

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



Ocak 2008
January

TÜRK KAYA MEKANİĞİ DERGİSİ

TURKISH JOURNAL OF ROCK MECHANICS

Sayı **16**
Number

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 ARIOĞLU (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
Ümit ERDEM
H. Sinan İNAL

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) 16 Ocak (January) 2008

İÇİNDEKİLER (CONTENTS)

Terkedilmiş bir oda – topuk yeraltı linyit ocağının uzun süreli duraylılığının değerlendirilmesi / Assessment of long – term stability of an abandoned room and pillar underground lignite mine Ömer AYDAN, Hisatako TANO, Melih GENİŞ	1
Terkedilmiş bir oda – topuk yeraltı linyit ocağının depreme karşı duraylılığının değerlendirilmesi / Assessment of dynamic stability of an abandoned room and pillar underground lignite mine Ömer AYDAN, Melih GENİŞ	23
Sultanahmet (Aksaray) beldesi tuz örneklerinin sünme davranışının incelenmesi / Investigation of creep behavior of the rock salt samples from Sultanahmet (Aksaray) Deniz ARIKAN, Mustafa Gürel ŞENYUR	45
Kitap tanıtımı	53

ÖNSÖZ

Derneğimiz tarafından 1985-2003 yılları arasında 15 sayı olarak yayımlanabilmiş bulunan **Kaya Mekaniği Bülteni**'nin yayın hayatına "**Türk Kaya Mekaniği Dergisi**" adıyla yeni biçim ve yazım şekliyle devam etmesi konusunda Yönetim Kurulu'nun almış olduğu karar, 16. sayı ile hayata geçirilmiş bulunmaktadır. Bu sürece katkıda bulunan yazarlara, dergi editörlerine ve yayın kurulu üyelerine teşekkür ederiz.

Milli Komite niteliğinde bulunan derneğimiz Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği (ISRM)'nin bir üyesidir. Derneğimiz bugüne kadar 8 adet Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu düzenlemiş olup 9. Kaya Mekaniği Sempozyumu 30-31 Ekim 2008 tarihlerinde İzmir'de derneğimiz himayesinde Dokuz Eylül Üniversitesi Maden ve Jeoloji Mühendisliği Bölümlerince gerçekleştirilecektir. Derneğimiz ayrıca, ISRM'nin himayesinde olmak üzere iki adet uluslararası nitelikte sempozyumun da düzenleyicisi olmuştur.

Kaya mekaniği ve kaya mühendisliği alanlarında araştırma, uygulama vb çalışmalarda bulunan kişiler, hem derneğimize hem de ISRM'ye üye olabilmektedirler. ISRM'ye üye olabilmek için Derneği'mize üye olmak ISRM tarafından getirilmiş bir ön kuraldır. Şu anda ulusal düzeyde 130 üyemiz bulunmakta ve bu üyelerimizden 86'sı aynı zamanda ISRM üyesidirler. Bu amaçla, üye olmak ya da daha fazla bilgi edinmek isteyenlerin aşağıda verilen yazışma adreslerinden biri ile iletişime geçmelerini dileriz.

Dergimizin arzu edilen nitelik ve süreklilikte yayımlanması konusunda katkılarınızı bekler, çalışmalarınızda başarılar dileriz.

Saygılarımızla,

Türk Ulusal Kaya Mekaniği Derneği (TUKMD)
Yönetim Kurulu
Ocak 2008

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): 11/01/2008

OKURLARIMIZA

“**Kaya Mekaniği Bülteni**,” Türk Ulusal Kaya Mekaniği Derneği (TUKMD) tarafından kaya mekaniği ve kaya mühendisliği konularında ülkemizde gerçekleştirilen araştırmaların ve uygulamaya yönelik çalışmaların duyurulması ve teşviki amacıyla 1985-2003 yılları arasında yayımlanmıştır. Bilindiği gibi, ülkemizde özellikle akademik yükseltmelerin son yıllarda ağırlıklı olarak uluslararası dergilerde yayın yapma ölçütüne bağlanması nedeniyle, **Bülten**’e gönderilen makale sayısında önemli düzeyde bir düşüş olmuş ve Mart 2003’te yayınlanan 15. sayıdan sonra bugüne değin **Bülten**’in basımı mümkün olamamıştır. Bu durumun, kaya mekaniği konusundaki çalışmalardan uygulayıcıların yararlanabilmesi açısından getirdiği sınırlamalara ek olarak, Türkçe bilim dilinin yeterli düzeyde gelişmemesinde de olumsuz bir rol oynadığı yadsınamaz. Dolayısıyla, ülkemizde gerçekleştirilen kaya mekaniği konulu çalışmaların duyurulması açısından önemli bir görevi olan **Bülten**’in işlevinin sürdürülmesi bir zorunluluk haline gelmiştir.

Yukarıda belirtilen hususlar dikkate alınarak, TUKMD Yönetim Kurulu tarafından **Bülten**’in bundan böyle “**Türk Kaya Mekaniği Dergisi (TKMD)**” adıyla çıkarılması ve bazı değişikliklerin yapılarak zaman içinde derginin uluslararası indeksler tarafından da taranan bir dergi olması yönünde gerekli çabanın sarfedilmesi kararı alınmıştır. Bu çerçevede, derginin yazım ve yayım kuralları ile Yayın Kurulu yeniden düzenlenmiş olup, Dergi’nin yılda iki kez düzenli şekilde yayımlanması öngörülmüştür.

TUKMD Yönetim Kurulu ve Editörler olarak, **Dergi**’yi yeni şekli ve içeriğiyle sizlere sunmaktan mutluluk duymaktayız. Yeni düzenlemeyle; kaya mekaniği ve mühendisliği alanında özgün sonuçların elde edildiği çalışmaların yanı sıra, uygulamaya dönük konuları da içeren makalelere yer verilerek, kaya mekaniği alanında çalışan araştırmacılar ve mühendisler arasındaki bilimsel ve teknik iletişime daha etkin şekilde katkı sağlanması amaçlanmıştır. Bu amaca ulaşılması açısından kuşkusuz, araştırmacıların yanı sıra, uygulamaya dönük çalışan mühendislerin de makalelerini **Dergi**’ye göndererek dergimizin yayım hayatını kesiksiz bir şekilde sürdürmesi yönündeki katkılarını esirgemeyeceklerine inanıyoruz.

Türk Kaya Mekaniği Dergisi ile ilgili bu gelişmede önemli katkısı olan TUKMD Yönetim Kurulu’na, **TKMD**’nin yeni bir anlayışla çıkarılan bu ilk sayısına makale gönderen yazarlara, Yayın Kurulu Üyeleri’ne ilgi ve katkılarından dolayı içten teşekkürlerimizi sunar, **TKMD**’nin kaya mekaniği camiası için yararlı olmasını dileriz.

Saygılarımızla,

Reşat ULUSAY ve Hasan GERÇEK, Editörler
Ocak 2008

EDITORIAL

*We are happy to introduce the first issue of the **Turkish Journal of Rock Mechanics (TJRM)**. This journal is envisioned to replace the **Rock Mechanics Bulletin** that was published irregularly for 15 issues by the Turkish National Society for Rock Mechanics (TNSRM) between 1985 and 2003.*

*It is our hope and intention that **TJRM** will contribute to the scientific and technical literature by original papers involving theoretical and practical aspects of the field of rock mechanics and rock engineering. We, therefore, strongly encourage researchers and practicing engineers to submit their papers to **TJRM** and support it.*

We also would like to express our thanks to the Executive Committee of the TNSRM for their support, to the authors of the articles in this first issue for their contributions, and to the members of the Editorial Board for their valuable help.

Warm regards,

Reşat ULUSAY & Hasan GERÇEK, Editors
January 2008



Terkedilmiş bir oda-topuk yeraltı linyit ocağının uzun süreli duraylılığının değerlendirilmesi

Assessment of long-term stability of an abandoned room and pillar underground lignite mine

¹Ömer AYDAN, ²Hisatako TANO, ³Melih GENİŞ

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

²Nihon Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Koriyama, Japonya

³Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak

ÖZ

Bu makalede, Japonya'da Mitake ilçesinde terkedilmiş bir oda-topuk linyit ocağında duraysızlık problemlerinin belirlenmesi ve ocağın uzun süreli duraylılığının değerlendirilmesine yönelik olarak sürdürülen kaya mekaniği araştırmaları sunulmuştur. Çevre kaya malzemesi ve kaya kütlesi özelliklerinin belirlenebilmesi için yerinde ve laboratuvar da deneyler yapılmıştır. Kaya malzemesinin kısa süreli dayanım ve deformasyon özellikleri ile krip davranışının yanı sıra, su içeriğinin fonksiyonu olarak bozunma özelliklerinin belirlenmesi için laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Ayrıca maden açıklıklarını çevreleyen kaya kütlelerinin davranışı yerinde incelenmekte olup, bu çalışmalar halen sürdürülmektedir. Bu çalışmada, deprem olgusu göz önünde bulundurulmadan terkedilmiş ocakta gözlenen duraysızlık problemleri, laboratuvar deneyleri ve arazi ölçümleri üzerinde durulmuş olup, bu deneylere bağlı olarak, terkedilmiş oda topuk madeninin uzun süreli duraylılığının değerlendirilmesi ve göçme zamanlarının tahmini için bazı duraylılık analizleri yapılmış ve sonuçları tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Terkedilmiş yeraltı linyit ocağı, oda topuk, uzun süreli duraylılık, krip, kayaç bozunması.

ABSTRACT

In this article, rock mechanics investigations for the determination of instability problems and assessment of long-term stability of the abandoned room and pillar underground lignite mine in Mitake town of Japan are described. Some in-situ and laboratory tests were performed for the determination of rock material and rock mass properties. Laboratory tests were carried out for determination of short-term strength and deformation properties of rock material, creep behaviour as well as degradation properties as a function of variation in water content. In addition, the behavior of the rock mass around mining openings is monitored and these studies are still continuing. In this study, instability problems encountered in the abandoned mine without considering the effects of earthquakes, laboratory experiments and field measurements are presented. On the bases of these experiments, some stability analyses for the assessment of the long-term stability of the abandoned room and pillar mines and estimation of their collapse time have been carried out and their implications are discussed.

Key Words: Abandoned underground lignite mine, room and pillar, long term stability, creep, degradation of rock.

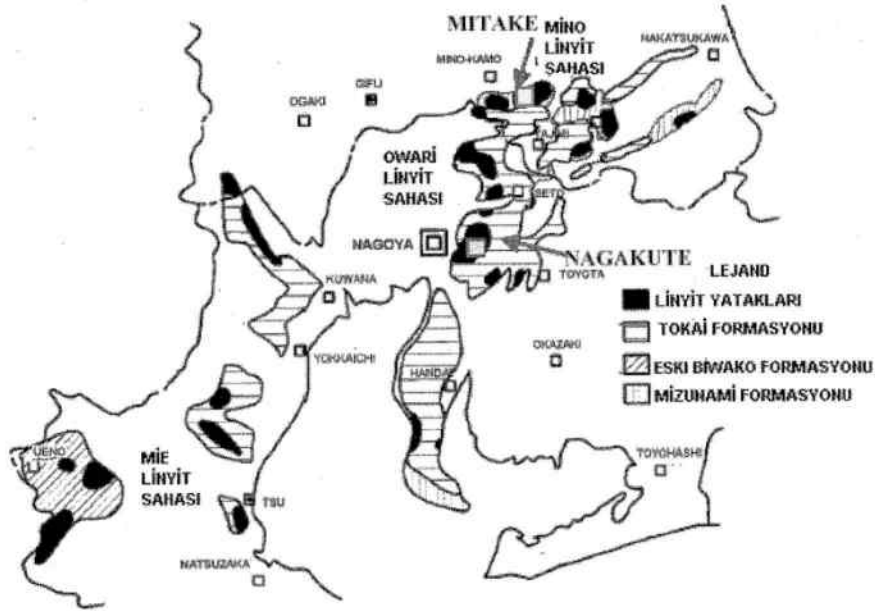
1. GİRİŞ

Kaya kütlelerinin uzun süreli dayanım ve deformasyon özellikleri kaya yapılarının uzun süreli davranış ve duraylılığı açısından kaya mekaniği alanında önemli bir araştırma konusunu oluşturmaktadır. Özellikle kayacın uzun süreli davranışının arazi gözlemleri ile sınırlanabileceği sınırlı sayıda örnek bulunmaktadır. Kapadokya Bölgesi'nde bulunan yeraltı açıklıkları, Ege Bölgesi'ndeki antik yeraltı mermer ocakları, kral mezarları ve Mısır'daki 3200 yıllık kral mezarları bu tür yapılara bir kaç örnektir. Yazarlar yukarıda değinilen bölgelerde açıklıkların uzun süreli davranışlarının belirlenmesi amacıyla bazı çalışmalar yapmışlardır (Aydan vd., 1999 a, 1999b; Aydan ve Geniş, 2004; Aydan ve Kumsar, 2005).

Bu çalışmada, Japonya'nın Gifu ili Mitake kasabasında terkedilmiş bir oda topuk linyit ocağına ilişkin laboratuvar ve arazide yapılan çalışmalar ile duraylılık çözümleme yöntemleri ve uygulamaları sunulmuştur. İncelenen madende yaklaşık 40 yıl önce üretim faaliyeti sona ermiştir. Terkedilmiş madende ve/veya yeryüzünde, depremlerin etkisiyle ve kaya kütlelerinin zamana bağlı dayanım değerlerinin azalması sonucu bazı duraysızlık sorunları oluşmaktadır. Özellikle sığ derinlikteki bu tür yeraltı ocaklarının üstünde tasman ve göçükler zaman zaman karşılaşılan problemler arasındadır. Bölgenin deprem açısından aktif olması, ayrıca beklenen Tokai ve Tonankai depremlerinin kasabada önemli hasarlara yol açabileceği düşünülmektedir (Aydan ve Kawamoto, 2004). Söz konusu yeraltı madenini oluşturan çevre kayacının kısa ve uzun süreli mekanik davranışının ortaya konulması ve su içeriğinin mekanik özelliklere olan etkisi ve zamanla bozunmasının belirlenmesi amacıyla bazı laboratuvar deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Yerinde ölçümlerde kullanılan duraylılık izleme yöntemleri için temel verilerin elde edilmesine yönelik olarak kaya malzemesi üzerine yapılan laboratuvar deneyleri sırasında akustik emisyon, elektrik potansiyeli ve manyetik alan değişimi gibi ek ölçümler de gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, deprem yüklerinin etkisinin yanı sıra, kaya kütlelerinin uzun süreli davranışının belirlenmesi ve açıklıkların uzun süreli davranışın ortaya konması için arazi ölçümleri başlatılmıştır. Bu çalışmada yukarıda sözü edilen laboratuvar deneyleri ve yerinde ölçüm ve gözlem çalışmaların sunulmasının yanı sıra oda-topuk yöntemi ile çalıştırılmış terkedilmiş ocakların uzun süre duraylılığı ve göçme zamanının saptanması için bazı yöntemler önerilmekte ve uygulamaları verilmektedir.

2. İNCELENEN OCAK VE JEOLJİK ÖZELLİKLER

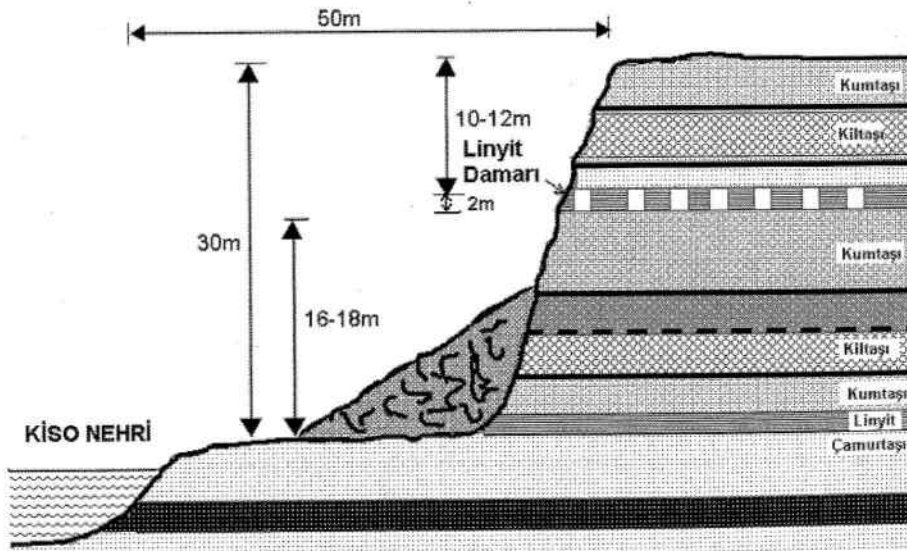
İnceleme alanı, Japonya'nın Tokai Bölgesi'nde Gifu iline bağlı Mitake kasabasında terkedilmiş bir oda-topuk yönetimiyle işletilmiş bir linyit ocağıdır. Madenin yer aldığı bölgedeki linyit yataklarının dağılımı Şekil 1'de gösterilmiştir. Linyit çevre kayalarının yaşları bölgeden bölgeye değişim göstermektedir. Mitake'de Mizunami formasyonu Nakamura biriminde yer alan linyit yatakları Miyosen, Nagakute'de Seto formasyonu Yadagawa birimindeki linyit yatakları da Pliyosen yaşlıdır. Mitake'de bulunan kayalar Nagakute'de bulunan kayalara göre daha yaşlıdır. Mitake'deki dört adet linyit damarından ikinci ve üçüncü damarlar işletilmiştir. Üçüncü damarın kalınlığı 1-3 m arasındadır. Nagakute'deki damar sayısı dört olup, kalınlıkları genellikle 1 m'den daha azdır. Mitake'de tabakalanma, erken Tersiyer yaşlı kayaların üstünde tabandan tavana konglomeralı çamurtaşı, silttaşı, kumtaşı ve linyit olarak kaba bir şekilde dizilmektedir. Nagakute tortul kayaları da benzer şekilde jeolojik olarak sınıflandırılabilir. Çimentolanma zayıf olup, bazen çimentosuz kum tabakaları linyit damarlarının altında bulunmaktadır.



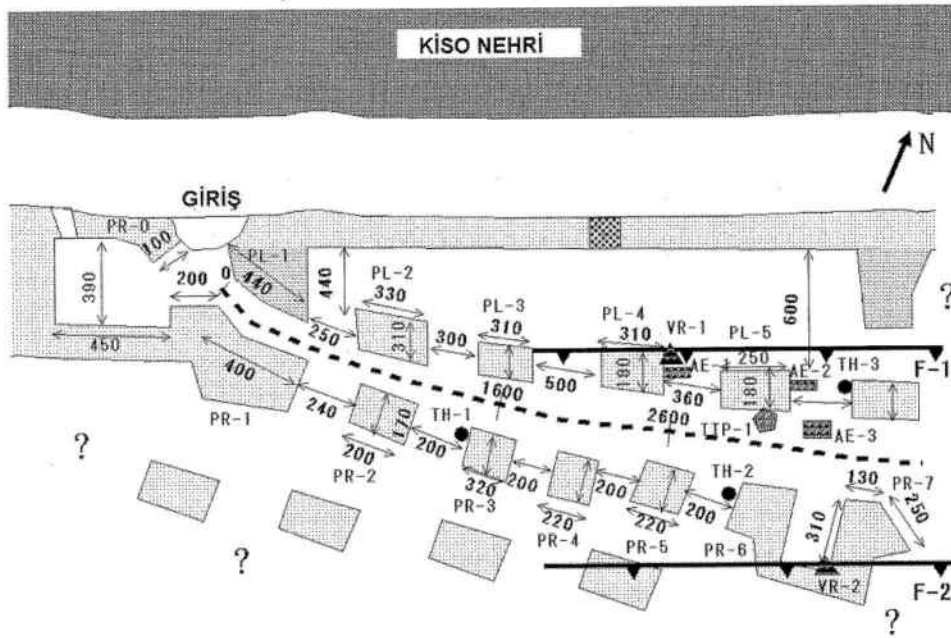
Şekil 1. Tokai bölgesinde bulunan linyit sahaları.
Figure 1. Lignite deposits in Tokai Region.

3. MADEN GEOMETRİSİ

Linyit ocağı Kiso nehrinin aktığı vadinin doğusunda yer almaktadır (Aydan vd., 2005a ve 2005b). İki damarda oda-topuk üretim yönteminin uygulandığı madende topuk boyutları yaklaşık 2x2 m olup damar kalınlıkları 1.8-2 m arasında değişmektedir (Şekil 2). Örtü kalınlığı yaklaşık 10-12 m arasında değişmektedir. İncelenen ocağın krokisi Şekil 3'te gösterilmiştir. Üretim yapılan damarın 16-18 m altındaki linyit damarına ilişkin üretim faaliyeti konusunda kesin bir bilgi bulunmamaktadır.



Şekil 2. Jeolojik kesit.
Figure 2. Geologic cross-section.



Şekil 3. Ocağın krokisi.
Figure 3. Mine sketch.

4. KAYA MALZEMESİNİN VE LİNYİTİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Kaya malzemesinin ve linyitin fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla terkedilmiş madenden örnekler alınmıştır. Alınan örnekler üzerinde kısa süreli tek eksenli basınç dayanımı ve deformabilite deneylerinin yanı sıra, krip (sünme) deneyleri yapılmıştır (Şekil 4 ve 5). Deneyler sırasında yük ve yerdeğiştirme miktarlarının ölçümüyle birlikte akustik emisyon (AE), elektrik potansiyel (EP), elektrik direnci ve manyetik alan değişimi gibi ek ölçümler de yapılmıştır. Bu tür çok parametrelili ölçümlerinin yeraltı açıklıklarının davranışının yerinde izlenmesi açısından da büyük bir önemi bulunmaktadır (Aydan vd., 2005b). Ayrıca, dayanımı düşük olan kayanın ve linyitin dayanımlarının tahmin edilmesinde kullanılan kaya iğnesi deneyi de linyitte uygulanmıştır. Kayaçların içsel sürtünme açıları, tek eksenli basınç ve dolaylı çekme dayanımlarından hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 1’de sunulmuştur.

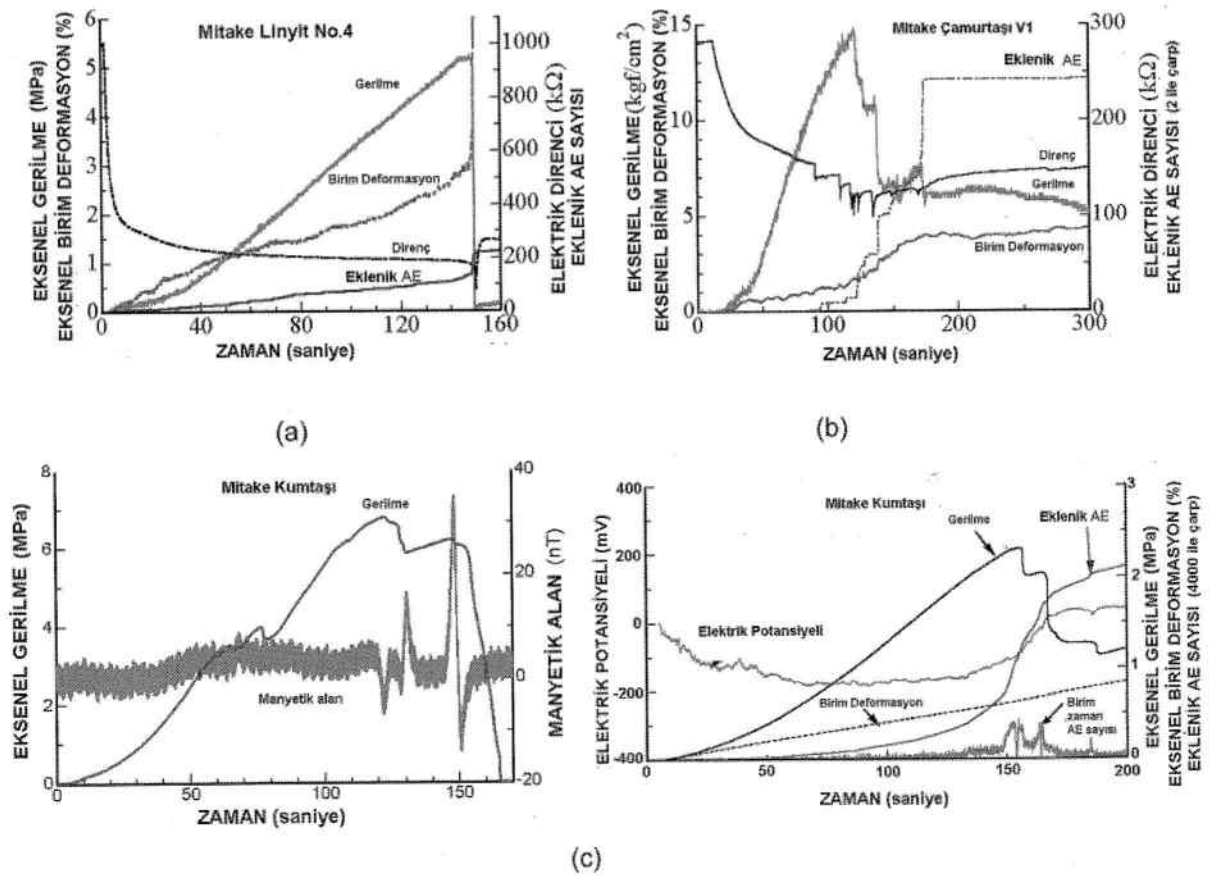
Çizelge 1. Kaya malzemesinin kısa süreli mekanik ve fiziksel özellikleri.
Table 1. Short-term mechanical and physical properties of rock material.

Birim	Birim hacim ağırlık (kN/m ³)	Su içeriği (%)	Kaya iğnesi batma direnci (N/mm)	P-dalga hızı (km/s)	Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (MPa)	İçsel sürtünme açısı (derece)
Linyit	10.6-14.4	12.6-27.2	22-33	1.6-2.2	4.0-6.0	0.4-0.7	557-983	53-63
Kumtaşı	16.8-19.2	15.4-19.8	20-71	1.9-2.6	2.3-6.5	0.06-0.4	257-1219	53-63
Çamurtaşı	14.2-14.9	9.5-13.3	2-22	1.3-1.5	1.0-1.5	0.05	76-141	29

Terkedilmiş madenlerin uzun süreli duraylılığını etkileyen parametrelerden birisi krip özelliğidir. Bu amaçla Mitake kayaçları üzerine krip deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sırasında eksenel birim deformasyon, eksenel yükün yanı sıra elektrik potansiyel ve akustik emisyon ölçümleri de yapılmıştır (Şekil 5). Kayaların uzun süreli dayanımı (σ_{cl}) ile kısa süreli dayanımları (σ_{cs}) oranlanarak kırılma zamanı için Aydan ve Nawrocki (1996) aşağıdaki verilen bir ilişkiyi önermişlerdir.

$$\frac{\sigma_{cl}}{\sigma_{cs}} = 1 - b \ln \left(\frac{t}{t_s} \right) \quad (1)$$

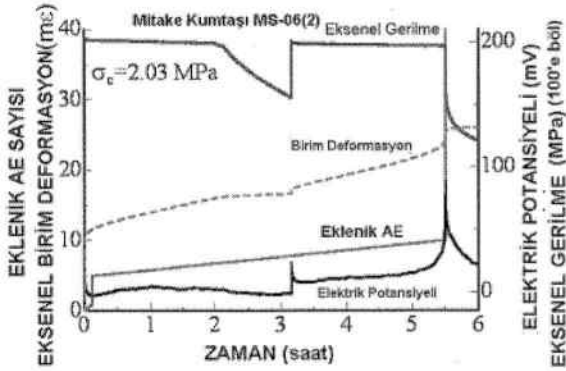
Burada; t zamanı ve t_s ise kısa süreli deney zamanını göstermektedir. 1 No.lu eşitlikteki b katsayısı Mitake kayaçları için 0.0397 olarak belirlenmiştir (Şekil 6).



Şekil 4. Mitake linyit ocağı çevre kayaçlarının çok parametrelili davranışı: (a) linyit, (b) çamurtaşı-kiltaşı, (c) kumtaşı.

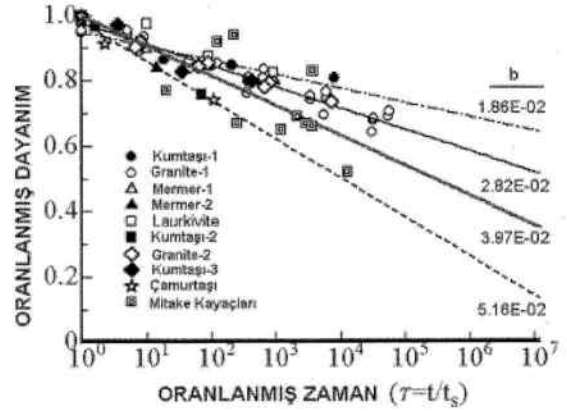
Figure 4. Multi parameter response of the surrounding rocks at Mitake lignite mine: (a) lignite, (b) mudstone-claystone, (c) sandstone.

