

# **V. ULUSAL KAYA MEKANİĞİ SEMPOZYUMU BİLDİRİLER KİTABI**

**PROCEEDINGS OF THE 5<sup>th</sup> NATIONAL ROCK MECHANICS  
SYMPOSIUM**

**30-31 Ekim 2000**  
**October 30-31, 2000**  
**ISPARTA**



Türk Ulusal Kaya Mekaniği Derneği  
Turkish National Society for Rock Mechanics



S.D.Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi  
Maden Mühendisliği Bölümü  
SDU Engineering and Architecture Faculty  
Department of Mining Engineering

Editörler / Edited by  
Saim SARAÇ  
Lütfullah GÜNDÜZ  
Raşit ALTINDAĞ

**V. ULUSAL KAYA MEKANİĞİ SEMPOZYUMU**  
**BİLDİRİLER KİTABI**

**PROCEEDINGS OF THE 5<sup>th</sup> NATIONAL ROCK MECHANICS**  
**SYMPOSIUM**

**30-31 Ekim 2000**

**October 30-31, 2000**

**ISPARTA**

**Editörler / Edited by**

**Saim SARAÇ**

**Lütfullah GÜNDÜZ**

**Raşit ALTINDAĞ**

**Türk Ulusal Kaya Mekanik Derneği**

**Turkish National Society for Rock Mechanics**

**SDÜ Mühendislik Mimarlık Fakültesi / Maden Mühendisliği Bölümü**

**SDU Engineering and Architecture Faculty / Department of Mining Engineering**

Bu bildirler kitabının yayım hakkı Türk Ulusal Kaya Mekaniği Derneği'ne aittir. Bu kitapta yer alan bildirilerin aynen yayınlanması yazarından yazılı izin almak koşulu ile mümkündür. Alıntı için kaynak göstermek yeterlidir. Bildiriler, bilimsel kurul tarafından seçilmiş olup, yazarları tarafından basıma hazır hale getirilmiştir. Bildirilerin içeriklerinin tüm sorumluluğu yazarlarına aittir.

Bu kitabın basımına katkıda bulunan

BARUTSAN A.Ş.  
NİTROMAK A.Ş.  
ve  
ORİCA-NİTRO A.Ş.'ne  
teşekkür ederiz

**ISBN : 975-93675-0-5**

Baskı . KOZAN OFSET Matbaacılık San. ve Tic. Ltd. Şti.  
Tel : 0.312. 384 20 03 Fax : 0.312. 341 28 60

**ADRES /ADDRESS**

Türk Ulusal Kaya Mekaniği Derneği  
Genel Sekreter  
Prof.Dr. Abdurrahim ÖZGENOĞLU  
Maden Mühendisliği Bölümü  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
06531 Ankara / TURKEY  
Tel: (+90) 312- 210 26 54 – 210 58 16  
Fax: (+90) 312-210 12 65  
E-mail : aozgen@metu.edu.tr

© 2000 Türk Ulusal Kaya Mekaniği Derneği, ANKARA.

Bu Sempozyumun düzenlemesinde katkıda bulunan, aşağıdaki kurum ve kuruluşlara teşekkür ederiz.

Akdeniz Mermer San.ve Tic. A.Ş.  
Barutsan A.Ş.  
Çam Halı A.Ş.  
Fruko-Meşrubat Pazarlama ve Tic.A.Ş.  
Gülkent-Kozmetik Tekstil Turizm ve Gıda San. Tic. Ltd. Ş.  
Isparta Petrol Turizm  
Isbaş – Isparta Belediyesi Bims Yapı Elemanları San. ve Tic. A.Ş.  
Iyaş A.Ş.  
İnterkarbon Ltd. Ş.  
İşmer-Mermer İşleme San. ve Tic. Ltd. Ş.  
Metamar- Mermer Granit Madencilik San. ve Tic. A.Ş.  
Modülmer A.Ş.  
Nitromak Makine Kimya – Nitro Nobel Kimya San. A.Ş.  
Orica-Nitro Patlayıcı Mad. San. ve Tic. A.Ş.  
Soylu Endüstriyel Mineraller Üretim ve Dış Tic. A.Ş.  
Süleyman Demirel Üniversitesi Rektörlüğü

Türk Ulusal Kaya Mekaniği Derneği  
S:D.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi – Maden Mühendisliği Bölümü



## ÖNSÖZ

V. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu'nu Isparta'da düzenlemekten gururluyuz. Sempozyum, yüzyılın felaketi olarak nitelenen Marmara ve Düzce depremlerinin ardından jeoteknik bilim dalının öneminin acı tecrübelerle kendisini vurguladığı bir döneme karşılık gelmektedir. Yeni milenyumun ilk Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu olması, sempozyumun bir diğer anlamlı yanıdır.

Bu sempozyumun amacı, Türkiye'de kaya mekaniği bilim dalındaki araştırmaları özendirmek, ülkemizde yapılan özgün çalışmaları duyurmak ve bilimsel bir ortamda tartışmaktır. Genelde " Jeoteknik " kavramı içinde yer alan kaya mekaniği, zemin mekaniği ve mühendislik jeolojisi disiplinleri arasında iletişiminin ve işbirliğinin geliştirilmesi de amaçlanan hedefler arasındadır. Bu amaca uygun olarak sempozyum, ülke çapında olabildiğince geniş bir şekilde duyurulmaya çalışılmıştır.

Bilimsel Kurulumuzca, 28 bildiri başvurusundan, toplam 44 yazarın katkısıyla hazırlanmış olan 25 bildiri sunuma kabul edilmiştir. Bildirilere bütün olarak bakıldığında; sempozyumun amaçlanan hedeflere ulaştığı değerlendirilebilir.

Sempozyumun gerçekleşmesindeki katkılarından dolayı, TUKMD Yönetim Kurulu'na, SDÜ Rektörlüğü'ne, SDÜ Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dekanlığı'na, gerek bilimsel, gerekse de maddi ve manevi destek veren, adı anılan ve anılmayan tüm kişi, kurum ve kuruluşlara teşekkür ederim.

Prof. Dr. Saim SARAÇ

V. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu

Yürütme Kurulu Başkanı



## **YÜRÜTME KURULU** **EXECUTIVE COMMITTEE**

**Başkan**  
Chairman

Prof. Dr. Saim SARAÇ (SDÜ)

**Başkan Yardımcısı**  
Vice-chairman

Doç. Dr. Lütfullah GÜNDÜZ (SDÜ)

**Sempozyum Sekreteri**  
Symposium Secretary

Yrd. Doç. Dr. Raşit ALTINDAĞ (SDÜ)

**Üyeler**  
Members

Pof. Dr. Abdurrahim ÖZGENOĞLU (ODTÜ)

Prof. Dr. Remzi KARAGÜZEL (SDÜ)

Doç. Dr. H.Aydın BİLGİN (ODTÜ)

Yrd. Doç. Dr. Mahmut MUTLUTÜRK (SDÜ)

Arş. Gör. İbrahim UĞUR (SDÜ)

Arş. Gör. Servet DEMİRDAĞ (SDÜ)

**BİLİMSEL KURUL**  
**SCIENTIFIC COMMITTEE**

- Doç. Dr. H. Aydın BİLGİN ( *Orta Doğu Teknik Üniversitesi* )  
Prof. Dr. Nuh BİLGİN ( *İstanbul Teknik Üniversitesi* )  
Prof. Dr. Naci BÖLÜKBAŞI ( *Orta Doğu Teknik Üniversitesi* )  
Prof. Dr. Hasan GERÇEK ( *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi* )  
Doç. Dr. Lütfullah GÜNDÜZ ( *Süleyman Demirel Üniversitesi* )  
Prof. Dr. Osman Zeki HEKİMOĞLU ( *Dicle Üniversitesi* )  
Prof. Dr. Remzi KARAGÜZEL ( *Süleyman Demirel Üniversitesi* )  
Prof. Dr. Celal KARPUZ ( *Orta Doğu Teknik Üniversitesi* )  
Prof. Dr. Halil KÖSE ( *Dokuz Eylül Üniversitesi* )  
Prof. Dr. Seyfi KULAKSIZ ( *Hacettepe Üniversitesi* )  
Prof. Dr. Yedigir MÜFTÜOĞLU ( *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi* )  
Prof. Dr. Erkin NASUF ( *İstanbul Teknik Üniversitesi* )  
Doç. Dr. Turgay ONARGAN ( *Dokuz Eylül Üniversitesi* )  
Doç. Dr. A. Hakan ONUR ( *Dokuz Eylül Üniversitesi* )  
Prof. Dr. Güner ÖNCE ( *Osmangazi Üniversitesi* )  
Prof. Dr. Abdurrahim ÖZGENOĞLU ( *Orta Doğu Teknik Üniversitesi* )  
Prof. Dr. A. Günhan PAŞAMEHMETOĞLU ( *Atılım Üniversitesi* )  
Prof. Dr. Cem ŞENSÖĞÜT ( *Selçuk Üniversitesi* )  
Prof. Dr. Necdet TÜRK ( *Dokuz Eylül Üniversitesi* )  
Doç. Dr. Reşat ULUSAY ( *Hacettepe Üniversitesi* )  
Doç. Dr. Erdal ÜNAL ( *Orta Doğu Teknik Üniversitesi* )  
Prof. Dr. Erdoğan YÜZER ( *İstanbul Teknik Üniversitesi* )

## İÇİNDEKİLER CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                                                     |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| <b>Önsöz</b><br>Preface                                                                                                                                                                                                             | v    |
| <b>Yürütme Kurulu</b><br>Executive Committee                                                                                                                                                                                        | vii  |
| <b>Bilimsel Kurul</b><br>Scientific Committee                                                                                                                                                                                       | viii |
| <b>Kaya malzemesinin kohezyonunu doğrudan tayin eden deney yönteminin geliştirilmesi</b><br>Testing method development for direct determination of the cohesion of rock material<br><b>O. Yaralı</b>                                | 1    |
| <b>Kaya mekaniği çalışmalarında “Tümünden Gelme” mantığı</b><br>Logic of systematic approach in rock mechanics studies<br><b>M. K. Gökay</b>                                                                                        | 11   |
| <b>İzmir Metrosu Nene Hatun Tüneli üretim parametreleri ve değerlendirilmesi</b><br>Excavation parameters and evaluations of Nene Hatun Tunnel-İzmir Metro<br><b>B. Arıoğlu, A. Yüksel, E. Arıoğlu</b>                              | 21   |
| <b>İzmir-Karşıyaka Tünellerinde kazı ve iş-zaman etüdü</b><br>Excavation and work-time in İzmir-Karşıyaka Tunnels<br><b>Ç. Tatar, M.E. Ertem</b>                                                                                    | 35   |
| <b>Bilecik-Osmaneli Karayolu tünellerinin ön tasarımında ampirik ve analitik yaklaşımlar</b><br>Empirical and analytical approaches for preliminary design of Bilecik-Osmaneli highway tunnels<br><b>T. Çan, A. Ertunç</b>          | 45   |
| <b>Adana-Gaziantep (TAG) otoyolu Kızlaç (T3-A) tüneline oluşan göçükler ve sağlamlaştırma uygulamaları</b><br>Collapses and reinforcement applications in Kızlaç (T3-A) tunnel of Adana-Gaziantep (TAG) motorway<br><b>A. Kılıç</b> | 57   |
| <b>Yeraltı açıklıklarının dinamik tasarımı</b><br>Dynamic design of underground openings<br><b>M. Geniş, H. Gerçek</b>                                                                                                              | 65   |
| <b>Geometrik tasarım değişirgelerinin yeraltı açıklıklarının duraylılığına etkisi</b><br>Effect of geometrical design parameters on the stability of underground openings<br><b>H. Gerçek, M. Geniş</b>                             | 73   |
| <b>Yeraltı radyoaktif depolarının tasarımını etkileyen kaya mekaniği parametreleri</b><br>Rock mechanics parameters effecting the design of underground radioactive waste repositories<br><b>M.K. Gökay</b>                         | 81   |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Tehlikeli atıkların yeraltında depolanmasının değerlendirilmesi ve konunun kaya mühendisliği açısından önemi</b><br>Evaluation of underground disposal of hazardous wastes and the importance of the subject for rock engineering<br><b>A. Özarslan, H. Gerçek</b>                                                                                            | <b>89</b>  |
| <b>Türkiye’de kayaç ve kömür kesmede kullanılan mekanik kazı makinelerinin performanslarının değerlendirilmesi</b><br>An appraisal of mechanically rock end coal excavating machines employed in Turkey<br><b>O.Z. Hekimoğlu, M. Ayhan, B.Tiryaki</b>                                                                                                            | <b>99</b>  |
| <b>Darbeli delme performans analizlerinde kayaç gevrekliğinin rolü</b><br>The role of rock brittleness on analysis of percussive drilling performance<br><b>R. Altındağ</b>                                                                                                                                                                                      | <b>105</b> |
| <b>Ömerler mekanize ayakta yürüyen tahkimatlardaki basınçların izlenmesi ve incelenmesi</b><br>Investigation and evaluation of pressures on powered supports in Ömerler coal mine<br><b>H. Akdaş, N. Destanoğlu, S. Öğretmen, M. Yavuz</b>                                                                                                                       | <b>113</b> |
| <b>Sert kayaçlarda diskli kesicilerle kesme işlemlerinde aşağı ve yukarı kesme yöntemlerinin çekilen akım üzerine etkilerinin incelenmesi</b><br>Investigation of the affect of up and down cutting parameter on the current consumed in the process of cutting with disc in hard rocks<br><b>Y. Özçelik, A.S. Eyüboğlu, S. Kulaksız, İ.C. Engin, A. Özgüven</b> | <b>123</b> |
| <b>Kaya mühendislik yapılarının duraylılık analizlerinde kullanılan kaya yenilme ölçütleri</b><br>The rock failure criteria used at the stability analyses of the rock engineering structures<br><b>İ. Özkan, R. Özel</b>                                                                                                                                        | <b>129</b> |
| <b>Süreksizlik yüzeylerinin matematiksel modellenmesi</b><br>Mathematical modelling of discontinuity roughness<br><b>M.K. Gökay, A. Turanboy</b>                                                                                                                                                                                                                 | <b>139</b> |
| <b>Su içeriğinin kayaçların dayanımı ve elektrik iletkenliğine etkisi</b><br>Effects of water content in electrical conductivity of rock materials<br><b>M.K. Gökay, İ. Özkan</b>                                                                                                                                                                                | <b>145</b> |
| <b>Sıvı karbondioksitle kayaç parçalamanın mekanizması</b><br>The mechanism of rock breakage by liquid carbondioxide<br><b>N.A. Akçın, T. Özkan</b>                                                                                                                                                                                                              | <b>153</b> |
| <b>Sekköy açık kömür ocağında patlatmalardan kaynaklanan yer sarsıntılarının değerlendirilmesi</b><br>Evaluation of ground vibrations induced by blasting at Sekköy surface coal mine<br><b>H.A. Bilgin, S. Esen, M. Kılıç</b>                                                                                                                                   | <b>161</b> |
| <b>Patlatılmış yığının parça boyut dağılımının belirlenmesinde kullanılan sayısal standart fotoğraf yönteminin güvenilirliği</b><br>The reliability of the digital standard photographic method in determination of size distribution of blasted muckpiles<br><b>H.T. Özkahraman</b>                                                                             | <b>171</b> |
| <b>Uzun ayaklarda göçük malzemesinin sayısal yöntemlerle modellenmesi</b><br>Numerical modelling of caved material in longwall panels<br><b>H. Akdaş</b>                                                                                                                                                                                                         | <b>179</b> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                 |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Açık ocakların modellenmesinde geometrik bir yaklaşım</b><br>An approach to open pit geometrical modelling<br><b>A. Turanboy</b>                                                                                                                             | <b>187</b> |
| <b>Elmas tel kesme yönteminde açı değişimine bağlı olarak kesilen alan değerlerinin belirlenmesi</b><br>Determination of cutting area values depending on the change in angle in diamond wire cutting method<br><b>Y. Özçelik, S. Kulaksız, A. Özgüven</b>      | <b>195</b> |
| <b>Pomzadan mamül blok elemanlarında kayaç parametreleri-ses akustiği ilişkisi üzerine teknik bir analiz</b><br>A Technical analysis on the relationship between the rock parameters and the sound acoustics for the pumice blocks<br><b>L. Gündüz, İ. Uğur</b> | <b>205</b> |
| <b>Adapazarı, Düzce Ovalarının jeoteknik özellikleri</b><br>Geotechnical properties of Adapazarı-Düzce Plains<br><b>H. Şişman, F. Koca, M. Altıntaş, S. Basa, S. Saraç, M. Fişek</b>                                                                            | <b>217</b> |
| <b>Yazarlar Dizini</b><br>Authors Index                                                                                                                                                                                                                         | <b>227</b> |



## KAYA MALZEMESİNİN KOHEZYONUNU DOĞRUDAN TAYİN EDEN DENEY YÖNTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

### TESTING METHOD DEVELOPMENT FOR DIRECT DETERMINATION OF THE COHESION OF ROCK MATERIAL

O. YARALI

Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, ZONGULDAK

**ÖZET :** Bu çalışmanın amacı kaya malzemesinin kohezyonunu laboratuvarda doğrudan belirlemek üzere pratik, ucuz ve tekrarlanabilirliği yüksek bir deney yönteminin geliştirilmesi olmuştur.

