

Türk Ulusal Kaya Mekaniği Derneği yayınıdır
A publication of Turkish National Society for Rock Mechanics



TÜRK KAYA MEKANİĞİ DERGİSİ

TURKISH JOURNAL OF ROCK MECHANICS

“KAYA PATLAMASI” ÖZEL SAYISI

Ocak
January

Sayı
Number

17

TÜRK KAYA MEKANİĞİ DERGİSİ
TURKISH JOURNAL OF ROCK MECHANICS

TUKMD Adına Yayın Sahibi ve Sorumlu Yazı İşleri Müdürü / Owner on Behalf of TNSRM and Publication Director
H. Aydın BİLGİN

Editörler / Editors

Reşat ULUSAY
Hasan GERÇEK

Yardımcı Editörler / Assistant Editors

Tuğrul ÜNLÜ
Ergün TUNCAY

Yayın Kurulu / Editorial Board

Nuri A. AKÇİN (Zonguldak)
Ergin ARIÖĞLU (İstanbul)
Ömer AYDAN (Japonya)
Nuh BİLGİN (İstanbul)
Atilla CEYLANOĞLU (Sivas)
Şevket DURUCAN (İngiltere)
M. Kemal GÖKAY (Konya)
R. Mete GÖKTAN (Eskişehir)
Güner GÜRTUNCA (ABD)

O. Zeki HEKİMOĞLU (Diyarbakır)
Celal KARPUZ (Ankara)
Seyfi KULAKSIZ (Ankara)
Yadigar V. MÜFTÜOĞLU (Zonguldak)
Uğur ÖZBAY (ABD)
Abdurrahim ÖZGENOĞLU (Ankara)
Levent TUTLUOĞLU (Ankara)
Bahtiyar ÜNVER (Ankara)
Mahir VARDAR (İstanbul)

TUKMD Yönetim Kurulu / TNSRM Executive Committee

H. Aydın BİLGİN
Mehmet Ali HİNDİSTAN
Hasan ŞİŞMAN
Barış ÇAKMAK
Ümit ERDEM

Derginin Kapsamı / Scope of the Journal

Türk Kaya Mekaniği Dergisi'nde kaya mekaniği ve kaya mühendisliği ile ilgili konularda yapılmış ve Türkçe veya İngilizce olarak yazılmış özgün bilimsel çalışmalara yer verilir.

Turkish Journal of Rock Mechanics is a medium for the publication of original scientific studies in the field of rock mechanics and rock engineering written in Turkish or English.

Katkıda Bulunacaklara Not / Note to Contributors

Gönderilecek yazılar Türk Kaya Mekaniği Dergisi "Yayın Amaç ve Kuralları"nda belirtilen ilkelere uygun olmalıdır. Yazılar üç kopya halinde aşağıdaki yazışma adreslerinden birine gönderilmelidir.

Manuscripts should be prepared in the form required in the instructions entitled "Guide for Authors". Three copies should be submitted to any of the correspondence addresses below.

Yazışma Adresleri / Correspondence Addresses

Reşat ULUSAY

Hacettepe Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Jeoloji Mühendisliği Bölümü
06800 Beytepe, ANKARA
Tel : (312) 297 77 67 (Ofis)
(312) 297 77 00-05 (Sekreterlik)
Faks : (312) 299 20 34
E-posta : resat@hacettepe.edu.tr

Hasan GERÇEK

Zonguldak Karaelmas Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Maden Mühendisliği Bölümü
67100 ZONGULDAK
Tel : (372) 257 40 19
Faks : (372) 257 40 23
E-posta : gercek@karaelmas.edu.tr



TÜRK KAYA MEKANİĞİ DERGİSİ

Turkish Journal of Rock Mechanics

Sayı (No) 17 Ocak (January) 2010

İÇİNDEKİLER (CONTENTS)

Yeraltı açıklıklarında kaya patlaması olgusu ve önlemleri üzerine değerlendirme / <i>Rockburst phenomena in underground openings and evaluation of its counter measures</i> Ömer AYDAN, Melih GENİŞ	1
---	----------

Dernek Yazışma Adresleri / Correspondence Addresses of the Society

H.Aydın BİLGİN (Başkan)

Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Maden Mühendisliği Bölümü

06531 Çankaya / ANKARA

Tel : (312) 210 58 14

Faks : (312) 210 58 22

E-posta : abilgin@metu.edu.tr

Hasan ŞİŞMAN (Genel Sekreter)

Ulaştırma Bakanlığı

DLH İnşaat Genel Müdürlüğü

Emek / ANKARA

Tel : (312) 203 16 11

GSM : 0505.771 12 75

E-posta : hassisman@yahoo.com

Yayın Türü (Type of publication): Yerel Sürekli Yayın

Baskı (Printed by): Öncü Basımevi, Kazım Karabekir Caddesi, Ali Kabakçı İşhanı,

No: 85/2 İskitler Ankara, Tel.: +90 312 384 31 20; Faks: +90 312 384 31 19

Baskı Tarihi (Printing date): 18/02/2010

Yeraltı açıklıklarında kaya patlaması olgusu ve önlemleri üzerine değerlendirme

Rockburst phenomena in underground openings and evaluation of its counter measures

¹Ömer AYDAN, ²Melih GENİŞ

¹Tokai Üniversitesi, Deniz İnşaat Mühendisliği Bölümü, Shizuoka, Japonya

²Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak

ÖZ

Son yıllarda çok derinlerde veya yüksek birincil gerilme ortamlarında, yeraltı açıklıkları ve baraj temelleri gibi kaya kazıları sırasındaki kaya patlaması potansiyeli büyük önem kazanmaktadır. Bu nedenle, kaya patlaması tahmini için bazı etkili izleme ve analiz yöntemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Kaya patlaması tahmini için değişik ölçütleri göz önüne alan elasto-plastik sonlu elemanlar yöntemi geliştirilmiştir. Eğer analizlerden elde edilen yenilme bölgeleri doğru bir şekilde yorumlanırsa, klasik elasto-plastisite teorisine dayalı sonlu elemanlar yönteminin uygun olacağı bulunmuştur. Ryukyu kireçtaşı, kumtaşı ve şeyl ardalanmalı kayalarda oluşturulan dairesel açıklıklarda bazı laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kaya patlamasının tahmini için bazı gözlemsel ve izleme tekniklerini geliştirmek için çok parametrelili ölçümler yapılmıştır. Akustik emisyon, kaya sıcaklığı ve elektriksel potansiyelin birlikte kullanımının kaya patlaması tahmini için yerinde etkin izleme aracı olabileceği deneysel olarak gösterilmiştir. Bu teknik, Shizuoka 3. tünelinin arın çevresindeki kaya kütlelerinin davranışının değerlendirilmesi ve kazı boyunca kaya patlamasına karşı tünelin duraylılığını kontrol etmek için kullanılmıştır. Ayrıca yapılan detaylı bir literatür araştırmasında inşaat mühendisliği ile maden mühendisliği alanında meydana gelmiş başlıca kaya patlaması örnekleri özetlenerek sunulmuştur. Bu veriler için geliştirilen SQROCKBURST adlı veri tabanı ve özellikleri anlatılmıştır. Makalenin son kısmında ise, kaya patlaması olgusunun etkilerini azaltmaya yönelik önlemler sunulmuş ve tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Derin yeraltı açıklıkları, gerilme azaltımı, kaya patlaması, madencilik.

ABSTRACT

In recent years, the potential of rock bursting during rock excavations such as underground openings and dam foundations due to great depth or high in-situ stress environment receives great attention. Therefore, some effective monitoring and analysis methods for predicting rockburst must be developed. Various finite element methods based on conventional elasto-plasticity, energy methods and extension strain method have been developed for predicting rockburst. Among them, the finite element method based on classical elasticity-plasticity theory was found to be appropriate if the failure zones obtained in analyses are properly interpreted. Some laboratory tests were carried out on the circular openings excavated in Ryukyu limestone and Shizuoka intercalated sandstone and shale plates and multi-parameter measurements were done in order to develop some observational and monitoring

techniques for predicting rockbursts. It is experimentally demonstrated that the combined utilization of AE, rock temperature and electric potential may be a quite effective in-situ monitoring tool for predicting rockburst. This technique is used to assess the response of rock mass surrounding of Shizuoka third tunnel to face advance and to check its stability against rockburst during the excavation. In addition, an extensive literature survey on major examples of rockburst in civil engineering and mining engineering field are summarized and their major features are presented. A data-base system named as SQROCKBURST for the data from literature survey is developed and its characteristics are explained. In the final part, the possible counter-measures for diminishing the disastrous effects of rockburst are briefly outlined and discussed.

Key Words: Deep underground openings, stress reduction, rock bursting, mining.

1. GİRİŞ

Yeraltı açıklıklarında kaya patlaması problemleriyle oldukça sık karşılaşılmaktadır. Bunlar kısa ve uzun süreli yenilme olgularıdır. Yazarlar detaylı bir şekilde kaya sıkışması ve patlaması olgusu üzerinde çalışmalar yapmıştır. Kaya sıkıştırma potansiyelinin tahmini ve tünelde oluşacak deformasyon tahmini için bir yöntem önermişler ve çok sayıda tünel projesine uygulayarak geçerliliğini sınamışlardır (Aydan vd., 1993, 1996). Kaya sıkıştırması problemleri zayıf kayalarda gözlemlenmesine karşın, kaya patlaması problemleri sert kayalarda oluşturulan yeraltı açıklıklarında sıkça karşılaşılmaktadır. Kazı sırasında yüksek hızla kaya parçalarının fırlaması şeklinde çok şiddetli kaya patlamaları oluşabilmektedir. Fransa'da Mont Blanc, İsviçre'de Gotthard, Japonya'da Dai-Shimizu ve Kanetsu tünelleri kaya patlamasının yaşandığı ve tünelticilikte iyi bilinen örneklerdir. Kaya patlaması problemleri ayrıca, sert kaya kütlelerinde yapılan derin madencilik faaliyetlerinde oldukça yaygın karşılaşılan duraysızlık tiplerinden biridir. Güney Afrika ve Kanada'da literatürde yer almış bir çok örnek bulunmaktadır (Kaiser vd., 1996).

Yeraltı kazılarında kaya patlaması olasılığının tahmini için birçok yöntem önerilmiştir. Bu yöntemlerin ayrıntılı derlemesi Aydan vd. (2001b) tarafından yapılmıştır. Bu yöntemler kısaca; enerji yöntemi, elasto-plastik yöntem ve uzama birim deformasyon yöntemi olarak sınıflandırılmaktadır. Ancak, kaya patlaması olgusu ve şiddetinin değerlendirilmesi için bu yöntemlerin geçerlilikleri sınanmamıştır. Bununla birlikte, kazı sırasında tünelin gerçek zamanlı duraylılığının kontrol edilmesi için etkili ve güvenilir bir izleme tekniği bulunmamaktadır. Bu makalede, önce sert kayalarda tünelticilikte kaya patlaması duyarlılığının değerlendirilmesi için mevcut yöntemlerin kısa özeti sunulmuş, sonra da tünellerin kazısı boyunca etkin izleme tekniğinin geliştirilmesi için kaya örneklerinde yapılan deneyler ile kaya bloklarından oluşturulan model tünel deneyleri anlatılmıştır. Bunların uygulanabilirliği ve etkinliğinin kontrol edilmesi için gerçek tünel kazılarına uygulamaları verilmiştir. Madencilikte ve inşaat mühendisliği alanlarında karşılaşılan önemli kaya patlaması olayları kısaca özetlenmiştir. En son bölümde ise, kaya patlaması olgusunun etkilerinin azaltılması için mümkün yöntemler kısaca sunulmuş ve uygulanabilirlikleri tartışılmıştır.

2. KAYA PATLAMASI OLGUSU

Kaya patlaması, özellikle derin kotlarda çalışan ($h > 600$ m) madenler ile özel amaçlı açılan yeraltı açıklıklarında (yeraltı depoları ve elektrik santralleri gibi) sert kristalin kayalarda görülmesine rağmen, sığ tünellerde ve az kırılğan kayalarda da gözlenebilmektedir. Bu bölümde kaya patlamasının fiziksel ve mekanik özellikleri hakkında bilgi verilmiştir.

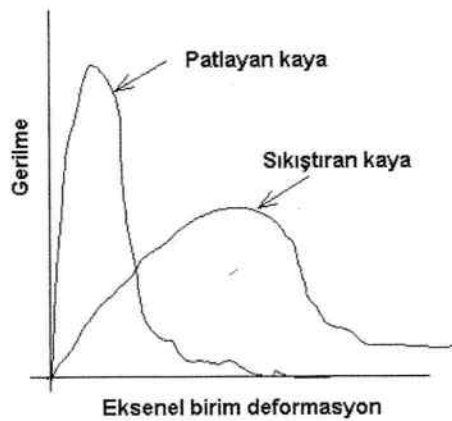
2.1. Kaya Patlamasının Fiziksel Özellikleri

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 (sıkışma) 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.

2.2. Kaya Patlaması Oluşturan Kayaların Mekanik Özellikleri

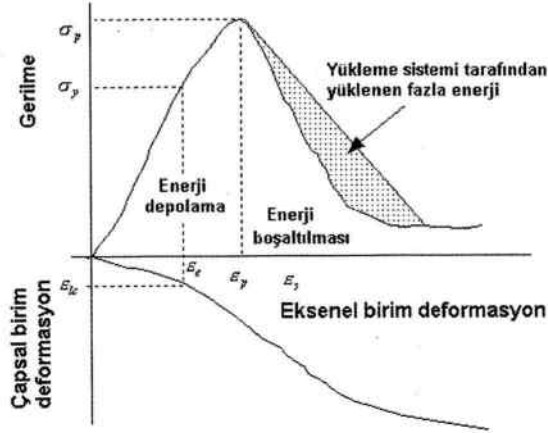
Kaya patlaması yüksek deformasyon modülüne sahip kayalarda oluşurken kaya sıkıştırmasının, tek eksenli basınç dayanımı 20-25 MPa'dan daha düşük kayalarda olduğu gözlemlenmektedir. Kaya patlaması ve sıkıştırması gözlenen kayalara ilişkin tipik gerilme birim deformasyon davranışı Şekil 1'de gösterilmiştir. Patlayan kayalar yüksek dayanımları, yüksek deformasyon modülleri ve kırılğan yenilme sonrası davranışları; sıkıştıran kayalar ise düşük dayanımları, düşük deformasyon modülleri ve sünümlü (ductile) yenilme sonrası davranışları ile karakterize edilmektedir.

Kaya patlaması sırasında kaya parçalarının şiddetli fırlama olgusu, depolanan mekanik enerjinin deformasyon sırasında nasıl harcanacağı ile ilişkilidir. Şekil 2'de görüleceği üzere, laboratuvar da yükleme makinası veya çevreleyen kaya kütlesi tarafından serbest bırakılan enerji kayacın depolayabileceği enerjiden fazla ise depolanan mekanik enerjinin bir bölümü kinetik enerjiye dönüşecektir. Bu kinetik enerji, patlayan kayacın deformasyon özellikleri ve çevre kaya kütlesinin katılığına bağlı olarak kaya parçalarının kopması ve açıklığa doğru belli bir hızda fırlatılması olarak harcanmaktadır (Jaeger ve Cook, 1979).



Şekil 1. Kaya patlaması ve sıkıştırması gözlenen kayaların tipik gerilme-birim deformasyon tepkileri.

Figure 1. Typical stress-strain responses of squeezing and bursting rocks.



Şekil 2. Kaya patlamasının mekanik nedeninin basit gösterimi.

Figure 2. A simple illustration of the mechanical cause of rock bursting.

Patlama davranışı gösteren kayalar için enerji türleri için aşağıda verilen özdeşlik ile tanımlanmaktadır (Aydan vd., 2001b, 2004):

$$E_S = E_K + E_T + E_P + E_O \quad (1)$$

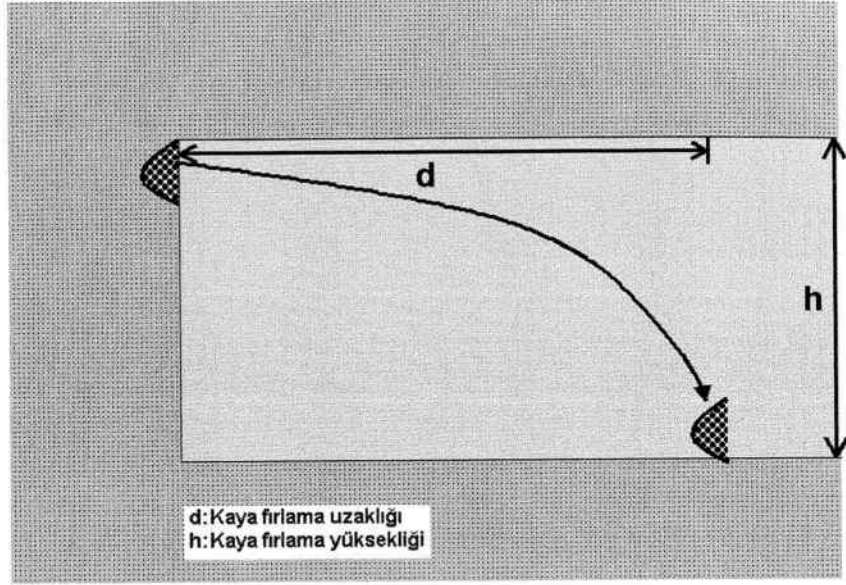
Burada; E_S , E_K , E_T , E_P ve E_O sırasıyla; depolanan mekanik enerji, kinetik enerji, ısıl enerji, plastik iş ve diğer enerji türleridir. Patlamaya yatkın bir bloğun tek eksenli koşulda yüklenmesi durumunda, kaya parçalarının hızı (v) aşağıda verilen eşitlikten kolayca elde edilebilmektedir. Bu durumda depolanan mekanik enerjinin tamamının kinetik enerjiye dönüştüğü varsayılmaktadır (Kaiser vd., 1996; Arıoğlu vd., 1999).

$$v = \frac{\sigma_c}{\sqrt{\rho E}} \quad (2)$$

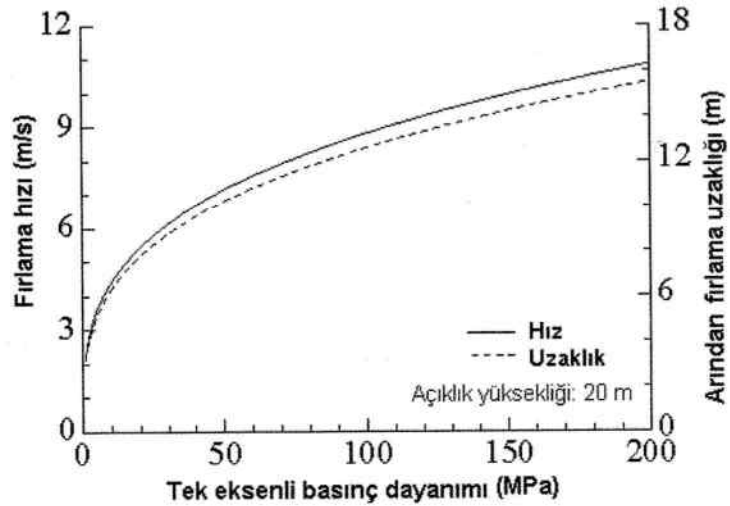
Burada; σ_c , ρ ve E sırasıyla tek eksenli basınç dayanımı, kayacın yoğunluğu ve kopan kaya bloğunun elastisite modülüdür. Açıklığın belirli bir yüksekliği h için bloğun fırlama uzaklığı (d) aşağıda verilen eşitlikten bulunabilmektedir (Şekil 3).

$$d = v \sqrt{\frac{h}{g}} \quad (3)$$

Burada, g yerçekimi ivmesidir. Blokların fırlama uzaklığı ve fırlama hızları, kaya kütesinin tek eksenli basınç dayanımının bir fonksiyonu olarak Şekil 4'te verilmiştir.



şekil 3. Tünel arından fırlayan kaya parçalarının gösterimi.
Figure 3. An illustration of fragments ejection from tunnel face.



şekil 4. 20 m yüksekliğe sahip bir açıklık için çevre kayacın tek eksenli basınç dayanımının bir fonksiyonu olarak kaya parçalarının arından fırlama hızı ve fırlama uzaklığı.
Figure 4. Ejection velocity and throw distance of a rock fragment for an opening height of 20 m as a function of uniaxial compressive strength of surrounding rock.

3. TÜNEL EKSENİ BOYUNCA OLUşAN GERİLME DAğILIMI

Tünel arından uzaklaştıkça gerilmeler ve yerdeğiştirmeler değişim göstermektedir. Bu durum özellikle tünel duraylılığının değerlendirilmesi açısından önemli bir konudur. Bu bölümde, birincil gerilmeler altında desteksiz dairesel bir tünel göz önüne alınmış ve tünel eksenli boyunca elastik gerilme ve

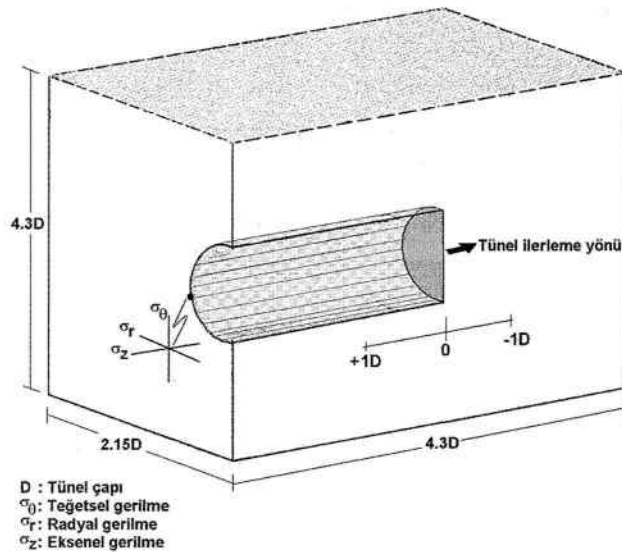
yerdeğiştirme dağılımları sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Çözümler, tünel eksenine paralel farklı eksenel birincil gerilme bileşenleri durumunda yapılmıştır. Tünel eksenine boyunca oluşan gerilme ve yerdeğiştirme dağılımları Ranken ve Ghaboussi (1975), Panet ve Guenot (1982), Corbette vd. (1991), Carranza-Torres ve Fairhurst (2000), Ünlü ve Gerçek (2003) gibi bir çok araştırmacı tarafından incelenmiştir.

3.1. Çözümleme Modeli

Çözümlemede kullanılan modelin üç boyutlu görünümü Şekil 5'te verilmiştir. Çözümlemede tünelin yarıçapı 3 m ve kazı uzunluğu 10 m alınmıştır. Modelde kazı yapılmayan uzunluk 16 m ve tünelin merkezinden model sınırına olan uzaklık ise 13 m'dir. Kaya kütleinin elastik davranış gösterdiği ve Poisson oranının 0.25 olduğu varsayılmıştır. Modelde birincil gerilmeler uygulandıktan sonra kazı yapılmıştır. Kazı öncesi radyal ve teğetsel birincil gerilmelerin birbirine eşit olduğu varsayılmıştır. Tünel eksenine paralel eksenel birincil gerilmeler diğer gerilme bileşenlerinin 0, 0.5 ve 1 katı olacak şekilde seçilmiştir. Eksenel birincil gerilmenin açıklık çevresinde oluşan gerilme ve birim deformasyon dağılımına etkisinin araştırılması amaçlanmıştır.

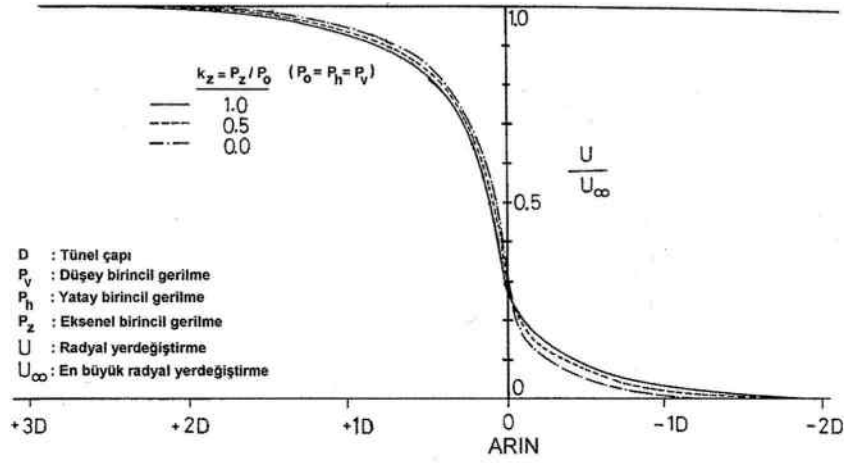
3.2. Çözümleme Sonuçları

Tünel arının ilerisi ve gerisinde oluşan radyal yerdeğiştirmeler en büyük yerdeğiştirmeye oranlanarak normalleştirilmiştir (u/u_∞) (Şekil 6). Tünel arını önünde kaya kütleinde radyal yerdeğiştirmeler başlamaktadır. Tünel arınında oluşan yerdeğiştirme en yüksek deformasyonun %28-30'u civarındadır. Tünel arını çapının bir katı uzaklığa ilerlediğinde (+1D) oluşan yerdeğiştirme miktarı toplam oluşacak yerdeğiştirmenin yaklaşık %80 kadardır. Tünel arını çapının 2 katı kadar uzaklığa (+2D) ilerlediğinde ise, radyal yerdeğiştirme en büyük değerine ulaşmaktadır. Eksenel birincil gerilmenin radyal yerdeğiştirmeye etkisi ihmal edilebilir düzeydedir.



Şekil 5. Sonlu elemanlar analizi için oluşturulan çözümleme modeli.

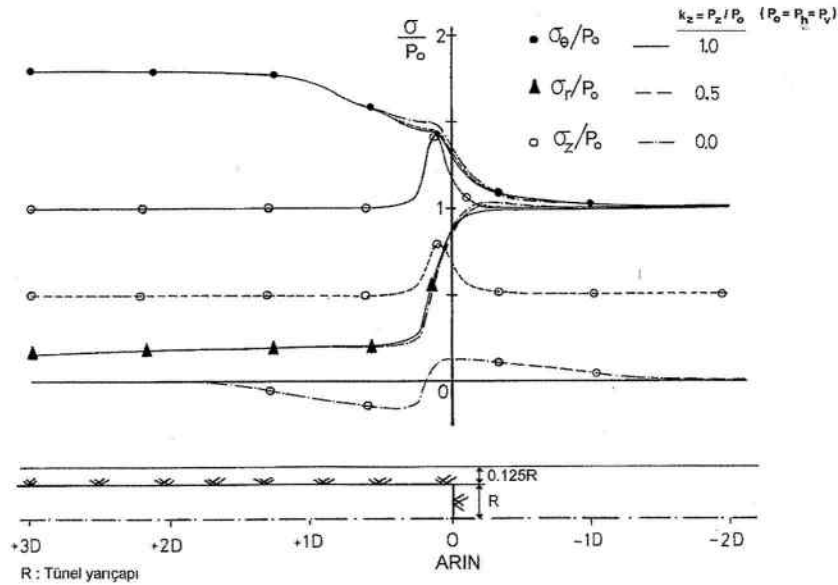
Figure 5. Computational model for finite element analysis.



Şekil 6. Tünel yüzeyinde oluşan normalleştirilmiş radyal yerdeğiştirme.

Figure 6. Normalized radial displacement of the tunnel surface.

Bir sonraki sonuç, tünel çevresinden $0.125R$ derinlikte oluşan radyal, teğetsel ve eksenel gerilme değişimi ile ilgilidir (Şekil 7). Tünel arınından uzaklık arttıkça teğetsel gerilmeler giderek artış göstermektedir. Eksenel birincil gerilmenin hem teğetsel gerilmeye, hem de radyal gerilmeye etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Radyal gerilmeler tünel arınına yaklaştıkça hızla azalmaktadır. En önemli değişim eksenel gerilme dağılımı ile ilgilidir. Arına yaklaşıldıkça eksenel gerilmeler artış göstermekte ve arın etkisi ortadan kalktığında başlangıç değerine doğru azalmaktadır. Bu değişim, tünel arınından $1R$ ($0.5D$) uzaklıkla sınırlıdır. Eksenel birincil gerilmenin olmadığı durumda, tünel arını çevresinde eksenel çekme gerilmeleri oluşabilmektedir.

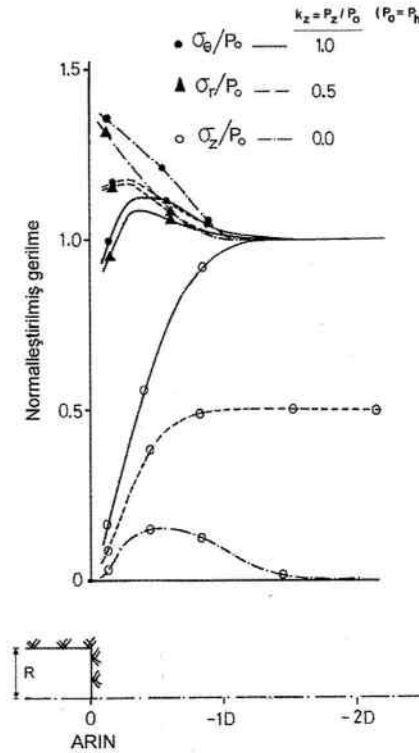


Şekil 7. Tünel çevresinden $0.125R$ uzaklıkta tünel eksenı boyunca oluşan normalleştirilmiş gerilme bileşenleri.

Figure 7. Normalized stress components along tunnel axis at a distance of $0.125R$.

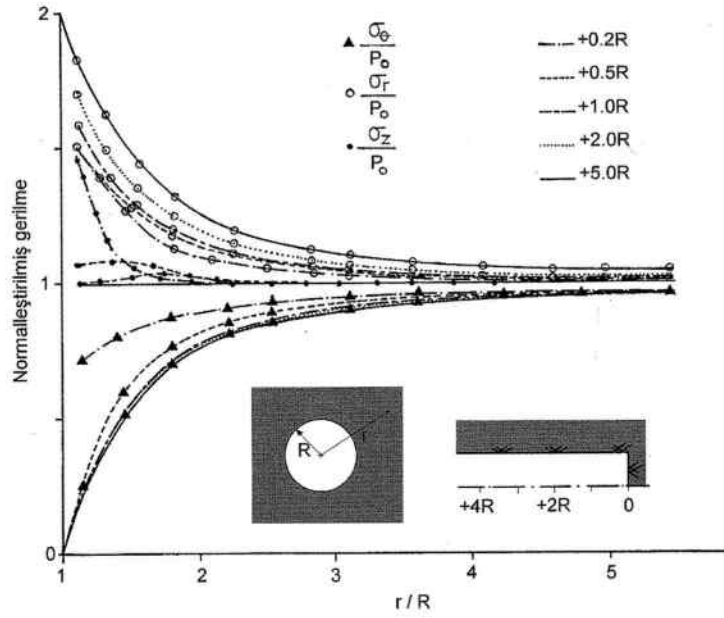
Tünel arını önündeki gerilme dağılımları Şekil 8’de gösterilmektedir. Beklendiği gibi, tünel arını önünde radyal ve teğetsel gerilmeler artmakta ve büyüklükleri hidrostatik birincil gerilmelerin 1.5 katından daha az olmaktadır. Tünel arını önündeki eksenel gerilmeler tünel arınında sıfır olmakta ve tünel arınından uzaklaştıkça ($\sim 2D$ uzaklıkta) eksenel birincil gerilme değerine ulaşmaktadır.

Eksenel birincil gerilmenin radyal ve teğetsel birincil gerilmelere eşit olduğu durumda (hidrostatik birincil gerilme durumu), arından farklı uzaklıklarda tünel kesitinin radyal eksen boyunca oluşan gerilme dağılımları Şekil 9’da verilmiştir. Açıklık yüzeyindeki en büyük teğetsel gerilmeler tünel arınına yakın uzaklıklarda hidrostatik birincil gerilmenin 1.5 katı, tünel arınından $+5R$ uzaklıkta ise hidrostatik birincil gerilmenin 2 katı olmaktadır. Bu durum, hidrostatik birincil gerilme durumunda açılan dairesel tünellerin kuramsal çözümlemesi elde edilen sonuca oldukça benzer çıkmıştır (Şekil 9). Ayrıca, tünel arını civarındaki gerilmelerin, hidrostatik birincil gerilme durumunda açılan küresel açıklık çevresinde oluşan gerilmelere yakın olduğu belirlenmiştir (Şekil 10). Gerilmeler, küresel açıklık çevresindeki gerilme durumu ile arın etkisinin ortadan kalktığı silindirik açıklık çevresindeki gerilme durumu arasında değişim göstermektedir. Tünel arınından yaklaşık $+2D$ uzaklıkta arın etkisi ortadan kalkmaktadır. Bununla birlikte, gerilme ve yerdeğiştirmelerde tünel arınından yaklaşık $+1R$ ($+0.5D$) uzaklıkta çok büyük değişimler oluşmaktadır.

