

## Çatalağzı Termik Santralı Kül İletim Tünelinde Tahkimat Uygulamalarının Değerlendirilmesi

A. Özarslan & M. Geniş

Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak

Ç. Alkılıç

Devlet Su İşleri Zonguldak Şube Müdürlüğü, Zonguldak

D. Acun

Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak

**ÖZET:** Zonguldak'ta işletilen Çatalağzı termik santralında günde yaklaşık 2000 ton oluşan artık kül denize deşarj edilmektedir. Bu çevresel sorunun önlenmesi amacıyla kül barajı inşaatı projesi gerçekleştirilmektedir. Kül nakliyatının sağlanabilmesi için termik santral ile kül barajı arasında 885 m uzunluğunda atnalı kesit şeklinde bir tünel açılmıştır. Bu çalışmada, tünel bölgesinin jeolojik, hidrojeolojik ve jeoteknik özellikleri incelenmiştir. Tünel güzergahı yapısal bölgelere ayrılıp kaya kütle kalite belirteci (RMR) sınıfları belirlenmiştir. Tünel açıklığının duraylılık değerlendirmeleri için sayısal gerilme çözümlenmeleri yapılmıştır. Gerilme çözümlenmeleri için iki boyutlu sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Sonuçta, elde edilen bilgiler doğrultusunda tahkimat uygulamaları değerlendirilmiştir.

**ABSTRACT:** Approximately 2000 tpd of ash produced by Çatalağzı Coal Power Station in Zonguldak is discharged into the sea. In order to overcome this environmental problem, an ash dam project is put into application. A tunnel with horseshoe cross-section and 885 m in length is opened to provide transportation of ash between power station and ash dam. In this study, geological, hydrogeological and geotechnical properties of the tunnel area are investigated. The tunnel route is divided into structural zones and rock mass rating (RMR) classifications are determined. Numerical stress analyses are carried out for assessment of tunnel stability. A two dimensional finite element programme has been utilised for stress analysis. Finally, support applications have been analysed according to these findings.

### 1 GİRİŞ

Çatalağzı Termik Santralı Zonguldak il merkezinin 15 km doğusunda Karadeniz kıyısında yer almaktadır. Santrale ulaşım, Zonguldak-Filyos karayolu ve Zonguldak-Ankara demiryolu ile sağlanmaktadır. Ayrıca termik santralın Balı kıyısında bir liman bulunmaktadır. Toplam Kurulu gücü 129 MW olan Çatalağzı A termik santralı ekonomik ömrünü doldurduğu gerekçesiyle 1991 yılında servis dışı bırakılmıştır. Çatalağzı A termik santralının yanına kurulan Çatalağzı B termik santralı toplam 300 MW (2x150 MW) kurulu gücündedir (Çınar 2001).

Çatalağzı B termik santralının iki ünitesinde, Türkiye Taşkömürü Kurumuna ait Zonguldak ve Çatalağzı Filtrasyon tesisleri ürünü olan 1.5 milyon ton/yıl taşkömürü artığı yakılmaktadır. Yakma işleminde kullanılan yüksek kül oranına sahip (%45-50) kömürden yılda yaklaşık 650 bin ton kül ve cüruf açığa çıkmaktadır. Termik santralden çıkan

karışımın yaklaşık %15'i cüruf ve %85'i külden oluşmaktadır.

Çatalağzı B termik santralinde kazanlarda kömür yanması sonucu açığa çıkan kül-cüruf mevcut sistemde deniz suyu ile yaklaşık 1/10 oranında karıştırılarak kanallar aracılığıyla kıyıdan denize boşaltılmaktadır. Kül ve cüruf artıklarının kanallar aracılığıyla denize dökülmesi sonucunda içindeki %6-7 oranında sudan hafif yüzen kısmı deniz yüzeyinde fiziksel bir kirlilik oluşturmaktadır. Kirlenme deniz yüzeyinde askıda kül zerrecikleri şeklinde görülmektedir. Akıntı ve rüzgarın etkisiyle kirlenme boşaltma bölgesinden yaklaşık 25-30'ar km'lik sahil bandına ve deniz üzerinde 5-6 mil açığa kadar yayılmaktadır.

Termik santralden kaynaklanan bu olumsuzlukların önlenmesi için çalışmalar başlatılmış ve çeşitli düzenli depolama yöntemleri incelenmiştir. Bu doğrultuda olası depolama yöntemleri olarak; derin deniz deşarjı, denizden kazanılan alanda depolama, vadide atık barajı oluşturulması, yöntemleri araştırılmıştır. Depolama





Tünel güzergahı ile yakın çevresindeki formasyonlar genelde Doğu-Batı doğrultusunda olup eğimleri ise kuzeye doğrudur. Tabaka eğimleri 10-70° arasında değişkenlik göstermektedir. Eğim açıları tünel giriş ağzından çıkış ağzına doğru greceli olarak artış göstermekte. Tünel içerisinde gözlemlenen süreksizlik sistemleri genellikle tünel eksenine paralel veya vevv doğrultuludur. Süreksizlik eğimleri 50-90° arasında değişkenlik göstermektedir. Tünel güzergahı boyunca gözlemlenen süreksizlik aralığı genelde 0.6-2 m, yer yer 2 m'den fazla değerler almaktadır.