Zayıf kayalar su emme ve kaybetme özelliğine sahip mineralleri içeriyorsa zamanla bozunmaktadır. Ayrıca kayacın mekanik özellikleri kuruma-ıslanma çevrim sayısına göre azalmakla birlikte, su içeriği de büyük önem taşımaktadır. Mitake linyit ocağındaki kayaçların kuruma-ıslanma çevrim sayısına göre bozunmasına birkaç örnek Şekil 7'de verilmiştir. Bozunmanın derecesi çevresel koşullara bağlı olup, ocak girişlerinde ve hava akımının hızlı olduğu yerlerde oldukça etkili olmaktadır. Ter-



Şekil 5. Mitake kumtaşı üzerinde yapılan bir krip deney davranışı.

Figure 5. Creep behaviour of Mitake sandstone.

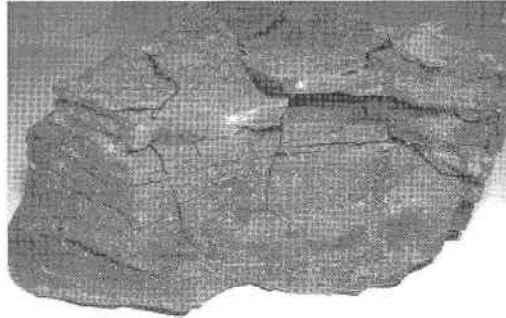


Şekil 6. Kayaların uzun süreli dayanımı ile kırılma zamanı arasındaki ilişki.

Figure 6. Relation between normalized long-term strength and failure time of the rocks.



(a)



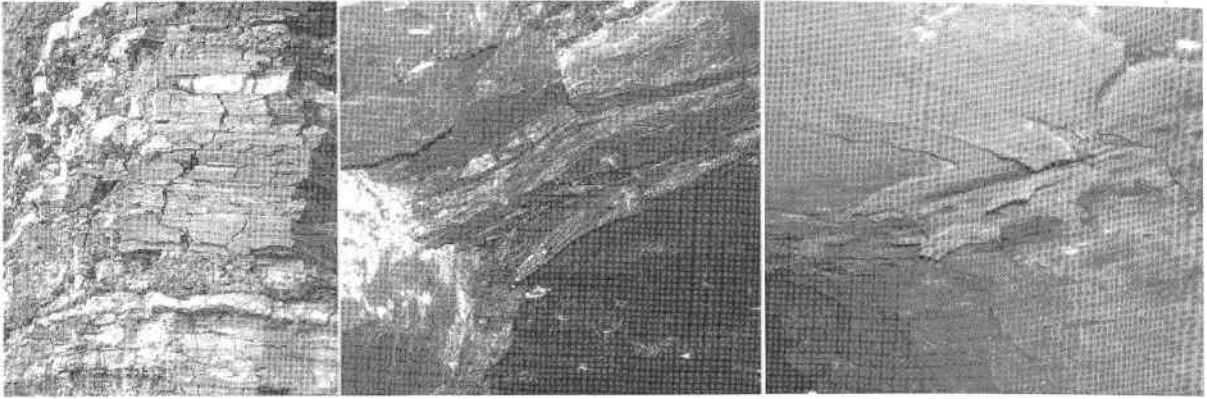
(b)

Şekil 7. Mitake linyit ocağı çevre kayaçlarının kuruma-ıslanmaya bağlı dağılması: (a) çamurtaşı, (b) linyit.

Figure 7. Degradation of rocks of Mitake due to cyclic wetting and drying: (a) mudstone, (b) lignite.

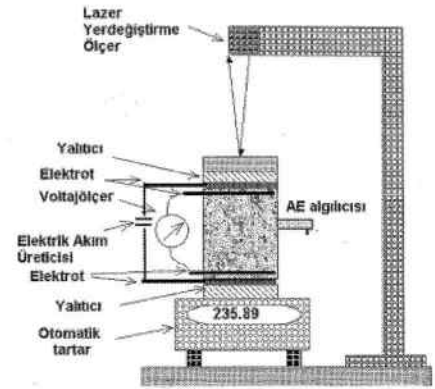
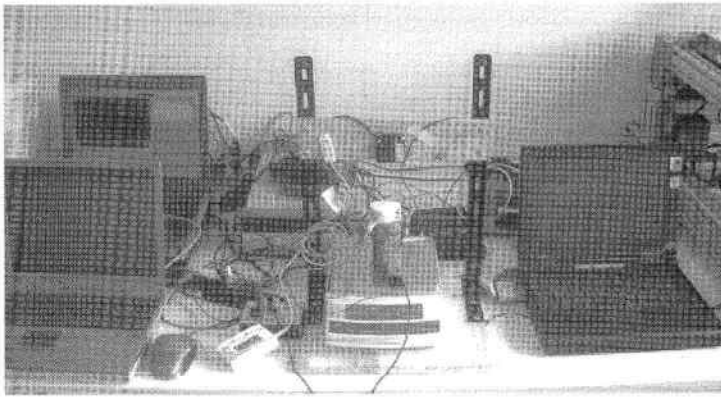
kedilmiş Mitake linyit ocağında görülen kuruma-ıslanma çevrimlerine bağlı birkaç bozunma örneği Şekil 8'de gösterilmiştir.

Kuruma-ıslanma çevrimine bağlı olarak meydana gelen olgunun mekanizmasını incelemek üzere ıslanma-kuruma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sırasında kaya örneğinin su içeriği, elektrik potansiyel veya elektrik direnci, akustik emisyon oluşumu ve hacimsel değişimler zamana bağlı olarak ölçülmüştür. Su içeriği suya doymuş kaya örneğinin kuruma sırasındaki ağırlık değişiminden hesaplanmıştır. Elektrik direnci, kayaç içindeki su içeriğini dolaylı olarak belirlemek amacıyla ölçülmüştür. Kayaç örneğinde kuruma sırasında çatlak oluşumunu izlemek amacıyla hem akustik emisyon, hem de elektrik potansiyel ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlerin beraberinde deney odasının sıcaklığı ve nemi de ölçülmüştür. Tipik bir deney düzeneği Şekil 9'da sunulmuş, kumtaşı örneği üzerinde yapılan deney sonuçları ise Şekil 10'da verilmiştir. Bu deneyde örnekte deney başlangıcından yaklaşık 3 saat sonra akustik emisyon oluşmakta olup, 10-12 saat sonra akustik emisyon oluşumu doruk noktasına ulaşmaktadır. Bu zaman, kuruma hızının en yüksek olduğu zamana karşılık gelmektedir. Örnek içerdiği suyunu kaybetmekte ve buna bağlı olarak hacimsel büzülme meydana gelmektedir. Bu olguya bağlı olarak kaya malzemesinde gelişen çekme gerilmelerinin kayacın çekme dayanımını aşması durumunda kaya malzemesinde çatlak meydana gelmektedir.



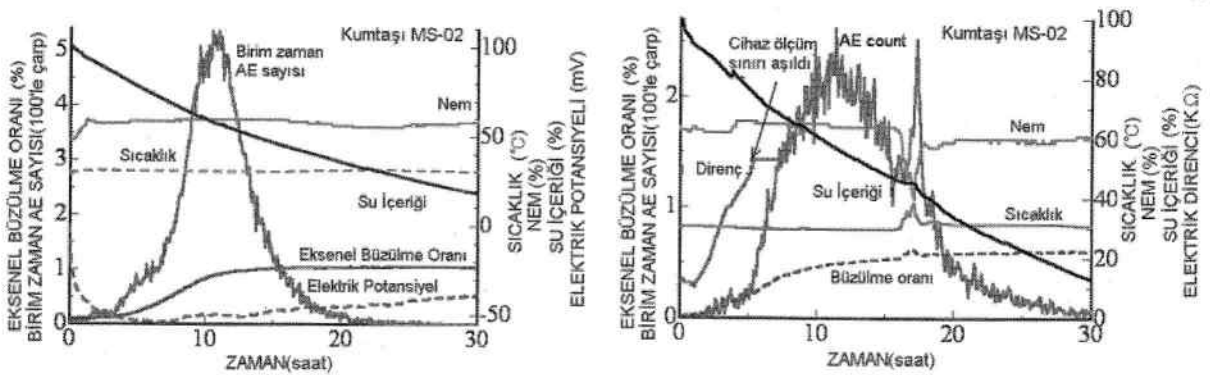
Şekil 8. Terkedilmiş ocakta görülen kuruma-ıslanmaya bağlı bozunma ve kavraklanma.

Figure 8. Spalling in abandoned mine due to degradation of rocks as a result of cyclic wetting and drying.



Şekil 9. Kuruma-ıslanma deney düzeneği.

Figure 9. Wetting-drying experimental set-up.



Şekil 10. Mitake kumtaşı MS-02 no.lu örneğin kuruma sırasındaki davranışı.

Figure 10. Response of the Mitake sandstone numbered MS-02 during drying process.

5. KAYA KÜTLESİNİN ÖZELLİKLERİ

Kaya tabakaları genellikle GD'ya doğru düşük bir eğime sahiptir. Tabakalanma eksen KD-GB yönündedir. Madende bulunan linyit damarı yaklaşık 2 m olup, kalınlıkları 5-15 cm olan çamurtaşı ve kumtaşı

bantları içermektedir. Eklemler genellikle tabakalanmaya dik veya dike yakın olup, eklem aralıkları 10 ila 60 cm arasında değişmektedir. Eklem aralıkları çamurtaşı ve kumtaşı içinde daha büyük, linyit damarı içinde ise daha azdır. Ocakta sağ-yanal atıma sahip normal faylar bulunmaktadır. Başlıca normal fayların doğrultusu, ocağın hemen bitişiğindeki vadide akan Kiso Nehri'nin akış yönüne paraleldir. Kaya kütlesi sınıflandırmaları için kaya kütlesi puanı (RMR) (Bieniawski, 1984) ve Q sınıflama sistemleri (Barton vd., 1974) kullanılmıştır. Çevre kayası olağan kaya kütlesi ve fay zonu olarak iki ayrı kütle olarak sınıflandırılmış ve sonuçlar Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Kaya kütlesi sınıflama sistemi puanları.

Table 2. Rating values of rock mass according to classification systems.

Kaya kütlesi	Temel RMR	Q
Çevre kaya	37-53 (45)	2.08-2.5
Fay zonu	26-29	0.83-1.00

Kaya kütlesinin dayanım ve deformasyon modülü, değişik yöntemlere göre kaya kütlesi puanına dayalı görgül bağıntılar kullanılarak tahmin edilmiştir. Kaya kütlesinin tek eksenli basınç dayanımının (σ_{cm}) kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımına (σ_{ci}) oranı ile Çizelge 3'te kaya kütlesinin elastisite modülünün (E_m) kaya malzemesinin elastisite modülüne (E_i) oranı sırasıyla Çizelge 3 ve 4'te verilmiştir. Çizelge 3 ve 4'ten görüleceği üzere, diğer araştırmacılar tarafından önerilen eşitliklere göre Hoek ve Brown (1980,1988, 2000) tarafından önerilen eşitlikler kullanıldığında, genellikle kaya kütlesi dayanımı küçük, elastisite modülü ise çok yüksek olarak tahmin edilmektedir. Yazarlar, daha önce de ilk yazar tarafından belirtildiği gibi (Aydan vd., 1997; Aydan ve Kawamoto, 2000; Aydan ve Ulusay 2003) Hoek ve Brown (1980,1988) tarafından önerilen yaklaşımın geçerliliğinin oldukça tartışmalı olduğunu burada bir kez daha vurgularlar. Bu konu ocağın duraylılık konusu işlenirken tekrar ele alınmıştır.

Çizelge 3. Kaya kütlesinin dayanımının kaya malzemesi dayanımına oranı ($\sigma_{cm} / \sigma_{ci}$).

Table 3. Normalized rock mass strength by intact rock strength ($\sigma_{cm} / \sigma_{ci}$).

Yöntem	Çevre kaya	Fay zonu
Aydan-Kawamoto (2000)	0.09 - 0.16	0.060
Hoek-Brown (1988-2000)	0.03-0.07	0.016
Kalamaris-Bieniawski (1995)	0.12-0.21	0.085
Elastik dalga hızı (V_{pm} / V_{pi}) ^{2*}	0.44 - 0.83	-

* V_{pm} : kaya kütlesi P dalga hızı

V_{pi} : kaya malzemesi P dalga hızı

Çizelge 4. Tahmin edilen kaya kütlesinin oranlanmış elastisite modülü (E_m / E_i).

Table 4. Estimated normalized elastic modulus of rock mass (E_m / E_i).

Yöntem	Çevre Kaya	Fay zonu
Aydan-Kawamoto (2000)	0.09 - 0.16	0.06
Hoek (2000)	0.94-5.94	2.98 - 5.94
Elastik dalga hızı (V_{pm} / V_{pi}) ²	0.44 - 0.83	-

6. BİRİNCİL GERİLME DURUMU

Çalışma sahasında günümüze değin yapılmış herhangi bir gerilme ölçümü bulunmamaktadır. Kiso Nehri'nin akış yönüne paralel doğrultulu ana faylardaki çiziklerden Aydan (2000) tarafından önerilen yöntem kullanılarak birincil gerilme durumu tahmin edilmiştir (Çizelge 5). Yatay düzlemdeki en büyük asal birincil gerilmenin yaklaşık D-B doğrultusunda ve Kiso Nehri'nin akış yönüne paralel konumlu olduğu belirlenmiştir. Düşey birincil gerilme ise en büyük bileşen olup, yatay en küçük bileşen madenin bulunduğu yamaca ve nehrin akış yönüne dik konumludur. Elde edilen bu sonuçlar, Japonya'da yaklaşık 100 yıldır ölçülen birim deformasyon miktarları kullanılarak hesaplanan asal birim deformasyon doğrultuları ile oldukça uyumludur (Şekil 11).

Çizelge 5. Tahmin edilen birincil gerilme bileşenleri.

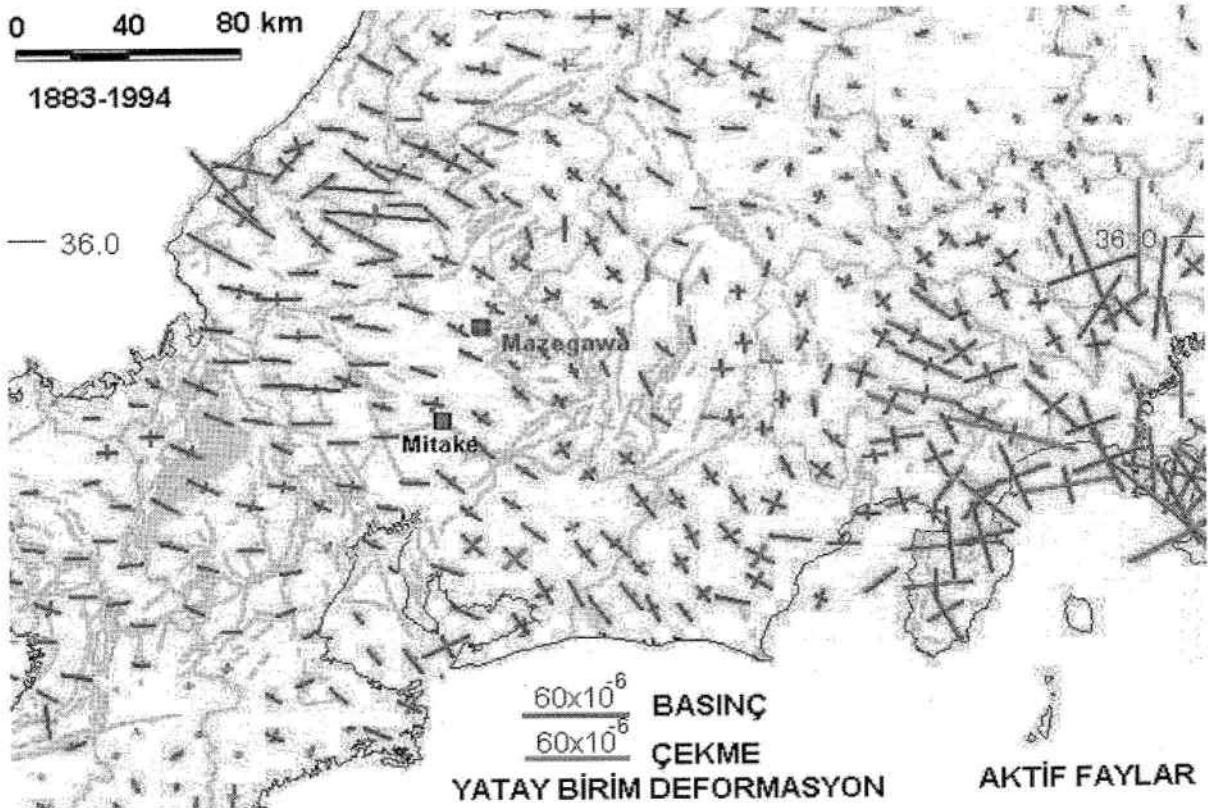
Table 5. Estimated in-situ stress components.

P_1			P_2			P_3			$\frac{P_h}{P_v}$	$\frac{P_H}{P_v}$	α_{P_H}
$\frac{P_1}{P_v}$	θ_1	ϕ_1	$\frac{P_2}{P_v}$	θ_2	ϕ_2	$\frac{P_3}{P_v}$	θ_3	ϕ_3			
1.007	82.5	81.3	0.694	265	8.7	0.336	175.0	0.4	0.336	0.701	84.93

P_1, P_2, P_3 : Asal birincil gerilme bileşenleri; θ , kuzeyle yapılan açı; ϕ , eğim açısı;

P_h : en küçük yatay gerilme; P_H : en büyük yatay gerilme; P_v : düşey birincil gerilme;

α_{P_H} : en büyük yatay gerilmenin kuzeyle yaptığı açı



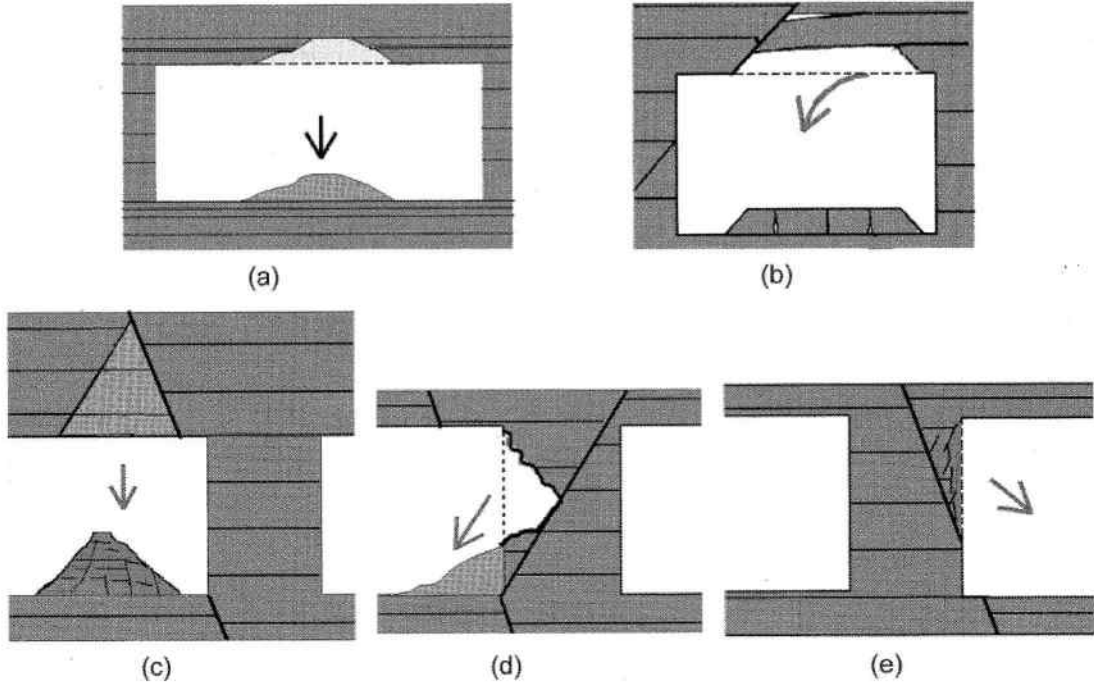
Şekil 11. Yatay asal birim deformasyonlar ve doğrultuları.

Figure 11. Horizontal principal strains and their directions.

7. OCAK İÇİNDE GÖZLENEN YEREL DURAYSIZLIKLAR

Terkedilmiş oda-topuk yöntemi ile çalışılmış ocakların toptan göçme olgusu meydana gelmeden ocak içinde değişik yenilme türleri söz konusudur. Yazarların incelediği ocaklarda gözlenen yerel duraysızlıklar kısaca aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

- Tavan tabakaların eğilme duraysızlığı (Şekil 12a,b),
- Tavandan blok düşmesi (Şekil 12c),
- Topuktaki süreksizliklere bağlı blok kayması (Şekil 12d) ve
- Topukların aşırı yük altında kavlaklanmasıdır (Şekil 12e).



Şekil 12. Terkedilmiş oda-topuk ocağında gözlenen yerel duraysızlıklar.

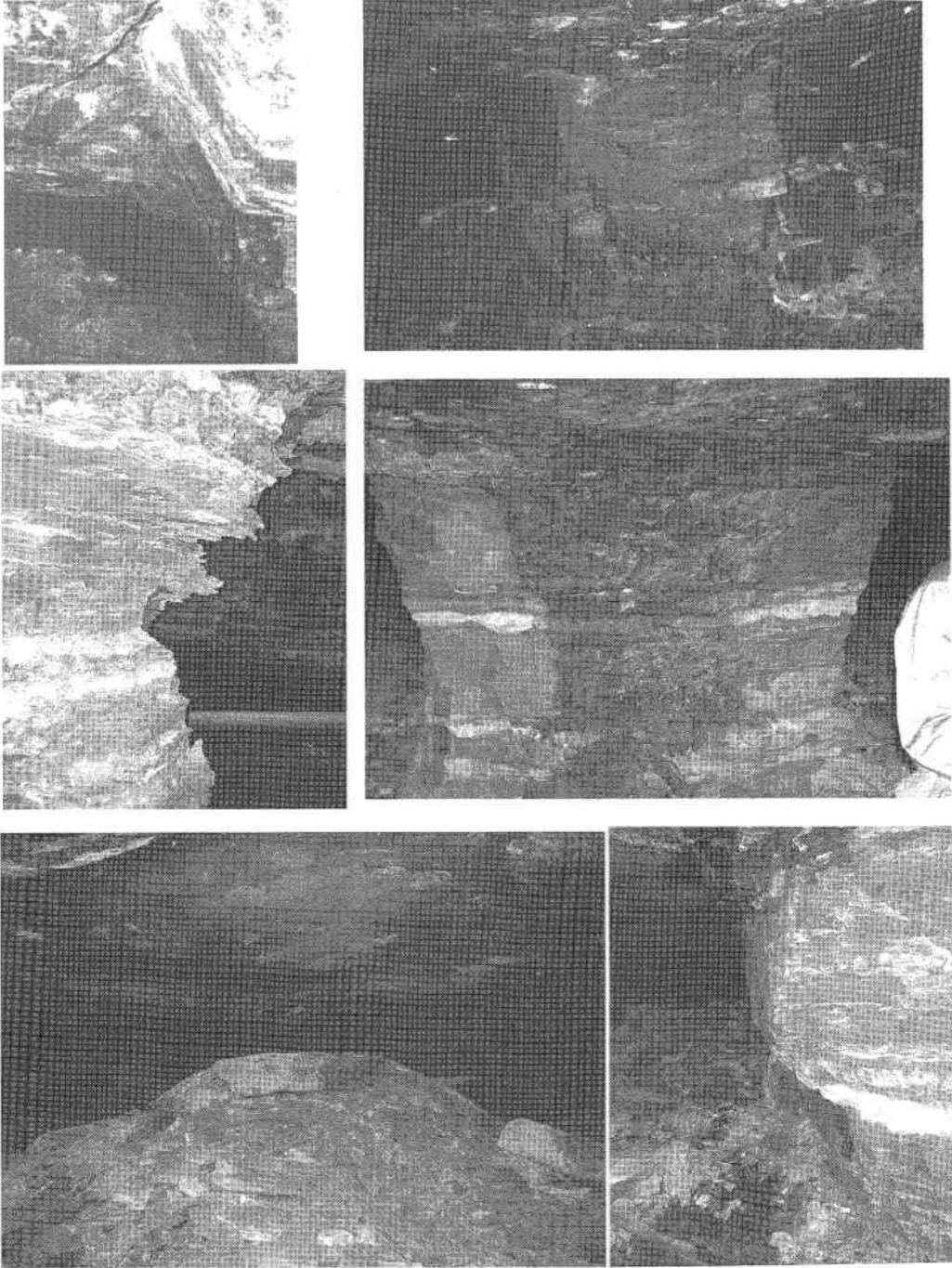
Figure 12. Local instability modes observed at the abandoned room and pillar mine.

Yukarıdaki sözü edilen duraysızlıklarla ilgili fotoğraflar Şekil 13'te gösterilmiştir. Ocak içerisinde oluşan duraysızlıklarda kayacın su içeriği oldukça etkili olmaktadır. Önce hava ile temasta olan yüzeylere yakın bölgelerde çevre kayacı su içeriğini kaybetmekte ve buna bağlı olarak büzülme çatlakları oluşmakta veya daha da gelişmektedir. Yağışlı mevsime girildiğinde kayacın su içeriğinin artmasıyla hem elastisite modülü, hem de dayanımı azalmaktadır. Bu nedenle topuklarda yüzeysel dökülmeler ve tavandan blok düşmeleri oluşmaktadır. Bu davranış, kendini tekrarlayarak topukların ve tavanın giderek incelmeye neden olmaktadır. Sonuçta bu incelmeler belirli bir değere ulaştığında ise, ocakta toptan göçme meydana gelmektedir.

8. ARAZİ GÖZLEM VE ÖLÇÜMLERİ

Kaya kütlelerinin zamana bağlı davranış özelliklerini etkileyen bazı faktörlerin (sıcaklık ve nem değişimleri gibi) belirlenmesi için yerinde ölçümler yapılmaktadır. Kayanın uzun süreli davranışı ve bozunması

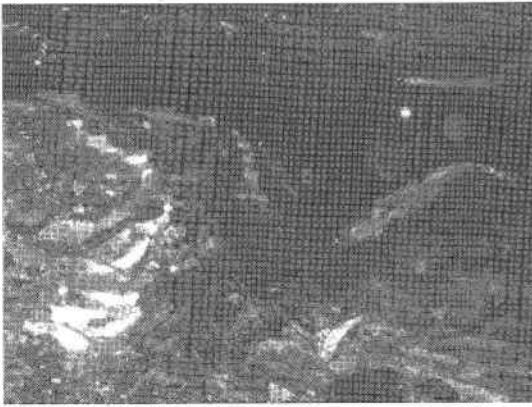
ile depremler sırasında kaya kütlesinde oluşabilecek ek yük ve yenilmeler, ocağın duraylığını olumsuz yönde etkileyebilecek en önemli olgulardır. Laboratuvar koşullarında kırılma öncesi görülen olguların benzerinin ocak içindeki duraysızlıkların oluşumundan önce görülme olasılığını incelemek için topuklara ve tavana yerleştirilen akustik emisyon ve yerin elektrik potansiyel değişimini ölçen cihazlardan sürekli kayıt alınmaktadır.



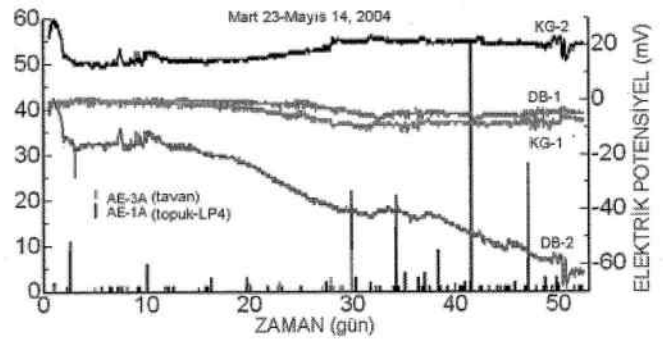
Şekil 13. Ocak içinde gözlenen gerçek yerel duraysızlıklara örnekler.

Figure 13. Examples of observed local instability modes at the mine.