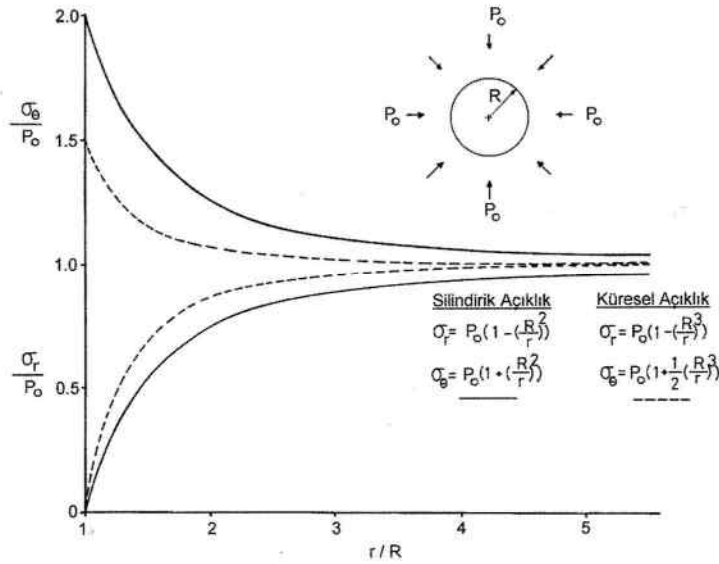


Şekil 8. Tünel arını önünde oluşan gerilme dağılımı.

Figure 8. The distribution of stresses in front of the tunnel face.



Şekil 9 Tünel arınına değişik uzaklıklarda tünelin radyal eksenini boyunca oluşan gerilme dağılımları.
Figure 9 The distribution of stresses along radial direction at various distances from tunnel face.



Şekil 10. Hidrostatik birincil gerilme durumunda küresel ve silindirik açıklıklar çevresinde oluşan radyal ve teğetsel gerilme dağılımları.
Figure 10. Radial and tangential stress distributions for spherical and cylindrical openings subjected to hydrostatic initial stress state.

4. KAZI NEDENİYLE OLUŞAN DİNAMİK GERİLME DEĞİŞİMLERİ

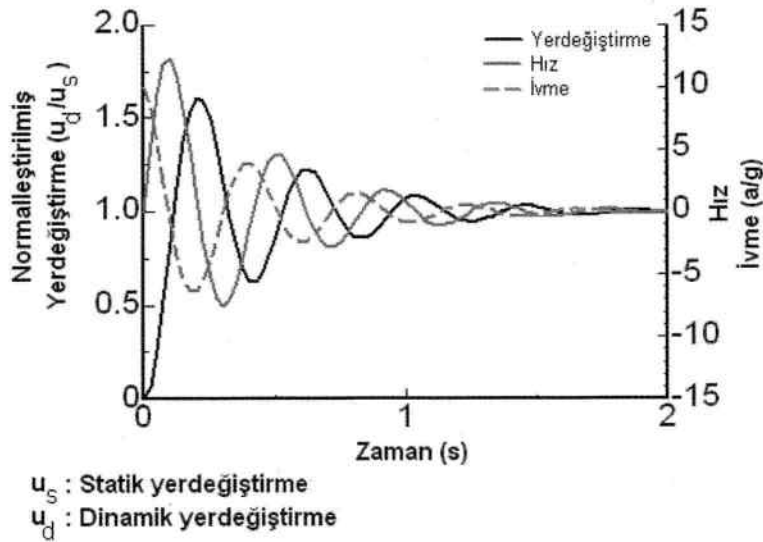
Tüneller veya yeraltı kazıları, delme-patlatma veya mekanik kazı yöntemleri (TBM veya kazıcılar) ile yapılmaktadır. Gerilme için en kritik durum kazı kuvvetlerinin yoğun olarak uygulandığı delme-patlatma ile yapılan kazılarda ortaya çıkmaktadır. Delme-patlatma ile yapılan kazılar, kazı çevresinde

çevre kayada yüksek gerilme değişimlerine neden olarak açıklık çevresinde hasar oluşturabilmektedir. Kazı kuvvetleri aşamalı uygulanırken, gerilme birikimleri tünel veya yeraltı açıklığının çevresinde oluşmaktadır. Bu nedenle kaya patlaması tünel çevresine yakın bölgelerde oluşmaktadır.

Bu bölümde, hidrostatik birincil gerilme altında silindirik bir tünelin ani kazı kuvvetlerinin etkisiyle göstereceği davranış incelenmiştir. Çözümlemede ilk yazar tarafından geliştirilen dinamik visko-elastik sonlu elemanlar yöntemine dayanan program kullanılmıştır (Aydan, 1994). Tünelin kazısı sonlu elemanlar yönteminde yaygın olarak kullanılan yöntemle göre modellenmiştir (Aydan vd., 1995; Aydan ve Kawamoto, 2001).

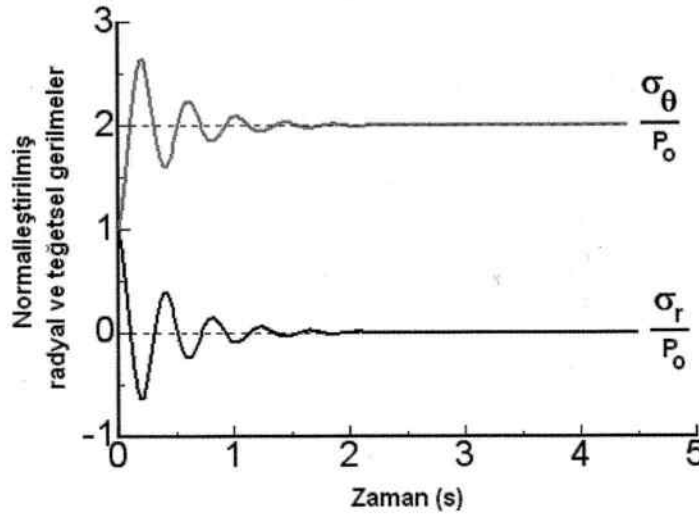
5 m yarıçapında bir tünelin yüzeyinde oluşan yerdeğiştirme, hız ve ivme davranışları Şekil 11’de verilmiştir. Kazı kuvvetlerinin ani bir şekilde uygulanması, diğer bir ifadeyle arazi basıncının aniden boşalması, tünel çevresinde statik koşullardaki yerdeğiştirmeyi 1.6 kat artırmıştır. Sarsıntı yaklaşık 2 s’de sona ermiştir. Zaman ilerledikçe yerdeğiştirme statik değere yaklaşarak hız ve ivme ortadan kalkmıştır.

Tünel yüzeyine yakın bölgede (açıklık yüzeyinden 25 cm kaya içinde) teğetsel ve radyal gerilme bileşenleri zamanın bir fonksiyonu olarak Şekil 12’de gösterilmiştir. Teğetsel gerilmelerin statik koşullardaki değerinden daha büyük olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca tünel çevresinde yüksek radyal gerilmeler çekme gerilmesi olarak açıklık çevresinde oluşmaktadır. Bu durum, tünellerin statik koşullardan çok farklı geçici gerilme durumlarına maruz kalabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, açıklığı çevreleyen kaya kütlesi elastik davranıyorsa gerilmeler statik değerlerine yaklaşacaktır. Başka bir ifadeyle, çevre kayada statik koşullarda beklenmeyen plastik davranışın görülebilme olasılığı ortaya çıkmaktadır.



Şekil 11. Tünel yüzeyinde oluşan yerdeğiştirme, hız ve ivme tepkileri.

Figure 11. Responses of displacement, velocity and acceleration of the tunnel surface.



Şekil 12. Tünel yüzeyinde 25 cm derinlikte radyal ve teğetsel gerilmelerin ani dinamik yükleme sonucu değişimleri.

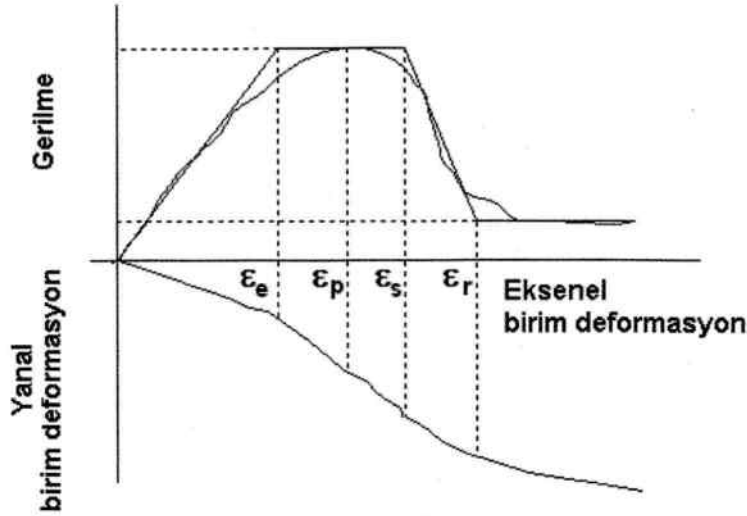
Figure 12. Responses of radial and tangential stress components nearby the tunnel surface 25cm away from the perimetry.

5. KAYA PATLAMASI VE DERESESİNİN TAHMİNİ İÇİN YÖNTEMLER

5.1. Hidrostatik Birincil Gerilme Koşulu için Analitik Yöntemler

5.1.1. Tünelcilikte kaya patlaması ve sıkıştırması için önerilen genişletilmiş yöntem

Bosman ve Malan (2000), sert kayaların tüm davranışlarının sıkıştıran kayalara oldukça yakın olabileceğini belirtmiştir. Sıkıştırma ve patlama olgusu arasındaki en temel farklılık, farklı durumlardaki gerilme birim deformasyon seviyeleridir (Şekil 13). Daha önce Şekil 1’de belirtildiği gibi patlayan kayaların birim deformasyon seviyeleri, sıkıştıran kayalar için oluşan seviyelerden oldukça küçüktür. Tek eksenli basınç dayanımı 1-100 MPa arasında değişen kayalar için Şekil 13’te tanımlanan sınır, elastik birim deformasyon değerleri ile normalleştirilmiş birim deformasyon seviyeleri Şekil 14’te sunulmuştur. Bu, Şekil 14’e yeni veriler eklenerek daha önce tanımlanan sıkıştıran kayalar için verilen şeklin genişletilmiş halidir. Kaya malzemesi ve kaya kütlesi özellikleri ile ilgili veritabanları ve deneyimlere bağlı olarak malzeme ve kütle dayanımlarında farklılık yapılmadığı belirtilmelidir. Diğer bir ifadeyle, eğer kaya malzemesinin ve kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımları birbirlerine yakınsa mekanik davranışları birbirlerine oldukça benzer olacaktır.



Şekil 13 Tek eksenli yükleme altında kayada oluşan farklı durumlar için birim deformasyon değerleri.

Figure 13. Strain limits for different states of rock under uniaxial compression.

Sıkıştıran kayalar için Aydan vd. (1993, 1996) tarafından daha önceki çalışmalarında önerilen ve Şekil 14'te gösterilen görgül ilişkiler, kaya patlaması potansiyeli için sert kayalara da uygulanmıştır. Bunun yanı sıra, analizler için gerekli diğer mekanik özellikler için önerilen görgül ilişkiler patlama potansiyeli olan kayalara da uygulanabilmektedir. Şekil 15'te gösterilen hidrostatik birincil gerilme durumunda dairesel tünel çevresinde oluşan birim deformasyon seviyeleri ve yenilme bölgesi yarıçapları aşağıda verilen ilişkilerden hesaplanabilmektedir.

Elastik durum için:

$$\xi = \frac{\varepsilon_{\theta}^a}{\varepsilon_{\theta}^e} = 2 \left(\frac{1 - \beta}{\alpha} \right) \leq 1 \quad (4)$$

Burada; ξ , açıklık yüzeyindeki normalleştirilmiş birim deformasyon; ε_{θ}^a , açıklık yüzeyindeki teğetsel birim deformasyon; ε_{θ}^e , elastik birim deformasyon sınırı; β , birincil gerilmeye göre normalleştirilmiş tahkimat basıncı ve α ise direnç katsayısıdır.

Elastik - kusursuz plastik durum için:

$$\xi = \frac{\varepsilon_{\theta}^a}{\varepsilon_{\theta}^e} = \left\{ \frac{2[(q-1)+\alpha]}{(1+q)[(q-1)\beta + \alpha]} \right\}^{\frac{f+1}{(q-1)}} \quad (5)$$

$$\frac{R_{pp}}{R} = \left\{ \frac{2[(q-1)+\alpha]}{(1+q)[(q-1)\beta + \alpha]} \right\}^{\frac{1}{(q-1)}} \quad (6)$$

Burada; R_{pp} , plastik bölge yarıçapı; R , tünelin yarıçapı; q ise kaya malzemesinin içsel sürtünme açısına bağlı sabittir.

Elastik - kusursuz plastik – kırılğan (gevrek) plastik durum için:

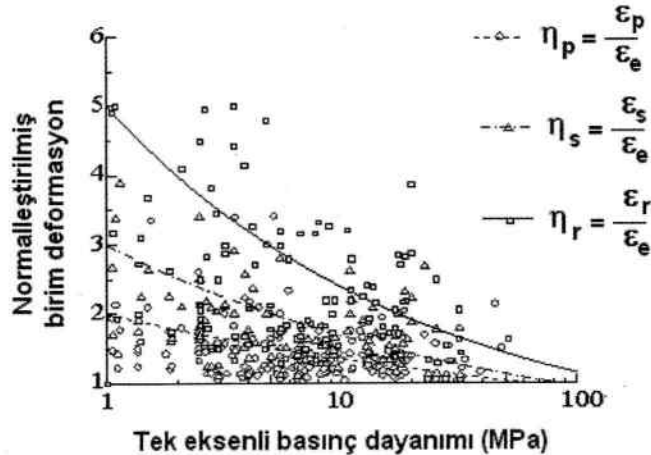
$$\xi = \frac{\varepsilon_{\theta}^a}{\varepsilon_{\theta}^e} = \eta_{sf} \left\{ \frac{2 \left[\frac{(q-1)+\alpha}{(1+q)(q-1)} \right] (\eta_{sf})^{\frac{(1-q)}{f+1}} - \frac{\alpha}{q-1} + \frac{\alpha^*}{q^*-1}}{\beta + \frac{\alpha^*}{q^*-1}} \right\}^{\frac{f^*+1}{(q^*-1)}} \quad (7)$$

$$\frac{R_{pp}}{R} = \left\{ \frac{2 \left[\frac{(q-1)+\alpha}{(1+q)(q-1)} \right] (\eta_{sf})^{\frac{(1-q)}{f+1}} - \frac{\alpha}{q-1} + \frac{\alpha^*}{q^*-1}}{\beta + \frac{\alpha^*}{q^*-1}} \right\}^{\frac{1}{(q^*-1)}} \quad (8)$$

Burada; η_{sf} , kusursuz-kalıcı plastik sınırdaki teğetsel birim deformasyonun elastik-kusursuz plastik sınırdaki teğetsel birim deformasyona oranı; f ve f^* ise, sırasıyla kusursuz plastik bölgede ve kalıcı plastik bölgede, çapsal birim deformasyonun eksenel birim deformasyona oranının ters işareti olarak elde edilen fiziksel sabitlerdir.

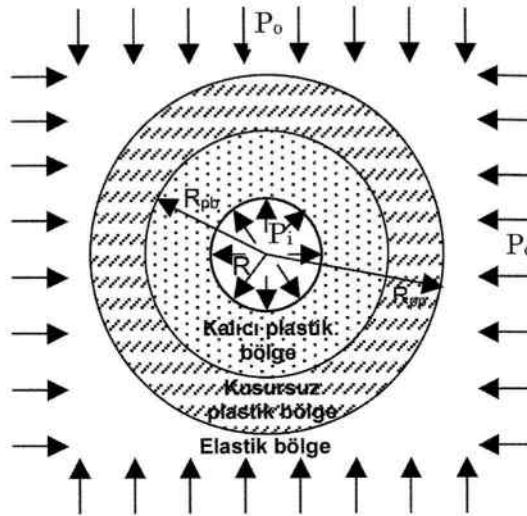
$$\beta = \frac{p_i}{p_0}; \alpha = \frac{\sigma_c}{p_0}; \alpha^* = \frac{\sigma_c^*}{p_0}; q = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}; q^* = \frac{1 + \sin \phi^*}{1 - \sin \phi^*} \text{ dır.} \quad (9)$$

Burada; p_i , içsel basınç veya tahkimat basıncı; p_0 , hidrostatik birincil gerilme; σ_c , kayanın tek eksenli basınç dayanımı; σ_c^* , kırılmış kayanın tek eksenli basınç dayanımı; ϕ , kaya malzemesinin içsel sürtünme açısı ve ϕ^* , kırılmış kayanın içsel sürtünme açısıdır. Yukarıda verilen eşitliklerin elde edilişi ile ilgili detaylı bilgiler Aydan ve Geniş (2003) tarafından verilmiştir.



Şekil 14 Sıkıştıran ve patlayan kayalar için görgül ilişkiler ve normalleştirilmiş birim deformasyon seviyelerinin karşılaştırılması.

Figure 14. Comparison of normalized strain levels and empirical relations for squeezing and bursting rocks.



Şekil 15. Hidrostatik birincil gerilme alanında dairesel tünel çevresinde oluşan yenilme bölgeleri ve tanımlamalar.

Figure 15. Failure zones around a circular tunnel under hydrostatic in-situ stress state and notations.

5.1.2. Enerji yöntemleri

Enerji yöntemleri doğrusal malzeme davranışına dayanmaktadır. Malzeme davranışı doğrusal olmadığında enerjinin tanımlanması güçleşmektedir. Hidrostatik birincil gerilme durumunda, dairesel bir tünel çevresinde oluşan yenilme bölgesinin yarıçapı Mohr-Coulomb yenilme ölçütü kullanılarak aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanabilmektedir.

$$\frac{R_p}{R} = \left\{ \frac{(q+1)(1-\beta)}{[(q-1)+\alpha]} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

Yenilme bölgesinde birim alanda oluşan toplam enerji aşağıdaki eşitlikten elde edilebilmektedir.

$$w_{el} = \frac{1+\nu}{E} (p_o - p_i)^2 R \left[1 - \left(\frac{R}{R_p} \right)^2 \right] \quad (11)$$

5.1.3. Uzama birim deformasyon yöntemi

Stacey (1981), sert kayalarda yeraltı açıklıklarının duraylılığının değerlendirilmesi için uzama birim deformasyonu yöntemini (extensional strain method) önermiştir. Bu yöntemin kullanımıyla sert kayalardaki yeraltı açıklıklarında açıklık yüzeyinde oluşan kavlaklanmanın (spalling) tahmin edilebileceği belirtilmiştir. Uzama birim deformasyonu, en küçük asal birim deformasyonunun doğrusal davranıştan sapması olarak tanımlanmaktadır. Bu tanımlama, plastisite teorisindeki yenilme başlangıcının tanımıyla aynı olup, yenilmenin başlangıcı genellikle malzemenin dayanımının %40-60

seviyelerinde gözlenmektedir. Ayrıca, Bieniawski'nin (1967) çatlak ilerlemesi koşuluyla aynı olup, bu konu tünelciliğe ilk olarak Stacey (1981) tarafından uygulanmıştır. Eğer bu ölçüt hidrostatik birincil gerilme alanında açılan dairesel açıklığa uygulanırsa, uzama birim deformasyonlarının aşıldığı bölgenin yarıçapı, R_o :

$$\frac{R_o}{R} = \left(\frac{\left[\frac{1+\nu}{E} (p_o - p_i) \right]}{\varepsilon_e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

ifadesinden elde edilir. Aşağıdaki eşitlikler kullanılarak

$$\varepsilon_c = \nu \varepsilon_e \text{ ve } \sigma_c = E \varepsilon_e, \quad (13)$$

12 no.lu eşitlik aşağıda verilen şekilde yeniden yazılabilir.

$$\frac{R_o}{R} = \left(\frac{1+\nu}{E} \left(\frac{1-\beta}{\alpha} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

5.1.4. Elastik - kırılğan (gevrek) plastik yöntem

Bu yöntemde kayanın dayanımı en yüksek dayanım değerinden kalıcı dayanım değerine aniden düşmektedir. Hidrostatik birincil gerilme alanında dairesel açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi yarıçapı, R_p :

$$\frac{R_p}{R} = \left\{ \frac{\frac{2-\alpha}{(1+q)} + \frac{\alpha^*}{q^*-1}}{\beta + \frac{\alpha^*}{q^*-1}} \right\}^{\frac{1}{(q^*-1)}} \quad (15)$$

eşitliğinden bulunur. Yukarıda verilen yaklaşım, karmaşık kazı geometrisi ve birincil gerilme durumunu içeren karmaşık koşullara genişletilebilmektedir. Bununla birlikte, bu gibi koşullarda sayısal yöntemlerin kullanımı gerekecektir (Aydan vd., 1995, 2004).

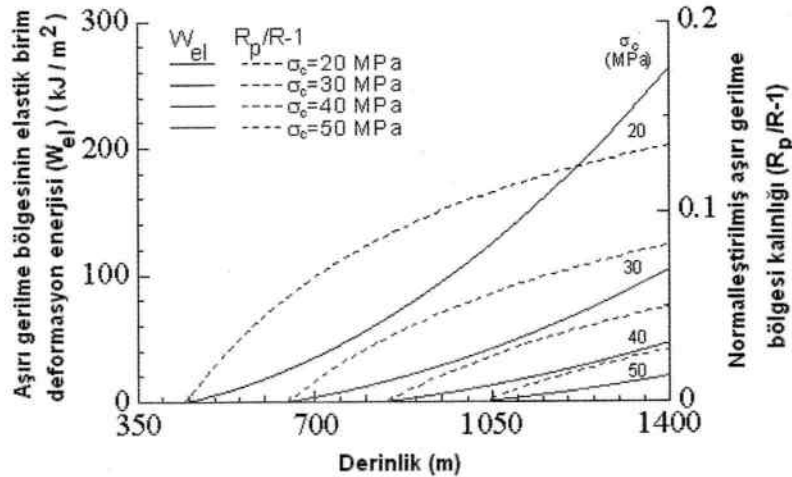
5.1.5. Hidrostatik birincil gerilme koşulu için analitik yöntemlerin karşılaştırması

Farklı tek eksenli basınç dayanımlarına sahip kayalarda, açıklık çevresinde oluşan aşırı gerilme bölgesi veya yenilme bölgesi yarıçapı, elastik enerji ve örtü yüksekliği arasındaki ilişkiler Şekil 16'da gösterilmiştir. Eğer kayanın dayanımı düşükse, kaya patlaması potansiyeli oldukça yüksektir. Bölüm 5.1'de tanımlanan yöntemler, hidrostatik birincil gerilme durumunda açılan dairesel bir tünel için karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalarda, kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımının 20 MPa ve içsel basıncın sıfır olduğu varsayılmıştır. Analizler için gerekli parametreler, Aydan vd. (1993, 1996) tarafından önerilen görgül ilişkilerden elde edilmiştir. Çözümlerlerde, farklı örtü yüksekliklerinde yenilme bölgesi veya aşırı gerilme bölgesi yarıçapları hesaplanmıştır (Şekil 17). Uzama birim deformasyon

yöntemine dayanan 14 no.lu eşitlik kullanıldığında, sığ derinliklerde aşırı gerilme bölgesinin oluştuğu görülmektedir. Diğer üç yöntem aynı derinlikte yenilme oluşumunu önermektedir. Bu farklılık, uzama birim deformasyon ölçütü ile ilişkili yenilme gerilmesi seviyesinin değerinden kaynaklanmaktadır. Elastik - kırılğan plastik malzeme davranışının esas alındığı yöntemden tahmin edilen yenilme bölgesi yarıçapı (15 no.lu eşitlik) oldukça büyük çıkmakta ve hatta uzama birim deformasyon yönteminden tahmin edilen değerden de daha büyük olmaktadır. Önerilen genişletilmiş yöntem ve enerji yönteminden tahmin edilen değerler birbirleriyle oldukça yakın sonuçlar vermektedir. Diğer yöntemlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldıklarında, daha gerçekçi sonuçlar elde edildiği belirlenmiştir.

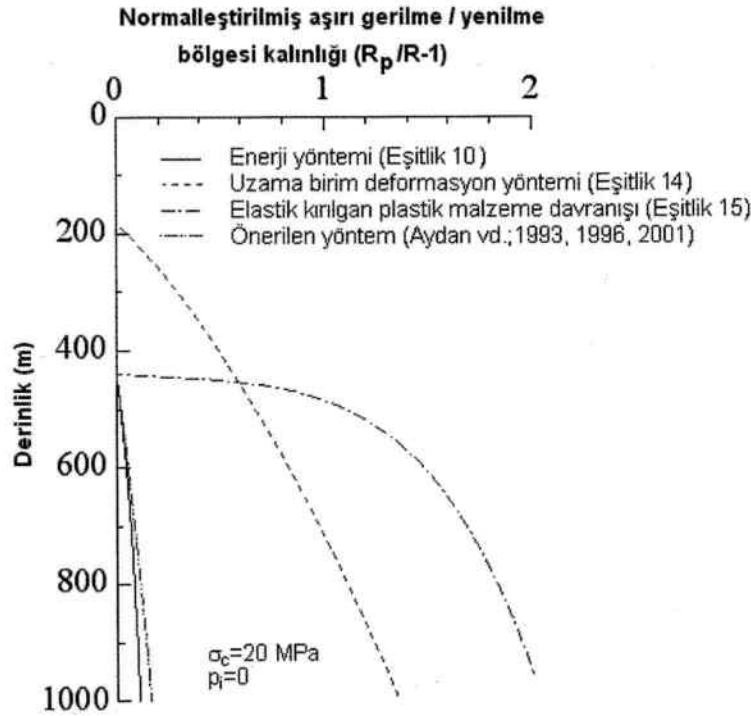
5.1.6. Arazi uygulamaları

Önerilen yöntem, kazısı devam eden bir tünel projesine uygulanmıştır. Bu proje ile Japonya'nın orta bölgesinde yüksek dağların altından geçen bir karayolu tüneli açılacaktır. 10 km uzunlukta ve 12 m çapındaki bu tünel için kaya kütleli özellikleri, Aydan ve Kawamoto (2000) tarafından RMR sınıflaması (Bieniawski, 1989) kullanılarak geliştirilen görgül ilişkiler yardımıyla elde edilmiştir. Tünel güzergahı boyunca örtü kalınlığı değişimi, RMR, tahmini patlama veya sıkıştırma derecesi ve tünel yüzeyi deformasyonu Şekil 18'de gösterilmiştir. Çözümlemelerin yapıldığı sırada tünelin 600 m'lik kısmının kazısı tamamlanmıştır. Ön deformasyon ölçümleri tahmini değerlere oldukça yakın çıkmıştır (Aydan vd., 2001b).



Şekil 16. Derinlik, elastik birim deformasyon enerjisi ve aşırı gerilme bölgesi kalınlığı arasındaki ilişki.

Figure 16. Relation between overburden and elastic strain energy and radius of overstressed zone.



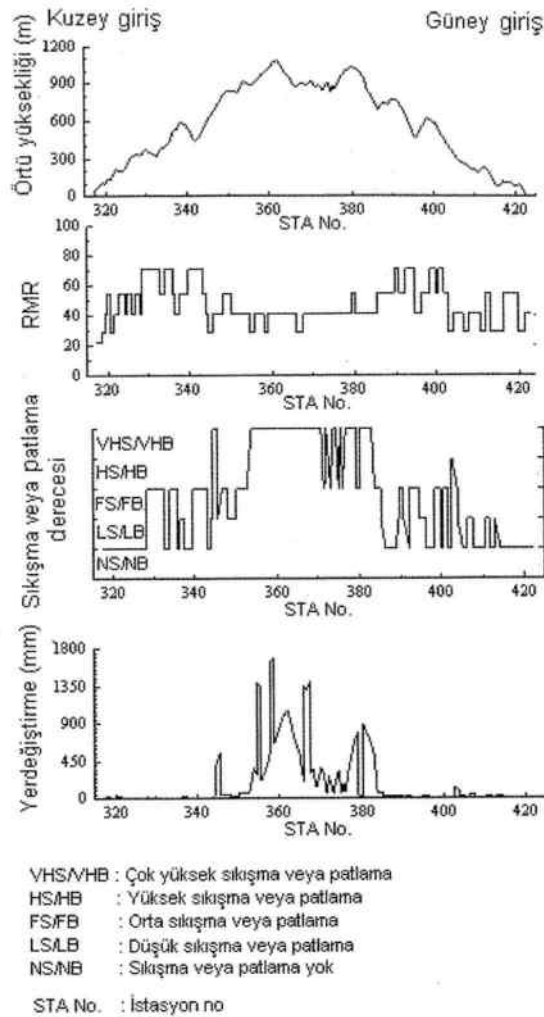
Şekil 17. Farklı yöntemler kullanılarak açıklık çevresinde oluşan aşırı gerilme bölgesi veya yenilme bölgesi yarıçapının örtü kalınlığı ile değişimleri.

Figure 17. Variations of radius of plastic zone or overstressed zone with overburden estimated from different methods.

Son uygulama, patlayan ve sıkışan kaya kütlelerinde dairesel tünel çevresindeki deformasyon davranışının karşılaştırılması ile ilgilidir (Şekil 19). Çözümlemelerde, her iki koşul için yeterlik katsayısı (competency factor, CF) (tek eksenli basınç dayanımının hidrostatik birincil gerilmeye oranı) 1 olarak alınmıştır. Şekil 1'deki sıkıştıran ve patlayan kayalarda beklendiği gibi, tünel yüzeyi birim deformasyonları ile yenilme bölgeleri, sıkıştıran kayalardaki tünellerde patlayan kaya kütlelerine göre daha fazla oluşmaktadır. (Aydan vd., 2001b)

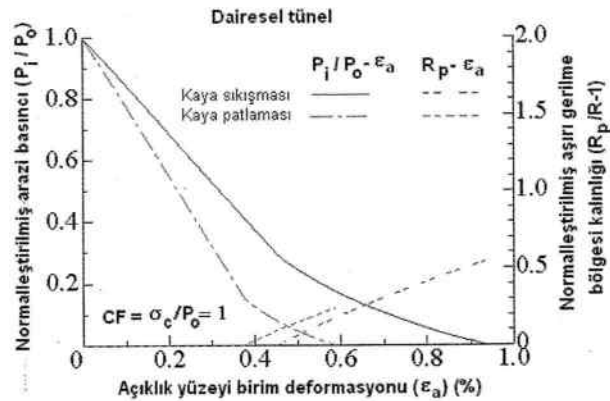
5.2. Hidrostatik Olmayan Birincil Gerilme Koşulu için Analitik Yöntem

Hidrostatik olmayan birincil gerilme durumunda doğrusal olmayan malzeme davranışı gösteren ortamlardaki açıklık çevresinde oluşan yerdeğiştirme, birim deformasyon ve gerilmelerin analitik yollarla tahmini genellikle güçtür. Bununla birlikte, kaya kütlelerinin elastik davranış gösterdiği durumda dairesel açıklıklar için Kirsch (1898), eliptik açıklıklar için Ingliss (1913) ve yerçekimi yüklemesi durumunda dairesel açıklık için Mindlin (1939) tarafından önerilen analitik çözümler bulunmaktadır. Muskhelishvili (1963) değişik kesitli açıklıklar için karmaşık değişken fonksiyonlara dayalı genel bir yöntem geliştirmiştir.



Şekil 18 Yapım aşamasında olan 10 km uzunluğundaki tünelde hesaplanan tahmini değerler (Aydan vd., 2001b).

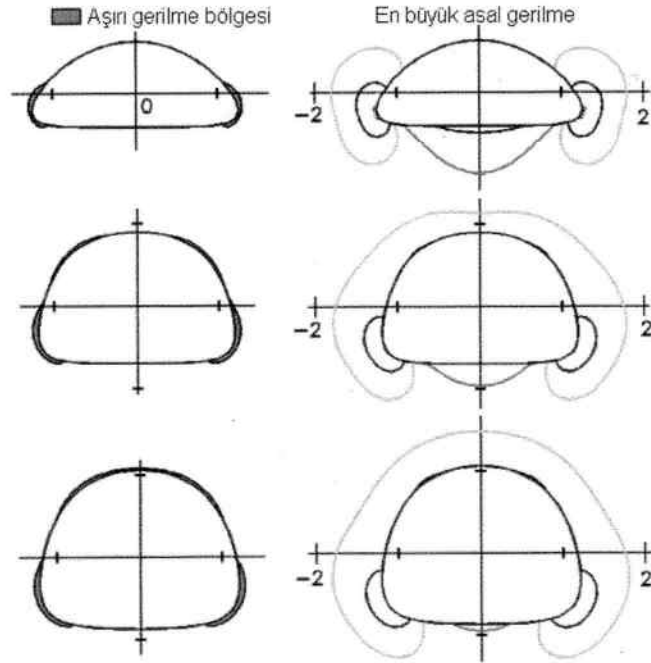
Figure 18. Predicted results for a 10 km long expressway tunnel under construction (Aydan et al., 2001b).