### 3.2 Hidrojeoloji

İletim tüneli kazısı esnasında özellikle fay, kırık ve çatlak zonlarından gelen su akma ve sızıntılarına rastlanılmıştır. Jeolojik gözlemler sonucu Gökçetepe, Tasmaca ve Sapça Formasyonlarının geçirimsiz-yarı geçirimli özellikte olduğu sonucuna varılmıştır. Tünel kazısında, tavanda ve yan duvarlarda gözlemlenen kırık süreksizliklerinden yer yer su akmaları tespit edilmiştir. Tünelin 830 ile 855 m'leri arasında önemli miktarlarda su geliri gözlemlenmiştir. Genel olarak tünelde karşılaşılan yeraltı suyu koşulları II, III, IV nolu yapısal bölgelerde nemli, I, V, VI nolu bölgelerde ıslak ve VII nolu bölgede damlama şeklinde sınıflandırılmaktadır.

### 3.3 Kaya Kütesinin Mühendislik Özellikleri

Kaya kütesinin mühendislik özelliklerinin kestiriminde tünelcilik ve madencilik uygulamalarında RMR ve Q kaya kütesi sınıflandırma sistemleri yaygın kullanım alanı bulmaktadır. RMR (rock mass rating) kaya kütesi sınıflama sistemi Bieniawski (1973) tarafından geliştirilmiş olup kazanılan deneyimler çerçevesinde son şeklini 1989 yılında almıştır. Bu sisteme göre kaya kütlelerinin sınıflandırılmasında; kayaç malzemesinin dayanımı, kayaç kalitesi göstergesi (RQD), süreksizlik aralığı, süreksizliklerin durumu, yeraltı suyu koşulları ve süreksizliklerin yönelimine göre düzeltilmiş değerlerinden yararlanılmaktadır.

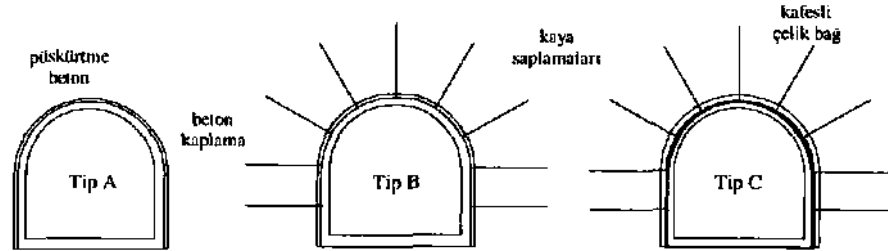
Ayrıca, özellikle madencilik uygulamalarında, patlatma, yerindeki gerilmeler ve fayların durumu gibi faktörler de dikkate alınarak ilave düzeltmelerin yapılması önerilmektedir. Kaya kütesine ait mekanik özelliklerin kestiriminde kullanılan görgül bağıntılarda süreksizlik yönelimi için düzeltme yapılmamış toplam temel RMR değeri, yeraltı açıklıklarının duraylılığıyla ilgili görgül bağıntılarda ise düzeltilmiş nihai RMR değerlerinin kullanılması önerilmektedir (Ulusay & Sönmez 2002).

Araziden alınan kaya bloklarından laboratuvar koşullarında kaya malzemesi örnekleri alınıp ISRM standardına uygun deneyler yapılmıştır. Çalışmada, tünel güzergahı yedi adet yapısal bölgelere ayrılmış olup RMR sınıflama sisteminin girdi parametreleri her bölge için ayrı ayrı belirlenmiştir (Çiz. 1).

## 4 TAHKİMAT UYGULAMALARI

Ulaşım tünelinin tipi atnalı kesit şeklinde olup toplam tünel uzunluğu 885 m dir. Tahkimat elemanları açıklığın çevresel koşullarına bağlı olarak; püskürtme beton, çelik hasır, çimento dolgulu kaya saplamaları, kafesli çelik bağ ve kalıp betondan oluşmuştur. İletim tüneli kazısı esnasında jeolojik birimlerin kaya kütesi özellikleri göz önünde bulundurularak uygun tahkimat sistemleri belirlenmiştir. Buna göre tünelde projelendirilmesi yapılmış olan Tip A, Tip B ve Tip C tahkimat sistemleri uygulanmıştır (Şek. 3).

Püskürtme beton genelde tünel tahkimatının ilk destekleme elemanını oluşturmaktadır. Kül iletim tünelinde püskürtme beton kuru karışım yöntemi şeklinde uygulanmıştır. Bu yöntemde, tasarıma göre belirlenen miktarlarda hazırlanan çimento, hafifçe (%2 ile 6 oranında) nemlendirilmiş kum ve çakıl ile susuz ortamda karıştırılarak elde edilen kuru karışım püskürtme beton makinesine beslenir. Karışım, buradan basınçlı hava yardımı ile özel iletim hortumuna aktarılır, iletim hortumu ucundaki püskürtme beton tabancasında (nozül) püskürtme suyu ile karıştırılarak, uygulanacak yüzeye yüksek hızla püskürtülür (Yurdakul & Gerçek 2002).



Şekil 3. Tünelde uygulanan farklı tahkimat sistemleri.

Çizelge 1. Tünel güzergahında yapısal bölgelere ait RMR kaya kütleli sınıflandırma değiştirgeleri ve puanlar.