H/D = 0,5 ve 1 olan homojen malzemeler (alçı ve özel beton karışımları) ve tortul kayaç örnekleri (kumtaşı, kireçtaşı, marn) üzerinde doğrudan kohezyon ve diğer laboratuvar dayanım deneyleri yapılmıştır. Tek ve üç eksenli basınç dayanımı deney verileri kullanılarak ve üç yenilme ölçütüne (Coulomb, Hoek- Brown, Sheorey) göre, bu malzemeler için kohezyon (c) değeri belirlenmiştir. Bu değer, doğrudan kohezyon deneylerinden elde edilen ya da türetilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Eksenel yükleme donanımını kullanan doğrudan kohezyon deneylerinde, H/D = 0,5 olan örneklerin kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

**ABSTRACT :** The objective of this investigation has been to develop a practical, inexpensive and highly repeatable testing method for direct determination of the cohesion of rock material in the laboratory.

Direct cohesion tests and other laboratory strength tests have been performed on homogeneous materials (i.e. plaster and special concrete mixes) and sedimentary rock samples (i.e. sandstone, limestone and marl) with H/D = 0,5 and 1,0. Using the data from uniaxial and triaxial strength tests and according to three failure criteria (Coulomb, Hoek - Brown, and Sheorey), cohesion (c) value has been determined for these materials. These values have been compared with those obtained or derived from the direct cohesion tests. It has been concluded that, in the direct cohesion tests employing the axial loading equipment, the specimens with H/D = 0,5 should be used.

## 1. GİRİŞ

Kohezyon basitçe, normal gerilmenin etkilediği bir düzlem boyunca kaya malzemesinin yenilmesi için gerekli olan kesme gerilmesi olarak tanımlanabilir (ISRM, 1975).

Günümüzde değişik araştırmacılar, kaya malzemesinin saf kesme dayanımını veya kohezyonunu doğrudan belirlemede kullanılan bir takım deney düzenekleri ile yöntemler (tek kesme yüzeyli, çift kesme yüzeyli, darbe kesme deneyi, vb.) önermişlerdir. Protodyakonov. (1969) ve Vutukuri vd. (1974), çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen kaya malzemesinin kohezyonunu doğrudan belirleyen yöntemler ile deney aletlerinin özelliklerini laboratuvar düzeyinde incelemişlerdir. Ayrıca, bu deney yöntemlerinin avantaj ve dezavantajlarını da ortaya koymuşlardır. Gerek Protodyakonov (1969) gerekse Vutukuri vd. (1974), doğrudan kesme deney yöntemleriyle kırılan örneklerin yenilme şekillerini incelediklerinde, örneklerin yenilmelerinin, saf

kesme yenilmesiyle gerçekleşmediğini ve bunun sebebinin de, malzeme içindeki gerilme dağılımlarının düzgün olmadığından kaynaklandığını vurgulamışlardır. Bunun sonucu olarak, kaya malzemesinin kesme gerilmesiyle yenilmesi beklenirken, istenmeyen çekme gerilmeleri sonucu örneklerin yenildiğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca, gerilme dağılımları düzgün olmadığı için elde edilen kesme dayanımı (kohezyon) değerlerinin olması gereken değerlerden ya daha düşük, ya da daha büyük olduğunu da ifade etmişlerdir.

Günümüzde kohezyon değeri halen daha üç eksenli basınç dayanımı deney verilerinden hesaplama yoluyla bulunarak kullanılmaktadır. Kohezyonu doğrudan belirleyen deney aletlerinden elde edilen sonuçların üç eksenli deney verilerine göre hesaplamayla bulunan kohezyon değerleriyle karşılaştırmak yanlış olmaktadır. Çünkü, hesaplamayla bulunan kohezyon değeri kaya malzemesinin gerçek kohezyonu değil, görüntü kohezyonudur.

Kohezyonun tanımının gerektirdiği koşul olan normal gerilmenin etkimediği düzlem boyunca, kesme gerilmesiyle malzemenin yenilmesi durumunda, kohezyon değeri  $\sigma$ - $\tau$  uzayında ordinat eksenini ( $\tau$  eksenini) tek bir noktada kesmesi gerekmektedir. Oysa, üç eksenli basınç dayanım deney sonuçlarına göre çizilen Mohr dairelerinden malzemenin yenilme zarfı çizilerek, kaya mekaniğinde kullanılan yenilme ölçütlerinin eşitliklerinin parabolik veya üstel olma durumuna göre çizilen yenilme zarfları,  $\sigma$ - $\tau$  uzayında ordinat eksenini ( $\tau$  eksenini) birkaç farklı noktadan kesmektedirler. Bu durumda, kohezyon tanımının gerektirdiği koşul sağlanamamaktadır.

Vutukuri vd. (1974)'ne göre, kaya malzemesinin kohezyonunu elde etmek için önerilen yöntemlere bakıldığında, çok pahalı deney ekipmanları gerektirmesine, zahmetli ve uzun zaman almasına rağmen, üç eksenli basınç dayanım deneyinin en iyi yöntem olarak görülmektedir. Bu yaklaşım, yukarıda anlatılan açıklamalar doğrultusunda geçerliliğini korumaktadır. Kohezyonu bulmak için yapılan doğrudan deneylerden elde edilen büyüklüğün kohezyon olup olmadığına açıklık getirmek için güvenilirliği geçerli ve literatürde kabul görmüş, ayrıca kohezyonun tanımına da uygun olacak yöntemlerle karşılaştırma yapılmasının gerekliliği söz konusudur.

## 2. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Öncelikle, literatür gözden geçirilerek daha önceki araştırmacıların kaya malzemesinin kohezyonunu doğrudan belirlemek için geliştirdikleri değişik yüklem düzeneklerine bakılmıştır. Değişik araştırmacılar, bu yüklem düzeneklerinde farklı geometriye sahip (küp, silindir) örnekler üzerinde deneyler yapmışlardır. Protodyakonov (1969), bir çok deney yöntemiyle farklı geometrilerdeki örnekler üzerinde doğrudan kesme/makaslama deneyleri yapmış ve saf kesme yenilmesinin silindir şeklindeki örneklerle daha kolay olduğunu belirlemiştir. Ayrıca, geliştirilen deney aletiyle yapılan deneyler sonucu elde edilecek verilerin diğer deney (tek eksenli basınç dayanımı, üç eksenli basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı deneyi v.s.) sonuçlarıyla karşılaştırılmasında çap farklılığı etkisinden doğabilecek sorunları gidermek amacıyla, deneyler sırasında kaya mekaniğinde standart hale gelmiş olan NX- çapında (54 mm) silindirik kaya örneklerinin kullanılacağı düşüncesi kabul edilmiştir.

Yüklem düzeneklerinde iç yapısı denetlenebilen homojen ve izotropik özelliklerdeki yapay (plastik hamur, alçı ve beton) örneklerle doğrudan kohezyon deneyleri yapılmıştır. Böylece malzeme davranışı ile yüklem düzenekleri arasındaki etkileşim gözlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda (Yaralı, 1999), eksenel yüklem düzeneginin istenilen amaca daha uygun olduğu ortaya çıkmıştır. Kaya örnekleriyle deneyler yapmadan önce, malzemenin petrografik özelliklerini (tane boyu dağılımı, çimento oranı, çimento cinsi v.b.) kontrol edilebileceği örnekler (plastik hamur, alçı, beton) seçilmiştir. Böylece, doğrudan kohezyon deneyinde eksenel olarak kırılmaya çalışılan örneğin yenilme mekanizmasını değerlendirilirken sadece kırılma şekli açısından bakılmasına kolaylık getirilmiştir.

Doğrudan kohezyon deneylerinde, örneklerin kırılma şekillerinden istenilen yenilme durumunun olup olmadığına bakılıp, deneylerin geçerlilik durumları araştırılmıştır. Ancak, laboratuvarında deneyler sırasında her zaman en uygun kırılma şeklini elde etmek mümkün olmamaktadır. Bu sebeple, örneğin kırılma şeklinin geçerliliği değerlendirilirken bir hata payı ( $\epsilon$ ) göz önünde bulundurulmuştur. Kırılan örneğin iki parçası da tüm boy olarak ölçüldüğünde kırılma ekseninden sağ ve/sola 5 mm saptığında örnek geçerli kabul edilmiştir (Şekil 1). Bu durumda, incelenen kırılma düzleminin alanında maksimum % 1,7'lik bir hata oluşmaktadır. Kırılan örneğin parçaları ölçüldüğünde hata payı olarak  $22 \text{ mm} \leq e \leq 32 \text{ mm}$  arasında kalan örnekler kabul edilmiş, bu ölçüler içinde olmayan örnekler de değerlendirme dışı bırakılmıştır. Deneylerde farklı yükseklik/çap oranlarında ( $H/D = 0,5; 1; 1,5; 2; 2,50; 2,75; 3$ ) örnekler kullanılmıştır. Homojen örneklerle yapılan yaklaşık 400 adet deney (doğrudan kohezyon deneyi) kırılma şekilleri açısından değerlendirildiğinde, en uygun örnek kırılmasının  $H/D = 0,5$  ve 1 olan örneklerde gerçekleştiği görülmüştür.

Bulunan bu büyüklüklerin, gerçekten kaya malzemesinin içsel dayanım parametresi olan kohezyon olup olmadığını anlamak için başka mekanik büyüklüklerle karşılaştırılması gerekmektedir. Bu sebeple, aynı malzemelerin tek eksenli basınç dayanımı, dolaylı (Brazilian) çekme dayanımı, üç eksenli basınç dayanımı deneyleri ile eksenel olarak nokta yükü dayanımı indeksi deneyleri yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Deneyler ZEDEM (Zonguldak Endüstri Destekleme Merkezi) Uygulamalı Kaya Mekaniği Laboratuvar'ında yapılmıştır. Deneylerde, Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği'nin (ISRM)

önerdiği standartlarda deney yapabilen servo kontrollü bir pres kullanılmıştır.

Beton örnekler portland çimentosu ve standart kum kullanılarak, ağırlıkça kum/çimento = 3/1, su/çimento = 0,65 oranlarında ve TSE 3068'e (TSE. 1978) göre hazırlanmıştır. Deneylerde kaya örnekleri olarak iki seri kumtaşı, kireçtaşı ve killi marn kullanılmıştır. Bu kaya örnekleri, TTK Karadon Müessesesi Gelik İşletmesi -360/41405 nolu Kuzey Lağımindan kumtaşı, TTK Üzülmüş Müessesesi Asma -Dilaver İşletmesi +56 Kurul Damarı tabantısından kumtaşı, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Hastanesi inşaatının olduğu bölgeden kireçtaşı, Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ) Orta Anadolu Linyitleri (OAL) Müessesesi Beypazarı İşletmesi ara kesme marn örnekleridir.

### 3. LABORATUVAR ÇALIŞMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde üç farklı yenilme ölçütü kullanılmıştır. Bunlar; Coulomb, Hoek - Brown (Hoek ve Brown, 1980) ve Sheorey (Sheorey vd., 1989) yenilme ölçütleridir. Bu yenilme ölçütlerinde tek eksenli ve üç eksenli basınç dayanımı deney sonuçları kullanılmıştır. Yenilme ölçütlerinin eşitliklerine bakıldığında (sırasıyla Eşitlik 1, 2 ve 3), bunların iki parametrelili olduğu görülmektedir. İstatistiksel değerlendirme sırasında, bu eşitliklere uygun olarak bağlanım (regresyon) çözümlemeleri yapılmıştır. Yapılan bağlanım çözümlemeleri sonucunda bu yenilme ölçütlerinde yer alan ve bilinmeyen katsayılar hesaplanmıştır.

$$\sigma_1 = N_0 \sigma_3 + \sigma_c \quad (1)$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m\sigma_c \sigma_3 + s\sigma_c^2)^{1/2} \quad (2)$$

$$\sigma_1 = \sigma_c (1 + \sigma_3 / |\sigma_1|)^b \quad (3)$$

Burada;

$\sigma_c$  = tek eksenli basınç dayanımı (MPa)

$\sigma_1$  = tek eksenli çekme dayanımı (MPa)

$\sigma_1$  = maksimum asal gerilme (MPa)

$\sigma_3$  = minimum asal gerilme (MPa)

H/D = 0,5 ve 1 için yapılan doğrudan kohezyon deneyleri ile dayanım deneyleri sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir.

Bağlanım çözümlemeleri sonucu, Hoek - Brown yenilme ölçütündeki m katsayısı, beton örnekler için yaklaşık 10 civarında iken 1. seri kumtaşı (Karadon)

için 15,5, 2. seri kumtaşı (Asma) için 11,8, kireçtaşı için 20,3 ve marn için 16,7 olarak elde edilmiştir.

Tasarlanan deney aletiyle (Şekil 2) yapılan doğrudan kohezyon deney sonuçları ile yenilme ölçütlerinden hesaplama yoluyla bulunan kohezyon ve içsel sürtünme açıları değerleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Beton - kaya gibi grup grup değerlendirmek yerine yapılan 6 seri deney bir bütün olarak ele alınıp değerlendirildiğinde, deney sonuçlarıyla yenilme ölçütleri arasında daha uygun sonuçlara varılmaktadır. Şekil 3'te hem H/D = 0,5 hem de H/D = 1 olan örnek boyutları için deneysel olarak bulunan kohezyon değerleriyle Coulomb yenilme ölçütünden hesaplanan kohezyon değerleri arasında doğrusal bir ilişki gözlenmektedir. Belirleme katsayısı ( $r^2$ ) H/D = 0,5 için 0,98 iken H/D = 1 için 0,92'dir. Şekil 4'de deneysel olarak bulunan kohezyon değerleriyle Hoek - Brown yenilme ölçütünden hesaplanan kohezyon değerleri arasında da doğrusal ilişki görülmektedir. H/D = 0,5 için belirleme katsayısı  $r^2 = 0,98$  iken H/D = 1 için  $r^2 = 0,92$ 'dir. Şekil 5'de ise Sheorey yenilme ölçütünden hesaplanan kohezyon değerleri ile deneysel olarak bulunan kohezyon değerleri arasında da doğrusal ilişki vardır. Belirleme katsayısı H/D=0,5 için 0,96 iken H/D= 1 için  $r^2 = 0,94$ 'dür.

Laboratuvar çalışmalarında hem homojen hem de kaya örnekleriyle yapılan doğrudan kohezyon deney sonuçlarının üç adet yenilme ölçütüyle karşılaştırıldığında H/D = 0,5 olan örnek boyutunun H/D = 1 olan örnek boyutuna göre biraz daha uygun sonuçlar vermiştir. Bu değerlendirmelerin ışığı altında, H/D = 0,5 olan örnek boyutunun geliştirilen deney aletinde kullanılacak en uygun boyut olduğu sonucuna varılabilmektedir.

### 4. SONUÇLAR

Yapılması kolay, tekrarlanabilirliği yüksek ve maliyeti ucuz bir deney düzeneği ve deney yöntemi geliştirmek amacıyla ön tasarım aşamasında, değişik yükleme düzenekleri (eksenel ve yanal) denenmiştir. Bu düzeneklerde önce, asıl deneylerde kullanılması düşünülen kaya örneklerini temsilen plastik hamurdan yapılmış silindirik örnekler kullanılmıştır. Böylece yükleme düzenekleri ile örnek arasındaki etkileşimin ne şekilde gerçekleştiği gözlenmiştir. Benzer çalışma alçı ve beton örneklerle de yapılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda, eksenel yükleme düzeneğinin istenilen amaca daha uygun olduğu ortaya çıkmıştır.

Laboratuvarında önce, tasarlanan doğrudan kohezyon deney aletiyle iç yapısı denetlenebilen homojen örnekler üzerinde deneyler yapılmıştır. Gerek alçı gerekse beton örneklerle yapılan doğrudan kohezyon deneylerinde;  $H/D = 1,5$  ve daha büyük örnek geometrilerinde beklenen kırılma gerçekleşmemiştir. Homojen örneklerle yapılan doğrudan kohezyon deneylerinde kırılma şekilleri açısından değerlendirildiğinde, en uygun örnek kırılmasının  $H/D = 0,5$  ve 1 olan örneklerde gerçekleştiği görülmüştür. Bu sebeplerden dolayı, beton ve kaya örnekleriyle yapılacak deneysel çalışmalarda  $H/D = 0,5$  ve 1 olan örneklerle deneylerin yapılmasının daha uygun olacağı kararı verilmiştir.

Hoek - Brown yenilme ölçütündeki  $m$  katsayısı, beton örnekler için yaklaşık 10 civarında iken birinci seri kumtaşı (Karadon) için 15,5, ikinci seri kumtaşı (Asma) için 11,8, kireçtaşı için 20,3 ve marn için 16,7 olarak elde edilmiştir.