Çevre kayasının elektrik potansiyel (EP) ve akustik emisyon (AE) değişimleri tavana ve topuklara yerleştirilen cihazlardan elde edilmiştir. LP4 topuğuna (Şekil 3) yerleştirilen AE ve EP cihazlarının ölçtüğü bulgular ile 23 Mart – 14 Mayıs 2004 tarihleri arasındaki bir dönemde meydana gelen tavan göçmesi ile ilişkisi burada sunulmuştur (Şekil 14). Tavan göçmesi LP4—LP5—RP4—RP5 topukları arasındaki bir bölgede kalınlığı 200 mm olan kilitaşı meydana gelmiştir. Söz konusu tavan göçmesinden çok önce yerin elektrik potansiyelindeki değişim, akustik emisyon değişiminden çok daha önce başlamaktadır (Şekil 15). Bu durum laboratuvarında yapılan kaya malzemesi örnekleri üzerinde elde edilen bulgular ile benzerlik göstermektedir (Aydan vd., 2001, 2003 ve 2005c). Bir diğer önemli husus da, özellikle elektrik potansiyel ölçümleri duraysızlığın meydana geldiği bölgeyi işaret etmektedir. Bu ölçümlerin ayrıntısı Aydan vd. (2005a) tarafından sunulmuştur. Aletsel ölçümlerin yanı sıra, ikişer aylık aralıklarla gözleme dayalı incelemeler de yapılmıştır. Bu incelemeler sırasında topuk ve tavanların durumları fotoğraflanmıştır.



Şekil 14. Tavan göçmesi.
Figure 14. Roof collapse.



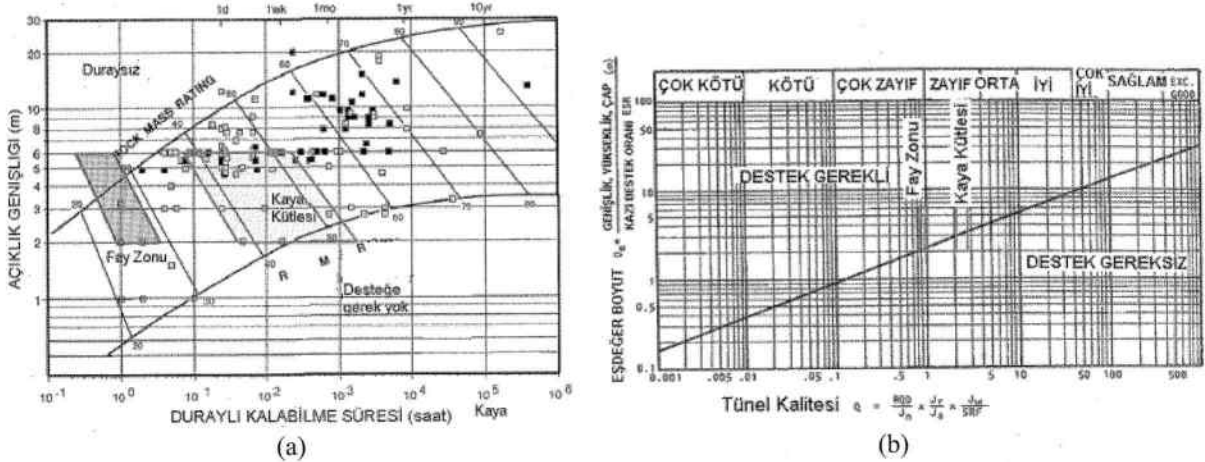
Şekil 15. 23 Mart-14 Mayıs 2004 tarihleri arasında ölçülen elektrik potansiyel ve akustik emisyon değişimleri.
Figure 15. Variations of electrical potential and acoustic emission between March, 23 and May 14, 2004.

9. DURAYLILIK ANALİZLERİ

9.1. Kaya Kütlesi Sınıflama Sistemlerini Esas Alan Duraylılık Değerlendirmeleri

Kaya mekaniği alanında tahkimat sistemlerinin ön tasarımlarında kullanılabilecek kazının desteksiz (tahkimatsız) duraylı kalma süresinin belirlenmesinde kaya kütlesi sınıflamalarından yaygın şekilde yararlanılmaktadır. Bu çalışmada kaya kütlesi puanlama sistemi (RMR) (Bieniawski, 1984) ve Tünelcilik Niteliği İndeksi (Q) (Barton vd., 1974) sistemlerine göre yapılan değerlendirmeler sunulmuş olup, kaya kütlesinin değerlendirme puanları Çizelge 2’de verilmiştir. Yazarların incelediği kısımda açıklığın genişliği 2-6 m arasında değişmektedir. Bieniawski (1984) ve Barton (1995) tarafından önerilen açıklık genişliği ile desteksiz kalabilme süresi ile ilgili şekillere söz konusu linyit ocağının verilerinin işlenmiş hali Şekil 16’da gösterilmiştir. RMR sistemine göre yapılan değerlendirmede ocağın yıllar önce yenilmesi öngörülmektedir. Söz konusu ocakta tavandan kısmi göçmeler ve topuklarda bazı yenilmeler gözlenmekle birlikte, bu ocaklar en az 40 senedir duraylılıklarını genel olarak korumaktadırlar. Dolayısıyla RMR sisteminin oldukça tutucu olduğu söylenebilir. Diğer yandan, Q sistemi kullanıldığında daha gerçekçi değerler elde edildiği söylenebilir.

Q sistemine göre gerekli destek sistemi hafif olup, bu sistemin küçük ölçekte blok düşmesi veya kaymasına karşı gerekli olduğu şeklinde yorumlanabilir. Benzer görüşler Mısır'da bulunan III. Amenophis kaya mezarı, Kapadokya'daki değişik türdeki yeraltı yerleşimleri ile Kuşini yeraltı mermer ocağı için daha önceki çalışmalarda belirtilmiştir (Aydan vd., 1999a; Aydan ve Geniş, 2004; Aydan ve Kumsar, 2005).



Şekil 16. Açıklık genişliği ile duraylı kalabilme süresinin karşılaştırılması: (a) RMR sınıflama sistemi, (b) Q sınıflama sistemi.

Figure 16. Comparison of opening width and stand-up time: (a) RMR classification system, (b) Q classification system.

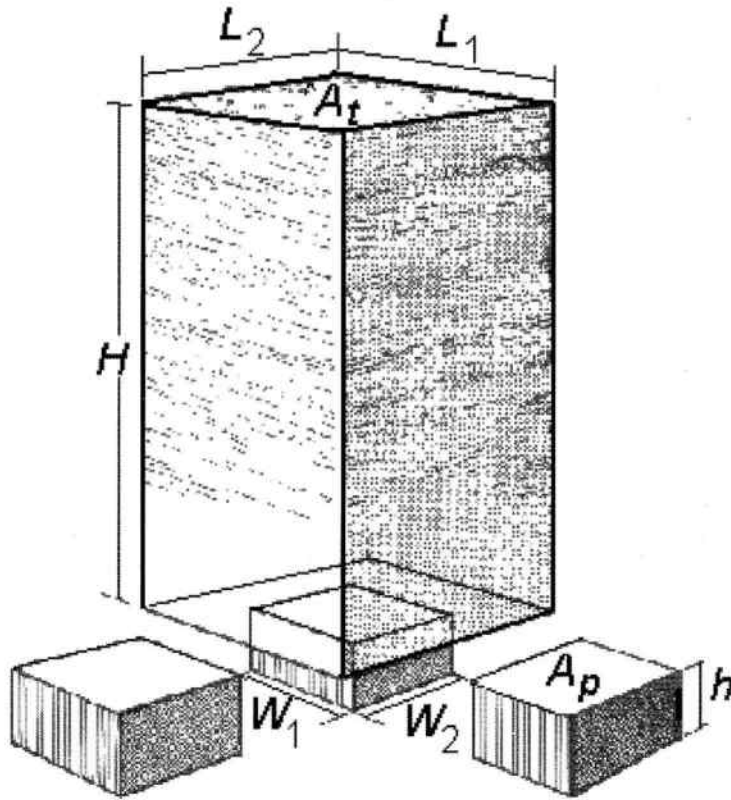
9.2. Topukların Kuramsal Duraylılık Analizi

Oda-topuk ocaklarının tasarımında, çok basit olmakla birlikte, eş yüklü alanlar (tributary area) yaklaşımı çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Örnek bir topuğa yüklerin Şekil 17'de gösterildiği gibi etki ettiği düşünüldüğünde, geometrik olarak topuğa etkiyen eksenel gerilme, σ_p aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\sigma_p = \rho g H \frac{A_t}{A_p} \text{ veya } \sigma_p = P_v \frac{A_t}{A_p} \quad (2)$$

Burada; ρ kaya kütlelerinin yoğunluğu, g yerçekimi ivmesi, H örtü kalınlığı, A_t : topuğun taşıdığı alan, A_p topuk alanı ve düşey birincil gerilme ise, $P_v = \rho g H$ 'dir.

Yazarların incelediği ocağın topuğu linyit olup, tek eksenli basınç dayanımı 4 ile 6 MPa arasında değişmektedir. Ocak derinliği 12.5 m ve topukların ortalama boyutları 2 x 2 m dolaylarındadır. Topuğun taşıdığı alanın topuk alanına oranı 4 ile 6 arasındadır. Bu durumda tipik bir topuğa etkiyen ortalama eksenel basınç gerilmesi 1-1.5 MPa olacaktır. Topukta oluşan gerilme ile kaya kütle dayanımları göz önünde bulundurulduğunda, elastik dalga hızından hesaplanan kaya kütle dayanımı dışında, diğer yöntemlerden tahmin edilen kütle dayanımı topukta oluşan gerilmeden daha küçük olarak elde edilmiştir. Bu durumda kazı sırasında bile topukların yenilmesi gerekmektedir. Söz konusu ocak en az 40-60 yıl geçmesine rağmen ve yerel bazı duraysızlıklar gözlemlense bile halen genel olarak duraylıdır. Bu fiziksel gerçek düşünüldüğünde, kaya mekaniğinde yaygın şekilde kullanılan kaya kütle dayanım yaklaşımlarının geçerliliği konusunda gözlemlere dayalı uyumsuzluklar oluşmaktadır. Daha gerçekçi bir yaklaşım için kaya kütlelerinin dayanımından çok, kaya malzemesinin dayanımının kullanılmasının gerektiği ortaya çıkmaktadır.



Şekil 17. Topuğun duraylılık analiz modeli (Whittaker ve Reddish (1989)'den değiştirilerek).

Figure 17. Geometrical model for stability analysis of pillar (modified from Whittaker and Reddish (1989)).

9.3. Bozunmanın Etkisi

Daha önceki bölümlerde değinildiği gibi, su içeriğine sahip kayalardan oluşan topuklarda yüzeyden belirli bir derinliğe kadar her bir kuruma-ıslanma çevrimine bağlı olarak dökülmeler oluşmaktadır. Bu davranış, sonuçta giderek topuğun taşıyıcı alanın azalmasına neden olacaktır. Dolayısıyla topuğa etkiyen oranlanmış eksenel gerilme değişimi aşağıdaki gibi yazılabilir (Aydan, 2005a).

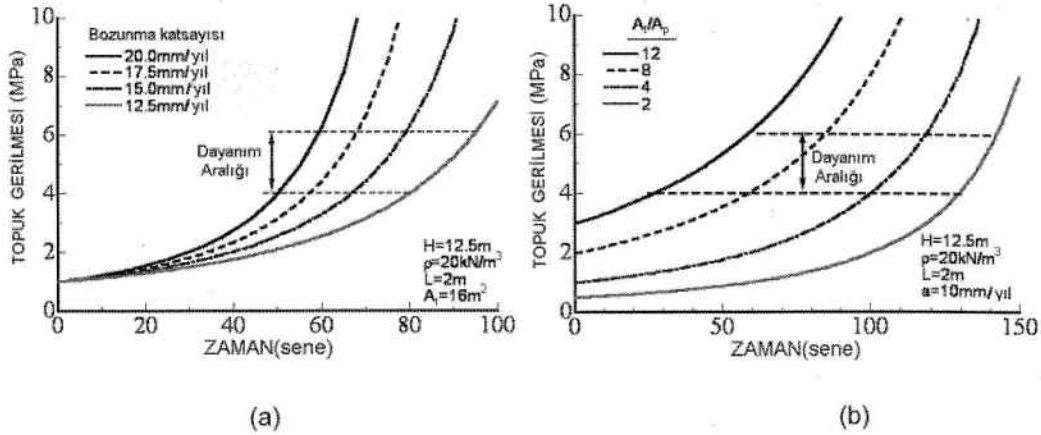
$$\frac{\sigma_p}{\sigma_{p0}} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta L \times (L_{10} + L_{20})}{A_{p0}} + \frac{\Delta L^2}{A_{p0}}} \quad (3)$$

Burada; σ_p bozunma oluştuktan sonra topuğa etkiyen gerilme, σ_{p0} bozunma başlamadan topuğa etkiyen gerilme, L_{10} , L_{20} bozunma oluşmadan önce topuğun taşıdığı alanın ilksel boyutları, A_{p0} ise bozunma oluşmadan önceki topuk alanıdır. Topuğun her bir kuruma-ıslanma çevrimine bağlı olarak bozunup dökülmesi değişik fonksiyonlar kullanılarak belirlenebilir. Aydan vd. (2005a) tarafından topuğun bozunarak yüzeyden belirli bir derinliğe kadar olan dökülme miktarını belirlemek için aşağıdaki verilen doğrusal bir ilişki önerilmiştir.

$$\Delta L = a \cdot t \quad (4)$$

Burada, a bozunma hızı (katsayısı) ve t ise zamandır. Topuk duraylılığında kayacın tek eksenli sıkışma dayanımı 4-6 MPa olarak kullanılırsa, Şekil 18'de görüldüğü gibi, taşınan alanın topuk alanına

olan oranı bozunmaya bağlı olarak artacağı için başlangıç A_i/A_p oranının 4 olması halinde 40-60 sene sonra ocağın göçme tehlikesi ortaya çıkmaktadır.

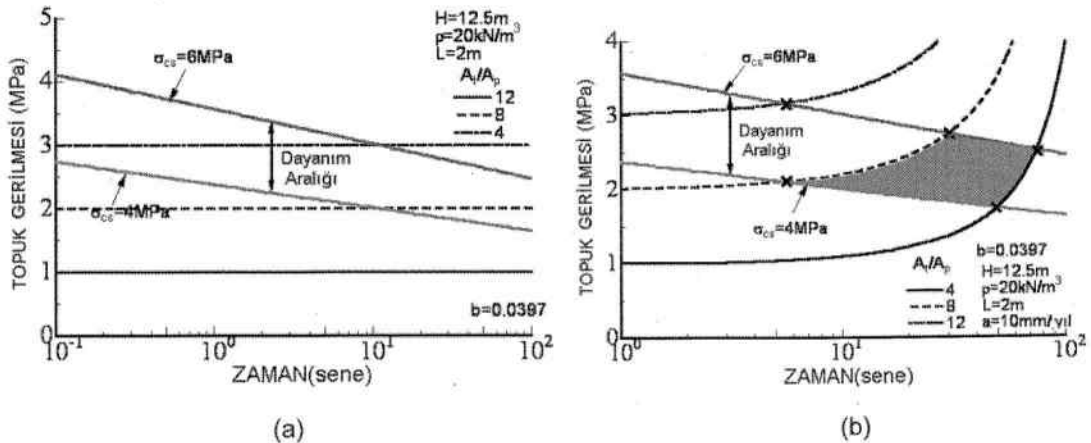


Şekil 18. Bozunmanın topukların yenilme süresine olan etkisi: (a) bozunma hızının etkisi, (b) taşınan alanın topuk alanına oranının etkisi.

Figure 18. Effect of degradation and tributary area on collapse time of pillars: (a) effect of degradation, (b) effect of tributary area.

9.4. Krip Etkisi

4. bölümde sunulduğu gibi, terkedilmiş oda-topuk ocakları için krip yüklemesi geçerli olacağı için uzun süreli dayanım kullanılmalıdır. Şekil 6'da elde edilen katsayılar ($b=0.0397$) kullanıldığında Şekil 19a'da görülen göçük oluşma zamanı belirlenir. Göçük oluşma zamanı, kazı alanı arttıkça kısalmaktadır. Ocağın tamamen su ile dolu olması halinde, suya doygun durum için uzun süreli dayanım ilişkilerinin kullanılması gerekecektir. Böyle bir durumda kayanın tek eksenli basınç dayanımı oldukça azalmakta ve kayaçta oluşacak yenilme süresi de kısalmaktadır.



Şekil 19. Bozunma ve kripin topukların yenilme süresine olan etkisi: (a) sadece kripin etkisi, (b) krip ve bozunmanın etkisi.

Figure 19. Effect of degradation and creep on collapse time of pillars: (a) effect of creep only, (b) effect of creep and degradation.

9.5. Bozunma ve Kripin Ortak Etkisi

Eğer ocak atmosferik değişimlere maruz kalıyor ise, çevre kayacı kripin yanı sıra, bozunmadan da etkilenecektir. Bu koşullarda topukların duraylılıklarını kaybetme süresi kısalmaktadır. Taşıyıcı alan oranı değerine bağlı olarak kısa süreli dayanımın alt sınır değeri kullanılırsa topukların tümüyle yenilmesi 5.6 ile 50 yıl arasında değişecektir. Yenilme süresi dayanımın üst sınırı kullanılması halinde ise 30 ile 75 yıl arasında değişecektir (Şekil 19b).

9.6. Tavanın Kuramsal Duraylılık Analizi

Ocak tavanının duraylılığının analizi için değişik yenilme durumları gözönüne alınabilir. Genelde tavan tabakaları eğilme sonucu çatlak oluştursa bile, toptan göçme çatlak oluşan tabaka içinde kemerlenme olgusuna uygun olarak oluşacaktır. Bunun yanı sıra, makaslama sonucu yenilme mümkün olsa da bu tür yenilmeler oldukça azdır. Kemerlenme olgusuna göre tavan tabakasının üst kısmında oluşan en yüksek basınç gerilmesi aşağıdaki ilişkiden elde edilebilir (Aydan, 1990; Kawamoto vd., 1991):

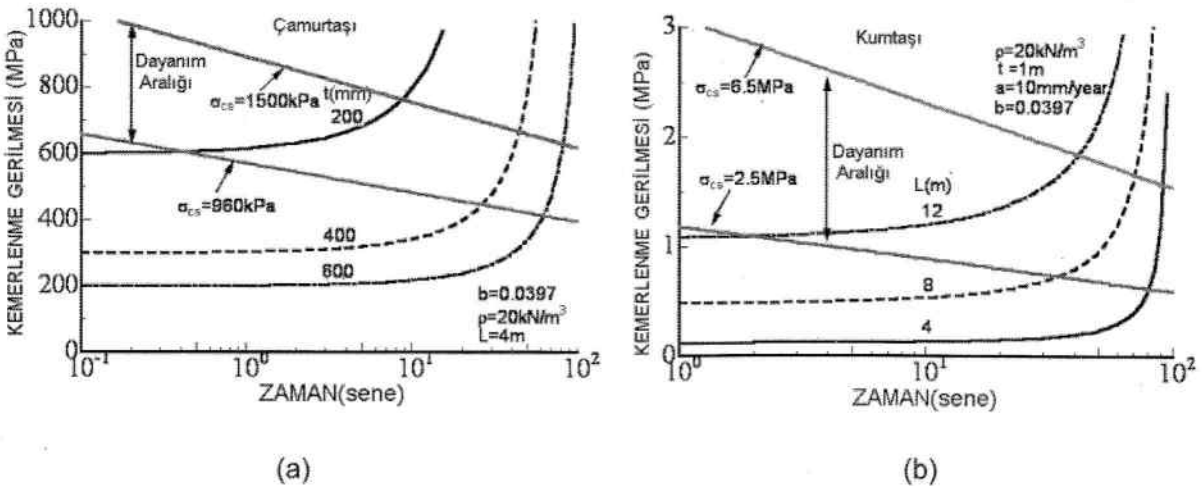
$$\sigma_a = \frac{3}{8} \rho g L \left(\frac{L}{h} \right) \quad (5)$$

Burada; σ_a kemerlenme gerilmesi, L ve h açıklık genişliği ile tabaka kalınlığıdır. (5) no.lu ilişkiden elde edilen gerilme kayacın tek eksenli basınç dayanımını aşarsa tavan göçmesi oluşacaktır.

Topuklarda olduğu gibi, hava ile temasta olan kısmın bozunması ve kripe bağlı uzun süreli dayanım yaklaşımı 5 no.lu eşitlikte de kullanılabilir. Tavan tabakasının bozunması durumunda tavan kalınlığının (h) giderek incilmesi modellenenebilir. Bozunmanın 4 no.lu doğrusal ilişkiye göre meydana geldiği varsayılırsa, tavadaki kalınlık değişimi aşağıdaki gibi elde edilecektir:

$$h(t) = h_0 - \alpha t \quad (6)$$

Burada h_0 tavanın ilk durumdaki kalınlığıdır. Bozunmanın bu modele göre geliştiği ve tavanı oluşturan kayacın çamurtaşı ve kumtaşı olması halinde tavanın bozunma ve kripe bağlı göçme zamanı Şekil 20'de gösterilmiştir. Tavanın çamurtaşından oluşması halinde tavanın göçme süresi oldukça azalmaktadır.

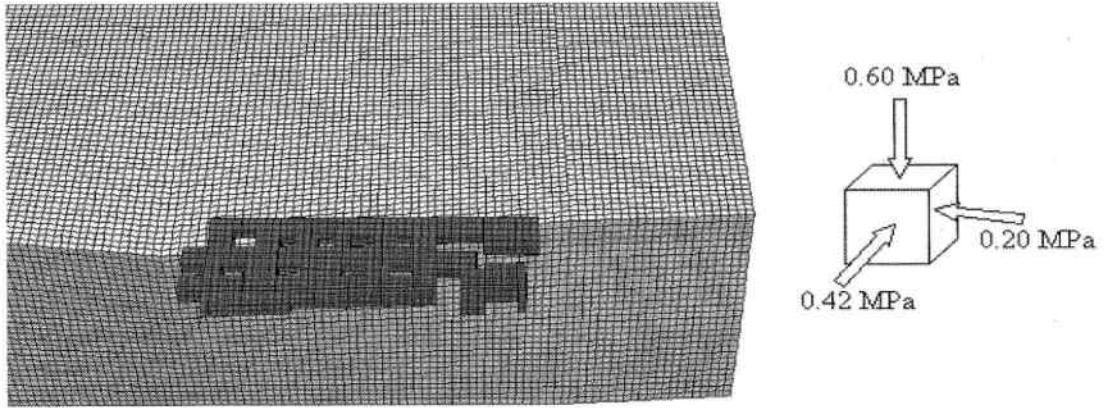


Şekil 20. Bozunma ve kripin tavanın yenilme süresine olan etkisi: (a) çamurtaşı, (b) kumtaşı.

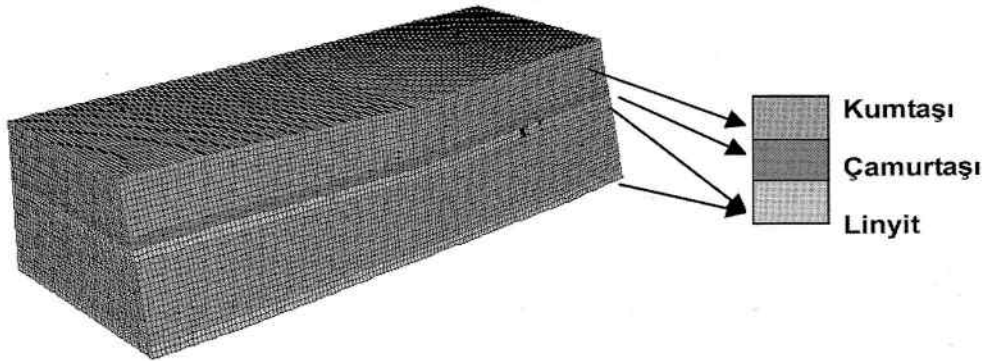
Figure 20. Effect of degradation and creep on collapse time of roof: (a) mudstone, (b) sandstone.

9.7. Üç Boyutlu Sayısal Duraylılık Analizleri

Bu bölümde açıklıkların statik yükleme koşullarında gösterecekleri davranışlar sayısal gerilme çözümlemesi kullanılarak ayrı ayrı incelenmiş ve çözümlemede sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır (Itasca, 2005). Kaya kütlelerinin dayanımı ve deformasyon özellikleri için Aydan ve Kawamoto (2000) tarafından önerilen görgül yöntemden elde edilen değerlerin ortalaması çözümlemelerde girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Kaya kütlelerinin elastik kusursuz-plastik davranış gösterdiği varsayılmıştır. Böyle bir durumda açıklık çevresinde oluşan plastik bölge elastik bölge ile sınırlanırsa çözülen denklem sisteminden duraylı çözüm elde edilecektir. Başka bir ifadeyle, açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi yüzeye kadar ulaşmayacaktır. Sonlu farklar ağı Şekil 21’de verilmiştir. Şekil 2’de verilen jeolojik yapıya uygun tabakalar tanımlanmış ve bu tanımlamaya göre sonlu farklar ağı Şekil 22’de gösterilmiştir.



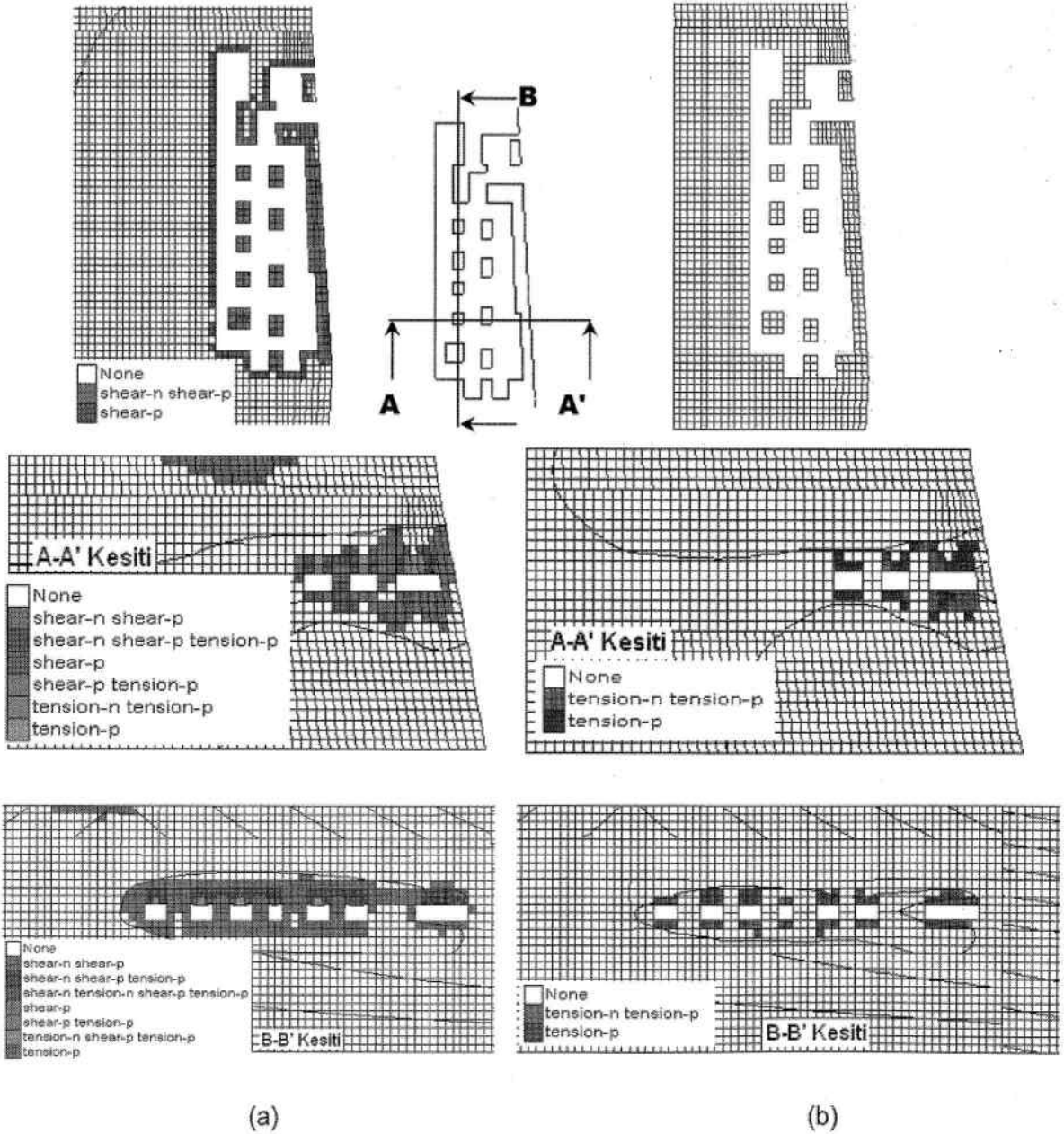
Şekil 21. Sonlu farklar ağı ve birincil gerilme durumu.
Figure 21. Finite difference mesh and in-situ stress state.