Yapısal bölge	i	II	III	IV	V	VI	VII
Kayaç malzemesinin basınç dayanımı	50-100 MPa (7)	50-100 MPa (7)	50-100 MPa (7)	50-100 MPa (7)	25-50 MPa (14)	25-50 MPa (4)	25-50 MPa (4)
RQD kayak.iliie göstergesi	%70 (14)	%90 (18)	%90 (18)	%95 (19)	%70 (14)	%40 (B)	%25-50 (8)
Süreksizlik aralığı	0.6-2m (15)	0.6-2 m (15)	0.6-2 in (15)	> 2 m (20)	> 2 m (15)	0.2-0.6 m (10)	0.2-0.6 m (10)
Süreksizliklerin durumu	(25)	(25)	(25)	(25)	(10)	(0)	(0)
Yeraltı suyu koşulları	ıslak (17)	nemli (10)	nemli (10)	nemli (10)	ıslak (7)	ıslak (17)	damlama (4)
Temel RMR puanı	68	75	75	81	50	29	26
Süreksizlik yönelimine göre düze İlme	uygun değil (-10)	uygun değil (-10)	çok uygun (0)	uygun değil (-10)	çok uygun (0)	çok uygun (0)	çok uygun (0)
Nİhn i RMR puanı	58	65	75	71	51	29	26
Kaya sınıfı	ofta	m	m	m	arta	zayıf	zayıf
Uygulanan tahkimat tim	TipC	Tip B	Tip B	Tip A	TipB	TipB	TipC

\* Değiştirgelere ait puanlar parantez içinde verilmiştir

Yapısal bölgeler ve jeolojik formasyonlar:

I. (I, III Gökçetce formasyonu (Krg). 0-21 m (I), 21-265 m (II), 265-290 m (III), 290-558 m (IV)

V Tasmaca formasyonu (Krt), 558-621 m (V)

VI, VII Sapça formasyonu (Krs), 621-809 m (VI), 809-885 m (VII)

Genelde püskürtme beton çelik hasır ile birlikte uygulanmaktadır. Çatalağzı kül iletim tüneline çelik hasır ile birlikte Tip A tahkimatında 5 cm. Tip B'de 10 cm ve Tip C'de 20 cm kalınlığında püskürtme beton uygulanmıştır.

Dolgu veya çimentolu kaya saplamları tünelcilikte yaygın kullanılan saplama türleridir. Diğer saplama türlerine kıyasla daha ekonomiktir ve uygulanması kolaydır. Nervürlü çelikten imal edilen dolgu kaya saplamları delik içerisine itilmekte ve çimento karışımı enjeksiyon malzemesinin katılaşması ile sabitleşmektedir. Taşıyıcı plakalar somun ile sıkılarak püskürtme beton kabuğunun yüzeyine bastırılır ve kabuğun doğal arazi kemeri ile birlikte çalışması sağlanmaktadır. Çelik hasır, kaya kütleli yoğun olarak eklemeler içeriyorsa, küçük kaya blokları ve parçaların sökülmesi veya dökülmesine karşılık kaya saplamlarının plakaları arasına döşenmektedir (Gerçek 2004). Kül iletim tüneline Tip B ve C tahkimatında çimentolu kaya saplamları kullanılmıştır. Kaya saplamları şebek düzeninde bir sırada 9 adet diğer sırada 10 adet olmak üzere yerleştin İmiş ür. 4 m uzunluktaki kaya saplamları 1.5 m aralıklı olarak yerleştirilmiştir. Tünelde zayıf çevre kaya kütleli koşullarında yer yer tabana yakın yan duvarlarda saplama uygulanmıştır.

Tünel inşaatlarında ihtiyaç duyulması durumunda çelik tahkimat olarak kafesli çelik bağlar kullanılmaktadır. Kafesli çelik bağlar üç adet nervürlü çelik ve bunları birleştiren bağlantı elemanlarından oluşmaktadır. Tünel içerisinde parça şeklindeki kafesli çelik bağlar civata-somun aracılığıyla birbirine bağlanmaktadır. Kurulan

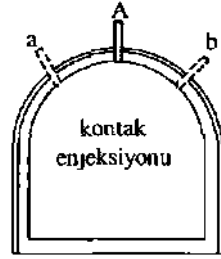
bağların birbirine irtibatlandırılması da nervürlü çubuklar aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Tünel girişinde ilk 20 m'de ve Sapça formasyonu içerisinde uygulanan Tip C tahkimatında dört parçalı kafesli çelik bağlar kullanılmıştır. Genelde 1.5 m aralıklı olarak yerleştirilen bağlarda çevre kayacın koşullara bağlı olarak bağ aralığı yer yer 0.75 m'ye kadar azaltılmıştır.

Çelik sürenler, tünel kazı işlerinde gerekli olabilen kazı öncesi destekleme elemanını oluşturmaktadır. Çelik sürenler, kazıyı takiben aşırı sökülme, çökme veya malzeme akmasına elverişli kaya koşullarında uygulanmaktadır. Çelik bağ tahkimatı ile bağlantılı olan süren elemanları, çevresel koşullara bağlı olarak yerel veya sistematik olarak uygulanabilmektedir. Yaygın olarak çelik borular veya nervürlü çelik çubuklar kullanılmaktadır (Yüksel Proje 2004). Kül iletim tüneline içi boş çelik borular süren olarak kullanılmıştır. Sürenler çelik kafesli bağ üzerinden yatayla en fazla 5-10° açı yapacak biçimde yerleştirilmiş ve iç boşluğa çimento enjeksiyonu yapılmıştır. C tipi tahkimatta çevre kaya koşullarına bağlı olarak 6 m uzunlukta, 10-20 adet süren açıklığın tavan bölgesinde uygulanmıştır.