Şekil 19. Sıkışan ve patlayan kayalarda, dairesel tünel çevresinde hesaplanan açıklık yüzeyi birim deformasyonu ve yenilme bölgesi kalınlıklarının karşılaştırılması (Aydan vd., 2001b).

Figure 19. Comparison of computed tunnel wall strain and plastic zone of circular tunnels in squeezing rock and bursting rock (Aydan et al., 2001b).

Gerçek (1986, 1988, 1989), Muskhelishvili (1963)'nin yöntemine dayalı gerilme fonksiyonlarının integrasyon sabitlerini elde eden yarı sayısal teknik önermiştir. Hidrostatik olmayan birincil gerilme durumunda Tresca tipi malzeme modeli kullanılarak dairesel açıklık çevresindeki ilk analitik çözüm Galin (1955, Savin 1961'den) tarafından geliştirilmiştir. Bu çözüm, Detournay ve Fairhurst (1982, 1987) tarafından Mohr-Coulomb malzeme davranışına uygulanarak genişletilmiş ve yenilme bölgesinin açıklığı tamamen çevrelemediği durum düşünülerek bazı önerilerde bulunmuştur. Kastner (1962) tarafından Kirsch'in (1898) çözümü kullanılarak, hidrostatik olmayan birincil gerilme durumunda dairesel açıklık çevresinde yaklaşık yenilme bölgesi tahmini için bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntem ayrıca Zoback vd. (1980) tarafından birincil gerilmelerin yorumlanmasında kullanılan sondaj kuyuları çevresinde oluşan yenilme bölgesi geometrilerinin tahmini için kullanılmıştır. Gerçek (1993) ve Geniş (2002) değişik geometriye sahip açıklıklar çevresindeki yenilme bölgesinin değerlendirilmesi için aynı yöntemi kullanmışlardır. Hidrostatik birincil gerilme alanında dairesel açıklık için bu yöntem kullanılarak tahmin edilen yenilme bölgeleri daha küçük olmasına rağmen (Aydan, 1987), tahmini yenilme bölgesi kapalı çözümlerin sonuçlarına yakın olmaktadır. Ayrıca kaya saplamaları ile yapılan tahkimatlı durumda beklenen yenilme bölgesi için kaba bazı bilgiler sunabilmektedir. Yazarlar, Gerçek (1993) tarafından önerilen yöntemine dayalı olarak farklı geometrilere sahip açıklıklar çevresinde oluşan aşırı gerilme bölgesi tahmini kavramını genişletmişlerdir. Çözümlemeye birim deformasyon ve şekil değiştirme enerjileri, uzama birim deformasyonu ve çekme yenilmelerinin ihmal edildiği Mohr-Columb ölçütünü eklenmiştir. Hidrostatik birincil gerilme alanında açılan bir tünelin farklı kazı aşamalarında açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgeleri ve en büyük asal gerilme dağılımları Şekil 20'de gösterilmiştir. En kritik gerilme durumu tünelin üst kazısının yapıldığı durum olup, kazı dairesel forma yaklaştıkça gerilme durumu daha düzenli bir dağılım göstermektedir. Ayrıca, çekme gerilmelerinin dağılımı göreceli olarak azalmaktadır.



Şekil 20. Hidrostatik birincil gerilme durumunda, farklı kazı aşamalarında tünel çevresinde oluşan aşırı gerilme bölgesi ve en büyük asal gerilme dağılımı.

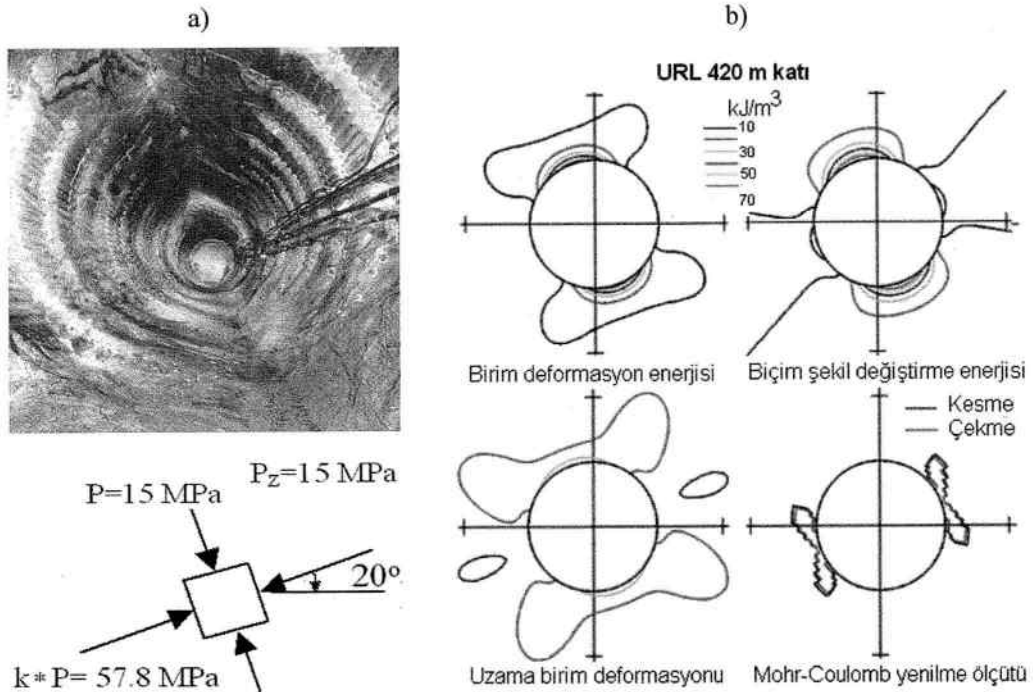
Figure 20. The overstressed zones around a tunnel subjected to hydrostatic initial stress state at different stages of excavations and the contours of maximum principal stress.

Kanada'da Winnipeg'de bulunan "Yeraltı Araştırma Laboratuvarı, URL" granodiyoritik sert kayada açılmıştır. 420 m derinlikteki dairesel açıklık çevresinde ilginç bir yenilme bölgesi gözlenmiştir (Şekil 21a) (Martin ve Read, 1996). URL'de dairesel açıklık çevresinde oluşan aşırı gerilme bölgesi Şekil 21b'de gösterilmiştir. Kesme (makaslama) ve çekme yenilme modeli dışında diğer bütün yöntemler gerçek yenilme bölgesine yakın sonuçlar vermiştir. Ayrıca, önerilen yaklaşık yöntem sonlu elemanlar yöntemine uyarlanmış ve olası yenilme bölgeleri elde edilmiştir (Şekil 22). Çözümlemede kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Sonlu elemanlar çözümleme yönteminde kullanılan malzeme özellikleri.

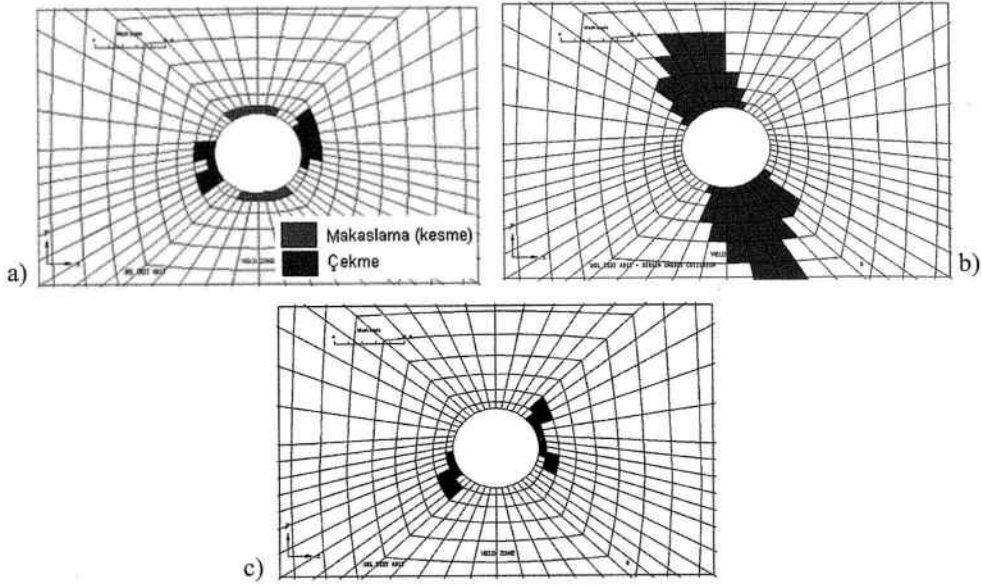
Table 1. Material properties used in finite element method analysis.

Elastisite modülü (GPa)	Poisson oranı, ν	Drucker-Prager içsel sürtünme katsayısı, α	Drucker-Prager dayanımı, k
30	0.20	0.271	16.4
Birim hacim ağırlık (kN/m ³)	İçsel sürtünme açısı, ϕ (°)	Kohezyon (MPa)	Çekme dayanımı, σ_t (MPa)
26.3	45	15	3



Şekil 21. Açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesinin görünümü ve farklı yöntemler kullanılarak belirlenmiş olası yenilme bölgeleri: (a) açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi görünümü ve birincil gerilme bileşenleri (Martin ve Read, 1996), (b) açıklık çevresinde oluşabilecek olası yenilme bölgeleri.

Figure 21. View of the failure zone around opening and estimated yield zones by different methods: (a) a view of the failure zone around opening and in-situ stress state (Martin and Read, 1996), (b) estimated yield zone around the opening.



Şekil 22. Doğrusal olmayan FEM analizleri kullanılarak tahmin edilen yenilme bölgeleri: (a) elasto-plastik analiz, (b) birim deformasyon enerjisi, (c) çekme dayanımının olmadığı durum.

Figure 22. Yield zones estimated from non-linear FEM analyses: (a) elasto-plastic analysis, (b) strain energy criterion, (c) no-tension analysis.

5.3. Elasto-Plastik Yöntem

Bu yöntemde, kayanın dayanımını modellemek için birçok model malzeme davranışı önerilmiştir. Kayacın en yüksek dayanımından kalıcı dayanımına aniden düşüşü şeklinde tanımlanan elastik kırılğan plastik model bunlardan en basitidir. Aydan vd. (2001b), kaya sıkıştırması ve patlaması olgusunu birleştiren gerilme düşüşü modelini birim deformasyon seviyesinin bir fonksiyonu olarak önermiştir. Bu model, en azından iki olguyu birleştirici bir tarzda düşünülmektedir. Bununla birlikte model, kaya patlamasının tahmini için zamandan bağımsız sınıflama yöntemleri ile sınırlıdır.

5.4. Görgül Yöntemler

Görgül yöntemlerin biri kaya sınıflandırmaları ile ilgilidir. Kaya kütlesi sınıflama sistemlerinden Q sistemi (Barton vd., 1974), kaya patlaması olgusunu doğrudan ele alan tek sınıflama sistemidir. Kaya patlaması seviyesi, kayanın tek eksenli basınç dayanımı (σ_c) ile teğetsel gerilmenin (σ_θ) en büyük asal birincil gerilme (P_{max}) bileşenine oranı ile tanımlanmıştır (Çizelge 2). Kaiser (1993) tarafından arazi gözlemlerine dayanarak derlenen enerji ölçütü yeniden düzenlenerek Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 2. Q-sistemi tarafından önerilen kaya patlaması olasılığının tahmini (Barton vd., 1974).

Table 2. Rockburst susceptibility assessment by Q-system (Barton et al., 1974).

Kaya patlaması seviyesi	σ_c / P_{max}	σ_θ / P_{max}
Hafif patlama sesleri	10-5	0.66-0.33
Orta derecede kaya patlaması	5-2.5	0.33-0.16
Şiddetli kaya patlaması	< 2.5	0.16

σ_c : tek eksenli basınç dayanımı

σ_θ : teğetsel gerilme

P_{max} : en büyük birincil gerilme

Çizelge 3. Kaiser vd. (1993) tarafından önerilen kaya patlaması duyarlılığının tahmini.
Table 3. Rockburst susceptibility assessment recommended by Kaiser et al. (1993).

Kaya patlaması düzeyi	σ_θ / σ_c	Enerji (kJ/m ²)
Yok veya çok az	0.35	-
Az	0.35-0.45	<5
Orta	0.45-0.55	5 to 10
Şiddetli	0.55-0.70	10 to 25
Çok şiddetli	>0.70	25 to 50
Oldukça şiddetli	>0.70	>50

5.5. Birleştirilmiş Yöntem

Bu yöntem, kaya patlaması olasılığının tahmini için Aydan vd. (2004) tarafından önerilmiştir. Tahmin yöntemi aşağıda verilen işleme uygun olarak yapılmalıdır.

- Bölüm 5.1 ve 5.2’de tanımlanan çeşitli yöntemlere göre kaya patlaması oluşumu olasılığının tahmini,
- kaya patlaması oluşumunun azaltılması ve önlenmesine yönelik uygun önlemlerin alınması ve
- çevre kaya kütlelerinin davranışlarının arazide izlenmesi ve kaya patlamasının tahmini.

Kaya patlaması problemlerinde yukarıda verilen ilk iki aşama kaya patlaması olasılığının değerlendirilmesi için göz önünde bulundurulmaktadır. Bununla birlikte, kaya patlaması olayının tahmini bilinen deformasyon ölçümlerinin kullanımıyla mümkün değildir. Aydan (2003), Aydan vd. (2001a, 2002, 2003)’nin çalışmalarında, laboratuvar koşullarında deformasyon ölçümlerinin kaya yenilmesi olayının yorumlanması için etkin olmadığını göstermiştir. Bununla birlikte, bazı parametrelerin kaya yenilmesi ipucunu verebileceği deneysel olarak da ortaya konmuştur. Bu parametreler; akustik emisyon (AE), elektrik potansiyel, elektriksel özdirenç, manyetik alan ve sıcaklık değişimleri olup, kayada depolanan mekanik enerjinin kaya yenilmesi sırasında oluşan enerji dönüşüm ürünleridir. Kaya patlaması ve diğer yenilme şekilleri için gerçek zamanlı çok parametre ölçümleri, deformasyon ölçümlerine ek olarak kullanılmalıdır. Bununla birlikte, tüm parametrelerin kullanımı, ölçüm aletlerindeki ve kazı işlemlerindeki sınırlandırmalar nedeniyle mümkün olamayabilmektedir.

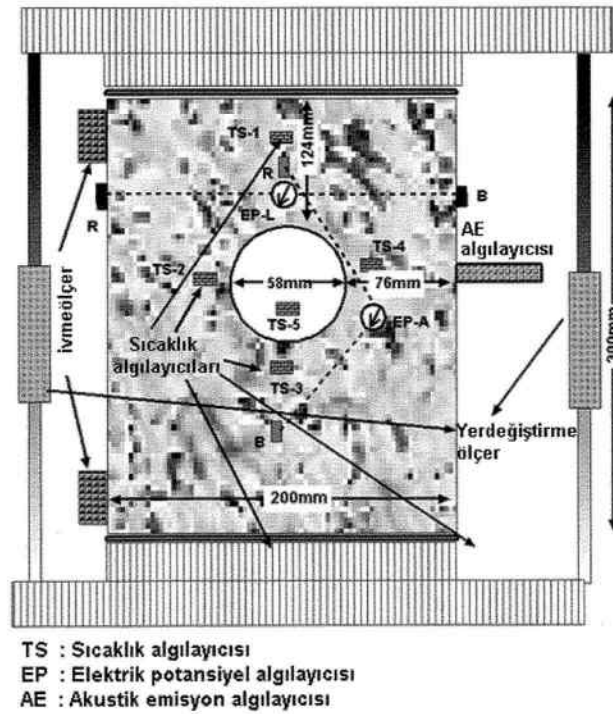
5.6. Fiziksel Model Deneyleri

Kaya bloklarından oluşturulan tünel modelleri üzerinde bazı deneyler yapılmıştır (Aydan vd., 2005b, 2005c). Bu deneyler, tüneli çevreleyen kayacın yenilme olayının tahmini için gerçek zamanlı çok parametrelili izleme sistemlerini geliştirmek amacıyla yapılmıştır. Kaya blokları Japonya’da bulunan 2. Tomei karayolunun bir bölümü olan 3. Shizuoka Tüneli (STT1 ve STT2) ve Ryukyu Adası’nda bulunan Ryukyu kireçtaşı ocaklarından alınmıştır. Model deneyler için kullanılan örneklerin boyutları Çizelge 4’te verilmiştir. Model tünelin çapı tüm deneylerde 58 mm olacak şekilde oluşturulmuştur. Çok parametrelili model deney ölçüm düzeneğinin genel görünümü Şekil 23’te gösterilmektedir. Gerilme ve birim deformasyon gibi ölçümlere ek olarak elektrik potansiyel, akustik emisyon, sıcaklık ve ivme ölçümleri de yapılmıştır.

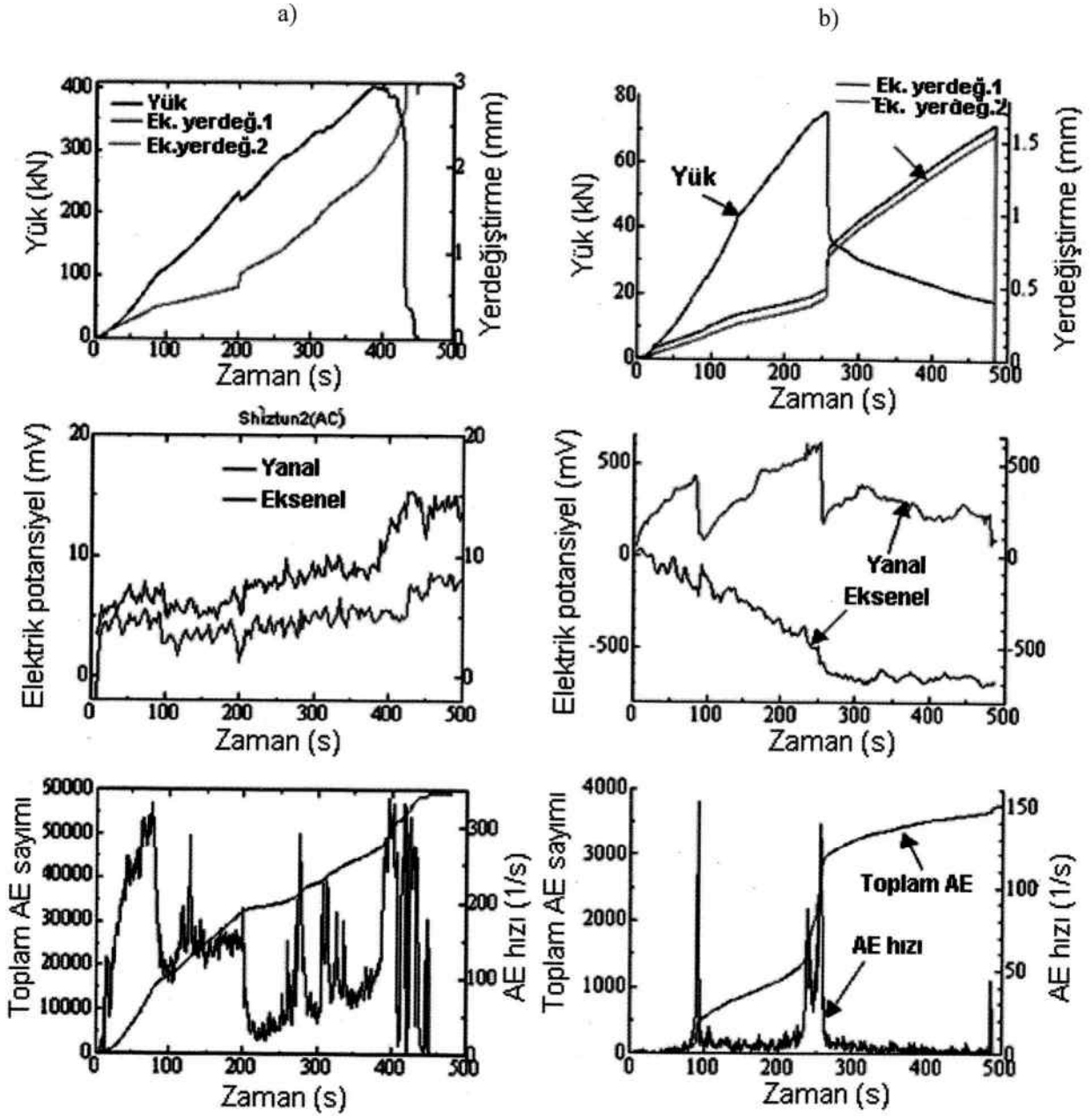
Çizelge 4. Model tünel deneylerinde kullanılan blokların boyutları.
 Table 4. Dimensions of samples used for the model tunnel tests.

Blok No	Kaya türü	Yükseklik (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)
STT1	Kumtaşı	300	200	68
STT2	Kumtaşı	300	200	138
RLT1s RLT2s	Ryukyu kireçtaşı	100	155	20
RLT1 RLT2 RLT3	Ryukyu kireçtaşı	270	160	140

Kumtaşı ve kireçtaşı örnekleri kullanılarak yapılan model tünel deney sonuçları Şekil 24'te sunulmuştur. Ölçülen tüm parametrelerin birbirleri ile çok yakından ilişkili oldukları Şekil 24'te açıkça görülmektedir. Kayanın yenilme başlangıcı ile ilgili yük ve yerdeğiştirmelerdeki ani değişiminden önce akustik emisyon ve elektrik potansiyel değerlerinde değişimler başlamaktadır. Diğer bir ifadeyle, bu parametreler kayada oluşan çatlama olayı öncesinde bazı ipuçları vermektedir. Bu parametrelerdeki değişimler, örneklerin dayanımlarının aşılmasından önce daha belirgin olmaktadır. Yerdeğiştirmedeki değişimler ise, çok daha az belirgindir. Bu nedenle akustik emisyon ve elektrik potansiyelin eş zamanlı ölçümleri çatlama olgusunun ve kaya kazılarında kaya patlamasının tahmini için oldukça yararlı bir araç olabilecektir. Bu nedenle, çok parametreyle ölçülen davranışlar için deneyim kazanmak amacıyla araziden alınan kaya örnekleri üzerinde bazı laboratuvar deneyleri yapılmıştır.



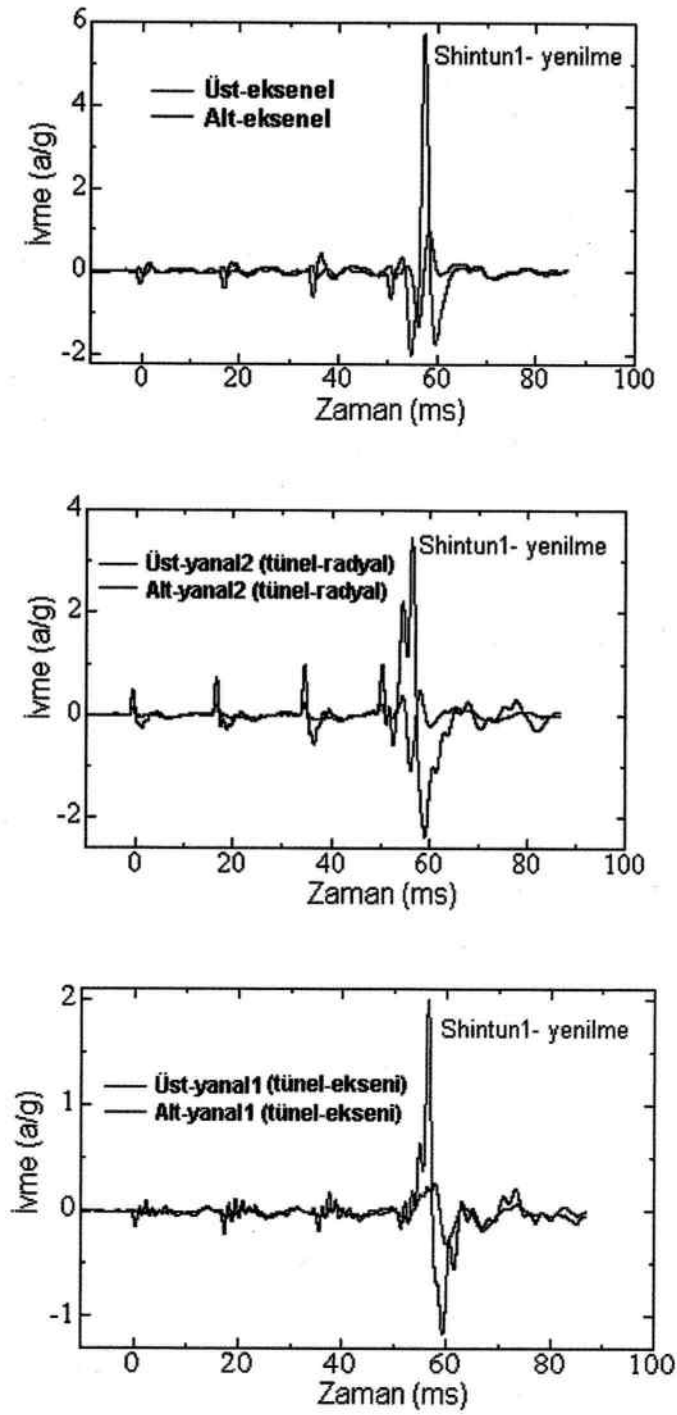
Şekil 23. Deney düzeneğinin gösterimi (Aydan vd., 2005c).
 Figure 23. The layout of the instruments (Aydan et al., 2005c).



Şekil 24. STT-2 ve RLT-1s örnekleri için çoklu parametre ölçüm sonuçları (Aydan vd., 2005c) (a) STT-2, (b) RLT-1s

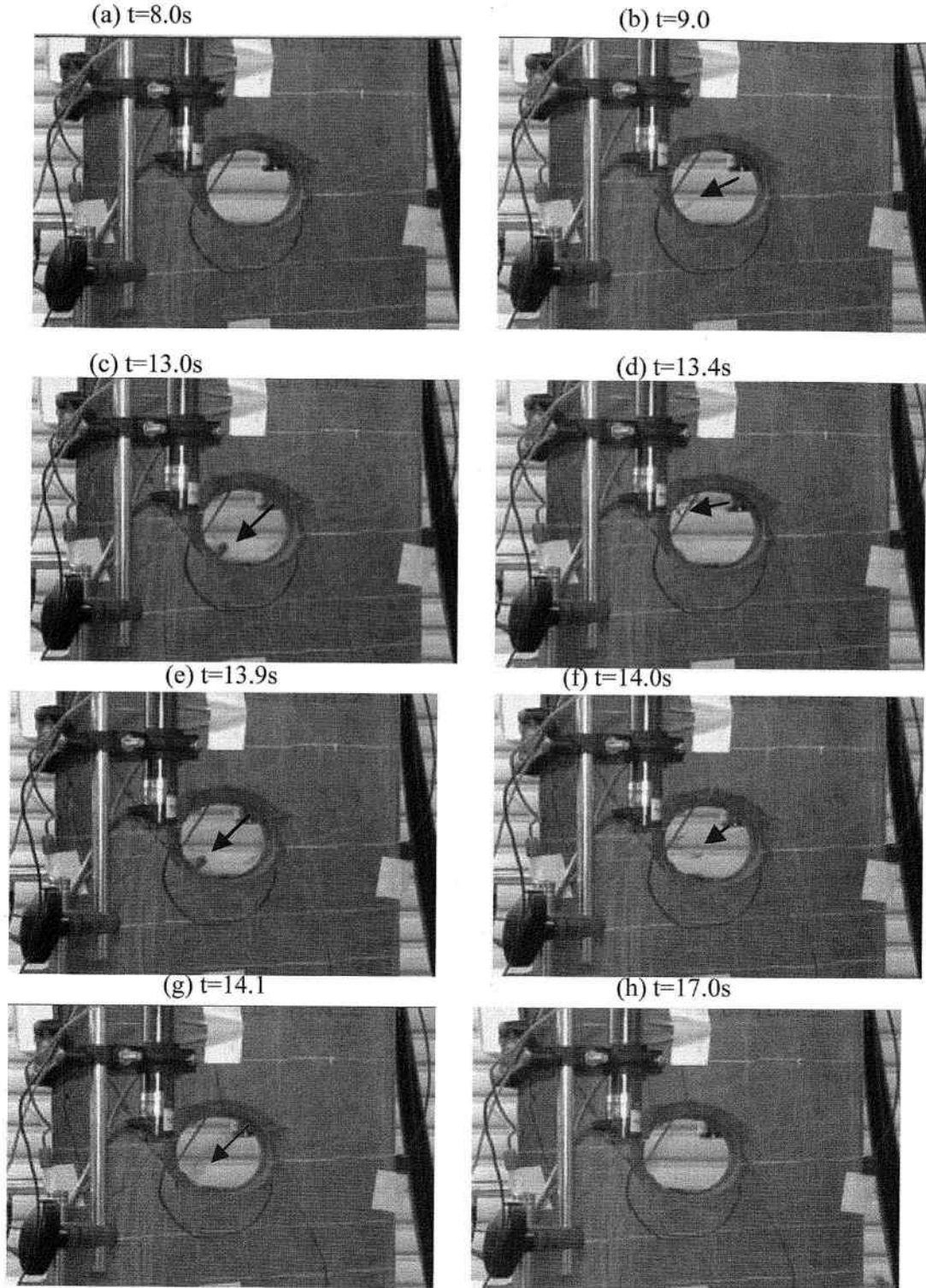
Figure 24. Measured responses of multi-parameters for the samples STT-2 and RLT-1s (Aydan et al., 2005c) (a) STT-2, (b) RLT-1s

Kaya örneğinin üst ve alt kısmına yerleştirilen ivme ölçerler tarafından kaydedilen ivme kayıtları Şekil 25'te verilmiştir. Bu ölçümler kaya parçalarının olası fırlama hızlarının yorumlanması için yararlıdır. Şekil 26'da ise, değişik zaman aralıklarında kaydedilmiş kaya patlaması görüntüleri verilmiştir.



Şekil 25. Yenilme sırasında model tünellerde ölçülen ivme davranışları.

Figure 25. Acceleration responses of model tunnels during fracturing.



Şekil 26. Shizuoka 3. tüneline alınan kaya örneğinde yapılan model tünelleri sırasında gözlenen kaya patlaması: (a) $t=8.0$ s, (b) $t=9.0$ s, (c) $t=13.0$ s, (d) $t=13.4$ s, (e) $t=13.9$ s, (f) $t=14.0$ s, (g) $t=14.1$ s, (h) $t=17.0$ s.

Figure 26. Rockbursting observed during the model tests on rock sample from Shizuoka 3rd tunnel: (a) $t=8.0$ s, (b) $t=9.0$ s, (c) $t=13.0$ s, (d) $t=13.4$ s, (e) $t=13.9$ s, (f) $t=14.0$ s, (g) $t=14.1$ s, (h) $t=17.0$ s.

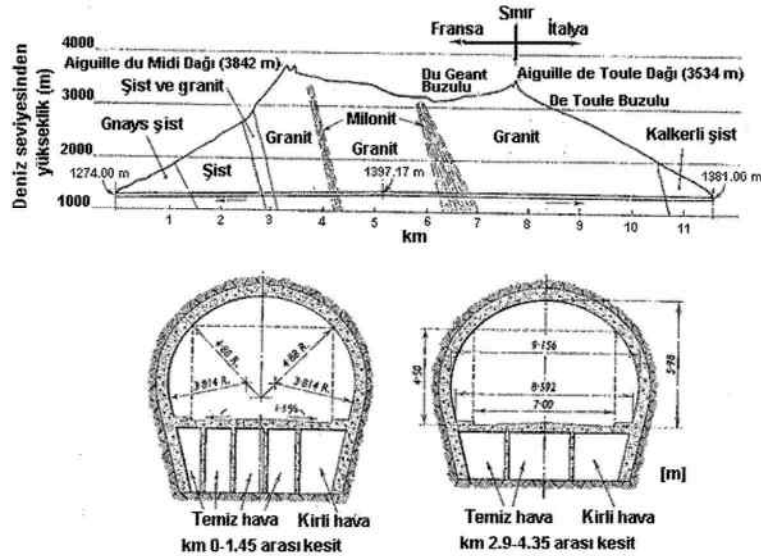
6. ÖNEMLİ BAZI KAYA PATLAMASI ÖRNEKLERİ

Kaya patlaması örneklerinin önemli bir kısmı madencilik ile ilgili olup, inşaat mühendisliği çalışmalarında çok az örnek bulunmaktadır. İnşaat mühendisliğindeki önemli örnekler kronolojik sırayla, madencilikle ilgili örnekler ülke bazında aşağıda sunulmuştur.