Şekil 22. Modelin üç boyutlu görünümü ve çözümlemelerde tanımlanan jeolojik birimler.
Figure 22. A three dimensional view of numerical model of the mine and geologic units.

Çözümlemelerde kaya kütleleri ile kaya malzemesinin dayanım ve deformasyon özellikleri kullanılarak statik çözümlemeler yapılmıştır. Bunun amacı, daha önceki bölümde basit yöntemler kullanılarak yapılan analizlere göre daha gerçekçi bir modelleme oluşturulması ve hem kaya kütleleri dayanımı hem de kaya malzemesi dayanımları ayrı ayrı kullanılarak yapılan analiz sonuçlarının arazi gözlemleri ile ne kadar uyumlu olduğunun belirlenmesidir.

Kaya kütlelerinin özellikleri kullanılarak yapılan çözümlemede açıklık çevresi ile topukların tümünde yenilme bölgesi oluşmuştur. Oluşan yenilme bölgeleri, damar kalınlığının yaklaşık iki katı olup, makaslama (kayma) şeklinde oluşmaktadır (Şekil 23a). Ayrıca yeryüzünde açıklık etkisiyle oluşan tasmanın sınırı boyunca da yenilme oluşmuştur. Topuklarının tamamının plastik hale gelmesi, gevrek malzeme davranışı gözönüne alınması halinde statik durumda bile ocağın kazı sırasında tamamen göçmesi gerektiğine işaret etmektedir.



Şekil 23. Üç boyutlu sayısal analize göre linyit ocağı çevresinde oluşan yenilme bölgeleri: (a) kaya kütleleri özellikleri yaklaşımı, (b) kaya malzemesi özellikleri yaklaşımı.

Figure 23. Yield zones around the lignite mine estimated from three-dimensional analyses: (a) rock mass properties approach, (b) intact rock properties approach.

Ocakta üretimin sona ermesinden 40 yıl geçmiş olması ve Şekil 13'te gösterildiği gibi tavandan kaya düşmeleri ile topuklarda bazı yenilmeler gözlenmesine rağmen, ocak günümüzde duraylı olarak nitelendirilebilecek bir durumdadır. Buna karşın tahmin edilen kaya kütlesi dayanımı kullanılarak yapılan sayısal çözümlemeler, açıklığın duraylı olarak kalmasının mümkün olmadığı sonucunu göstermektedir. Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi, benzer bulgular Kapadokya'daki yeraltı açıklıkları, Kuşini yeraltı mermer ocağı ile Mısır'daki 3200 yıllık kral mezarlarında yapılan çalışmalarda da elde edilmiştir (Aydan vd., 1999; Aydan ve Geniş, 2004; Aydan ve Kumsar, 2005). Kaya malzemesi dayanım parametreleri kullanılarak yapılan çözümde, yenilme bölgesi sadece açıklığın tavanında ve çekme şeklinde oluşmuştur (Şekil 23b). Bu yenilmelerin arazide sadece tavandan yerel dökülmeler olarak kendini göstereceği düşünülürse, kaya malzemesi özellikleri kullanılarak yapılan çözümün arazi gözlemleri ile uyumlu olduğu, diğer bir ifadeyle daha gerçekçi sonuçlar elde edildiği söylenebilir.

10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yaklaşık 40 yıl önce üretim faaliyeti durdurulmuş olan Japonya'nın Gifu iline bağlı Mitake ilçesindeki bir linyit ocağının uzun süreli duraylılığı incelenmiştir. İncelenen ocak koşulları göz önünde bulundurularak elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- (a) Çok uzun süreli hizmet verecek yeraltı yapılarını çevreleyen kayaçların dayanımlarının tespit edilmesinde çevresel faktörlerin de (nem, bozunma gibi) hesaba katılması ve zamana bağımlı ilişkilerinin elde edilmesi önem taşımaktadır.
- (b) Yeraltı açıklıklarının davranışının ortaya konmasında kayacın mekanik özelliklerinin kestirimi oldukça önemli olup, görgül ilişkilere göre kaya kütlesi özelliklerinin belirlenmesi yaklaşımının geçerliliği konusunun kaya mekaniği camiasında tekrar tartışılmasında yarar görülmektedir. Üretim faaliyeti 40 yıl önce son bulmuş oda-topuk linyit ocağı'nın analizinden elde edilen sonuçlar, kaya kütlesi dayanım özellikleri kullanılarak yapılan üç boyutlu analiz ile ocağın statik yükleme koşullarında bile duraylı olmasının mümkün olmadığı sonucunu ortaya koymuştur. Kaya malzemesi özellikleri kullanılarak yapılan analiz sonuçlarının, gözlemlere dayalı gerçek duruma daha yakın olduğu söylenebilir. Burada belirlenen bu sonucun daha basit yöntemlerin kullanılması ile de aynı olduğu belirlenmiştir.
- (c) RMR sınıflama sistemi kullanılarak elde edilen duraylı kalma süresi 1 dakika ile 1 ay arasında ön görülmektedir. Madende bazı kısmi yenilmelere rağmen, incelenen ocak en az 40 seneden bu yana duraylıdır (Aydan et al., 2005a, 2005b). Q sisteminin daha gerçekçi sonuçlar veridiği anlaşılmaktadır.
- (d) Suya karşı hassas olan kayaçlarda, kaya malzemesi özellikleri su içeriğine bağlı olarak değişmekte ve kuruma-ıslanma çevrimine bağlı olarak bozunma meydana gelmektedir. Önerilen basit yöntemle topuk ve tavan tabakalarının duraylılığı incelenmiş olup, göçük zamanının kestirimi için uygulamalar yapılmış ve önerilerde bulunulmuştur. Bu çalışmada sunulan basit yaklaşımın aynı düşünce yapısına uygun olarak sayısal yöntemlere de uygulanmasıyla gerçeğe daha yakın çözümlemeler yapmak mümkün olacaktır. Benzer şekilde, kripi olgusu modellenmiş ve ayrıca bozunma ile birlikte kripi ortak etkisi üzerine bazı uygulamalar sunulmuştur. İncelenen ocakların 30-40 yıl sonra göçük yapma olasılığının oldukça yüksek olduğu yapılan uygulamalardan anlaşılmıştır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, laboratuvar deneyleri için yardımcı olan birinci yazarın öğrencilerine, krip deneylerine yardımcı olan Toyota National College ve Technology'den Prof.Dr. T. Ito'ya, hem lojistik hem de araştırma fonunu tahsis eden Tobishima Firması Nagoya bürosundan K. Sugiura, A. Sakamoto, N. Yamada'ya ve bu çalışmaya başından beri destek veren Nagoya Üniversitesi'nden emekli Prof.Dr. T. Kawamoto'ya teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- Aydan, Ö., 1990. Saplamların kemer oluşturma etkisi, Madencilik, Ankara, 30 (2), 33-40.
- Aydan, Ö., 2000. A stress inference method based on GPS measurements for the directions and rate of stresses in the earth' crust and their variation with time, *Yerbilimleri*, 22, 223-236.
- Aydan Ö., and Nawrocki, P., 1998. Rate-dependent deformability and strength characteristics of rocks, *The Geotechnics of Hard Soils-Soft Rocks*, Evangelista & Picarelli, ISBN 90 5809 018 3.
- Aydan, Ö., and Kawamoto, T., 2000. The assessment of mechanical properties of rock masses through RMR rock classification system, *GeoEng2000*, UW0926, Melbourne.
- Aydan, Ö., and Ulusay, R., 2003. Geotechnical and geoenvironmental charactersitics of man-made underground structures in Cappadocia, Turkey, *Engineering Geology*, 69, 245-272.
- Aydan, Ö. ve Geniş, M., 2004. III. Amenhotep kaya mezarının (Mısır) çevre kayasının özellikleri ve açıklıklarının duraylılığı, VII. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, A. Ceylanoğlu ve B. Erdem (eds.), TUKMD, Sivas, 191-202.
- Aydan, Ö. ve Kumsar, H., 2005. Kuşini antik yeraltı mermer ocağının mühendislik jeolojisi ve kaya mühendisliği açısından değerlendirilmesi, *Mühendislik Jeolojisi Bülteni*, 20, 41-60.
- Aydan, Ö., Ulusay, R., and Kawamoto T., 1997. Assessment of rock mass strength for underground excavations, *The 36th US Rock Mechanics Symposium*, 777-786.
- Aydan, Ö., Ulusay R., and Yüzer, E., 1999a. A research on Living Environment of Derinkuyu Underground City, Turkey. A report submitted to Japan Ministry of Education, Sports and Culture. Research Report No: 09044154, 149p (Japonca).
- Aydan, Ö., Ulusay, R., Yüzer, E., and Erdoğan, M., 1999b. Man-made structures in Cappadocia, Turkey and their implications in rock mechanics and rock engineering. *ISRM News Journal*, 6, 1:63-73.
- Aydan, Ö., Minato, T., and Fukue, M., 2001. 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., 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., 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.
- Barton, N., Lien, R., and Lunde, I., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel supports, *Rock Mechanics*, 6 (4), 189-239.
- Barton, N., 1995. The influence of joint properties in modelling jointed rock masses, 8th Int. Rock Mech. Congress, Tokyo.
- Bieniawski, Z.T., 1984. *Engineering Rock Mass Classifications*. John Wiley & Sons, New York, 251 pp.
- Hoek, E., and Brown, E.T., 1980. *Underground excavations in rock*. Inst. Min. & Metall., London.
- Hoek, E., and Brown, E.T., 1988. The Hoek-Brown failure criterion - a 1988 update, 15th Can. Rock Mech. Symp., 31-38.
- Hoek, E., 2000. *Practical Rock Engineering*. Course Notes by Evert Hoek, <http://www.rocsience.com/hoek/PracticalRockEngineering.asp>
- Ikeda, K., 1970. A classification of rock conditions for tunnelling, 1st Int. Congr. Eng. Geology, IAEG, Paris, 1258-1265.
- Itasca, 2005. *FLAC3D-Fast Lagrangian Analysis of Continua* (Version 2.21), Minneapolis, Itasca Consulting Group Inc.
- Kawamoto, T., Aydan, Ö., and Tsuchiyama, S., 1991. A consideration on the local instability of large underground openings, Int. Conf. GEOMECHANICS'91, 33-41.
- Kalamaris, G.S., and Bieniawski, Z.T., 1995. A rock mass strength concept for coal incorporating the effect of time, *Proc. 8th Int. Cong. Rock Mechanics, ISRM*, Rotterdam, Balkema, 1, 295-302.
- Whittaker, B.N., and Reddish, D.J., 1989. *Subsidence - Occurrence, Prediction and Control*. Developments in Geotechnical Engineering, 56, Elsevier, 528 p.



Terkedilmiş oda-topuk yeraltı linyit ocağının depreme karşı duraylılığının değerlendirilmesi

Assessment of dynamic stability of an abandoned room and pillar underground lignite mine

¹Ömer AYDAN, ²Melih GENİŞ

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

²Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak

ÖZ

Bu makalede, Japonya'da Mitake ilçesinde terkedilmiş bir oda-topuk linyit ocağında deprem sırasında oluşan duraysızlık sorunları ile kaya kütlesi davranışının belirlenmesine yönelik sürdürülen kaya mekaniği araştırmaları sunulmuştur. Önce terkedilmiş oda-topuk linyit ocaklarında gözlenen duraysızlıklar üzerinde durulmuş, daha sonra oda-topuk yöntemi ile çalışmış ocaklar için laboratuvarda yapılan iki boyutlu model deneylerinde gözlenen sarsıntı özellikleri ve duraysızlık durumları tartışılmıştır. Daha sonra Mitake ilçesindeki terkedilmiş oda-topuk linyit ocağında, iki deprem sırasında oluşan kaya kütlelerinin davranışı ve duraysızlık sorunları sunulmuştur. Terkedilmiş maden sahasında yüzeyde zemin büyümesi olgusu bir boyutlu sonlu elemanlar analizi yapılarak incelenmiştir. Deprem yüklerini de gözönüne alan eş yüklü alanlar yaklaşımı kullanarak oda-topuk madenlerinin duraylılık analizi yöntemi ve uygulamaları verilmiştir. Makalenin diğer kısmında ise, madenin üç boyutlu dinamik elasto-plastik gerilme çözümlemeleri verilmektedir. Bu sayısal çözümlemelerde ideal ve gerçek deprem ivme kayıtları kullanılarak analizler yapılmış ve elde edilen sonuçlar gözlemlerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, yüzeydeki ivme dalgalarının genlik artışının yeraltı açıklıklarındakine göre daha büyük olduğunu göstermiştir. Kaya kütlelerinin özelliklerine bağlı olarak düşük genlikli ivme dalgaların açıklıklarda ve yeryüzünde önemli hasarlar yapabileceği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Terkedilmiş yeraltı linyit ocağı, oda topuk, deprem yükleri, dinamik duraylılık.

ABSTRACT

In this article, rock mechanics investigations for the determination of instability problems at an abandoned room and pillar underground lignite mine in Mitake town of Japan during earthquakes are described. First, examples of stability problems observed in the areas of abandoned lignite mines during earthquakes are presented. Then two-dimensional model tests of abandoned room and pillar mines are described and vibration characteristics and instability modes are summarized. And then, behavior of rock mass and instabilities around the abandoned room and pillar underground lignite mine in Mitake town monitored during two earthquakes are presented. Soil amplification is investigated at the abandoned mine sites by using a series of one-dimensional finite element analyses. A simple tributary area approach incorporating dynamic forces resulting from earthquakes is proposed and its applications are given. In the remaining part of the article, three-dimensional elasto-plastic dynamic stress analy-

ses are presented. In numerical solutions, analysis are performed by using ideal and actual ground motions and compared with field observations. The results obtained indicated that the ground motions with low amplitudes may also cause significant damages in the surrounding mass around the mine and ground surface depending on rock mass properties.

Key Words: *Abandoned underground lignite mine, room and pillar, earthquake loads, dynamic stability.*

1. GİRİŞ

Bu çalışmada, Japonya'nın Gifu ili Mitake ilçesinde terkedilmiş bir oda topuk linyit ocağına ilişkin arazide yapılan çalışmalar ve sayısal gerilme çözümleri sunulmuştur. İncelenen madende üretim faaliyeti yaklaşık 40 yıl önce sona ermiştir. Terkedilmiş madende ve yeryüzünde, depremlerin etkisiyle ve kaya kütlelerinin zamana bağlı dayanım değerlerinin azalması sonucu bazı duraysızlık sorunları oluşmaktadır. Özellikle sığ derinlikteki bu tür yeraltı ocaklarının üstünde tasman ve göçükler zaman zaman karşılaşılan problemler arasındadır.

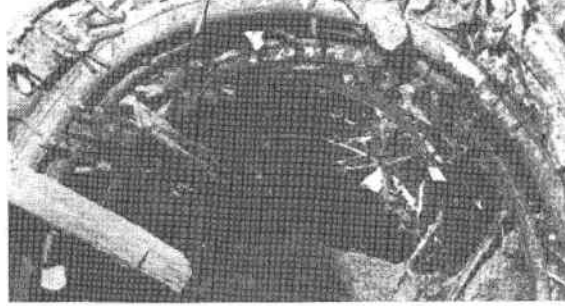
Bölgenin deprem açısından aktif olması ve beklenen Tokai ve Tonankai depremlerinin ilçede önemli hasarlara yol açabileceği düşünülmektedir (Aydan ve Kawamoto, 2004). Söz konusu yeraltı madeninin dinamik yükler altında göstereceği davranışın ve duraysızlık sorunlarının ortaya konması için geçmişte deprem sırasında meydana gelmiş duraysızlık örnekleri gözden geçirildikten sonra, elastik veya elasto-plastik davranış gösteren malzeme kullanılarak yapılan iki boyutlu model deneyleri sunulmaktadır. Bu model deneylerinde önce, elastik durumda temelden yüzeye doğru ivme değişimi ile bunlara kazı alan oranı ve örtü tabakasının kalınlığının etkisi incelenmektedir. Daha sonra model yükleme koşullarında kırılabilir malzemeden oluşturulan model kullanılarak duraysızlık koşulları araştırılmıştır. Aydan vd. (2007) tarafından terkedilmiş oda-topuk madenlerinin uzun süreli davranışın izlenmesinde kullanılan akustik emisyon, elektrik potansiyeli, sıcaklık ve nem gibi çok parametrelili bir yerinde izleme sistemi kullanılarak deprem öncesi, sırası ve sonrasında açıklık çevresinde oluşan fiziksel olgular ve değişimler sunulmakta ve bu sistemin gerçekte uygulanabilirliği tartışılmıştır.

Model deneylerinin yanı sıra, sayısal yöntemlerden yararlanılarak depremler sırasında terkedilmiş oda-topuk linyit sahalarında yüzeyde zemin büyütmesi ve duraysızlık olgularının araştırılması ve değerlendirilebilir olması oldukça önemlidir. Bu amaçla bir boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak zemin büyütmesi olgusu incelenmektedir. Pratik bir çözüm olarak, deprem yüklerini de gözönüne alan eş yüklü alanlar yaklaşımı kullanarak oda-topuk madenlerinin duraylılık analiz yöntemi ve uygulamaları verilmiştir. Çalışmanın son kısmında ise, üç boyutlu sayısal dinamik elasto-plastik gerilme çözümleri verilmektedir. Bu sayısal çözümlerinde ideal ve 2004 Tokaido-oki ile 2005 Komaki depremleri sırasında Minokamo şehrinden alınan gerçek deprem ivme kayıtları kullanılarak analizler yapılmış, arazi gözlemleri ile karşılaştırılarak sonuçlar tartışılmıştır.

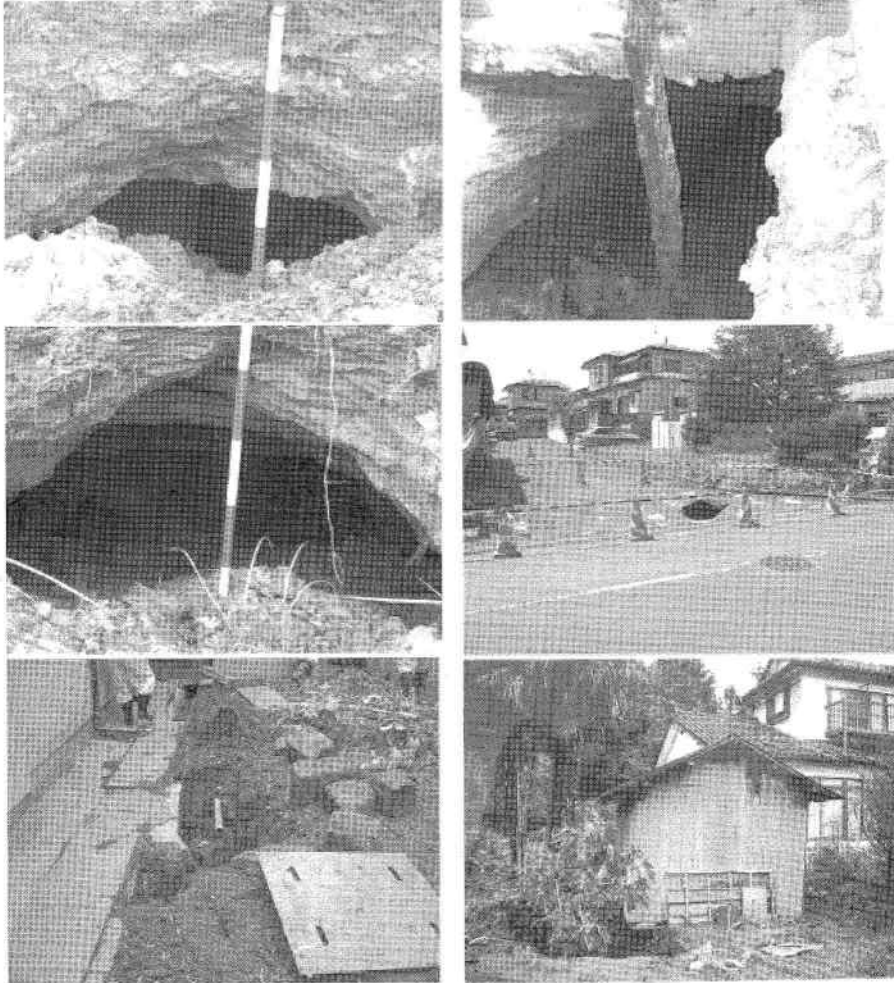
2. DEPREM SIRASINDA MADENLERDE OLUŞAN DURAYSIZLIK SORUNLARI

Literatürde deprem sırasında hasar görmüş maden ocağına ilişkin örnekler çok az rastlanmaktadır. Örneklerin çoğunu Japonya'da bulmak mümkündür. Çin'de 1975 Tangshan depreminde kömür madeninde meydana gelen hasarlar doğrudan madenin içinden geçen yanal atımlı fayın kalıcı deformasyonundan kaynaklanmıştır (Şekil 1). Depremlerin yeraltı yapılarına verdikleri hasarlara ilişkin sınırlı literatür bilgileri Geniş ve Gerçek (2002) tarafından verilmiştir. Japonya'nın Miyagi ilinde 1978 ve 2003'te meydana gelen depremlerde terkedilmiş linyit ocaklarında göçükler meydana gelmiştir (Şekil 2). 2003 yılında

meydana gelen depremdeki duraysızlık sorunları Aydan vd. (2004) ile Aydan ve Kawamoto (2004) tarafından rapor edilmiştir. Oluşan duraysızlıklar özellikle, sığ derinliklerde tavan göçmesi ve ocak içindeki suyun fişkırması olarak kendini göstermektedir. Ocak derinliğinin artması halinde duraysızlıklar kendilerini yeryüzünde homojen olmayan tasmanlar şeklinde göstermektedir.



şekil 1. 1976 Tangshan depreminde faylanma sonucu meydana gelen hasar (Lee, 1987).
Figure 1. Damage caused by faulting at 1976 Tangshan earthquake (Lee, 1987).



şekil 2. 2003 Miyagi Hokubu depreminde terk edilmiş Yamato linyit ocakları sahasında meydana gelen deprem hasarları.
Figure 2. Damages in Yamato lignite field caused by 2003 Miyagi Hokubu earthquake.

3. LABORATUVAR DENEYLERİ

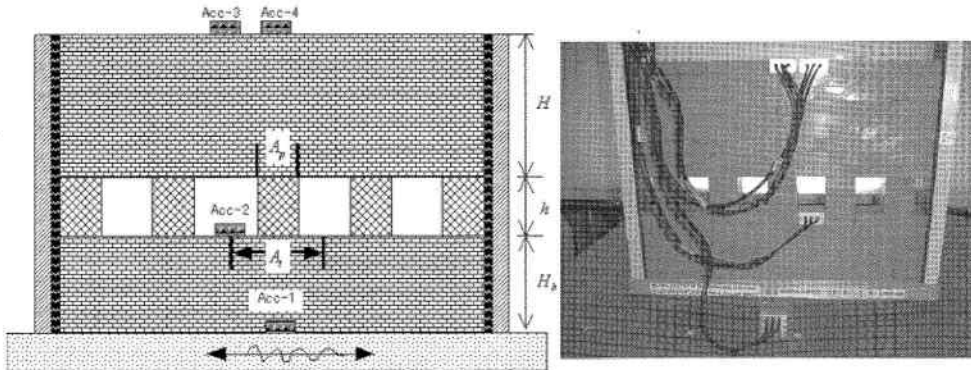
Terkedilmiş oda-topuk yöntemi ile işletilmiş maden ocaklarının deprem sırasındaki davranışını etkileyen etmenleri ve duraysızlık sorunlarını incelemek amacıyla laboratuvar koşullarında iki tür fiziksel model deney yapılmıştır. İlk fiziksel model deneyler, yükleme koşullarında kırılmayan malzeme kullanılarak oluşturulan ocak geometrisinin ocak yüzeyi ve ocak içi sarsıntı özelliklerine olan etkisini araştırma amacıyla yapılmıştır. Dolayısıyla ilk seri deneyleri, modelde kullanılan malzemede kırılma ya da yenilme oluşmadığı için elastik model deneyler olarak adlandırılmıştır. İkinci model deney serisinde modele uygulanan sarsıntı altında kırılabilir malzeme kullanılarak duraysızlık sorunları incelenmiştir. İkinci seri model deneyleri bu nedenle elastik-plastik model deneyleri olarak adlandırılmıştır. Her iki seri model deneyleri de burada ayrı ayrı başlıklar altında sunulmuştur.

3.1. İlk Seri Model Deneyleri (Elastik Model Deneyleri)

İlk seri modellerde boyutları 50x50x21 mm olan bloklar kullanılarak oda-topuk modeli oluşturulmuştur. Kullanılan blokların malzeme özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. Şekil 3'te gösterildiği gibi, ahşap bir çerçeve sarsma masasına sabitlenmiş ve ocak iki boyutlu olacak şekilde bloklar dizilmiştir. Ocak tavanından blok düşmesi olmayacak şekilde düşmesi mümkün bloklar üst ve yan bloklara çift-yüzlü bantlar kullanılarak yapıştırılmıştır. Çerçeve ile model kaya kütleleri arasında yan yüzeylerde çarpmaya bağlı sarsıntıyı engellemek amacıyla 4 mm kalınlığında kauçuk şeritler kullanılmıştır. Deney sırasında tabana, ocak tabanına ve yüzeye topuk ile açıklığın tam üstüne gelecek şekilde 3 bileşenli 4 adet ivme ölçer yerleştirilmiştir. Deney sırasında genliği 20-100 gal olan frekansı 2-20 Hz arasında değiştirilen sinüs dalgaları uygulanmıştır. Tek topukla desteklenen alanın (A_t) topuk alanına oranı (A_p), taşınan alan oranı (A_t/A_p) olarak tanımlanmaktadır (Şekil 3). Taşınan alan oranı (A_t/A_p) oranı 1, 2, 3, 4 ve 5 için örtü kalınlığı oranı (H/h) 2,3 ve 5 şeklinde değiştirilerek model deneyleri yapılmıştır.

Çizelge 1. Blokların malzeme özellikleri.
Table 1. Material properties of blocks.

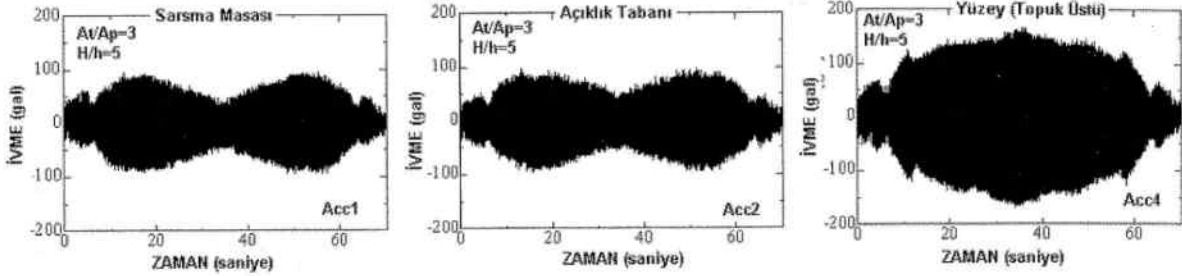
Birim hacim ağırlık (kN/m ³)	Elastik dalga hızı (km/s)	Sürtünme açısı (°)
13.33	2.0 - 2.1	20 - 22



Şekil 3. Sarsma masası deney düzeneği: (a) ivme ölçerlerin yerleştirilme düzeni, (b) deney düzeneğinin görünümü.

Figure 3. Shaking table experimental set-up: (a) installation locations of accelerometers. (b) view of experimental set-up.

