik 5.2 ile tahmin edilebilir; burada  $Z(x_0)$  örneklenmemiş sahanın büyüklüğü,  $Z(x_i)$  numune noktasının büyüklüğü ve  $w_i$  ağırlık katsayısıdır.

$$Z_{(x_0)} = \sum_{i=1}^m w_i Z_{(x_i)} \quad (5.2)$$

Yukarıdaki denklemdeki iki bilinmeyen parametrelili problemin çözümü Eşitlik 5.3'te verilen kriging matris kullanılarak yapılabilir. Bu kriging matris için gerekli olan veriler teorik SV'den elde edilir; burada  $\gamma_{ii}$  her örneklenmiş nokta arasındaki SV'nin değeridir,  $w_i$  istenilen noktadaki ağırlık katsayısıdır,  $\gamma_{vi}$  bilinmeyen nokta ve diğer noktalar arasındaki SV'nin değeridir ve  $\mu$  Lagrange parametresidir.

Aşağıdaki matrislerden  $w_i$ 'nin bulunması, örneklenmemiş bölgenin büyüklüğünü tahmin etmeyi olanaklı hale getirir.

$$\begin{pmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \cdot & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \cdot & \gamma_{2n} & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \cdot & \gamma_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & \cdot & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \cdot \\ w_n \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_{v1} \\ \gamma_{v2} \\ \cdot \\ \gamma_{vn} \\ 1 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \cdot \\ w_n \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_{v1} \\ \gamma_{v2} \\ \cdot \\ \gamma_{vn} \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \cdot & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \cdot & \gamma_{2n} & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \cdot & \gamma_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & \cdot & 1 & 0 \end{pmatrix}^{-1} \quad (5.3)$$

Cokriging tekniği, ikincil değişkenler olarak adlandırılan diğer ReVs'ler arasındaki korelasyon kadar, uzaysal ilişkiden birincil değişken olarak ReVs'nin büyüklüğünü bulmakta da kullanılabilir [34, 35]. Cokriging, özellikle birincil değişkenlerin az sayıda veri noktası olduğu durumlarda tahmin için elverişlidir [36]. Cokriging sisteminden türetilen adımlar aşağıda verilmiştir[37].

$$u_0^* = \sum_{i=1}^n a_i u_i + \sum_{j=1}^m b_j v_j \quad (5.4)$$

$u_0^*$  'ın tahmin edilen değer olduğu durumda,  $u_i$  ve  $v_j$  birincil ve ikincil değerler,  $a_i$  ve  $b_j$  ise cokriging ağırlıklarıdır (Eşitlik 5.4). Böyle bir sistemdeki hata, tahmin edilen ile gerçek değerler arasındaki farkı göstermek için kullanılabilir (Eşitlik 5.5).

$$R = U_0^* - U_0 = \sum_{i=1}^n a_i u_i + \sum_{j=1}^m b_j v_j - U_0 \quad (5.5)$$

Hatanın matris gösterimi Eşitlik 5.6'da gösterilmiştir; burada  $w^t$  cokriging ağırlıklarını ve  $Z$ 'de RVs ( $U_i, V_j$ )'yi gösterir.

$$R = w^t Z \quad (5.6)$$

Cokriging'de aynı zamanda iki önemli durum vardır: tarafsız varsayım (Eşitlik 5.7)

ve Lagrange çarpanının minimum hata varyansı ( $\mu$ ) (Eşitlik 5.8).

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1 \quad \sum_{j=1}^m b_j = 0 \quad (5.7)$$

$$Var\{R\} = w^t C_Z w + 2\mu_1 \left( \sum_{i=1}^n a_i - 1 \right) + 2\mu_2 \left( \sum_{j=1}^m b_j \right) \quad (5.8)$$

Denklemdaki her değişken için  $\text{Var}\{R\}$ 'ın kısmi türevi hesaplandıktan sonra, cokriging sistem aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n a_i \text{Cov}\{U_i U_j\} + \sum_{i=1}^n b_i \text{Cov}\{V_i V_j\} + \mu_1 &= \text{Cov}\{U_0 V_j\} \quad j = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{i=1}^n a_i \text{Cov}\{U_i V_j\} + \sum_{i=1}^n b_i \text{Cov}\{V_i V_j\} + \mu_2 &= \text{Cov}\{U_0 V_j\} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5.9) \\ \sum_{i=1}^n a_i &= 1 \quad \sum_{j=1}^m b_j = 0 \end{aligned}$$

Böyle bir cokriging hesaplama prosedürü izlenirken, ilk olarak izotropik ve kross semivariogramlar (CSVs) bulunur, sonra örneklenmiş ve örneklenmemiş noktalar için çalışma alanındaki birincil değişkenlerin dağılımının bulunması için bir cokriging haritası oluşturulur. Bu uygulamadaki en zor aşama, cross SV nin modellenmesidir. Eşitlik 5.10'da verilen Cauchy-Schwarz eşitsizliği cross SV nin kesin sonucunun bulunması için tanımlanmalıdır [38].

$$\sqrt{\gamma_{p(h)} \gamma_{s(h)}} \geq \gamma_{ps(h)} \quad (5.10)$$

Burada  $\gamma_p$  birincil değişkenin variogramı,  $\gamma_s$  ikincil değişkenin variogramı, ve  $\gamma_{ps}$  cross variogramdır.

#### 5.4.1 Jeostatistik uygulamalar

RQD, GSI, UCS, Em, Er ve AR'nin dağılımları, yeraltı açıklıklarının inşasının NATM ile yapıldığı, tünelin 8+000 ile 20+270 km'leri arasındaki kısımda jeostatistik metodolojilerle belirlenmiştir. Çizelge 5.7deki veriler jeoteknik çalışmalar ve saha raporlarıyla oluşturulmuştur [30, 31].

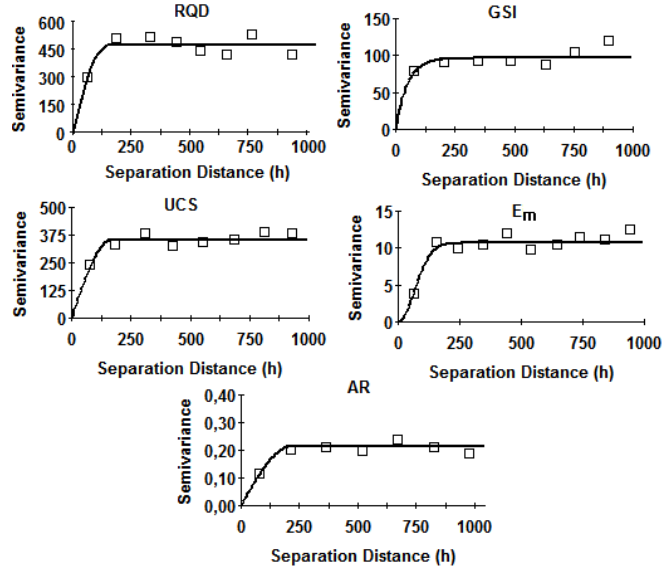
**Çizelge 5.7 : Jeoteknik veriler [30, 31].**

Yeri (Km)	RQD (%)	GSI	UCS (MPa)	Em (MPa)	Er (MPa)	AR (m/gün)	Yeri (Km)	RQD (%)	GSI	UCS (MPa)	Em (MPa)	Er (MPa)	AR (m/gün)
8+000	72.91	49.00	35.68	10700			15+590	16	25.00	31.30	4500		1.18
8+250	44.24	33.00	49.15	11250			15+650	4	13.00	26.10		189.00	0.92
8+500	58.54	46.00	49.89	6200			15+695	0					0.98
8+960	81.74	51.00	64.40	6600		1.82	15+825	61	32.00	20.90	6700		
9+160	60.32	36.00	60.70	8300		2.08	15+860			16.80		188.50	1.68
9+240	61.94	47.00	12.20	4100		2.56	15+980	10		12.70			1.26
9+530	62.93	36.00	10.80	5900		2.71	16+025			22.80		217.50	1.75
9+665	61.54	43.00	28.77	4100		0.80	16+145	54	36.00	28.80	6750		0.93
10+175	67.03	50.00	21.07	4700	170		16+165	0	10.00				1.72
10+370	48.66	31.00	63.40	14800			16+260	25		22.80		176.00	
10+540	50.93	42.00	25.93	7300	247.5	2.37	16+350	12	17.00				
10+720	75.00		36.73			1.71	16+360	20		29.00		246.50	
10+860	19.80	24.00	32.00	7300		0.75	16+455	20		27.00		226.00	0.63
10+870	58.00	46.00	45.90	10200		0.64	16+660	12	8.00				0.85
10+950	40.00	33.00	41.23	10200		1.25	16+870	30	35.00	40.50	7200		1.51
10+990	10.00	28.00	22.66	7300		1.09	17+030	13	32.00	55.30	8550		0.65
11+285	69.00	48.00	59.80	13100		1.18	17+200	28	47.00	70.10	9900		1.51
11+640	57.00	48.00	66.97	12000		2.25	17+410	57	47.00	105.60	18800		
11+980	55.00		66.90			1.35	17+510	10	58.00	75.50	14200		1.08
12+020	54.00	46.00	60.98	10700		1.95	17+660	87	55.00	45.95	11400		1.84
12+205	77.00	50.00	85.87	9400		1.62	17+900	70	46.00	43.40	8600	306.00	1.58
12+365	47.00	45.00	48.30	11750			17+930	20					0.92
12+565	44.00	39.00	61.17	13250		1.81	18+220	96	63.00	45.30	10100		1.90
12+805	80.00		26.73			2.00	18+330	84	49.00	47.20	11600		
12+980	27.00	42.00	37.97	14450	257.5	2.90	18+410	81	56.00	45.67	14600		
13+185	65.00	37.00	59.24	14450		2.50	18+670	82	50.00	40.62	19165		2.26
13+245	57.00	48.00	80.50	15650		1.53	18+870	66	49.00	34.30	12300		
13+410	14.00	36.00	47.67	10200	284	2.00	18+950	72	47.00	68.50	14794		
13+830	66.00	44.00	56.88	11300			19+270	43	32.00	27.38	10648		
14+180	15.00	38.00	23.98	9100		1.38	19+350	80		67.00			1.15
14+600	2.00	24.00	20.00	9100	214	1.95	19+500	66	52.00	63.40	13150		1.57
14+720	25.00		21.33			1.61	19+770	47	36.00	40.40	11642		
14+790	25.00	36.00	38.58	9100		1.91	19+950	83	57.00	63.10	18700		2.94
15+080	25.00		9.40			1.82	20+020	90		37.50			2.45
15+205	0.00						20+170	78	48.00	49.00	23764		2.76
15+300	40.00		27.40				20+610	49	33.00	30.88	19697		
15+440	66.00	43.00	80.05	11705		2.07	20+720	80		33.30			

UCS ile Er arasındaki iyi korelasyon kadar az veri de cokriging tekniğini uygulanabilir yapar. Jeoteknik parametrelerin kalanı normal kriging metodlarıyla bulunur.

#### 5.4.2 Semivariogram

Teorik SV fonksiyonları ilk olarak, RQD, GSI, UCS, Em ve AR (Şekil 5.3) için jeoteknik parametrelerin bölgenemesinden sonra bulunur. SV modeli, külçe etkisi (C0), eşik (C), etki alanı (a), and korelasyon katsayısı ( $r^2$ ) teorik SVs'lerden variogram parametreleri olarak belirlenir.  $r^2$ 'nin yüksek değerleri deneysel SVs'lerden alınan teorik modellerin güvenilirliğini yansıtmaktadır. Variogram çalışmalarının sonuçları Çizelge 5.8'de özetlenmiştir.

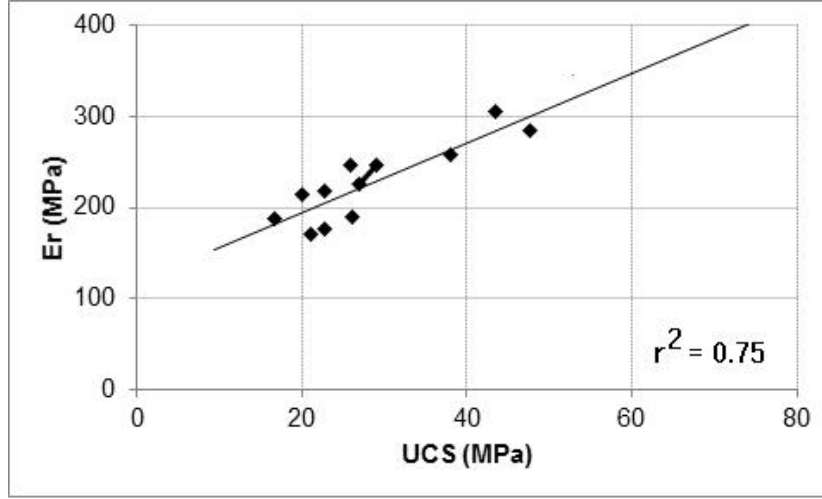


Şekil 5.3 : Semivariance.

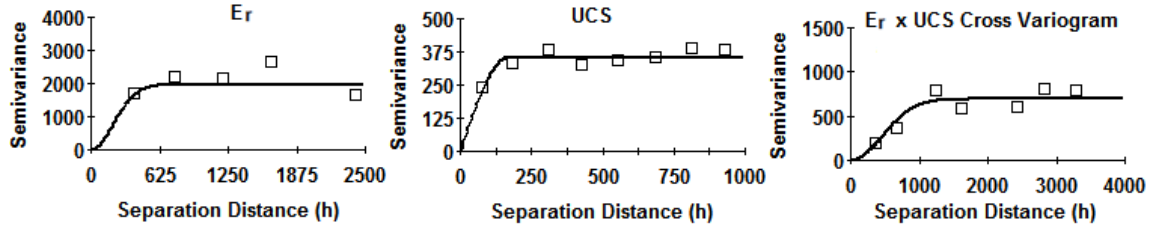
Çizelge 5.8 : Variogram parametreleri.

ReV	Model	$C_0$	$C_0+C$	$A_0$	$r^2$
RQD	Spherical	1	466.8	152	0.833
GSI	Exponential	0.1	96.4	49	0.812
UCS	Spherical	1	352.3	167	0.943
Em	Gaussian	0.01	10.66	94	0.876
AR	Spherical	0.0001	0.212	212	0.921

Bu sonuçlar gösteriyor ki, jeoteknik parametreler için bölgelerin etkisi 49 m ile 212 m arasında değişmektedir. Sonuçlara göre, kaya kütle parametresi küçük bir aralıkta değişmesine rağmen, inşa parametresi olarak AR geniş bir aralığı etkilemektedir. Er'nin noktasal tahmininin UCS ile ilişkisine bağlı olarak yapılabilmesi için SV ve Er'nin kross variogramında cokgriging kullanılmıştır. Şekil 5.4'de verilmiş olan, UCS ile Er arasındaki regresyon doğrusunun yüksek bir  $r^2$  değerinin olması, cokgriging uygulamalarını olanaklı kılar. Variogramlar Şekil 5.5'de, variogram parametreleri de Çizelge 5.9'de verilmiştir. Eşitlik 5.10'da verilen Cauchy-Schwarz eşitsizliği SVs ve cross variogramlardan alınan verilerle test edilir; sonuçlar yine cokgriging in uygulanabilirliğini destekler.