Deneysel olarak bulunan kohezyon değerleri ile yenilme ölçütlerinden hesaplanan kohezyon değerleri karşılaştırılmıştır. Belirleme katsayısına ( $r^2$ ) bakıldığında bütün yenilme ölçütleri için  $H/D=0,5$  olan örnek boyutunun incelenen  $H/D$  oranları arasında en iyi sonucu verdiği görülmüştür. Özellikle Hoek - Brown ve Sheorey yenilme ölçütlerine göre değerlendirildiğinde, tasarlanan deney yöntemiyle ölçülen değer (H/D = 0,5 için), kuramsal kohezyon ( normal gerilmenin sıfır olduğu durumdaki kesme dayanımı) değerine yakın olduğu söylenebilmektedir. Bu çalışmada sadece NX çapında örnekler kullanılmıştır. Ancak, her zaman NX çapında karot örnekleriyle çalışmak mümkün olmayabilir. Özellikle sondajlardan alınan karotların çapları NX'den farklıdır. Bu sebeple, BX (42 mm), NQ (47,6 mm) çaplarında ve farklı  $H/D$  oranlarında deneyler yapılmalıdır.

Bu çalışmanın eksik olan bir yanı da, çalışılan kayaçların petrografik özelliklerinin incelenmemesidir.

Bilindiği üzere, kaya malzemesinin petrografik özellikleri dayanımı etkilemektedir. Bu sebeple, bu çalışmaya benzer yapılacak çalışmalarda, deneylerde kullanılacak kaya örneklerinin petrografik özelliklerinin kohezyonu ne şekilde etkilediğinin de ortaya konulması bilimsel açıdan çok daha yararlı olacaktır. Bu çalışmada, NX çapında örneklerle çalışıldığından, en büyük tane boyutunun 5 mm'den fazla olamama durumu söz konusudur. Farklı tane boyutlarında malzemenin kohezyonunun ne şekilde değişeceği incelenmelidir. Ayrıca, deneylerde yalnızca tortul kayaçlarla çalışılmış olması bulunan ilişkilerin evrenselliğini sınırlamaktadır. İlerideki çalışmalarda, diğer kayaç tipleriyle de deneyler yapılmalıdır.

## KAYNAKLAR

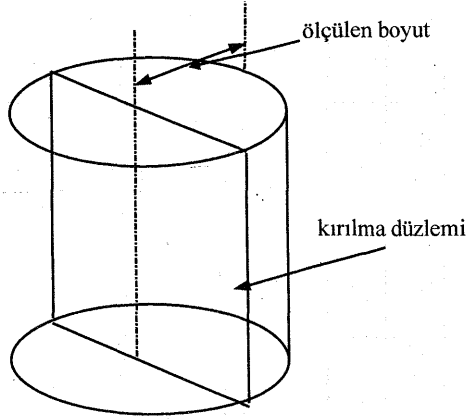
- Hoek, E. ve Brown, E.T. 1980 *Underground Excavations in Rock*, IMM, London.
- ISRM 1975 *Terminology* (English, French, German), ISRM Commission on Terminology, Symbols and Graphic Representation: 83.
- Protodyakonov, M.M. 1969 Methods of determining the shearing strength of rocks. *Mechanical Properties of Rocks*, Wiener Bindery Ltd., Jerusalem, Israel: 175.
- Sheorey, P.R., Biswas, A.K. ve Choubey, V.D. 1989 An emprical failure criterion for rocks and jointed rock masses. *Engg. Geol.*, Vol. 26: 141 - 159.
- TSE 3068. 1978 Laboratuvarında beton numunelerinin hazırlanması ve bakımı. *Türk Standartları Enstitüsü*, Udk 691.32:620:1, I Baskı, Ankara
- Vutukuri, V.S., Lama, R.D. ve Saluja, S.S. 1974 *Handbook On Mechanical Properties Of Rocks. Testing Techniques and Results*, Vol. I, Trans Tech Publications, 141 - 173.
- Yaralı, O. 1999 *Kaya Malzemesinin Kohezyonunun Doğrudan Tayininde Bir Deney Yönteminin Geliştirilmesi*. Doktora Tezi, Z.K.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü 198.

Çizelge 1. Doğrudan kohezyon deneyleri ile dayanım deney sonuçları (Yaralı. 1999).

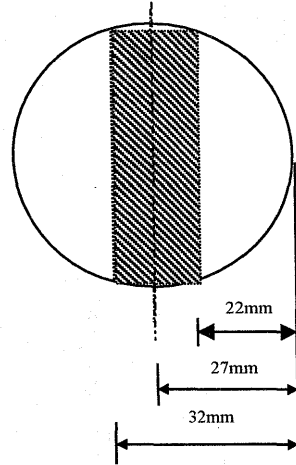
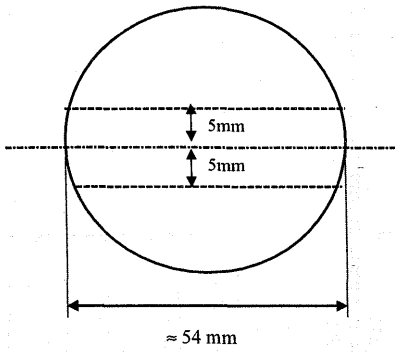
| Malzeme              | H/D = 0,5<br>c (MPa) | Deney<br>Sayısı | H/D = 1<br>c (MPa) | Deney<br>Sayısı | $\sigma_c$<br>(MPa) | Deney<br>Sayısı | $\sigma_t$<br>(MPa) | Deney<br>Sayısı | $I_{s(50)}$<br>c (MPa) | Deney<br>Sayısı |
|----------------------|----------------------|-----------------|--------------------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|------------------------|-----------------|
| Beton<br>1.Seri      | 7,13 ± 0,68          | 10              | 5,20 ± 0,80        | 10              | 26,26 ± 2,80        | 11              | 2,57 ± 0,53         | 10              | --                     |                 |
| Beton<br>2. Seri     | 7,86 ± 1,90          | 10              | 5,15 ± 2,73        | 10              | 29,10 ± 6,73        | 11              | 2,90 ± 0,54         | 10              | 3,14 ± 0,75            | 11              |
| Kumtaşı<br>(Karadon) | 18,94 ± 3,73         | 11              | 13,89 ± 2,66       | 11              | 123 ± 13,61         | 6               | 7,42 ± 0,90         | 10              | 5,00 ± 0,65            | 9               |
| Kumtaşı<br>(Asma)    | 12,01 ± 0,80         | 11              | 7,96 ± 0,56        | 11              | 77,05 ± 3,02        | 5               | 6,28 ± 0,91         | 10              | 4,92 ± 0,46            | 7               |
| Kireçtaşı            | 18,98 ± 4,11         | 11              | 13,54 ± 1,85       | 11              | 125,21 ±<br>3,59    | 5               | 9,41 ± 1,40         | 10              | 3,81 ± 0,26            | 7               |
| Marn                 | 3,94 ± 1,36          | 11              | 5,12 ± 0,80        | 11              | 12,27 ± 1,47        | 6               | 7,48 ± 1,65         | 10              | 2,17 ± 0,98            | 8               |

Çizelge 2. Doğrudan kohezyon deney sonuçlarıyla yenilme ölçütlerinden bulunan kohezyon değerleri (Yaralı. 1999).

| Malzeme              | Doğrudan kohezyon deneyi            |                                   | Coulomb ölçütü           |                                     | Hoek - Brown ölçütü      |                                     | Sheorey ölçütü           |                                     |
|----------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|
|                      | H/D = 0,5<br>c <sub>0,5</sub> (MPa) | H/D = 1<br>c <sub>1,0</sub> (MPa) | c <sub>cb</sub><br>(MPa) | ( $\phi_{cb}$ ) <sub>0</sub><br>(°) | c <sub>HB</sub><br>(MPa) | ( $\phi_{HB}$ ) <sub>0</sub><br>(°) | c <sub>sh</sub><br>(MPa) | ( $\phi_{sh}$ ) <sub>0</sub><br>(°) |
| Beton<br>1.Seri      | 7,13 ± 0,68                         | 5,20 ± 0,80                       | 6,49                     | 39,1                                | 5,21                     | 52,9                                | 4,82                     | 53,5                                |
| Beton<br>2. Seri     | 7,86 ± 1,90                         | 5,15 ± 2,73                       | 7,11                     | 38,5                                | 5,41                     | 53,0                                | 5,40                     | 52,9                                |
| Kumtaşı<br>(Karadon) | 18,94 ± 3,73                        | 13,89 ± 2,66                      | 22,64                    | 49,1                                | 18,25                    | 59,9                                | 18,30                    | 60,3                                |
| Kumtaşı<br>(Asma)    | 12,01 ± 0,80                        | 7,96 ± 0,56                       | 15,92                    | 43,2                                | 12,25                    | 56,0                                | 13,22                    | 55,5                                |
| Kireçtaşı            | 18,98 ± 4,11                        | 13,54 ± 1,85                      | 21,40                    | 53,4                                | 17,33                    | 63,4                                | 18,92                    | 58,5                                |
| Marn                 | 3,94 ± 1,36                         | 5,12 ± 0,80                       | 3,07                     | 39,4                                | 1,69                     | 60,9                                | 3,85                     | 21,9                                |



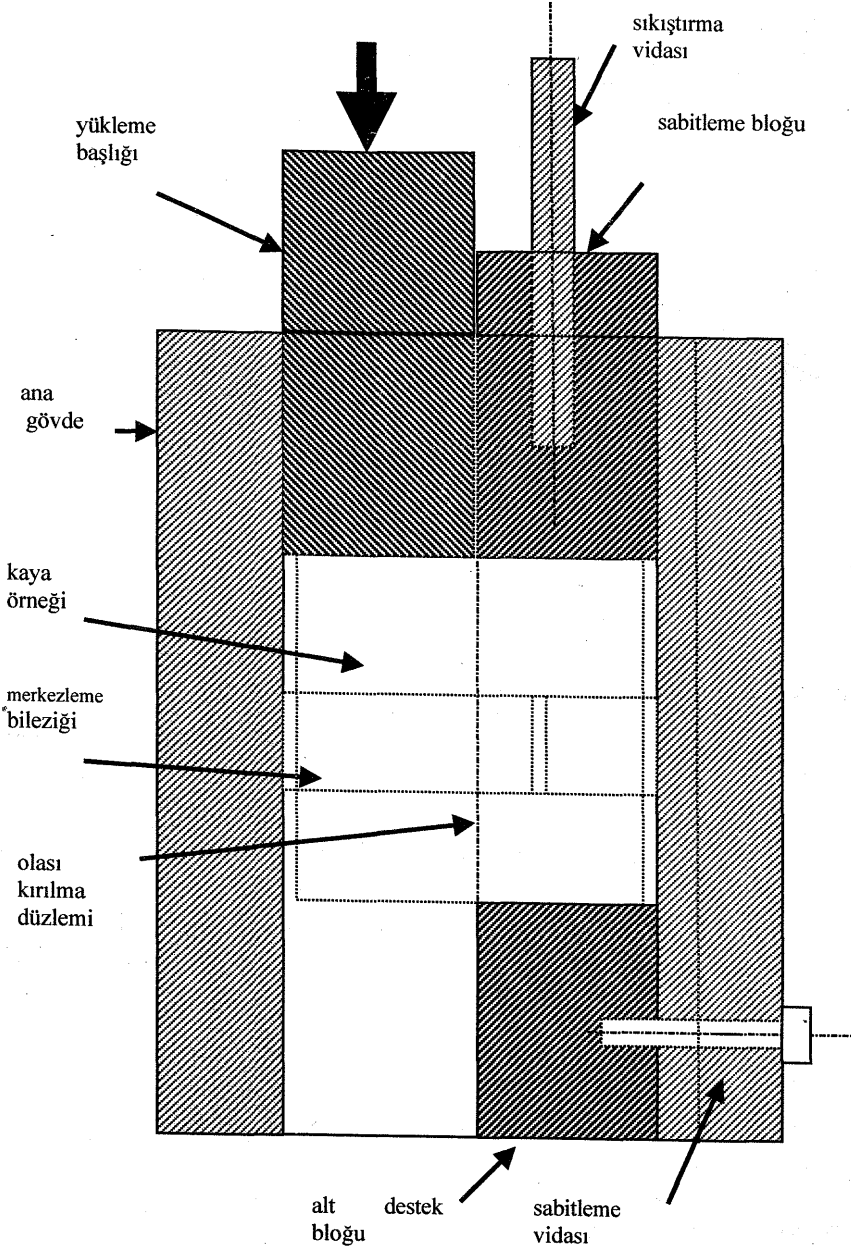
a. Kırılan örneğin ölçülmesi



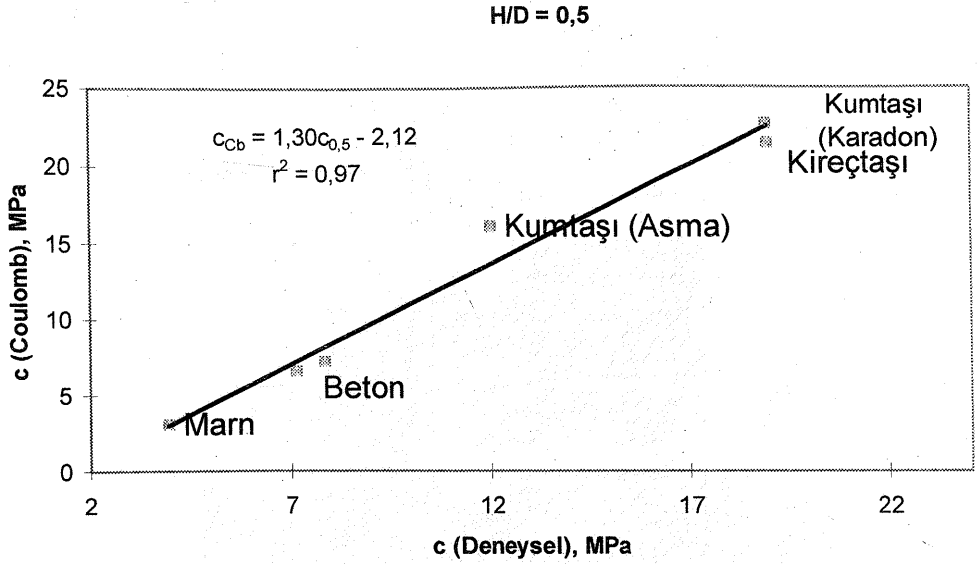
b. Kırılan düzlemin merkezden sapma payı

c. Kırılan örneğin alt ve/veya üst yüzeyindeki kırılma izinin taralı bölgenin içinde kalmasıdır.

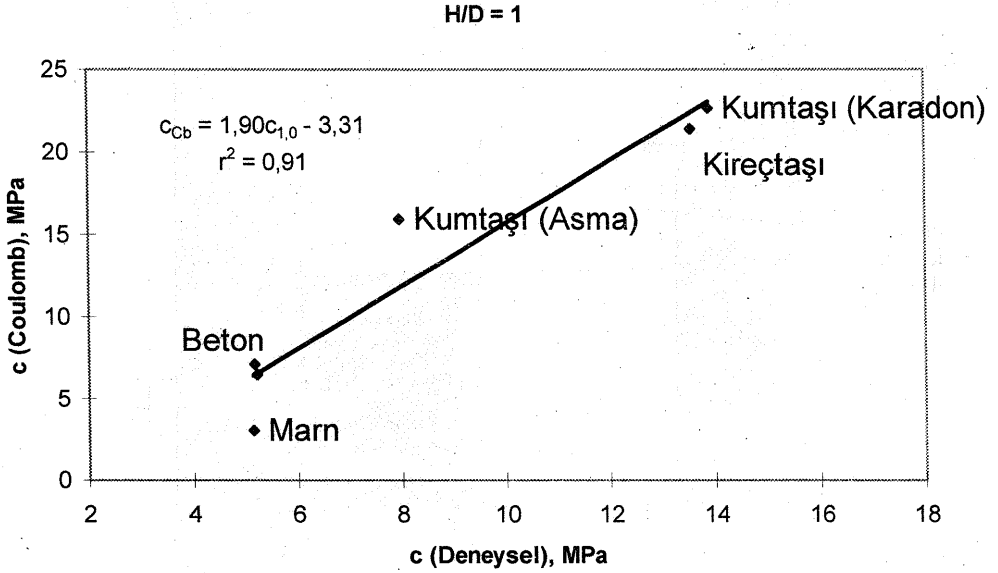
Şekil 1. Geçerliliği kabul edilen örneğin boyutları (Yaralı. 1999).



Şekil 2. Eksenel yükleme düzeneğinin yükleme şeklinin yandan görünüşü (Yaralı. 1999).