Kalıp beton, tünellerde kalıcı destekleme elemanını oluşturmaktadır. Genellikle beton dökümü, geçici destekleme elemanları ile takviye edilmiş, tünel açıklığında deformasyonların ihmal edilecek düzeye inmesinden sonra gerçekleştirilmektedir. Çatalağzı Termik Santrali kül iletim tüneline kullanılan kaplama betonu BS 25

sınıfında olup kaplama betonu kalınlığı 40 cm olarak uygulanmıştır.

iletim tüneli boyunca kaplama betonu ile kaya arasında var olan boşlukları doldurmak amacıyla kontak enjeksiyonları yapılmıştır. Kontak enjeksiyonları için açılan 46 mm çapındaki delikler, beton dökülürken bırakılan borular içinden delinmiştir. Kontak deliklerinin boyu, kaplama betonu ve kazı boşluğunu aşacak şekilde en az 15 cm uzunlukta seçilmiştir. Kontak enjeksiyonları 3 m kesit aralığında şerbeş olarak açılan delikler içerisinde yapılmıştır. Tünel güzergahı boyunca toplam 194 kesitle 441 adet kontak enjeksiyon sondajı açılmıştır. Şerbeş düzeninde tavanda bir adet (A) veya sol üst yan ile sağ üst yan olmak üzere iki adet (a, b) enjeksiyon deliği açılmıştır (Şek. 4). Uygulanan enjeksiyon basınçları 2.1 kg/cm civarında gerçekleşmiştir. Tünel içinde ayrıca 35 adet kontrol ve 22 adet karotlu kontrol enjeksiyon sondajları açılarak enjeksiyonları yapılmıştır. Roald vd (2002) enjeksiyon işlemlerinin kaya kütlesi kalitesinde kuru koşullarda bir, ıslak koşullarda ıki veya uç sınıf iyileşmesini sağlayabileceğini belirtmektedirler



Şekil 4. Tünelde kontak enjeksiyonu uygulaması

Çatalağzı termik santrali iletim tüneline Sapça Formasyonu içerisinde çevre kayanın zayıf ve su gelirinini fazla olması nedeniyle 821-885 metre'leri arasında konsolidasyon enjeksiyonları yapılmıştır. Konsolidasyon enjeksiyonları ile açıklık çevresinde zayıf kaya kütlesi Özelliklerinin iyileştirilmesi ve su gelirinini sınırlandırılması hedeflenmiştir. Bu amaçla toplam 134 adet konsolidasyon enjeksiyon sondajı açılmıştır. Her bir kesitle 6 adet olarak açılan enjeksiyon sondajlarının boylan 2.5 m seçilmiştir. Kul iletim tüneline tüm enjeksiyon işlemleri bitirildikten sonra tünelde her 6 m'de bir olmak üzere drenaj kanalı içerisinde 5 m boyunda basınç düşürme sondajları yapılmıştır. Bütün delikler

açıldıktan sonra kuyulara 50 mm çapında delikli borular yerleştirilmiştir (Alkılıç 2004)

Kül iletim tüneline uygulanan tahkimat sistemi ile RMR sistemi tahkimat önerilerinin bir karşılaştırılması Çizelge 2'de verilmiştir. Karşılaştırmada, RMR tahkimat önerileri arasında da yer almaması nedeniyle, uygulanan tahkimat sisteminde kaplama betonu ve enjeksiyon işlemleri göz önünde bulundurulmamıştır. Gökçetepe formasyonunda I nolu yapısal bölgenin tünel girişini oluşturması nedeniyle Tip C tahkimatı uygulanmıştır. II ve İÜ nolu yapısal bölgelerde ise belirlenen kaya kütlesi sınıfına kıyasla daha yoğun bir tahkimat sistemi kullanılmıştır. IV nolu bölgede ise önerilen ve uygulanan Tip A tahkimat sistemi benzerlik göstermektedir. Tasmaca formasyonunda orta kaya sınıfını temsil eden yapısal bölgede önerilen ve uygulanan tahkimat sistemleri ortuşmektedir. En zayıf kaya kütlesi koşullarını temsil eden Sapça formasyonunda yer alan VI ve VII nolu yapısal bölgelerde uygulanan Tip C tahkimatı ile önerilen tahkimat sistemi uyum içerisinde bulunmaktadır.

Genel olarak incelendiğinde kül iletim tüneline uygulanan tahkimat sistemi ile RMR sistemi tahkimat önerilerinin önemli ölçüde örtüşürüğü görülmektedir. RMR sisteminde kullanılan on tasarım amaçlı tahkimat sistemleri seçim kılavuzu delme-patlatma yöntemi ile açılmış atnalı kesit şeklindeki 10 m genişliğindeki tüneller için önerilmiştir. Kül iletim tüneline uygulanan kazı yöntemi ve kesit şekli uyumlu olmasına karşın, tünel genişliği daha dardır. Bu durumda aynı kaya kütlesi koşullarında seçim kılavuzunda yer alan tahkimat önerileri bir nevi en fazla tahkimat gereksinimini temsil etmektedir. Bu açıdan değerlendirildiğinde özellikle Gökçetepe formasyonunda yer alan II ve III nolu yapısal bölgelerde fazla tahkimat boyuLandırmasına gidildiği söylenebilmektedir. Tünel içerisinde gerçekleştirilen gözlemler de bu durumu doğrulamaktadır.