Şekil 5.4 : Er ve UCS arasındaki korelasyon.



Şekil 5.5 : SVs of Er ve UCS ve Er and UCS arasındaki cross variogram.

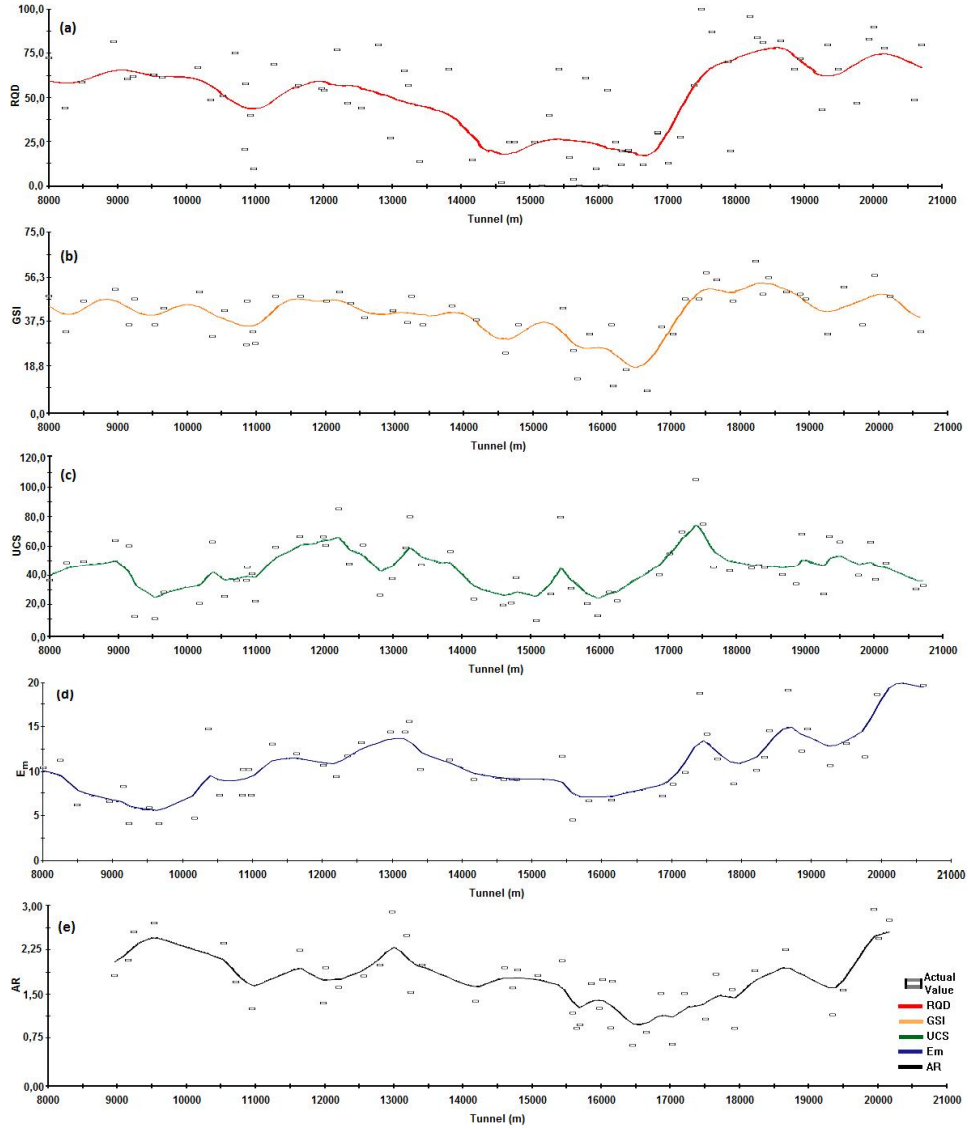
Çizelge 5.9 : Er ve UCS için SV ve cross semivariogram parametreleri.

Variogram Parametreleri	SV Er	Cross Var. Er & UCS
Model	Gaussian	Gaussian
$C_0$	1	1
$C_0+C$	1956	691
$A_0$	288	648
$r^2$	0.766	0.824

### 5.4.3 Kestirim Probleminin Çözümü

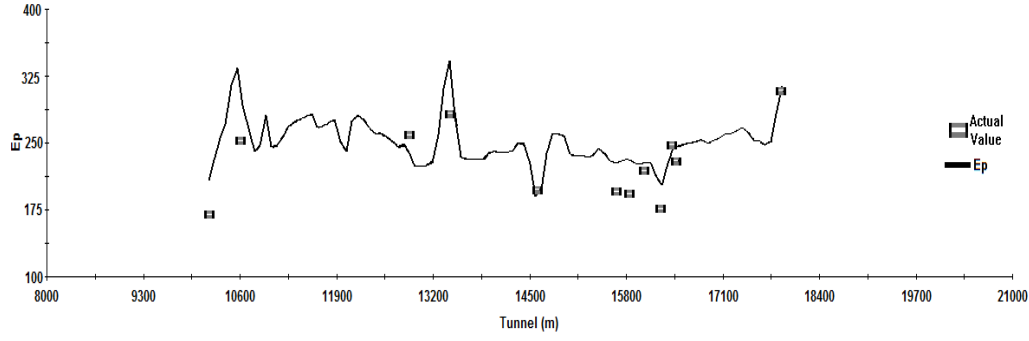
Normal kriging, daha önce bahsedildiği gibi cokriging tekniğinin tünel boyunca Er'nin büyüklüğünün bulunmasında kullanılmasında RQD, GSI, UCS, Em, ve AR'ın noktasal tahmininde kullanılır. Kriging'in interpolasyonu 10 m'lik bir tahmin aralığı alınarak yapılır, her ReV için toplam 1,262 nokta bulunur. Kriging haritaları, interpolasyon kesitinin tamamlanmasından sonra ReV'lerin dağılımının bulunması

için kullanılır. Tünel boyunca dağılım RQD (a), GSI (b), UCS (c), Em (d), AR (e) için Şekil 5.6’da verilmiştir. Çalışılan alan için Kriging haritalarının hazırlanması, klasik istatistiksel yaklaşımlarla anlaşılabilen ReV’lerin dağılımının anlaşılmasını ve kayaç kütlelerinin jeoteknik özellikleri hakkında yorum yapılabilmesini sağlar.



Şekil 5.6 : ReVs (a:RQD, b:GSI, c:UCS, d:Em, e:AR) Kriging haritaları.

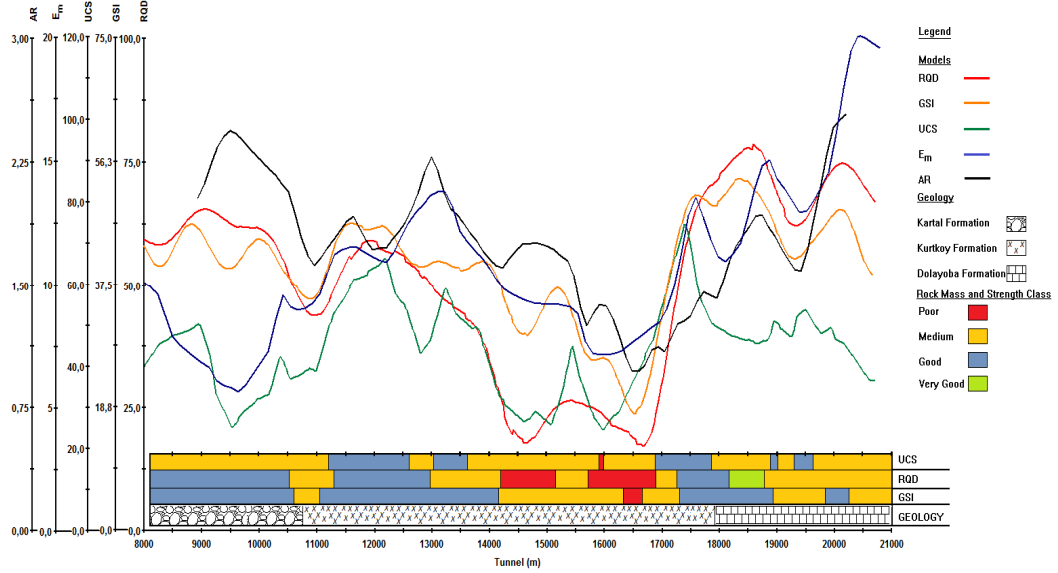
Er'nin Cokriging haritası, Er'nin SV'sinden, UCS'den ve birincil değişken olarak Er ile kross variogramdan ve ikincil değişken olarak UCS'den oluşturulur. İnterpolasyon, 10+175 km ve 17+900 km arasındaki 10 m'lik interpolasyon dizisinden alınmış 773 noktadan oluşturulmuştur. Cokriging haritası Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



**Şekil 5.7 :** Er.'nin Cokriging haritası.

Teorik SV fonksiyonları ReV'nin uzaysal düzlemde değişimini anlamak için kullanılmıştır; bu fonksiyonlardan, her ReV için etkileme alanı ( $A_0$ ) bulunabilir. Sonuçlarda göre, UCS için maksimum uzunluk 167 m ve GSI için minimum etkileme alanı 49 m'dir. Böylece iki komşu delik arasındaki mesafe, jeoteknik çalışmalarda optimum sonuçların alınabilmesi için bu değerler arasında olmalıdır. Ayrıca, AR için etkileme alanı 212 m, bu da diğer  $A_0$  değerlerinden yüksek; bu durum var olan değerlerle AR'nin öngörülebilirliğini gösterir. Kazının ve yeraltı açıklıklarının desteklerinin biteceği olası tarihi öngörmek önemlidir, bu yüksek bütçeli projeler için hayati önem taşır.

Şekil 5.8, her ReVs için uygun kriging haritasını gösterir; buna, araştırılan ReVs'ler arasındaki ilişkinin ve modellerin güvenilirliğinin anlaşılabilmesi için, çalışılan alandaki sağlam kaya ve kayaç kütesinin jeolojik ve sağlamlık sınıflaması da dâhildir.



**Şekil 5.8 :** Jeoloji ve kaya kütle sınıflamalarının jeostatistiksel uyg. sonuçları.

Burada, kaya kütle özellikleri olarak RQD ve GSI, Dolayoba jeolojik yapılanmasının olduğu 17+500 km ile 19+200 km arası hariç, tünel hattı boyunca malzeme özellikleri olan UCS dağılımıyla daha tutarlı ve uygundur. Bu aralıkta, RQD ve GSI değerleri düşerken, UCS değerleri yükselme eğilimindedir. Bu durum, kalker bloklarının arasında bulunan kil malzemesinin etkisidir. Malzeme özelliği olarak Em'nin dağılımı, çalışma alanının bazı bölümleri hariç, diğer jeoteknik özelliklerden bağımsızdır. Jeolojik formasyonun Kurtköy, malzemenin de daha çok kumtaşı ve çamurtaşı olduğu 12+400 km ile 14+000 km ve 15+750 km ile 16+500 km arası hariç, bir inşa parametresi olarak AR, RQD, GSI ve UCS ile uyum gösterir. Bu bölümlerde, AR'nin eğilimi diğer parametrelerin eğilimi ile farklılık gösterir. Neyse ki alanın diğer kısmı (neredeyse bütün alanın %80i ) kaya malzemesi, kaya kütle ve yapım parametreleriyle uyumludur.

Yetersiz veri yüzünden sıradan kriging ile belirlenemeyen Er'nin cokriging haritası Er'nin dağılımını anlamak için fayda sağlar. Bu uygulama, tünel projeleri için cokriging tekniğinin kullanımını göstermesi açısından önemli olmuştur.

### 5.5 Açıklık Etrafındaki Gerilmeler

Bahsedilen hesaplama yöntemleri kullanılarak, formasyonlarda açılmış boşluklar etrafındaki gerilmeler Çizelge 5.10'da hesaplanmıştır.

**Çizelge 5.10 : Açıklıktrafındaki bölgeselleştirilmiş gerilmeler.**

Bölge	Derinlik (m)	$\gamma$ (MN/m <sup>3</sup> )	$\nu$	$\sigma_z$ (Mpa)	$\sigma_h$ (Mpa)	k	$\sigma_w$ (Mpa)	$\sigma_r$ (MPa)
Kozyatağı İst.	24	0,026	0,3	0,624	0,267	0,428	0,177	1,605
M19-M24 & Bostancı İst.	22	0,026	0,26	0,572	0,201	0,351	0,030	1,515
Küçükalyalı İst.	28	0,0265	0,3	0,742	0,318	0,429	0,213	1,908
M25-M30 Makası	31	0,0265	0,3	0,822	0,352	0,428	0,233	2,114
Maltepe İstasyonu	32	0,0270	0,35	0,864	0,465	0,538	0,530	2,127
Huzurevi İst.	25	0,0230	0,3	0,575	0,246	0,428	0,163	1,479
M31-M34 Makası & Gülsuyu İst.	33	0,0220	0,3	0,726	0,311	0,428	0,206	1,867
Hastane İstasyonu	28	0,0270	0,28	0,756	0,294	0,389	0,126	1,974
M35-M40 Makası - Kartal İst.	35	0,0270	0,27	0,945	0,350	0,37	0,104	2,485

$\gamma$ : Birim hacim ağırlığı (MN/m<sup>3</sup>),  $\nu$ : Poisson oranı,  $\sigma_z$ : düşey gerilme,  $\sigma_h$ : yatay gerilme,  $k$ :  $\sigma_h/\sigma_z$ ,  $\sigma_w$ ,  $\sigma_r$ : teğetsel gerilmeler

## 5.6 Kaya Kütlesinin Dayanımı

Bölüm 4.2’de bahsedilen hesaplama yöntemleri kullanılarak bölgeselleştirilmiş formasyonların kaya kütle dayanımı farklı önermelere göre hesaplanmış ve Çizelge 5.11’de verilmiştir.

**Çizelge 5.11 : Kaya kütlesinin dayanım hesapları.**

Bölge	Birim Ağırlık $\gamma$ (MN/m <sup>3</sup> )	$\sigma_{ci}$ (Mpa)	Q	RMR	Bhasin& Grimstad $\sigma_{mass}$	Singh $\sigma_{mass}$	Trueman $\sigma_{mass}$	Barton $\sigma_{mass}$
Kozyatağı İst.	0,026	28,44	1,98	29		23,31	2,85	1095
M19-M24 & Bostancı İst.	0,026	31,87	12,32	52		Q<10 Koşulu yok	11,32	20,91
Küçükalyalı İst.	0,0265	48,05	2,97	37		27,19	4,6	15,21
M25-M30 Makas	0,0265	58,84	2,20	45		24,6	7,44	14,73
Maltepe İst.	0,0270	34,32	1,65	32	Q>10 ve $\sigma_{ci}>100$ koşulu yok	22,78	3,41	11,39
Huzurevi İst.	0,0230	26,48	0,0293	32		5,06	3,41	2,32
M31-M34 Makas& Gülsuyu İst.	0,0220	29,42	0,0978	32		7,24	3,41	3,44
Hastane İst.	0,0270	44,13	10,50	47		Q<10 Koşulu yok	8,39	22,95
M35-M40 Makası - Kartal	0,0270	54,91	11,88	67		Q<10 Koşulu yok	27,85	25,72

## 6. ANALİTİK YÖNTEMLER İLE TASARIM ve UYGULAMA

Bu bölümde yapılan çalışmalardan yola çıkarak, tünelde meydana gelebilecek kaya patlama olgusu ve/veya ezilme potansiyeli araştırılmış ve açıklıklardaki tahkimatların tasarımı kaya kütle sınıflama sistemlerine göre yapılmıştır.