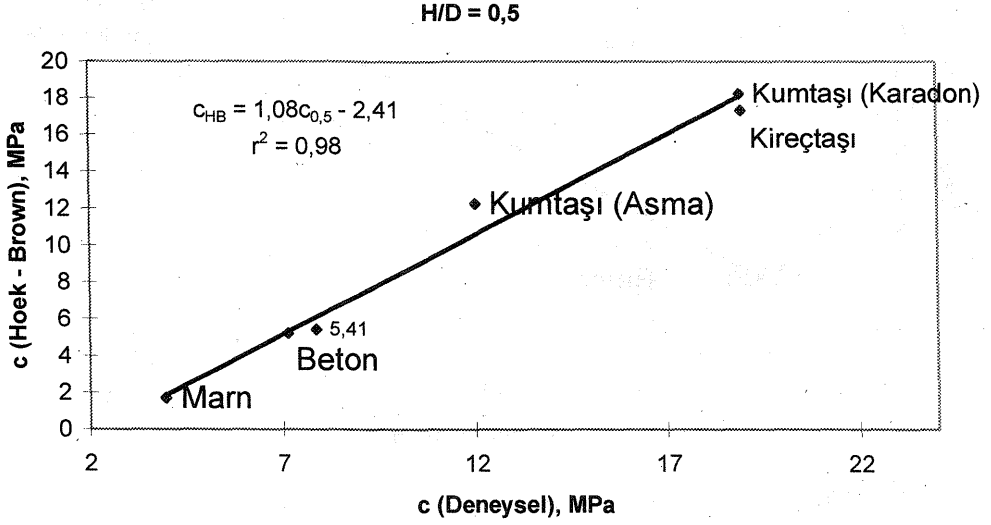


a.  $H/D = 0,5$  olan örneklere ait ilişki

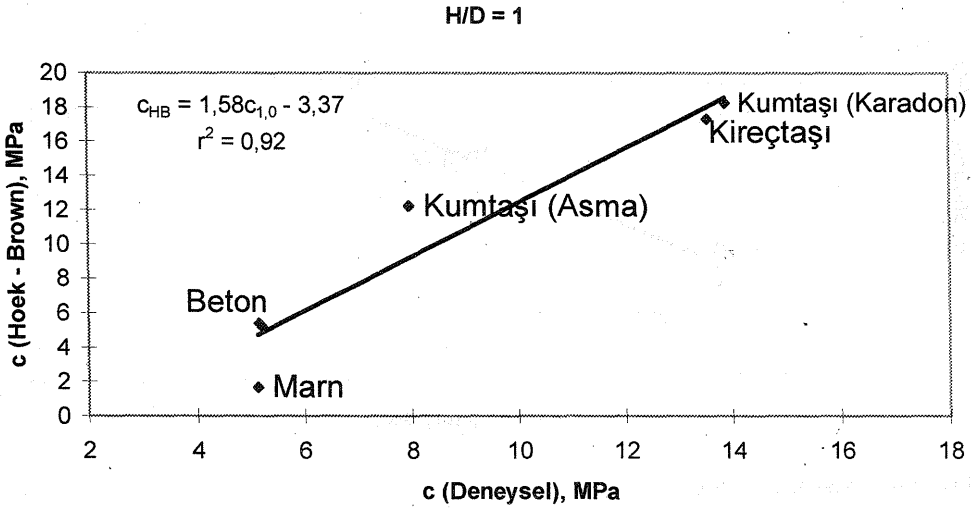


b.  $H/D = 1$  olan örneklere ait ilişki

Şekil 3 Doğrudan kohezyon deneyi verileriyle Coulomb yenilme ölçütünden hesaplanan kohezyon değerleri arasındaki ilişki (Yaralı. 1999).

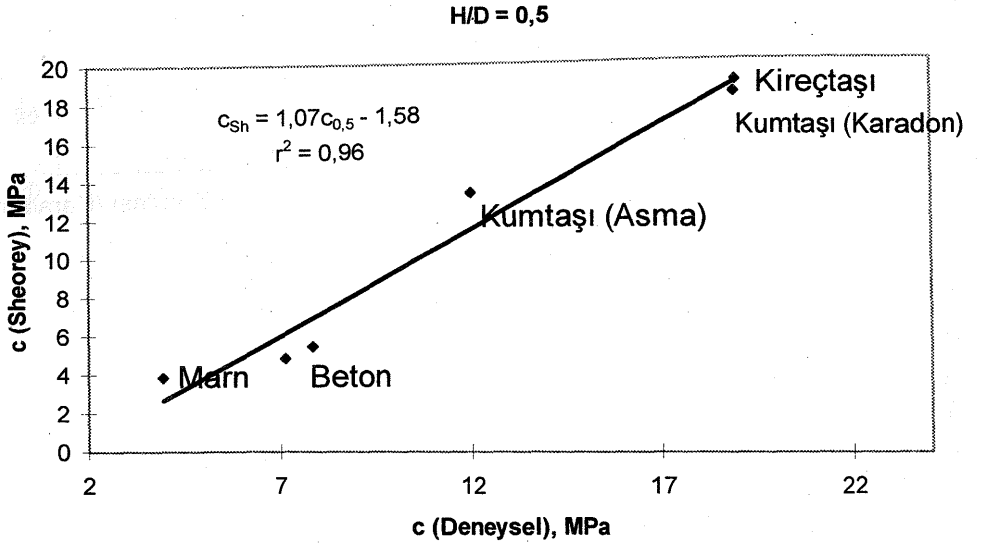


a. H/D = 0,5 olan örneklere ait ilişki

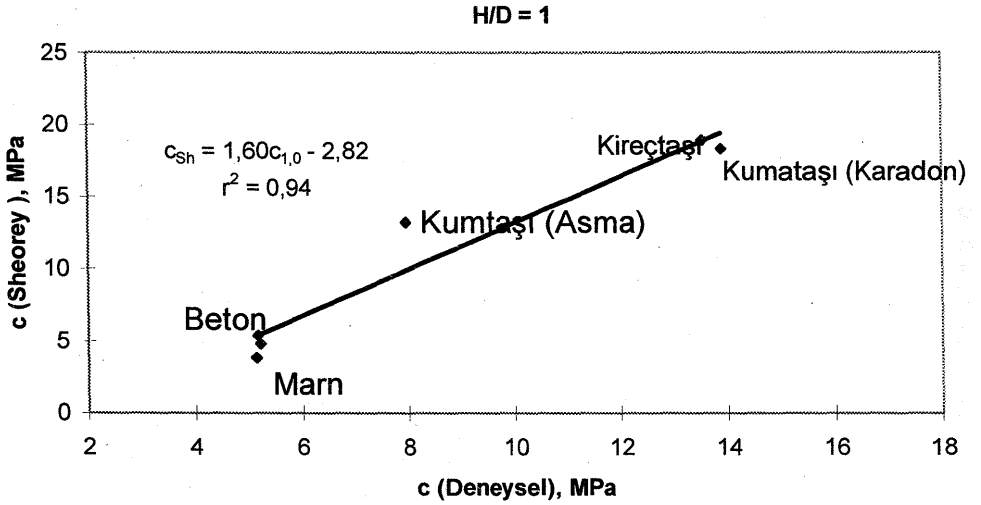


b. H/D = 1 olan örneklere ait ilişki

Şekil 4. Doğrudan kohezyon deneyi verileriyle Hoek - Brown yenilme ölçütünden hesaplanan kohezyon değerleri arasındaki ilişki (Yaralı. 1999).



a. H/D = 0,5 olan örneklere ait ilişki



b. H/D = 1 olan örneklere ait ilişki

Şekil 5. Doğrudan kohezyon deneyi verileriyle Sheorey yenilme ölçütünden hesaplanan kohezyon değerler arasındaki ilişki (Yaralı. 1999).

## KAYA MEKANİĞİ ÇALIŞMALARINDA "TÜMDEN GELME" MANTIĞI

### LOGIC OF SYSTEMATIC APPROACH IN ROCK MECHANICS STUDIES

M.K. GÖKAY

Selçuk Üniversitesi, Maden Müh. Bölümü, KONYA.

**ÖZET:** Mühendislik uygulamaları için kaya kütesinin davranışı çok önemlidir. Bu nedenle, davranış şekilleri değişik koşullar altında farklı kaya türleri için incelenmiş ve değişik araştırmacılar tarafından yenilme kriterleri olarak verilmiştir. Bu çalışmalarda ortak nokta belirli bir davranışı incelemek için onun diğerlerinden soyutlanarak çalışılmış olmasıdır. Kaya kütesinin davranışının karmaşık yapısı gereği, kaya kütesinin bir bütün olarak ele alınması gerekmektedir. Bireysel veya belirli varsayımlarla sınırlandırılmış davranış biçimleri gerçeklik açısından düşündürücü olmaktadır. Bu makalede sunulan "tümden gelme" mantığıyla bu zorluk aşılmaya çalışılmıştır. Sonuçta çalışılan projeye veya çalışmaya daha geniş bir açıyla bakıldığından, önemli mühendislik hatalarından sakınılmış olunacaktır.

**ABSTRACT:** Rock mass behaviour is very important for the engineering applications which can be excavated on/in the rock mass. Therefore types of rock mass behaviour have been studied under various conditions and related failure criteria for different rock masses were proposed by different investigators. In these research works, the common point is that a certain behaviour was checked and relations were determined by isolating it from the other properties and behaviours. Due to the complex nature of the rock mass behaviour it should be examined as a whole. When the types of behaviour are examined separately without checking them altogether, the result may be questionable on the basis of the reality. In this study these difficulties are tried to be solved by using an overall approach. At the end due to difficulties in the problem solving approaches, some of the conceptual errors will be avoided.

#### 1. GİRİŞ

Temel bilimler ve bunlara bağlı alt gruplardaki çalışmalar incelendiğinde maddeyi katı, sıvı ve gaz durumlarında incelemiş sayısız araştırmayla karşılaşılır. Kimya, fizik, termodinamik, mekanik, mukavemet, malzeme ve kaya mekaniği gibi disiplinlerde değişik minerallerin ve bunların oluşturduğu kaya kütlelerinin davranışları incelenmiş, bunlar arasındaki farklılıklar anlaşılmasına çalışılmıştır. Kaya kütesinin çeşitli davranışlarını etkileyen parametreler, yeraltındaki boşluklara sızan magmanın soğumaya başlamasıyla ortaya çıkmaktadır. Magma içindeki elementlerin farklılığına, magmanın soğuduğu derinliğe, yan kayaçların fiziko-kimyasına ve daha sayısız etkileşimlerden dolayı magmadan oluşacak kayaç içerik ve kristal büyüklüğü açısından değişimler göstermekle birlikte, hiç süreksizlik içermeyebileceği gibi katmanlı veya eklem takımlarına bölünmüş bir yapıya sahip olabilecektir. Bu kaya kütesinin modellenmesi için magmanın kimyasal içeriğinin belirlenmesinden başlayarak, kütleinin soğuması, jeolojik zamanlar içinde değişik basınç, ısı, gerilme v.b. faktörlerden nasıl

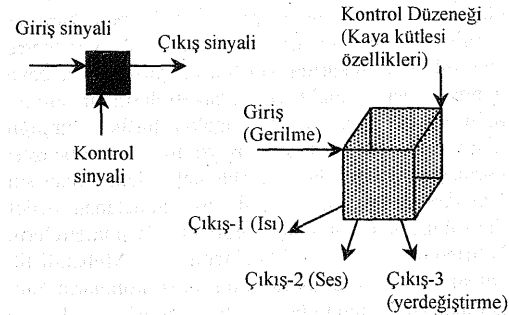
etkilendiğinin araştırılmasına kadar sayısız parametrenin incelenmesi gereklidir. Magmatik ve metamorfik kayaçların aşınıp sedimanter kayaç ve bunların bazılarının da metamorfik kayaçlara nasıl dönüştüğünün araştırılması, içinde kazı boşluğu açılacak kaya kütlelerini tanımak açısından çok önemlidir. Olayları ve temel parametreleri inceleyerek sonuca ulaşmak isteniyorsa, olabildiğince fazla bilgi toplanarak tasarımı düşünülen mühendislik projesi hakkında kararlar verilir. Bu çalışmanın ne kadar çok parametre içerebileceği yukarıda verilmeye çalışılan çerçeve içinde anlaşılmaktadır. Bu parametrelerin tamamının belirlenmesi mümkün olmamakla birlikte birçoğu için zaman ve yeterli kaynak yoktur. Bu ve benzeri karmaşık tasarımları incelemek için önerilen "tümden gelme" mantığında ise amaçlanan hedef doğrultusunda ihtiyaç görülen parametrelerin belirlenmesine gidilmektedir. Mühendislik çalışmalarından bilindiği gibi bazı konuların tam açıklaması mümkün olmamaktadır. Kayaç davranışları konusunda bir belirsizliğin olduğu durumlarda davranışın tam çözülmesi ve açıklanması yerine, bu davranışa neden olacak girdileri ve sonuçta kaya kütesinin verdiği sonuç

davranışını belirlemek daha pratik sonuçlar vermektedir. Bu konudaki açıklamalar "birim küp" yaklaşımı yardımıyla açıklanabilmektedir.

## 2. BİRİM KÜP YAKLAŞIMI

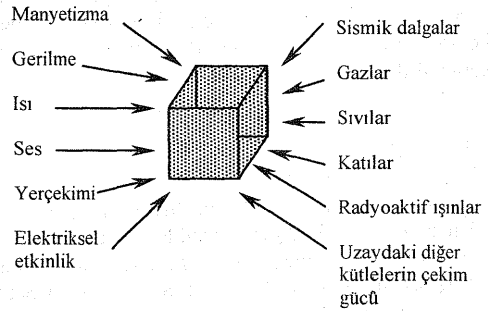
Birim küp yaklaşımı kaya kütlesi davranışlarını ve enerji alış-verişlerini kuramsal olarak incelemek amacıyla ilk olarak Miller (1993) tarafından kullanılmıştır. Miller çalışmalarında kaya kütlesinden aldığı bir birim küpün enerjisini belirli bir zaman dilimi için sabitleyerek, daha sonra yapılan işlerin (tünel kazısı, patlatma, tahkimat v.b.) birim küp enerji seviyesinde yaptığı değişiklikleri kuramsal olarak açıklamaya çalışmıştır. Kuramsal olarak yapılan bu çalışmalar sırasında birim küp yaklaşımının matematiksel modellenmesi fikri ortaya çıkmaya başlamıştır.

Birim küp yaklaşımı "tümünden gelme" mantığı doğrultusunda daha geniş bir şekilde incelenirse, aşağıdaki kuramsal yorumlar ortaya çıkacaktır. Bu yaklaşımda belirli bir hacim birim küp olarak seçilmektedir, birim hacmin boyutları düşünülen proje şartlarına göre ayarlanabilmektedir. Differansiyel bir yaklaşım için milimetre seviyesindeki bu boyut, bir başka problem için birkaç metre veya kilometre olabilmektedir. Genellikle modellenmesi yapılacak kaya kütlesinin birim küpü oluşturduğu varsayıldığından bu araştırma sırasında da bu şekilde ele alınmıştır. Modellenmesi yapılamayacak kadar karmaşık yapıya sahip kaya kütlelerinde, birim küp içeriği belli olmayan bir kara kutu şeklinde düşünülecektir. Böylece modellenmesi yapılamasa da kaya kütlesini etkileyen faktörlerin etkisi, birim küpe veri girişi ve



Şekil 1. Kara kutu tekniği ve bunun kaya mekaniği konularına uyarlanması.

çıkışı şeklinde incelenerek kaya kütlesinin modellenmesine ulaşılmaya çalışılacaktır. Burada kullanılan kara-kutu kabulü mühendislikte kullanılan bir yöntemdir. Şekil 1'de gösterildiği gibi bir mekanizmanın ne olduğu biliniyorsa onun giriş ve çıkışındaki özellikleri incelemek kara kutu tekniğinin birinci özelliğidir. Eğer bir sistemin, elektronik devrenin, makinenin veya bir canlının nasıl ve nelerden oluştuğu bilinmiyorsa, onun belirli giriş sinyallerine karşı nasıl çıkışlar verdiği araştırılacaktır. Bu gibi durumlarda eğer giriş-çıkış sinyallerinin neler olduğu mekanizmanın nasıl çalıştığından önemliyse, olayın gerçekleştiği mekanizmayı içi bilinmeyen bir kara kutu olarak düşünmek yeterli olacaktır. Burada gözden kaçırılmaması gereken konu, üzerinde çalışılan mekanizmaların ayrıca detaylı olarak araştırılması gerektiğidir. Birim küp olarak seçilen hacim eğer bir kaya kütlesinden alınmışsa, seçilen birim küpün yapısını etkileyecek iç ve dış etkiler (sinyaller) Şekil 2'de gösterildiği gibi olacaktır.



Şekil 2. Kaya kütlesinde seçilen bir birim küpe etki eden bazı dış faktörler.

Bu etkileşim parametrelerinin birim hacim üzerindeki etkilerinin incelenmesinde, birim küpün karşı davranışı ve birim küpün iç yapısında oluşan değişiklikler etkili olacaktır. Burada birden çok fiziko-mekanik mekanizmanın aynı anda birbirleriyle etkileşim halinde olduğu düşünüldüğünde olayın tamamının anlaşılmasının ve bunların hesaplanabilirliğinin zorluğu açıktır.

### 2.1 Birim Küp Üzerindeki İlişkiler

Kaya kütlesini etkileyen parametrelerin birbirleriyle olan bazı ilişkileri aşağıda kısaca verilmiştir. Bunların tamamının araştırılması konunun anlaşılması için önemlidir. Bu ilişkilerin

açıklanması, parametreler arasındaki karşılıklı bağıntıların belirlenmesiyle sağlanacaktır. Sonuçta ulaşılabilecek değerlendirmeler kaya kütlelerinin davranışını açıklamak için yararlı olacaktır.