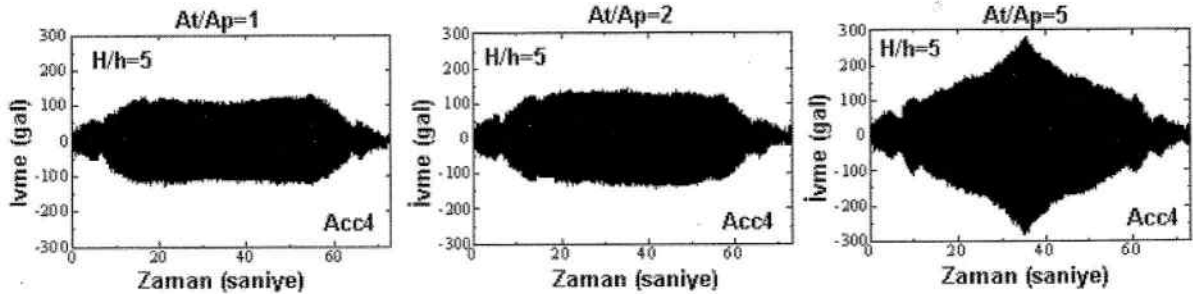
Örtü tabakası oranı ($H/h=5$) ile taşınan alan oranı ($A_t/A_p=3$) durumunda sarsma masası, ocak tabanı ve yüzeyde (topuk üstü) alınan ivme kayıtları Şekil 4'te gösterilmiştir. Yüzeydeki ivmenin değeri tabana göre 2-3 kat arasında bir büyütme oluşturturken, ocak içindeki (açıklık tabanı) büyütmenin değeri 1.1-1.5 kat arasında değişmektedir. Deprem mühendisliğinde bilinen, elastik zeminlerde yüzeydeki ivmenin temel kayaya göre en az 2 katına ulaşacağı bilgisi de burada sınanmış olmaktadır. Dolayısıyla yüzeydeki büyütmenin ocak içine göre oldukça yüksek olacağı söylenebilir.



Şekil 4. Örtü tabakası oranı ($H/h=5$) ve taşınan alan oranı ($A_t/A_p=3$) için yatay ivme kayıtları.

Figure 4. Acceleration records for an overburden ratio of $H/h=5$ and tributary area ratio of $A_t/A_p=3$.

Örtü tabakası oranı ($H/h=5$) sabit tutularak ve taşınan alan oranı ($A_t/A_p=1, 2, 5$) değiştirilerek yüzeyde (topuk üstü) alınan yatay bileşen kayıtları Şekil 5'te gösterilmiştir. Taşınan alan oranı (kazı alanı) arttıkça yüzeydeki ivme, kazının olmadığı ($A_t/A_p=1$) duruma göre 3 kata varan bir büyütme oluşturmaktadır (Şekil 5). Oda-topuk yöntemiyle çalışan pek çok ocakta taşınan alan oranının 5 veya 5'ten büyük olacağı düşünülürse, terk edilmiş linyit sahaları üzerindeki yerleşimlerde diğer yörelere göre sarsıntılar daha da şiddetli hissedilecektir.

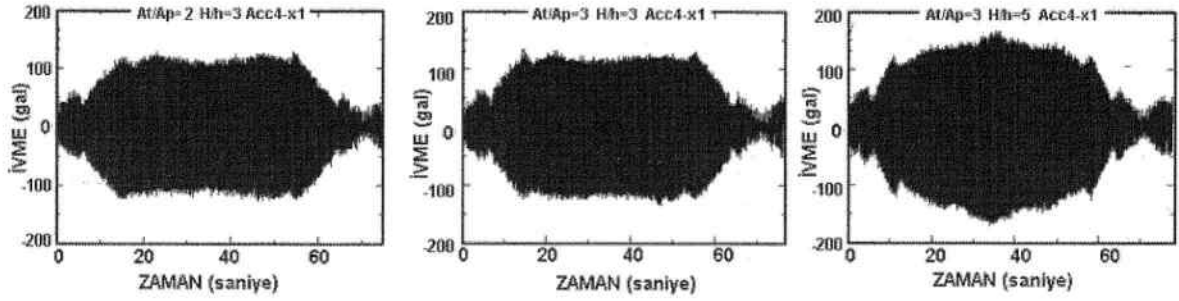


Şekil 5. Örtü tabakası oranı ($H/h=5$) ve taşınan alan oranı ($A_t/A_p=1, 2, 5$) için yüzeyde ölçülen yatay ivme kayıtları.

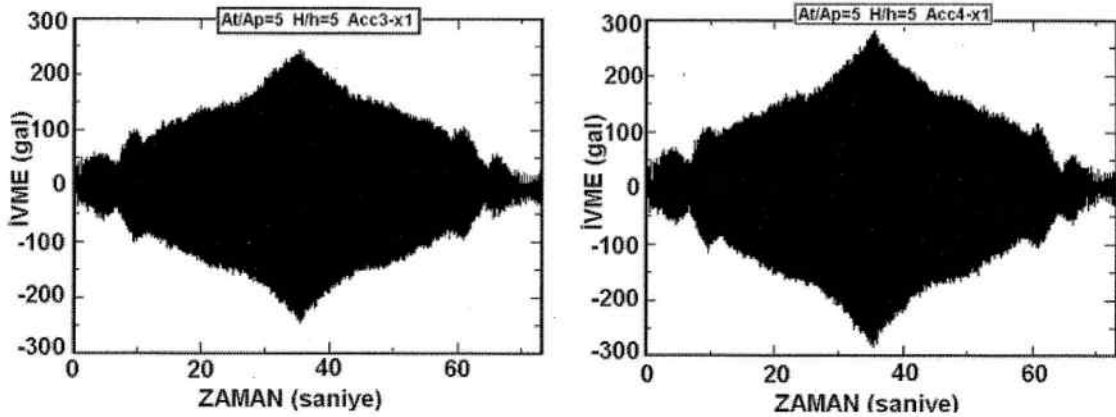
Figure 5. Acceleration records at ground surface for overburden ratio of $H/h=5$ and tributary area ratios of $A_t/A_p=1, 2, 5$.

Taşınan alan oranı ($A_t/A_p=3$) sabit tutulup, örtü tabakası oranı ($H/h=2, 3, 5$) değiştirilerek yapılan deneylerde yüzeyde (topuk üstü) alınan yatay bileşen kayıtları Şekil 6'da gösterilmiştir. Ocak derinleştikçe yüzeydeki ivme değerindeki büyütme söz konusu deney koşulları için yaklaşık 1.5 katıdır. Dolayısıyla ocak derinleştikçe, ivmede büyütme söz konusu olmakla birlikte, taşınan alan oranı ($A_t/A_p=3$)'nın etkisine göre daha az olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Yüzeydeki ivme davranışının açıklığın veya topuğun üstüne denk gelecek şekilde alınmasının yaratacağı büyütme etkisi ile ilgili kayıtlar Şekil 7'de gösterilmiştir. Topuk üstündeki ivme değeri açıklık üstündeki ivme değerine göre daha büyük olmaktadır.



Şekil 6. Taşınan alan oranı ($A_t/A_p=3$) ve örtü tabakası oranı ($H/h=2, 3, 5$) için yüzeyde ölçülen yatay ivme kayıtları.
Figure 6. Acceleration records at ground surface for an overburden ratio of $H/h=2,3,5$ and tributary area ratio of $A_t/A_p=3$.

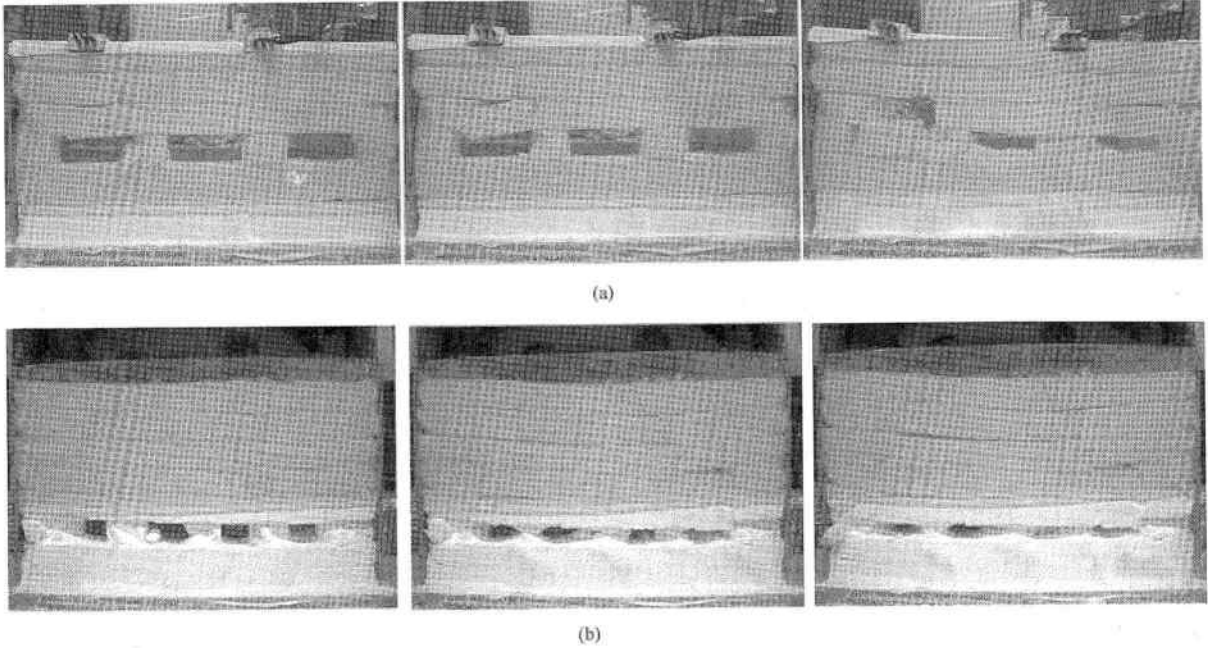


Şekil 7. Taşınan alan oranı ($A_t/A_p=5$) ve örtü tabakası oranı ($H/h=5$) için yüzeyde alınan yatay ivme kayıtlarının karşılaştırılması: (a) açıklık üstü, (b) topuk üstü.
Figure 7. Acceleration records at ground surface for an overburden ratio of $H/h=5$ and tributary area ratio of $A_t/A_p=3$: (a) above opening, (b) above pillar.

3.2. İkinci Seri Model Deneyleri (Elasto-plastik Model Deneyleri)

Zemin büyütmesi olgusunun yanı sıra, terk edilmiş oda-topuk ocaklarının göçme olasılığını incelemek için sarsma masasına uygulanan ivme ile kırılabilen (yenilebilen) malzeme kullanılarak ikinci seri model deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kırılabilir özelliğe sahip model malzemesi, toz halinde baryum sülfat ($BaSO_4$), çinko oksit (ZnO) ve vazelin yağının karıştırılıp sıkıştırılması ile elde edilmiştir. Sıkıştırma basıncına bağlı olarak farklı dayanıma sahip model malzemeleri oluşturulabilmektedir. Bu malzeme taban-sürtünme model deneylerinde bazı araştırmacılar tarafından kullanılmıştır (Erguvanli ve Goodman 1972; Kawamoto vd., 1983). Bu malzemenin seçilme amacı malzeme dayanımının kolayca değiştirilebilir ve defalarca kullanılabilir olmasıdır. Birinci seri model deneylerinde kullanılan ahşap çerçeve kullanılarak yatay 50 mm kalınlığında tabakalar oluşturulmuştur. Oda-topuk ocak modelleri, önceden hazırlanmış topuklar yerleştirilerek veya model oluşturulduktan sonra kazı ile yapılmıştır. İvme ölçerler, sarsma masası ve yüzeyde açıklık ile topukların üstüne gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Deneyler farklı örtü tabakası kalınlığı ve kazı alanı değerlerinde yapılmıştır. Frekansı 3 Hz, genliği giderek artan ivme dalgaları sarsma masasına uygulanmıştır. $A_t/A_p=3$ ve $H/h=3$ ile $A_t/A_p=2$ ve $H/h=5$ durumları için yapılan model deneylerinde gözlenen duraysızlık oluşumunu ve gelişimi Şekil 8'de gösterilmiştir. Deneysel çalışmada ocağın sığ olması duru-

munda duraysızlık tavan tabakalarının göçmesi şeklinde gelişmektedir. Diğer yandan, ocak derinleştikçe örtü yükünün artması nedeniyle topuklarda ezilerek göçme meydana gelmektedir. Topukların ezilerek göçmesi durumunda yüzeyde düzgün dağılmayan büyük ölçekte tasman meydana gelmektedir.



Şekil 8. Kırılabilir malzeme kullanılarak yapılan deneylerde gözlenen yenilme davranışı: (a) tavan tabakalarının göçmesi ($A_t/A_p = 3$ ve $H/h=3$), (b) topukların basınç nedeni kırılması ve ocağın göçmesi ($A_t/A_p = 2$ ve $H/h=5$).

Figure 8. The failure modes observed at experiments using yielding model material: (a) roof collapse ($A_t/A_p = 3$ and $H/h=3$), (b) pillar failure and collapse of mine ($A_t/A_p = 2$ and $H/h=5$).

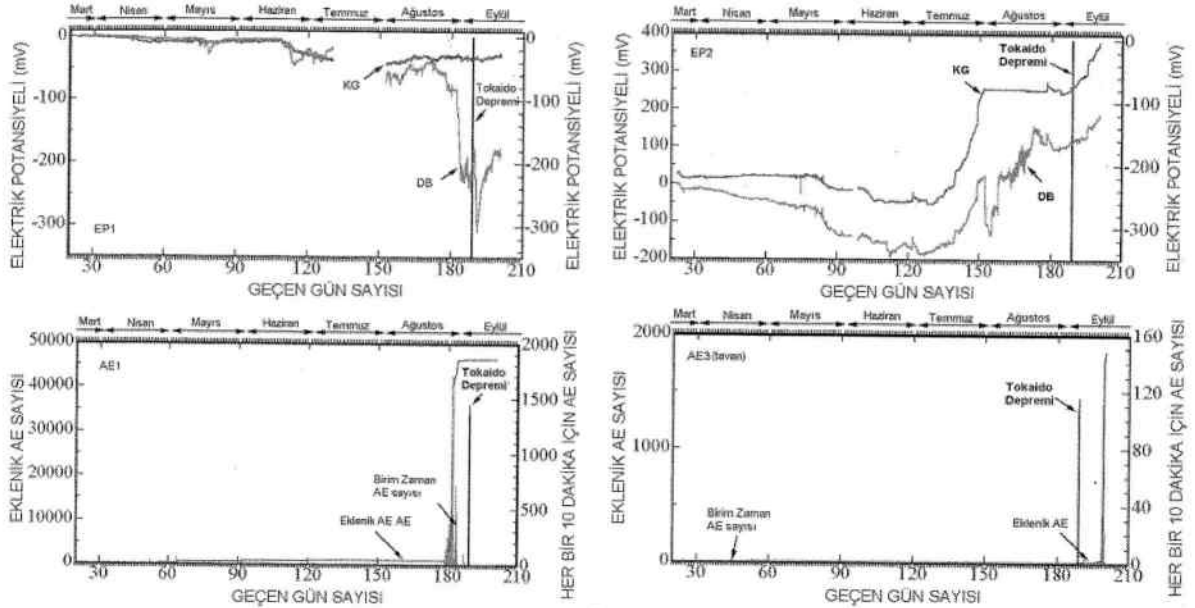
4. DEPREM SIRASINDA YAPILAN ARAZİ GÖZLEM VE ÖLÇÜMLERİ

Kaya kütlelerinin zamana bağlı davranış özelliklerini etkileyen bazı faktörlerin (deprem, sıcaklık ve nem değişimleri gibi) belirlenmesi için yerinde ölçümler yapılmaktadır. Depremler sırasında kaya kütlelerinde oluşabilecek ek yük ve yenilmeler, ocağın duraylılığını olumsuz etkileyebilecek en önemli olgulardır. Bu amaçla topuklara ve tavana yerleştirilen akustik emisyon ve yerin elektrik potansiyel değişimini ölçen cihazlardan sürekli kayıt alınmaktadır.

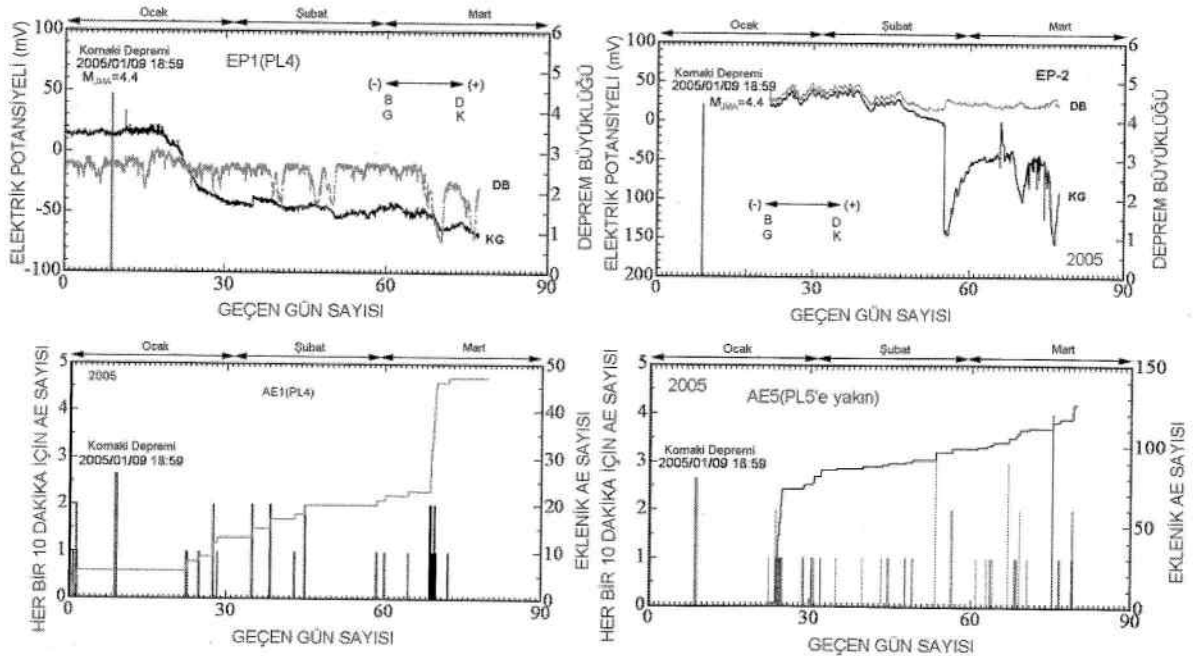
Gözlemler sırasında bölgeden 236 km ve 25 km uzaklıkta iki deprem olmuştur. Bunlardan ilki olan 7.4 büyüklüğündeki Tokaido-oki depremi 5 Eylül 2004'te, 4.7 büyüklüğündeki Komaki depremi ise, 9 Ocak 2005'te meydana gelmiştir. Tokaido-oki depreminin merkez üssü madenden 236 km uzaklıkta olmasına rağmen 20 gal (0.02g) ve Komaki depremi ise 50 gal (0.05g) ivme yaratmıştır. Bu iki deprem, terkedilmiş madenin deprem sırasında gösterdiği davranışların ortaya konması açısından önemli bilgiler elde edilmesini sağlamıştır.

Terkedilmiş madende çevre kayacın elektrik potansiyel (EP) ve akustik emisyon (AE) değişimleri, ocakta tavana ve topuklara yerleştirilen cihazlar ile elde edilmiştir. Arazi ölçümleri ilgili ayrıntılar Aydan vd. (2007) tarafından sunulmuştur. PL4 no.lu topuğua yerleştirilen AE ve EP cihazlarının ölçtüğü bulgular Tokaido-oki depremi öncesi için Şekil 9 ve deprem sonrası için de Şekil 10'da verilmiştir. Depremden önce yerin elektrik potansiyelindeki değişim akustik emisyon değişiminden çok daha önce

başlamaktadır. Bu durum laboratuvarda yapılan örnekler üzerinde elde edilen bulgular ile benzerlik göstermektedir (Aydan vd., 2001, 2002, 2003, 2005b, 2005c). Aletsel ölçümlerin yanı sıra, ikişer aylık aralıklarla gözleme dayalı incelemeler de yapılmıştır. Bu incelemeler sırasında topuk ve tavanların durumları fotoğraflanmıştır.

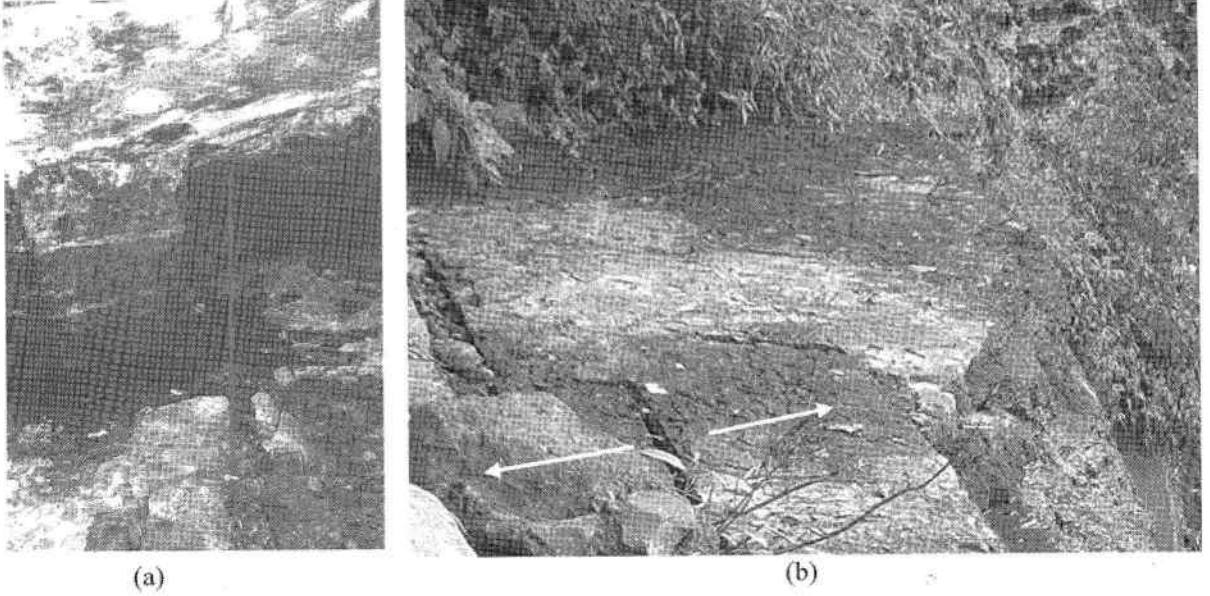


Şekil 9. Tokaido-oki depremi öncesi ve sonrasında ölçülen elektrik potansiyel ve akustik emisyon değişimleri.
Figure 9. Variation of electrical potential and acoustic emission before and after the Tokaido-oki earthquake.



Şekil 10. Komaki depremi öncesi ve sonrasında ölçülen elektrik potansiyel ve akustik emisyon değişimleri.
Figure 10. Variation of electrical potential and acoustic emission before and after the Komaki earthquake.

Depremden bağımsız 24 Mart 2004 tarihindeki ilk incelemeden sonra 14 Mayıs 2004'te yapılan ikinci inceleme sırasında tavandan önemli ölçüde bir kaya kütlelerinin düştüğünü belirlemişlerdir (Aydan vd., 2007). PL3, PL4, RP3 ve RP4 olarak numaralandırılan topukların arasında kalan kumtaşı tavan tabakasının boyutları yaklaşık 300x200x20 cm'dir. 14 Mayıs-5 Eylül 2004 tarihleri arasında ölçümlerin alındığı bölgede önemli bir yenilme gözlenmemiştir. 5 Eylül 2004 Tokaido-oki depremi sonrasında yapılan incelemede tavandan kaya düşmeleri gözlenmiştir (Şekil 11a). Bunun yanı sıra, ocak girişinde serbest yüzeye doğru çatlaklarda 20 mm'ye varan açılmalar gözlenmiştir (Şekil 11b). İkinci depremde ise, önemli bir göçme oluşmamıştır.



Şekil 11. Tokaido-oki depreminin neden olduğu göçükler ve çatlak açılması. (a) Tavan göçmesi. (b) Ocak girişindeki çatlakların açılması.

Figure 11. Some roof failures and fracture propagation caused by the Tokaido-oki earthquake: (a) roof failure, (b) fracture opening at mine entry.

5. DURAYLILIK ÇÖZÜMLEMELERİ VE KARŞILAŞTIRMALAR

5.1. Basit Kuramsal Duraylılık Analiz Yöntemi

Oda-topuk işletmeleri için topuk tasarımında yaygın olarak kullanılan eşyüklü alanlar yaklaşımı (tributary area method)'nda deprem yükü göz önüne alınmamaktadır. Aydan vd. (2005a), eş yüklü alanlar yaklaşımını esas alan ve deprem yükünü de içeren bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntemde tavan ile topuk arasında çekme dayanımının sıfır olacağı varsayımıyla kırılma anındaki yatay deprem yükü katsayısı (α) aşağıda verildiği gibi elde edilmektedir (Şekil 12a):

$$\alpha = \frac{w}{3H} [5\xi + 1] \quad (1)$$

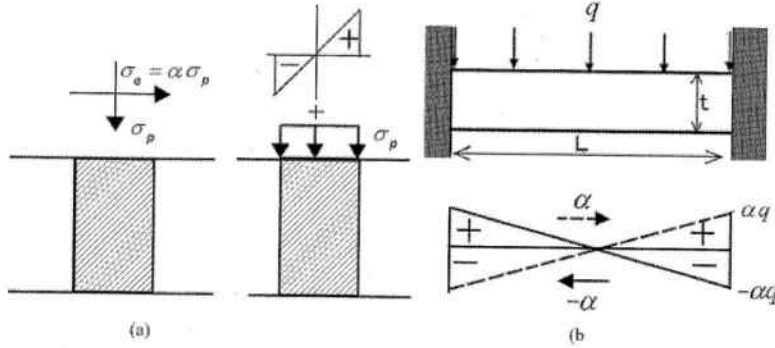
Burada; $\xi = e/w$, $e = w - w^*$, $A_p^* = w^* \cdot w^*$, w topuk genişliği, w^* etkin topuk genişliği, e topuğa etkileyen eşdeğer yükün etkime uzaklığı, H ise örtü tabakası kalınlığıdır.

Diğer taraftan, tavan tabakasında tabaka ağırlığından kaynaklanan eğilme gerilmesi ile yatay deprem yükünden kaynaklanan eksenel gerilmenin yöne göre çekme veya sıkıştırma şeklinde olacağı (Şekil

12b) varsayımıyla kırılma anındaki yatay deprem yük katsayısı (α) için aşağıdaki ilişki geliştirilmiştir (Aydan vd., 2005a).

$$\alpha = \frac{\sigma_t}{\rho g t (A_t / A_p - 1)} - \frac{t}{2H} (A_t / A_p - 1) \quad (2)$$

Burada; ρ ve t , sırasıyla tabakanın yoğunluğu ve kalınlığı, σ_t ise tabakanın çekme dayanımıdır.

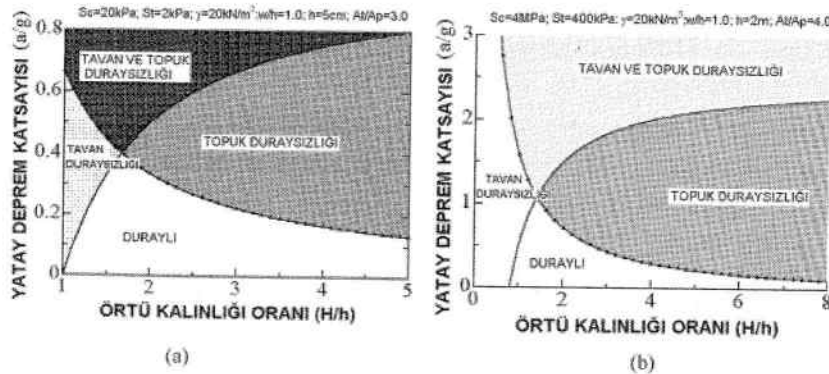


Şekil 12. Deprem yükünün topuğa ve tavan tabakasına etkiye modelleri: (a) topuk modellenmesi, (b) tavan tabakası modellenmesi.

Figure 12. Mechanical models for earthquake loading on pillar and roof stratum: (a) pillar modeling, (b) roof modeling.

Laboratuvar model deneyleri ile Mitake'deki terk edilmiş oda-topuk ocağı için yapılmış duraylılık analiz sonuçları Şekil 13'te gösterilmiştir. Burada dört farklı durum söz konusu olup, bunlar

- 1) duraylı,
 - 2) tavan duraysızlığı,
 - 3) topuk duraysızlığı ve
 - 4) tavan ve topuk duraysızlığı
- şeklinde sınıflandırılabilir.



Şekil 13. Laboratuvar model ocağı ve güncel terk edilmiş ocakların tahmini dinamik duraylılıkları için diyagramlar: (a) laboratuvar model ocağı, (b) terk edilmiş Mitake linyit ocağı.