### 6.1 Kaya Patlama Riskinin Araştırılması

Bölüm 4.2.2’de tariflenen kaya patlama riskini araştırma amaçlı yapılan hesaplamalar ve sonuçları Çizelge 6.1’de verilmiştir. Yapılan çalışmanın sonuçları değerlendirilirse, incelenen bölgelerde kaya patlama riski oldukça düşüktür.

**Çizelge 6.1 :** Kaya patlama olgusunun değerlendirilmesi.

Bölge	$\sigma_c / \sigma_0$	Rusenes (1974)	Hoek ve Brown (1980)	Grimstad ve Barton (1993)	Palmstrom (1996)
Kozyatağı İst.	17.720				
M19-M24 & Bostancı İst.	21.036				
Küçükyalı İst.	25.183				
M25-M30 Makas	27.833				
Maltepe İst.	16.135	Dökülme yok	Duraylı	Orta, Zayıf gerilme koşulları	Stabiliteyi düşüren gerilme yok
Huzurevi İst.	17.904				
M31-M34 Makası & Gülsuyu	15.758				
Hastane İstasyonu	22.356				
M35-M40-Kartal İst.	22.097				

### 6.2 Ezilme Potansiyeli Riskinin Araştırılması

Bölüm 4.2.3’de tariflenen ezilme potansiyeli riskinin araştırma amaçlı yapılan hesaplamaları ve sonuçları Çizelge 6.2’de verilmiştir. Yapılan çalışmanın sonuçları değerlendirildiğinde, incelenen bölgelerde ezilme riski ile karşılaşılması beklenilmemektedir. Bu araştırma ezilme olgusunun meydana gelebileceği tek eksenli basınç dayanımı 20 MPa’ın altında olan ortamlarda ve zayıf olarak tanımlanan kaya kütle ortamları için gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 6.2 : Ezilme davranışı değerlendirilmesi.**

Referans	Singh	Goel	ISRM	Jethwa	Davranış
Bölge	H	H	Ratio	N <sub>c</sub>	
Kozyatağı İst.	439.5	283.53	0.056	0.45	
M19-M24 & Bostancı İst.	808.36	518.32	0.048	0.55	
Küçükalyalı İst.	503.1	324.12	0.04	0.64	
M25-M30 Makas	455.21	293.56	0.036	0.70	Ezilme yok
Maltepe İst.	413.58	266.97	0.062	0.39	
Huzurevi İstasyonu	107.94	70.62	0.056	0.45	
M31-M34 Makası & Gülsuyu İst.	161.24	105.07	0.063	0.40	
Hastane İstasyonu	766.42	491.69	0.045	0.57	
M35-M40 Makası - Kartal İst.	798.62	512.14	0.045	0.57	

Çizelge 6.1 ve 6.2’de yapılan kaya patlaması ve ezilme davranışı incelemelerinde, bölgelerde farklı yaklaşımlar yardımı ile yapılan değerlendirmeler sonucunda duraylı bir yapı ortaya çıkmıştır. Ancak çalışmada bahsedilmeyen ve hat tünelleri üzerinde bulunan az da olsa duraylı olmayan zayıf – ezik zonlar mevcuttur. Bu tip riskli alanlarda yoğun tahkimat olarak, profil çelik kirişler, 30 – 35 cm. kalınlığında püskürtme beton ve “umbrella arch” uygulamaları yapılarak bu tür riskli bölgeler geçilmiştir.

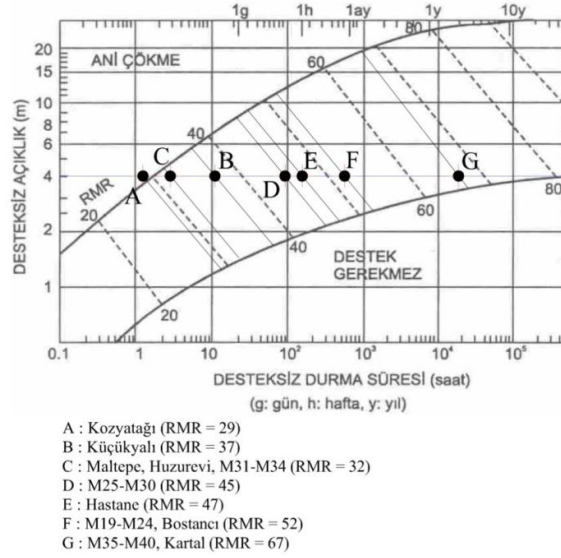
### 6.3 RMR’a Göre Tahkimat Tasarımı

Tahkimat sisteminin kestirimi, Bölüm 5.4’te hesaplanarak verilen “RMR” puanlamalarına göre yapılmış ve sonuçları Çizelge 6.3’de verilmiştir.

**Çizelge 6.3 : RMR’dan hareketle tahkimat sisteminin kestirimi.**

Bölge	RMR		Tahkimat			
	Puan	Sınıf	Kazı	Kaya Saplama	P. Beton	Çelik İksa
Kozyatağı	29		Tavan ve tabandan ilerleme, tavandan	4-5 m uzunluğunda	100-150 mm	Gerekli yerlere 1.5 m
Küçükalyalı	37		1.0-1,5 m ilerleme,	1-1,5 Aralıklarla	mm	
Maltepe	32	Zayıf	1.0-1,5 m ilerleme,	sistemik saplama	tavanda	m
Huzurevi	32	kaya	tam tahkimat aynaya	tavan ve duvarlara	100 mm	aralıklarla
M31-M34& Gülsuyu	32		10 m mesafede	uygulanır yapılır.	duvarda	hafif orta
			yerleştirilmeli	Tel örgü kullanılır.		profiller
M19-M24 & Bostancı	52		Tavan ve tabandan ilerleme, tavandan	4 m uzunluğunda	Tavana	
M25-M30 Makası	45	Orta	1,5-3 m ilerleme,	1,5-2 m aralığında	50-100 mm	Yok
Hastane	47	kaya	tam tahkimat aynaya	sistemik kaya	duvarlara	
			10 m mesafede tam tahkimat.	yerleştirilir ve tel örgü kullanılır	30 mm.	
M35-M40 Makası - Kartal	67	İyi	Tam cepheli, 1,0-1,5 m ilerleme, Aynaya	Tavan kemerinin 3 m gerisine 2,5 m aralıklarla tel örgü ile birlikte kaya saplama	Gerektiğinden tavana 50 mm. beton püskürtme	Yok
		kaya	20 m mesafede tam tahkimat			

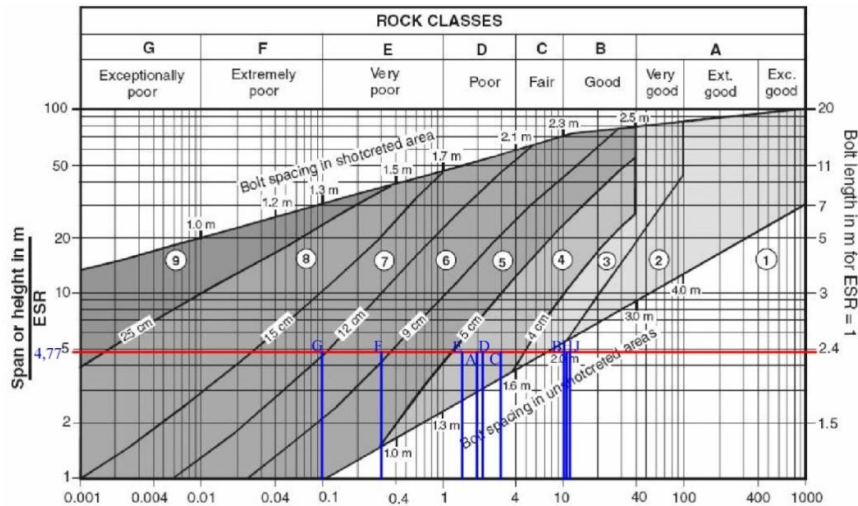
Tahkimatsız durma süresi ile ilgili çalışma Şekil 6.1’de de verildiği üzere RMR ile açıklığın geometrisine bağlı olarak araştırılmış ve sonuçları aşağıda verilmiştir. Buna göre, A için ani çökme tehlikesi beklenirken diğer tüm formasyonlar ve açıklıklarda tahkimat gerekli olup tahkimatsız durma süresi 1 saatten 1 yıla kadar değişmektedir.



Şekil 6.1 : RMR ve tahkimatsız durma süresi vedesteksiz açıklık ilişkisi [13].

#### 6.4 Q’ya Göre Tahkimat Tasarımı

Bölüm 5.4’te formasyonlara ait kaya kütle özellikleri kullanılarak hesaplanan“Q” puanlamasına göre tahkimat sisteminin kestirimi, Şekil 6.2’de verilen abak kullanılarak yapılmış ve sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 6.2 : Bölgelerin Q sistemine dayalı destek kategorileri [18].

**Çizelge 6.4 : Q' dan hareketle tahkimat sisteminin kestirimi.**

Bölge	Grup	Q Puanı	P. Beton Kalınlığı (mm)	Bulon Aralığı (m)	Bulon Uzunluğu (m)
Kozyatağı	A	1,98	100	2,0	2,5
M19-M24 & Bostancı	B	12,32	-	2,0	2,5
Küçükyalı	C	2,97	100	1,6	2,5
M25-M30	D	2,2	100	1,5	2,5
Maltepe	E	1,65	90	1,4	2,5
Huzurevi	F	0,03	120	1,5	2,5
M31-M34 & Gülsuyu	G	0,1	150	1,3	2,5
Hastane	H	10,5	-	2,0	2,5
M35-M40 & Kartal	J	11,88	-	2,0	2,5

### 6.5 Açıklığa – Jeotekniğe ve Yapılmış Hesaplara Göre Tahkimat Seçimi

RMR ve Q sınıflama yöntemlerine göre yapılan puanlamalar değerlendirilerek, seçilen destek tiplerinden daha güçlü olan destekleme seçilerek aşağıdaki Çizelge 6.5 oluşturulmuştur.

**Çizelge 6.5 : Seçilen tahkimat sistemleri.**

Bölge	Formasyon	RMR puanı	Q Puanı	P. Beton (mm)	Bulon Aralığı (m)	Bulon Uzunluğu (m)	Hasır Çelik	İksa
Kozyatağı	Kartal	29	1,98	150	2,0	2,5		1,5 m. aralıkla profiller
M19-M24 & Bostancı	Kartal	52	12,32	100	2,0	2,5		-
Küçükyalı	Kurtköy	37	2,97	150	1,6	2,5	Tavan ve duvar	1,5 m. aralıkla profiller
M25-M30	Kurtköy	45	2,2	100	1,5	2,5		-
Maltepe	Kurtköy	32	1,65	150	1,4	2,5		1,5 m. aralıkla profiller
Huzurevi	Kurtköy	32	0,03	150	1,5	2,5		-
M31-M34	Kurtköy	32	0,1	150	1,3	2,5		-
Hastane	Dolayoba	47	10,5	100	2,0	2,5		-
Kartal	Dolayoba	67	11,88	50	2,0	2,5		-

## 7. NÜMERİK YÖNTEMLER İLE UYGULAMA

### 7.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Tünel Tasarımı

Sonlu elemanlar yönteminde herhangi bir sürekli ortam veya yapı sonlu eleman denilen parçacıklara bölünmektedir. Elemanlar birbirlerine düğüm noktalarında bağlanmaktadır. Basit fonksiyonlar seçilerek, eleman için gerçekleşen deplasman değişimi düğüm noktalarındaki değerler cinsinden ifade edilirler. Düğüm noktalarındaki ve sonradan bulunması gereken deplasman bileşenlerine, serbestlik derecesi adı verilmektedir.

Sonlu elemanlar metodu ile çeşitli mühendislik yapılarının analizini yapabilecek birçok sonlu eleman bilgisayar programı geliştirilmiştir. Bu tür programlar ile çeşitli rijit veya elastik sınır şartları ve çeşitli yükleme durumları altında, uzay ve düzlem kafes kirişler, uzay ve düzlem çerçeveler, düz veya katlanmış plaklar, plak kiriş sistemleri ve kabuk tipi yapıların statik ve dinamik gerilme analizleri yapılabilmektedir.

Sonlu elemanlar metodunun (SEM) gerilme analizleri ve deplasmanların bulunmasında başlıca iki temel prensip uygulanmaktadır. Birincisi deplasman yöntemidir. Bu yöntemin temel işleyiş prensibi minimum potansiyel enerji ilkesini esas alan ve yer değiştirmeleri ilk bilinmeyen olarak tanımlamaktır. İkinci yöntem ise minimum tamamlayan enerji prensibine dayanan ve gerilmeleri ilk bilinmeyen olarak benimseyen denge yöntemidir. Tünelcilikte minimum enerji prensibine dayalı deplasman yöntemi uygulanmaktadır [39].

Modellenen yapının statik denge durumunun sağlanması için, uygun sınır şartlarının belirlenmesi gerekmektedir. Sonlu eleman analizinde özel bir durum tanımlanmadığı sürece, genel olarak modelin üst sınırı yatay ve düşey yer değiştirmelere açıktır. Modelin alt bölümü ise yatay hareketleri alabilme kabiliyetine sahip kayıcı mesnetler ile sınırlandırılır. Sol kenar sınır şartları için düşey yer değiştirmelere açık mesnetler kullanılır. Model tünel içinden destek elemanları ile sınırlandırılır. Klasik kafes elemanlar kaya bulonlarını, kiriş elemanlar ise, iksa ve benzeri destek yapılarını modellemek için kullanılır. 2 ve 3 boyutlu kabuk elemanlar, beton kaplama ve çelik

plaka gibi sürekli destek yapılarının modellenmesi için uygundur. Sonlu elemanlar yönteminde, özellikleri bilinen bir kaya formasyonunda modellenecek bir iki boyutlu tünel modeli için tanımlanması gereken tasarım parametreleri, elastisite modülü (E), poisson oranı ( $\nu$ ), eleman kalınlığı (t), ve malzeme yoğunluğudur.