- Gerilme** : Gerilme-yerdeğiştirme ilişkisi,  
**Isı** : Isı-genleşme, ısı transferi ilişkileri, termodinamik kurallar,  
**Ses** : Ses frekansları, kristal titreşimleri ve aralarındaki ilişkiler,  
**Manyetizma**: Manyetik alan şiddeti ve akı yoğunlaşması, ısı oluşumu, enerji kaybı,  
**Yerçekimi** : Yerçekimi farklılaşması, kütle-ağırlık ilişkileri,  
**Gazlar** : Gazların kayalar içindeki hareketi, yayılma hızı, gözeneklilik, mineral tane boyutu, gazların emilme ve karışma özellikleri,  
**Sıvılar** : Kaya kütleleri içindeki yayılma hızı, gözeneklilik, mineral tane boyutu,  
**Katılar** : Kaya kütleleri içindeki süreksizliklerin içine taşınan kil ve benzeri katılar, buralarda tekrar kristalleşen sıvılar,  
**Radyoaktif Işımlar** : Radyoaktivite seviyesi-kaya kütlelerindeki elementlerin farklılaşması,  
**Sismik Dalgalar** : Sismik dalga hızı ve cinsi, yansıma özelliği,  
**Çekim Etkisi** : Güneş, ay ve gezegenlerin dünya üzerindeki kütlelere yaptığı çekim etkisi,  
**Kimyasal etkileşim** : Gerilme, ısı ve çeşitli sıvıların etkileşimiyle kaya kütleleri yapısının kimyasal özelliklerinin ve bileşiminin değişmesi, v.b.  
**Fiziksel Değişimler** : Gaz, farklı sıvılar ve sismik etkileşimlerle fiziksel boyut ve tane boyutunun farklılaşması v.b.  
**Elektriksel Etkileşim** : Elektron hareketliliği, direnç, elektron akı yoğunluğu, v.b.

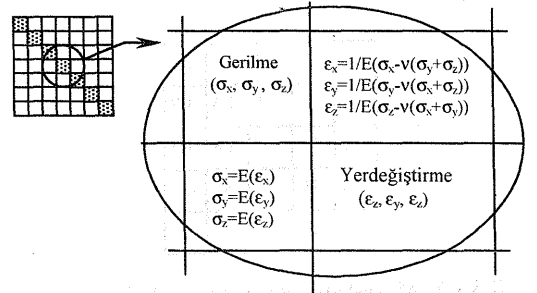
Kaya kütlelerinden seçilecek birim küptün davranışlarını incelemek için bu davranışları etkileyen parametrelerin araştırılması gerekir. Kaya mekaniği çalışmalarında uygulanacak proje şartlarına göre seçilecek parametrelerin, kaya kütleleri davranışlarını nasıl etkileyeceğinin araştırılması kontrol sistemlerinde olduğu gibi giriş-çıkış

sinyallerinin (etki-tepki özellikleri) incelenmesiyle olacaktır. Projenin amacına bağlı olarak, proje parametrelerinin birbirlerini ve kaya kütlelerini nasıl etkilediklerinin bilinmesi bu araştırmalara bağlı olacaktır. Bu çalışmada parametreler arası ilişkileri açıklamak için tümden gelme mantığıyla uyum içinde olan etkileşim matrisi yaklaşımı (Hudson, 1991) kullanılacaktır.

### 3. KAYA DAVRANIŞINI ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN ETKİLEŞİMİ

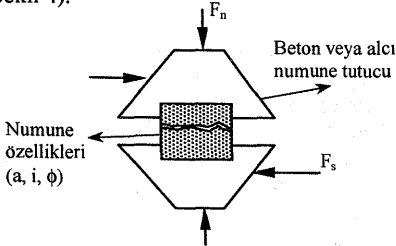
Etkileşim matrisi mantığı Hudson (1991) tarafından ilk olarak kullanılmış ve bu yaklaşımla ilgili uygulamalar Gökay (1994)'de anlatılmıştır. Etkileşim matrisinin temel düşüncesi belirli bir karar aşaması için seçilen parametreler arasındaki etkileşimlerin açıklanmasıyla ilgilidir. Bu yaklaşımda parametrelerin birbirleriyle olan etkileşimleri, o konuda uzmanlaşmış mühendislerin görüşüne göre sınıflandırılmaktadır. Hudson (1992) parametreler arası etkileşimleri; ilişkisiz, zayıf derecede, orta derecede, kuvvetli derecede ilişkili ve kritik ilişkiler olmak üzere beş ayrı gruba ayırmıştır.

Uzmanlar bu ilişkileri daha önceki tecrübelerine göre değerlendireceklerdir. Etkileşim matrisi yaklaşımında kullanılan ikili ilişkilerin incelenmesi mantığı, birim küp yaklaşımında ortaya çıkacak etkileşimlerin ikili ilişkiler şeklinde açıklanması amacıyla kullanılmıştır. Etkileşim matrisinin diyagonal elemanlarına izlenmesi gereken parametreler yerleştirilirken, diğer matris elemanları bu parametreler arasındaki ilişkiyi açıklamak için kullanılmışlardır. Etkileşim matris yönteminin tümden gelme mantığı çerçevesinde, parametrelerin kendi aralarındaki ilişkileri açıklamak amacıyla kullanılmaları Şekil 3'de verilen örneklerle gösterilebilir.



Şekil 3. Birim küp üzerine etki eden dış faktörlerin kendi aralarındaki etkileşim ilişkilerinin bilinen formüllerle açıklanması.

Pratik bir uygulama olarak kaya kütlesi davranışlarının izlenmesi doğrultusunda kaya mekaniği laboratuvar çalışmaları arasında yer alan "direkt makaslama" deneyini modellemek istersek, bu deneyde etkili olan parametreleri sıralamamız gerekecektir. Bunlar arasındaki etki-tepki ilişkileri, araştırmacılar tarafından belirlenen formülasyonlar halinde yazılırsa deneyde kullanılan kayacın davranışı modellenmiş olacaktır. Burada örnek oluşturması için seçilen ve makaslama deneyinin sonucunu direkt etkileyen parametreler; normal kuvvet,  $F_n$ ; kaymayı sağlayan kesme kuvveti,  $F_s$ ; eklem yüzeyinde bulunan pürüzlülüklerin pürüz (gelme) açısı,  $i$ ; dolgu malzemesi kalınlığı,  $a$  ve eklem yüzeyinin sürtünme açısı,  $\phi$  olarak sıralanabilir. Bu parametreleri deney düzeneğinde gösterirsek modellemenin kapsadığı parametrik küme elemanlarının sınırları belirlenmiş olacaktır (Şekil 4).



Şekil 4. Makaslama deney düzeneği.

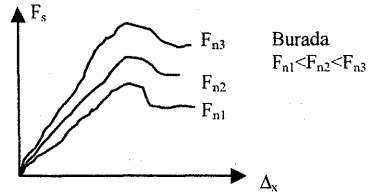
Seçilen parametrelerin birbirleriyle olan interaksiyonlarının direkt makaslama deney düzeneğine göre yorumlanması aşağıdaki matris düzeneğinde yapılacaktır. Burada makaslama deneyi için seçilen parametrelerin dışında daha başka parametrelerinde matrise yerleştirilmesi ve matris boyutunun büyütülmesinin mümkün olduğu unutulmamalıdır.

|       |       |     |        |     |
|-------|-------|-----|--------|-----|
| $F_n$ | E1    | E2  | E3     | E4  |
| T1    | $F_s$ | E5  | E6     | E7  |
| T2    | T5    | $i$ | E8     | E9  |
| T3    | T6    | T8  | $\phi$ | E10 |
| T4    | T7    | T9  | T10    | $a$ |

Şekil 5. Makaslama deneyinin etkileşim matrisiyle modellenerek incelenmesi (E: etki, T: tepki olarak gösterilmektedir).

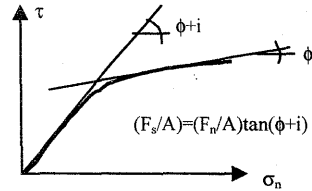
Seçilen bu 5 parametre ve aralarındaki ilişkileri incelemek istersek etki-tepki özelliklerinin ve yorumlarının, Şekil 5'de gösterilen matris üzerindeki matris eleman kotlarına göre hazırlanması gerektiği açıktır.

*E1: Normal kuvvetin ( $F_n$ ) kesme kuvveti ( $F_s$ ) üzerindeki etkisi:*  $F_n$  artarsa kaya içindeki eklem kayması için daha fazla kesme kuvveti uygulanmalıdır. Çünkü  $F_s$ 'e karşı koyan sürtünme kuvveti ( $R=A.F_n$ )  $F_n$ 'deki artışa paralel artacaktır, (Şekil 4 ve 6).



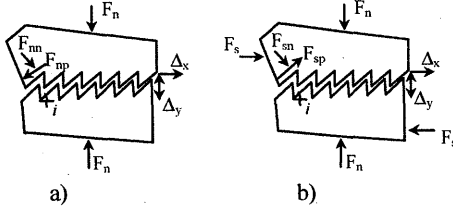
Şekil 6. Makaslama deneyinde, kesme kuvveti ile yatay yerdeğiştirme arasındaki ilişki.

Bu grafiğe ek olarak  $\tau$ - $\sigma_n$  grafiği incelenirse  $F_n$  kuvvetinin kesme kuvvetine etkisi incelenirse  $\phi$  ve  $i$  değişkenlerinin de olayı etkilediği görülmektedir.



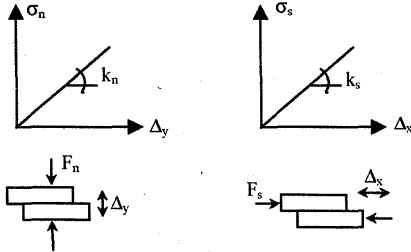
Şekil 7. Makaslama deneyi  $\tau$ - $\sigma_n$  grafiği.

*T1: Kesme kuvvetinin ( $F_s$ ) eklem üzerine uygulanan normal kuvvet ( $F_n$ ) üzerindeki etkisi:* Eklem yüzeyi, yatay düzleme paralel ve eklemde yüzey pürüzlülüğü ve kohezyon hiç yoksa (parlatılmış yüzey),  $F_s$ 'in  $F_n$  üzerinde bir değişikliğe yol açması mümkün değildir. Eklem sürtünmeden dolayı karşılaşılan  $R=A(F_n)$  direnci yenilince kayar,  $(F_s/A)=(F_n/A)\tan(\phi)$ . Ancak eklem yüzeyi pürüzlülse kesme kuvvetinin artırılması  $F_n$  üzerinde azaltıcı etki yapabilir. Şekil 8'de görüldüğü gibi  $F_s$ 'in artışıyla eklem pürüzlülük yüzeyinde kaymaya çalışacak ve pürüzlülük yönüne göre hareket edecektir.  $\Delta_y$ ,  $F_n$  yönüne ters yönde olduğu zaman



Şekil 8.  $F_s$  kuvvetinin pürüzlülük üzerindeki etkisi.

eklem yüzey alanına etki eden normal kuvvet azalacaktır (Şekil 8b). Öyleyse  $F_n' = F_n \cdot f(\Delta_y)$  olacaktır. Burada  $F_n$  toplam etkili normal kuvvet,  $F_n$  uygulanan normal kuvveti ve  $f(\Delta_y)$  ise  $\Delta_y$  hareketiyle doğan karşı kuvvet fonksiyonunu göstermektedir.  $f(\Delta_y)$  fonksiyonu eklem dolgusu (varsa) ve eklem kendisiyle ilgili olarak bulunan normal tokluğa (stiffness) bağlıdır. Bu işlemlerin yorumlanmasından Şekil 9'da verilen grafik elde edilecektir. Burada;  $k_n = (\Delta F_n / \Delta_y)$  olacak, buradan da  $\Delta F_n = k_n \cdot \Delta_y$  olarak bulunacaktır. Öyleyse deneyi yapılan eklem tokluk ( $k_n$ ) değeri biliniyorsa  $f(\Delta_y)$  çok az kabüller yapılarak hesaplanabilecektir.

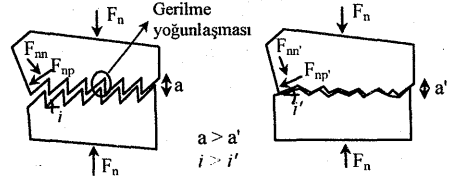


Şekil 9. Eklem tokluk değerlerinin bulunması.

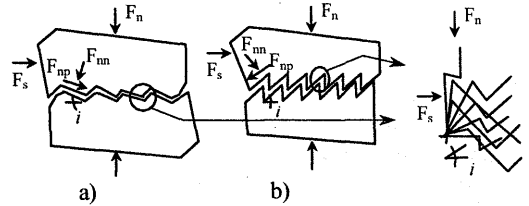
**E2: Normal kuvvetin ( $F_n$ ) pürüzlülüklerin gelme açısı ( $i$ ) üzerindeki etkisi:** Normal kuvvet yüzey pürüzlülüğünün yapısını değiştiremeyecektir. Fakat pürüzlü yüzeylerin kırılmasına ve ezilmesine yol açacaktır (Şekil 10), böylece  $i$  açısının değişmesine yol açabilecektir. Bu değişiklik dolgu malzemesi (varsa) kalınlığına (a) ve bu malzemenin normal toklaşma özelliğine ( $k_n$ ) bağlı olacaktır. Dolgu malzemesi yoksa direkt gerilmeye uğrayacağı için kırılma ve ezilmeler hemen başlayacaktır. Dolgu malzemesinin olduğu durumlar için;  $f(\Delta_i) = f(F_n, a, k_n, M_k)$  bağıntısı verilebilecektir. Bu fonksiyonda  $f(\Delta_i)$ ;  $i$  gelme açısındaki değişimi göstermektedir ve büyüklüğü  $F_n$ ,  $k_n$ , a ve  $M_k$  değerine bağlıdır.  $M_k$

eklem yan kayaçlarının mukavemetini göstermektedir ve yan kayaçların tek eksenli basma dayanımı veya üç eksenli basma dayanımlarıyla ilgilendirilebilir.

**T2: Pürüzlülük gelme açısının ( $i$ ) normal kuvvet ( $F_n$ ) üzerindeki etkisi:** Pürüzlülük  $i$  açısının artmasıyla, bu açının yönüne göre,  $F_n$  kuvveti bileşenlerine bölünecektir. Böylece sürtünme kuvvetini artıracak etkili bir normal kuvvet ( $F_{nn}$ ) elde edilmesi  $i$  açısına göre değişirken, bu etkileşim sırasında ortaya çıkan  $F_{np}$  kuvveti, eklem uygulanan  $F_n$  kuvvetinin etkisini farklılaştıracaktır ( $F_{np}$ 'nin makaslama etkileri). Bu etkinin büyüklüğü  $f(\Delta_{Fnn}) = f(i, k_n, a)$  şeklinde de ifade edilebilir.



Şekil 10. Pürüzlülükler ezilip kırıldıkça normal kuvvetin pürüzlülüklerin gelme açısı üzerindeki etkisinin değişimi.



Şekil 11. Pürüzlülük gelme açısının  $F_n$  bileşenlerini etkileyerek  $F_s$ 'in etkisini artırması (a) veya düşürmesi (b).

**E3: Normal kuvvetin ( $F_n$ ) eklem yüzeyinin sürtünme açısı ( $\phi$ ) üzerindeki etkisi:** Şekil 7'de gösterildiği gibi  $\tau$ - $\sigma_n$  grafiğinde elde edilen eğrinin eğimi ( $\phi+i$ ) veya ( $\phi$ ) açılarını verecektir. Burada  $(F_s/A) = (F_n/A) \tan(\phi+i)$  veya  $(F_s/A) = (F_n/A) \tan(\phi)$  olduğuna göre  $(\phi+i) = \tan^{-1}(F_s/F_n)$  veya  $\phi = \tan^{-1}(F_s/F_n)$  olacaktır. Burada  $F_n$  artırılırsa göreceli olarak kaymayı sağlayacak  $F_s$ 'in de artırılması gerekecektir, (Şekil 6). Fakat sonuçta elde edilecek  $\tau$ - $\sigma_n$  eğrisinden de anlaşılacağı gibi  $F_n$ 'deki artış  $F_s$ 'deki artış ile aynı miktarda olmayacak,  $\phi$  değeri yani eğrinin eğimi azalacaktır, (Şekil 7).

**T3: Eklem yüzeyi sürtünme açısının ( $\phi$ ) eklem yüzeyine uygulanan normal kuvvet ( $F_n$ ) üzerindeki**

*etkisi:* herhangi bir eklemden  $\phi$  fazlaysa, eklem kayması için uygulanan  $F_s$  kuvveti artırılarak ancak kayma sağlanır. Pratik bir örnek vermek gerekirse, şevlerdeki eklemelerin  $\phi$  açıları fazla ise, bu eklemelerin duraylılıklarını arttırmak için kullanılacak kaya saplaması sayısında azaltmaya gidilebilir. Çünkü  $(F_s/A)=(F_n/A)\tan(\phi+i)$  ise burada  $(F_n/A)=(F_s/A)\tan(\phi+i)$  dir. Görüleceği gibi  $F_n$  ile  $\tan(\phi+i)$  arasında ters ilişki vardır. Böylece daha yüksek sürtünme açısına sahip bir eklem yüzeyi daha az normal kuvvet ( $F_n$ ) ile duraylı duruma getirilebilecektir. Çünkü eklem yüzeyinde oluşacak eşit sürtünme direnci için daha az normal kuvvete ihtiyaç duyulacaktır.