6.1. İnşaat Mühendisliğiyle İlgili Önemli Kaya Patlaması Örnekleri

6.1.1. Mont Blanc tüneli (Fransa-İtalya)

Mont Blanc tünelinin inşasına İtalya ve Fransa arasında 1957’de başlanmış ve 1965’te tamamlanmıştır (Şekil 27). Tünel 11 km uzunluğunda ve 8.6 m genişliğindedir. Tünelin geçtiği ana kaya kütleleri milonitleşmiş çatlaklı granittir. Kaya patlaması problemleri örtü kalınlığının 1000 m’den daha fazla olduğu bölgelerde meydana gelmiştir. Kayanın tek eksenli basınç dayanımı 100-140 MPa ve en büyük birincil gerilmeler 59-80 MPa arasında değişmektedir (Panet, 1969). Kaya patlaması, kaya fırlaması ve kavlaklanma oluşmuştur (Şekil 28). Kavlaklanma eklemli kaya kütlelerinde gözlenmiştir. Kaya patlaması, tünel çapının 0.3-0.6 katı arından uzaklıkta ve 3-4 gün içinde meydana gelmiştir. Yan duvarlardan kaya parçalarının şiddetli bir şekilde fırlamalarının önlenmesi ve duraylılığın sağlanması amacıyla çelik şeritler ve kaya saplamaları kullanılmıştır.



Şekil 27. Mont Blanc tüneli jeolojik kesiti ve tünelin kesitleri (Panet, 1969)

Figure 27. Geological section and cross-sections of Mont Blanc tunnel (Panet, 1969).

6.1.2. Furka demiryolu tüneli (İsviçre)

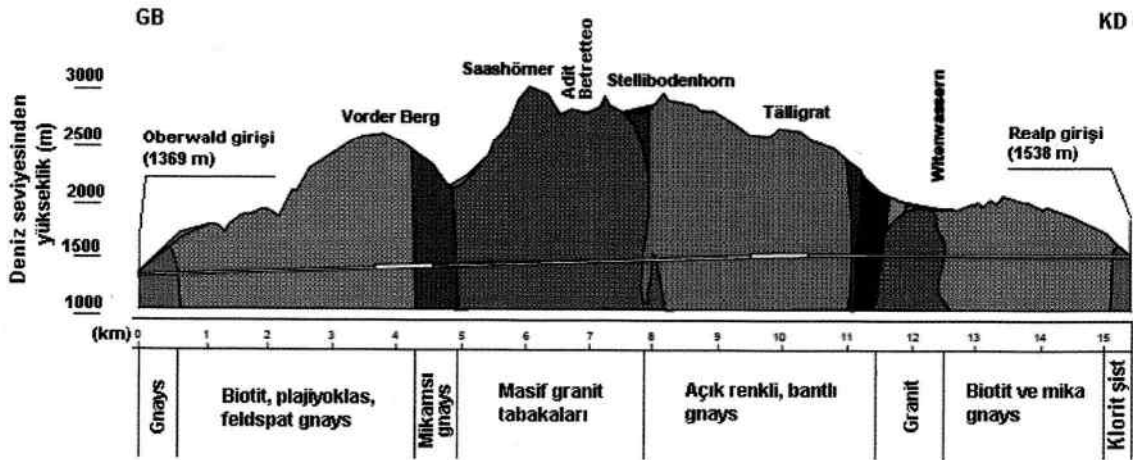
Furka demiryolu tüneli 15.5 km uzunluğunda olup, en fazla örtü yüksekliği 1520 m’dir (Şekil 29). Tek yön tünelin kesit alanı 26 ila 42 m² arasında değişmektedir. Son kaplama, kaya saplaması ve püskürtme betondan oluşmaktadır. Yüksek arazi basınçlarının bulunduğu kesitlerde kaya saplaması ve çelik hasırlı püskürtme betona ek olarak çelik bağların kullanılmasıyla eliptik veya dairesel kazı

gereksinimi doğmuştur. Kaya kütlesi başlıca granit ve gneystan oluşmaktadır. Granite kavlaklanma, gneysta ise devrilme şeklinde yenilmeler gözlenmiştir (Amberg, 1983). Gneys ve granitin tek eksenli basınç dayanımı sırasıyla 95 ve 100 MPa olup, en büyük birincil gerilme 37-38 MPa'dır. Tünel arınının 0.5-1.0 D gerisinde kaya fırlaması ve kavlaklanma meydana gelmiştir (Şekil 30).



Şekil 28. Mont Blanc tüneline oluşan kavlaklanmadan görüntüler (Panet, 1969).

Figure 28. Views of slabbing in Mont Blanc tunnel (Panet, 1969).

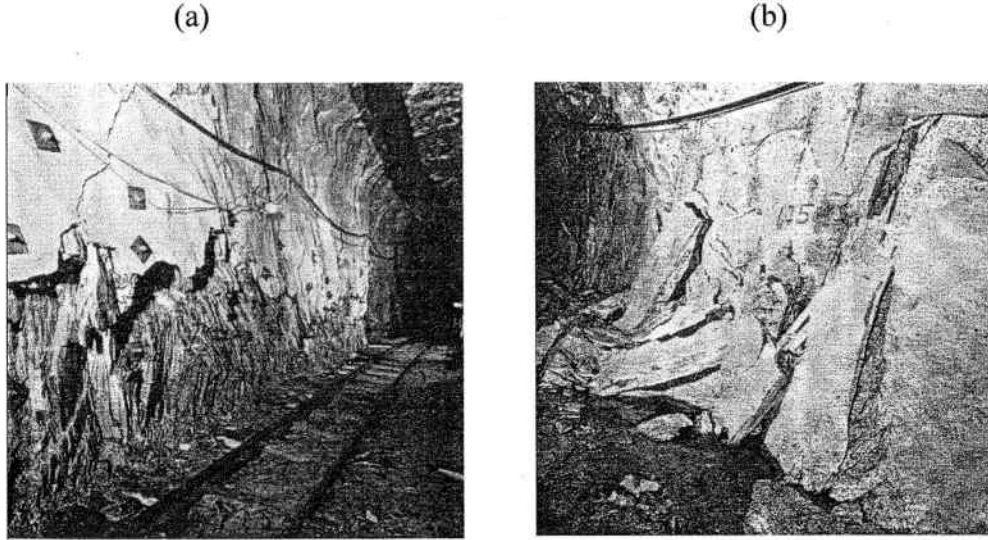


Şekil 29. Furka tüneli jeolojik kesiti (Amberg, 1983)

Figure 29. Geological cross-section of the Furka tunnel (Amberg, 1983).

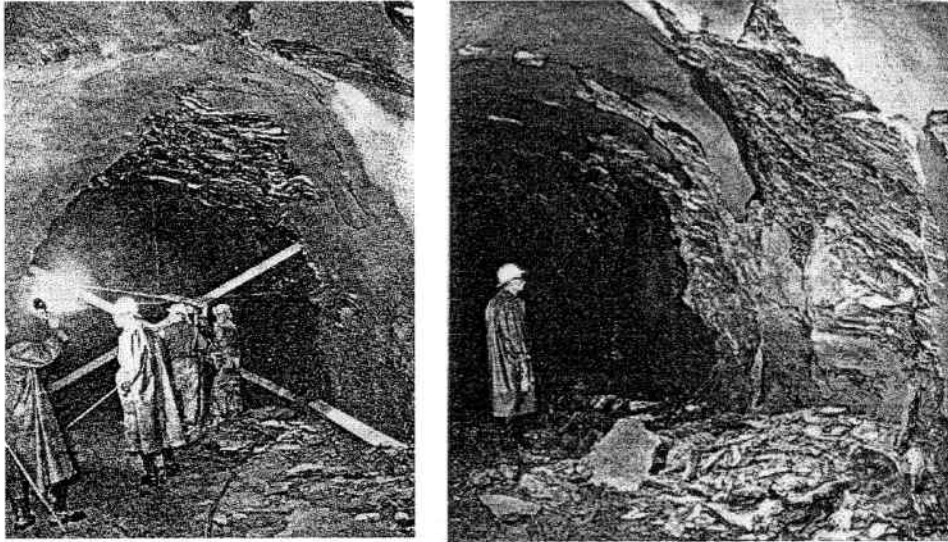
6.1.3. Kaunertal basınçlı su tüneli (Avusturya)

Kaunertal hidroelektrik santrali basınçlı su tüneli 12 km uzunluğunda ve 8 m çapındadır. Kaya kütlesi gneys olup, en büyük örtü kalınlığı 1000 m'dir. Kayaların tek eksenli basınç dayanımı 100 MPa ve deformasyon modülü 10 GPa'dır. Örtü kalınlığının 600-700 m'den kalın bölgelerinde kavlaklanma ve бүкүлме şeklinde yenilme gözlenmiştir (Şekil 31) (Detzhofer, 1969).



şekil 30. Furka tünelinde oluşan kaya patlaması problemlerinden görüntüler: (a) gneyista oluşan bükülme yenilmesi, (b) granitte oluşan kavlaklanma (Amberg, 1983).

Figure 30. Views of rockburst problems occurred in Furka tunnel: (a) buckled failure in gneiss, (b) slabbing in granite (Amberg, 1983).



şekil 31. Kaunertal tnelinde gözlenen kavlaklanma problemleri (Detzlhofer, 1969).

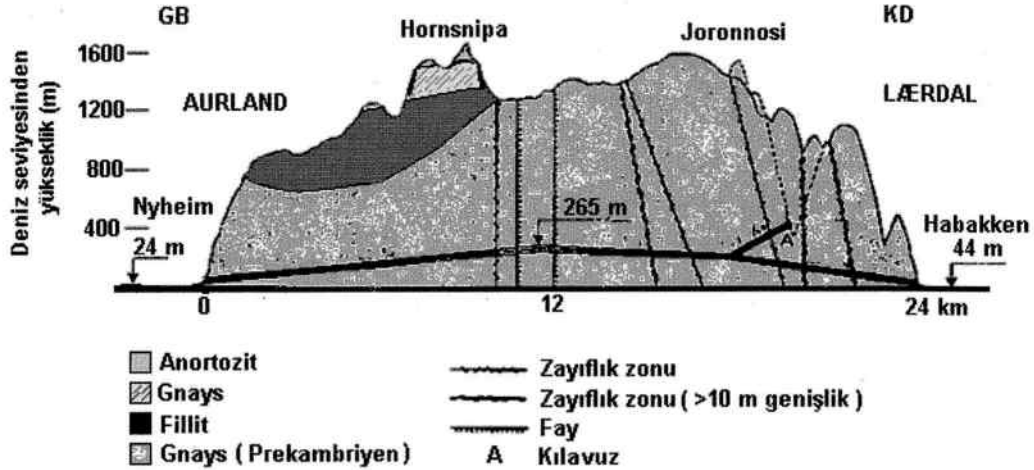
Figure 31. Spalling problems observed in Kaunertal tunnel (Detzlhofer, 1969).

6.1.4. Lrdal tüneli (Norveç)

Dünyanın en uzun karayolu tüneli olan Lrdal tüneli 24.5 km uzunlukta olup, en fazla örtü kalınlığı 1450 m ve düşey birincil gerilme 39 MPa'dır. Örtü kalınlığının 800 m'den daha fazla olduğu bölgelerde tünelin uzunluğu 20 km'dir (şekil 32). Örtü kalınlığının fazla olmasına rağmen en büyük asal gerilme tünelin çoğunda yataya yakındır. Tünel yüzeyinden 3.5 m derinlikte gerilmelerin neden olduğu bir yenilme bölgesi gözlenmiştir. En büyük asal birincil gerilme (P_1) 31.5 MPa, tünel ve vadi eksenine

paralel konumlu ortanca birincil gerilme (P_2) 28.7 MPa (36° eğimli), en küçük asal birincil gerilme (P_3) ise 21.4 MPa olup, vadi eksenine yaklaşık dik konumlu ve 47° eğime sahiptir. Kaya kütlesi ise tek eksenli basınç dayanımı (σ_c) 120-190 MPa olan gnaysdır (Grimstad, 1999).

Myrvang vd. (2000) tarafından, Hoyanger karayolu tüneli (örtü kalınlığı: 1450 m; $P_1 = 31.5$ MPa; $\sigma_c = 120$ MPa) ve Lanefjord karayolu tüneline (örtü kalınlığı: 700 m; $P_1 = 25$ MPa; $\sigma_c = 100$ MPa) de kaya patlaması problemleri oluştuğu belirtilmiştir.



Şekil 32. Lærdal tüneli jeolojik kesiti (Grimstad, 1999).

Figure 32. Geological cross-section of the Lærdal tunnel (Grimstad, 1999).

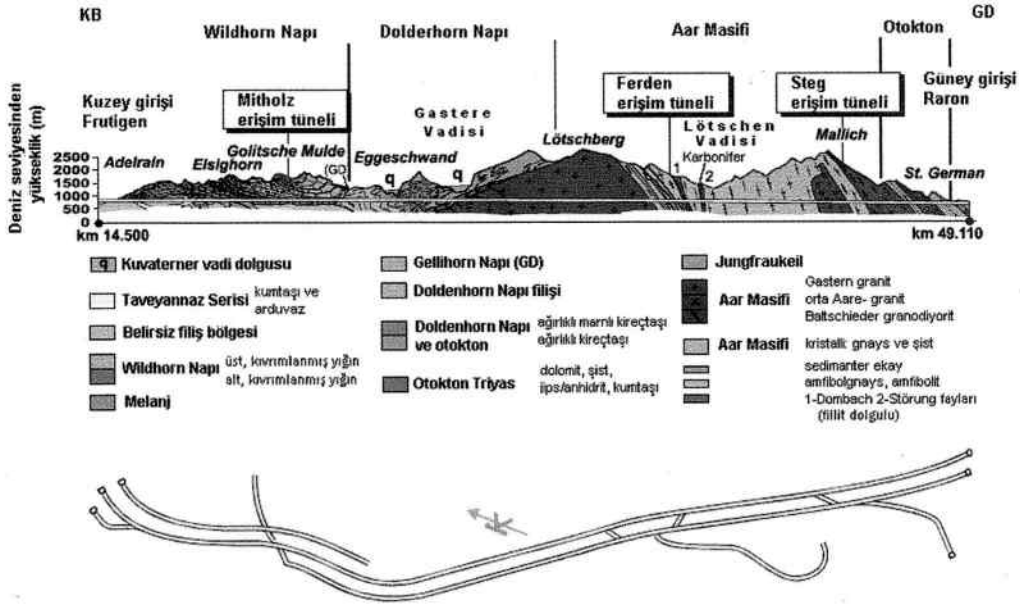
6.1.5. Lötschberg ve Gotthard tünelleri (İsviçre)

Alp Dağları'nı geçen yeni demiryolu bağlantısı iki tüneli içermektedir. Bunlardan biri Lötschberg'den geçen 34.6 km uzunluğundaki Lötschberg tüneli ve St. Gotthard'dan geçen 57 km uzunluğundaki Gotthard tünelidir (Vuillemeur vd., 1997; Aeschbach, 2002; Henke, 2005). Lötschberg tüneli Kandertal vadisindeki Frutigen'den Valais'deki Raron'a çalışacaktır. Lötschberg tüneli iki ayrı tünel olacak şekilde açılmıştır. Kaya kütlesi kalitesine bağlı olarak iki tüp arasındaki uzaklık 40 ile 60 m olup, bağlantı tünelleri her 300 m de bir inşa edilmiştir. Tam cephe galeri açma makinesinin (TBM) kullanıldığı kazının çapı 9.43 m, geleneksel delme-patlatma ile yapılan kazıda kesit alanı 62-78 m²'dir.

Tünelin güney bölümü Aar Masifi'ne ait granodiyorit ve gnays ve kuzey bölümü ise kireçtaşı, fillit ve kumtaşından oluşan sedimanter kayalardan oluşmaktadır (Şekil 33). Lötschberg tüneline granit ve granodiyorit birimleri içinde örtü kalınlığı 2000 m'ye ulaşmaktadır. Tünelin yaklaşık 9.3 km'lik bölümünde derinlik 1500 m'yi aşmaktadır. Bu nedenle, bu bölgelerde kaya patlaması oluşum riski göreceli olarak yüksektir. Kaya patlaması riski tünel çevresinde beklenen teğetsel gerilmeye göre dört ayrı sınıfta aşağıda verilmiştir:

- A Sınıfı: Çok yüksek kaya patlaması riski: %75-100, $\sigma_0 > 130$ MPa
- B Sınıfı: Yüksek kaya patlaması riski: %50-75, $120 \text{ MPa} < \sigma_0 < 130 \text{ MPa}$
- C Sınıfı: Orta derece kaya patlaması riski: %25-50, $110 \text{ MPa} < \sigma_0 < 120 \text{ MPa}$
- D Sınıfı: Düşük kaya patlaması riski: %0-25, $100 \text{ MPa} < \sigma_0 < 110 \text{ MPa}$.

Bu sınıflama sistemine dayalı olarak Lötschberg tünelinin yaklaşık 4.1 km'si A sınıfı, yaklaşık 1.4 km'si B sınıfı, 1.4 km'si C sınıfı ve 300 m'si ise D sınıfı olarak sınıflandırılmıştır. Sert kayaların tek eksenli basınç dayanımları 75 ile 205 MPa arasında değişmekte olup, ortalama tek eksenli basınç dayanımı 180 MPa'dır.



Şekil 33. Lötschberg tünelinin jeolojik kesiti (Aeschbach, 2002).

Figure 33. Geological cross-section of the Lötschberg Tunnel (Aeschbach, 2002).

TBM kazıları için iki ayrı yenilme olgusu tanımlanmıştır:

- TBM kazıcı kafası önündeki bloklu formasyon: Bloklar belirli bir şekle sahip olmayıp, kavlaklanma ve dilimlenme türünde karşılaşılan tipik yenilme şekillerini göstermemektedir (Şekil 34). Bu tür duraysızlıklar meydana geldiğinde, kesiciler tarafından kayada oluşan izlerin gözlenmesi mümkün olamamakta ve arın düzensiz bir şekilde oluşmaktadır. Kesicilerin bıraktığı izler arının çok küçük bir bölümünde görülmektedir. Bazı durumlarda klorit dolgulu zayıf yenilme düzlemlerinin varlığı ile bloklu formasyonun kazıya yardımcı olacağı görülmektedir. Bloklar, TBM'in kullanma zamanını ve ilerleme hızını azaltmaktadır.
- TBM kalkanı seviyesinde soğan kabuğu şeklinde yenilmelerin başlaması: Tünel arınının 4 m gerisine kadar yan duvarlarda kalınlığı az olan kavlaklanma oluşmaktadır. Yüksek örtü kalınlığı ile karşılaşıldığında, simetrik düzende yaklaşık 1 m derinliğinde derin kamalanma şeklinde yenilme gözlenmiştir. Bazı durumlarda, TBM mesnetlerinin kaya kütlesi ile çok iyi temas sağlamasını engelleyen bu çentikler, önemli derecede verim kayıplarına neden olabilmektedir. Bu tür koşullarda karşılaşılan güçlüklerin, büyük ölçüde artan kaya çatlaklılığıyla oluştuğuna inanılmaktadır. Çoğu durumlarda bu olgu sağlam masif kayalarda ortaya çıkmıştır. Arazide bazı güçlü akustik olgulardan bahsedilmiş, ancak şimdiye değin şiddetli blok fırlamaları oluşmamıştır. Çoğu enerji boşalmaları, açık şekilde arından 4 m (~1D) uzaklıkta ve TBM kalkanı içinde oluşmuştur.

Gotthard tüneli kazısı devam etmekte olup, 2017’de tamamlandığında dünyanın en uzun demiryolu tüneli olacaktır (Şekil 35). Tünel at nalı kesite sahiptir. Bununla birlikte, tünelin Piora bölümünde Alp orojenezi nedeniyle “kristalleşmiş dolomit” olarak adlandırılan bir kaya kütleinin bulunduğu yerde aşırı kaya sıkışması beklenmektedir (Şekil 36). Tünelin yer aldığı merkezi Alp bölgesi jeolojisi üç ana gnays bölgesinden oluşmaktadır. Bunlar; kuzeyde Aar masifi, ortada Gotthard masifi ve güneyde Pennine gnays bölgesidir. Bu birimler çok yüksek dayanımlı volkanik ve metamorfik kayalardan oluşmaktadır. Genelde bu bölgeler inşaat sırasında önemli jeoteknik güçlükler neden olmamaktadır. Ancak örtü kalınlığının 2000 m’den daha yüksek ve özellikle 5 km’lik bölümde 2300 m olduğu bölgelerde kaya patlaması olasılığı söz konusudur. Bununla birlikte, Gotthard tüneline ait araştırma tüneline son bir kaya patlaması rapor edilmiştir. Kaya patlaması tünelin tabanında başlamış ve sonra tünel arında kavlaklanma gelişmiştir (Şekil 37).

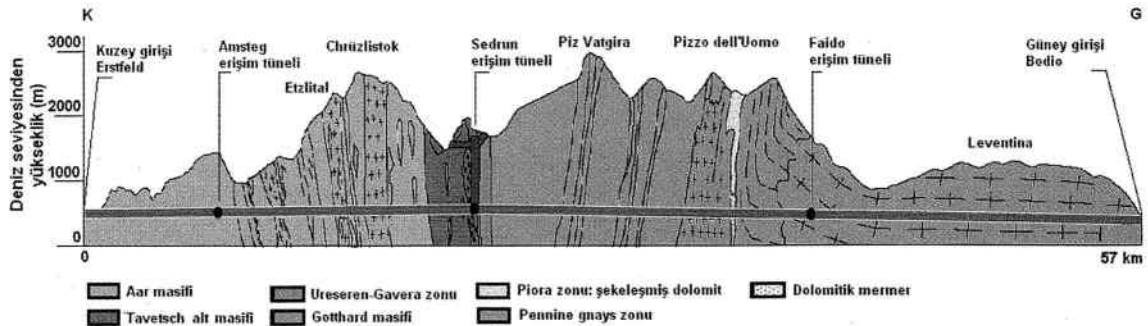
(a)

(b)



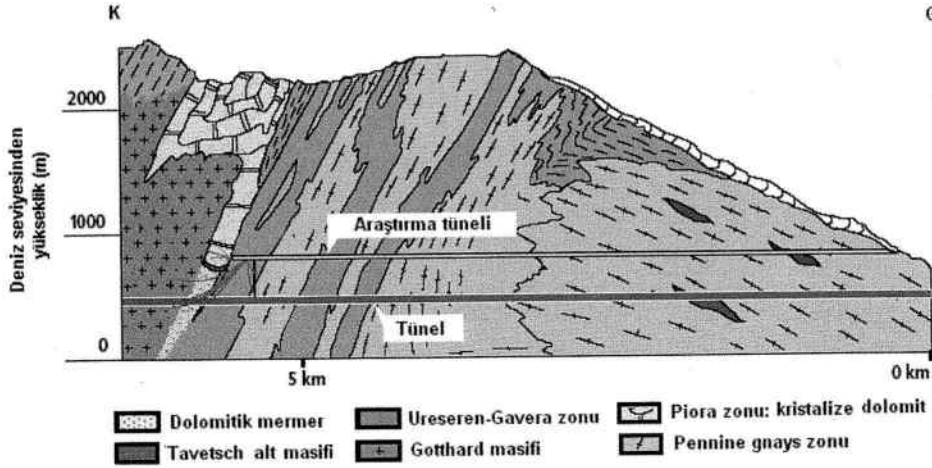
Şekil 34. Lötschberg Tüneli kaya patlaması problemleri: (a) kavlaklanma, (b) kaya fırlaması (Vuillemeur vd., 1997).

Figure 34. Rockbursting problems in Lötschberg Tunnel: (a) spalling, (b) popping (Vuillemeur et al., 1997).



Şekil 35. Gotthard tüneli jeolojik kesiti (Henke, 2005).

Figure 35. Geological cross-section of the Gotthard tunnel (Henke, 2005).



Şekil 36. Gotthard tüneli Piora bölümü jeolojik kesiti (Henke, 2005).

Figure 36. Geological cross-section at Piora section of the Gotthard tunnel (Henke, 2005).

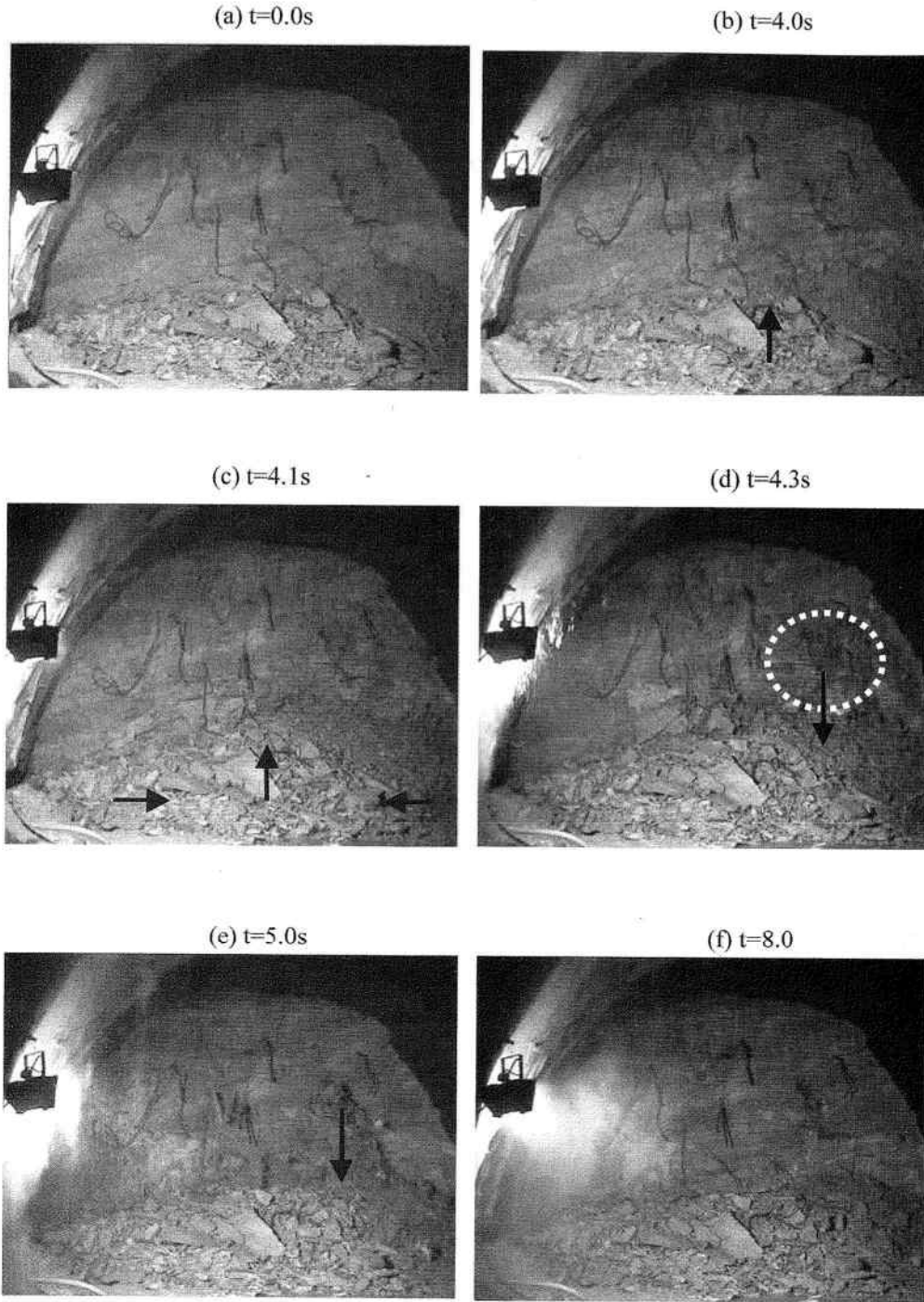
6.1.6. URL 420 m seviyesi araştırma tüneli (Kanada)

Yeraltı Araştırma Laboratuvarı (URL) Kanada Kalkanı'ndaki Lac du Bonnet granit sokulumu içinde açılmıştır. Granit sokulumu Kanada Kalkanı'nın Bird River ve Winnipeg River bölgeleri arasında tektonizma ve metamorfizma sonrasına ait sokulumlardan biridir. Sokulum, yüzeyde 1400 km²'lik bir alana sahip ve derinliği ise 6-25 km arasında değişmektedir. Arazi iki düşük eğimli bindirme fayı tarafından kesilmektedir (Şekil 38). Eğimli üçüncü bindirme fayının aşağıda, URL açıklıklarını kesmeden önce son bulunduğu görülmektedir. Bindirme fayları arasındaki bloklar, birincil gerilmelerin değişimi kadar sokulumların varlığı, düşeye yakın çatlakların sıklığı ve düzeniyle ayırt edilebilen farklı yapısal alanları tanımlamaktadır. Kuyu yakası kazıları ve yüzeydeki diğer yapıların inşaatı 1982 ve 1983 yılları arasında gerçekleştirilmiştir.

255 m derinlikte olan URL kuyusunun kazısına 1984'te başlanmıştır. 240 m seviyesinin (yüzeyden 240 m derinlikte) yatay galerileri ve havalandırma kuyusu 1987'de tamamlanmıştır. Ana kuyu 1988'de 443 m'ye derinleştirilmiştir. Yeraltı araştırma laboratuvarında 420 m derinlikte 3.5 m çapa sahip dairesel açıklık yaklaşık 46 m uzunluğunda açılmıştır. Açıklıkta oluşan yenilme bölgesinin en üst seviyede gelişmesine olanak sağlayacak şekilde tünel, ortanca birincil gerilmeye paralel şekilde konumlandırılarak açılmıştır (Read, 1994; Chandler, 2003).

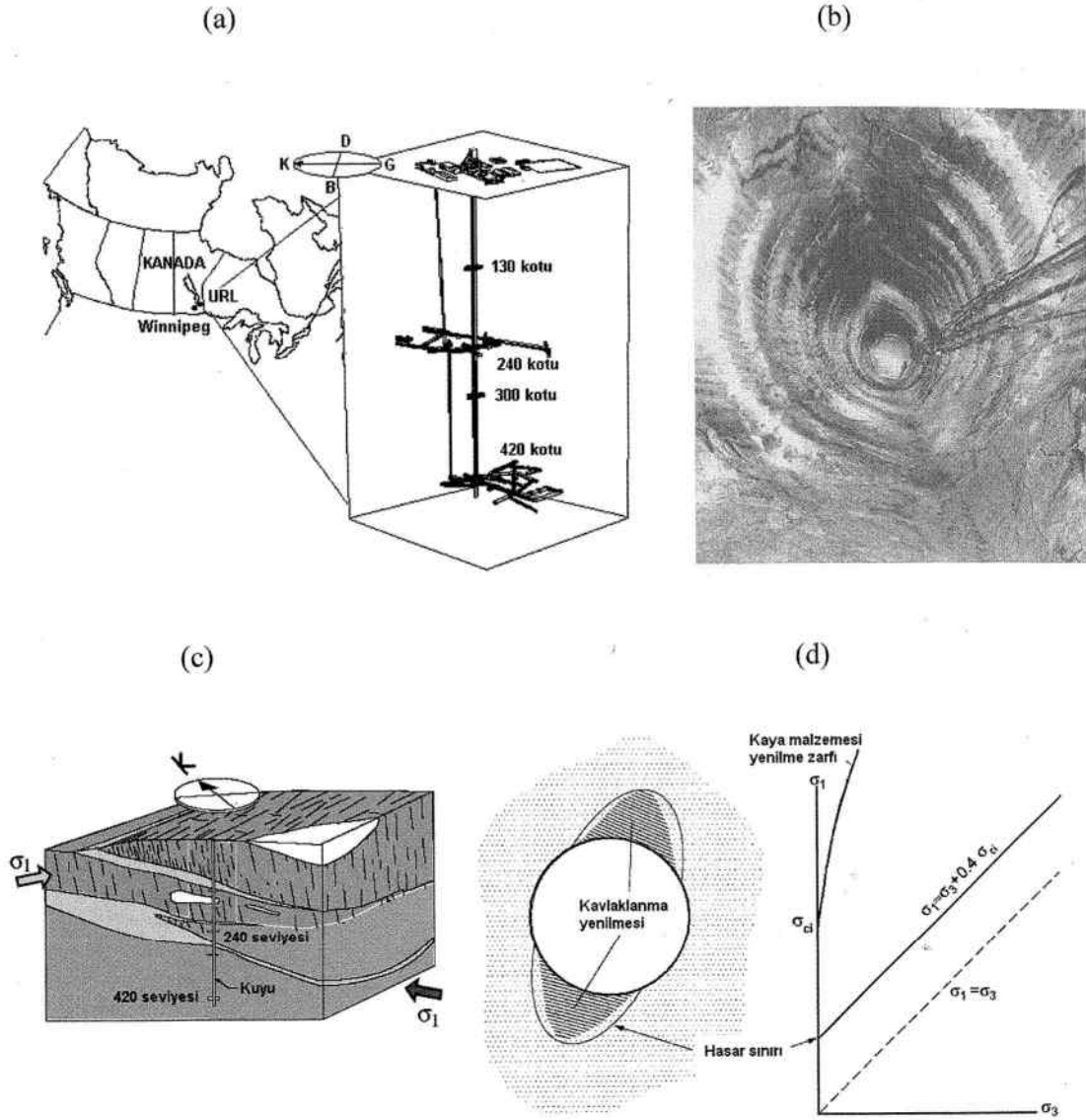
Ekim 1991 ve Temmuz 1992 arasında arındaki kazılar günde 0.5 m ile 1 m ilerleme hızıyla yapılmıştır. Bu sırada kaya kütlelerinde ivme, yerdeğiştirme, birim deformasyon ve sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Granit izotropik davranış göstermekte olup, P ve S dalga hızları sırasıyla 5763 m/s ve 3376 m/s olarak ölçülmüştür ($V_p/V_s=1.707$).