## 7.2 Nümerik Yöntemler ile Tahkimat Malzemelerinin Tasarımı

Tahkimat elemanları programa tanıtılırken, “Liner” kaplama adı verilen eleman türü kullanılmaktadır. Püskürtme beton ve çelik iksa gibi destekleme elemanları aynı kesitte yer alması nedeniyle rijitlik parametreleri ayrı ayrı hesaplanmakta ve toplamları kaplama özelliği olarak programa girilmektedir. Çelik hasırında ilave olarak kullanıldığı durumlarda ise çelik hasıra ait parametreler ayrı bir kaplama olarak oluşturulur ve kaplamalar “composite” olarak birleştirilir. Tahkimat elemanları için programa girilen parametreler aşağıda belirtilmiştir.

E: malzeme elastisite modülü (MPa), h: malzeme kalınlığı (m), A: kesit alanı (m<sup>2</sup>),  
Bulonlar için A, bulonun kesit alanıdır. I: atalet momenti (m<sup>4</sup>), w: ağırlık (kg/m),

$\nu$ : malzeme poisson oranı.

Bu değerler her kaya destekleme sınıfı için hesaplanmış ve veriler programa girilmiştir. Öngörülen tahkimat sisteminde kullanılan malzemelere ait veriler Çizelge 7.1’de gösterilmiştir.

**Çizelge 7.1** : Modellerde kullanılan tahkimat elemanlarının özellikleri.

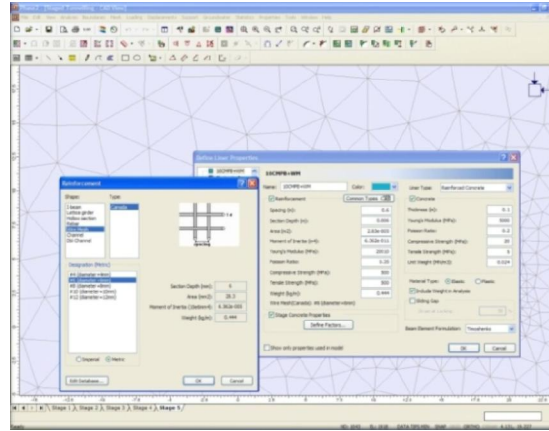
Destek Tipi	Kalınlık (cm)	Atalet Momenti (m <sup>4</sup> )	Young Mod. (MPa)	Poisson Oranı	Basınç Day. (MPa)	Çekme Day. (MPa)	Birim Ağ. (MN/m <sup>3</sup> )	Birim Ağ. (kg/m)
Püskürtme Beton	5 – 15	-	5000	0,2	20	5	0,024	
Kafes İksa	14,1	4,85e-006	200000	0,35	400	400	-	13,1
Hasır çelik	0,3	6,362e-011	200000	0,35	400	400	-	0,444

Kullanılan kaya bulonlarına ait veriler Çizelge 7.2’de gösterilmiştir.

**Çizelge 7.2 :** Modellerde kullanılan kaya bulonu özellikleri.

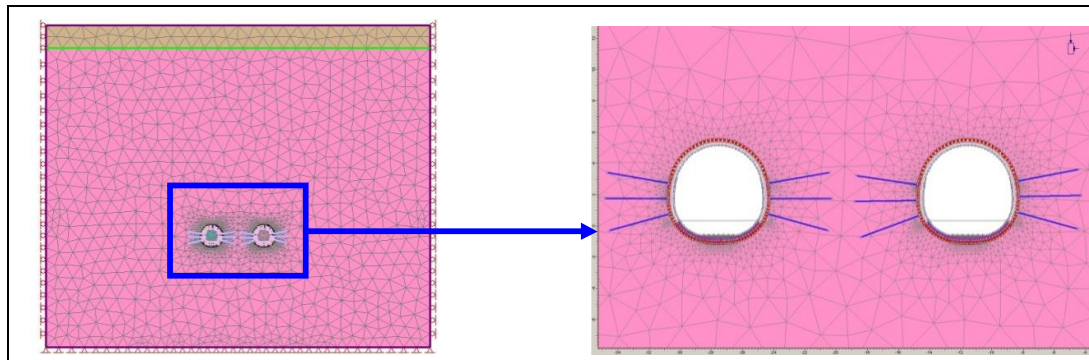
Destek Tipi	Bulon Tipi	Bulon Çapı (mm)	Young Mod. (MPa)	Çekme Day. (MN)	Residuel Çekme Day. (MN)	Boyuna Aralık(m)
Kaya Bulonu	Tam Enj.	26	200000	0,22	0,01	1,5

Tahkimat elemanlarının programa girilişi ile ilgili görsel, Şekil 7.1’de verilmiştir.



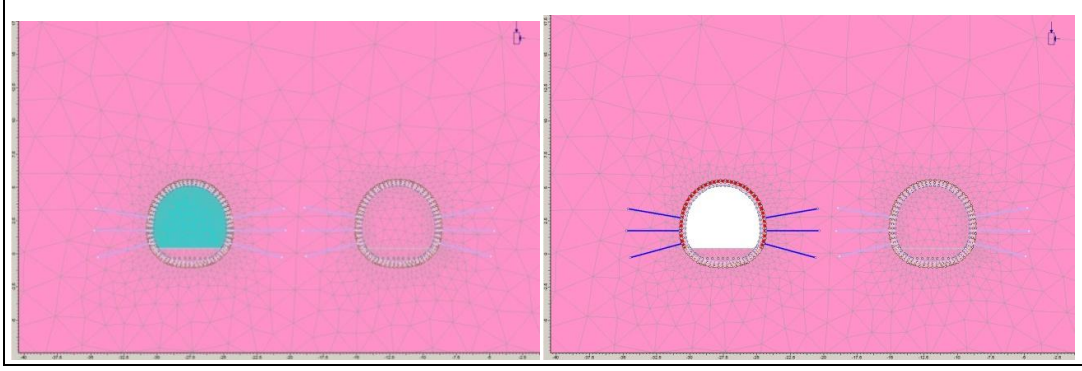
**Şekil 7.1 :** Tahkimat elemanlarının programa tanıtılması.

Aşağıdaki şekiller birincil destek yeterliliği doğrulamak için yürütülen sayısal analiz hesaplama aşamalarını göstermektedir.



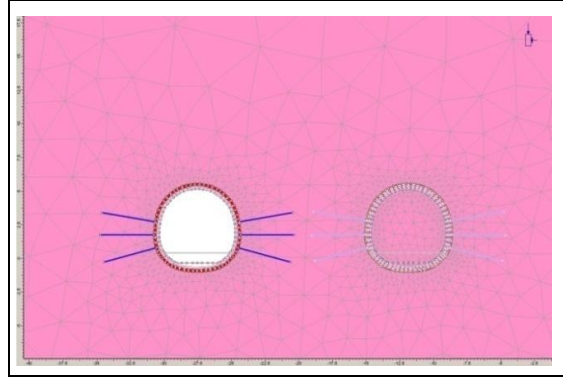
**Şekil 7.2 :** Modelin çalıştırılması 1. aşama.

1. aşamada stres durumunun simülasyonu için Kaya kütlesi ( $\gamma$ ) ve yerçekimi aktivasyonunun ( $g$ ) uygulaması yapılmıştır.

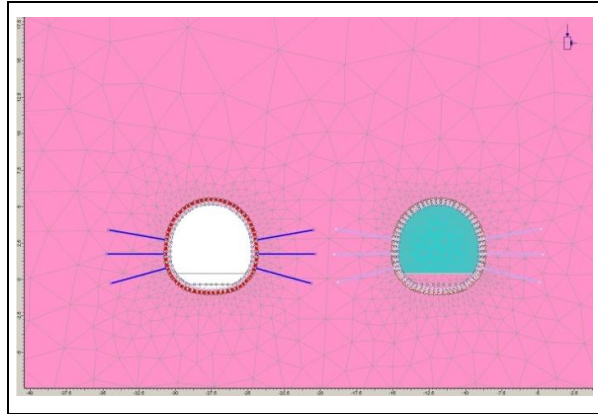


**Şekil 7.3 :** Hat – 1 üstyarı kazısının yapılması ve desteklenmesi 2. aşama.

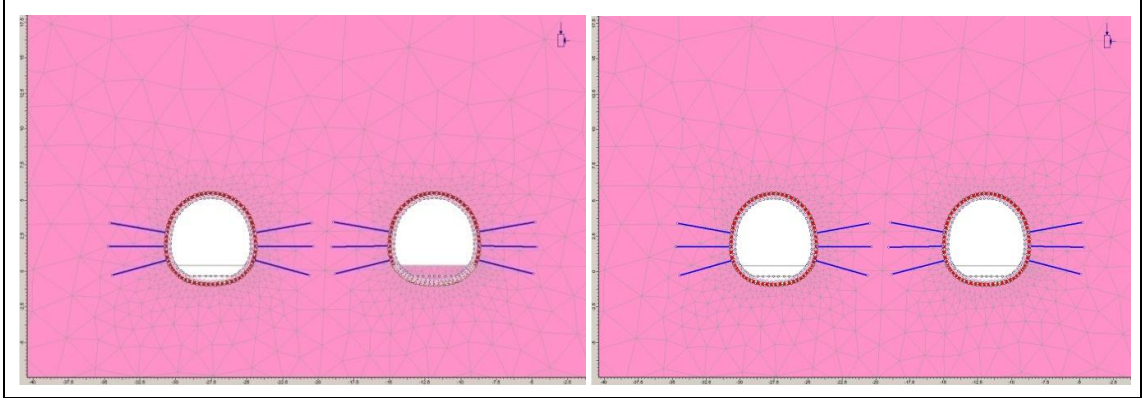
Modelde oluşturulan her aşamada zeminin zayıflamasını simüle edebilmek amacıyla zeminin elastisite modülü her aşamada yüzde 10 azaltılmıştır.



**Şekil 7.4 :** Hat – 1 altyarı kazısının yapılması ve desteklenmesi 3. aşama.

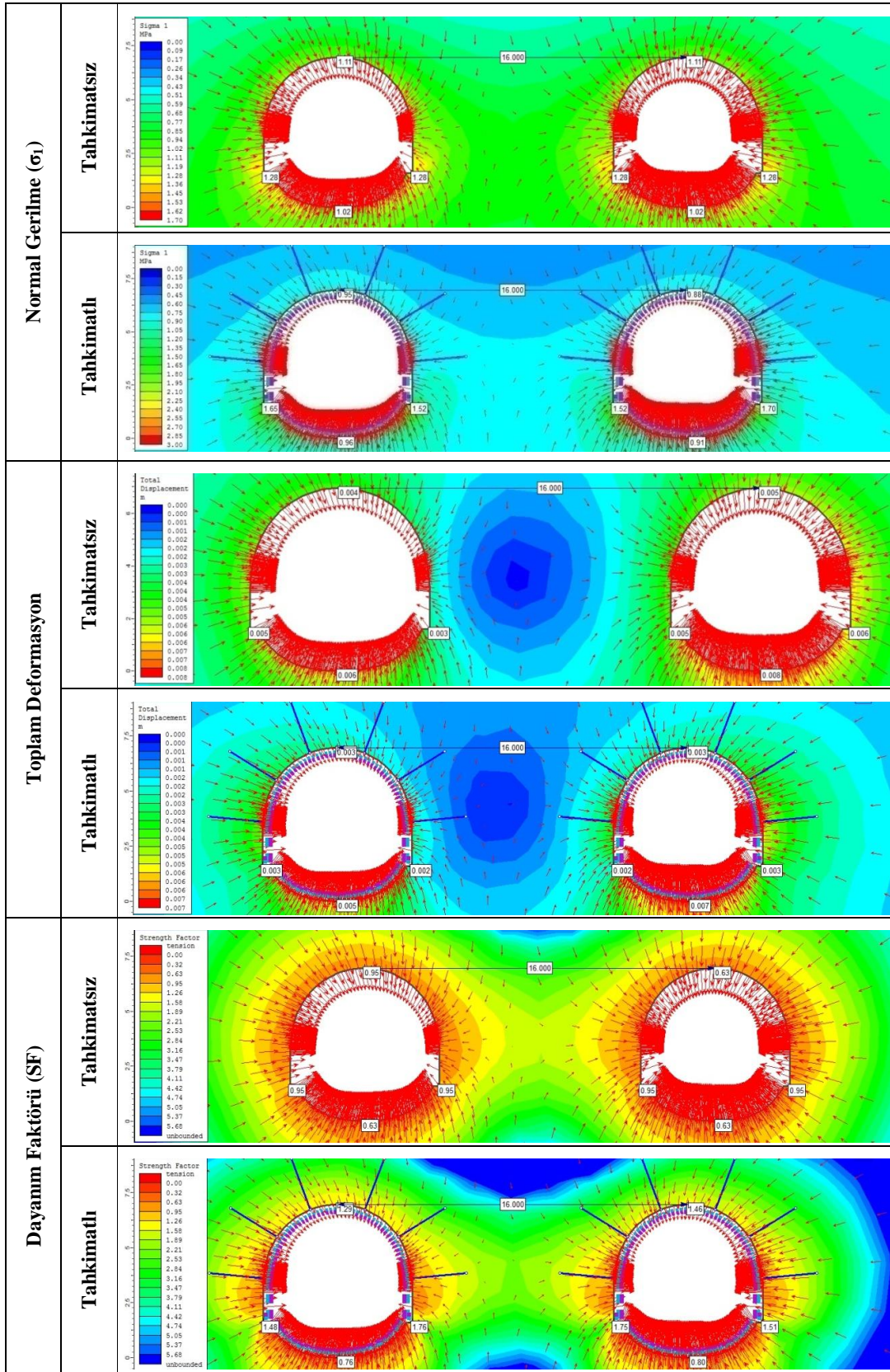


**Şekil 7.5 :** Hat – 2 üstyarı kazısının yapılması ve desteklenmesi 4. aşama.



**Şekil 7.6 :** Hat – 2 altyarı kazısının yapılması ve desteklenmesi 5. aşama.

Kazının ve destek sisteminin tamamlanması 5 aşamada gerçekleşmiştir. Bu modelleme yöntemi hem tahkimatlı hem de tahkimatsız durum için yapılarak, tahkimatın etkisi gözlenmiştir. Çalıştırılan modellerde her bölge için tahkimatlı ve tahkimatsız durumda normal gerilme ( $\sigma_1$ ), toplam deformasyon ve dayanım faktörü (SF) hesaplanmış ve kesit üzerindeki 2 hat tüneline aynı 5 noktadan program tarafından hesaplanan değerler gösterilmiştir. Elde edilen modellerin çıktıları Kozyatağı bölgesi için aşağıda diğer bölgeler için ise ekler içerisinde verilmiştir.



Şekil 7.7 : Kartal formasyonu - Kozyatağı bölgesi.

Tüm bu çalışmalardan sonra 18 farklı uygulamaya ait sayısal modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiş ve 54 farklı model çıktısı elde edilmiştir. 3 farklı formasyonda aralarında ve 5 farklı tünel aralık mesafesi değerine göre gerçekleştirilen tüm modellerden elde edilen sonuçlar, kaya kütle sınıflama sistemlerine bağlı olarak elde edilen tahkimat sistemlerinin uyumluluğunu ve seçilen tahkimat ekipmanlarının uygunluğunu göstermesi açısından önemli sonuçlar içermektedir. Küçükyalı, M25-M30, Maltepe, gülsuyu, hastane ve kartal analizlerinde SF değerinin 1,0'dan küçük olduğu bölgelerde ilave tahkimatlara ihtiyaç duyulabileceği sonucuna da ulaşılmıştır. İnşaat faaliyetleri sırasında uygulanan tahkimatlar ile model çalışmalardan elde edilen tahkimatların karşılaştırılması aşağıda verilmiştir.