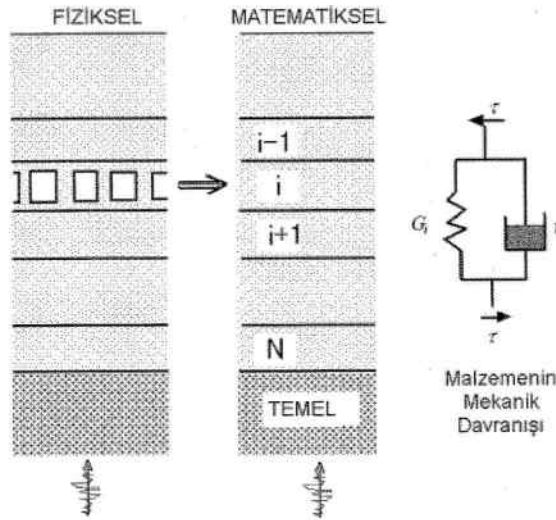
Figure 13. Charts for estimating dynamic stability of the model mine and actual abandoned mine: (a) laboratory model mine, (b) abandoned Mitake lignite mine.

Örtü tabakasının ince (sığ) olduğu durumlarda tavanın göçük yapma olasılığı yüksek iken, derinlik arttıkça topukların yenilme olasılığı da artmaktadır. Şekil 8’de verilen model deney sonuçları gözönüne alındığında, kuramsal sonuçlarla deneysel sonuçların birbirlerini desteklediği söylenebilir. Mitake ilçesindeki terkedilmiş linyit ocaklarına yatay deprem yük katsayısı 0.2g’i aşan ivmeler etkimesi halinde, ilçede büyük duraysızlık sorunlarının yaşanma olasılığı oldukça yüksek olacaktır. Duraysızlığın büyük kısmının topuk yenilmesinden kaynaklanma olasılığı yüksektir. Şekil 2’de görülen 2003 Miyagi Hokubu depremindeki duraysızlık sorunları örtü kalınlığı oranın 2’den küçük olduğu duruma karşılık gelmektedir.

5.2. Doğrusal Zemin Büyütmesi ile İlgili Sayısal Çözümler

Ortamın davranışının basit makaslama tabaka modeline uygun olması halinde dinamik denge denklemi aşağıdaki şekli almaktadır (Aydan, 1994) (Şekil 14).

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\eta}{\rho} \frac{\partial^2 \dot{u}}{\partial x^2} + \frac{b}{\rho} \quad (3)$$



Şekil 14. Oda-topuk ocağındaki kaya kütlelerinin dinamik makaslama dalgası yayılım modeli.

Figure 14. Models for dynamic shear wave propagation in rock mass of the room and pillar mine.

Burada; G , η ve b , sırasıyla tabakanın makaslama elastik modülü, makaslama viskoz modülü ve yayılı hacimsel yüküdür. Eğer hacimsel yük ile viskoz kısım ihmal edilirse, 3 no.lu eşitlikten temel kayasının üzerinde aynı özelliği taşıyan ve kalınlığı H olan bir zeminin makaslama dalgası hızına (V_s) bağlı olarak ana doğal salınım süresi aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$T_p = \frac{4H}{V_s}; V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (4)$$

Şekil 14’te verilen tabaka modeline uygun bir zemin söz konusu ise, zeminin ortalama doğal salınım süresi için aşağıdaki ilişki elde edilebilir ve Eşitlik 4’te verilen makaslama dalgası hızının aşağıdaki ilişkiler kullanılarak hesaplanması mümkün olabilmektedir.

$$\bar{T}_p = \frac{4H}{\bar{V}_s}; \bar{V}_s = \sqrt{\frac{\bar{G}}{\bar{\rho}}}; \frac{1}{\bar{G}} = \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i}{G_i}; \bar{\rho} = \sum_{i=1}^N \lambda_i \rho_i; \lambda_i = \frac{h_i}{H} \quad (5)$$

Depremlerin ürettiği karmaşık dalgalar için sayısal yöntemlerden örneğin sonlu elemanlar yönteminden yararlanılabilir. 3 no.lu eşitlik sonlu elemanlar yöntemine göre düzenlenirse aşağıdaki ilişki elde edilir (Aydan, 1994).

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F\} \quad (6)$$

Burada; $[M]$ kütle matrisi, $[C]$ sönümlenme matrisi, $[K]$ katılık matrisi, $\{U\}$ yerdeğiştirme vektörü, ve $\{F\}$ yük vektörüdür. Açık olarak aşağıdaki ifadeler yazılabilir:

$$[M] = \sum \int [N]^T [N] dx; [C] = \sum \int \frac{C}{\rho} [B]^T [B] dx; [D] = \sum \int \frac{G}{\rho} [B]^T [B] dx \quad (7a)$$

$$\{F\} = \sum \int \frac{b}{\rho} [N]^T [N] dx \quad (7b)$$

Burada $[N]$ eleman içerisinde uzaysal interpolasyon fonksiyonudur.

Eşitlik 6, orta farklar yöntemi (central difference method) kullanılarak integre edildiğinde aşağıda verilen şekle dönüşür:

$$[K^*]\{U\}_{n+1} = \{F\}_{n+1} \quad (8)$$

Burada,

$$[K^*] = \frac{1}{\Delta t^2} [M] - \frac{1}{\Delta t} [C] \quad (9.a)$$

$$\{F\}_{n+1} = \{F\}_n - ([K] - \frac{1}{\Delta t} [M])\{U\}_n + (\frac{1}{2\Delta t} [C] - \frac{1}{\Delta t^2} [M])\{U\}_{n-1} \quad (9.b)$$

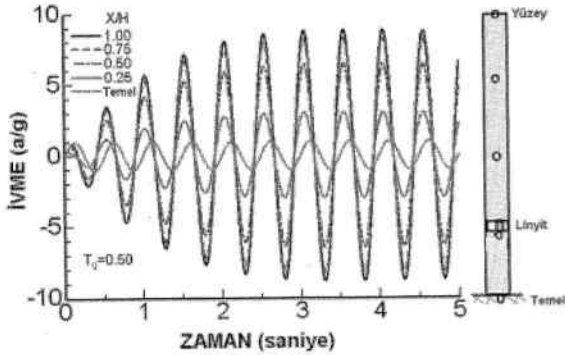
Kuramsal olarak, zeminin doğal salınım süresi ve girdi olarak kullanılan deprem dalgaları için zemin büyütmesi Eşitlik 8'in çözülmesiyle elde edilebilir.

Örnek bir uygulama olarak sismik temel üzerindeki 40 m kalınlığında oda-topuk yöntemi ile çalışılmış bir tabakayı içeren ve temele salınım süresi 0.5 s olan bir ivmenin etkidiği varsayılmıştır. Çözümde kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 1'de sunulmuştur. Çözümleme sonucu elde edilen ivme davranışı Şekil 15'te gösterilmiştir. Oda-topuk yöntemiyle çalışılmış linyit seviyesinin eşdeğer elastik makaslama (kayma) modülü (G_e), linyit tabakasının makaslama modülü (G_l), topuk alanı ve taşıdığı alanın oranı olarak aşağıdaki ilişkiden hesaplanmıştır.

$$G_e = G_l \frac{A_p}{A_t} \quad (10)$$

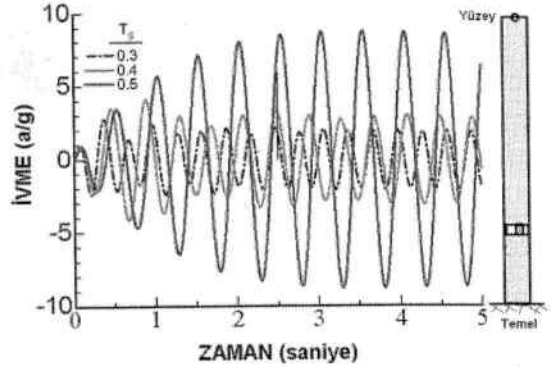
Şekil 16'da ise, temele etkileyen ivme dalgasının salınım süresi 0.3, 0.4 ve 0.5 s şeklinde değiştirilerek yapılan çözümde yüzeydeki bir noktada elde edilen ivme davranışları gösterilmiştir. Tahmin edileceği üzere, Eşitlik

4 ile zeminin doğal salınım süresi 0.5 saniyeye yakın olması nedeniyle yüzeydeki salınım temele etkiyen ivmeye göre yaklaşık 10 katına ulaşmaktadır. Yalnız burada dikkat edilmesi gereken nokta, büyütmenin büyüklüğü malzemenin viskoz özelliklerine doğrudan bağlı olup uygulanan dalganın genliğinden bağımsızdır.



Şekil 15. Temel üzerinde tabakalar içinde seçilen noktaların ivme davranışı.

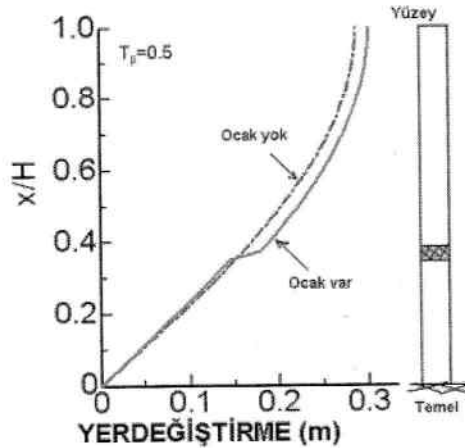
Figure 15. Acceleration response at selected points located several levels.



Şekil 16. Temel ivmesinin salınım süresinin değişimine göre yüzeydeki ivme davranışı.

Figure 16. Acceleration response at ground surface for different periods of input wave.

Oda-topuk ocağının varlığında, temele göre ocak seviyesinde göreceli yerdeğiştirme durumu oluşmaktadır (Şekil 17).



Şekil 17. Oda-topuk linyit ocağının varlığının yerdeğiştirme davranışına etkisi.

Figure 17. Effect of room and pillar mine on deformation response of ground.

6. ÜÇ BOYUTLU SAYISAL GERİLME ÇÖZÜMLEMELERİ

Bu bölümde, deprem yükleme koşullarında açıklıkların gösterecekleri davranışlar üç boyutlu sayısal gerilme çözümleri ile incelenmiştir. Çözümlemede, sonlu farklar yöntemini esas alan bilgisayar programı kullanılmıştır (Itasca, 2005). Ocak çevresinde statik koşullar için kayanın modellenmesinde kaya malzemesi ve kaya kütlesi dayanımları esas alınarak modeller yapılmış ve kaya kütlesi dayanımının kullanıldığı çözümlerinin arazide yapılan gözlemler ile uyuşmadığı sonucuna ulaşılmıştır (Aydın vd., 2007; Aydın ve Geniş, 2004). Bu çalışmada verilen çözümlerde kaya malzemesinin dayanım ve

deformasyon özellikleri kullanılmıştır. Dinamik yüklemelerde harmonik sinüs dalgası, 2004-Tokaido-oki depremi ile 2005-Komaki depreminde ocak yakınında ölçülen gerçek ivme kayıtları esas alınmıştır.

6.1. Çözümleme Varsayımları ve Sonlu Farklar Ağı

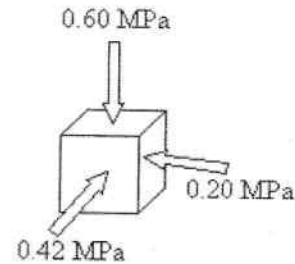
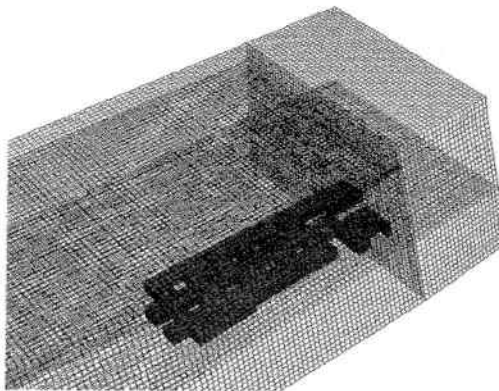
Çözümlemede kullanılan kaya malzemesine ilişkin mekanik özellikleri Çizelge 2 ve 3'te verilmiştir. Ortama etkiyen birincil gerilme bileşenleri Aydan (2000) tarafından önerilen yöntem kullanılarak tahmin edilmiştir (Şekil 18). Statik koşullar için oluşturulan sonlu farklar ağı, dinamik çözümlemeler için de aynen kullanılmış ve sonlu farklar ağı ve sınır koşulları dinamik dalgaların model içinde doğru bir şekilde yayılabilmesi için gerekli koşullar dikkate alınarak hazırlanmıştır (Şekil 18). Analizlerde önce statik çözümler yapılmış, daha sonra dinamik yükleme uygulanarak madenin duraylılığı incelenmiştir. Tanımlanan tabakaların sonlu farklar ağı Şekil 19'da gösterilmiştir.

Çizelge 2. Analizde kullanılan malzeme özellikleri.
Table 2. Material properties used in the analysis.

Malzeme	$\sqrt{G/\rho}$ (m/s)	η/ρ (m ² /s)	(b/ρ) (m/s ²)
Tabaka 1 (30-40 m)	320	32	10
Tabaka 2 (28-30 m)	160	16	10
Tabaka 3 (0-28 m)	320	32	10

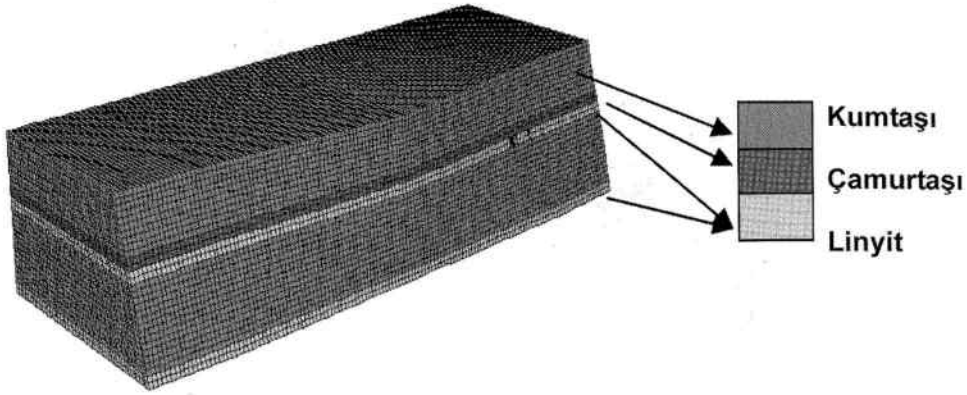
Çizelge 3. Sayısal çözümlemede kullanılan kaya malzemesi özellikleri.
Table 3. Rock material properties used in numerical analysis.

Birim	Tek eks. sıkışma dayanımı (MPa)	Sürtünme açısı (°)	Elastik Modülü (MPa)	Birim hacim ağırlık (kN/m ³)	Çekme dayanımı (MPa)	Kohezyon (MPa)	Makaslama (kayma) modülü (MPa)
Linyit	4	53	557	20	0.4	0.669	228.8
Kumtaşı	2.3	53	257	20	0.06	0.385	102.8
Çamurtaşı	0.96	29	76	20	0.05	0.283	30.4



Şekil 18. Sonlu farklar ağı ve varsayılan birincil gerilme durumu.

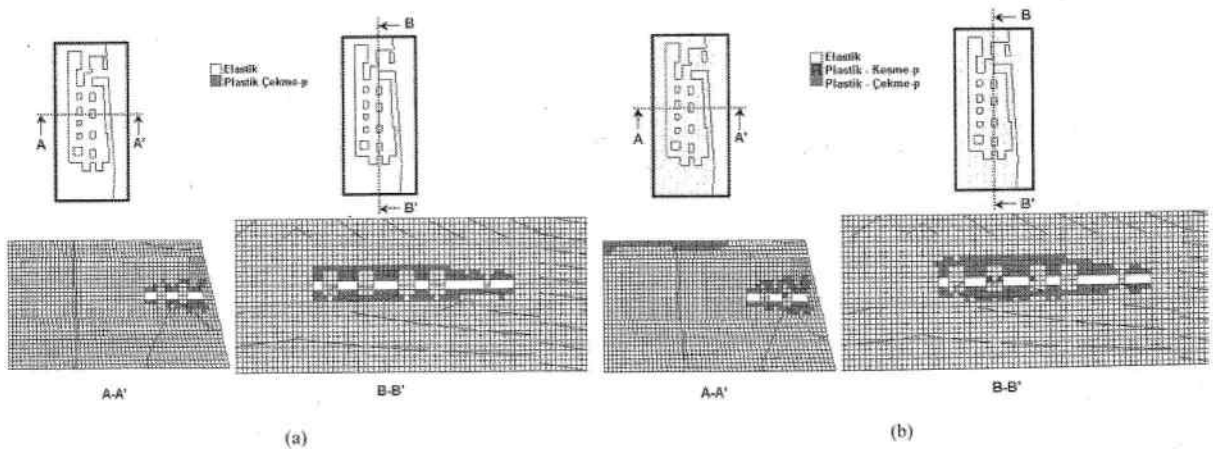
Figure 18. Finite difference mesh and assumed in-situ stress state.



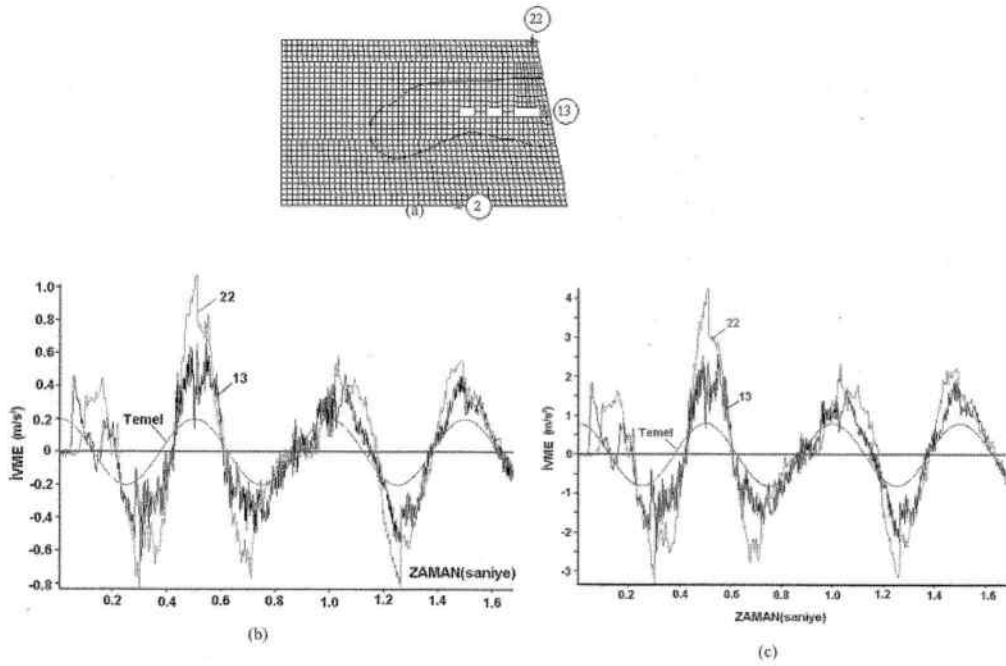
Şekil 19. Modelin üç boyutlu görünümü ve çözümlemelerde tanımlanan jeolojik birimler.
Figure 19. A three dimensional view of numerical model of the mine and geologic units.

6.2. Dinamik Çözümleme

İlk önce dinamik çözümlerde modelin tabanına düşey yönde harmonik sinüzoidal dalga şekli uygulanmıştır. Çözümlerde kütleyle orantılı sönümleme yaklaşımı ile sayısal model sınırlarından yansımayı engelleyecek susturucu (silent) sınır koşulları kullanılmıştır. Uygulanan dalgaların en büyük ivme değerleri 0.2 m/s^2 ($0.02g=20 \text{ gal}$) ve 0.8 m/s^2 ($0.08g=80 \text{ gal}$) olup, frekansı ise 2 Hz 'dir. Bu çalışmada, depremin etkidiği süre 1.7 s olarak alınmıştır. Uygulanan dalganın model içinde uygun yayılımının sağlanabilmesi için en büyük sonlu farklar ağ boyutu, en yüksek frekansa sahip dalga boyunun $1/8$ ve $1/10$ 'undan daha küçük olacak şekilde oluşturulmuştur. $0.02g$ ve $0.08g$ 'lik ivmelerde ocağın tavanlarında çekme gerilmelerinin çekme dayanımını aşması sonucu çekme modunda yenilme bölgeleri meydana gelmiştir (Şekil 20). İvme 80 gal olarak etkidiğinde, bazı topuklarda kayma (makaslama) türünde yenilmeler oluşmuştur. Modelde seçilen bazı önemli noktadaki ivme kayıtları incelendiğinde oluşan zemin büyütmesinin 3 ile 5 arasında olduğu belirlenmiştir (Şekil 21). En büyük genlikli ivme yamacın tepesinde ve topuğun yüzeydeki izdüşümü noktasında oluşmaktadır. Ocak içinde elde edilen ivme değerleri göreceli olarak yeryüzündeki noktalara göre daha küçüktür.



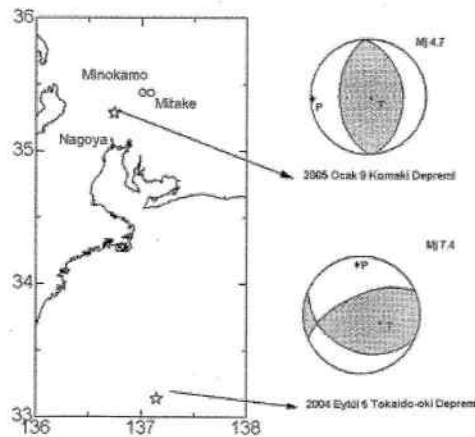
Şekil 20. Açıklık ve topukların çevresindeki yenilme bölgeleri: (a) $A_{\max}=20 \text{ gal}$, (b) $A_{\max}=80 \text{ gal}$.
Figure 20. Yield zones around openings and pillars: (a) $A_{\max}=20 \text{ gal}$, (b) $A_{\max}=80 \text{ gal}$.



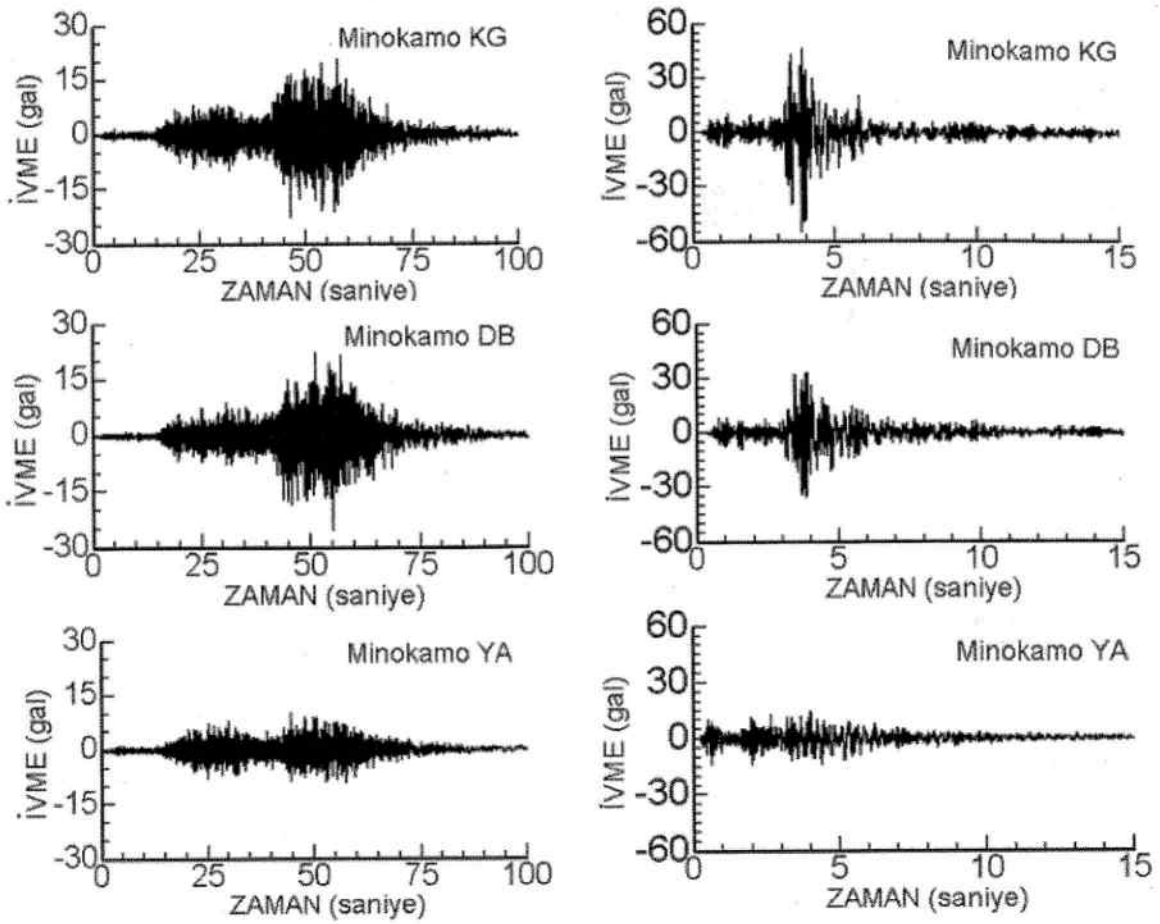
Şekil 21. Seçilen bazı noktadaki ivme davranışları: (a) seçilen gözlem noktaları, (b) $A_{max}=20$ gal. (c) $A_{max}=80$ gal.
 Figure 21. Acceleration behaviour at several selected points: (a) selected points, (b) $A_{max}=20$ gal. (c) $A_{max}=80$ gal.

6.3. Gerçek Deprem Kayıtları Kullanılarak Yapılan Dinamik Çözümler

Gözlemler sırasında ocaktan 236 km ve 25 km uzaklıkta iki deprem olmuştur. Bunlardan ilki olan Mj 7.4 büyüklüğündeki Tokaido-oki depremi 5 Eylül 2004'te; Mj 4.7 büyüklüğündeki Komaki depremi 9 Ocak 2005'te olmuştur (Şekil 22) Tokaido-oki depreminin merkez üssü madenden 236 km uzaklıkta olmasına rağmen ocak yakınında Minokamo'da 20 gal (0.02g) ve Komaki depremi ise 50 gal (0.05g) ivme yaratmıştır (K-Net 2004, 2005) (Şekil 23). Bu iki deprem terk edilmiş madenin deprem sırasında gösterdiği davranışların ortaya konması açısından önemli bilgiler elde edilmiştir.



Şekil 22. Tokaido-oki ve Komaki depremleri ile Mitake ve Minokamo'nun yerleri.
 Figure 22. Locations of the Tokaido-oki, Komaki earthquakes, and Mitake and Minokamo.



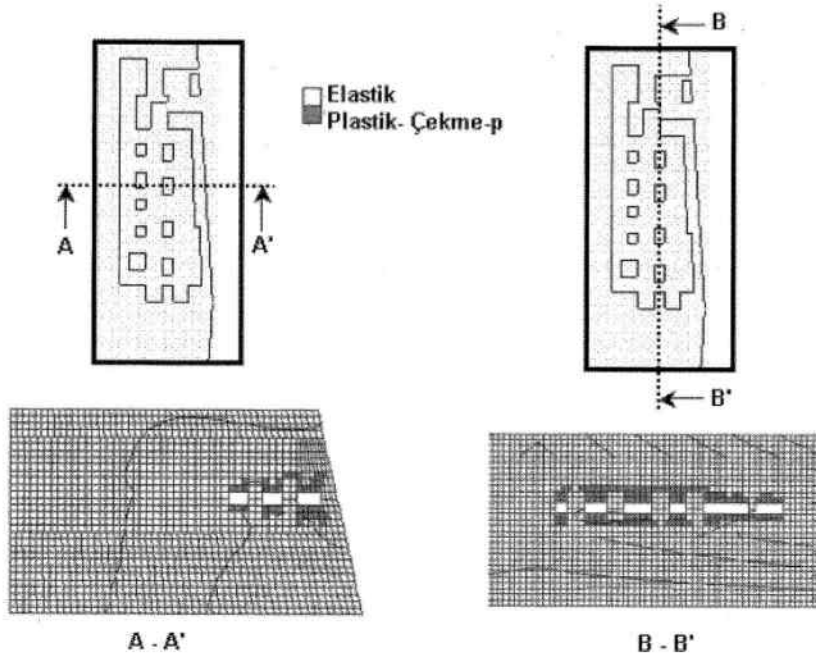
Şekil 23. Tokaido-oki ve Komaki depremleri sırasında Minokamo'da alınan ivme kayıtları.

Figure 23. Acceleration records at Minokamo during the Tokaido-oki and Komaki earthquakes.