*E4: Normal kuvvetin ( $F_n$ ) eklem dolgu kalınlığı ( $a$ ) üzerindeki etkisi:* Şekil 9'da verilen  $F_n\Delta y$  grafiğinden de görüleceği gibi, eklem yüzeyine  $F_s$  uygulamadan sadece  $F_n$  uygulanarak  $\Delta y$  kaydedilirse eklem yan yüzlerinin birbirlerine yaklaşma özelliği belirlenir. Normal tokluk olarak tanımlanan  $k_n$ ,  $F_n$  ile  $a$  arasındaki bağıntıyı özetlemektedir. Öyleyse;  $k_n=(F_n/A)\Delta y$  olacaktır,  $k_n$  değeri eklem dolgusunun cinsine göre değişeceğinden aynı eklemden bulunacak farklı dolgu bölgelerde farklı sonuçlar elde edilecektir. Bu değişim  $f(C_0, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \tau_{maks}, C, \phi_d, E_d, v_d)$  fonksiyonunda da gösterildiği gibi dolgu malzemesinin mukavemet değerlerine ve dolgu üzerinde oluşan gerilmelere bağlı olacaktır.

*T4: Eklem dolgusunun ( $a$ ) eklem yüzeyine uygulanan  $F_n$  üzerindeki etkisi:* Dolgu malzemesi cinsine göre elde edilen  $k_n$  değeri değişime uğrayacaktır.  $F_n\Delta y$  grafiğinden elde edilen  $k_n=(F_n/A)\Delta y$  den yola çıkılarak  $F_n=k_n\Delta y.A$  bulunacaktır. Öyleyse  $F_n$  artırılırsa bile uygulanan kuvvetin bir kısmı dolgunun sıkıştırılmasına (pekiştirilmesine) gidecektir. Dolgu kalınlığı arttıkça bu amaçla kullanılan  $F_n$  kuvveti artacaktır. Sonuçta dolgu malzemesi tam olarak pekişene kadar süsbansiyon edilen eklem yüzeyi, uygulanan  $F_n$  kuvvetinin ancak bir bölümü tarafından etkilenecektir.

*E5: Kesme kuvvetinin ( $F_s$ ) pürüzlülüklerin gelme açısı ( $i$ ) üzerindeki etkisi:*  $F_s$  kuvvetine karşı koyan önemli faktörlerin birisi eklem yüzeylerinin pürüzlülüğüdür. Şekil 4 ve 8 incelenirse  $i$  açısının  $\tau-\sigma_n$  grafiğinde (Şekil 7) neden daha dik eğimler oluşturduğu anlaşılacaktır.  $F_s$  arttıkça ortaya çıkan  $F_{sn}$  ve  $F_{sp}$  kuvvet bileşenleri pürüzlülük üzerinde etkili olur. Sonuçta ortaya çıkan gerilmelerden pürüzlülükler sivri uçlardan başlayarak kırılmaya başlarlar.  $i$  açısında değişikliklere neden olacak bu ezilme olayından sonra  $\tau-\sigma_n$  grafiğinin eğimi

azalacaktır. Pürüzlülükler kırılmadan önce makaslama  $(F_s/A)=(F_n/A)\tan(\phi+i)$ , kırıldıktan sonra  $(F_s/A)=(F_n/A)\tan(\phi)$  şeklinde ifade edildiğine göre  $F_s$ 'nin  $i$  üzerindeki etkisi  $(\phi+i)=\tan^{-1}(F_s/F_n)$  olacaktır.

*T5: Pürüzlülük gelme açısının ( $i$ ) kesme kuvveti ( $F_s$ ) üzerindeki etkisi:* Pürüzlülük açısının değişmesiyle pürüzlülük üzerindeki  $F_s$  kuvvet bileşenlerinin ( $F_{sn}$  ve  $F_{sp}$ ) değeri (Şekil 8b), aynen  $F_{nn}$  ve  $F_{np}$  değerlerinde olduğu gibi (Şekil 10), değişecektir.  $F_{sn}$  bileşeni eklem yüzeyini sıkıştırmaya çalıştığından sürtünme direncini arttıracaktır bu eklem kayması için daha fazla  $F_s$  değeri ihtiyacı demektir. Fakat pürüzlülükler kırıldıkça  $F_{sn}$  değeri değişecek ( $F_{sn}$ ) ve büyük bir çoğunlukla da azalacaktır. Şekil 8b'den de anlaşıldığı gibi  $i$  açısı fazla olursa  $F_{sn}$  değeri fazla olacak ve eklemi kaydırmaya çalışan  $F_{sp}$  değerinin daha da artırılması gerekecektir. Birbirini etkilediği için bu karşılıklı  $F_{sn}$  ve  $F_{sp}$  değer artışları makaslama deneylerinde de gözlenen kabarma bölümü sona erene kadar devam edecektir. Pürüzlülükler ezilip kırılınca eklem pürüzlülükleri üzerinde gelişen  $F_{sn}$  değerleri hızlı bir şekilde azalacaktır. Kırılan pürüzlülüklerin, eklem pürüzlülük aralarını doldurması da göz önüne alınırsa  $F_{sn}$ 'nin yok denecek kadar azalacağı söylenebilir. Öyleyse  $(F_s/A)=(F_n/A)\tan(\phi+i)$  fonksiyonu kabarma bölümünde  $i$  ile  $F_s$  arasındaki doğru orantılı ilişkiyi anlatmaya yetecektir.

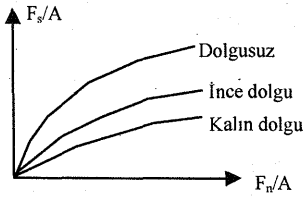
*E6: Kesme kuvvetinin ( $F_s$ ) eklem yüzeyi sürtünme açısı ( $\phi$ ) üzerindeki etkisi:* E3 etki anlatımında da değinildiği gibi eklem yüzeyi sürtünme açısı  $(\phi+i)=\tan^{-1}(F_s/F_n)$  veya  $\phi=\tan^{-1}(F_s/F_n)-i$  olacaktır. Öyleyse  $F_s$  ile  $\phi$  arasındaki orantı  $F_n$  kuvveti de göz önüne alınırsa doğru orantılıdır. Yüzeyindeki şartları  $i=0$  ve  $F_n=0$  olan bir eklem yüzeyine etki eden  $F_s$  değeri sürtünmeyi ve kohezyonu yenince kayma başlayacaktır. Bunun yanında  $i=0$  ve  $F_n=0$  şartında  $(F_s/A)=(F_n/A)\tan(\phi)$  olacaktır ve  $F_s$  ile  $\phi$  arasındaki ilişki doğru orantılı olacaktır (trigonometrik ilişki). Şekil 8b'de gösterilen kuvvet bileşenlerini göz önüne alırsak  $F_{sn}$  bileşeninin artışıyla eklem sürtünme direnci artacaktır.

*T6: Eklem yüzeyi sürtünme açısının ( $\phi$ ) kesme kuvveti ( $F_s$ ) üzerindeki etkisi:* Genel makaslama deney sonuçlarını özetleyen açıklamalar bu ilişkiyi açıklamaya yetmektedir,  $(F_s/A)=(F_n/A)\tan(\phi+i)$ . Burada  $F_s$  ile  $\phi$  değerleri arasındaki ilişkinin  $i$  ve  $F_n$  değerleriyle de ilgili olduğu açıkça bellidir.

*E7: Kesme kuvvetinin ( $F_s$ ) dolgu kalınlığı ( $a$ ) üzerindeki etkisi:* Kesme kuvveti  $F_s$ 'nin etkisiyle pürüzlülük yüzeyinde oluşan  $F_{sn}$  bileşeni dolgu

malzemesini eklem yüzeyine dik yönde baskı altında tutarak,  $F_{sp}$  bileşeni de dolgu malzemesini eklem yüzeyine paralel yönde makaslayarak ezmeye ve pekiştirmeye çalışacaklardır. Dolgu malzemesi kalınlığına ve cinsine göre elde edilecek değişik  $k_s$  değerleri  $F_s$ 'nin a üzerindeki etkisini açıklayacaktır.  $k_s=(F_s/A)/\Delta_x$  kullanılarak  $f(\Delta_x)=f(C_0, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \tau_{maks}, C, \phi_d, E_d, V_d)$  fonksiyonuna bağlı olacaktır.

T7: Dolgu malzemesi kalınlığının (a) kesme kuvveti ( $F_s$ ) üzerindeki etkisi: Eklem dolgusunun  $\tau-\sigma_n$  grafiğini nasıl etkilediğini inceleyen Hoek ve Bray (1973) Şekil 12'de verilen grafiği elde etmişlerdir.



Şekil 12. Dolgunun eklem kayma davranışına etkisi, (Hoek ve Bray, 1973).

Şekil 12'de görüldüğü gibi eklem üzerine uygulanan  $F_n$  sabit tutulduğunda, dolgu kalınlaştıkça eklemi kaydırmak için daha az  $F_s$  kuvveti kullanılacaktır. Bunun nedeni dolgunun kalınlaşarak eklem yüzey pürüzlülüklerini örtmesidir. Bu gibi durumlarda eklem davranışı tamamen dolgu malzemesinin özellikleriyle kontrol edilecektir.

E8: Pürüzlülük gelme açısının ( $i$ ) sürtünme açısına ( $\phi$ ) etkisi: Genel makaslama formülünü ele alırsak  $(F_s/A)=(F_n/A)\tan(\phi+i)$  buradan  $(F_s/F_n)=\tan(\phi+i)$  ve sonuçta  $\phi=\tan^{-1}(F_s/F_n)-i$  bulunacaktır. Buna göre  $i$  artarsa makaslama deneyindeki kabarma bölümü içindeki değerler büyüyecektir, kısaca  $(\phi+i)$  toplam açısı artacaktır. Ayrıca  $i$ 'nin artışı kaymaya karşı olan sürtünme kuvvetini artıracaktır.

T8: Sürtünme açısının ( $\phi$ ) pürüzlülük açısı ( $i$ ) üzerindeki etkisi:  $i$  açısı doğrudan eklemle ilgili olduğu için  $\phi$  açısındaki değişimle  $i$ 'nin doğrudan etkilenmesi mümkün görülmemektedir. Bunun yanında sürtünme açısını oluşturan kayaç yapısı, kimyasal özellikleri, mineralojik ve petrografik özellikler dolaylı da olsa  $i$  açısını etkileyecektir.

E9: Pürüzlülük açısının ( $i$ ) dolgu kalınlığı (a) üzerindeki etkisi: Dolgunun eklemde rol oynayarak eklem davranışını etkileyebilmesi için  $i$  açısıyla belirlenen pürüzlülükleri kaldırarak bunların işlevini azaltması gerekir.  $i$  açısı yükselse eklem zayıflık yüzeylerine dolgu malzemesinin sızması

zorlaşacaktır. Dolgu tane boyutuna göre dolgunun bütün eklem yüzeyince yayılmış olup olmadığı da değişecektir.  $i$  açısının düşük olduğu veya  $i=0$  olduğu durumlarda dolgu eklem davranışını doğrudan etkileyecektir.  $i$ 'nin fazla olduğu zamanlarda eklemlerdeki kaymaların etkisiyle pürüzlülük uçları kırılarak dolgu malzemesine karışacaklardır. Dolgunun olmadığı durumlarda bunlar dolgu malzemesi olarak eklemde yerlerini alacaklardır.

T9: Dolgu kalınlığının (a) pürüzlülük gelme açısı ( $i$ ) üzerindeki etkisi: Dolgunun kalın olması halinde pürüzlülüğün tipi önemini yitirmeye başlar çünkü kayma dolgu malzemesinde gerçekleşecektir. Bu nedenle dolgu kalınlığı belirli bir değeri aşip pürüzlülükleri kapatırsa  $i$  açısının önemi kalmayacaktır. Dolgu inceldikçe  $F_n$  kuvveti altında ezilen dolgu, eklem yüzeyindeki pürüzlülüklerin birbirlerine dokunmasına belirli bir sınırdan sonra engel olamayacaktır. Bu durumda  $i$  açısı  $F_s$  ve  $F_n$  değerlerini daha önce değinildiği şekilde etkilemeye başlar ve  $a$  ile  $i$  arasındaki ilişkiler şu şekilde de ifade edilebilir;

Eğer  $a>(\text{limit değeri}) \Rightarrow i$  açısı etkisi yok,

Eğer  $a<(\text{limit değeri}) \Rightarrow i$  açısı etkisi var.

E10: Sürtünme açısının ( $\phi$ ) dolgu kalınlığı (a) üzerindeki etkisi: Bu konuda önemli bir etkinin varlığına rastlanılamamıştır. Ancak dolaylı olarak etkilenmesi mümkün olduğu için bu belirsizliğin araştırılması gerektiğine karar verilmiştir.

T10: Dolgu kalınlığının (a) sürtünme açısı ( $\phi$ ) üzerindeki etkisi: Şekil 12'de gösterildiği gibi dolgu kalınlığı arttıkça  $\tau-\sigma_n$  grafiği değişmektedir. Normal kuvvet ( $F_n$ ) arttıkça pürüzlü yüzeylerdeki çıkıntılar dolguyu ezerler ve birbirleriyle kenetlenmeye başlarlar. Bu nedenle dolgu kalınlığı azaldıkça  $\tau-\sigma_n$  grafiği yukarıya doğru kayarak sürtünme direncinin arttığını gösterir. Pürüzlülükler birbirine kenetlendikçe kayma eğrisi eğimi, yani ( $\phi$ ) veya ( $\phi+i$ ) artar.

#### 4. EKLEMLER BOYUNCA GELİŞEN MAKASLANANIN ETKİLEŞİM MATRİSİ İLE MODELLENMESİ

Bu bölümde yukarıdaki bölümlerde tartışılan ve  $F_n$ ,  $F_s$ ,  $i$ ,  $\phi$  ve  $a$  değerleriyle açıklanmaya çalışılan, eklem yüzeyi kayma davranışının modellenmesi sunulmuştur. Seçilen parametreler konunun sınırını

tanımlayacağı için verilen 5 parametre bu çalışmada karşılıklı etkileşimlerin sınırını oluşturacaktır. Daha ayrıntılı modeller için karşılıklı etkileşim parametre sayısı artırılarak kaya kütlelerinin ve eklem davranışlarının araştırılması gerekir. Burada birim küp yaklaşımıyla modellenmeye çalışılan eklem davranışlarına örnek verilmiş ve konunun irdelenme yöntemi belirlenmiştir. Seçilen 5 kaya kütlesi parametresi arasında tariflenen mekanik ilişkiler etkileşim matrisi üzerinde formülasyonlar olarak yazılırsa (Şekil 13) önceki etkileşim matrisi uygulamalarının (Hudson, 1992; Gökay 1994) daha farklı bir değerlendirmeye karşılaştırılır. Bazı karşılıklı etkileşimlerin tam olarak kavranamaması nedeniyle bu ilişkiler hakkında verilebilecek

deneyel veya teorik bir bilgi transferi yoktur. Bu ilişkilerin tariflenmesi kaya mekanikinde ileriki yıllarda yapılacak çalışmalara kalmıştır.