### 7.3 Tahkimat Sistemlerinin Karşılaştırılması

Analitik yöntemlerden hareketle, incelenen her bir bölge için öngörülen tahkimat sistemleri ile aynı kesit için projede uygulanan tahkimat sistemleri arasındaki karşılaştırmalar aşağıdaki Çizelge 7.10'da verilmiştir.

**Çizelge 7.3 : Tahkimat Sistemleri Karşılaştırması.**

Bölge	Km.	Formasyon	Püskürtme Beton(mm)		İksa (Kafes Kiriş)		Hasır Çelik (Çift Kat)	
			Analiz	Uyg.	Analiz	Uyg.	Analiz	Uyg.
Kozyatağı	9+500	Kartal	150	200	H141	H141		
Bostancı	10+500	Kartal	100	200	-	H141		
Küçükyalı	12+500	Kurtköy	150	200	H141	H141		
M25-M30	13+400	Kurtköy	100	250	-	H164	Tavan ve Duvar	Tavan ve Duvar
Maltepe	14+200	Kurtköy	150	200	H141	H141		
Huzurevi	15+100	Kurtköy	150	250	H141	H164		
M31-M34	16+100	Kurtköy	150	250	H141	H164		
Hastane	18+600	Dolayoba	100	200	-	H141		
Kartal	20+500	Dolayoba	50	200	-	H141		

Her ne kadar analizlerden elde edilen sonuçlar ile inşaat faaliyetleri sırasında gerçekleştirilen uygulamalar benzerlik arz etse de, bazı durumlarda özellikle püskürtme beton kalınlıklarının fazla olduğu ve/veya iksa kullanıldığı gözlemlenmiştir. Bu durumun, emniyet açısından bakıldığında da tünellerin stabilitesine olumlu katkı sağlayacağı düşünüldüğünden bu uygulamaların olumlu olacağı kesindir. Ancak, maliyet açısından bakıldığında ilave maliyet oluşturduğu da dikkate alınmalıdır. Tüm bunların yanında, model ile gerçek arasındaki farklılıklar ve ölçüm ve olası hata payları da dikkate alınacak olunursa tüm bu sonuçların kestirim ve uygulama olarak birbirleri ile çok ayrışmadığı kolayca söylenebilir.

## 8. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Kadıköy – Kartal metrosu tünel inşaatında Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu kullanılarak açılmış olan Kozyatağı ve Kartal arasındaki ana hat tünelleri incelenmiştir. Tek tip açıklıkta çalışılmasının sebebi 10'dan fazla farklı açıklığa sahip tünelin her bir formasyon için modellenmesi 500'den fazla model çıktısı üretimi gerektirdiği için tek tip açıklık değerlendirilmeye alınmıştır. Bu bölgede öncelikli olarak çalışılan güzergâhı kesen Kartal, Kurtköy ve Dolayoba formasyonlarının RMR ve Q'ya bağlı olarak jeoteknik sınıflamaları yapılmıştır. Daha sonra analitik yöntemler kullanılarak, RMR ve Q'dan hareketle, her bir formasyon için tahkimat sistemlerinin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tahkimat sistemlerinin uygunluğu ve tahkimat sistemlerinde kullanılacak olan ekipmanların mühendislik özellikleri nümerik yöntemler ile test edilmiş ve çalışmaların sonuçları değerlendirilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar ile tünel kazısı sırasında uygulanan gerçek tahkimat sistemleri arasındaki karşılaştırmalar yapılmıştır. Yapılan karşılaştırmadan da görüleceği üzere, sahada uygulanan tahkimat sistemleri teorik hesaplar sonucunda elde edilen tasarımlardan daha yoğun sistemlerdir. Bu durum özellikle emniyet açısından bakıldığında güvenli bir yaklaşım sunması açısından yerindedir. Ancak, maliyet açısından bakıldığında ise, uygulanan sistemlerin maliyeti ihtiyaç duyulan sistemlerin maliyetinin çok çok üzerindedir.

Bu tip çalışmalar yer altı yapıları projelendirilirken yapılan bir ön proje olarak nitelendirilmeli ve her proje başlangıcından önce yapılmalıdır. NATM'nin temel prensiplerinden biri olan kazı aşamasında karşılaşılan durumlar yerinde incelenmeli ve gerekli görülen destek sistemleri güçlendirilmeli veya gerekli değilse zayıflatılmalıdır.



## KAYNAKLAR

- [1] Köse, H. ; Gürgen, S. ; Onargan, T. ; Yenice, H. ; Aksoy, C. O. (2007).Tünel ve Kuyu Açma, D.E.Ü., Mühendislik Fakültesi Yayınları No: 145, İzmir
- [2] Ergin, K. 1992.YeniAvusturya tünel inşa yönteminde sonlu elemanlar yöntemiyle tünel kaplaması hesabı, *Yüksek Lisans Tezi*. İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [3] Singh, B., Goel, R. K., 2006.Tunneling in Weak Rocks, *Elsevier Publications*, London.
- [4] Karaođlan, H.(2002).Kaya zeminde tünel tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*. İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [5] Şeker, Ö. (2008).Yeni Avusturya prensiplerine göre tünel kaplama tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*. İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [6] Arıoğlu, E., Yüksel, A., Yılmaz, A. O., (2008). Püskürtme Beton Bilgi Föyleri Çözümlü Örnekler, *TMMOB Maden Mühendisleri Odası*, İstanbul.
- [7] Aktaş, S. Ş.,(2009). Yeni Avusturya tünel açma yöntemi ile inşa edilen bir tünelin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizi ve değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*. Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [8] Kolymbas, D., (2005). Tunneling and Tunnel Mechanics, A Rational Approach to Tunnelling, *Springer Publications*, Innsbruck.
- [9] Ozturk, C.A., Simdi, E.(2012). Subway project in Istanbul , Turkey. In Proc. 46th 18 U.S.RockMechanics/Geomechanics Symposium (ARMA 2012), Chicago, USA.
- [10] Zemar Ltd. Şti. (2008). Kadikoy-Kartal metrosu ikmal inşaatı tünel güzergâhları mühendislik jeolojisi ilave araştırmaları değerlendirme raporu

- [11] **Anadoluray Ortak Girişimi.** (2005). Kadıköy-Kartal raylı toplu taşıma sistemi jeolojisi, mühendislik jeolojisi raporu
- [12] **Karpuz, C., Hindistan, M. A.**(2006). Kaya Mekaniği İlkeleri, Uygulamaları, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Ankara.
- [13] **Ulusay, R., Sönmez, H.**(2007). Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Ankara.
- [14] **Bieniawski, Z. T.,** (1976). Classification System is used to predict rock mass behavior, World Construction.
- [15] **Koçak, B.,** (2006). Yeraltı Kaya Yapılarının Denetimi ve Yönlendirilmesinde Uzman Sistem Oluşturulması, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [16] **Mahtab, M., Grasso, P.,** (1992). Geomechanics Principles in the Design of Tunnels and Caverns in Rock, *Elsevier Publications*, Tokyo.
- [17] **Kaya, E.,** (2002). Kaya Mekaniği Ders Notları, *Pamukkale Üniversitesi*, Denizli.
- [18] **Grimstad, E., Barton, N.** (1993). Updating of Q-system for NMT. *International Symposium on Sprayed Concrete*, s.46-66
- [19] **Bhasin, R., Grimstad, E.** (1996). The use of stress-strength relationships in the assessment of tunnel stability. *Tunn. Undergr. Space Tech.*, 11(1), s.93-98
- [20] **Singh, B., Viladkar, M. N., Samadhiya, N. K., Mehrota, V. K.,** (1997). Rock Mass Strength parameters mobilized in tunnels , *Tunn. Undergr. Space Tech.*, 12, s.147-154
- [21] **Trueman, R.,** (1998). An evaluation of strata support techniques in dual life gateroads, *Phd Thesis*, University of Wales. Cardiff. Read.
- [22] **Barton, N.,** (2000). TBM Tunneling in Jointed and Faulted Rock, Balkema, Rotterdam.s. 169.

- [23] **Aydan, Ö., Geniş, M.** (2010). Yeraltı açıklıklarında kaya patlaması olgusu ve önlemleri üzerine değerlendirme, *Türk Kaya Mekaniği Dergisi*, Sayı 17.
- [24] **Singh, B., Jethwa, J.L., Dube, A.K.**, (1992). Correlation between observed support pressure and rock mass quality. *Tunn. Undergr. Space Tech.*, 7, 59-74.
- [25] **Goel, R.K., Jethwa, J.L., Paithakan, A.G.**, (1995). Tunneling through the young Himalayas – a case history of the Maneri – Uttarkashi power tunnel. *Engineering Geology* 39, 31-44.
- [26] **Barla, G.**, (1995). Squeezing rocks in tunnels. *ISRM News Journal* (3&4), 44-49.
- [27] **Jethwa, J.L., Singh, B.**, (1984). Estimation of ultimate rock pressure for tunnel linings under squeezing rock conditions – a new approach. In:Brown, E. T.,Hudson, J.A.(Eds.),. *Design and Performance of Underground Excavations*, ISRM Symposium, Cambridge, s. 231-238.
- [28] **Ocak, I.,Ozkisa O., Kartal, M., Cilingir, M.**(2008).Metro tunellerinde GSIve RMRdegerleri ile tasman arasindaki iliskinin arastirilmesi. In. Proc. 2nd Symp.Underground Excavations for Transportation, Istanbul. 487-497
- [29] **Baykal, F., Kaya, O.**(1963). Istanbul 1. bolgesinde bulunan karboniferin genel stratigrafisi. 2 MTA Bull. 61, s.1-9
- [30] **IBB-Istanbul Büyükşehir Belediyesi.**(2008). Kadikoy-Kartal metrosu ikmal infaatitunel guzergahlari muhendislik jeolojisi ilave arastirmalari degerlendirmeraporu. Istanbul: Teknik Rapor. Zemar Ground Research Ltd. Sti.
- [31] **IBB-Istanbul Büyükşehir Belediyesi.**(2005). Kadikoy – Kartalrayli toplu tasimasistemimuhendislik jeolojisi raporu. Anadoluray. İstanbul.
- [32] **Jornel, A.G.**(1989). Fundamentals of Geostatistics in Five Lessons. The AmericanGeophysical Union, Washington.
- [33] **Ozturk, C.A.**(2001). Maden yatakları için jeostatistiksel değerlendirme, kriging ve nokta kümülatif semivariogram tekniklerinin karşılaştırması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbulTeknik Üniversitesi.

- [34] **Francois-Bongarcon, D.**(1981). Les coregionalisations le cokrigeage: Centre deGeostatistique. Fontanebleau, 86, 26
- [35] **Carr, J.R., Myers, D.E., Glass, C.E.**(1985). Cokriging-A computer program. Compt.and Geoscien. 11 (2), 111-127.
- [36] **Asli, M., Marcotte, D.**(1995). Comparison of approaches to spatial estimation in abivariate context. Math. Geol. 27 (5), 641-658.
- [37] **Isaaks,E.H., Srivastava, R.M.**(1989). An Introduction to Applied Geostatistics. OxfordUniversity Press, New York.
- [38] **Goovaerts, P.**(1997). Geostatistics for natural resources evaluation. Oxford Uni. press,483 pp.
- [39] **Desai, C.S.**(1972). Theory and application of the finite element method in geotechnical engineering, *Symposium on the applications of the finite element method in geotechnical engineering.* s. 3-8. Mississippi

## EKLER

### EK A: Bölüm 5'e ait çizelgeler

**Çizelge A.1 :** Kozyatağı istasyon bölgesi hat tünelleri özellikleri [29, 30].

Katman	Der. (m)	Birim Ağ. kN/m <sup>3</sup>	Kohezyon (kPa)	İçsel Sürt. Açısı (°)	Poisson Oranı	Def. Mod. (MPa)	UCS (kg/cm <sup>2</sup> )	Çekme Day. (kg/cm <sup>2</sup> )	RQD (%)
Kartal	24	26	210	32	0,3	700	300	45-60	60
Belgrad	10	20	0	26	0,35	80	-	-	-
Dolgu	2	20	0	28	0,35	25	-	-	-

**Çizelge A.2 :** M19-M24 & Bostancı bölgesi hat tünelleri özellikleri [29, 30].

Katman	Der. (m)	Birim Ağ. kN/m <sup>3</sup>	Kohezyon (kPa)	İçsel Sürt. Açısı (°)	Poisson Oranı	Def. Mod. (MPa)	UCS (kg/cm <sup>2</sup> )	Çekme Day. (kg/cm <sup>2</sup> )	RQD (%)
Kartal	22	26	500	40	0,26	2000	400	45-60	70
Kil	-	21	0	30	0,4	80			
Dolgu	-	19	0	23	0,35	15			

**Çizelge A.3 :** Küçükyalı istasyonu bölgesi hat tünelleri özellikleri [29, 30].

Katman	Der. (m)	Birim Ağ. kN/m <sup>3</sup>	Kohezyon (kPa)	İçsel Sürt. Açısı (°)	Poisson Oranı	Def. Modülü (MPa)	UCS (kg/cm <sup>2</sup> )	Çekme Day. (kg/cm <sup>2</sup> )	RQD (%)
Kurtköy	28	26,5	250	45	0,3	1000	500	50-75	45
Dolgu	-	19	0	23	0,35	15			

**Çizelge A.4 :** M25-M30 makas bölgesi hat tünelleri özellikleri [29, 30].

Katman	Der. (m)	Birim Ağ. kN/m <sup>3</sup>	Kohezyon (kPa)	İçsel Sürt. Açısı (°)	Poisson Oranı	Def. Modülü (MPa)	UCS (kg/cm <sup>2</sup> )	Çekme Day. (kg/cm <sup>2</sup> )	RQD (%)
Kurtköy	31	26,5	250	45	0,3	2000	600	-	50
Dolgu	-	21	0	30	0,4	50			
Dolgu	-	19	0	23	0,35	15			

**Çizelge A.5 :** Maltepe istasyon bölgesi hat tünelleri özellikleri [29, 30].

Katman	Der. (m)	Birim Ağ. kN/m <sup>3</sup>	Kohezyon (kPa)	İçsel Sürt. Açısı (°)	Poisson Oranı	Def. Modülü (MPa)	UCS (kg/cm <sup>2</sup> )	Çekme Day. (kg/cm <sup>2</sup> )	RQD (%)
Kurtköy	32	27	200	35	0,35	250	350	-	25
Dolgu	4	21	0	26	0,3	80			
Dolgu	3	19	0	23	0,26	15			