Kul iletim tüneline Tasmaca ve Sapça formasyonları içerisinde taban betonda yer yer kılcal çatlaklar oluşmuştur. Bu çatlaklar özellikle VII nolu yapısal bölgede yoğunlaşmıştır. Bu durumda açıklık çevresindeki su gelirinini önemli rol aldığı tahmin edilmiştir. Tünel güzergahı boyunca yapılan kontak enjeksiyonları, en olumsuz durumu temsil eden VII nolu yapısal bölgede gerçekleştirilen konsolidasyon enjeksiyonları ve ilave su drenajı önlemlerinin de etkisiyle, beton kaplamada ilave çatlak gelişmesi veya mevcut çatlakların genişlemesi durumları gözlemlenmemiştir. Mevcut durumda tünelde ilave bir duraylılık sorunu ile karşılaşılman ıştır.

Çizelge 2 Tünelde uygulanan tahkimat sistemi ile RMR sistemi tahkimat önerilerinin karşılaştırılması

Yıpsal Bölge	Önerilen tahkimat sistemi (RMR)	Tu ne ile uygulanan tahkimat sistemi
I (0-21 m) Gökçetepe formasyonu Kaya sınıfı orta (Nihai RMR =58)	3 4 m uzunlukta 1 5 2 m aralıklı sistematik kaya saplamaları kemer tavanında çelik hasır kemer tavanında 5 10 cm ve yan duvarlarda 3 im puskürtme beton, çelik bağ desteği yok	kemer tavanında ve yan duvarlarda 1 5 m aralıkta çelik hasırla birlikte şeşbeş düzende sistematik çimento dolgulu 4 m uzunlukta kaya saplamaları gerektiğinde 4 m boyunda taban saplamaları kafesli çelik bağ ile birlikte toplam 20 cm kalnlığında puskürtme betoa gerektiğinde kemer ve yan duvarlarda çelik süren uygulaması
II (21 265 m) Gökçetepe formasyonu Kaya sınıfı iyi (Nihai RMR =65)	kemer tavanının her 2 3 m'sinde çelik hasır ile birlikte 2 2 5 m aralıklı yer yer kaya saplamaları gerektiğinde Livan kemerinde 5 cm kalnlığında puskürtme beton çelik bağ desieği yok	kemer tavanında ve yan duvarlarda 1 5 m aralıkla çelik hasırla birlikte şeşbeş düzende sistematik çimento dolgulu 4 m uzunlukta kaya saplamaları. lunel açıklığı çevresinde 10 cm kalnlığında puskürtme beton, kafesli çelik bağ desteği yok
III (265 290 m) Gökçetepe formasyonu Kaya sınıfı iyi (Nihai RMR =75)	kemer tavanının her 2 3 m sinde çelik hasır ile birlikte 2 2 5 m aralıklı yer yer kaya saplamaları gerektiğinde tavan kemerinde 5 cm kalnlığında puskürtme beton çelik bağ desteği yok	kemer tavanında ve yan duvarlarda 1 5 m aralıkta çelrk hasırla birlikte şeşbeş düzende sistematik çimento dolgulu 4 m uzunlukta kaya saplamaları tünel açıklığı çevresinde 10 cm kalnlığında puskürtme beton, kafesli çelik bağ desteği yok
IV (290 558 m) Gökçetepe formasyonu Kaya sınıfı iyi (Nihai RMR=71)	tavan kemerinin her 2 3 m sinde çelik hasır ile birlikte 2 2 5 m aralıklı yer yer kaya saplamaları gerektiğinde tavan kemerinde 5 cm kalnlığında puskürtme beton, çelik bağ desteği yok	kaya saplaması yok lunel açıklığı çevresinde 5 cm kalnlığında puskürtme beton, çelik bağ desteği yok
V (558 621 m) Tasmaca formasyonu Kaya sınıfı orla (Nihai RMR-50)	3 4 m uzunlukla I 5 2 m aralıklı sistematik kaya saplamaları tavan kemerinde çelik hasır tavan kemerinde 5 10 cm ve yan duvarlarda 3 cm kalnlığında puskürtme beton çelik bağ desteği yok	kemer tavanında ve yan duvarlarda 1 5 m aralıkla çelik hasırla birlikte şeşbeş düzende sistematik çimento dolgulu 4 m uzunlukta kaya saplamaları tünel açıklığı çevresinde 10 cm kalnlığında puskürtme beton kafesli çelik bağ desteği yok
VI (621 809 m) ânpa formasyonu Kaya sınıfı zayıf (Nihai RMR =29)	çelik hasır ile birlikte kemer tavanı ve yan duvarlarda 1 1 5 m aralıklı 4-5 m uzunlukta sistematik kaya saplamaları kemer (ava nında 10 15 cm ve yan duvarlarda 10 cm kalnlığında puskürtme beton gerekli yerlerde 1 5 m aralıklı hafif protill çelik bağ tahkimatı	kemer tavanında ve yan duvarlarda 1 5 m aralıkla çelik hasırla birlikte şeşbeş düzende sistematik çimento dolgulu 4 m uzunlukta kaya saplamaları gerektiğinde 4 m boyunda taban saplamaları tunc! açıklığı çevresinde 0 75 1 5 m aralıklı kafesli çelik bağ 20 cm kalnlığında puskürtme beton, gerektiğinde kemer ve yan duvarlarda çelik süren uygulaması
VII (809 885 m) Sapça formasyonu Kaya sınıfı zayıf (Nihai RMR =26)	çelik hasır ile birlikte kemer tavanı ve yan duvarlarda 1 1 5 m aralıklı 4-5 m uzunlukta sistematik kaya saplamaları kemer tavanında 10 15 cm ve yan duvarlarda 10 cm kalnlığında puskürtme beton gerekli yerlerde 1 5 m aralıklı hafif profilli çelik bağ tahkimat	kemer tavanında ve yan duvarlarda 1 5 m aralıkta çelik hasırla birlikte şesbes düzende sistematik çimento dolgulu 4 m uzunlukta kaya saplamaları gerektiğinde 4 m boyunda taban saplamaları tünel açıklığı çevresinde 0 75 1 5 m aralıklı kafesli çelik bağ toplam 20 cm kalnlığında puskürtme beton gerektiğinde kemer ve yan duvarlarda çelik süren uygulaması