Matrisin oluşturulmasından sonra, bilinen parametrelerden yola çıkılarak matrisin diğer parametrik elemanlarına ulaşıp ulaşamayacağı kontrol edilmelidir. Bu konunun incelenmesi sonunda projeye konu olan kaya kütlelerinin davranışı seçilen değerlendirme parametreleriyle belirli şartlar içinde açıklanabilecektir. Matriste fonksiyonel olarak tanımlanan fakat formülasyonu tam olarak verilemeyen konular, üzerinde araştırma yapılması gereken konulardır. Bu ikili ilişkilerin araştırılıp ortaya çıkarılması modellemeyi daha da sağlamlaştıracaktır.

|                                                                  |                                                                              |                                                                                                                                      |                                                                                       |                                                                                                                                  |
|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Eklemler üzerindeki</b>                                       | <b>E1:</b><br>$F_s = F_n \cdot \tan(\phi+i)$<br>$F_s = F_n \cdot \tan(\phi)$ | <b>E2:</b><br>$f(\Delta_i) = f(F_n, a, k_n, M_k)$                                                                                    | <b>E3:</b><br>$(\phi+i) = \tan^{-1}(F_s/F_n)$<br>$\phi = \tan^{-1}(F_s/F_n)$          | <b>E4:</b><br>$k_n = (F_n/A)/\Delta_y$<br>$\Delta_y = F_n/(A \cdot k_n)$                                                         |
| <b>T1:</b><br>$F_n = F_s/\tan(\phi)$<br>$F_n = F_s/\tan(\phi+i)$ | <b>Makaslama (kesme) Kuvveti (<math>F_s</math>)</b>                          | <b>E5:</b><br>$\tan(\phi+i) = (F_s/F_n)$<br>$\tan(\phi) = (F_s/F_n)$                                                                 | <b>E6:</b><br>$(\phi+i) = \tan^{-1}(F_s/F_n)$<br>$\phi = \tan^{-1}(F_s/F_n)$          | <b>E7:</b><br>$k_s = (F_s/A)/\Delta_x$<br>$f(\Delta_x) = f(C_o, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \tau_{maks}, C, \phi_d, E_d, V_d)$ |
| <b>T2:</b><br>$f(\Delta_{Fnn}) = f(i, k_n, a)$                   | <b>T5:</b><br>$F_s = F_n \cdot \tan(\phi+i)$<br>$F_s = F_n \cdot \tan(\phi)$ | <b>Pürüzlülük Gelme açısı (i)</b>                                                                                                    | <b>E8:</b><br>$(\phi+i) = \tan^{-1}(F_s/F_n)$<br>$\phi = -i \cdot \tan^{-1}(F_s/F_n)$ | <b>E9:</b><br>$f(a) = f(F_n, F_s, i)$                                                                                            |
| <b>T3:</b><br>$(F_s/F_n) = \tan(\phi+i)$                         | <b>T6:</b><br>$(F_s/F_n) = \tan(\phi+i)$                                     | <b>T8:</b><br>$f(i) = f(\phi)$ belirsiz                                                                                              | <b>Eklemler sürünme açısı (<math>\phi</math>)</b>                                     | <b>E10:</b><br>$f(a) = f(F_n, F_s, i)$                                                                                           |
| <b>T4:</b><br>$F_n = k_n \cdot \Delta_y \cdot A$                 | <b>T7:</b><br>$f(F_s) = f(a, F_n, A, \phi, i)$                               | <b>T9:</b><br>Eğer $a > (\text{limit}) \Rightarrow i$ açısı etkisi yok,<br>Eğer $a < (\text{limit}) \Rightarrow i$ açısı etkisi var. | <b>T10:</b><br>$f(\phi) = f(F_n, F_s, a)$                                             | <b>Dolgu malzemesi kalınlığı (a)</b>                                                                                             |

Şekil 13. Oluşturulan karşılıklı etkileşim matrisi.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada tüm deneme mantığı kullanılarak süreksizliklere ilişkin makaslama deneyini etkileyen parametrelerin deneyi etkileme düzeyleri anlatılmıştır. Karşılıklı etkileşim matris yöntemi

kullanılarak incelenen parametreler arasındaki etki-tepki ilişkileri diğer çalışmalardan farklı bir yaklaşımla formüle olarak açıklanmıştır. Burada kaya kütlesi incelemelerinin getireceği kolaylıklar gösterilirken üzerinde çalışılan konuda araştırılması gereken ikili ilişkilerin nasıl belirlendiği

gösterilmiştir. Birim küp yaklaşımıyla başlayan kaya kütlesi tümünden gelme mantığı kaya kütlesinin davranışlarını etkileyen iç ve dış parametrelerin ayrı ayrı incelenmesini gerektirmektedir. Seçilen parametrik özelliklerle sınırlandırılan birim küp davranış özellikleri, bu parametrelerin ikili etkileşimleriyle açıklanmaya çalışılmıştır. Bireysel özelliklerin analizini yaparak kaya kütlesinin bütününe açıklamaya çalışmak yerine, burada bütünden yola çıkarak bireysel kaya kütlesi özelliklerinin kendi aralarındaki ilişkilere (karşılıklı etkileşimlere) ulaşılması amaçlanmıştır. Kaya kütlesinin doğal yapısı gereği, kayaç davranışlarının tamamı açıklanamamaktadır. Bu ve benzeri durumlarda kaya kütleleri kara kutu mantığıyla incelenmekte, kaya kütlesini etkileyen giriş ve çıkış verilerinin analiziyle davranışlar anlaşılmaya çalışılmaktadır.

Benzer çalışmalarda belirli davranış mekanizmalarını açıklamak için kaya kütlesi davranışlarını etkileyecek parametreler sıralanmalı ve bunlar arasındaki ilişkiler yukarıda açıklanan örnek çalışmada olduğu gibi araştırılmalıdır. Seçilen parametrelerin sayısı artırıldığı sürece açıklanması

gereken karşılıklı etkileşimlerin sayısı da artacak ve sonuçta kaya davranışı daha bütünsel olarak incelenebilecektir. Konunun matematiksel olarak araştırılması kaya mekanikinde yeni bir kaya kütlesi modelleme yaklaşımına yol açacaktır.

#### KAYNAKLAR

- Gökay, M.K. (1993) Proje parametrelerinin değerlendirilmesi ve interaksiyon matrisi. *Kaya Mekaniği Dergisi*, Türkiye Ulusal Kaya Mekaniği Derneği, Ankara, N9, s19-24.
- Hoek, E. ve Bray, J.W. (1973) *Rock Slope Engineering*, The Institute of Mining and Metallurgy, (IMM), London.
- Hudson, J.A. (1991) Atlas of rock engineering mechanism: Underground excavations, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abs.* V28, N6, ss523-536.
- Hudson, J.A. (1992) *Rock Engineering Systems, Theory and Practice*, Ellis-Horwood Pres.Londra.
- Miller, D.L. (1993) Kişisel görüşme, Londra Üniversitesi, Mineral Resource Engineering Bölümü, Imperial College.



## İZMİR METROSU NENE HATUN TÜNELİ ÜRETİM PARAMETRELERİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

### EXCAVATION PARAMETERS AND EVALUATIONS OF NENE HATUN TUNNEL - İZMİR METRO

**B. ARIOĞLU**

Yapı Merkezi Holding A. Ş., Çamlıca-İSTANBUL

**A. YÜKSEL**

Yapı Merkezi İnş. San. A. Ş., İzmir Metrosu İnşaatı, İZMİR

**E. ARIOĞLU**

Ar-Ge Bölümü, Yapı Merkezi Holding A. Ş., Çamlıca-İSTANBUL

**ÖZET:** 11.4 km'lik İzmir Metrosu Güzergahının Üçyol-Konak İstasyonları arasında bulunan Nene Hatun Tüneli (1675 m) Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu ile açılmıştır. Yapımına 26 Aralık 1995 tarihinde başlanan tünel 608 takvim gününde tamamlanmıştır. Üretim kayıtlarının değerlendirilmesi sonucunda 1 adım (iksa aralığı) ilerleme ortalama 670 dk'da tamamlanmakta olup bunun %29'unu ayna kazısının, %27'sini ise püskürtme beton işleminin aldığı tesbit edilmiştir. Bunun yanı sıra birim tünel kazı hacmi başına toplam çelik donatı tüketiminin 7.8 kg/m<sup>3</sup>, püskürtme beton tüketiminin 0.20 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> olduğu belirlenmiştir.

**ABSTRACT:** Nene Hatun Tunnel which is between Üçyol and Konak Stations of İzmir Light Rail Transit System was excavated by New Austrian Tunneling Method. Construction works started at 26 December 1995 and completed in 608 days. One round tunnel advance takes 670 minute time. Details of round; 29% excavation, 27% shotcrete and other works. On the other hand total reinforcement and shotcrete per unit tunnel excavation volume were estimated to be respectively 7.8 kg/m<sup>3</sup>, 0.20 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>.

#### 1. GİRİŞ

Türkiye'nin büyük metropol kentlerinden birisi olan İzmir'de 1980'li yılların sonuna doğru kent nüfusunun artmasıyla birlikte kentiçi ulaşımdayaşanan sıkıntılar, Yerel Yönetimi ulaşımdayeni-köklü çözüm arayışlarına itmiştir. Bu arayışlar içerisinde Yerel Yönetim ulaştırma etüdleri yaptırmış ve bu çalışmaların sonucunda bir yönden bir yöne doğru yerdeğıştiren toplam yolcu sayısının mevcut taşıma sistemleri ile taşınamayacağı ortaya çıkmıştır. Bu durumda yerel yönetim, kentin ana arterlerini daha yüksek taşıma kapasitesine sahip, çevre dostu ve girdileri itibariyle dışa daha az bağımlı raylı taşıma sistemi ile bağlama kararı almıştır. Alınan bu karar çerçevesinde Raylı Sistem Ağı'nın ana omurgasını oluşturacak olan Üçyol-Bornova arasındaki 11.4 km'lik güzergahın inşasına öncelik verilmiştir. Bu projenin yapımını Yapı Merkezi - Adtranz Konsorsiyumu üstlenmiş, inşaatına 18 Mayıs 1995 te başlanmış ve 22 Ağustos 2000 tarihinde sistem işletmeye alınmıştır.

Bu çalışmada, Üçyol-Konak arasında bulunan Nene Hatun Tüneli kazı çalışmaları sırasında elde edilen üretim verileri ele alınmış, bundan sonraki tünel çalışmalarına ışık tutması amacıyla bunların istatistiksel değerlendirme sonuçlarına yer verilmiştir.

#### 2. NENE HATUN TÜNELİ

İzmir Hafif Raylı Sistem Projesi I. Aşama İnşaatını oluşturan 11.4 km'lik Üçyol-Bornova güzergahının Üçyol-Konak İstasyonları arasındakalan bölümü "Derin Tünel" ile geçilmiştir. Bu kısmın tünel ile geçilmesi ile ilgili başlıca nedenler şunlardır;

- Üçyol-Konak arasında ~70 m'lik yükselti farkı bulunmakta ve bunun sonucu olarak düşey güzergah yüzeyden 30-50 m derindedir. Bu mertebedeki derinlikte aç-kapa inşaat metodu ekonomik değildir.
- Aç-kapa inşaat yapılması durumunda Güzergahın geçtiği İnönü Caddesinin iki yanında bulunan yakın binalar açık kazının oluşturacağı deformasyonların etki alanında kalacaktır. Kaldiki güzergahın bir bölümü de tamamen yapıların bulunduğu alanın altından geçmektedir.
- Kentin ana arterlerinden birisi niteliğinde olan İnönü Caddesindeki mevcut yoğun trafiğin kanalizasyon edilebileceği alternatif yollar söz konusu değildir. Güzergahın Üçyol tarafında (0+088.<sup>07</sup>-0+018.<sup>69</sup>), (0+011.<sup>09</sup>-0+093.<sup>28</sup>) km'leri arasında I. ve II. makas tünelleri, (0+140.<sup>00</sup>-0+289.<sup>00</sup>) km'leri arasında ise istasyon tüneli bulunmaktadır. Bunların dışındaki toplam 1384.70 m'lik güzergah bölümünde tünel, "Tek

Tüp-Çift Hat" kesitindedir. Makas tünellerinde, Raylı Sistem İnşaatının ileriki aşamalarda Buca tarafına doğru sürdürülebilmesine olanak sağlayacak tek hatlı bağlantı tünelleri açılmıştır. İstasyon Tüneli ile aç-kapa metodu

ile inşaa edilen Bilet Holü'nün bağlantısı eğimli "Merdiven Tünelleri" ile sağlanmaktadır. Nene Hatun Tüneli'ne ait karakteristik bazı bilgiler Çizelge-1'de özetlenmiştir.

Çizelge 1: Nene Hatun Tüneli Karakteristikleri

| Tünel Tipi                                    | Geometrik Boyutlar (L×H), m                                                                                                                           | Kazı Alanı, m <sup>2</sup> | Uzunluk m |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------|
| Çift Hat, Tek Tüp:                            | 9.70×7.10                                                                                                                                             | 65                         | 1384.70   |
| Geniştirilmiş Kesim (I., II. Makas Tünelleri) | 16.50×9.70                                                                                                                                            | 146                        | 141.58    |
| İstasyon Tüneli                               | 16.09×9.13                                                                                                                                            | 139                        | 149.00    |
| Buca Bağlantı Tünelleri (Tek Hat)             | 6.90×6.20                                                                                                                                             | 39                         | 76.90     |
| Merdiven Tünelleri                            | 9.29×6.55                                                                                                                                             | 57                         | 357.68    |
| Toplam                                        | -                                                                                                                                                     | -                          | 2107.96   |
| Formasyon Cinsi                               | Az -Orta - Çok Ayrışmış Çatlaklı Çok Sık Çatlaklı Andezit, Kil Taşı, Kum taşı, Konglomara Ardalanması Çok Zayıf Dayanımlı                             |                            |           |
| Örtü Kalınlığı                                | 7-40 m                                                                                                                                                |                            |           |
| Kazı - Destekleme Yöntemi                     | Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi, Püskürtme Beton, Çelik Hasır, Esnek Çelik İksa, Kaya Bulonu, Süren Çubuk                                           |                            |           |
| Kullanılan Kazı Makinası Tipi                 | Kollu Kazıcı Makina, (Westfalia, WAW 178/300) Hidrolik Çekiçli Kırıcı (OK RH9)                                                                        |                            |           |
| İç Kaplama                                    | Çift Hat Tüneli: 40 cm Su Geçirimsiz Beton (BS 30), Çift Kat Hasır Çelik İstasyon Tüneli: 50 cm Beton (BS30), Esnek Çelik İksa, Su İzolasyon Membranı |                            |           |

### 3. NENE HATUN TÜNELİNİN GEÇTİĞİ FORMASYONLAR VE JEOLojİK - JEOMEKANİK KARAKTERİSTİKLERİ

Nene Hatun Tüneli Miyosen yaşlı Kilitaşı, Kumtaşı ve Konglomera ardalanmasından oluşan tabakalar ve bu tabakaların üzerine aşıl uyumsuz olarak yerleşen ve yine Miyosen yaşlı (Yüzer ve arkadaşları,1993) Andezit kayacı içerisinde geçmektedir. (Şekil-1) Andezit, genel olarak gri kahverengi, az-orta-çok-tamamen ayrışmış durumda, çatlaklı çok sık çatlaklı ve Zayıf-Dayanımlı sınıflarındadır. Geçilen formasyonların basınç dayanım değerleri Çizelge-2'de özetlenmiştir. Bu değerler güzergahın mühendislik jeolojisi çalışmaları sırasında yapılan sondaj karotlarından elde edilmiştir. Tünelin Üçyol tarafındaki ilk bölümlerinde andezit gri renkli, az ayrışmış bloklar içeren, çatlak sistemi belirgin olarak takip edilemeyen zayıf orta dayanımlıdır. Üçyol istasyonuna kadar olan bu bölümlerde yaklaşık 20-50 m aralıklarla kuzeye yönelimli (350°-20°) ve (55-70°) eğimli ezilme zonları bulunmaktadır. Bu kısımlarda kayacın ayrışma derecesi çok veya yer yer tamamen ayrışmış durumdadır. Bu zonlarda su gelirinin de mevcut olması durumunda tavan kısmında zaman zaman aşırı sökülme meydana gelmiştir. Böyle zonlarda tavan

bölgesini destekleyerek emniyetli çalışma koşullarını sağlamak için önsüren (30-50 cm aralıklarla, L=3.0 m,  $\phi=26$  mm nervürlü çubuk) uygulaması yapılmıştır.

İstasyon tüneli bölgesinde kayaç koyu gri renkli, orta-çok ayrışmış, çok sık çatlaklı-"küp şeker" görünümlüdür. Kayacın bu şekilde çatlaklı olması kazı operasyonunu oldukça kolaylaştırmış olmasına karşın kaya bulonu işlemlerini güçleştirmiştir. Şöyleki; küçük kaya parçaları açılan deliğe düşerek deliğin tıkanmasına yolaçmış, enjeksiyon hortumu deliğe sürülememiş, deliğin bir, hatta birkaç kez daha delici uç ile taranması gerekmiştir. Üçyol İstasyonunun son kısımlarında (~km 0+280) koyu gri, az ayrışmış, orta az çatlaklı ve yüksek dayanımlı ( $\sigma_c \approx 1000-1200$  kgf/cm<sup>2</sup>) kayaç ile karşılaşmıştır. ~100 m uzunluğundaki tünel bölümünde kazıyı yapan kollu kazıcı (Westfalia Lünen WAW 178/300H Raodheader) makine ile kazı yapmak güçleşmiş kazıcı uç sarfiyatı ise aşırı ölçüde artmıştır.

Bütün tünel boyunca ortalama uç tüketimi 0.058 adet/m<sup>3</sup> iken bu bölümdeki uç tüketimi 0.082 adet/m<sup>3</sup> olarak gerçekleşmiştir. Bir müddet ilerlemeden sonra da roadheader ile kazı mümkün olmamıştır. Bu kısmın sonuna kadar kazı işlemi hidrolik çekiçli kırıcı makine (Beko tipi, OK RH9) ile yapılmıştır.

Çizelge 2: Formasyonların Basınç Dayanım Değerleri (Yüzer ve Ark., 1993)

| Kayaç Cinsi           | Ort. Basınç Dayanımı, kgf/cm <sup>2</sup> | Standart Sapma, kgf/cm <sup>2</sup> | Veri Sayısı, n |
|-----------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------|----------------|
| Az Ayrışmış Andezit   | 545                                       | 192                                 | 17             |
| Orta Ayrışmış Andezit | 309                                       | 83                                  | 2              |
| Çok Ayrışmış Andezit  | 189                                       | 140                                 | 5              |
| Kiltaş                | 180                                       | 127                                 | 7              |
| Silttaş               | 168                                       | 108                                 | 3              |
| Kumtaş                | 129                                       | 76                                  | 6              |
| Çakıltaş              | 230                                       | 255                                 | 14             |

km 0+400'lere doğru geçişli olarak kayacın dayanımı azalmış, ayrışma derecesi ise artmıştır. Dolayısıyla km 0+380'den sonra kazı işlemine tekrar kollu kazıcı makine ile devam edilmiştir.

km 0+380'den tortul kayaçların görüldüğü ~km 0+700 arasında kayaç açık gri renkli, az-orta çatlaklı, orta- yer yer çok ayrışmış durumda ve orta-zayıf dayanımlı andezit şeklindedir.