**Çizelge A.6 :** Huzurevi istasyon bölgesi hat tünelleri özellikleri [29, 30].

Katman	Der. (m)	Birim Ağ. kN/m <sup>3</sup>	Kohezyon (kPa)	İçsel Sürt. Açısı (°)	Poisson Oranı	Def. Modülü (MPa)	UCS (kg/cm <sup>2</sup> )	Çekme Day. (kg/cm <sup>2</sup> )	RQD (%)
Çok Ayırılmış Kurtköy Ezik zon	25	23	0	32,5	0,3	100	270	-	0

**Çizelge A.7 :** M31-M34 makası ve Gülsuyu bölgesi hat tünelleri özellikleri [29, 30].

Katman	Der. (m)	Birim Ağ. kN/m <sup>3</sup>	Kohezyon (kPa)	İçsel Sürt. Açısı (°)	Poisson Oranı	Def. Modülü (MPa)	UCS (kg/cm <sup>2</sup> )	Çekme Day. (kg/cm <sup>2</sup> )	RQD (%)
Çok Ayırılmış Kurtköy Ezik zon	33	22	68	25	0,3	100	300	-	0

**Çizelge A.8 :** Hastane istasyon bölgesi hat tünelleri özellikleri [29, 30].

Katman	Der. (m)	Birim Ağ. kN/m <sup>3</sup>	Kohezyon (kPa)	İçsel Sürt. Açısı (°)	Poisson Oranı	Def. Modülü (MPa)	UCS (kg/cm <sup>2</sup> )	Çekme Day. (kg/cm <sup>2</sup> )	RQD (%)
Dolayaoba	28	27	400	45	0,28	4000	450	55	70
Dolgu	5	20	0	28	0,3	25	-		
Dolgu	1	19	0	25	0,35	15	-		

**Çizelge A.9 :** M35-M40 makası ve Kartal bölgesi hat tünelleri özellikleri [29, 30].

Katman	Der. (m)	Birim Ağ. kN/m <sup>3</sup>	Kohezyon (kPa)	İçsel Sürt. Açısı (°)	Poisson Oranı	Def. Modülü (MPa)	UCS (kg/cm <sup>2</sup> )	Çekme Day. (kg/cm <sup>2</sup> )	RQD (%)
Dolayoba.	35	27	500	45	0,27	4000	560	55-65	90
Dolgu	2	20	0	28	0,3	25	-	-	-
Dolgu	2	19	0	25	0,3	15	-	-	-

**Çizelge A.10 : M19-M24 & Bostancı istasyon bölgesi Q puanlaması.**

Parametre	Açıklama	Puan	Q Değeri
RQD	İyi	70	
Jn	Bir Çatlak Takımı, rassal	3	
Jr	Süreksiz Çatlak	4	
Ja	Az altere olmuş çatlak duvarı, yumuşak olmayan mineral kaplaması var, kum partikülleri var, kilsiz parlamamış kaya vs.	2	12,320
Jw	Orta akış veya basınç, arada bir çatlak dolgularının yıkanması söz konusudur.	0,66	
SRF	Düşük Gerilme Yüzeye Yakın	2,5	

**Çizelge A.11 : Küçükyalı istasyonu bölgesi Q puanlaması.**

Parametre	Açıklama	Puan	Q Değeri
RQD	Kötü	45	
Jn	İki çatlak takımı	4	
Jr	Pürüzlü veya Düzensiz, Dalgalı	3	
Ja	Siltli veya kumlu kil kaplaması, küçük kil parçaları var (yumuşak olmayan)	3	2,970
Jw	Orta akış veya basınç, arada bir çatlak dolgularının yıkanması	0,66	
SRF	Düşük Gerilme Yüzeye Yakın	2,5	

**Çizelge A.12 : M25-M30 makas bölgesi Q puanlaması.**

Parametre	Açıklama	Puan	Q Değeri
RQD	Orta	50	
Jn	İki çatlak takımı, rassal	6	
Jr	Pürüzlü veya Düzensiz, Dalgalı	3	
Ja	Siltli veya kumlu kil kaplaması, küçük kil parçaları var (yumuşak olmayan)	3	2,200
Jw	Orta akış veya basınç, arada bir çatlak dolgularının yıkanması söz konusudur.	0,66	
SRF	Düşük Gerilme Yüzeye Yakın	2,5	

**Çizelge A.13 : Maltepe istasyonu bölgesi Q puanlaması.**

Parametre	Açıklama	Puan	Q Değeri
RQD	Çok Kötü	25	
Jn	İki çatlak takımı	4	
Jr	Düz, Dalgalı	2	
Ja	Az altere olmuş çatlak duvarı, yumuşak olmayan mineral kaplaması var, kum partikülleri var, kilsiz parlamamış kaya vs.	2	1,650
Jw	Orta akış veya basınç, arada bir çatlak dolgularının yıkanması söz konusudur.	0,66	
SRF	Düşük Gerilme Yüzeye Yakın	2,5	

**Çizelge A.14 : Huzurevi istasyon bölgesi Q puanlaması.**

Parametre	Açıklama	Puan	Q Değeri
RQD	Çok Kötü	10	0,02933
Jn	Dört veya daha fazla çatlak takımı, rassal çok ağır çatlaklı	15	
Jr	Kumlu çakıllı veya kırılmış zon ve kaya duvar kontağını engellemeye yeter kalınlıktadır.	1	
Ja	Oldukça aşırı konsolide olmuş, yumuşak olmayan kil mineralleri dolgusu (sürekli kalınlık 5mm 'den küçük)	6	
Jw	Orta akış veya basınç, arada bir çatlak dolgularının yıkanması söz konusudur.	0,66	
SRF	Düşük Gerilme Yüzeye Yakın	2,5	

**Çizelge A.15 : M31-M34 makası ve Gülsuyu istasyonu bölgesi Q puanlaması.**

Parametre	Açıklama	Puan	Q Değeri
RQD	Çok Kötü	10	0,0978
Jn	Üç çatlak takımı	9	
Jr	Düz, Dalgalı	2	
Ja	Oldukça aşırı konsolide olmuş, yumuşak olmayan kil mineralleri dolgusu (sürekli kalınlık 5mm 'den küçük)	6	
Jw	Orta akış veya basınç, arada bir çatlak dolgularının yıkanması söz konusudur.	0,66	
SRF	Düşük Gerilme Yüzeye Yakın	2,5	

**Çizelge A.16 : Hastane istasyonu bölgesi Q puanlaması.**

Parametre	Açıklama	Puan	Q Değeri
RQD	Orta	70	10,500
Jn	Bir Çatlak Takımı	2	
Jr	Pürüzlü veya Düzensiz, Düz	1,5	
Ja	Az altere olmuş çatlak duvarı, yumuşak olmayan mineral kaplaması var, kum partikülleri var, kilsiz parlanmamış kaya vs.	2	
Jw	Kuru kazı veya çok az akış örn. 5lt/dk	1	
SRF	Düşük Gerilme Yüzeye Yakın	2,5	

**Çizelge A.17 : M35-M40 makası - Kartal istasyon bölgesi Q puanlaması.**

Parametre	Açıklama	Puan	Q Değeri
RQD	Çok İyi	90	
Jn	Bir Çatlak Takımı	2	
Jr	Düz, Dalgalı	2	
Ja	Az altere olmuş çatlak duvarı, yumuşak olmayan mineral kaplaması var, kum partikülleri var, kilsiz parlamamış kaya vs.	2	11,880
Jw	Orta akış veya basınç, arada bir çatlak dolgularının yıkanması söz konusudur.	0,66	
SRF	Düşük Gerilme Yüzeye Yakın	2,5	

**Çizelge A.18 : M19-M24 & Bostancı istasyonu bölgesi RMR puanlaması [29].**

Parametre	Açıklama	Değer	Puan	RMR Puanı	Kaya Sınıfı
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	Deney Sonuçları	39,2	4		
RQD (%)	Sondaj verileri	70	13		
Süreksizlik Aralığı	Sondaj raporları ve saha gözlemleri	200-600	10	52	Orta Kaya
Süreksizlik Özelliği	Ayna raporları	Az pürüzlü yüzeyler	20		
Yeraltı Suyu Koşulları	Az – Orta Etkili	Nemli	10		
Süreksizlik Düzeltmesi	-	Orta	-5		

**Çizelge A.19 : Küçükalyalı istasyonu bölgesi RMR puanlaması [29].**

Parametre	Açıklama	Değer	Puan	RMR Puanı	Kaya Sınıfı
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	Deney Sonuçları	49	4		
RQD (%)	Sondaj verileri	45	8		
Süreksizlik Aralığı	Sondaj raporları ve saha gözlemleri	200-600	10	37	Zayıf Kaya
Süreksizlik Özelliği	Ayna raporları	Az pürüzlü yüzeyler	20		
Yeraltı Suyu Koşulları	Az – Orta Etkili	Islak	7		
Süreksizlik Düzeltmesi	-	Paralel	-12		

**Çizelge A.20 : M25-M30 makası bölgesi RMR puanlaması [29].**

Parametre	Açıklama	Değer	Puan	RMR Puanı	Kaya Sınıfı
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	Deney Sonuçları	58,8	7	45	Orta Kaya
RQD (%)	Sondaj verileri	50	13		
Süreksizlik Aralığı	Sondaj raporları ve saha gözlemleri	200-600	10		
Süreksizlik Özelliği	Ayna raporları	Az pürüzlü yüzeyler	20		
Yeraltı Suyu Koşulları	Az – Orta Etkili	Islak	7		
Süreksizlik Düzeltmesi	-	Paralel	-12		

**Çizelge A.21 : Maltepe istasyonu bölgesi RMR puanlaması [29].**

Parametre	Açıklama	Değer	Puan	RMR Puanı	Kaya Sınıfı
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	Deney Sonuçları	34,3	4	32	Zayıf Kaya
RQD (%)	Sondaj verileri	25	3		
Süreksizlik Aralığı	Sondaj raporları ve saha gözlemleri	200-600	10		
Süreksizlik Özelliği	Ayna raporları	Az pürüzlü yüzeyler	20		
Yeraltı Suyu Koşulları	Az – Orta Etkili	Islak	7		
Süreksizlik Düzeltmesi	-	Paralel	-12		

**Çizelge A.22 : Huzurevi istasyonu bölgesi RMR puanlaması [29].**

Parametre	Açıklama	Değer	Puan	RMR Puanı	Kaya Sınıfı
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	Deney Sonuçları	26,46	4	32	Zayıf Kaya
RQD (%)	Sondaj verileri	0	3		
Süreksizlik Aralığı	Sondaj raporları ve saha gözlemleri	200-600	10		
Süreksizlik Özelliği	Ayna raporları	Az pürüzlü yüzeyler	20		
Yeraltı Suyu Koşulları	Az – Orta Etkili	Islak	7		
Süreksizlik Düzeltmesi	-	Paralel	-12		

**Çizelge A.23 : M31-M34& Gülsuyu istasyonu bölgesi RMR puanlaması [29].**

Parametre	Açıklama	Değer	Puan	RMR Puanı	Kaya Sınıfı
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	Deney Sonuçları	29,4	4	32	Zayıf Kaya
RQD (%)	Sondaj verileri	0	3		
Süreksizlik Aralığı	Sondaj raporları ve saha gözlemleri	200-600	10		
Süreksizlik Özelliği	Ayna raporları	Az pürüzlü yüzeyler	20		
Yeraltı Suyu Koşulları	Az – Orta Etkili	Islak	7		
Süreksizlik Düzeltmesi	-	Paralel	-12		

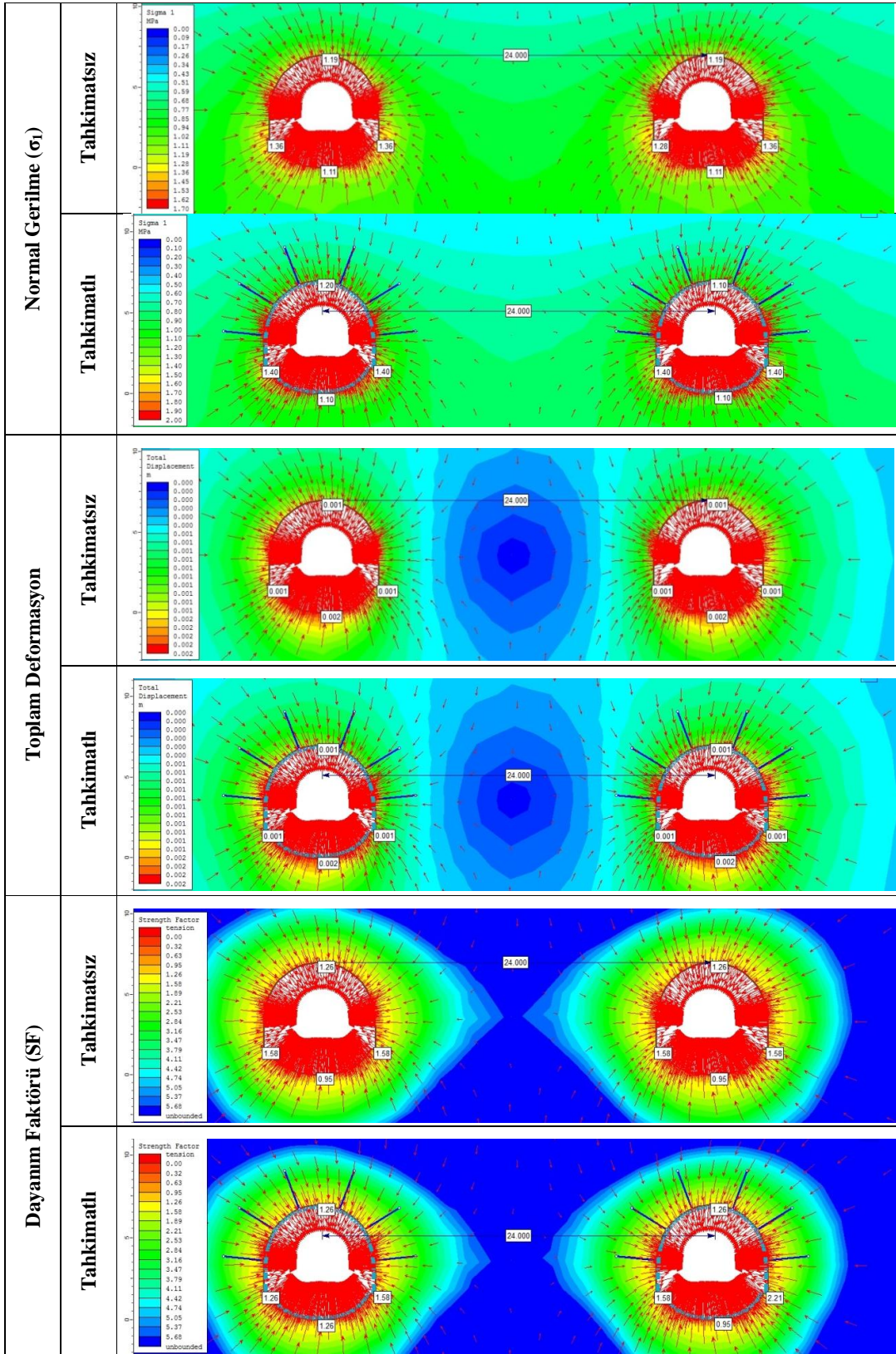
**Çizelge A.24 : Hastane istasyonu bölgesi RMR puanlaması [29].**