## 5 DURAYLILIK ÇÖZÜMLEMELERİ

Çalışmada duraylılık çözümlerleri için iki boyutlu sonlu elemanlar bilgisayar programı PHASE 2D 5.0 (Rocscience, 2004) kullanılmıştır. Söz konusu programda oluşturulan sonlu elemanlar ağında 3 düğüm noktalı üçgen elemanlar seçeneği kullanılmıştır. Tüneli çevreleyen ortamın sınırlarının açıklıktan uzaklığı yaklaşık olarak açıklık genişliğinin 9 katı alınmıştır. Bu sınır üzerinde bulunan düğüm noktalarının yatay ve düşey yöndeki yer değiştirmeleri önlenmiştir. İncelenen tüm durumlarda, açıklığı çevreleyen ortam için aynı sonlu elemanlar ağı kullanılmıştır.

Tünelin yeryüzünden derinliği tünel güzergahı boyunca değişkenlik göstermektedir. Duraylılık çözümlerlerinde tünel güzergahı boyunca düşey birincil gerilmeler eşit kabul edilip, derinlik ortalama olarak 200 m alınmıştır. Örtü katmanının ortalama birim hacim ağırlığı 25 kN/m<sup>3</sup> alınarak, düşey birincil gerilme (Pv) yaklaşık 5 MPa olarak tahmin edilmiştir. Yatay birincil gerilmelerin (Ph) tüm doğrultularda birbirine eşit olduğu varsayılmıştır. Literatürde rapor edilen (Brown & Hoek 1978) ölçüm sonuçlarından ortalama 200 m derinlik için birincil gerilmelerin oram (Ph/Pv) = "k", 1-4 hatta 5-6 ya kadar çok değişkenlik gösterdiği belirtilmektedir. Genelde sığ derinliklerde yatay birincil gerilmelerin düşey birincil gerilmelerden daha büyük olduğu kabul edilmektedir. Çözümlerlerde mevcut birincil gerilme ölçümleri olmadığı için "k" oranı 2 olarak kabul edilmiştir.

Atmalı kesitli tünelin kazı genişliği 6 m ve yüksekliği 6 m alınmıştır. Yarım daire şeklindeki tavanın eğrilik merkezi tabandan 3 m yüksekliktedir. Bu durumda tünelin kazı kesiti yaklaşık 32 m<sup>2</sup> olmaktadır. Farklı yapısal bölgeler içerisinde uygulanmış olan tahkimat durumları göz önünde bulundurularak elasto-piastik çözümler yapılmıştır. Tahkimat durumları nihai kaplama betonu ve iyileştirme enjeksiyonları Öncesi durumları temsil etmektedir.

Çözümlerlerde tünelde açıklık çevresinde 9 adet tamamen dolgulu ön gerdirmesiz kaya saplamaları kullanılmıştır. Kaya saplamalarının boyu 4 m, çapı 25 mm, saplama aralığı 1.5 m (düzlem içi ve dışı), saplama çeliğinin Young modülü 200 GPa ve çekme kapasitesi 0.1 MN alınmıştır.

Çözümlerlerde püskürtme beton, Bernoulli fibrülasyonuna uygun olarak davranan giriş elcmanlarıyla temsil edilen kaplama elemanları kullanılarak model lenmiştir. Püskürtme betonun elastik özellikleri, Young modülü 30 GPa ve Poisson oranı 0.2 alınmıştır. Püskürtme betonun dayanım özellikleri olarak, tek eksenli basınç dayanımı 35 MPa, kalıcı tek eksenli basınç dayanımı 3.5 MPa,

çekme dayanımı 3 MPa ve kalıcı çekme dayanımı O alınmıştır. Püskürtme betonun kaplama kalınlığı uygulanan tahkimat tipine (A, B, C) bağlı olarak 5 cm, 10 cm ve 20 cm şeklinde değişmektedir.

Açıklığı çevreleyen kaya kütesinin Hoek-Brown görgüI yenilme ölçütüne (Hoek & Brown 1980) uygun olarak yenildiği varsayılmıştır. Ölçütün genelleştirilmiş hali aşağıda verilmiştir (Hoek vd. 2002):

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left( m_b \sigma_3' / \sigma_{ci} + s \right)^a \quad (D)$$

burada  $\sigma_1'$  ve  $\sigma_3'$  sırasıyla yenilme anındaki en büyük ve en küçük asal gerilmeler ve  $\sigma_{ci}$  ise kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımıdır. Hoek-Brown dayanım sabitleri ( $m_b$ ,  $s$ ,  $a$ ) kaya kütesinin özelliklerine (GSI) ve kaya kütesinde oluşan patlatma hasarına göre değişim göstermektedir. Ölçüt ile ilgili detaylı bilgiler Hoek vd. 2002'den elde edilebilir.