Burada sunulan analizlerin çözümleme süresinin çok uzun olması nedeniyle, toplam sarsıntı süresi 90 saniye olan Tokaido-oki depreminin D-B yönünde alınan sayısal kaydında en büyük ivmenin olduğu 6 saniyelik kısmı kullanılmıştır. Bu dalga modele düşey yönde uygulanmıştır. Depremin etkisi genelde tavanda çekme şeklinde bir yenilme bölgesinin oluşumuna neden olmaktadır. Ocak seviyesinde topuklarda yenilme bölgesi görülmemekle birlikte, ocak tavan ve tabanından belirli bir derinliğe kadar çekmeden kaynaklanan yenilme bölgeleri oluşmuştur. (Şekil 24). Bu depremde en büyük ivmeler, daha önceki örneklerde olduğu gibi, şevin üst noktasında yüzeyde oluşmakta ve değeri tabana uygulanan en büyük ivmenin 4 katını aşmaktadır. (Nokta 22, Şekil 25). Şekil 11'de de gözlendiği gibi, Tokaido-oki depremi sonrasında tavandan blok düşmeleri gözlenmiştir. Bunun yanı sıra, ocak girişinde serbest yüzey yakınlarındaki çatlaklarda açılmalar meydana gelmiştir. Gözlenen bu olgularla yapılan sayısal analiz sonuçları arasında bir uyumluluk görülmektedir.

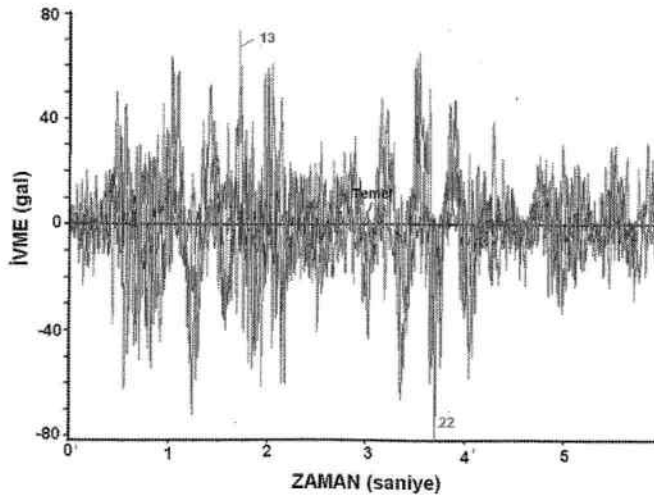
İkinci gerçek deprem uygulama örneği olarak Komaki depreminde K-G yönünde alınan en büyük ivme kaydı düşey yönde girdi dalgası olarak ocak modeline uygulanmıştır. Depremin etkisi genelde tavanda çekme gerilmelerinden kaynaklanan yenilme bölgesi oluşumuna neden olmaktadır (Şekil 26). Ocak seviyesinde topuklarda yenilme bölgesi görülmemekle birlikte, ocak tavan ve tabanından belirli bir derinlikte çekme gerilmelerinden kaynaklanan yenilme bölgesi meydana gelmektedir. Yenilme bölgesi oluşumu Tokaido-oki

depremi sonrası oluşan zonla hemen hemen aynıdır. Komaki depremi sonrasında tavandan blok düşmeleri gözlenmemiştir. Bunun nedeni, büyük bir olasılıkla düşebilecek blokların Tokaido-oki depreminde düşmesine bağlanabilir. Bu depremde en büyük ivmeler, daha önceki örneklerde olduğu gibi, şevin üst noktasında yüzeyde oluşmakta ve değeri tabana uygulanan en büyük ivmenin 2.5 katını aşmaktadır. (Şekil 27). Açıklığın bulunduğu seviyedeki şev kenarında hesaplanan dalga büyütme katsayıları bazı durumlarda yüzeyde elde edilen dalga büyütme katsayılarına yakın, bazen de daha yüksek çıkmaktadır. Ancak madenin şev kenarından uzak bölgelerinde dalga büyütme katsayıları yüzeyde oluşan dalga büyütme katsayılarından genellikle daha az oluşmaktadır.



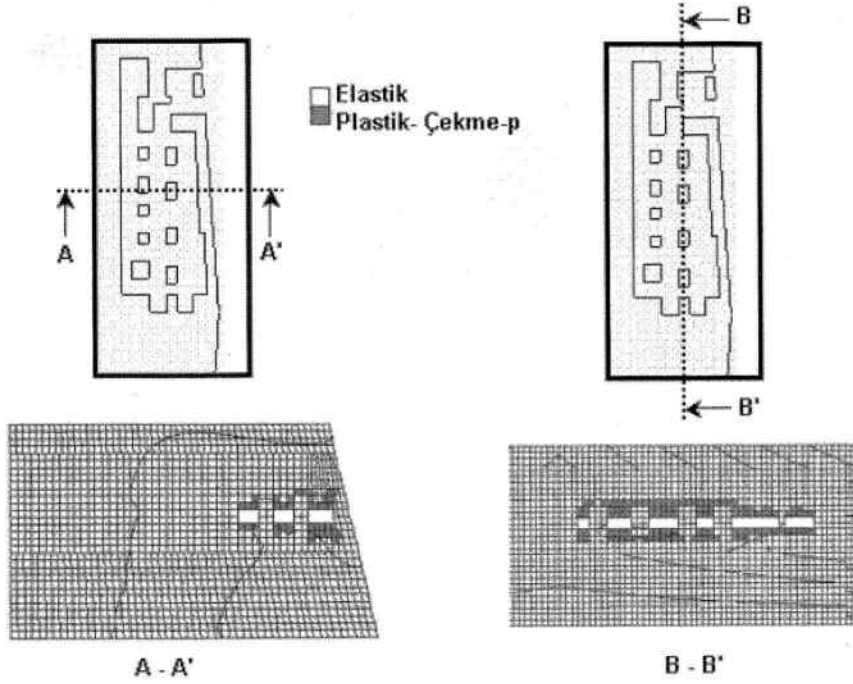
Şekil 24. Tokaido-oki deprem kaydı için ocak çevresinde oluşan yenilme bölgeleri.

Figure 24. Yield zones around mine for the Tokaido-oki earthquake record.

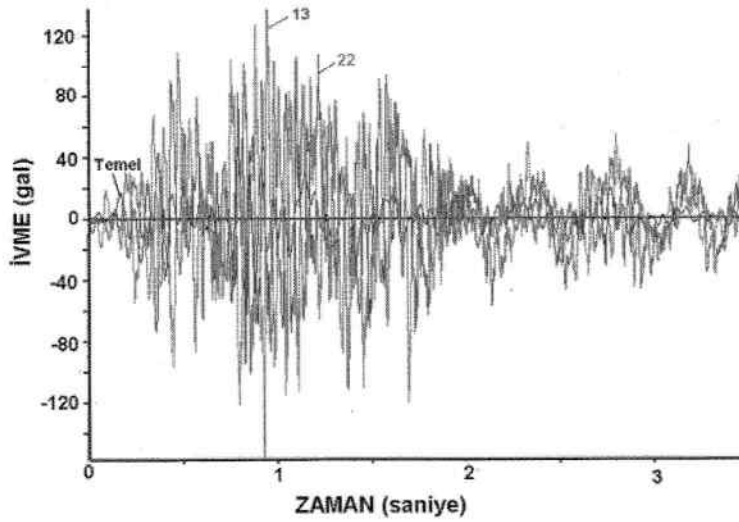


Şekil 25. Tokaido-oki deprem kaydı için seçilen bazı noktalardaki ivme davranışları.

Figure 25. Acceleration responses at selected points for the Tokaido-oki earthquake record.

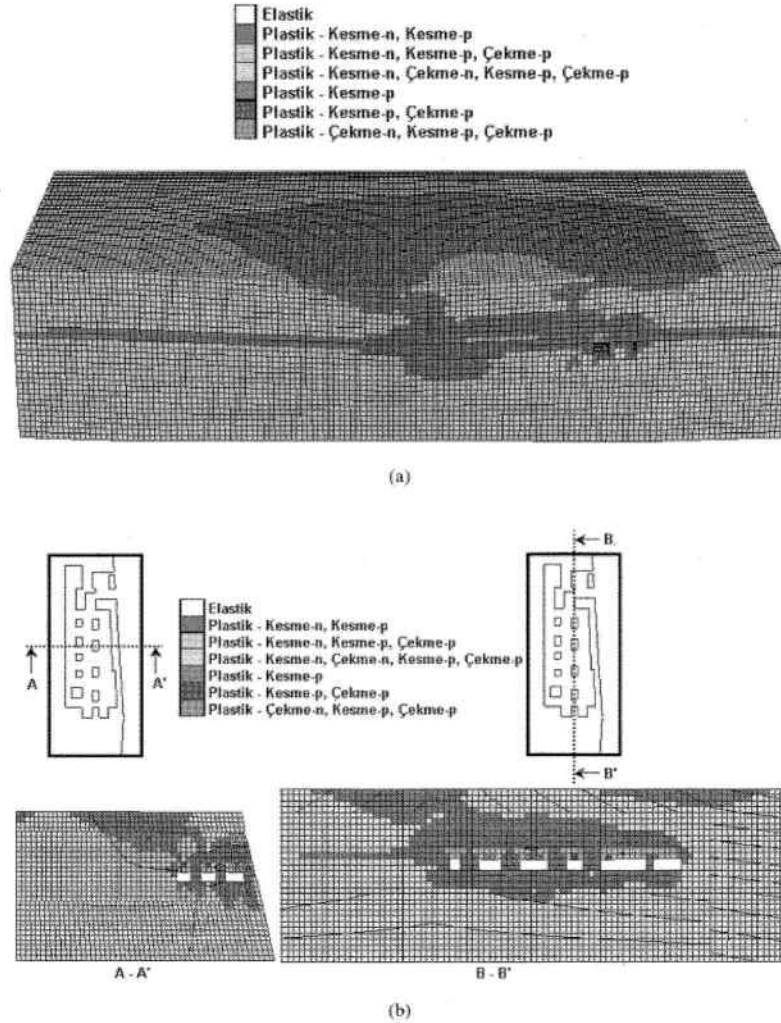


Şekil 26. Komaki deprem kaydı için ocak çevresinde oluşan yenilme bölgeleri.
Figure 26. Yield zones around mine for the Komaki earthquake record.



Şekil 27. Komaki deprem kaydı için seçilen bazı noktalardaki ivme davranışları.
Figure 27. Acceleration responses at selected points for the Komaki earthquake record.

En son uygulamada çevre kayacın uzun süreli dayanım özelliği olarak dayanımının $1/8$ 'e azaltıldığı ve tabana etkiyen ivmenin genliği 80 gal olduğu varsayılmıştır. Yapılan analiz ile elde edilen yenilme bölgesi gelişimi Şekil 28'de gösterilmiştir. Oluşan yenilme bölgesi yeryüzüne ulaşmakta ve geniş bir alanı etkilenmektedir. Bu durumun büyük bir olasılıkla deprem sırasında ocağın toptan göçme durumunu modelleyeceği düşünülmektedir.



Şekil 28. Azaltılmış dayanım özelliklerinde açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi: (a) yenilme bölgesinin üç boyutlu görünümü, (b) DB (A-A') ve KG (B-B') kesitlerinde yenilme bölgesi dağılımı.

Figure 28. Yield zone around the mine using reduced strength properties: (a) three dimensional view of yield zone, (b) yield zone development at EW (A-A') and NS (B-B') cross-sections.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada yaklaşık 40 yıl önce üretim faaliyeti sona eren Mitake ilçesindeki bir linyit ocağının dinamik koşullarda duraylılığı incelenmiştir. Elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

(a) Terkedilmiş maden ocaklarında depremlerde oluşan hasarlar ve duraysızlıklar, fayın hareketinden kaynaklanan kalıcı deformasyonlar ve sarsıntıdan kaynaklanabilir. Duraysızlıklar özellikle sığ derinliklerde tavan göçmesi, ocak içindeki suyun çalkalanarak fışkırması olarak kendini göstermektedir. Ocak derinliğinin artması halinde ise, duraysızlıklar yeryüzünde homojen olmayan tasmanlar şeklinde kendini göstermektedir. Gerçekte gözlenen bu olguların yapılan fiziksel model deneylerinde de doğruluğu sınanmıştır. Önerilen eş yüklü alanlar yaklaşımı yönteminde de bu bulgular kuramsal olarak desteklenmektedir.

(b) Model deneyleri sonucunda, yüzeydeki ivmenin değeri tabana göre 2-3 arasında bir büyütme oluştururken, ocak içindeki büyütmenin değeri 1.1-1.5 arasında değişmektedir. Deprem mühendisliğinde bilinen

elastik zeminlerde yüzeydeki ivmenin temel kayaya göre en az 2 katına ulaşacağı bilgisi de burada sınanmış olmaktadır. Dolayısıyla yüzeydeki büyütmenin ocak içine göre oldukça yüksek olacağı belirlenmiştir.

- (c) Çevre kayaca yerleştirilen elektrik potansiyel (EP) ve akustik emisyon (AE) ölçümlerinden deprem- den önce yerin elektrik potansiyelindeki değişimin akustik emisyon değişiminden çok daha önce başladığı görülmüştür. Bu durum laboratuvarda yapılan örnekler üzerinde elde edilen bulgular ile benzerlik göstermektedir. Bu tür çok parametrelili ölçüm sistemlerinin terkedilmiş ocakların uzun süreli davranışının yanı sıra, deprem sırasında oluşabilecek duraysızlıkların belirlenmesinde yardımcı olabileceği söylenebilir.
- (d) Sayısal analizlere göre, çevre kayacının visko-elastik veya visko-plastik davranış gösterdiği sığ yeraltı açıklıklarında ve yeryüzünde elde edilen ivme dalga genliklerinde 5'ten büyük artışlar oluşabilmektedir. Kayacın tamamıyla elastik davranış gösterdiği (yenilme veya plastik bölgenin oluşmadığı) durum için ise, bu artışların 3-6 kat arasında olduğu belirlenmiştir.
- (e) Açıklıkta oluşan dalga büyütme katsayıları yeryüzünde oluşan dalga büyütme katsayılarından daha düşüktür. Literatürde de bahsedildiği üzere (Geniş ve Gerçek, 2000; Aydan vd., 2004), çok büyük depremler dışında, yeraltı açıklıklarının yerüstü yapılarından daha güvenliği olabileceği bu çalışmada da bir kez daha ortaya konmuştur.

Kaya kütlelerinin dinamik yükler sırasında yeryüzünde ve yerüstü yapılarında gösterecekleri davranışın belirlenmesi amacıyla ivme ölçerler sıkça kullanılmaktadır. Bununla birlikte, yeraltı yapılarında ivme ölçümleri oldukça azdır. Özellikle uzun süreli hizmet verecek yeraltı yapılarında ivme ölçerlerin yerleştirilmesi yapının dinamik tepkisini belirlemek açısından önem taşımaktadır. Bu amaçla incelenen madene ivme ölçerler yerleştirilerek gözlemlere başlanmıştır. Ancak bölgede şu ana kadar oluşan depremlerin büyüklüğünün küçük olması nedeniyle söz konusu depremlerin etkisi bu çalışmada değerlendirilmemiştir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar; laboratuvar deneyleri için yardımcı olan birinci yazarın öğrencilerine (özellikle Y.Ohta'ya), yerinde ölçümleri birlikte gerçekleştirdiği Nihon Üniversitesi'nden Prof.Dr. H. Tano'ya, hem lojistik destek hem de araştırma fonunu sağlayan Tobishima Firması Nagoya bürosundan K. Sugiura, A. Sakamoto, N. Yamada'ya ve bu çalışmaya başından beri destek veren Nagoya Üniversitesi'nden Emekli Prof. Dr. T. Kawamoto'ya teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- Aydan, Ö., 1994. The dynamic shear response of an infinitely long visco-elastic layer under gravitational loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 13, 181-186.
- Aydan, Ö., 2000. A stress inference method based on GPS measurements for the directions and rate of stresses in the earth' crust and their variation with time. *Yerbilimleri*, 22, 223-236.
- Aydan, Ö. ve Geniş, M., 2004. III. Amenhotep kaya mezarının (Mısır) çevre kayasının özellikleri ve açıklıklarının duraylılığı. VII. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu A. Ceylanoglu ve B. Erdem (eds.), TUKMD, Sivas, 191-202.

- Aydan, Ö., and Kawamoto, T., 2004. The damage to abandoned lignite mines caused by the 2003 Miyagi-Hokubu earthquake and some considerations on its causes, 3rd Asian Rock Mechanics Symposium, Kyoto, 525-530.
- Aydan, Ö., Minato, T., and Fukue, M., 2001. An experimental study on the electrical potential of geomaterials during deformation and its implications in Geomechanics, 38th US Rock Mech. Symp., Washington, Vol.2, 1199-1206.
- 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, Korea, 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., Ogura, Y., and Kawamoto, T., 2004. A research on dynamic characteristics of areas with abandoned mines. 15th Central Japan Geotechnical Symp. (Geotechnical Environmental Problems) (in Japanese). Nagoya, 19-24.
- 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., Tano, H. ve Geniş, M., 2008. Terkedilmiş oda-topuk yeraltı linyit ocağının uzun süreli duraylılığının değerlendirilmesi, Türk Kaya Mekaniği Dergisi, TUKMD, Ankara, 16 s.
- Erguvanlı, K., and Goodman, R.E., 1972. Applications of models to engineering geology for rock excavations, Bulletin of Association of Engineering Geologists, 9,1.
- Geniş, M. ve Gerçek, H., 2000. Yeraltı açıklıklarının dinamik tasarımı, V. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu, Isparta, TUKMD, 65-72.
- Geniş, M. ve Gerçek, H., 2002. Çevre kaya kütlelerinin mekanik özelliklerinin derin yeraltı açıklıklarının sismik duraylılığına etkisi, VI. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, C. Şensöğüt ve İ. Özkan (eds.), TUKMD, Konya, 259-266.
- Itasca, 2005. FLAC3D-Fast Lagrangian Analysis of Continua-User Manuel (dynamic option) (Version 2.21), Minneapolis, Itasca Consulting Group Inc.
- Kawamoto, T., Obara, Y., and Ichikawa, Y., 1983. A base friction apparatus and mechanical properties of model materials (in Japanese), J. Min and Metal. Inst. of Japan, 99, 1-6.
- K-Net 2004, 2005. Strong motion records of 2004 Tokaido-oki and 2005 Komaki earthquakes. NIED, <http://www.bosai.ac.jp>
- Lee, C.F., 1987. Performance of underground coal mines during the 1976 Tangshan earthquake, Tunneling and Underground Space Technology, 2, 199-202.

Sultanhanı (Aksaray) Beldesi tuz örneklerinin sünme davranışlarının incelenmesi

Investigation of creep behavior of the rock salt samples from Sultanhanı (Aksaray)

Deniz ARIKAN, Mustafa Gürel ŞENYUR

Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 06800 Beytepe, ANKARA

ÖZ

Sünme davranışı, malzemelerin sabit gerilme altında zamana bağlı olarak gösterdiği deformasyon olup, kullanımı uzun sürecek yeraltı açıklıklarında incelenmesi gereken bir davranış türüdür. Doğalgaz tüketimindeki mevsimlere bağlı olarak ortaya çıkan değişikliklerden dolayı depolama bir gereksinim haline gelmiştir. Doğalgazın depolanabilmesi çok geniş hacimlerde boşluklar gerektiği için, tuz domlarının içine depolama yoluna gidilmektedir. Bu çalışma, Aksaray Sultanhanı beldesi civarındaki yeraltı tuz domlarının içine yapılması planlanan doğalgaz deposu için bu bölgeden 1100 – 1200 m derinlikten alınan tuz karotları üzerinde yapılmıştır. Çalışmada kaya tuzunun uzun-süreli (sünme) davranışının belirlenmesi için tek-eksenli sünme deneyi yapabilen bir sünme deney düzeneği geliştirilmiş ve bu düzeneğe kullanılarak kaya tuzu örneklerinin sünme deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda kaya tuzuna ait sünme grafikleri çizilmiş olup, grafiklerden elde edilen sünme oranları değerlendirilerek kaya tuzunun uzun-süreli dayanım değeri 4 MPa olarak bulunmuştur.

Anahtar Sözcükler: Sünme, kaya tuzu, sünme düzeneği, sünme oranı.

ABSTRACT

Creep behaviour is the time-dependent deformation of materials under constant load and it is necessary to investigate this behaviour in underground openings which will be used for long time. Due to seasonal variations in natural gas consumption, the construction of storage caverns becomes necessary. For the natural gas storage required large openings, it is stored in salt domes. This study was carried out on salt samples taken from the field located at the vicinity of Sultanhanı in the province of Aksaray at the depth of 1100m – 1200m. In the study a test apparatus capable of conducting uniaxial creep tests was developed to determine the long term behaviour (creep) of rock salt. By using this apparatus, creep experiments of the samples were done. By combining the results of the experiments creep curves of salt samples have been drawn and the evaluation of the creep ratio results obtained from curves, the long term strength of rock salt was found as 4 MPa.

Keywords: Creep, rock salt, creep apparatus, creep rate.

1. GİRİŞ

Bilindiği üzere, ülkemiz, petrol ve doğalgaz yönünden dışa bağımlıdır. Günümüzde gerek ısınma gerekse endüstri de doğalgaz sıkça kullanılmaktadır. Türkiye, yeterli derecede kömür rezervlerine sahiptir, ancak kalite ve oluşum açısından özellikle ısınmada kullanıma uygun değildir. Ayrıca, doğalgaz tüketimi de son yirmi yılda %17'den %23'e yükselmiştir. Bu çalışma, geniş kapsamlı olarak planlanan bir projenin parçasıdır. Bu proje, ülkemiz için güncel bir konu olan doğalgaz depolaması ile ilgilidir. Doğalgaz deposu olarak kullanılabilecek yeraltı ortamları, tuz domları ve işletilmiş petrol rezarvarlarıdır. Seçilecek bölgenin tektonik açıdan sakin, depremden etkilenmeyen ve yerleşik alan dışında olması gerekir. Bu nedenle, proje ve çalışma konusu olarak yeraltı doğalgaz depolaması için Tuz Gölü Havzası Sultanhanı/Aksaray bölgesindeki tuz domları düşünülmüştür.

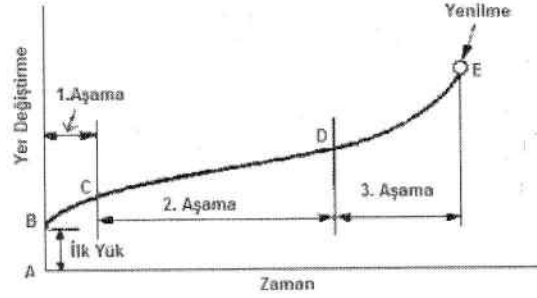
Yeraltı depolarının uzun süre duraylı kalmaları gerektiğinden uzun süreli duraylılık kavramı gündeme gelmektedir. Dolayısıyla, malzemenin sünme değişkenleri belirlenmelidir. Sünme davranışı özel bir deney düzeneği gerektirir. Tuzun yapısından dolayı mekanik özellikleri ve davranışı basit olmayıp doğru olarak tanımlanması zordur. Tuz, yükleme koşullarının ve yükleme süresinin bir fonksiyonu olarak elastik ve elastik olmayan bir davranış gösterir. Tuz bulunduğu bölgeye göre farklı davranışlar gösterdiği için, şimdiye kadar tuzun sünme davranışı bir çok kez incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Literatürde değişik bölgelere ait tuzların sünme davranışları için ilk benzeşimler Mellegard vd. (1981) tarafından araştırılmıştır. Ancak bu araştırmacılar, genel olarak kesin olmayan sonuçlar elde etmişlerdir. Tuzun sünme davranışı ile ilgili daha sonraki çalışmalar ise; Kelsall ve Nelson (1983), Hunsche (1992), Albrecht (1993), Hunsche (1994), Jeremic (1994), Hunsche ve Schulze (1996), Cristescu ve Hunsche (1998), Hunsche ve Hampel (1999) tarafından gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmanın amacı, tuz ve benzeri malzemelerin sünme özelliklerinin belirleneceği bir sünme deney düzeneği üretmek ve Sultanhanı (Aksaray) civarındaki tuz örnekleri üzerinde mekanik deneyler yaparak tek eksenli sıkışma dayanımını ve tek eksenli sünme değeri gibi mekanik büyüklüklerini belirlemektir. Böylece analitik ve/veya sayısal yöntemlerle yapılacak yeraltı depo ve duraylılık analizleri için veri temin edilmesi öngörülmüştür.

2. MALZEMELERİN GENEL SÜNME DAVRANIŞI

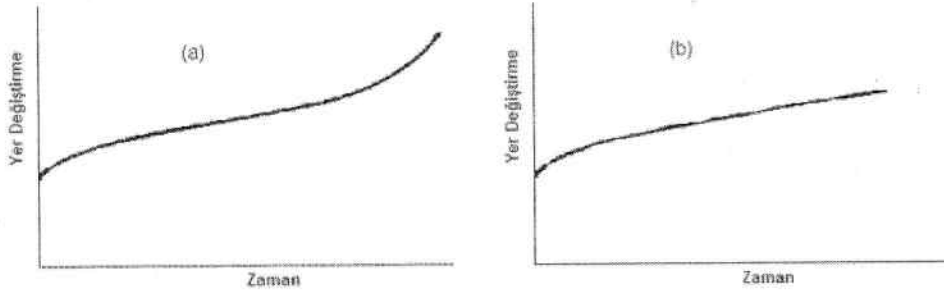
Malzemenin zamana bağlı sabit yük altındaki davranışına sünme denir. Mekanikte genellikle malzeme davranışı kısa zaman aralığı ve uzun zaman aralığı şeklinde iki grupta incelenir. Malzemenin zamana bağlı davranışı uygulanan sabit yükün şekline bağlıdır. Bu sabit yük; sıkışma, çekme ve eğilme yükleme olarak uygulanabilir. Bu çalışmada, tek eksenli sıkışma yükü altındaki zamana bağlı deformasyon incelenmiştir. Uygulanan sıkıştırma yükü tuzun tek eksenli sıkışma dayanım değerlerinin altındaki yük seviyelerinde olmalıdır (Ladanyi, 1993). Sünme çalışmalarındaki genel yöntem, örneğe sabit yük uygulanması ve zamana bağlı olarak değişen deformasyonların ölçülmesidir. Şekil 1'de sünmeye maruz kalmış bir malzemenin zamana bağlı deformasyon grafiği görülmektedir. Şekil 1'de gösterildiği gibi, sünme üç aşamadan oluşmaktadır. Bunlar; B-C aralığı sünmenin birincil veya geçici sünme, C-D aralığı sünmenin ikincil veya viskoz sünme ve D-E aralığı üçüncül sünme aşamalarıdır. Birincil aşamada, malzeme tipine ve gerilme seviyesine bağlı olarak, bir çok mekanizma gelişmektedir (Cedric, 1961). Bu aşamada, sünme oranı artışları hızlıdır ve ikincil aşamaya geçiş zamanına yaklaştıkça hızı azalarak artmaya devam eder. İkincil sünme aşaması ise, birincil sünme ile üçüncül sünme aşamaları arasındaki geniş bölümü kapsar ve genellikle doğrusal bir deformasyon-zaman ilişkisi gösterir. Viskoz akış, elastik olmayan yer değiştirmelerin doğal halidir. Bu tip yer değiştirmelerin miktarı sıcaklık ve gerilme ile değişir. Düşük gerilme değerlerinde ve düşük sıcaklıklarda sıcaklık akış sıcaklığının üstünde bir değere ulaşmaya veya yer değiştirmelerin alacağı yüksek gerilme değerlerine değin gözlemlenmezler (Cedric, 1961). Çekme kuvveti altında, kesit alanı sünme devam ettikçe azalır. Bu durum, yükü kesit alanı ile orantılı olarak azaltarak engellenebilir ve gerilme sabit olacak şekilde ayarlanabilir. Sabit yük ve sabit gerilme

için yer değiştirme-zaman grafiği Şekil 2’de gösterilmiştir. Yüksek ve sürekli ısıl etkiler malzemeleri yumuşatır ve malzemelerin yüke karşı gösterdikleri direnci azaltır. Yüksek ve düşük sıcaklıklardaki sünme davranışları Şekil 3’de görülmektedir (Cedric, 1961).



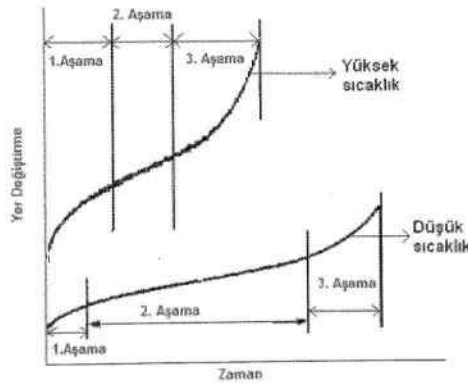
Şekil 1. Sünme grafiği.

Figure 1. Creep curve.



Şekil 2. (a) Sabit yük ve (b) sabit gerilmeler için sünme grafiği.

Figure 2. Creep curve under (a) constant load and (b) constant stress.