Parametre	Açıklama	Değer	Puan	RMR Puanı	Kaya Sınıfı
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	Deney Sonuçları	44,1	4	47	Orta Kaya
RQD (%)	Sondaj verileri	70	13		
Süreksizlik Aralığı	Sondaj raporları ve saha gözlemleri	200	15		
Süreksizlik Özelliği	Ayna raporları	Az pürüzlü yüzeyler	20		
Yeraltı Suyu Koşulları	Az – Orta Etkili	Islak	7		
Süreksizlik Düzeltmesi	-	Paralel	-12		

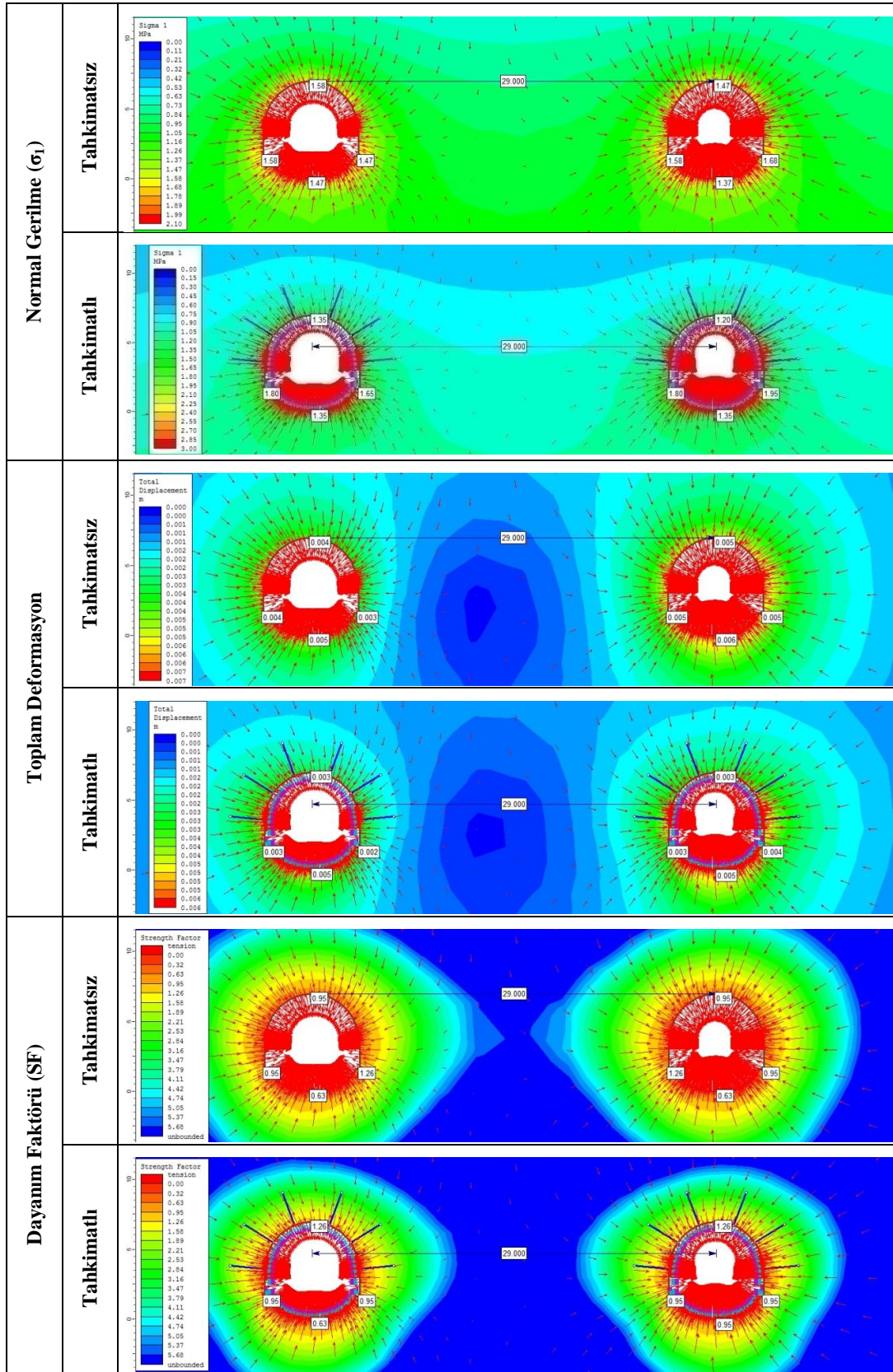
**Çizelge A.25 : M35-M40 makası - Kartal istasyonu bölgesi RMR puanlaması [29].**

Parametre	Açıklama	Değer	Puan	RMR Puanı	Kaya Sınıfı
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	Deney Sonuçları	54,88	7	67	İyi Kaya
RQD (%)	Sondaj verileri	90	20		
Süreksizlik Aralığı	Sondaj raporları ve saha gözlemleri	400	10		
Süreksizlik Özelliği	Ayna raporları	Az pürüzlü yüzeyler	25		
Yeraltı Suyu Koşulları	Az Etkili	Kuru	15		
Süreksizlik Düzeltmesi	-	Paralel	-10		

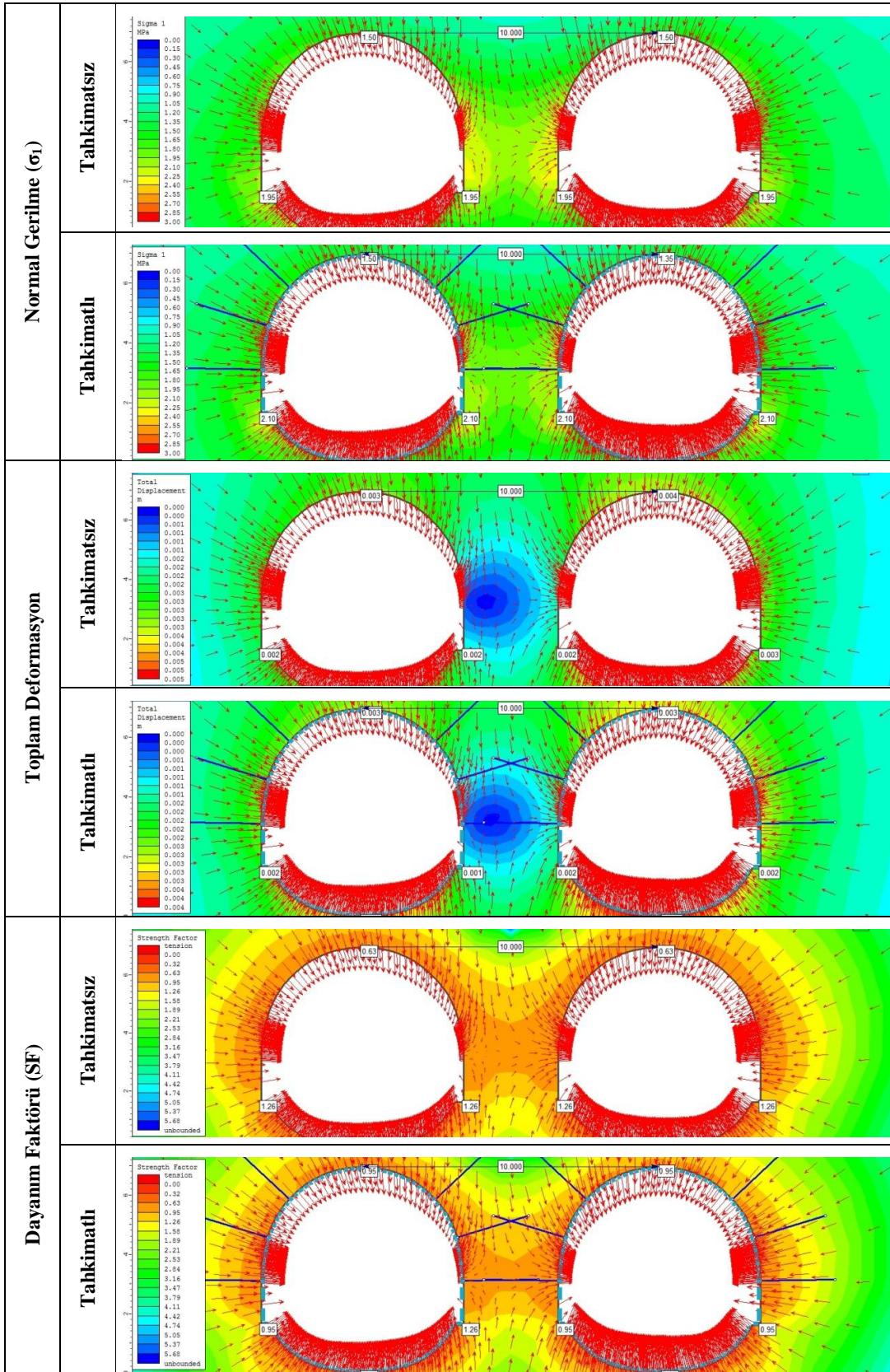
**EK B: Bölüm 7'ye ait çizelgeler**



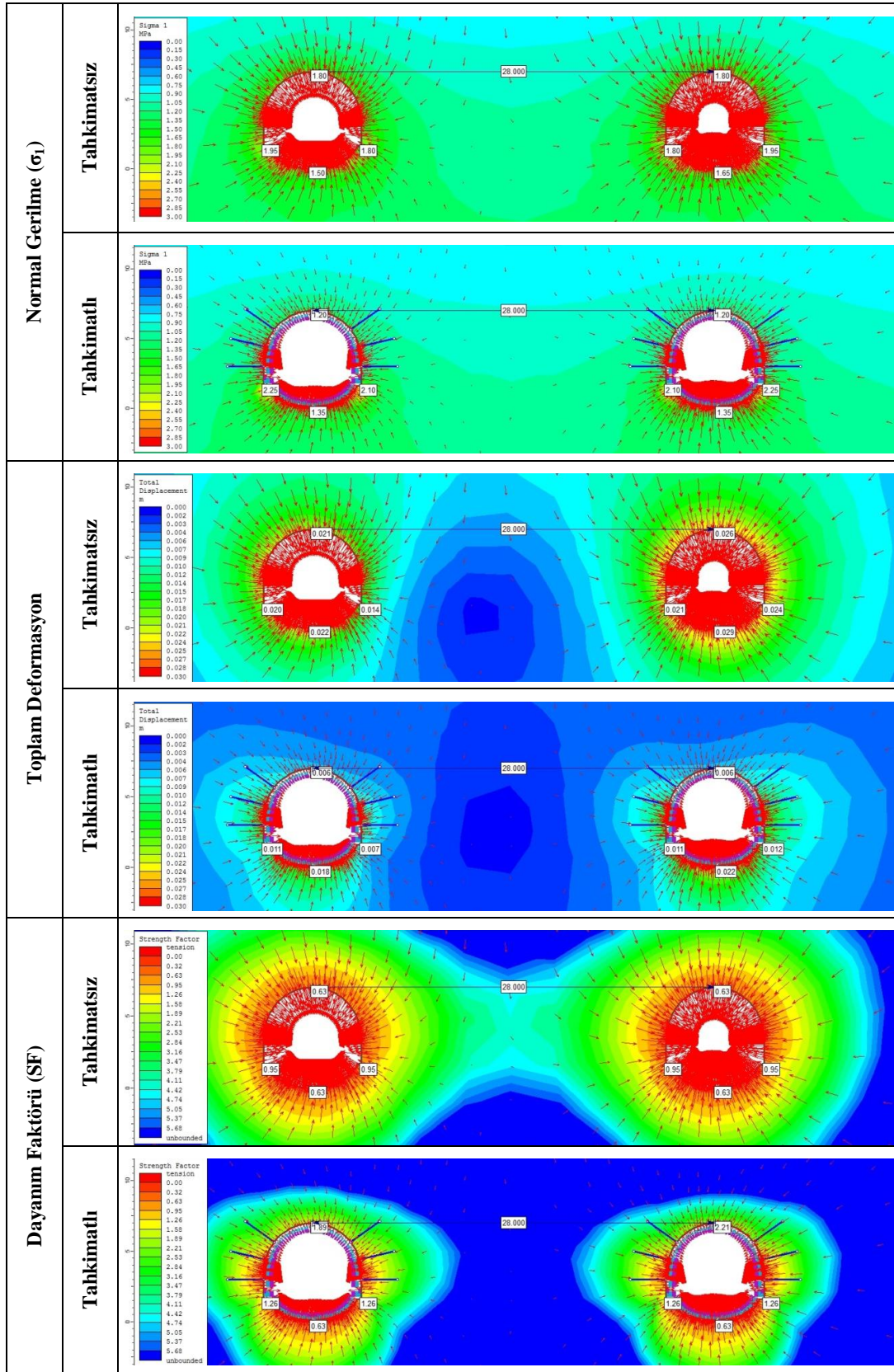
**Şekil B.1 : Kartal formasyonu - Bostancı bölgesi.**



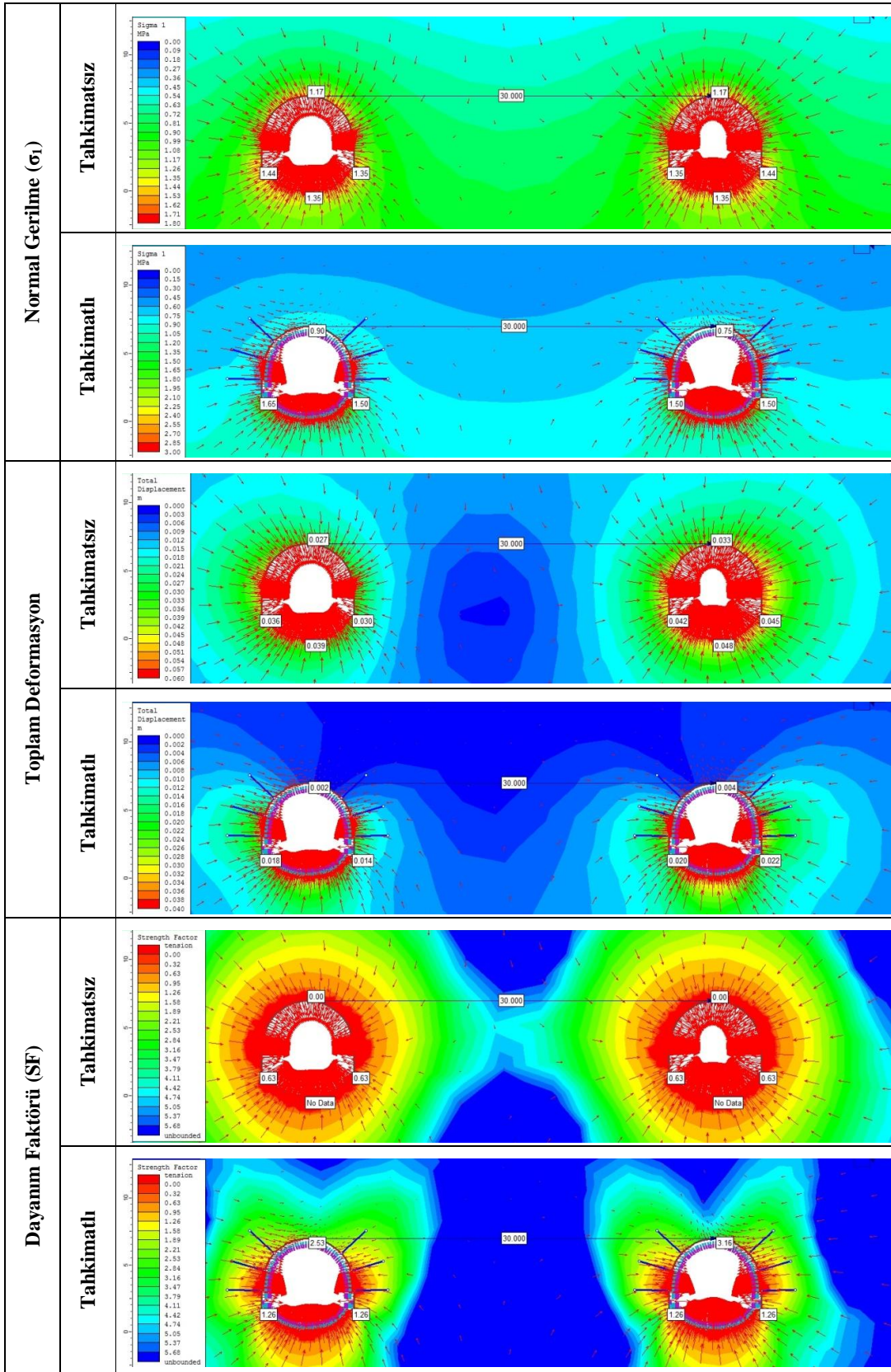
Şekil B.2 : Kurtköy formasyonu - Küçükyaılı bölgesi.