Beklendiği gibi, kama şeklinde yenilme, kazı ilerlemesi (her bir kazı aşamasını takiben tünel arınının son metresinden sonraki kısmı hariç) ile tünelin uzunluğu boyunca oluşmuştur (Şekil 38). Kama şeklindeki yenilme, sondaj ve yeraltı tünellerinde de gözlemlendiği gibi ortak bir özellik göstermiştir. Yenilmeler en düşük gerilme doğrultusuna paralel ve açıklık eksenine dik konumda oluşmaktadır (Bell and Gough, 1979). Kama şeklindeki yenilme genellikle düşeyle 10°-20° arasında ve güneydoğuya doğru oluşmuştur. Bu durum ölçülen en düşük gerilme doğrultusu ile oldukça uyumludur. Tünel çevresinde gerilmelerin neden olduğu çatlama yaklaşık 0.3-0.5 σ_{ci} seviyesinde oluşmaktadır. Tek eksenli basınç altında hasar başlangıcı en yüksek dayanımın 0.3 ile 0.5 seviyelerinde başlamaktadır. Yerinde ölçümler, laboratuvar koşullarında yapılan gözlemlerle oldukça benzer çıkmıştır.



Şekil 37. Gotthard tüneli araştırma tüneline kaya patlaması olgusunun değişik aşamalarından görüntüler (dijital video'dan düzenlendi): (a) başlangıç durumu ($t=0$), (b) tabandan başlayan kaya patlaması ($t=4$ s), (c) tabanda oluşan patlamanın son durumu (kabarma değil) ($t=4.1$ s), (d) arında kavlaklanmanın başlaması (toz oluşumu) ($t=4.3$ s), (e) arında kavlaklanmanın başlaması ($t=5$ s), (f) arının son durumu (toz oluşumu) ($t=8$ s)

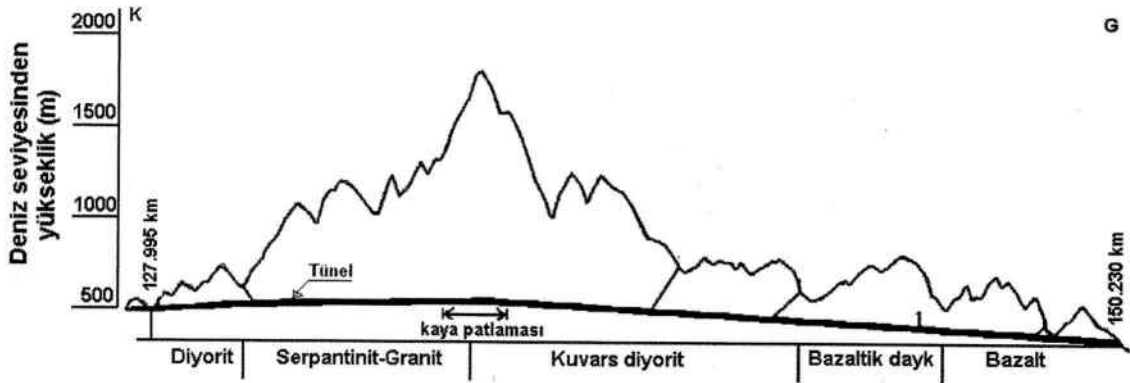
Figure 37. Views of various stages of rockbursting at an exploration Gotthard tunnel (arranged from a digital video): (a) initial state ($t=0$), (b) bursting from floor starting ($t=4$ s), (c) floor bursting at peak state (not heaving) ($t=4.1$ s), (d) face starts to slabbing (note dust) ($t=4.3$ s), (e) slabs falling from tunnel face ($t=5$ s), (f) final stage of tunnel face (note dust) ($t=8$ s).



Şekil 38. URL açıklıklarının jeolojisi ve test tüneli (Chandler, 2003).
 Figure 38. Geology of URL openings and test tunnel (Chandler, 2003).

6.1.7. Dai-Shimizu tüneli (Japonya)

Dai-Shimizu tüneli, Joetsu Shinkansen hattı boyunca 22.2 km uzunluğunda, yapımı 1982 yılında tamamlan çift hatlı bir demiryolu tünelidir. Kaya kütlesi başlıca kuvarsit diyorit olup, örtü yüksekliği 470-1150 m arasında değişmektedir (Şekil 39). En büyük birincil gerilme 24-26 MPa ve kayacın tek eksenli basınç dayanımı 150 MPa'dır. Örtü yüksekliğinin yaklaşık 700 m'yi geçtiği bölümlerde kaya patlaması gözlenmiştir. Kaya patlaması, kazı için yapılan patlatmaların hemen ardından veya yeni patlatma için delik delme sırasında tavanda ve arın çevresinde gözlenmiş olup, bazı durumlarda yan duvarlarda da oluşmuştur. Tünelin tahkimatı kaya saplamaları ve hasır örgü ile birlikte çelik bağla yapılmıştır (Shimokawa vd., 1977).

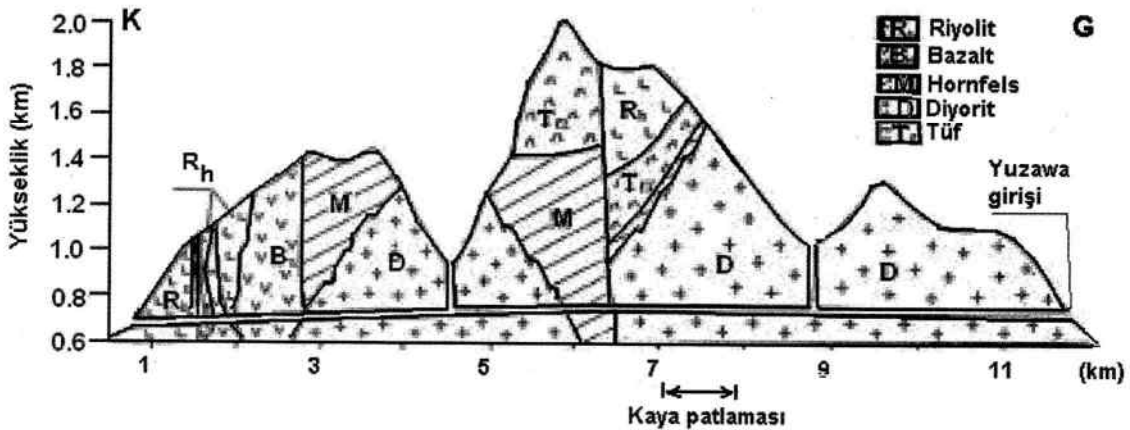


Şekil 39. Dai-Shimizu tüneli jeolojik kesiti (Shimokawa vd., 1977).

Figure 39. Geological cross-section of the Dai-Shimizu tunnel (Shimokawa et al., 1977).

6.1.8. Kanetsu tüneli (Japonya)

Kanetsu tüneli, 11 km uzunluğunda, Kanetsu otoyolu üzerinde ve Dai-Shimizu tüneline yakın açılmıştır. En fazla örtü kalınlığı 1200 m olup, kaya patlaması örtü yüksekliğinin 600-700 m'den daha derin olduğu bölgelerde (Şekil 40), arın ilerlemesinden sonra ise yan duvarlarda kavlaklanma gözlenmiştir. Kaya patlamasının gözlemlendiği tünelin bölümlerinde, 4 m uzunlukta kaya saplamaları ve çelik hasırla birlikte püskürtme beton kullanılmıştır. Kaya patlamasının gözlemlendiği bölümde kaya kütlesi diyorit olup, tek eksenli basınç dayanımı 126-282 MPa arasında değişmektedir (Inoma, 1981).



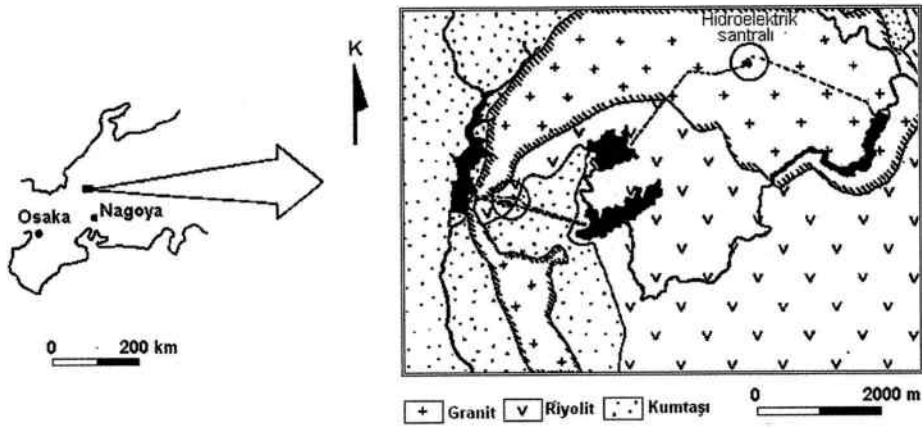
Şekil 40. Kanetsu tüneli jeolojik kesiti (Inoma, 1981).

Figure 40. Geological cross-section of the Kanetsu tunnel (Inoma, 1981).

6.1.9. Kawaore hidroelektrik santral erişim tüneli (Japonya)

Japonya'nın Gifu ilinde bir yeraltı hidroelektrik santrali yapılması planlanmıştır. Söz konusu açıklığın inşa edileceği bölge Japonya'da 1891 yılında büyüklüğü 8 olan depreme neden olan faydan yaklaşık 20 km uzaklıktadır. 550 m derinlikte granitik kaya içerisinde açılacak bu açıklık, inşa edildiğinde Japonya'da en derin yeraltı santralı olacaktır. Açıklığın boyutları 182.4x50.2x24 m olup aynı bölgede yaklaşık 340 m derinlikte benzer geometriye sahip Okumino yeraltı santralı da bulunmaktadır. Yeraltı

açıklığının oluşturulacağı kaya birimi Kretase yaşlı granit olup, sahanın genel jeolojisi Şekil 41’de gösterilmiştir. Granit orta boyutlu kristallerden oluşmaktadır. Açıklığın oluşturulacağı kaya kütleindeki ana süreksizlikler 4 eklem takımı ve 2 fay olarak ayırtlanmıştır. Sahadaki kaya kütleleri Japonya’da baraj ve yeraltı santrallerinin inşasında kullanılan DENKEN sınıflama sistemine (Tanaka, 1966) göre B ve CH sınıfı kaya kütleleri olarak tanımlanmıştır. Söz konusu sınıflama sisteminin detayları Ulusay ve Aydan (1997) tarafından verilmiştir. B sınıfı kaya kütlelerinde süreksizlikler aralığı geniş olup, çok az süreksizlik takımına sahip bir kaya kütleleridir. Ayrıca kayada ve süreksizlik yüzeylerinde ayrışma ve/veya oksitlenme görülmemektedir. Diğer taraftan, CH sınıfı kaya kütlelerinde süreksizlik aralığı küçük olup, daha fazla sayıda süreksizlik takımı içeren bir kaya kütleleridir. Süreksizlik yüzeylerinde ayrışma ve/veya oksitlenme gözlenir. Bu sahada süreksizlik yüzeylerindeki oksitlenme, granitik kayacın oluşumundan sonra volkanik sokulumların neden olduğu ısı bozunma sonucunda oluşmuştur.



Şekil 41. Yeraltı açıklığının yeri (Ishiguro vd., 1997).

Figure 41. Location of underground cavern (Ishiguro et al., 1997).

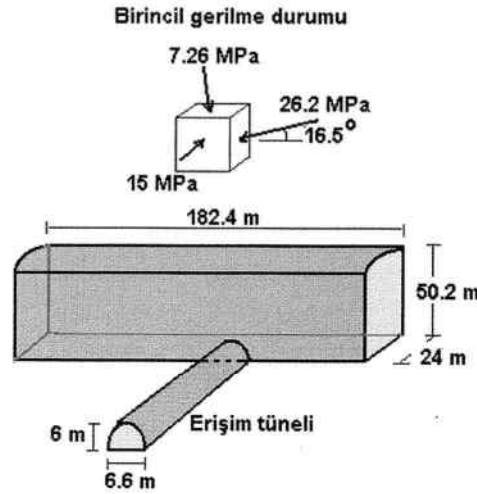
Kaya kütlelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla laboratuvar ve arazi deneyleri yapılmıştır. Laboratuvarda fiziksel özellikler olarak birim hacim ağırlık, boşluk oranı ve P-dalgı hızı ölçümleri ile mekanik özelliklerin belirlenmesi için de tek eksenli basınç, dolaylı çekme ve üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. B ve CH kaya sınıflarını temsil edecek karotlar araziden alınmıştır. Her bir kaya sınıfı için kaya malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 5’te verilmiştir.

Çizelge 5. Kaya malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri.

Table 5. Physical and mechanical properties of intact rock.

Sınıf	Birim hacim ağırlık (kN/m ³)	Young Modülü (GPa)	Poisson oranı	Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	İçsel sürtünme açısı (°)	P-dalgı hızı (km/s)
B	26	25 – 46	0.16 – 0.22	217 - 218	59 – 62	4.6 – 5.5
CH	26	5.0 – 21.4	0.18 – 0.27	110 - 153	53 - 58	3.9 – 5.1

Sahada ayrıntılı olarak birincil gerilme ölçümleri yapılmıştır. Daha önce yapılan gerilme-boşaltma yöntemi (overcoring) ile yapılan ilk çalışmalarda, Japonya’da bugüne değin diğer yeraltı açıklıklarının oluşturulduğu sahalarda gözlenen birincil gerilme değerlerinden daha yüksek gerilme değerleri elde edilmiştir. Birincil gerilme ölçümlerine göre; yatay düzlemdeki birincil gerilme bileşenlerinden biri yaklaşık doğu-batı yönünde ve büyüklüğü 21.9-26.9 MPa, diğeri ise kuzey-güney doğrultusunda ve büyüklüğü 11.2-14.2 MPa, düşey bileşen ise 7.4-11.3 MPa arasında değişim göstermektedir. Bu konu ile ilgili daha ayrıntılı bilgiler Ishiguro vd. (1997, 1999) ile Aydan ve Kawamoto (2001)’de bulunabilir. Yeraltı açıklığının uzun ekseninin konumu, yataydaki en büyük asal birincil gerilmeye paralel olacak şekilde yeniden konumlandırılmıştır. Yeraltı hidroelektrik santralinin inşası Japonya’daki enerji gereksinimdeki değişiklikler nedeniyle bilinmeyen bir süre askıya alınmıştır. Bununla birlikte ana açıklığa erişim tünelleri kazılmıştır (Şekil 42). Erişim tünelinin yatay en büyük birincil gerilmeye paralel konumlu olduğu durumda kaya patlaması gözlenmiştir. Kazı için yapılan patlatma sonrası tünel arınında, kaya yenilmesi sırasında ortaya çıkan sesler ve küçük ölçekli kavlaklanmalar gözlenmiştir. Erişim tüneli ve araştırma amaçlı yapılan kılavuz kazılarında farklı amaçlar için kaya kütleline açılan delikler dikkatli bir şekilde izlenmiştir. Bu sondaj delikleri çevresinde oluşan yenilmeler ve gerilmelerin neden olduğu çatlakların çeşitli görünüşleri Şekil 43’te verilmiştir.

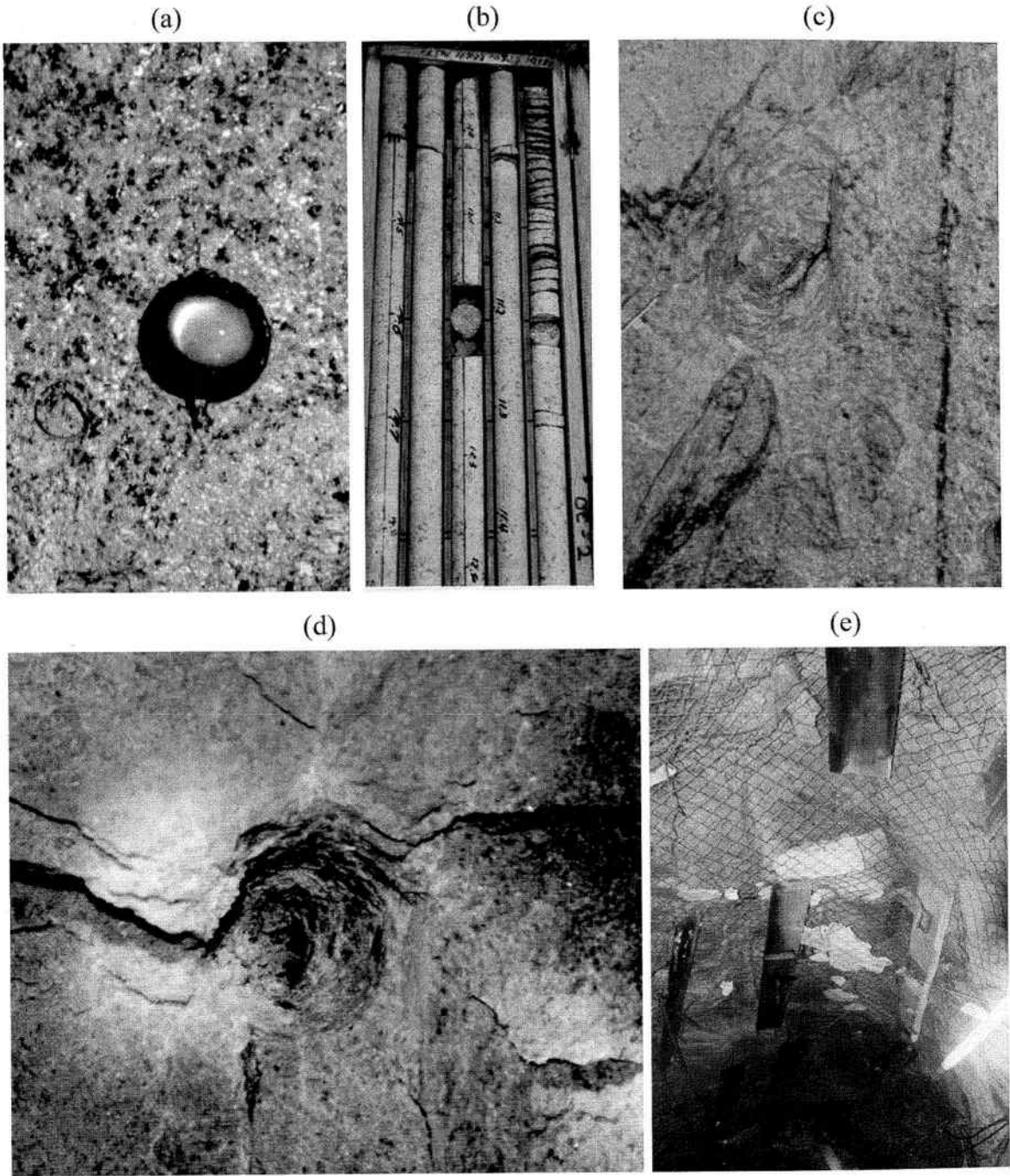


Şekil 42. Hidroelektrik santrali ve erişim tünelinin basitleştirilmiş gösterimi ve birincil gerilme durumu.

Figure 42. A simplified illustration of powerhouse and access tunnel and in-situ stress state.

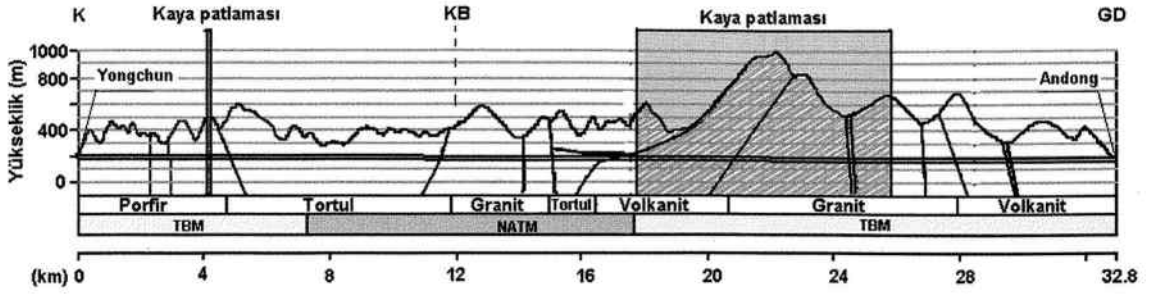
6.1.10. Andong-Yongchun su tüneli (Güney Kore)

Andong-Yongchun su tüneli, örtü kalınlığının yaklaşık 200 m ile 800 m arasında değiştiği yüksek dağların altından geçmektedir (Şekil 44). Uzunluğu 33 km olup, günümüzde Kore’nin en uzun su tünelidir. Tünel, magmatik ve sedimanter kayada açılmıştır. Kaya kütleli, faylar ve daykları içeren iki ile dört eklem seti içermektedir. Tünelin 10.6 km’lik NATM ile kazılan bölümde genişliği 3.8-4.0 m ve 22.4 km’lik TBM ile kazılarında ise çapı 3.5 m’dir. Kayanın tek eksenli basınç dayanımı 78-162 MPa arasında değişmektedir. Granit ve volkanik kayalarda TBM ile yapılan kazılarda örtü yüksekliğinin 400 m’den daha fazla olduğu bölümlerde kaya patlaması riski yüksek olmaktadır (Şekil 45). Kaya kütlelinin çok az hasar gördüğü hızlı arın ilerlemeleri, 400 m’den daha az derinliklerde, kaya patlamasında rol oynamaktadır. TBM ile yapılan kazılarda, 400 m’den daha az derinliklerde kaya patlaması oluşmuş, NATM kazılarında ise kaya türüne bağlı olmadan herhangi bir kaya patlaması oluşmamıştır (Lee vd., 2004).



Şekil 43. Araştırma galerisi ve erişim tünellerinde delik çevresinde oluşan yenilmeler: (a) araştırma galerisi-delik çevresi çekme çatlağı, (b) karot disklenmesi, (c) erişim tüneli-patlama sonrası delik dibi, (d) araştırma galerisi-delikte köpek kulağı şeklinde oluşan yenilme ve çekme çatlağı, (e) kaya saplaması, şerit levha, hasır ağ tahkimatı.

Figure 43. Views of yielding around boreholes in exploration adits and access tunnel: (a) tensile fracture around borehole in an exploration adit, (b) core diking, (c) borehole in access tunnel, (d) tensile fracture and dog-ear yielding in a borehole at an exploration adit, (e) rockbolting, straps and wire mesh support.



Şekil 44. Andong-Yongchun su tüneli jeolojik kesiti (Lee vd., 2004).

Figure 44. Geological cross-section of the Andon-Yongchun waterway tunnel (Lee et al., 2004).

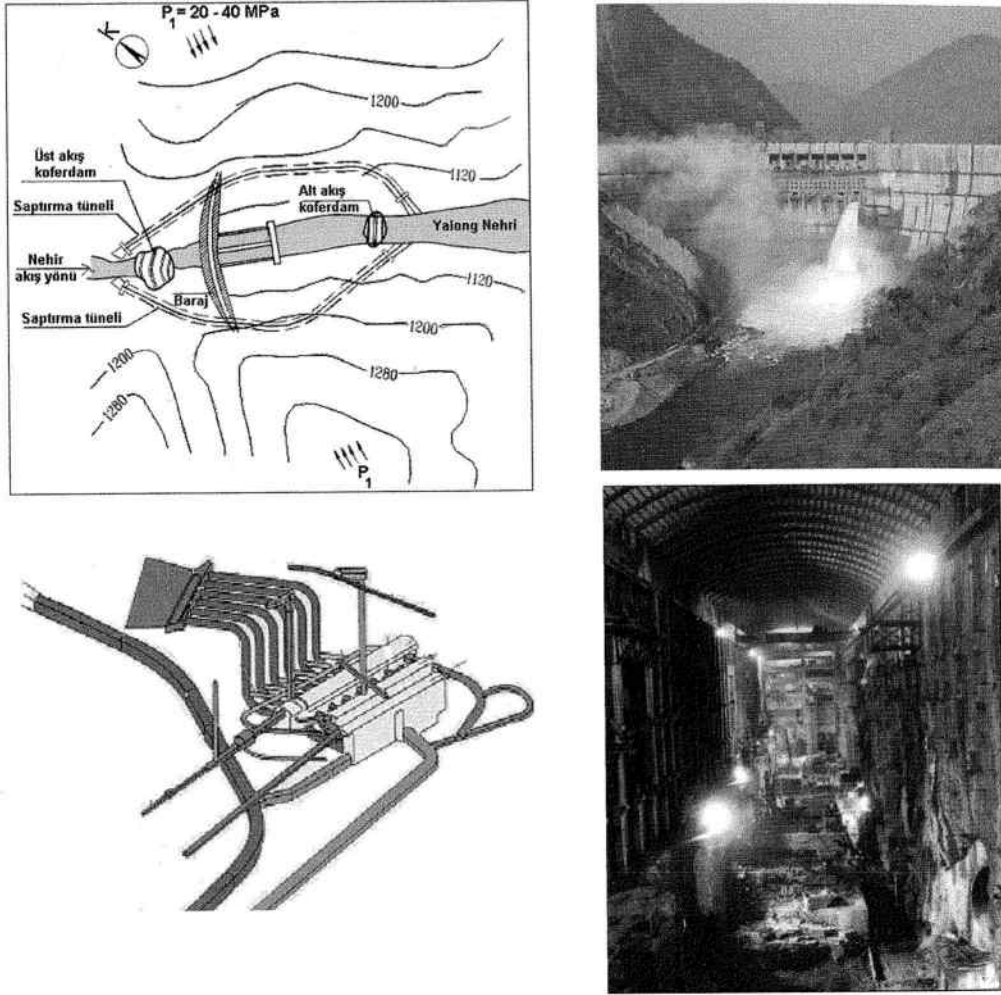


Şekil 45. Kaya patlaması lokasyonlarından görüntüler (Lee vd., 2004).

Figure 45. Views of rockburst locations (Lee et al., 2004).

6.1.11. Er-Tan yeraltı hidroelektrik santrali (Çin)

Er-Tan hidroelektrik santrali 3492 MW gücünde olup, yapımı 10 yıl sürmüştür. Tesis, 240 m'lik kemer beton baraj ile 280 m uzunluk, 25.5 m genişlik ve 65 m yüksekliğe sahip Asya kıtasının en uzun yeraltı açıklığına sahiptir (Şekil 46). Arazi, Sichuan ilinde Yalong Nehri üzerinde, Panzhihua yakınlarında yer almaktadır. Sichuan; dağlarla çevrili, su potansiyeli mükemmel olan ve Çin'in güney batısındaki bir ildir. Yeraltı kompleksi, 6 türbinli (550 MW) yeraltı açıklığı (281x26-31x66 m), transformator açıklığı (215x19x25 m) ve basınç dengeleme (dalgalanma) açıklığından (201x19x69 m) oluşmaktadır. Proje ayrıca, dünyanın en büyük saptırma tünelleri (her biri 1000x20x23 m) ile iki adet su tahliye tüneline (her biri 850x13x13 m) sahiptir. Gerilme ölçümlerine dikkate alınarak, nehir vadisi üç farklı gerilme bölgesine ayrılmış ve 30 MPa'ı aşan oldukça yüksek yatay gerilmeler ölçülmüştür. Hatta gerilmeler nehir yatağının altında 60 MPa'ı aşmaktadır. Kaya kütlesi siyenit ve bazalt olup, açıklık yeryüzünden 250 m derinlikte açılmıştır. Sol bölümdaki saptırma tüneline (Şekil 46) kaya patlaması gözlenmiştir. Kaya malzemesinin dayanımı kaynaklara göre değişmekte olup, Tao (1988) kayanın tek eksenli basınç dayanımını 220 MPa, Li vd. (1998) ise 40-80 MPa olduğunu belirtmektedir.

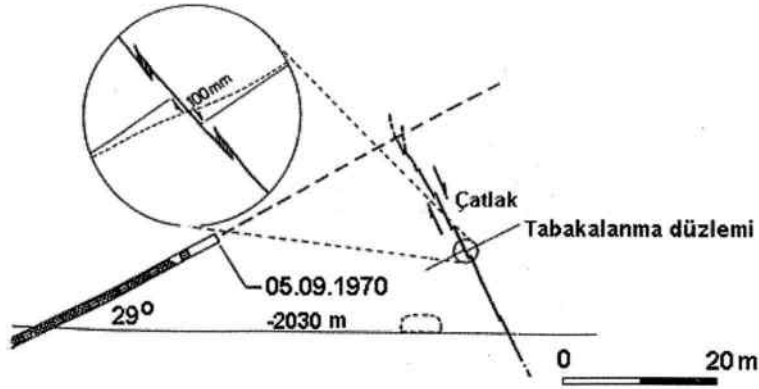


Şekil 46. Er-Tan hidroelektrik projesi ve yeraltı açıklığı (Li vd., 1998).

Figure 46. Er-Tan hydro-electric project and its powerhouse (Li et al., 1998).

6.2. Madencilik Uygulamalarında Karşılaşılan Önemli Kaya Patlaması Olayları

Kaya patlaması problemi maden mühendisliği alanında uzun süredir iyi bilinen bir olgu olup, yaygın olarak derin madencilik faaliyetlerinde karşılaşılmaktadır. Kaya patlaması ile ilgili ilk rapor edilmiş örnekler Güney Afrika'dan daha sonra ABD, Kanada ve diğer ülkelerden gelmiştir. Önemli kaya patlaması olaylarından bazıları ve karakteristikleri ülke bazında bu bölümde ana hatlarıyla verilmiştir. Madencilik günümüzde 3500 m'den daha derinlere ulaşmış olup, bu derinliklerde birincil gerilmeler en azından 65 MPa civarındadır. Dayanımları 100-350 MPa arasında değişen sert kayalar bulunuyorsa, maden açıklıklarının uygun olmayan geometrik şekillerinden dolayı sağlam kayanın yenilme olasılığı yüksek olmaktadır. Bununla birlikte, madenlerin ölçekleri oldukça geniş olduğundan mevcut faylar madencilik işlemlerinden dolayı harekete geçebilmektedir. Üretim faaliyeti ile açıklık geometrisinde oluşan farklılıklar, yüksek birincil gerilme ortamında, önemli gerilme değişimlerine neden olmaktadır. Bu durum, fayların harekete geçerek, kaya patlatması riskini oldukça yükseltmektedir (Şekil 47). Bununla birlikte, inşaat mühendisliği uygulamalarında (büyük yeraltı hidroelektrik santralleri bile) yeraltı kazısı sonucu fayların harekete geçme olasılığı oldukça düşüktür.



Şekil 47. Güney Afrika'da bir altın madeninde madenciliğin neden olduğu fayın hareketlenmesine bir örnek (Ortlepp, 2000).

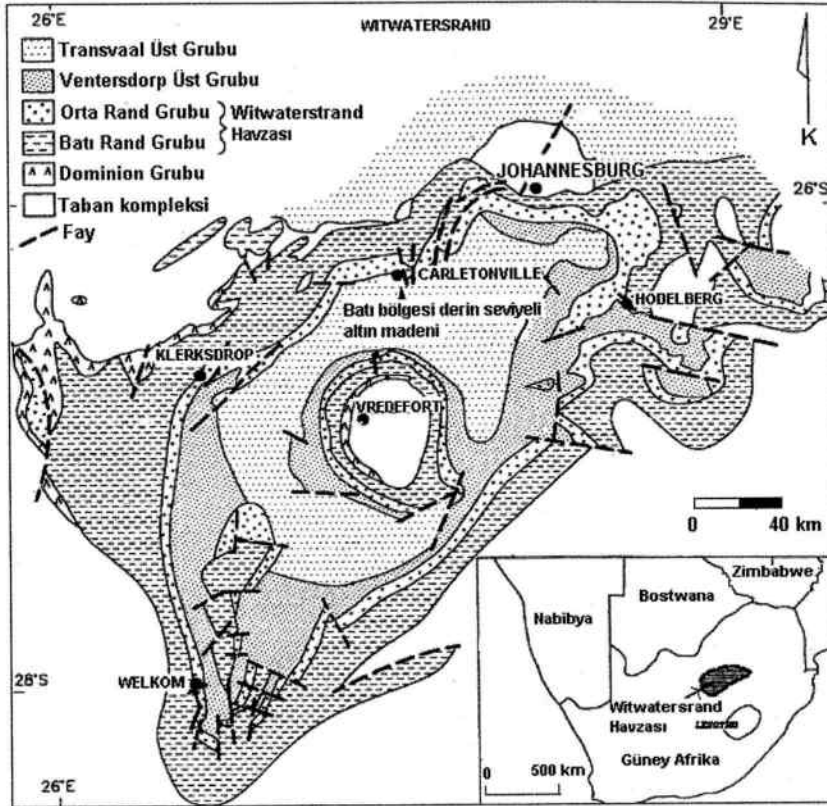
Figure 47. An example of activation of fault slip due to mining working at a gold mine of South Africa (Ortlepp, 2000).