Şekil 3. Yüksek ve düşük sıcaklıklardaki sünme grafikleri.

Figure 3. Creep curves at high and low temperatures.

3. TUZUN SÜNMESİ

Tuzun visko-plastik oluşumundan dolayı mekanik özellikleri ve davranışı karmaşık olup, doğru olarak tanımlanabilmesi için bir çok deney yapılması gerekmektedir. Tuz; gerilme şiddetine, yükleme koşullarına

ve yükleme süresine bağlı olarak elastik ve elastik olmayan bir davranış göstermektedir. Tuzun sünme özelliklerinin değişkenliği ve bunları etkileyen faktörler (sıcaklık ve nem gibi) zamana bağlı deformasyon ile gözlemlenebilir. Bu özellik yeraltı boşluklarının tasarımında ve zemin kontrolünde büyük bir öneme sahiptir. Tuzların sünme özellikleri içerdikleri minerallere göre değişiklik göstermektedir. Benzer tuz yataklarındaki kaya tuzlarının farklı sünme davranışları benzer yollarla açıklanabilir. Dryer (1973), değişik kaya tuzlarında düşey eksenli sabit yük altındaki sünme deneyleri yapmıştır. Örneğin, yüksek miktarda anhidrit içermesinden ve deformasyon sertleşmesinden dolayı, yaşlı tuz kayaları daha yüksek bir dayanım göstermiştir.

Kaya tuzu, sünme deneylerinde kullanmak için ideal bir malzemedir. Nedeni ise sünme davranışını ve plastisiteyi kristal ve tane yapısının karışık olmasına rağmen iyi bir şekilde göstermesidir. Kristal ve tane yapısı içindeki bozuklukların hareketi ile tuzda yer değiştirmeler meydana gelir. Bu bozuklukların kayması ve tırmanması sünmenin yavaşlaması ve tane boyu sınırlarının kayması olarak değerlendirilebilir. Tane yapısı içindeki bozuklukların kayması yüksek gerilme değerlerinde ve nispeten düşük sıcaklıklarda baskındır. Kristal yapıdaki bozukluklar birbirleri ile temas yüzeyleri üzerinde sıraya girerek tane sınırları ile küçük bir açı yaparlar. Bu durumda tanelerin ortaya çıkması sağlanır. Sünmenin ikinci aşaması boyunca alt tanelerin ortaya çıkması hacimsel bir deformasyon göstermez veya çok az bir deformasyon gösterir. Yer değiştirme oranı ve sıcaklıktaki azalma ile sünmenin yavaşlaması baskın hale gelir. Ortalama tane boyu, tane yapısındaki bozuklukların ortalama yer değiştirme uzaklıklarından daha büyük olduğundan, tane sınırlarının hızlı genişlemelerinden dolayı sünme boyunca oluşan yer değiştirmeler üzerinde bir etkisi yoktur. Tane sınırlarında kayma meydana gelebilmesi için yeteri kadar küçük boyutlu taneler ve küçük gerilmeler gereklidir (Jeremic, 1994).

4. SİSTEM VE DENEYLER

Deneylerde kullanılan örnekler Sultanhanı (Aksaray) civarında YGD1 ve YGD2 isimli iki kuyu açılarak 1000-1200m derinlikten BOTAŞ (Boru Hatları ile Petrol Taşıma Şirketi) tarafından alınmıştır. Alınan karotlar 10 cm çapında 1 m boyunda olacak şekilde sandıklara yerleştirilmiştir. Deneyler için 10 cm çapında 20 cm boyunda yaklaşık 30 adet karot kullanılmak istenmiştir. Ancak karotların sınırlı sayıda olmasından dolayı ve tekrar karot alınması gibi bir durum söz konusu olmadığından bu işlemde vazgeçilmiş ve karotlardan BX (42 mm) çapında deney örneklerinin hazırlanmasına karar verilmiştir. Bu işlem için, tuzda karot alabilecek şekilde ve susuz kesmeye uygun karotiye yapılmıştır.

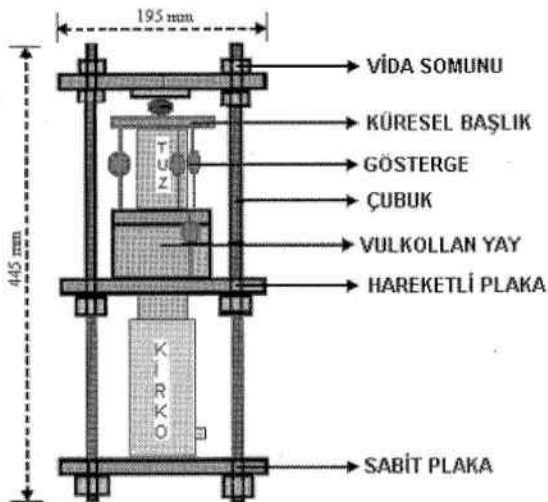
BOTAŞ'dan YGD1 kuyusunun 1047 m ve 1048 m'leri ve YGD2 kuyusunun 1102 m ve 1103 m'lerinden alınmış olan karotlar, karot alma makinasında karot alma yönüne dik olacak şekilde yerleştirilerek 42 mm çapında karotlar alınmıştır. Karot alma esnasında karotiyerde aşırı ısınma gözlemlenmiştir. Karotiyerdeki bu ısınma karot alma işlemini durdurmuştur. Bu durumda karot alma makinasına hava soğutma sistemi bağlanmıştır. Karotiye hava soğutma sistemi ile soğutularak karot alma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Düzenek yapıldıktan sonra sünme deformasyon ölçümlerinin daha uygun şekilde yapılması ve yükleme kontrolünün daha iyi sağlanması için incelenmiş ve değişiklikler yapılmıştır. Sünme çerçevesinde örnek üzerine gelecek sabit basıncı sağlamak için vulkollan yay kullanılmıştır. Vulkollan yay-yüklemeli sıkıştırılmış sünme çerçevesinin özellikleri aşağıda verilmiştir.

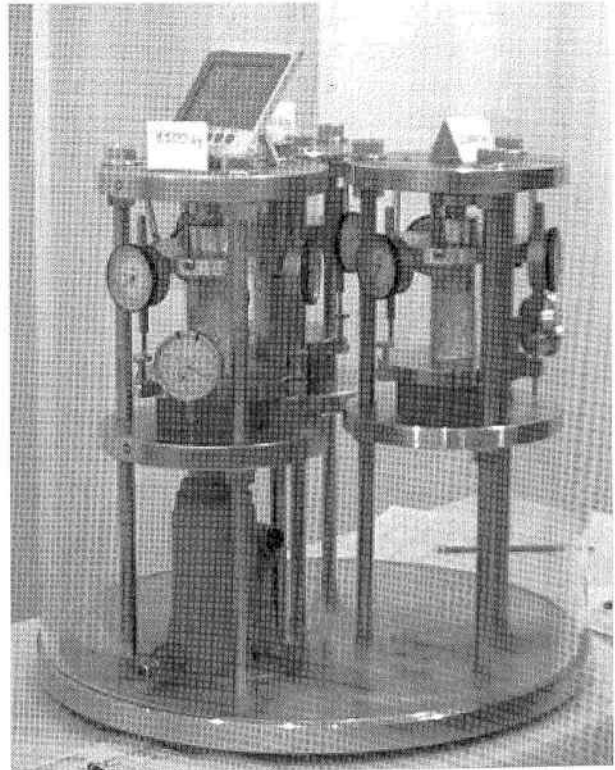
- (i) Tuz domları yeraltında üç yönde de sıkıştırıcı gerilmelere maruz kalmaktadır. Bu gerilmeler altında tuzun en zayıf dayanım gösterdiği gerilme sıkışma gerilmesidir. Çünkü, üç eksenli sıkışma gerilmesinde yatay olarak etkiyen gerilme bileşenleri tuzun dayanımını arttırmaktadır. Bu nedenle laboratuvarında kullanılmaya uygun sünme sistemi sıkıştırma tipinde olmalıdır.
- (ii) Bu çalışmada kullanılan vulkollan yay-yüklemeli sünme deney düzeneği, C 512-02 ASTM (ASTM, 2002) standardında tanımlanan sünme deney düzeneği üzerinde değişiklikler yapılarak üretilmiştir. ASTM

standardında, (ASTM, 2002) tanımlanan sünme deney düzeneği sayıları 2 ile 5 arasında değişen silindirik şekilli örnekler üst üste konabilecek şekilde tasarlanmıştır. Tuz örneklerinin bu şekilde üst üste konması sonucu aşırı sünme birim deformasyonlarının oluşacağı ve uygulanan yükte azalmaya neden olacağı düşünülmüştür. Ayrıca bu şekildeki yüklemelerde örnekler bükülme momentine maruz kalacaklardır. ASTM standardında belirtilen sünme deney düzeneği daha fazla örnekle deney yapılmasına olanak sağlamaktadır. Sünme çerçevesi, daha kullanışlı ve taşınması daha kolay olacak şekilde imal edilmiştir. Bu çerçeve taşınabilir bir düzenek oluşu nedeniyle rahatça taşınabilir ve kontrollü hava koşulları altında korunabilir. Çalışmada kullanılan sünme deney düzeneklerinin tasarımı daha küçük ve sadece tek bir standart örnek kullanılacak şekilde düşünülmüştür. Böylelikle ASTM standardında (ASTM, 2002) belirtilen eksenel olmayan yük sorunu önemsiz hale getirilebilir.

- (iii) Vulkollan-yay yüklemeli çerçevede elektrik ve hidrolik kontrollü cihazlar kullanılmamıştır. Bu durum laboratuvarda olabilecek elektrik kesintilerine karşı ek yarar sağlamaktadır.
- (iv) Tasarlanan ve üretilen sünme çerçevesinde 42 mm çapında 84 mm boyunda silindirik şekilli örnekler kullanılarak sünme deneyleri yapılmıştır.
- (v) Çerçeveye uygulanan yük 5 ton kapasiteli bir hidrolik pompa ile sağlanmıştır. Yükün kontrolü için hidrolik pompaya basınç dönüştürücü ile bu dönüştürücüye bağlı bir göstere bağlanmıştır. Basınç dönüştürücü içinde dairesel kesitli rozet tipli birim deformasyon ölçerler kullanılmıştır.
- (vi) Sünme deneyinde kullanılan 3 adet sünme deney düzeneği, deney ortamındaki çevresel koşullarda oluşacak kısa süreli değişimlerden sünme deneyinin etkilenmemesi için fiberglastan yapılan silindirik şekilli bir koruma kabini ile kapatılmıştır (Şekil 4 ve Şekil 5).



Şekil 4. Sünme deney düzeneğinin şematik gösterimi.
Figure 4. Schematic view of the creep apparatus.



Şekil 5. Sünme deney düzeneği.
Figure 5. Creep apparatus.

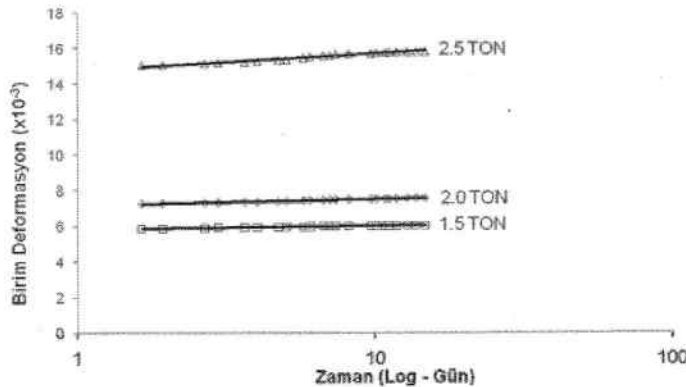
- (vii) Sünme deneyi boyunca koruma kabini içindeki sıcaklık ve nem değerlerinin ölçülmesi için sıcaklık ve nem ölçer cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz, bulunduğu ortamdaki en düşük ve en yüksek nem ve sıcaklık değerlerini otomatik olarak kaydetme özelliğine sahiptir.

Sünme deneylerini içeren laboratuvar çalışmaları aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır.

- (i) Silindirik şekilli tuz örneklerinin deney için hazırlanması.
- (ii) Örneklerin belirlenen sabit yük değerine kadar yüklenmesi. Örneklerin sünme deformasyonları-nın kaydedilmesi

Alınan tuz karotlarının alt ve üst kısımları birbirine paralel ve düşey eksenlerine dik olacak şekilde düzeltilmiştir. Sabit yük seviyeleri, 3 örnekte sırasıyla; tek eksenli sıkışma dayanımının 0.36, 0.48 ve 0.6 katları olacak şekilde 1.5 ton, 2 ton ve 2.5 ton olarak belirlenmiştir. Örnek, sünme deney düzeneğinin içine yerleştirilerek belirlenen yük seviyesine kadar 5 tonluk hidrolik krika ile yüklenmiştir. Sünme deney düzeneğinin kontrolü ve tuzdaki iç gerilmelerin ihmal edilebilmesi için sistem iki kez 3 tona kadar yüklenmiş ve sonra yük kaldırılmıştır. Asıl yüklemeye bu işlemten hemen sonra başlanılmış ve yük düzenli olarak istenen değere kadar artırılmıştır. Belirlenen yük seviyelerine kadar sünme deney düzeneği yüklenmiş ve vulkollan yaydaki deformasyonlar kaydedilmiştir. İstenen yük seviyesine ulaşıldıktan sonra hareketli plaka sabitlenerek vulkollan malzeme ve örneğin sıkıştırılmış konumda kalmaları sağlanmıştır. Daha sonra hidrolik krika sünme deney düzeneğinden ayrılmıştır. Bu durumda uygulanan yükteki değişimler göstergeden okuma alınarak kontrol edilmiş ve gerektiğinde vidalar tekrar sıkılaştırılmıştır. Bu ayarlama ve kontrollerden sonra örneklerdeki ilk deformasyon değerlerinin okuması alınarak kayıt edilmiştir. Bu işlemler, üç sünme deney düzeneğinde de belirlenen koşullar ve zaman aralıklarında tekrarlanmış ve deney süresince belirlenen zaman aralıklarında okumalar alınmıştır.

Tek eksenli sıkışma dayanımı esas alınarak belirlenen yükler altında sünme deneyine tabi tutulan tuz karotları, her bir yük seviyesinde farklı anlık birim deformasyonlar göstermiştir. Sünme aşamalarının tamamında gözlenen sünme davranışları farklı yükler altında farklı sünme eğrilerinin elde edilmesine neden olmuştur. İlk iki yük seviyesinde birbirlerine çok yakın sünme oranı değerleri elde edilirken, son yük seviyesinde sünme oranı diğerlerine göre biraz daha büyük çıkmıştır. Her üç yük seviyesi için ortalama sünme birim deformasyon değerleri Şekil 6'da gösterilmiştir.

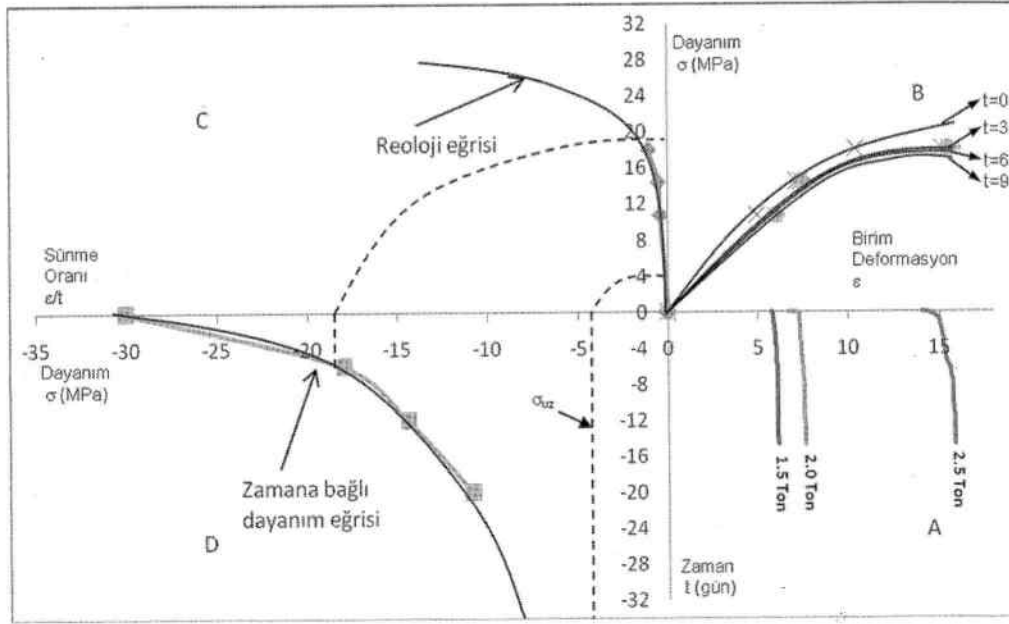


Şekil 6. Her üç yük seviyesi için birim deformasyon – zaman grafiği.

Figure 6. Unit deformation vs. time graph at each three load level.

Ladanyi (1993)'nin yeraltı açıklıkları etrafındaki kayaların zamana bağlı olarak dayanımlarını belirleyen çalışmasından yararlanılarak, birim deformasyonun sıfır olduğu nokta bulunmaya çalışılmıştır. Şekil 7'deki

grafik; A bölgesinde örneklerin sünme, B bölgesinde örneklerin kısa süreli deneylerdeki dayanım – birim deformasyon, C bölgesinde örneklerin dayanım/sünme oranı ve D bölgesinde ise dayanım zaman grafiklerini göstermektedir. Sünme davranışında birim deformasyonun sıfır olması sünme oranını sıfır yapmaktadır. Sünme oranının sıfır olduğu değer, C bölgesindeki reoloji grafiğinin dayanım eksenini kestiği nokta olarak belirlenmiştir. Şekilde gösterildiği üzere, reoloji grafiğinin dayanım ekseninden ayrıldığı noktadaki dayanımı 4 MPa aynı zamanda sünme oranının sıfır olduğu noktayı da göstermektedir. Böylece zamana bağlı olarak deformasyon gözlenmeyecektir. Sürekli duraylılığın sağlanabileceği gerilme değeri σ_{uz} ile gösterilmiştir.



Şekil 7. Reoloji grafiği.
Figure 7. Rheology curve.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sünme deney düzeneği ve deney süresince gösterdiği performans aşağıda değerlendirilmiştir:

- Deney düzeneği kolay bir şekilde taşınabilir ve pratiktir. Ayrıca elektrik güç kaynağından kısmen bağımsız olarak yük seviyelerinde ayarlama yapılabilir.
- Taşıyabileceği yük kapasitesi 5 tondur. Bu nedenle, tuzun sünme davranışının ve sıkıştırıcı kuvvetler altında aynı dayanıma sahip malzemelerin sünme davranışlarının test edilmesinde kullanılabilir.
- Sünme deney düzeneği tek bir standart silindir şekilli örnek için tasarlanmasına rağmen, iki veya daha fazla sayıda örneğin deneyleri deney düzeneği üzerinde küçük değişikliklerle yapılabilir.
- Farklı sabit yükler altında tuzların sünme davranışları ayırt edilebilir şekilde ortaya çıkmıştır.

Yapılan sünme deneyinden elde edilen sonuçlar ve öneriler şunlardır.

- Sultanhanı (Aksaray) beldesindeki tuz domlarından alınan tuz karotlarının genel sünme davranışı belirlenmiştir.
- Uygulanan ilk iki sabit yük altında tuzun gösterdiği anlık sünme birim deformasyonları birbirlerine yakındır. Ancak, uygulanan üçüncü sabit yük seviyesinde anlık sünme birim deformasyon değerlerinde önceki iki

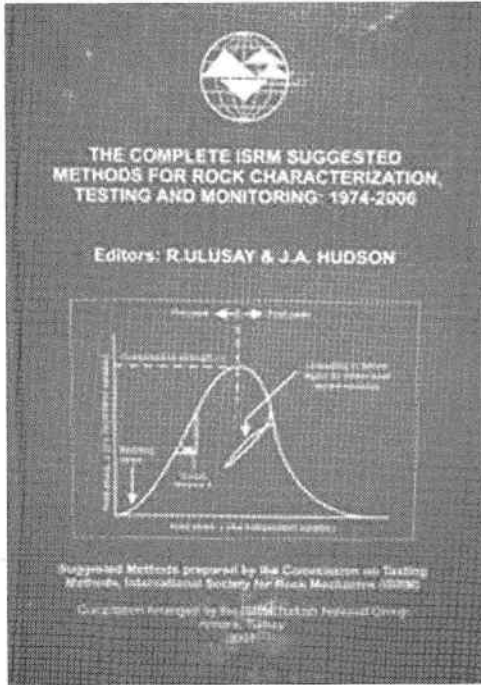
yük seviyesine göre ciddi bir artış görülmüştür. Artışın nedeni, belirtilen yük seviyesinin kullanılan tuz karotlarının taşıyabileceği en fazla yük seviyesine daha yakın olmasından dolayı sünme oranı ve zamana bağlı olarak tuzun gösterdiği deformasyonun artmasıdır.

- c) Deneyler sonucu elde edilen tuzun sünme davranış özellikleri kullanılarak Sultanhanı (Aksaray) civarındaki tuz domlarının içine yapılacak muhtemel bir deponun kullanım ömrü boyunca duraylı kalabileceği tek eksenli limit dayanım değeri $\sigma_{uz} = 4$ MPa olarak bulunmuştur.
- d) Uzun süreli davranışının (sünme davranışı) tam anlamıyla ifade edilebilmesi için, tek eksenli sünme deneylerinin yanı sıra, 3 eksenli sünme deneyleri de yapılmalıdır.
- e) Nem ve sıcaklık gibi parametrelerin değiştirilmesiyle sünme davranışında nasıl bir değişim olduğu incelenmelidir.

KAYNAKLAR

- Albrecht, H., 1993. Results from the application of the laboratory test program for mapping homogenous parts in the Gorleben salt dome. *Geotechnik-Sonderheft, Glückauf, Essen*, pp. 155-158.
- ASTM, 2002. Standard test method for creep of concrete in compression. *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.02., pp. 1-4.
- Cedric, W.R., 1961. *Engineering Material Science*. Wadsworth Publishing Company, Inc., Belmont, California, pp. 280-323.
- Cristescu, N., and Hunsche, U., 1998. *Time Effects in Rock Mechanics – Series: Materials, Modelling and Computation*. John Wiley and Sons, Chichester, 342p.
- Dreyer, W., 1973. Relationship between cubical comprehensive strength and the edge length, Clausthal:Trans. Tech. Publ., pp. 61-63.
- Hunsche, U., 1992. True triaxial failure tests on cubic rock salt samples – experimental methods and results. In: D. Besdo, and E. Stein (eds.), *Visco-Plastic Behaviour of Geomaterials, CISM-Courses and Lectures No. 350*. Springer, Wien, pp. 1-54.
- Hunsche, U., 1994. Creep and failure behaviour of rock salt around underground cavities. *Proceedings of the 16th World Mining Congress (WMC), Sofia (Bulgarien)*, Vol. 5, pp. 217-230.
- Hunsche, U., and Schulze, O., 1996. Effect of humidity and confining pressure on creep of rock salt.-In: *The Mechanical Behaviour of Salt III; Proceedings of the Third Conference, Palaiseau, France*; M. Ghoreychi, P. Berest, H. Hardy, Jr. and M. Langer (eds.), *Trans. Tech. Publications, Clausthal*, pp. 237-248.
- Hunsche, U., and Hampel, A., 1999. Rock salt – the mechanical properties of the host rock material for radioactive waste repository. *Engineering Geology*, 52, 271-291.
- Jeremic, M.L., 1994. *Rock Mechanics in Salt Mining*. pp. 166-244.
- Kelsall, P.C., and Nelson, J.W., 1983. Geological and engineering characteristics of Gulf Region Salt Domes applied to underground storage and mining. In: *Proceedings of the 6th International Symposium on Salt, The Salt Institute, Virginia*, Vol. 1, pp. 519-542.
- Ladanyi, B., 1993. Time-dependent response of rock around tunnels. *Comprehensive Rock Engineering, Volume 2, Chapter 4*, pp. 78-108.
- Mellegard, K.D., 1981. Quasi-static strength and creep characteristics of 100-mm diameter specimens of salt from Avery Island, Louisiana. *RE/SPEC, ONWI-250, Ch.5*.

KİTAP TANITIMI



The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006

(ISBN 978 975 93675 4 1)

Uluslararası Kaya Mekaniği Birliği (International Society for Rock Mechanics-ISRM) Deney Yöntemleri Komisyonu tarafından kabul edilmiş kaya mekaniği laboratuvar ve arazi deney yöntemlerini içeren “Rock Characterization, Testing and Monitoring: ISRM Suggested Methods” başlıklı kitap 1981 yılında ve Ted Brown’un editörlüğünde Pergamon Press tarafından basılarak kaya mekaniği camiasına sunulmuştur. 1981’den bu yana geçen süre içinde kitabın baskısı tükenmiş olup, ayrıca çok sayıda yeni yöntem önerilmiş ve bazı mevcut yöntemler de zaman içinde revize edilmiştir. Gerek bu durum, gerekse yeni önerilmiş yöntemlerin dergilerde yayımlanmış olması, bu yöntemlerin tümünün bir arada toplanıp kitabın yeniden basılması gereksinimini doğurmuştur. Bu gereksinim ISRM ve ISRM Deney Yöntemleri Komitesi tarafından dikkate alınarak, Editörlüğünü Reşat Ulusay (ISRM Deney Yöntemleri Komitesi Başkanı) ve John A. Hudson (ISRM Başkanı, 2007-2011)’un yapmış oldukları “**The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006**” başlıklı kitap Nisan 2007’de Ankara’da basılmıştır. 628 sayfadan oluşan cilt kapaklı bu kitabın basımı ile ulusal ve uluslararası düzeyde dağıtımını ISRM adına **Türk Ulusal Kaya Mekaniği Derneği (TUKMD)** üstlenmiştir. Kitapta, 1974 yılından günümüze değin ISRM tarafından kabul edilmiş 40 adet önerilmiş yöntem sunulmaktadır. Bu yöntemler; **kaya kütlelerinin karakterizasyonu** (kaya kütlelerinde süreksizlik özelliklerinin kantitatif tanımına ilişkin yöntemler ve jeofizik yöntemler), **laboratuvar deneyleri** (indeks deneyler ve dayanım deneyleri), **arazi deneyleri** (deformabilite deneyleri, yerinde gerilme ölçümleri, kuyu jeofiziği, şişme ve dağılma deneyleri, büyük ölçekli üç eksenli arazi deneyi, kaya saplaması ve ankrajı deneyleri) ve **izleme teknikleri** (ekstansometre ve inklinometre ile hareket izleme, hidrolik hücrelerle basınç izlenme, süreksizlikler boyunca hareket izleme ve patlatmadan kaynaklanan titreşimlerin izlenmesi) başlıklı dört ana bölüm altında verilmiştir. Her deney yöntemi; deneyin amacını, kullanılan gereç ve/veya cihazları, deneyin yapılışını, deneyle ilgili hesaplama aşamaları ile deney raporunda yer alması gerekenleri içermektedir. Kitabın bu son baskısında, 1981 baskısında olan ancak daha sonra revize edilmiş yöntemlerin son versiyonlarına yer verilmiştir. Kitap, TUKMD Başkanı Doç. Dr. Aydın Bilgin’den aşağıdaki hesap numarasına ödeme yapıp dekont gönderilmek suretiyle temin edilebilir. Kitap ayrıca, Maden ve Jeoloji Mühendisleri Odalarında da satışa sunulmuştur. Kitabın satış fiyatı TUKMD üyelerine 20 YTL, üye olmayanlara ise 30 YTL’dir.

Talep adresi: Doç. Dr. Aydın Bilgin, ODTÜ, Maden Mühendisliği Bölümü, Ankara

E-posta: abilgin@metu.edu.tr

Hesap Adı: Türk Ulusal Kaya Mekaniği Derneği

Hesap Numarası: İş Bankası ODTÜ Şubesi, Şube Kodu: 4229, Hesap No: 837932

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 taşımaktadır.

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. İki den fazla yazarlı yayınlara metin içinde değinilirken, ilk yazarın adı belirtilmeli diğ erleri 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.

- *Sürel i yayınlar ve bildiriler:*

[Yazar ad(lar)ı, Yıl. Makalenin başlığı. Sürel i 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, Kaçın cı 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 eklemli 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.rocsience.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_a , x^2 gibi).
4. Eşitliklerdeki sembollerle ilgili açıklamalar eşitliğin hemen altındaki ilk paragrafta verilmelidir.
5. Karekök işareti yerine üst indis olarak 0.5 kullanılmalıdır ($\sigma_{c_{mass}} = \sigma_c s^{0.5}$ 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 oranda 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 İtalic 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 güçlüklerle 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 Dizinde 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