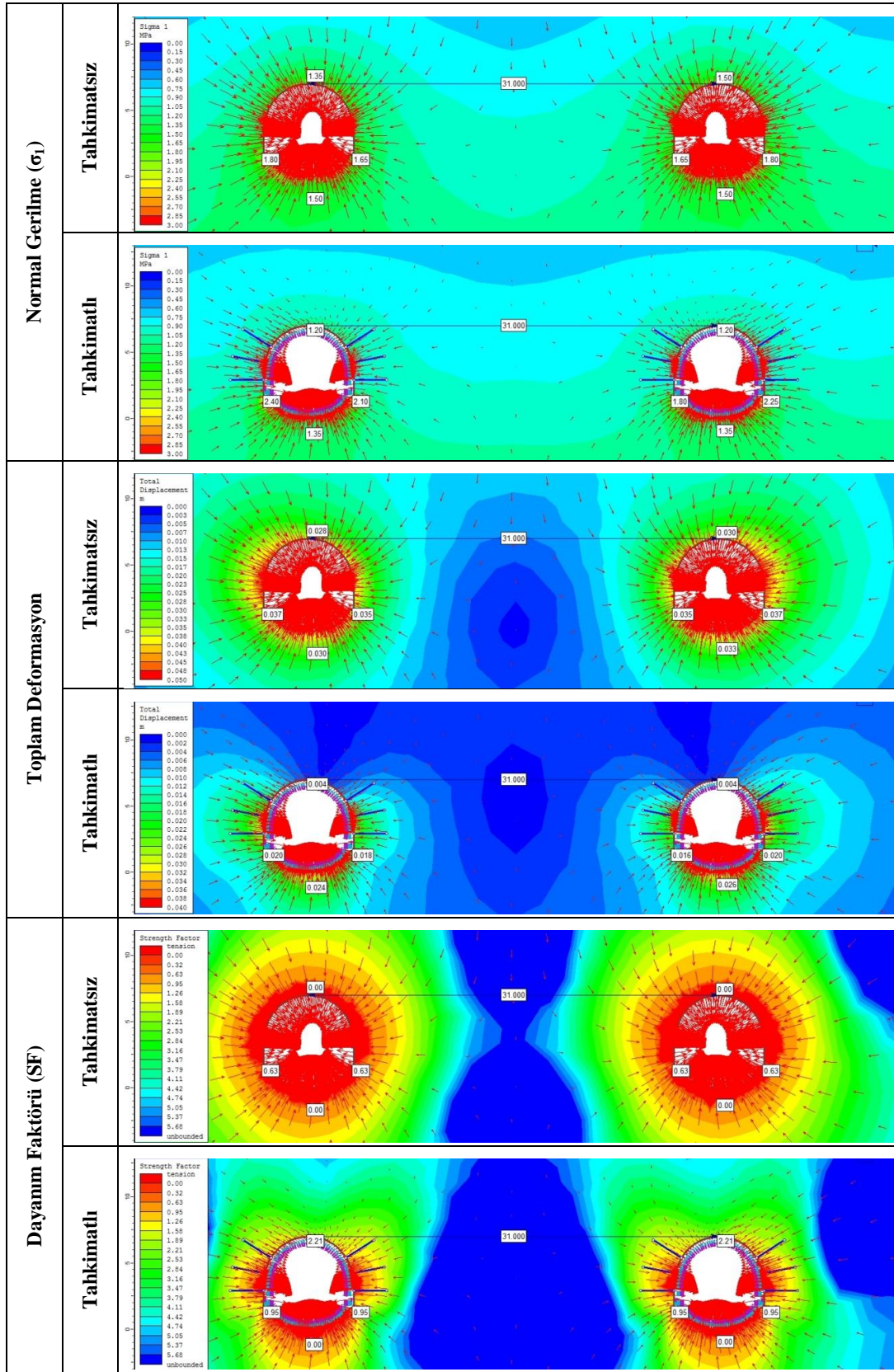
Şekil B.3 : Kurtköy formasyonu – M25-M30 bölgesi.



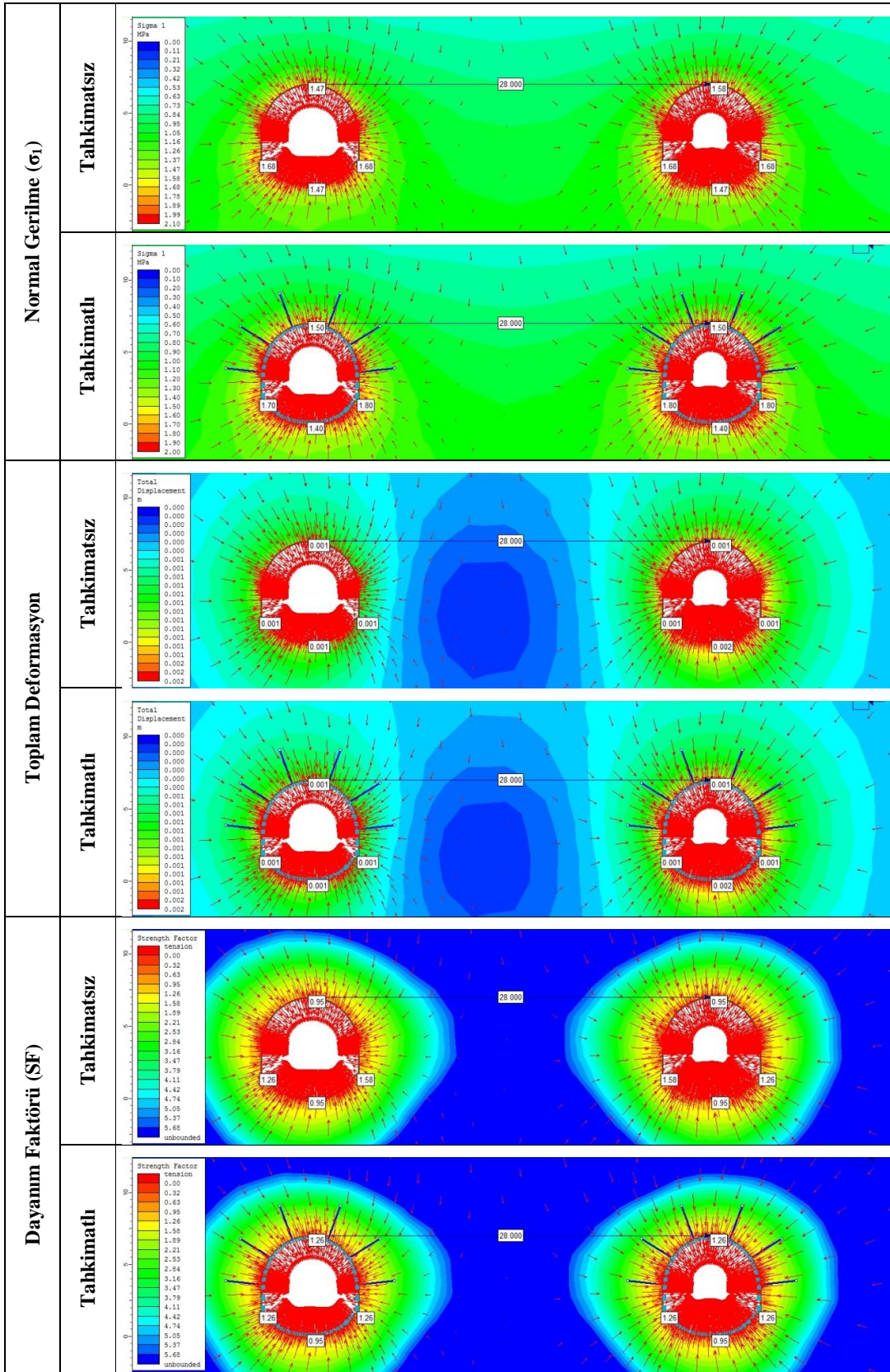
Şekil B.4 : Kurtköy formasyonu – Maltepe istasyon bölgesi.



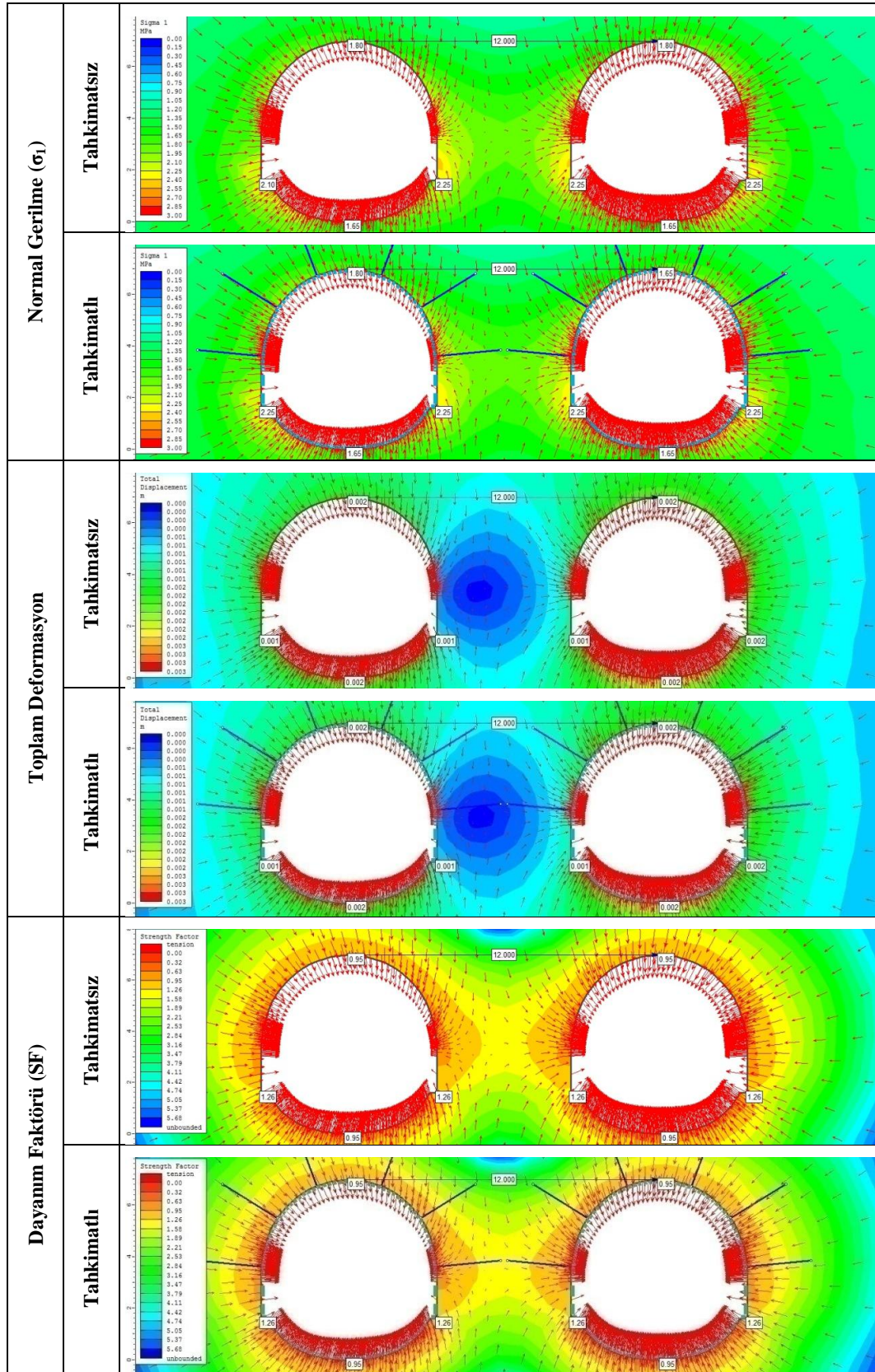
Şekil B.5 : Kurtköy formasyonu – Huzurevi istasyon bölgesi.



Şekil B.6 : Kurtköy formasyonu – Gülsuyu istasyon bölgesi.



Şekil B.7 : Dolayoba formasyonu – Hastane istasyon bölgesi.



Şekil B.8 : Dolayoba formasyonu – Kartal makas bölgesi.



## ÖZGEÇMİŞ



**Ad Soyad:** Emrah Şimdi

**Doğum Yeri ve Tarihi:** 25.07.1984 Mardin

**Adres:** Çakmak Mah. Uzun Ayna Cad. Burak Apt. No:26 D:2 Ümraniye İstanbul

**E-Posta:** emrah.simdi@gmail.com

**Lisans:** Dokuz Eylül Üniversitesi Maden Mühendisliği - 2006

### **Mesleki Deneyim ve Ödüller:**

2006 – 2008, İzmir Metro su İnşaatı, Saha Mühendisi, ATAÇ İnş. San. A.Ş., İzmir

2008 – 2013, Kadıköy Kartal Metro su İnşaatı, Kesin Hesap Mühendisi, Avrasya Metro Grubu, İstanbul

2013 – Devam ediyor, Yeni Bakü Limanı İnşaatı, Planlama ve Hakediş Kontrol Mühendisi, STFA – ECAP Mühendislik, Bakü, Azerbaycan.

### **YayınListesi:**

Ozturk, C.A., Simdi, E., 2012. Subway project in Istanbul, Turkey. In Proc. 46<sup>th</sup> US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium (ARMA 2012), Chicago, USA.