Jeolojik dayanım indeksi (GSI) değerlerinin kestirilmesinde aşağıda verilen eşitlik kullanılmıştır. (Hoekvd. 1995).

$$GSI = RMR_{89} - 5 \quad (RMR_{89} > 23) \quad (2)$$

burada, RMR<sub>89</sub>. Bieniawski tarafından önerilen kaya kütesi sınıflama sisteminin 1989 yılı versiyonudur. Kaya malzemesine ilişkin yapılan tek ve üç eksenli basınç dayanımı deney verileri ile ROCLAB (v.1.0) (Rocscience 2003) bilgisayar programı kullanılarak kaya malzemesine ilişkin dayanım parametreleri ( $\sigma_{ci}$ ,  $n_{ij}$ ) ve kaya kütesi dayanım ve deformasyon parametreleri ( $E_{ci}$ ,  $m_b$ ,  $s$ ) belirlenmiştir.

Kırılmış kaya kütesine ait dayanım parametrelerinin ( $m_b$ ,  $s$ ) tahmin edilmesinde Ribacci (2000) tarafından önerilen bağıntılar kullanılmıştır.

$$m_b = 0.65 m_b \quad (3)$$

$$s_r = 0.04 s \quad (4)$$

Çözümlerlerde tünelin farklı yapısal bölgeleri için kullanılan girdi parametreleri Çizelge 3'te verilmiştir. Hoek-Brown dayanım parametrelerinden "a" değeri tüm durumlar için 0.5 alınmıştır.

Çözümlemede kaya saplamaları ve/veya püskürtme betondan oluşan tahkimat elemanlarının ikinci bir aşamada yük almaya başladığı varsayılmıştır. Tahkimat elemanlarına tahkimat gecikmesini modellemek üzere tünel açıklığını Çevreleyen ortamdaki %75 oranında yük etkilediği varsayılmıştır.



Çizelge 3. Tünel güzergahı boyunca kaya malzemesi ve kütesinin özellikleri.

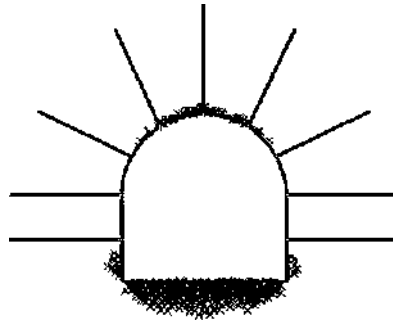
Yapısal Bölge	Aralık (m)	$\sigma_c$ (MPa)	GSI*	$\sigma_{un}$ (MPa)	$m_i$	$n_i$	s	$m_r$	$s_r$	$E_m$ (GPa)
I	0-21 m	68.4	53	4.91	21	3.9	0.0054	2.5	0.000216	9.83
II+III	21-290 m	68.4	70	12.9	21	7.1	0.0357	4.6	0.0014	26.2
IV	290-558 m	68.4	76	14.3	21	8.8	0.0695	5.7	0.00278	37.0
V	558-621 m	40.5	45	1.82	29	4.1	0.0022	2.7	0.00009	4.77
VI	621-809 m	31.4	24	0.35	50	3.3	0.0002	2.2	0.000008	1.25

\* GS^Temel RMR-5

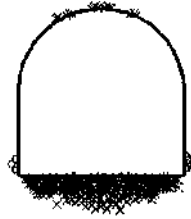
Tünel güzergahında karşılaşılan değişik formasyonlarda uygulanan farklı tahkimat türleri ayrı ayrı modellenmiştir. Çözümlenmelerde sadece kaya saptamalı ve püskürtme beton lu tahkimat durumları modellenmiştir. Tünel giriş ve çıkış ağzlarının gerçekçi bir şekilde modellenmesi için üç boyutlu analizlere ihtiyaç duyulduğundan I ve VII nolu yapısal bölgeler için çözümlenmeler yapılamamıştır. Tünel güzergahında farklı yapısal bölgeler için elde edilen çözümlenme sonuçları Şekil 5-8'de verilmiştir. Gökçetepe formasyonunda yer alan II ve III nolu yapısal bölgeler aynı kaya kütesi koşullarını temsil etmeleri nedeniyle ortak çözümlenme yapılmıştır.

İncelenen yapısal bölgeler için elde edilen kaya kütesi özellikleri kullanılarak, kaya saptaması ve püskürtme beton tahkimat uygulamasında, çözümlenmelerden elde edilen sonuçlara göre, duraylılık açısından olumsuz durumlar Tasmaca ve Sapça formasyonu içerisinde yer alan yapısal bölgelerde (V-VI) oluşmaktadır. Açıklık çevresindeki yenilme bölgesi açıklığı tamamen çevreleyerek özellikle tabanda derinlik kazanmaktadır. Bu olumsuz koşullar tünel içerisindeki gözlemler ile teyit edilmiştir. Gökçetepe formasyonu içerisinde yer alan yapısal bölgelerde (II-IV) ise tavan ve yan duvarlarda oluşan yenilme bölgesinin genişliği önemli ölçüde daralmaktadır. Bu bölgelerde tünel açılması ve desteklenmesinden sonra duraylılık problemleri ile karşılaşılmaşım. Genel anlamda bilgisayar programı ile yapılan sayısal çözümlenmelerden elde edilen sonuçlar ile tünel içerisindeki gözlemler karşılaştırıldığında benzer bulgulara ulaşıldığı soylenebilmektedir.