6.2.1. Güney Afrika

Madencilikle ilişkili sarsıntıların oluşumu, Güney Afrika'da 20. yüzyılın ilk on yılında bir problem olarak kabul edilmiştir (Ortlepp ve Stacey, 1994; Ortlepp, 2000). Bu sarsıntıların neden olduğu yüzey yapısı hasarları küçük bir ses olarak işitilmiştir. Ancak yeraltında oluşan kaya patlaması sıkça üretim kesilmelerine neden olmakta ve işçilerin güvenliği için büyük bir tehdit oluşturmaktadır.

Güney Afrika'da Witwatersrand Havzası'nda işletilen altın madenleri (Şekil 48) dünyanın en derin kazılarıdır. Yüzeyden 5000 m derinliklere yaklaşılrken madencilik faaliyetlerine devam edilmesi planlanmıştır. Bu derinliklerde açıklık çevresinde oluşan gerilmeler oldukça yüksektir. Kaya kütlelerinin şiddetli bir şekilde yenilme potansiyeli bulunmaktadır. Madende üretim yapılan arında şiddetli yenilme oluştuğunda kaya patlaması "arın patlaması" olarak adlandırılmaktadır. Maden arınlarında işçi sayılarının fazlalığı nedeniyle, küçük kaya yenilmeleri bile işçiler için felaketle sonuçlanabilmektedir (Stewart vd., 2001).

Kaya patlamasının temel esasıyla ilgili ilk önemli görüş, yeraltı sismik ağından elde edilen verilerin kullanımıyla Cook (1964, 1965) tarafından önerilmiştir. Bu sistem, East Rand Proprietary Madeni (ERPM)'nde 1959 yılında kurulmuştur. Makaslama yenilmesi kaya patlamasının tek kaynağı değildir. Madenlerde yaygın büyük sismik olguların çoğu mevcut faylar boyunca oluşan hareketten kaynaklanmakta olup, kaya kütlesi boyunca gelişen makaslama yenilmesinin bir sonucu olarak oluşmamaktadır. Faylardaki hareketlenme ile önemli sismik olayların bu ilişkisi, 1976'daki Welkom (Ortlepp, 2000) depremi ile büyük olasılıkla ilk dramatik gösterimiydi. Derin altın madenlerinde ayrıntılı sismolojik izleme sistemlerinin son yıllarda giderek artan kullanımıyla fay hareketlenmesinin, madenlerin neden olduğu sismik olaylar için oldukça yaygın mekanizmalarından biri olduğu günümüzde oldukça geniş bir kabul görmektedir. Son yıllara değin, Güney Afrika altın madenciliği endüstrisi merkezi Witwatersrand'm doğusunda bulunan ERPM dünyanın en derin madeniydi. Eğimi 20°-50° arasında değişen düz bir cevher 8 km doğrultu boyunca işletilmiştir. Maden 3400 m derinliğe inmiş ve yaklaşık 1.4 m yüksekliğinde ince kaya tabakası yaklaşık 30 km² lik bir alanda kazılmaktadır (Ortlepp, 2000).



Şekil 48. Witwatersrand (Güney Afrika)'da bulunan önemli derin altın madenleri (Stewart vd., 2001).
 Figure 48. Major deep gold mines at Witwatersrand Basin (South Africa) (Stewart et al., 2001).

Kaya patlamasının meydana geldiği madenlerde arın ve galerilerde kullanılan tahkimat elemanlarının katı olması önemlidir. Ayrıca kazı arınından yansıyan sismik enerji çıkışları olduğunda, tahkimatın hızla gelişen büyük yerdeğiştirmeleri karşılayabilecek şekilde olması gereklidir. Mevcut tür yenilen tahkimatlar, 3 m/s yerdeğiştirme hızlarında işlevlerini koruyabilmektedir. Bu hız değerinin, çoğu kez arazide gözlenen yerdeğiştirme hızı değerinden düşük olduğu göz önünde bulundurulmaktadır. Kaya patlamasından etkilenen kazı arınından kaya blokları 10 m/s hızla veya daha hızlı fırlamaktadır. Önemli fay ve daykların olmadığı geniş alanlara yayılı masif sert kayaların olduğu bölgelerdeki çok derin madenlerde kaya patlamaları yerel olmakta, ancak şiddetli şekilde oluşmaktadır (Şekil 49, 50 ve 51). Bu patlamaların yerel büyüklükleri (M_L) 1.5 ve 3.0 arasındadır. Bu olayların önemli düzeyde yüksek gerilme düşüşlerine neden olduğuna inanılmaktadır. Bu tür olgular normal fay karakterinde yerdeğiştirmesi 10 cm'ye ulaşan ve fay kili oluşturabilen ani gelişen makaslama sonucu meydana gelmektedir (Ortlepp ve Stacey, 1994; Ortlepp, 2000).

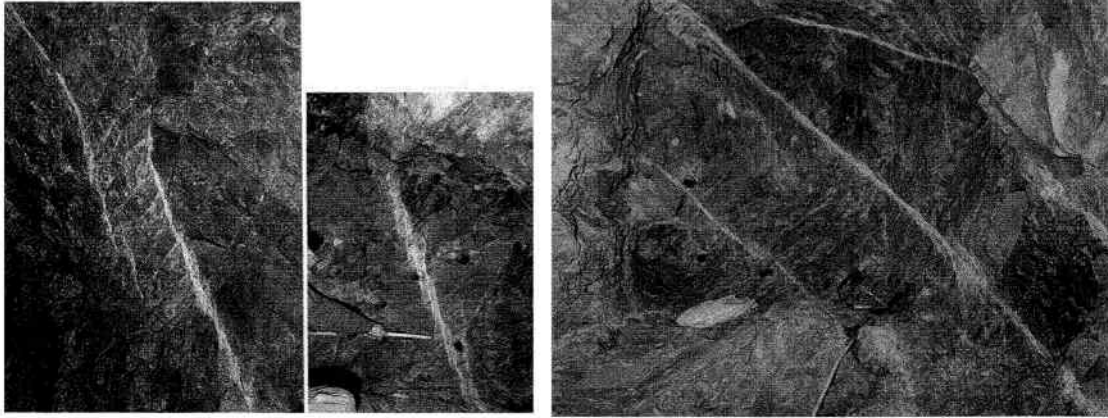
Güney Afrika Carletonville altın sahası, Ventersdorp Contact Reef (VCR) madeninde yüzeyden 2300 m derinlikte şiddetli yenilme meydana gelmiştir. Madende oluşan kaya patlaması bölgesinde tavan taşıma oluşturan lav ve kuvarsit/konglomeradan oluşan taban taşında 1-2 m kalınlığında yenilme gelişmiştir. Kaya patlaması bölgesinde yapılan gözlemlerden, 2.1 yerel büyüklüğünde bir sismik olay olduğu belirlenmiştir. Sismik olay makaslama yenilmesi olgusu ile açıklanamamış ve iki farklı hasar mekanizması ile tanımlanmıştır. Bunlardan ilki, madenin doğu tarafındaki arın ile taban taşının kabarması ve yenilmesini takiben ağaç kamaların ilk hattının orijinal arın arasındaki boşluğa doğru

şiddetli fırlamasıdır. İkincisi, madenin güney kesimindeki tavan taşının şiddetli sismik sarsıntı ile yenilmesidir. Bu tepki tabalanmaya paralel faylanmadan ve kalsit dolgulu eklemelerden dolayı olmuştur. Ocak tahkimat sistemi sarsıntı nedeniyle işlevini yitirmiştir (Ortlepp ve Stacey, 1994; Ortlevp, 2000).



Şekil 49. Carleton altın ocağında kaya patlaması (Ortlepp ve Stacey, 1994).

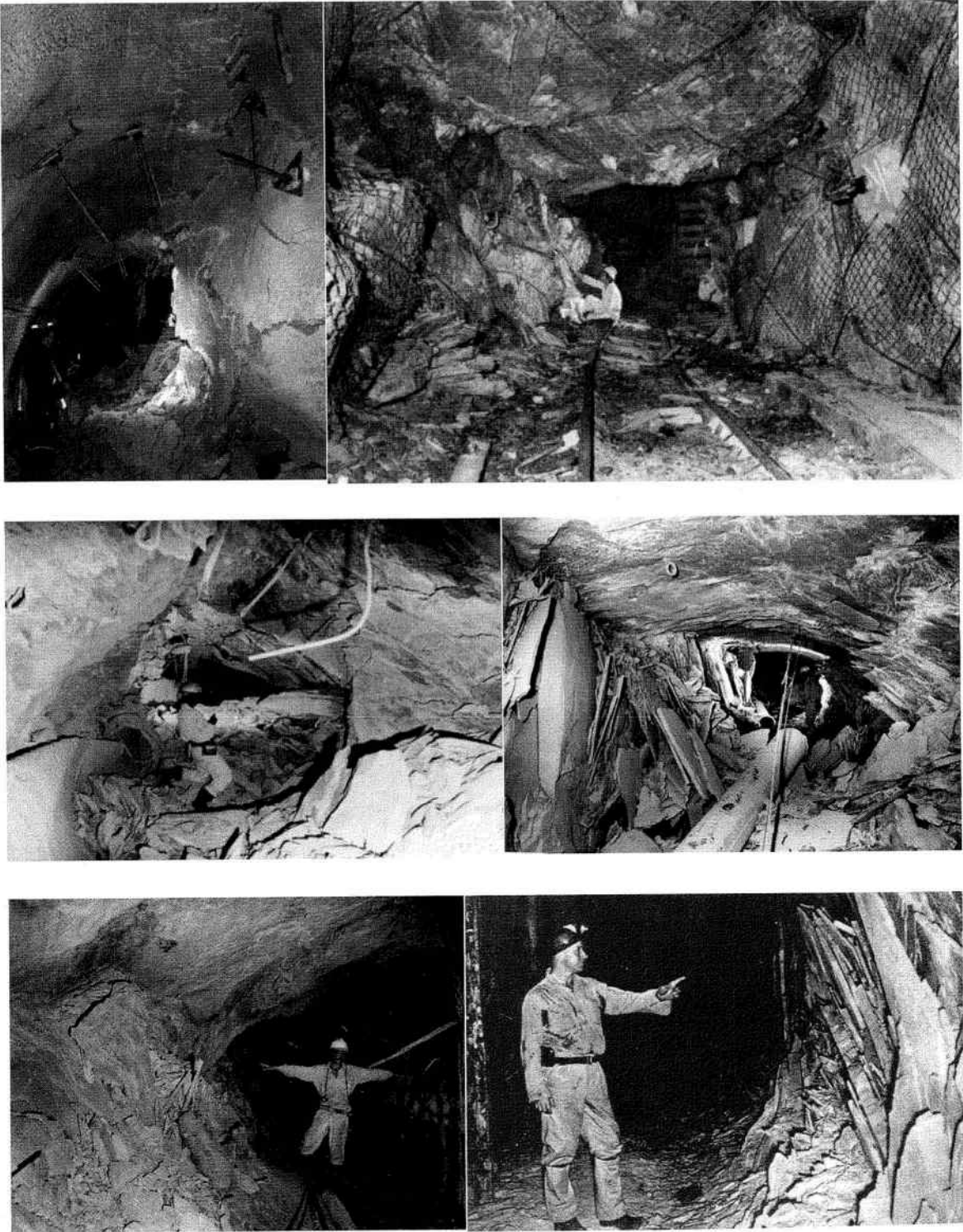
Figure 49. Rockburst at a mine stope of the Carleton gold mine (Ortlepp and Stacey, 1994).



Şekil 50. Carleton altın madeninde fay kaymalarına ilişkin görüntüler (Ortlepp, 2000).

Figure 50. Views of fault slips in Carleton gold mine (Ortlepp, 2000).

Witwatersrand Havzası'nda Western Deep Levels firmasına ait madende, organik açıdan oldukça zengin "Carbon Leader Reef" olarak adlandırılan ince damar işletilmektedir. Bu damar, hem altın hem de oldukça zengin uranyum içermektedir (Moon vd., 2006). Madenin derinliği 3100 m ve damar kalınlığı ise 0.9 m'dir. Birincil gerilme 72 MPa, tavan ve taban taşı dayak olup tek eksenli basınç dayanımı 300 MPa'dan daha büyüktür. Madende 11 Şubat 1994'te büyük bir kaya patlaması oluşmuştur. Bu patlama sonunda düşen bloğun genişliği 2.4 m, yüksekliği 0.8 m ve uzunluğu 0.8 m olarak ölçülmüştür (Stewart vd., 2001).



şekil 51. Maden galerilerinden kaya patlaması görüntüleri (Ortlepp, 2000'den değiştirilerek).

Figure 51. Views of rockbursts at mining galleries (arranged from Ortlepp, 2000).

Witwatersrand Havzası'nda bulunan DRDGOLD firmasına ait East Rand Proprietary Madeni (ERPM-GMK)'nde 3200 m derinlikte uzunayak yöntemiyle cevherli damarda altın üretimi yapılmaktadır. Jeolojik yapı dayk olup, 19° eğimlidir. Tavantaşı 180 MPa dayanımına sahip kuvasit, taban taşı ise Maraisburg formasyonuna ait dayanımı 235 MPa olan kuvarsittir. Birincil gerilme 141 MPa'dır. Kalıcı tahkimat olarak 1.1x1.1 m katı ahşap domuzdamı ile geçici tahkimat olarak da 1 m aralıklı 3 sıra hidrolik direk kullanılmıştır. Maden sahasında 23 Eylül 1993'te şiddetli bir kaya patlaması oluşmuştur. Bu olay sonrasında madende gözlenen düşen bloğun genişliği 10 m, yüksekliği 0.7 m ve uzunluğu 50 m'dir (Stewart vd., 2001).

6.2.2. Amerika Birleşik Devletleri

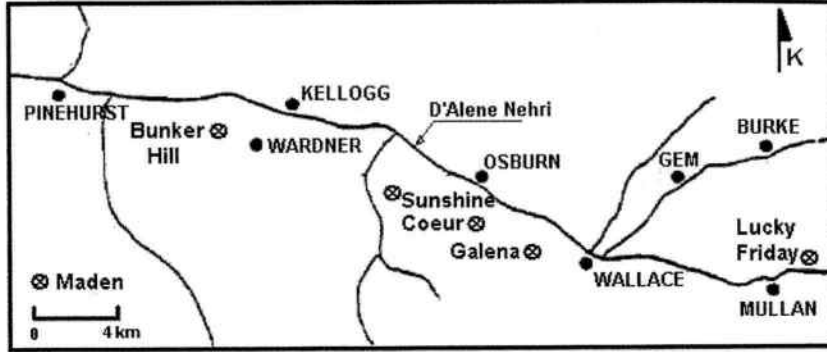
1900'lü yılların başında Coeur d'Alene bölgesindeki gümüş madeninde kaya patlamaları "hava patlaması" olarak ilk kez rapor edilmiştir (Şekil 52). Basında bir hava patlaması olarak tanımlanan bu ölümcül olay, 1914 yılında Greenhill-Cleveland Madeni 1600 seviyesi üretim bölgesinde oluşmuştur. Kaya patlaması 1940'lı yıllara değin problem olmamıştır. Bu yılları takiben madencilik daha derin damarlarda ve daha çok kuvarsitte yapılmaya başlamıştır. Geçen 60 yıl içinde bölgede 5 farklı ocakta ölümcül 22 kaya patlaması olayı yaşanmıştır (Whyatt ve White, 1998; Whyatt vd., 2002).

Madencilik faaliyetlerinin yaklaşık 2000 m derinlikte devam eden Hecla Madencilik Şirketi'nin Lucky Friday Madeni Kuzey Amerika'da (Idaho) gümüş, kurşun, çinko üretimi yapan en aktif madenlerden biridir. Cevher damarı hafif metamorfizmaya uğramış Prekambriyen tabakalı kaya birimi içindedir. Patlama eğilimli birimde sert, kalın ve camlaşmış kuvarsit ön plana çıkmaktadır. Bunlara ek olarak, ince, yumuşak kilaşı ara kesmeleri kuvarsit içine 0.5 ile 5 m aralıklarla dağılmışlardır. Kilaşı ara kesmeleri yaygın bir şekilde tektonizma ile kesilmiş ve zayıf kil dolguları oluşmuştur. (Whyatt ve White, 1998; Whyatt vd., 2002). Yüksek tektonik gerilmeler, karmaşık jeolojik yapının çoğunda, çok yüksek yatay birincil gerilme durumunu oluşturmuştur. Bölgedeki madenlerde ölçülen yatay birincil gerilmeler düşey birincil gerilmelerin 1.5-2.0 katı olup, madenin çalıştığı derinliklerde düşey birincil gerilme çoğunlukla 40 MPa'ın üstündedir (McMahon, 1988). En büyük birincil gerilme doğrultusu yaklaşık olarak yatay olup, batı-kuzeybatı yönündedir. Lucky Friday Madeni'nde en büyük birincil gerilme, kuzeydoğu yönelimli damarlara normal ve kuzey yönelimli bölümüne ise eğimlidir. En büyük gerilmenin doğrultusu ayrıca damarları kesen ve sınırlarında sonlanan fay takımlarına yaklaşık olarak paraleldir (Whyatt ve White, 1998; Whyatt vd., 2002).

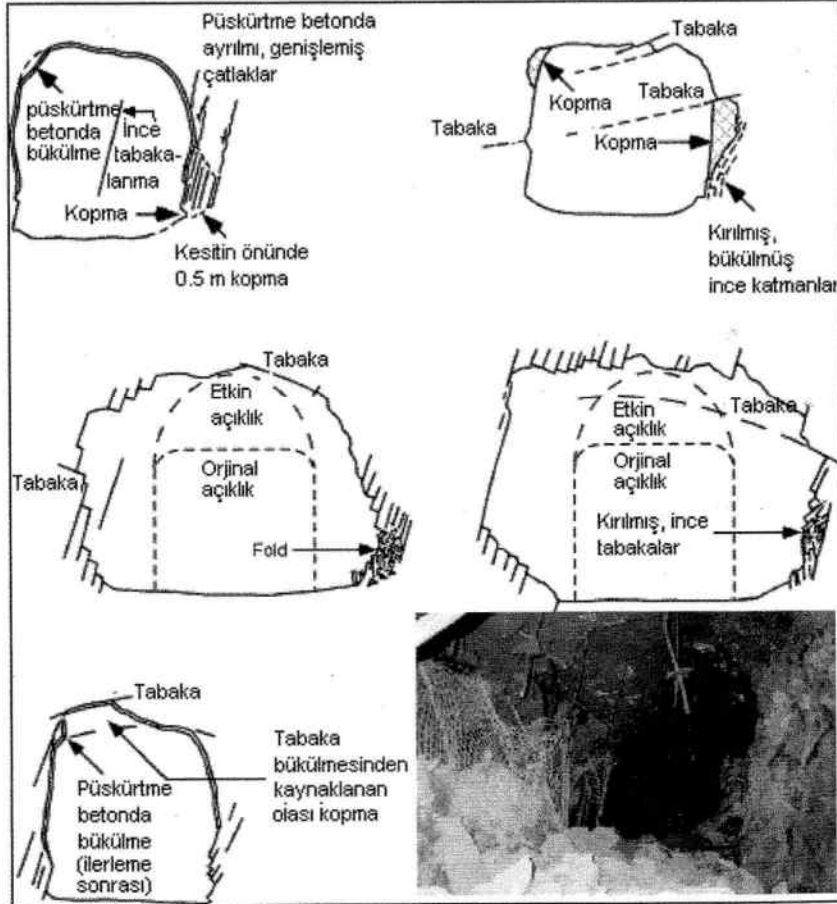
Kaya patlamasının oluşumunda en önemli özelliklerden biri hazırlık galerileri ve arının etkilen yüzeylerinin tabaka düzlemlerine paralel konumda olmasıdır. Tabakalar, madencilik nedeniyle oluşan çatlaklar, yataklanma düzlemi ile önceden varolan süreksizlik yapıları tarafından oluşturulmaktadır. Kaya patlaması, gerilme yoğunlaşmasının oluşturduğu çatlaklar ile bu çatlakları içeren kaya tabakalarının bükülme yenilmesiyle ilgili kısılma sonucu gelişen ani kaya yenilmesiyle meydana gelmektedir. Tabakaların kaya patlamasındaki kaya başlıca rolü, madenin patlama eğilimli bölümündeki yeni hazırlık galerilerinin oldukça eğimli tabakaların doğrultusuna göre yeniden paralel olarak konumlandırılmasıyla gözlenmiştir. Açıklıklar tabakalanmaya yaklaşık dik yönde oluşturulduğunda, kaya patlaması olayı sona ermiştir (Whyatt ve White, 1998; Whyatt vd., 2002).

Lucky Friday Madeni'nde patlama görülen bölgelerdeki tabakalı kaya, Güney Afrika madenlerinde kaya patlamasının sürekli tehlike oluşturduğu uzunayak arınlarında görülen tabakalı kayaya oldukça benzemektedir. Afrika madenlerinde tabakalı kayanın burkulma yenilmesi, kaya patlama hasarının başlıca mekanizması olarak tanımlanmaktadır. Kaya tabakalarının birbirlerinden ayrılarak bükülmesi sonucu meydana gelmektedir (Whyatt vd. 2002).

(a)



(b)



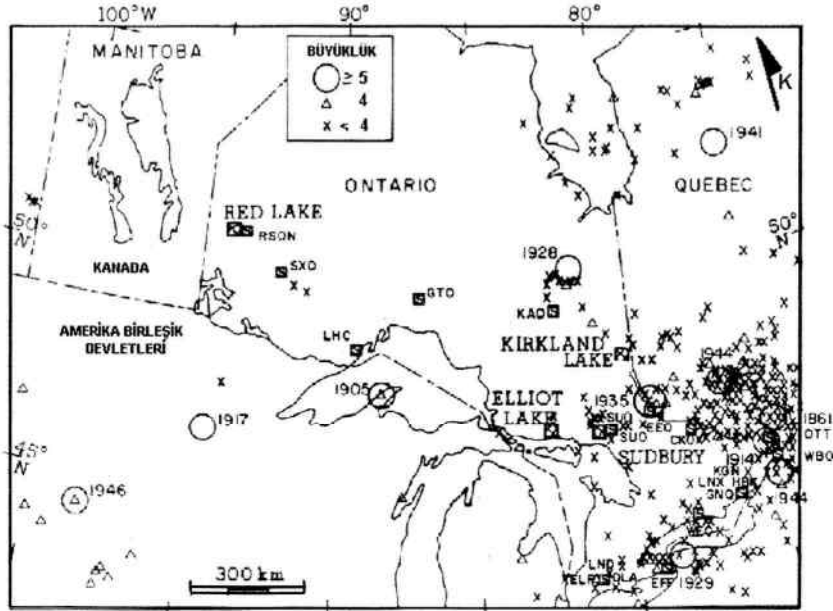
Şekil 52. (a) Coeur d'Alene bölgesi yer bulduru haritası ve (b) Lucky Friday Madeni'nde kaya patlaması olayları (Whyatt ve White, 1998; Whyatt vd. 2002).

Figure 52. (a) Location map of Coeur d'Alene district and (b) rockbursts at Lucky Friday mine (Whyatt and White, 1998; Whyatt et al., 2002).

Kaya patlaması görülen arazide tipik bir tahkimat düzeni çelik hasırlı sürtünmeli tip (split-set) ve reçine dolgu saplamlardan oluşmaktadır. Galeri kesişimleri gibi hassas noktalar kablo saplamlarla güçlendirilmektedir. Saplama veya patlatma amaçlı açılan sondajlar sırasında oluşan küçük birim deformasyonlara bağlı kaya patlamalarının olduğu yüksek gerilme ortamına sahip bölgelerde, çelik lifli güçlendirilmiş püskürtme beton oldukça sık kullanılmaktadır. Püskürtme beton, ayrıca sismik sarsıntıdan kaynaklanan hasarın oluşumunu da azaltmaktadır (Whyatt ve White, 1998; Whyatt vd., 2002).

6.2.3. Kanada

Kanada'da özellikle Ontario bölgesindeki madenlerde, 1980'li yıllarda kaya patlamaları önemli derecede artış göstermiştir (Şekil 53). Sudbury'de INCO'nun Creighton nikel madeninde kaydedilen 4 büyüklüğündeki kayıt, Kanada madencilik kayıtlarına en büyük sismik olay olarak 1984'te girmiştir. Büyük ölçekli bu kaya patlaması endüstrideki firmaları hareketlendirmiştir (Kaiser vd., 1993, 1996). Bazı kaya patlamalarına ilişkin görüntüler Şekil 54'te verilmiştir.



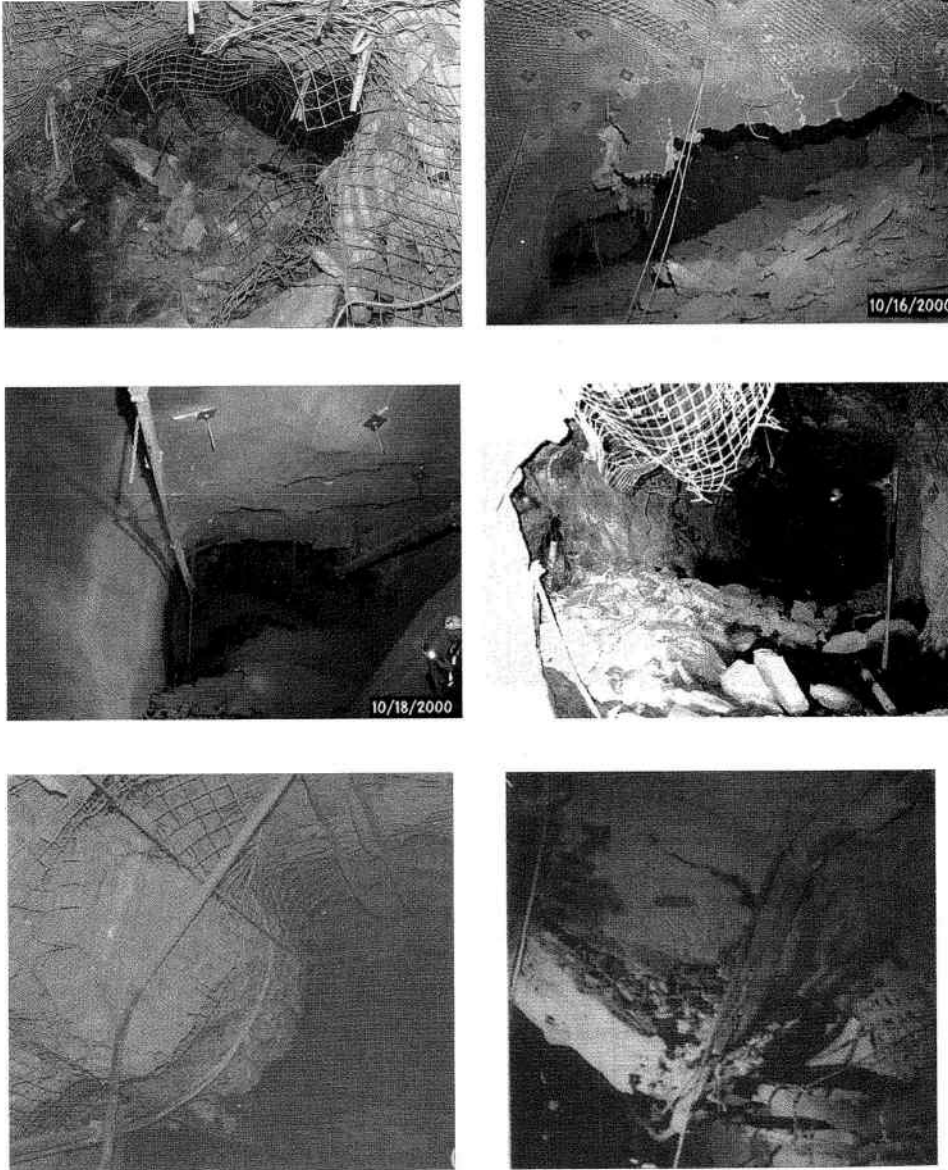
Şekil 53. Ontario ve Quebec eyaletlerinde (Kanada) maden kaynaklı sismik olaylar (Bell ve Gough, 1979).
Figure 53. Mine induced seismicity in Ontario and Quebec States of Canada (Bell and Gough, 1979).

Kidd Madeni günlük üretimi yaklaşık 8500 ton/gün olan Kanada'nın en büyük ve en derin çinko ve bakır ocağıdır. Madende 2500 m derinlikte üretim yapılmaktadır. Bu madende başlıca jeoteknik sorunlar; zayıf, bozunmuş riyolitte açılan açıklıklarda aşırı yenilme ve deformasyon, faylanmanın neden olduğu kaya patlaması, tavan taşı duraysızlığıdır (Kaiser vd., 1996).

Craig Madeni'nde, nikel cevheri yüzeyden 2100 m ve 2700 m arasında yer almaktadır. Cevher yaklaşık 30° eğime ve 45 m kalınlığa sahiptir. Cevher göreceli olarak zayıf ancak kırılğan olup, çevre kaya ise dayanımı yüksek, kırılğan ve patlamaya yatkın bir kayadır (Kaiser vd., 1996).

Ontario bölgesinde, Sudbury'de Falconbridge madencilik şirketine ait Strathcona madeninde 900 m derinlikte üretim yapılmaktadır. Nikel cevheri yüzeyden 570-950 m derinliklerde olup, 45°-80° eğime

sahiptir. Günümüzde, 5-15 m genişlik, 20 m yükseklik ve damarın genişliğine bağlı olarak farklı uzunluklarda birkaç panoda üretim yapılmaktadır. Tavanda uzun ve enine patlatma delikleri panonun sınırını belirlemektedir. 1985'lerin sonlarında patlatma ile kazılar başlatılmış, yeryüzünden 686-762 m derinliklerde 200 panoda üretim yapılmıştır. Bu kazılar sırasında büyüklükleri 2-3 olan bir çok kaya patlaması olayı rapor edilmiş ve tavantaşı kılavuzlarında hasarlar oluşmuştur. Madende kurulu mikrosismik izleme sistemi kullanılarak, çoğu kaya patlaması kaynak bölgesinin ana daykta, özellikle de cevherin taban taşında oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca, kaya patlaması olayının, mikrosismik verilerin yorumlanması sonucu, kaygan yüzeyli dayk ve fayın tavan panosu ile keşişmesi ile ilgili olduğu ortaya konmuştur (Hart vd., 1988).



şekil 54. Kanada madenlerinde bazı kaya patlaması olaylarına ilişkin görüntüler (Kaiser vd., 1996'dan değiştirilerek).

Figure 54. Views of some rockburst events in Canadian mines (arranged from Kaiser et al., 1996).

7. KAYA PATLAMASI GÖZLENEN YERALTI AÇIKLIKLARINA İLİŞKİN VERİ TABANI

Kaya sıkışması ve patlaması oluşan kayalarda açılan yeraltı açıklıkları için “SQROCKBURST” olarak adlandırılan bir veri tabanı MS ACCESS bilgisayar programı kullanılarak oluşturulmuştur. Veri tabanı; kaya özellikleri, birincil gerilme durumu, tahkimat türü ve kaya yenilme mekanizması gibi bilgilerden oluşmaktadır. Bunlarla birlikte; tünel adı, tünel türü, kaya türü, yeri, kazı türü ve tünel şekli gibi bilgiler de bulunmaktadır. Bu veri tabanında kullanılan sayısal girdiler Çizelge 6’da verilmiştir. Veri girişleri yayımlanmış kaynaklardan elde edilerek ve Şekil 55’te verilen veri giriş ekranı kullanılarak seçilen parametreler arasında bir veri dosyası oluşturan True BASIC dilinde oluşturulan bir program ilk yazar tarafından geliştirilmiştir. Kazı tipi, yenilme türü ve tünel şekli gibi karakter olarak kullanılan verilere ilişkin tanımlamalar ise Çizelge 7’de verilmiştir.

8. YERİNDE ÖLÇÜM SİSTEMİ

Tünelde yapılan kazı ile birlikte akustik emisyon, elektrik potansiyel, kaya sıcaklığı ve konverjans ölçümleri gibi bir çok parametrenin gerçek zamanlı izlenmesi, yeraltı kazısı duraylılığının kontrolü için kullanılabilmektedir. Aydan vd. (2005a, 2005c) tünellerin duraylılığının gerçek zamanlı değerlendirmesine ilişkin bir uygulama yapmışlardır. Aşağıda bu sistem kısaca açıklanmıştır.

8.1. Yer Elektrik Potansiyelini İzleme Sistemi

Yer elektrik potansiyeli (EP) izleme cihazları ve elektrotlar, Japonya’da Mitake kasabasındaki terkedilmiş bir linyit madenine yerleştirilmiştir (Aydan vd., 2005a, 2005b). Bu cihazların çevre kaya kütleindeki gerilme değişimlerine daha duyarlı olan fay, çatlak bölgeleri gibi jeolojik süreksizliklerin yakın çevrelerine yerleştirilmeleri tercih edilmektedir. Kaya kütlesi nemli veya suya doymun olduğunda arazinin elektriksel öz direnci “ $k\Omega$ ” büyüklüğündedir. Bu yüzden öz direnci “ $M\Omega$ ” büyüklüğünde sahip cihazların kullanımı yeterli olmaktadır. Diğer durumda öz direnci “ $G\Omega$ ” büyüklüğünde sahip cihazların kullanımı gerekmektedir. Elektrik potansiyeli değişimleri çevre kaya kütlesi davranışı ile doğrudan ilişkilidir. Yer elektrik potansiyel değişimlerinin genlik ve konumu, duraysızlık kaynak bölgelerinin olası konumu ve büyüklüğünü yorumlamak için kullanılabilmektedir. Böyle bir sistemle büyük ölçekteki duraysızlık olgularını belirlemenin mümkün olabileceği şu ana kadar yapılan ölçümlerde anlaşılmıştır (Aydan vd., 2005b, 2005c).

8.2. Akustik Emisyon Sayma Sistemi

Burada tanıtılan akustik emisyon sistemi, yalnızca akustik emisyon olayı sayımları ile sınırlıdır (Tano vd., 2005; Aydan vd., 2005b). Bu sistemin, terkedilmiş linyit ocaklarında kaya çatlamasının uzun süreli izlemesi için çok yararlı olacağı kanıtlanmıştır. Akustik emisyon (AE) dalgalarının belli bir eşik değerini aşan bölümüne karşılık gelen akım sinyalleri bir sayıcı ile ayırt edilmekte ve AE sayısı olarak bir kayıt cihazına kaydedilmektedir (Şekil 56 ve 57). Bu tür sınırlı özelliklere sahip bu sistem düşük maliyetli olup, bir sette iki AE sisteminin kullanımını sağlamıştır. AE sistemlerinden biri aktif ünite, diğeri ise yalancı ünite olarak adlandırılmaktadır. Yalancı ünite AE algılayıcısı kaya kütlesi ile temas halinde bulunmamaktadır. Eğer her iki sistem sinyalleri aynı anda algılamamışsa, aktif ünitenin sayımı ölçülen veri olarak kabul edilmektedir. Bu sistem, AE izleme güvenilirliğini artırmakta ve sahada gürültü nedeniyle oluşabilecek sayımların ayırt edilmesini sağlamaktadır.

Çizelge 6. SQROCKBURST veri tabanı için kullanılan girdi parametreleri.
Table 6. Input parameters for the SQROCKBURST database.

Parametre	Simge	Veri tabanı simgesi	Birim
Tabaka düzlemi eğimi	α	ALPHA	derece
Ortalama tabaka kalınlığı	T	TLAYER	m
Tünel derinliği	H	DEPTH	m
Düşey birincil gerilme	P_v	Sv	MPa
En büyük asal birincil gerilme	P_1	S1	MPa
En küçük asal birincil gerilme	P_3	S2	MPa
En büyük asal birincil gerilmenin düşeyle yaptığı açı	β	BETA	derece
Tünel genişliği	W	WIDTH	m
Tünel yüksekliği	H	HEIGHT	M
Kaya malzemesinin elastik dalga hızı	V_{pi}	VPINTACT	km/s
Kaya kütlelerinin elastik dalga hızı	V_{pm}	VPMASS	km/s
Kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı	σ_c	SC	MPa
Kaya malzemesinin elastisite modülü	E	ER	GPa
Poisson oranı	ν	VR	
Kayacın birim hacim ağırlığı	γ	GAMMA	kN/m ³
Doğal su içeriği	w_n	WN	%
Porozite	n	POR	%
Düzlemde saplama aralığı	e_b	ETB	m
Tünel eksenli boyunca saplama aralığı	e_{ltb}	ELB	m
Saplama çapı	D_b	DB	mm
Saplamanın yük taşıma kapasitesi	F_b	FTB	kN
Saplama uzunluğu	L_b	LB	m
Püskürtme beton kalınlığı	t_s	TS	mm
Püskürtme beton dayanımı	σ_{cs}	SCS	MPa
Çelik bağlar arası uzaklık	e_{srb}	ELSR	m
Çelik bağın kesit alanı	A_{rb}	ASR	mm ²
Beton kaplama kalınlığı	t_l	TL	m
Beton kaplama dayanımı	σ_{scl}	SCL	MPa
Tavanda oluşan yerdeğiştirme	u_r	UR	mm
Yan duvarda oluşan yerdeğiştirme	u_s	US	mm
Yeterlik katsayısı	σ_{cm}/P_{max}	CF	
Tavanda oluşan birim deformasyon	ϵ_{roof}	ERO	%
Yan duvarda oluşan birim deformasyon	ϵ_{side}	ESI	%
Yenilme bölgesi kalınlığı	D_{pzd}	PZD	m
Sıkışan veya patlayan kayanın arından uzaklığı	D_{rb}	FDIS	m
Kaya kütleli puanı (RMR)	RMR	RMR	--
Q değeri	Q	Q-VALUE	--
Japon karayolu birimi sınıflaması	JRAC	JRAC	--
Japon demiryolları eski sınıflaması	JROC	JROC	--

Çizelge 7. Karakter formunda kullanılan veri tabanı girdilerinin tanımları.

Table 7. Descriptions of inputs of database used in character items.

Parametre	Veri tabanı girdisi	Tanımlama
Kazı türü (EXCAV_TYPE)	BE	Basamaklı kazı
	FF	Tam çephe kazı
	BESD	Yan kılavuz kazı basamaklı kazı
Yenilme türü (FAIL_MODE)	CSF	Tamamen sıkışma yenilmesi
	BF	Burkulma yenilmesi
	SPF	Kavlaklanma yenilmesi
	PF	Kaya fırlaması
	RBF	Kaya patlaması
	TSSS	Çekme, makaslama
Açıklık şekli (TUNNEL_SHAPE)	CR	Dairesel
	HS	At nalı
	RECT	Dikdörtgen

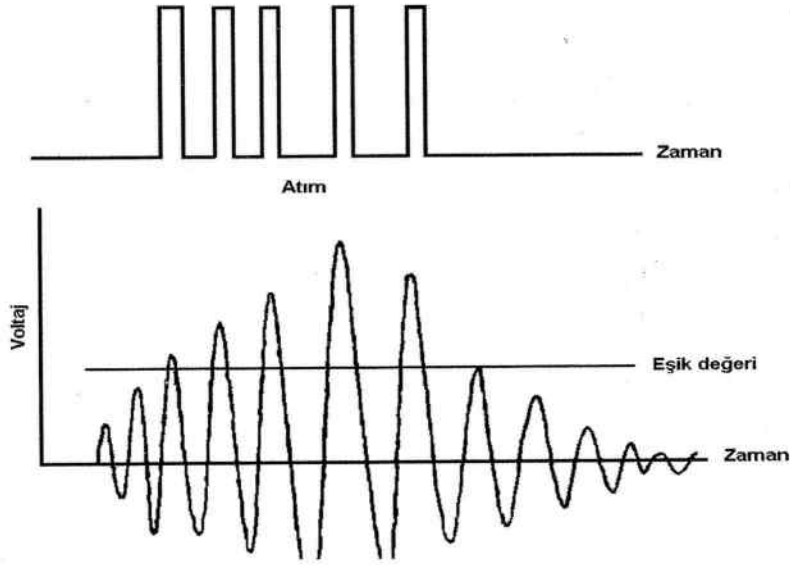
SQROCKBURST
A DATA BASE FOR UNDERGROUND OPENINGS
IN SQUEEZING AND BURSTING ROCK

TUNEL_NAME	MIMAKI	Sv		GAMMA	23.7		
REFERENCE	JR	S1		WN		ASR	1.25
TUNEL_TYPE	RAILWAY	S3		POR		TL	300
ROCK_NAME	TUFF	BETA		ETB	1.2	SCL	25
LOCATION	ST08K894.5	WIDTH	10	ELB	1.2	UR	
EXCAV_TYPE	BE	HEIGHT	9.1	DB	20	US	23.7
FAIL_MODE	NF	VPINTACT		FTB	20	CF	2.10
TUNEL_SHAP	HS	VPMAS	2.23	LB	3	ERO	0
ALPHA	15	SC	12.97	TS	1.20	ESI	0.3
TLAYER		ER		SCS	25	PZD	
DEPTH	100	VR		ELSR	1	FDIS	

Developed by Omar Aydan and Melih Genis

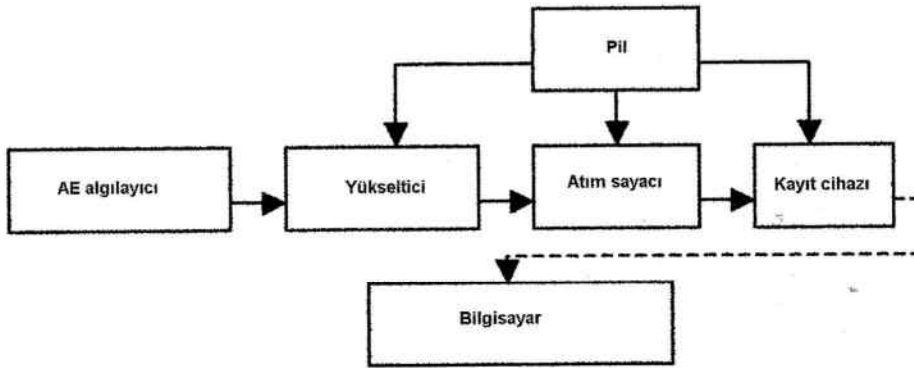
Şekil 55. SQROCKBURST veri giriş ekranı.

Figure 55. A screen view of SQROCKBURST database.



Şekil 56. Akustik emisyon sayımı ilkesi (Tano vd., 2005).

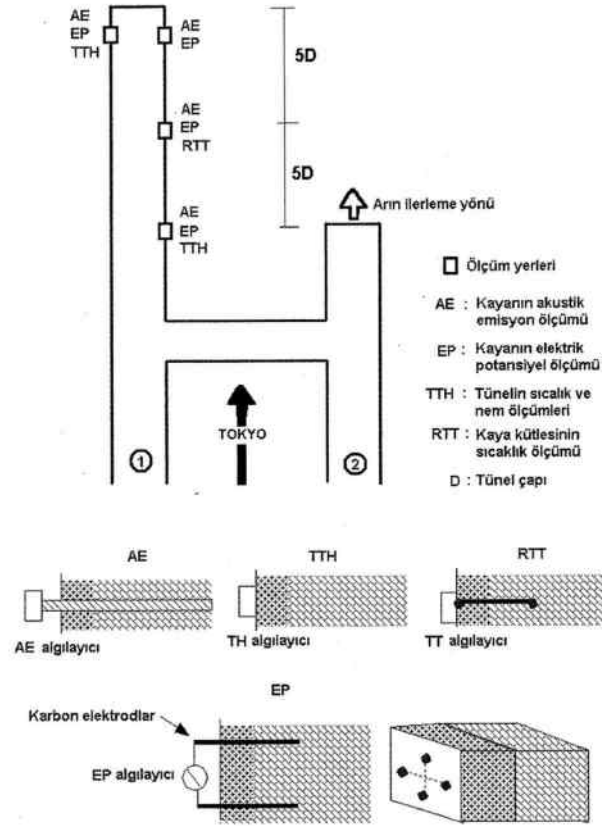
Figure 56. The principle of AE counting (Tano et al., 2005).



Şekil 57. AE sayım sisteminin gösterimi (Tano vd., 2005).

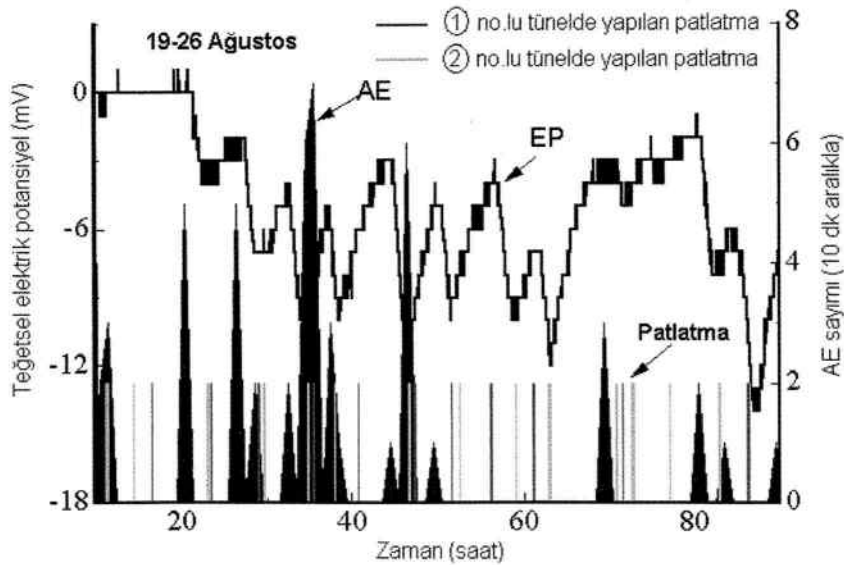
Figure 57. A block diagram of AE counting system (Tano et al., 2005).

Bu sistemin uygulaması 2. Tomei Hızlı Otoyolu 3. Shizuoka Tüneli kazılarında ilk kez Aydan vd. (2005c) tarafından yapılmıştır. Bu sistem ayrıca Tono Yeraltı Araştırma Laboratuvarı (Aydan vd., 2006) ve Mitake'deki terk edilmiş linyit ocakları (Aydan vd., 2005b ve 2006) duraylılık değerlendirilmelerinde kullanılmıştır. Burada 3. Shizuoka Tüneli'ndeki uygulamalara kısaca değinilmiştir. Tünel kazısı delme-patlatma yöntemi ile yapılmıştır. Her patlatma işlemi tünelde ve yakın çevresinde hem dinamik hem de statik gerilme değişimlerine neden olmaktadır. Ölçümler iki aşamada yapılmıştır. Birinci aşamada, 1 no.lu tünele 2 no.lu tünelin arın ilerleme etkisi araştırılmıştır. Ölçüm aletlerinin konumu Şekil 58'de gösterilmiştir. Ölçülen AE ve EP değişimleri zamanın fonksiyonu olarak Şekil 59'da gösterilmiştir. Şekil 59'da verilen düşey çizgilerin her biri patlatma işlemlerini göstermektedir. Her patlatma işleminden sonra belirgin AE ve EP değişimleri gözlenmiştir. Bu değişimler, belirli bir zaman periyodundan sonra durmaktadır. Elektrik potansiyeli kendiliğinden artmakta ve zaman ilerledikçe azalma eğilimi göstermektedir. AE tepkisi benzer özellik taşımaktadır. Tünel duraylı olduğunda, bu değişimlerin deneysel gözlemler ve ilk yazar tarafından yapılan kuramsal çalışmaları (Aydan vd., 2001a, 2003; Aydan ve Daido, 2002) dayalı olarak ortadan kalkması beklenmektedir.



Şekil 58. Ölçüm aletlerinin konumu ve arın ilerlemesi (Aydan vd., 2005c).

Figure 58. The layout of instrumentation and face advance (Aydan et al., 2005c).



Şekil 59. Arın ilerlemesi sırasında ölçülen AE ve EP değişimleri (Aydan vd., 2005c).

Figure 59. AE and EP responses measured resulting from face advance (Aydan et al., 2005c).

9. KAYA PATLAMALARINA KARŞI ALINABİLECEK ÖNLEMLER

9.1. Kaya Patlaması Oluşumuna İzin Verilmesi

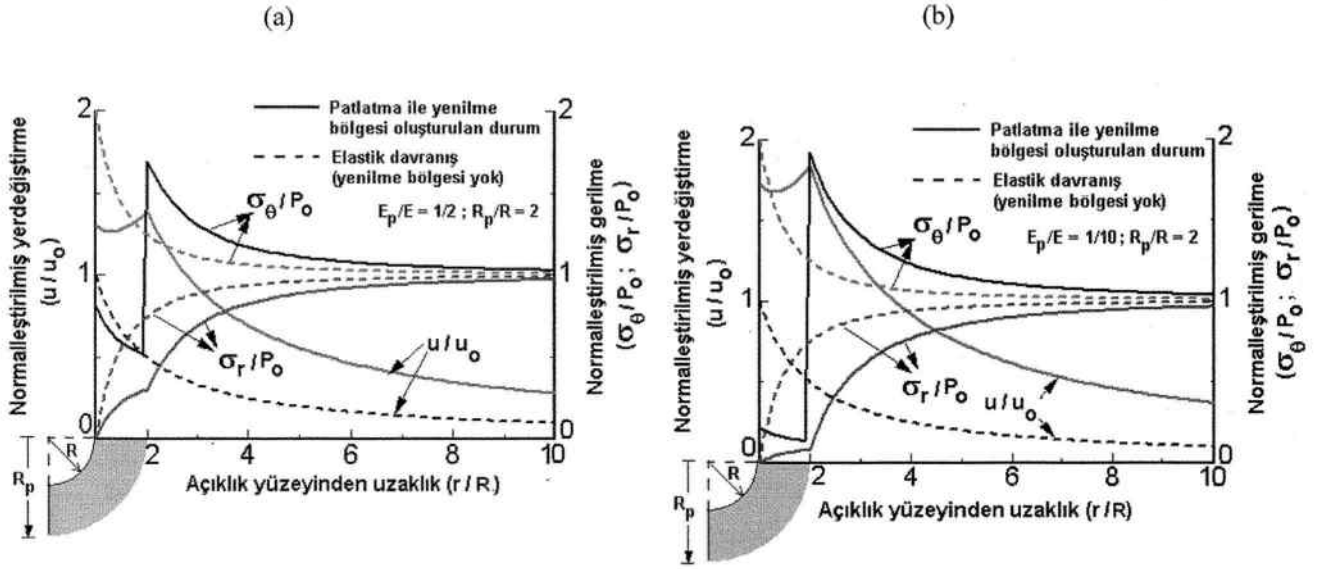
Kaya patlamasında alınabilecek önlemlerin en basiti, kaya patlaması oluşumuna izin vermek olabilir. Bazı kuramsal bulgularla birlikte deneyimler, kaya patlamasının tünel arımından 1D uzaklıkta oluşabileceğini göstermiştir. Kazı için patlatma teknikleri kullanıldığı durumda, yapılan patlatma ve tünel arımında çalışmalara başlama arasında biraz zaman bırakılmalıdır. Düşey birincil gerilmenin en büyük bileşen ve basamak tipi kazı uygulandığı durumda, üstteki basamağın kazısı sırasında en kritik durum oluşacaktır. Bununla birlikte, yatay gerilme en büyük bileşen ve kazı yüksekliği arttığı durumda ise açıklık tavanı oldukça kritik olacaktır. Bu tekniklerin uygulamalarında, bir önceki bölümde sözü edilen yerinde ölçüm sistemleri ile açıklığın yakın çevresinde değişimlerin izlenmesi gerekmektedir.

9.2. Gerilmenin Azaltılması veya Ön Koşullandırma

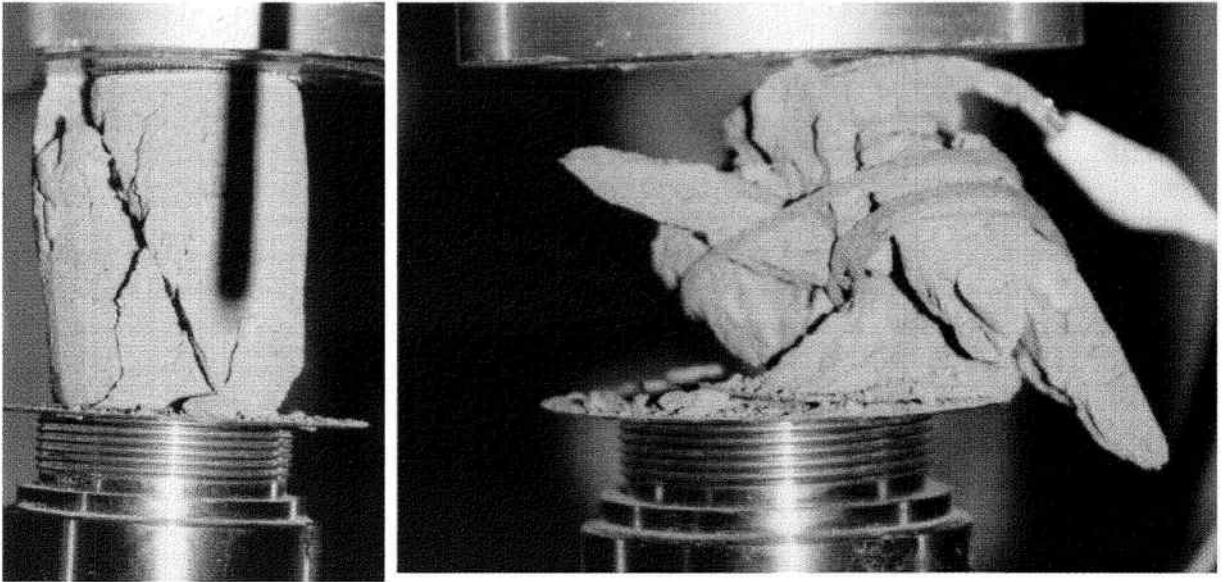
Madencilikte kaya patlaması problemini çözmek için gerilme azaltması veya ön koşullandırma tekniği geliştirilmiştir. Bu teknikte ana fikir, patlatma sırasında tünel çevresindeki kayada, belli yük taşıma kapasitesine ve düşük deformasyon modülüne sahip bir yapay yenilme bölgesi yaratmaktır. Bununla birlikte, bu şekilde gerilmelerin azaltıldığı bölgelerin niceliksel tasarımı için bazı pratik ve kuramsal tekniklerin geliştirilmesi gereklidir. Eğer TBM ile kazı yapılyorsa, bu işlemin kullanımı olanaksız olacaktır. Hidrostatik birincil gerilme durumunda açılan bir yeraltı açıklığı için gerilme azaltılmasının gerilmelerin yeniden dağılımı üzerindeki etkisini değerlendirmek için bir örnek Şekil 60'da verilmiştir. Çözümlerde, patlatma ile tünel yüzeyinden açıklık yarıçapı kadar uzaklıkta ($R_p/R=2$) ve deformasyon modülü, sağlam kayanın deformasyon modülününün 1/2 ile 1/10'u olduğu bir yenilme bölgesi (zedelenmiş kütle) ile çevrelendiği iki durum düşünülmüştür. Hidrostatik birincil gerilme ortamında tahkimatsız açıklıkta, yenilme bölgesinin oluşmadığı (kaya kütlelerinin elastik davranış gösterdiği) durumlarda açıklık yüzeyinde, teğetsel gerilme (σ_θ) hidrostatik birincil gerilmenin en fazla 2 katı olmaktadır. Patlatma ile açıklık çevresinde gelişen yenilme bölgesinde, elastik duruma kıyasla daha düşük radyal ve teğetsel gerilmeler oluşurken, en yüksek gerilmeler açıklık yüzeyinde oluşmamaktadır. Yenilme bölgesinde oluşan gerilme değerleri, zedelenmiş kütlelerin deformasyon modülü küçüldükçe azalmaktadır (Şekil 60a ve 60b). Madencilikte kaya patlamasına karşı deneme-yanılma ile bilinen bu yöntemin kuramsal temeli de burada verilmiş olmaktadır. Andong-Yongchun (Güney Kore) su tünelinin patlatma ile açılan bölümünde kaya patlamasının oluşmaması da burada sözü edilen yaklaşımın bir fiziksel uygulaması şeklinde düşünülebilir.

9.3. Esnek ve Şekil Değiştirebilen Tahkimat Sistemi

Oldukça kolay şekil değiştirebilen lastik benzeri sicimle bağlanan kaya örneklerinin tek eksenli yüklemesi sonucunda, yenilme sonrası kopan parçaların şiddetli şekilde fırlamasının büyük ölçüde azaldığı deneysel olarak gösterilmiştir (Aydan vd., 2001b). Esneyebilen tür malzemelerin yenilmeyi önleyici bir etkisi olmamasına rağmen, bu malzemeler kaya patlaması sonucu kopan kaya parçalarının ivmesini azaltıcı yönde sönümleyici bir görev yaparlar (Şekil 61). Esnek ve şekil değiştirebilen tahkimatların güncel uygulamaları daha esnek kaya saptamalarıyla (Swelllex, SA yenilebilen kaya saptamaları, kablo tipi kaya saptamaları gibi) birlikte çelik hasır kullanımı sayesinde sağlanabilmektedir. Çelik liflerle güçlendirilmiş püskürtme beton uygulaması da etkili olmaktadır. Kaya saptaması kullanılmadan yapılan püskürtme beton uygulamaları yeterli ve etkin olamamaktadır. Bölüm 6'da verilen güncel uygulamalar, tahkimat sistemlerinin esnekliğinin kaya patlaması ile mücadelede ana fikir oluşturduğunu açıkça göstermektedir. Bununla birlikte bu işlemde en zor husus, kaya parçalarının beklenmedik kopmalarına karşı işçilerin güvenliği için bu tahkimat sistemlerinin zamanında yerleştirilmesidir. Gerçek zamanlı izlemenin bu tekniğin gerçekleştirilmesi sırasında kullanılması oldukça yararlı olacaktır.



Şekil 60. Gerilme azaltılmasının gerilmelerin yeniden dağılımı üzerindeki etkisiyle ilgili çözümleme örnekleri.
Figure 60. Computational examples on the effect of de-stressing on stress re-distribution.



Şekil 61. Lastik bantlı ve bantsız kuru Fuji kil örneklerinde yenilme sonrası görüntüleri (Aydan vd., 2001b).
Figure 61. Post-failure views of dry initially sheared Fuji clay samples unwrapped and wrapped with rubber strings (Aydan et al., 2001b).

10. SONUÇLAR

Bu çalışmada, yeraltı kazılarında kaya patlaması problemlerine ilişkin yapılan çalışmalar ayrıntılı olarak incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Bu problemin uzun zamandır bilinmesi ve birçok çözüm tekniklerinin geliştirilmesine rağmen kaya patlamasının tahmini, izlenmesi ve önlenmesi/kontrolü döngüsündeki gelişmeler hala devam etmektedir. Çeşitli kuramsal ve görgül yöntemlerin kullanımıyla yapılan kaya patlaması potansiyeli değerlendirmeleri yeterlidir. Bununla birlikte, kaya patlaması, kaya malzemesinin dayanımı tarafından denetlenmekte olup, kaya kütlesi dayanımının kullanılmasının uygun olmadığı belirtilmelidir. Problemin dinamik kısmı için ileri çalışmalara gereksinim duyulmaktadır. Özellikle kaya parçalarının fırlama hızlarının tahmini, kazı sırasında çalışan işçilerin güvenliği ile oldukça yakından ilgili olup, büyük önem taşımaktadır. Akustik emisyon ve yer elektrik potansiyel ölçümleri ile ilgili çok parametrelili izleme sistemleri ile ilgili sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. Tünel arının gerçek zamanlı duraylılığı, kazı sırasında akustik emisyon ve yer elektrik potansiyeli değişimleri ile değerlendirilebilmektedir.
2. Tünel arını duraylı olduğunda, tünel arını çevresindeki AE ve yer elektrik potansiyeli değişimleri kısa zaman diliminde ortadan kalkmaktadır.
3. Başlangıç aşamasından sonra AE ve yer elektrik potansiyel değişimleri tüneli çevreleyen kaya kütlesinin duraylı olduğunun göstergesi olarak değerlendirilebilir.
4. AE ve yer elektrik potansiyel aktiviteleri, tünel arını uzaklığı yaklaşık 0.5D civarında olduğunda en büyük değerini almaktadır.

Özellikle kaya patlaması riski bulunan tünel yapımı ve madencilik çalışmaları sırasında çok sayıda parametre ölçümleri, kayanın yenilmesi ile ilgili birçok ipucunu barındırmaktadır. Günümüzde bu tür ölçümlerin yaygınlaştırılması, küçük ölçekli deprem etkisi yaratan kaya patlaması olayı mekanizmasının daha iyi anlaşılmasında önemli rol oynayacağı göz önünde bulundurulmalıdır.

Kaya patlamasına karşı, kontrollü olarak bu davranışın oluşumuna izin vermek en ucuz yöntem olmakla birlikte kontrol edilmesi oldukça güçtür. Özellikle açıklık arınından yaklaşık bir yarıçap uzaklıkta kaya patlamasının oluşma olasılığı oldukça yüksektir. Böyle bir durumda burada sözü edilen çok parametrelili ölçüm sisteminin kullanılması gerekecektir.

Ön koşullandırma ile açıklık çevresinde gerilme azaltılmasının en güvenilir yaklaşımlardan biri olduğu söylenebilir. Patlatma ile kazı yapılması durumunda böyle bir etkinin kendiliğinden oluşacağı beklenir. Kaya patlaması oluşumunun engellenemediği durumlarda yapay patlatma ile ön koşullandırma işlemi gerekli olacaktır.

Kaya patlamasının engellenmesi için ağır tahkimat sistemine ihtiyaç duyulabilecektir. Böyle durumda, kaya patlamasını engellemekten çok, esnek bir tahkimat sistemi tercih edilmeli ve kaya parçalarının fırlamasını engellemek üzere tasarlanmalıdır.

KAYNAKLAR

- Aeschbach, M., 2002. Lötschberg - Basistunnel: Gebirgsabdichtung einer wasserführenden Zone mit hohem Wasserdruck aus Umweltschutzgründen. IGWS. FGU-Fachtagung Thun.
- Amberg, R., 1983. Design and construction of the Furka base tunnel. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 16 (4), 215-231.
- Arioğlu, E., Arioğlu, B. and Girgin, C., 1999. Stability evaluation and design of tunnel openings in brittle-massive rock masses. 3rd Int. Symposium on Sprayed Concrete, Norway, 28-38.
- Aydan, Ö., 1987. Approximate estimation of plastic zones about underground openings. Department of Geotechnical Engineering, Nagoya University, (Kawamoto Laboratory, unpublished interim report), 7 pp.
- Aydan, Ö., 1994. The dynamic shear response of an infinitely long visco-elastic layer under gravitational loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Elsevier, 13, 181-186.
- Aydan, Ö., 2003. An experimental study on the dynamic responses of geomaterials during fracturing. *Journal of School of Marine Science and Technology, Tokai University*, 1 (2), 1-7.
- Aydan, Ö. and Kawamoto, T., 2000. The assessment of mechanical properties of rock masses through RMR classification system. *GeoEng2000*, UW0926, Melbourne.
- Aydan, Ö. and Kawamoto, T., 2001. The stability assessment of a large underground opening at great depth. 17th Int. Min. Congress and Exhibition of Turkey, IMCET 2001, E.Ünal vd. (ed.), Ankara, 277-288.
- Aydan, Ö. and Daido, M., 2002. An experimental study on the seepage induced geo-electric potential in porous media. *Journal of School of Marine Science and Technology, Tokai University*, 55.
- Aydan, Ö. ve Geniş, M., 2003. Silindirik ve küresel açıklıklar çevresindeki gerilme ve birim deformasyon alanlarının belirlenmesi için birleştirilmiş analitik çözüm. *Kaya Mekaniği Bülteni, Türk Ulusal Kaya Mekaniği Derneği*, Ankara, 15, 11-26.
- Aydan, Ö., Akagi, T. and Kawamoto, T., 1993. Squeezing potential of rocks around tunnels; theory and prediction. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 26 (2), 137-163.
- Aydan, Ö., Akagi, T., Ito, T., Ito, J. and Sato, J., 1995. Prediction of deformation behaviour of a tunnel in squeezing rock with time-dependent characteristics. *Numerical Models in Geomechanics NUMOG V*, 463-469.
- Aydan, Ö., Akagi, T. and Kawamoto, T., 1996. The squeezing potential of rock around tunnels: theory and prediction with examples taken from Japan. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 29 (3), 125-143.
- Aydan, Ö., Minato, T. and Fukue, M., 2001a. An experimental study on the electrical potential of geomaterials during deformation and its implications in geomechanics. 38th US Rock Mech. Symp., Washington, 2, 1199-1206.
- Aydan, Ö., Geniş, M., Akagi, T. and Kawamoto, T., 2001b. Assessment of susceptibility of rockbursting in tunnelling in hard rocks. *Int. Symp. on Modern Tunnelling Science and Technology, IS-KYOTO*, 1, 391-396.