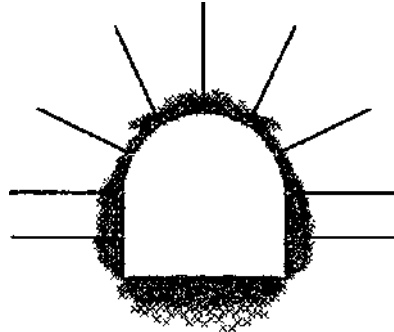
Tünelde karşılaşılan duraysızlık durumlarında çevre kaya kütesi koşullarının iyileştirilmesi için kontak ve konsolidasyon enjeksiyonları yapılmıştır. Tavan ve taban koşullarındaki olumsuz durumları sınırlandırmak için tünel içerisinde ihtiyaç olması durumunda tavana süren ve tabanda da saptama uygulamaları gerçekleştirilmiştir.



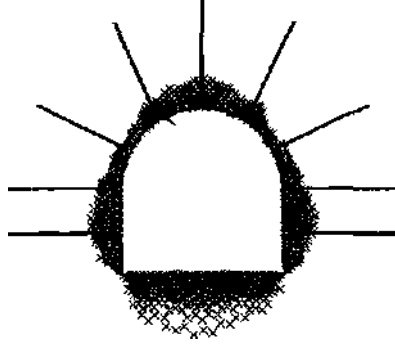
Şekil 5. Gökçetepe formasyonu II ve III. yapısal bölgeler.



Şekil 6. Gökçetepe formasyonu IV. yapısal bölge.



Şekil 7, Tasmaca formasyonu V. yapısal bölge.



Şekil 8. Sapça formasyonu VI. yapısal bölge.

## 6 SONUÇLAR

Arazi gözlemleri, kaya kütlesi sınıflandırma sistemi ve bilgisayar programı ile yapılan sayısal çözümlerden elde edilen sonuçların birbiriyle uyum içinde oldukları söylenebilmektedir. Ancak, elde edilen sonuçların sınırlı sayıda verilere dayalı olması ve bilgisayar programı özelliklerinden kaynaklanan zorunlu idealleştirmeler (sürekli ortam, birincil gerilmeler vb.) nedeniyle her zaman dikkatle kullanılması ve arazi gözlemleri ile devamlı olarak izlenmesi önerilmektedir. Çalışmadan, güvenilir ve yeterli arazi verilerine dayalı olan kaya kütlesi sınıflama sistemi ve sayısal çözümlene modelleri analizlerinin, yeraltı açıklıklarının ve tahkimat sistemlerinin planlanmasında önemli bir ön tasarım aracı işlevine sahip olduğu teyit edilebilmiştir.

## 7. KAYNAKLAR

Alkılıç, Ç. 2003; Çalagzı Termik Santrali Kül Cürufun Uzaklaştırılması ve Depolanması İnşaatı İletim Tüneli Jeoteknik Raporu (yayımlanmamış), DSİ 23. Bölge. 232. Şb. Md.. Zonguldak

- Alkılıç, Ç. 2004; Çalagzı Termik Santrali Kül Cürufun Uzaklaştırılması ve Depolanması İnşaatı Kontak ve Konsolidasyon Enjeksiyonları İşbitim Raporu (yayımlanmamış). DSİ 23. Bölge. 232. Şb. Md.. Zonguldak.
- Bieniawski. Z.T. 1989; *Engineering Rock Mass Classifications*. John Wiley & Sons, New York?
- Brown. E.T., Hoek. E., 1978; Trends in relationships between measured insitu stresses and depth, *Int. J. Rock Mech. Min. Sei. & Geomech. Ahsir.*, Vol. 15, pp. 211-215.
- Çınar, 2001 ; *Çalagzı Termik Santrali Alık Depolama ve Taş Ocağı Entegre Projesi*. ÇED Raporu, Çınar Mühendislik, Ankara.
- Gerçek; H. 2004; *Tünelcilik Ders Notları* (yayımlanmamış), ZKU Maden Müh. Bölümü. Zonguldak.
- Hoek, E., Brown, E.T., 1980; *Underground Excavations in Rock*. IMM, London.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B., 2002; Hoek-Brown failure criterion on-2 002 edition, <http://www.rocscience.com>, 7 p.
- Hoek, E., Kaiser, P.K., Bawden, W.F., 1995; *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. A.A. Balkema, Rotterdam.
- Ribacci, R., 2000; Mechanical tests on pervasively jointed rock material: insight into rock mass behaviour, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 33, No.4. pp.243-266.
- Roald, S., Barton. N., Nomeland, T., 2002; Grouting -The Third Leg of Underground Construction. Norwegian Tunnelling Society Publication, Vol. 12, [http://www.tunnel.no/upl/Kap10\\_Grouting.pdf](http://www.tunnel.no/upl/Kap10_Grouting.pdf)
- Rocscience, 2003; Rocklab (v.1.0) Software-Rock Mass Strength Analysis using the Generalized Hoek-Brown failure criterion, <http://www.rocscience.com/products/roclab.asp>
- Ulusay, R. Sönmez, H., 2002; *Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri*. TMMOB JMO Yayınları. No: 60, Ankara.
- Yurdakul, Ş., Gerçek H. 2002; Püskürtme Beton Tahkimatının TTK Ocaklarının Ana Galerilerinde Uygulanabilirliğinin Araştırılması, *Türkiye 13. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı*. TMMOB MMO. Zonguldak, s. 297-307.
- Yüksel Proje, 2004; İstanbul Metro Proje Raporu (yayımlanmamış), İstanbul.