- Aydan, Ö., Ito, T., Akagi, T., Watanabe, H. and Tano, H., 2002. An experimental study on the electrical potential of geomaterials during fracturing and sliding. Korea-Japan Joint Symposium on Rock Engineering, Seoul, 211-218.
- Aydan, Ö., Tokashiki, N., Ito, T., Akagi, T., Ulusay, R. and Bilgin, H.A., 2003. An experimental study on the electrical potential of non-piezoelectric geomaterials during fracturing and sliding. 9th ISRM Congress, South Africa, 73-78.
- Aydan, Ö., Daido, M., Owada, Y., Tokashiki, T. and Ohkubo, K., 2004. The assessment of rock bursting in rock engineering structures with a particular emphasis on underground openings. 3rd Asian Rock Mechanics Symposium, Kyoto, 1, 531-536.
- Aydan, Ö., Sakamoto, A., Yamada, N., Sugiura, K. and Kawamoto, T., 2005a. The characteristics of soft rocks and their effects on the long term stability of abandoned room and pillar lignite mines. Post Mining 2005, Nancy.
- Aydan, Ö., Sakamoto, A., Yamada, N., Sugiura, K. and Kawamoto, T., 2005b. A real time monitoring system for the assessment of stability and performance of abandoned room and pillar lignite mines. Post Mining 2005, Nancy.
- Aydan, Ö., Daido, M., Tano, H., Tokashiki, N. and Ohkubo, K., 2005c. A real-time multi-parameter monitoring system for assessing the stability of tunnels during excavation. ITA Conference, Istanbul, 1253-1259.
- Aydan, Ö., Daido, M., Tano, H., Nakama, S. and Matsui, H., 2006. The failure mechanism around horizontal boreholes excavated in sedimentary rock. 50th US Rock mechanics Symposium, Paper No. 06-130 (on CD).
- Barton, N.R., Lien, R. and Lunde, J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6 (4), 189-239.
- Bieniawski, Z.T., 1967. Mechanism of brittle fracture of rock: Part I. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 4 (4), 395-406.
- Bieniawski, Z.T., 1989. *Engineering Rock Mass Classifications*, Wiley, New York.
- Bell, J.S. and Gough, D.I., 1979. Northeast-southwest compressive stress in Alberta evidence from oil wells. *Earth and Planetary Science Letters*, 45 (2), 475-482.
- Bosman, J.D. and Malan, D.F., 2000. Time dependent deformation of tunnels in deep hard rock mines. *News Journal, ISRM*, 6 (2), 8-9.
- Carranza-Torres, C. and Fairhurst, C., 2000. Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion. *Tunnelling and Underground Space Tech.*, 15 (2), 187-213.
- Chandler, N.A., 2003. Twenty years of underground research at Canada's URL. WM'03 Conference, February 23 - 27, 2003, Tucson, Arizona.
- Cook, N.G.W., 1964. The Application of Seismic Techniques to problems in Rock Mechanics. *International Journal Rock Mechanics and Mining Science*, 1(2), 169-180.
- Cook, N.G.W., 1965. A note on rockburst considered as a problem of stability. *J. South Afr. Int. Min. Metallurgy*, 65, 437-446.

- Corbetta, F., Bernaud, D. and Nguyen-Minh, D., 1991. Contribution a la methode convergerce-confinement par le principe de la similitude. Rev. Fr. Geo'tech. 54, 5-11.
- Detzlhofer, H., 1969. Gebirgswassereinflüsse beim Stollenbau. Rock Mech., 1(4), 207-240.
- Detournay, E. and Fairhurst, C., 1982. Generalization of the ground reaction curve concept. Proc. 23rd US Symp. on Rock Mech. - Issues in Rock Mechanics, R.E. Goodman and F.E. Heuze (eds.), AIME, New York, 924-933.
- Detournay, E. and Fairhurst, C., 1987. Two-dimensional elastoplastic analysis of a long, cylindrical cavity under non-hydrostatic loading. Int. Journal of Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., 24 (4), 197-211.
- Geniş, M., 2002. Geometrik tasarım değiştirgelerinin derin yeraltı açıklıklarında yenilme bölgesinin boyutlarına etkilerinin statik ve dinamik koşullarda araştırılması. ZKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Zonguldak, 352 s.
- Gerçek, H., 1986. Yeraltı açıklıklarının yüzeyinde oluşan gerilmelerin hesaplanması için bazı pratik yaklaşımlar. I. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Türk Ulusal Kaya Mekaniği Derneği, Ankara, 33-60.
- Gerçek, H., 1988. Calculation of elastic boundary stresses for rectangular underground openings. Mining Science and Technology, 7, 173-182.
- Gerçek, H., 1989. Kemer tavanlı bir tünelde elastik yüzey gerilmelerinin hesaplanması. Türkiye 11. Madencilik Bilimsel ve Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı, TMMOB MMO, Ankara, 273-283.
- Gerçek, H., 1993. Qualitative prediction of failures around non-circular openings. Proc. Int. Symp. on Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering, A.G. Paşamehmetoğlu et al. (eds.), A.A. Balkema, Rotterdam, 727-732.
- Grimstad, E., 1999. Experiences from excavation under high rock stress in the 24.5 km long Laerdal tunnel. International Conf. on Rock Engineering Techniques for Site Characterisation, Bangalore, India, 135-146.
- Hart, R.D., Board, M. and Brady, B., 1988. Examination of fault-slip induced rockbursting at the Strathcona mine. Proc. of the the 29th U.S. Symposium on Rock Mechanics, A. A. Balkema, Rotterdam, Paper:88-0369.
- Henke, A., 2005. Tunnelling in Switzerland: from long tradition to the longest tunnel in the world. World Long Tunnels, 57-70.
- Henke, A., 2005. Tunnelling in Switzerland: from long tradition to the longest tunnel in the world. World Long Tunnels, 57-70.
- Ingliss, C.E., 1913. Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners. Trans. Inst. Nav. Archit., London, 55, 219-241.
- Inoma, H., 1981. Rock burst in the Kanetsu tunnel. Journal of the Japan Society of Engineering Geology (in Japanese), 22 (3), 286-295.
- Ishiguro, Y., Nishimura, H., Nishino, K. and Sugawara, K., 1997. Rock stress measurement for design of underground powerhouse and considerations. Rock Stress, E. Sugawara and Obara (ed.), Balkema, Rotterdam, 491-498.

- Ishiguro, Y., Nishino, K., Murakami, Sugawara, K. and Kawamoto, T., 1999. In-situ initial rock stress measurement and design of deep underground powerhouse cavern. Proc. of the 9th International Congress on Rock Mechanics, ISRM, Balkema, Rotterdam.
- Jaeger, J.G. and Cook, N.G.W., 1979. Fundamentals of Rock Mechanics. 3rd Ed., Chapman and Hall, London.
- Kaiser, P.K. 1993. Keynote address: support of tunnels in burst prone ground - toward a rational design methodology. Proc. of International Conference Rockburst and Seismicity in Mines, Young (ed), A.A. Balkema, Rotterdam, 13-27.
- Kaiser, P.K., McCreath, D.F. and Tannant, D.D., 1996. Canadian Rockburst Support Handbook. Geomechanics Research Centre, Laurentian University, Sudbury Canada, 314 p.
- Kastner, H., 1962. Statik des Tunnel- und Stollenbaues. Design of Tunnels, 2nd edn Springer-Verlag.
- Kirsch, G., 1898. Die theorie der elastizitat und die bedürfnisse der festigkeitslehre. Veit Ver. Deut. Ing., 42, 797-807.
- Lee, S.M., Park, B.S. and Lee, S.W., 2004. Analysis of rockbursts that have occurred in a waterway tunnel in Korea. SINOROCK2004 Symposium, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 41, Paper 3B 24.
- Li, S., Wu, X. and Ma. F., 1998. Application of precedent type analysis (PTA) in the construction of Er-tan hydroelectric power station, China. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 35 (6), 787-795.
- Martin, C.D. and Read, R.S., 1996. AECL's mine-by experiment: a test tunnel in brittle rock. Rock Mechanics, Aubertin et al. (eds.), A.A.Balkema, Rotterdam, 13-24.
- McMahon, 1988. Rock burst research and the Coeur d'Alene district. United States Department of the Interior, Bureau of Mines Information Circular, IC9186, 45 p.
- Mindlin, R. D., 1939. Stress distribution around a tunnel. Trans. ASCE, 105, 619-642.
- Moon, C.J., Whateley M.K.G. and Evans, A.M., 2006. Introduction to Mineral Exploration 2nd edition, Blackwell.
- Muskhelishvili, N.I., 1963. Some basic problems of the mathematical theory of elasticity. Trans.J.R.M. Radok, Gronigen, Noordhoff.
- Myrvang, A.M, Alnaes, L., Hansen, S.E. and Davik, K.I., 2000. Heavy spalling problems in road tunnels in Norway – long time stability and performance of sprayed concrete as rock support, Proc. Int. Symp. Rock Support – applied solutions for underground structures, Lillehammer, Norway, Broch, Myrvang, Stjern (ed), Norwegian Society of Chartered Engineers, 751-764.
- Ortlepp, W.D., 2000. Observation of mining-induced faults in an intact rock mass at depth. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. (37) 1-2, 423-436.
- Ortlepp, W.D. and Stacey, T.R., 1994. Rockburst mechanism in tunnels and shafts. Tunnelling and Underground Space Technology, 9 (1), 59-65.
- Panet, M., 1969. Quelques problèmes de mécanique des roches posés par le tunnel du Mont Blanc. Bul. Liaison Labo. Routiers P. et Ch., N. 42, 115-145.
- Panet, M. and Guenot, A., 1982. Analysis of convergence behind the face of a tunnel. Proceedings, International Symposium Tunnelling '82, IMM, London, 197-204.

- Ranken, R.E. and Ghaboussi, J. 1975. Tunnel Design Considerations: Analysis of Stresses and Deformations Around Advancing Tunnels. Final Report to Federal Railroad Administration, Report No. FRA OR&D 75-84, Department of Transportation, Washington, DC.
- Read, R.S., 1994. Interpreting excavation-induced displacements around a tunnel in highly stressed granite. Ph.D. thesis, Department of Civil and Geological Engineering, University of Manitoba, Winnipeg.
- Savin, G.N., 1961. Stress concentrations around holes. Oxford, Pergamon.
- Shimokawa, M., Oda, S. and Kizawa, T., 1977. An investigation from rock-burst phenomenon in Dai-Shimizu Tunnel (in Japanese). 5th Domestic Rock Mechanics Conference, 5, 79-84.
- Stacey, T.R., 1981. A simple extension strain criterion for fracture of brittle rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 18, 469-474.
- Stewart, R.A., Reimold, W.U., E.G. Charlesworth, E.E. and Ortlepp, W.D., 2001. The nature of a deformation zone and fault rock related to a recent rockburst at Western Deep Levels Gold Mine, Witwatersrand Basin, South Africa. *Tectonophysics*, 337, 173-190.
- Tanaka, M., 1966. Introduction to Engineering Geology for Civil Engineers, Sankaido.
- Tano, H., Abe, T. and Aydan, Ö., 2005. The development of an in-situ AE monitoring system and its application to rock engineering with particular emphasis on tunneling. ITA Conference, Istanbul, 1245-1252.
- Tao, Z. Y., 1988. Rockburst during construction in several hydropower station. *Water Power*, 7, 40-45.
- Ünlü, T. and Gerçek, H., 2003. Effect of Poisson's ratio on the normalized radial displacements occurring around the face of a circular tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18, 547-553.
- Vuillemeur, F., Teuscher, P. and Beer, R., 1997. The Lotscherberg base tunnel. *Tunnelling and Underground Space*, 12 (3), 361-368.
- Whyatt, J.K. and White, B.G., 1998. Rock bursting and seismicity during ramp development, Lucky Friday Mine, Mullan, Idaho. *Proceedings 17th International Conference on Ground Control in Mining*, S.S. Peng (ed.), Morgantown, WV, 4-6 Morgantown, 317-325.
- Whyatt-J, Blake, W., Williams, T.J. and White, B., 2002. 60 Years of Rockbursting in the Coeur D'Alene District of Northern Idaho, USA: Lessons Learned and Remaining Issues. 109th Annual Exhibit and Meeting, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Feb. 25-27, Phoenix, AZ. Preprint 02-164; 10 pp.
- Zoback, M.D., Tsukahara, H. and Hickman, S.H., 1980. Stress measurements at depth in the vicinity of the San Andreas fault: Implications for the magnitude of shear stress at depth. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 85, B11, 6157-6173.

YAYIM AMAÇLARI VE KURALLARI, YAYINA KABUL İLKELERİ

AMAÇ

Türk Kaya Mekaniği Dergisi (TKMD);

1. Türkiye’de kaya mekaniği konusunda gerek duyulan bilimsel iletişimi etkin bir şekilde sağlamak,
2. Türkiye’deki araştırmacıları kaya mekaniği ile ilgili konularda araştırma ve yayın yapmaya özendirmek ve
3. Türkçe’nin mesleki yayın dili olarak gelişmesi ve yabancı sözcüklerden arındırılması çabalarına katkıda bulunmak amacıyla yayımlanmaktadır.

NİTELİK

TKMD’de yayımlanması istemiyle gönderilecek olan yazılar daha önce yayımlanmamış olmalı ve aşağıdaki niteliklerden en az birini taşımalıdır.

1. Kaya mekaniği alanında bilimsel yöntemlerle yapılmış özgün sonuçları olan bir çalışma,
2. Kaya mekaniğinin herhangi bir uygulama alanında daha önce yapılmış çalışmaları eleştirel bir yaklaşımla derleyen ve/veya o konuda yeni bir görüş ortaya koyan bir derleme,
3. Vaka sunumu (*case study*),
4. Araştırmaların ön bulgularının sunulduğu veya mevcut tekniklerin doğrulanmasına yönelik bir teknik not.

YAZILARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE YAYINA KABUL İLKELERİ

TKMD Editörlüğüne ulaşan yazılar; öncelikle, içerik ve kaya mekaniğiyle ilgisi açısından ve ayrıca yazım kuralları vb. yönlerden Editörlük tarafından incelenir; sonra, değerlendirilmek üzere en az iki Yayın Kurulu üyesine gönderilir. Yayın Kurulu üyelerinden gelecek görüşler doğrultusunda yazının olduğu gibi, az veya önemli ölçüde düzeltilmesi koşuluyla yayımlanmasına, ya da reddine Editörlükçe karar verilir ve sonuç yazarlara bildirilir.

Yayın Kurulu üyelerinden birinin olumsuz görüş bildirmesi durumunda Editörlüğün bir karara varabilmesi için yazı ya Editörlükçe değerlendirilir veya üçüncü bir Yayın Kurulu üyesine gönderilir. Yayın Kurulu üyeleri gerekli görürlerse yazıları düzeltilmiş haliyle tekrar talep edip değerlendirebilirler.

Yazarlar, incelemecilerin ve Editörlüğün yaptığı eleştiri, öneri ve düzeltmeler arasında katılmadıkları hususlar olduğunda, bunları ayrı bir sayfada gerekçeleriyle birlikte açıklamalıdır.

Gönderilen yazılar, dergide yayımlansın veya yayımlanmasın yazarlara iade edilmez. Ayrıca, yayıma kabul edilen her yazının yayım hakkı devir formu yazar veya yazarlardan biri tarafından imzalanarak Editörlüğe gönderilir. Bu formun gönderilmemesi halinde, yazı yayıma kabul edilmiş olsa bile, baskıya gönderilmez. Yayıma kabul edilen yazıların ayrı baskısı yapılmaz. Yazarlara makalenin yayımlandığı sayı gönderilir.

YAZIM DİLİ

TKMD’nin yayın dili “Türkçe” ve “İngilizce”dir. Yazıların başlıkları, özetleri ve tüm çizelge ve şekillerin açıklamaları Türkçe ve İngilizce olarak iki dilde birlikte verilmelidir. İngilizce metinli makaleler de dergide yer alabilir. Kaya mekaniği ile ilgili yaygın kullanılan bazı İngilizce terimlerin Türkçe karşılıkları, TUKMD tarafından yayımlanan *Kaya Mekaniği Terimleri Kılavuzu*’na uygun olarak kullanılmalıdır.

YAZIM KURALLARI

Metin Bölümü

1. *Metin*; A4 boyutunda (297 x 210 mm) kağıtların bir yüzüne bilgisayarda, 1.5 satır aralıklı ve 10 puntoluk Arial yazı karakteri ile yazılmalıdır. Yazımda, blok yazım sistemi (paragraf başı girintisi yok ancak paragraflar arasında 1.5 satır aralığı boşluk verilerek) uygulanmalıdır. Sayfa kenarlarında 3'er cm boşluk bırakılmalı ve sayfalar numaralandırılmalıdır. Yazıcı çıktıların silik olmamasına özen gösterilmelidir.
2. *Başlık*; konuyu en iyi şekilde belirtir, en fazla 10 kelimeyi geçmeyecek şekilde kısa seçilmeli ve Türkçe başlığın (tamamı koyu büyük harflerle yazılmış) yanı sıra, İngilizcesi (italik büyük harflerle) de yazılmalıdır. Eğer yazı İngilizce yazılmış ise, önce İngilizce sonra Türkçe başlık verilmelidir.
3. *Özet*; yazının başlangıcında en fazla 200 kelimeyi geçmeyecek şekilde hazırlanmış, Türkçe ve İngilizce özet (abstract) bulunmalıdır. Eğer yazı İngilizce hazırlanmış ise, önce abstract sonra özet verilmelidir. Bu bölüm, yazının diğer bölümlerinden ayrı olarak yayımlanabilecek düzende yazılmış, yazının tümünü (özellikle çalışmanın amacını ve başlıca sonuçlarını içerecek şekilde) kısa ve öz biçimde yansıtır nitelikte olmalıdır. Yazı Türkçe yazılmışsa Abstract'ın, İngilizce yazılmışsa Özet'in başlığı ve metin kısmı italik karakterle verilmelidir. Özet içinde; yararlanılan kaynaklara, şekil, çizelge ve eşitlik numaralarına değinilmemelidir. Ayrıca, özet ve abstract bölümlerinin altında bir satır boşluk bırakılarak *Anahtar sözcükler* ve *Key words* (en az 2, en çok 6 sözcük) verilmelidir.
4. Yazının genel olarak aşağıda belirtilen düzene göre sunulmasına özen gösterilmelidir.
 - Başlık (Türkçe ve İngilizce)
 - Yazar ad(lar)ı ve adres(ler)i (yazar adları koyu karakterle ve soyadları tamamen büyük harfle, adresler normal italik karakterle)
 - Özet (anahtar sözcükler eklenerek)
 - Abstract (key words eklenerek)
 - Giriş
 - Metin bölümü
 - Sonuç(lar)
 - Katkı Belirtme (varsa)
 - Kaynaklar
 - Ek Açıklamalar (varsa)
5. Yazılarda okuyucuya aktarılması istenen veriler, görüşler, tartışmalar ve bu amaçla kullanılacak çizelgeler ile şekiller en fazla 20 sayfayı aşmayacak şekilde düzenlenmelidir.
6. Metin içinde en fazla üç ayrı düzeyde bölüm başlığı kullanılmalıdır. Başlık yazım şekilleri aşağıdadır.

1. BİRİNCİ DERECE BAŞLIK

1.1. İkinci Derece Başlık

1.1.1. Üçüncü derece başlık

7. Yazılarda, Uluslararası Birim Sistemi (SI birimleri) (kPa, kN/m³ vb.) kullanılmalıdır.
8. Gerek metin içinde ve çizelgelerde, gerekse şekillerde sayıların ondalık bölümlerinin ayrılması için nokta kullanılmalıdır (3.04 gibi). Üç basamaktan büyük tam ve ondalık sayılar, noktadan itibaren aralarında boşluk bulunan (sağa veya sola doğru) üçerli gruplar halinde yazılmalıdır (1234567 yerine 1 234 567; 9.87654 yerine 9.876 54).

Kaynaklar

1. Metin içinde kaynaklara atıflar, aşağıdaki örneklerde olduğu gibi, yazar soyadı ve yayın yılı yazılarak yapılır.

...Bieniawski (1989), Hudson ve Harrison (1997) tarafından ...

...bazı araştırmacılar (Bieniawski, 1989; Hudson ve Harrison, 1997) tarafından ...

2. İkiiden fazla yazarlı yayınlara metin içinde değinilirken, ilk yazarın adı belirtilmeli diğerleri için vd. (yabancı dildeki yayınlarda 'vd.') kısaltması kullanılmalıdır (Ulusay vd., 2001; Singh vd., 1997).
3. Kişisel görüşmelerde ve İnternet'ten yapılan alıntılarda da metin içinde ad (kişi soyadı veya kuruluş, firma vb. adı) ve yıl (görüşmenin yapıldığı veya bilginin elde edildiği yıl) belirtilerek atıf yapılmalıdır.
4. Yazarı belli olmayan kaynaklarda yazar adı yerine adsız (*anonymous*) anlamında 'Anon.' sözcüğü kullanılmalıdır.
5. Kaynaklar, yazar soyadları esas alınarak alfabetik sırayla verilmelidir. Metin içinde değinilen tüm kaynaklar, kaynaklar dizininde eksiksiz olarak belirtilmelidir. Kaynakların yazılmasında aşağıdaki örneklerde belirtilen düzen esas alınmalıdır.

- *Sürelî yayınlar ve bildiriler:*

[Yazar ad(lar)ı, Yıl. Makalenin başlığı. Sürelî Yayının Adı (kısaltılmamış), Cilt No. (Sayı No.), sayfa aralığı.]

Sugawara, K., and Obara, Y., 1999. Draft ISRM suggested method for in-situ stress measurement using the compact conical-ended borehole overcoring (CCBO) technique. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 36 (3), 307-322.

[Yazar ad(lar)ı, Yıl. Bildirinin başlığı. Sempozyum veya Kongrenin Adı, Düzenlendiği tarih, Yerin adı, Editör(ler), Basımevi, Basıldığı yer, Cilt No. (birden fazla ciltten oluşuyorsa), sayfa aralığı.]

Ünal, E., Özkan, İ., and Ulusay, R., 1992. Characterization of weak, stratified and clay bearing rock masses. ISRM Symposium: Eurock'92 - Rock Characterization, 14-17 September 1992, Chester, U.K., J.A.Hudson (ed.), British Geotechnical Society, London, 330-335.

- *Kitap veya kitap içinde bölüm:*

[Yazar ad(lar)ı, Yıl. Kitabın Adı (ilk harfleri büyük). Yayınevi, Basıldığı Şehir, Kaçınıcı baskı olduğu, sayfa sayısı.]

Goodman, R.E., 1989. Introduction to Rock Mechanics. John Wiley and Sons, New York, 2nd edn., 562 pp.

[Yazar ad(lar)ı, Yıl. Bölümün başlığı. Kitabın Adı (ilk harfleri büyük). Editör(ler), Yayınevi, Basıldığı Şehir, sayfa aralığı.]

Ramamurthy, T. 1993. Strength, modulus responses of anisotropic rocks. Comprehensive Rock Engineering, J.A. Hudson (ed.), Pergamon, Oxford, Vol.1, 313-329.

- *Raporlar ve tezler:*

[Yazar ad(lar)ı, Yıl. Raporun veya tezin başlığı. Raporun veya tezin türü (yayımlanıp, yayımlanmadığı), Arşiv No. (varsa), Kuruluşun/Üniversitenin Adı, Şehir, sayfa sayısı.]

Ranken, R.E., and Ghaboussi, J., 1975. Tunnel design considerations: Analysis of stresses and deformations around advancing tunnels. Final Report to Federal Railroad Administration, Report No. FRA OR&D 75-84, Department of Transportation, Washington, DC, 169 pp.

Sönmez, H., 1996. T.K.İ.-E.L.İ. Soma Linyitleri açık işletmelerinde eklemlili kaya kütlesi içindeki şevlerin duraylılığının değerlendirilmesi. Yüksek Mühendislik Tezi (yayımlanmamış), Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 99 s.

- *Kişisel görüşme veya yazışma:*

[Kişi adı, Görüşme/yazışma yılı. Görüşme yeri / kişinin adresi.]

Bieniawski, Z.T., 1994. Kişisel görüşme. The Penn State University, State College, Pa., USA.

- *İnternet:*

[Kişi, kuruluş, firma vb. adı, Bilginin elde edildiği yıl. Sayfanın/yazının başlığı (varsa), Web adresi]

ERI, 2002. Earthquake Research Institute, <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/>

Hoek, E., 2000. Practical Rock Engineering, Course notes by Evert Hoek. <http://www.rocksience.com/hoek/PracticalRockEngineering.asp>

Eşitlikler ve Formüller

1. Eşitlikler elle yazılmamalı ve bilgisayardan yararlanılmalıdır. Eşitliklerde, yaygın olarak kullanılan uluslararası simgelere yer verilmesine özen gösterilmelidir.
2. Her eşitliğe sırayla numara verilmeli, numaralar parantez içinde eşitliğin hizasında ve sayfanın sağ kenarında belirtilmelidir.
3. Eşitliklerde kullanılabilecek alt ve üst indisler belirgin şekilde ve daha küçük karakterlerle yazılmalıdır (I_d , x^2 gibi).
4. Eşitliklerdeki sembollerle ilgili açıklamalar eşitliğin hemen altındaki ilk paragrafta verilmelidir.
5. Karekök işareti yerine üst indis olarak 0.5 kullanılmalıdır ($\sigma_{cmax} = \sigma_c s^{0.5}$ gibi).
6. Bölme işareti olarak yatay çizgi yerine “/” simgesi kullanılmalıdır. Çarpma işareti olarak genellikle herhangi bir işaret kullanılmamalı, ancak zorunlu hallerde “*” işareti tercih edilmelidir ($Y=5*10^{-3}X$ gibi).

Çizelgeler

1. Yazarlar, derginin boyutlarını dikkate alarak, çizelgeleri sınırlamalı ve gerekiyorsa metinde kullanılabilecek oranla çizelgeleri daha küçük karakterlerle yazmalıdır. Bu amaçla çizelgeler tek sütuna (7.5 cm) veya çift sütuna (16 cm) yerleştirilebilecek şekilde düzenlenmesine özen gösterilmelidir. Tam sayfaya yerleştirilmesi zorunlu olan büyük çizelgelerin en fazla 16 x 21 cm boyutlarında olması gereklidir. Bu boyutlardan daha büyük ve katlanacak çizelgeler kabul edilmez.
2. Çizelgelerin hemen altında, gerekli durumlarda ve küçük puntolarla yazılmış, açıklayıcı dip notlarına veya kısaltmalara ilişkin açıklamalara yer verilebilir.
3. Çizelgelerin başlıkları, kısa ve öz olarak seçilerek, hem Türkçe (normal karakterle ve ilk harfi büyük diğerleri küçük harfle) hem de İngilizce (ilk harfi büyük diğerleri küçük İtalik harflerle) yazılmalıdır. İngilizce olarak hazırlanmış yazılarda önce İngilizce sonra Türkçe çizelge başlığı alt alta verilmelidir.

4. Çizelgelerde sütunların ayrımını gösteren düşey çizgiler yer almamalı, sadece çizelgenin üst ve alt sınırları ve gerek görülen diğer bölümleri için yatay çizgiler kullanılmalıdır.
5. Her çizelge ayrı bir sayfaya bastırılarak ve sıraya dizilerek "Çizelgeler Dizini" sayfasıyla birlikte metnin arkasına konulmalıdır. Çizelge başlıkları çizelgenin üzerine yazılmalıdır. Çizelge numaralarının her çizelgeyi içeren sayfanın sağ üst köşesinde belirtilmesi yeterlidir.

Şekiller (çizim, fotoğraf, harita vb.)

1. Değerlendirme aşamasında şekillerin orijinallerinin gönderilmesine gerek yoktur. Bu aşamada çizimlerin teknik çizim normlarına uygun olarak çini mürekkeple aydıngere çizilmiş veya bilgisayar çıktısı olarak alınmış ve harf, rakam ve simgeleri kolaylıkla okunabilen orijinallerinin kaliteli kopyaları gönderilmelidir.
2. Tüm çizim ve fotoğraflar şekil olarak değerlendirilip numaralandırılmalıdır. Şekil altı yazıları "Şekiller Dizini" başlığı altında hem Türkçe (normal karakterle ve ilk harfi büyük diğerleri küçük harflerle) hem de İngilizce (ilk harfi büyük diğerleri küçük İtalic harflerle) ayrı bir sayfada verilmelidir. Yazı İngilizce hazırlanmışsa, şekil altı yazıları önce İngilizce sonra Türkçe verilmelidir.
3. Her şekil, ayrı bir sayfada yer alacak biçimde sıraya dizilerek Şekiller Dizini sayfasıyla birlikte çizelgelerden sonra sunulmalıdır. Şekil altı yazılarının ayrıca şekil sayfalarına da yazılmasına gerek olmayıp, şekil numaralarının her şeklin yer aldığı sayfanın sağ üst köşesinde kurşun kalemle yazılarak belirtilmesi yeterlidir.
4. Şekiller ya tek sütuna (7.5 cm), ya da çift sütuna (en fazla 16 cm) yerleştirilebilecek boyutta olmalıdır. Tam sayfaya yerleştirilmesi zorunlu olan büyük şekillerin, şekil altı açıklamalarına da yer kalacak biçimde, en fazla 16x21 cm boyutlarında olması gereklidir. Belirtilen bu boyutlardan daha büyük ve katlanacak boyuttaki şekiller kabul edilmez.
5. Harita, kesit ve planlarda sayısal ölçek yerine çubuk (bar) türü ölçek kullanılmalıdır.
6. Şekiller yukarıda belirtilen boyutlarda hazırlanırken, şekil üzerindeki açıklamaların (karakterlerin) okunabilir boyutlarda olmasına özen gösterilmelidir.
7. Fotoğraflar şekiller için yukarıda belirtilen boyutlarda, parlak kağıda, kontrastlı ve siyah-beyaz basılmış olmalıdır. Özellikle koyu tonların egemen olduğu bölgelerde simgelerin beyaz karakterle gösterilmesi önerilir. Yaygın olarak kullanılan uluslararası simgelerin kullanılmasına özen gösterilmelidir. Dergide tüm şekillerin siyah beyaz ve gri tonlarında basılacak olmasından dolayı, renkli şekiller kabul edilmez.
8. Mikroskopta çekilmiş ince kesit fotoğraflarının parlak kağıda basılı olmaları gereklidir.

Ek Açıklamalar ve Dipnotlar

1. Ana metnin içine alınması, okuyucunun dikkatinin dağılmasına yol açabilecek ve hatırlatma niteliğindeki bilgiler, yazının sonunda "Ek Açıklamalar" başlığı altında konulabilir (istatistik bilgilerin verilisinde, formüllerin çıkarılmasının gösterilmesinde, bilgisayar programlarının verilmesinde vb. konularda bu yol izlenebilir).
2. Dipnotlar, yerleştirme ve yazılma açısından güçlükler neden olduğundan, çok gerekli durumlar dışında kullanılmamalıdır. Eğer dipnot kullanılırsa, yıldız (*) işareti ile gösterilmeli ve mümkün olduğunca kısa tutulmalıdır. Dipnotta eğer değinme yapılırsa, bibliyografik bilgiler dipnotta değil, Kaynaklar Dizininde verilmelidir.

YAZILARIN GÖNDERİLMESİ

TKMD'nin "Yayın Amaç ve Kuralları"nda belirtilen ilkelere uygun olarak hazırlanmış yazılar, biri orijinal diğer ikisi fotokopi olmak üzere ve ayrıca CD'ye de kopyalayarak aşağıdaki yazışma adreslerinden birine üç

nüsha gönderilmelidir. Orijinal resimlemeler, yazının yayına kabul edilmesi durumunda kullanılmak üzere yazarlar tarafından muhafaza edilmelidir.

Prof. Dr. Reşat Ulusay

Türk Kaya Mekaniği Dergisi Editörü
Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Jeoloji Mühendisliği Bölümü
06800 Beytepe, ANKARA
Tel : (312) 297 77 67 (Ofis)
(312) 297 77 00 - 05 (Sekreterlik)
Faks : (312) 299 20 34
E-posta : resat@hacettepe.edu.tr

Prof. Dr. Hasan Gerçek

Türk Kaya Mekaniği Dergisi Editörü
Zonguldak Karaelmas Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Maden Mühendisliği Bölümü
67100 ZONGULDAK
Tel : (372) 257 40 19
Faks : (372) 257 40 23
E-posta : gercek@karaelmas.edu.tr