Güzergahın 0+700 ile 0+980 km'leri arasında kiltaş, kumtaş ve konglomera ardalanmasından oluşan tortul kökenli formasyonlar bulunmaktadır. Bu kısımda hakim kayaç açık gri-yeşil renklerdeki kiltaş'dır. Gri- sarı rekli kumtaş ise genellikle mercerler biçiminde olup yer yer su taşımaktadır. Konglomera genellikle açık kahve rengi ve orta çimentolaşma derecesindedir. Totul kayaçların gözlemlendiği tünel bölümünde herhangi bir kazı güclüğü ile karşılaşılması. Ancak, kazı çalışması sırasında kazı makinasının ayna önündeki manevrası sırasında tünel tabanı, suyun da etkisi ile aşırı ölçüde örselenmiştir. Bunun sonucunda iksa ayaklarının bulunduğu bölümdeki zemin taşıyıcılığını yitirmiştir. Diğer taraftan bu durum ayna önünde çalışan iş makinalarının manevra kabiliyetini önemli ölçüde azaltmıştır. Yapılan deformasyon ölçümleri değerlendirilerek tünel tabanında destekleme sisteminin 25 cm kalınlıkta püskürtme beton ve tek kat hasır çelik ile invertli (Ters kemerli) olarak yapılmasına karar verilmiştir.

Tünelin Bahribaba ağzına kadar olan bölümlerde andezitin oldukça değişken karakterlerde; az ayrışma-çok ayrışma derecelerinde ve çok zayıf dayanımlı-dayanımlı aralıklarında bulunduğu kaydedilmiştir. km 1+158 ile 1+148 arasında da koyu gri siyah renkli, yüksek dayanımlı andezit ile karşılaşılması. Burada gerçekleşen uç tüketimi ise 0.128 adet/m<sup>3</sup> mertebesinde. Yer yer, su gelirinin fazla ve çok-tamamen ayrışma derecesinin gözlenen kısımlarda tavanda aşırı sökülme olayları

meydana gelmiştir. Böyle zayıf formasyon şartlarında ayna yüzeyine ~5 cm kalınlığında püskürtme beton uygulanmış ve tavan bölgesine her iki iksada bir olmak üzere önsüren çubuk yerleştirilmiştir.

Tünel güzergahı boyunca kazı aynasının jeolojik durumu yaklaşık olarak her ~5-10 m'de bir ayna jeolojik haritası çıkartılarak izlenmiştir. Ayrıca bu çalışmalarda geçilen kaya ortamın jeomekanik parametreleri (çatlak sıklığı-RQD büyüklüğü, çatlak yüzeylerinin şekli, ayrışma durumu, su geliri, vb.) de belirlenmiş ve Barton-Q Kaya kütle kalitesi hesaplanmıştır. Kestirilen RQD <sup>(1)</sup> büyüklüğünün güzergah boyunca değişimi Şekil-2'de gösterilmiştir. (0-180)-(0+700) km'lerine ait RQD değerlerini istatistiksel büyüklükleri şöyledir; ortalama,  $X = \%50.4$ , standart sapma,  $S = \%15.6$  ve Değişkenlik katsayısı,  $V = \%30$ , (0+900)-(1+504) km'leri arası için aynı büyüklükler sırasıyla  $X = \%64.9$ ,  $S = \%16.9$  ve  $V = \%26$  olarak belirlenmiştir.

Nene hatun tüneli boyunca elde edilen ayrıntılı jeolojik profilde sıklıkla değişen ayrışma zonları ile karşılaşılması. Çok-tamamen ayrışmış zonlarda, RQD değerindeki azalmanın yanı sıra kayacın jeomekanik özelliklerinde de belirgin ölçüde zayıflama söz konusu olmaktadır. Böylesi ayrışma zonlarının bulunduğu kısımlarda destekleme sisteminde değişikliğe gidilerek; "B" tipi destekleme sisteminden "C" tipi destekleme sisteminin uygulamasına geçilmiş ve iksa aralıkları da 0.8 m'ye kadar düşürülmüştür.

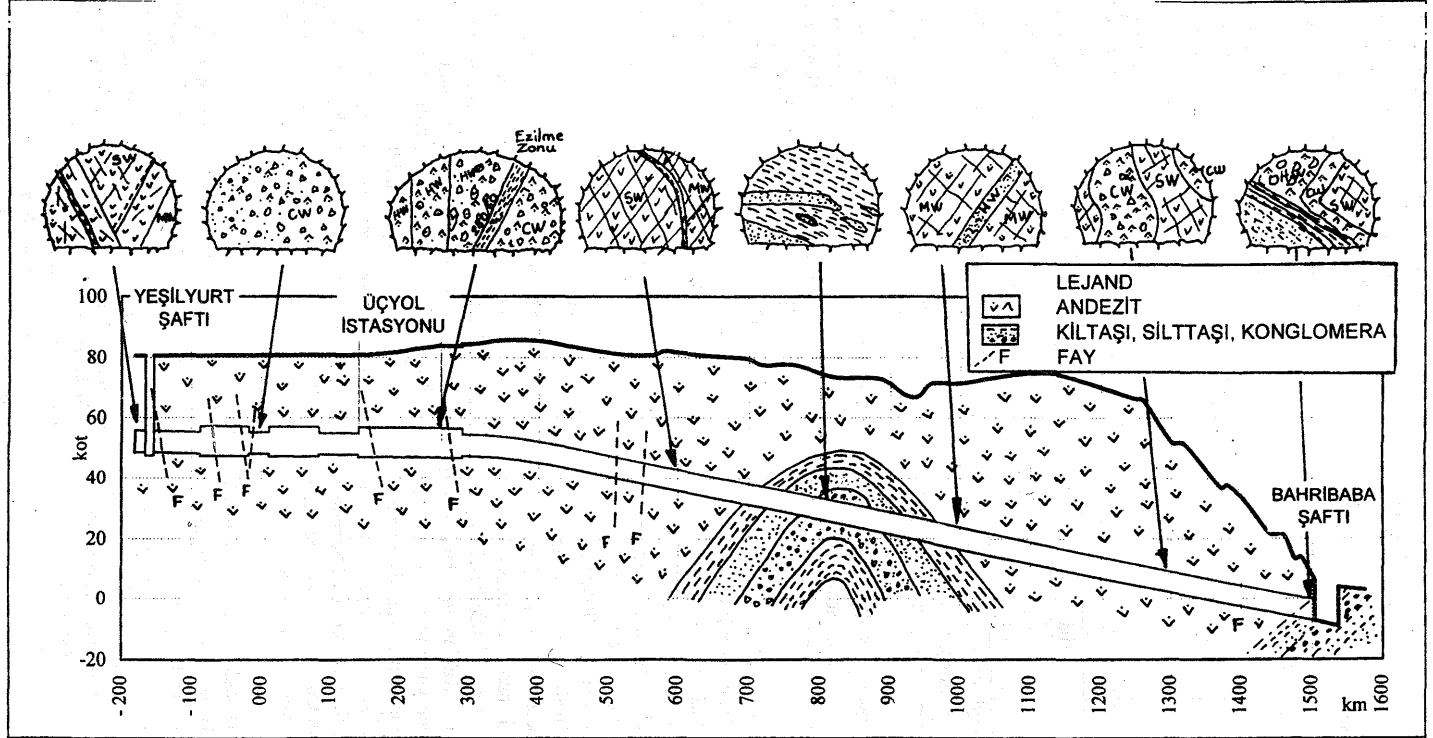
#### 4. KAZI-DESTEKLEME YÖNTEMİ VE KAZI İŞLEMLERİ

##### 4.1. Çift Hat Tüneli:

Nene Hatun Tünelindeki kazı-destekleme işlemleri Yeni Avusturya Tünel Açma Metoduna göre yapılmıştır. Esasları çok iyi bilinen bu metodun ayrıntılarına burada tekrar yer verilmeyecektir. Konu ile ilgili ayrıntılı bilgi için (Rabcewicz, 1964), (Sauer, 1990), (Arıoğlu, Yüksel, 1999) referanslarına başvurulabilir.

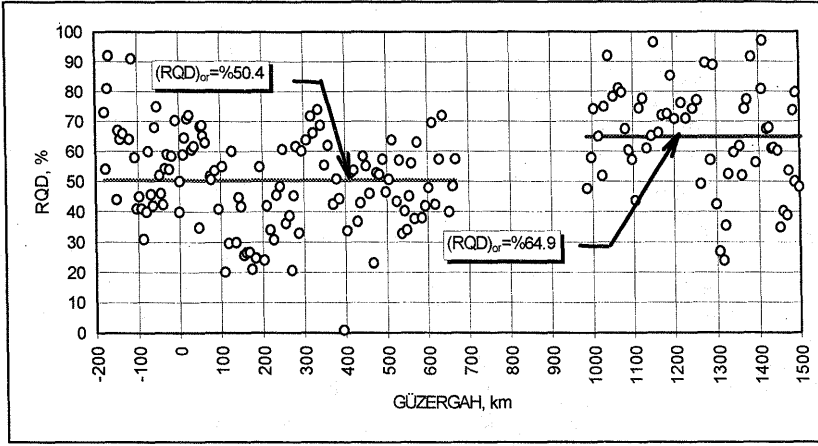
Çift hat tünelinde uygulanan kazı-destekleme aşamaları Şekil-3'de belirtilmiştir. Şekilden takip edildiği gibi kazı işlemi üst yarı ve alt yarıda birbirini izleyen biçimde yürütülmektedir.

<sup>(1)</sup> Bu büyüklük RQD =  $115 - 3.3 J_v$  bağıntısı yardımıyla hesaplanmıştır. Burada  $J_v$ , 1m<sup>3</sup> kaya hacmindeki kaya hacmindeki toplam çatlak sayısını ifade etmekte olup, tünel aynasındaki çalışma şartlarının güç olması ve zaman darlığı dolayısıyla, birim uzunluktaki her yöndeki çatlakların toplam sayısı dikkate alınmıştır. Ancak çatlakların izlenemediği "çok-tamamen ayrışmış" zonlarda ise, birim boydaki az-orta ayrışmış 10 cm'den büyük blokların toplam çizgisel uzunluğu RQD büyüklüğü olarak kabul edilmittir.



| Jeomekanik<br>Büyüklik | Değer Aralığı |         |           |          |           |           |          |          |
|------------------------|---------------|---------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|
| RQD, %                 | 24-70         | 20-72   | 21-69     | 51-74    | 25-72     | ölçülmedi | 43-96    | 24-97    |
| Q (Barton)             | 0.08-2.25     | 0.01-30 | 0.045-3.5 | 0.01-1.8 | 0.06-1.25 | -         | 0.03-2.5 | 0.01-2.6 |

Şekil-1: Nene Hatun Tüneli Jeolojik Kesiti



Şekil 2: Aynada Kestirilen RQD Değerlerinin Güzergah Boyunca Değişimleri

Üst yarı ile alt yarı arasındaki mesafe ayna stabilitesine bağlı olarak iyi zemin şartlarında iki iksa, daha kötü zemin şartlarında ise üç iksa aralığı mesafe bırakılmaktadır. Yapılan operasyonların sıralaması, kullanılan malzemelerin teknik özellikleri ve boyutları Çizelge-3'de özetlenmiştir.

Kazı işlemi aynaya dik olarak dönen, çift tamburlu kazıcı kafasına sahip Westfalia Lünen marka WAW 178/300 H model kollu kazıcı (Roadheader) ile yapılmıştır. Kazılan malzeme kazı makinası üzerinde bulunan zincirli oluk ile kamyonlara yüklenmiş, Üçöl tarafında ~10 m<sup>3</sup> kapasiteli damperli kamyon, Bahribaba tarafında ise ~14 m<sup>3</sup> kapasiteli Volvo marka belden kırmalı kaya damperli kamyon ile shaft tabanına taşınmıştır. Burada geçici olarak stoklanan kazı malzemesi ~5 m<sup>3</sup> hacmindeki kovalara yüklenen malzeme her iki fafta da bulunan Liebherr kule vinç ile yukarıya alınmış ve bir devrimsel boşaltma tertibatıyla kamyonu tekrar yüklenmiştir.

Püskürtme beton, şantiyede imal edilen bir besleme ünitesi üzerine monte edilmiş iki adet püskürtme beton makinası ile uygulanmıştır. Bu besleme ünitesi basit olarak, kızaklı bir şase üzerine yerleştirilen çift gözlü malzeme silosu, hızı ayarlanabilir lastik bant, dozaj makinası, kumanda panosu ve bu şaseye sabitlenmiş iki adet Meyco Marka kuru sistem püskürtme beton makinasından ibarettir.

Besleme ünitesinin kullanımıyla karışımın daima kesintisiz olarak beslenebilmesinin yanı sıra katkı malzemesinin her zaman istenilen sabit oranda ilave edilmesi sağlanmıştır. İki adet püskürtme beton makinası kullanılmasıyla püskürtme beton yerleştirme süresinde de önemli ölçüde zaman ekonomisi sağlanmıştır.

Püskürtme beton BS.20 (200 kgf/cm<sup>2</sup>-silindir) beton sınıfında tasarımı yapılmış, Üçöl şantiyesinde bulunan beton santralinde kuru karışım olarak üretilmiştir. Tünel içerisinde transmikserle aynaya getirilen kuru karışım %3-8 arasında değişen oranlarda priz hızlandırıcı toz katkı malzemesi ilave edilmiştir.

Kaya bulunu işleminde delikler Tamrock marka Paramatik HS 205 T model çift kollu jumbo delici ile delinmiş, enjeksiyon, harç karışımını otomatik olarak hazırlayan (0.40-0.50 su/çimento oranında) ve deliğe pompalayan Maipump 400 model enjeksiyon pompası ile yapılmış, bulon çubukları ise, jumbo delicideki platform üzerinde duran 2 işçi tarafından elle yerleştirilmiştir.

#### 4.2 Makas Tünelleri ve İstasyon Tünelinde Kazı-Destekleme İşlemleri:

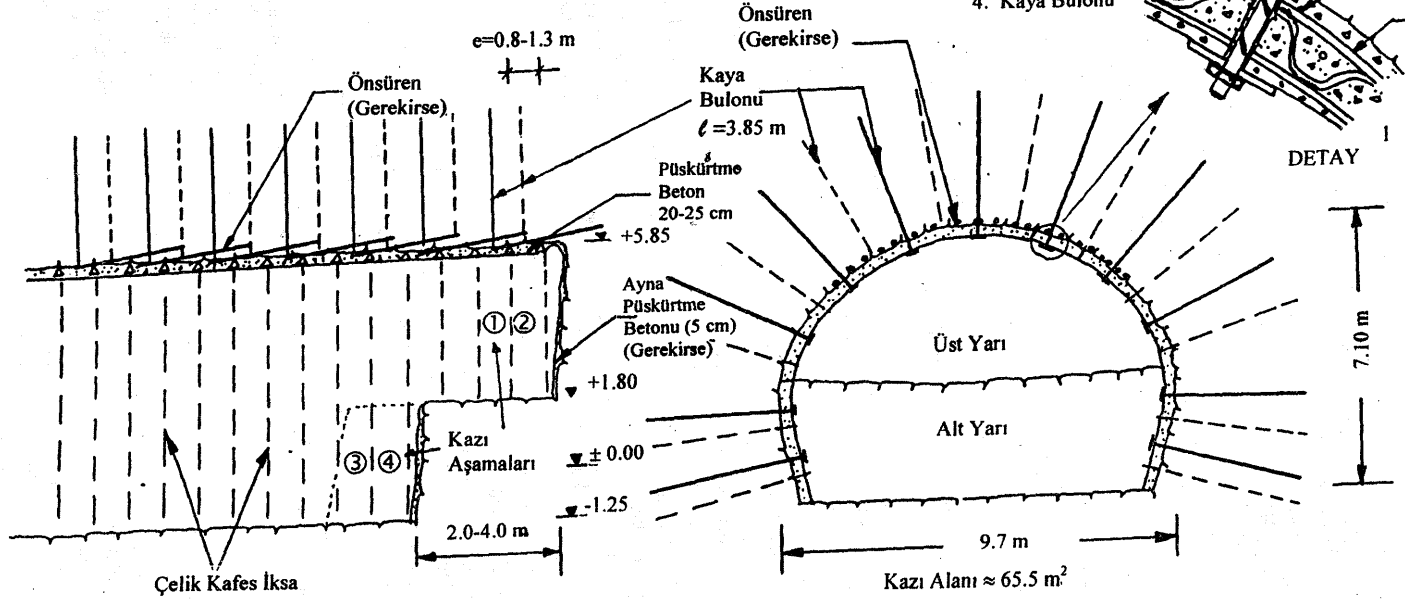
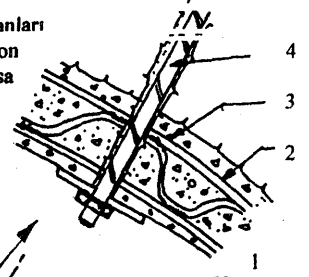
Güzergahın (0-088.<sup>09</sup>~0-018.<sup>69</sup>) km'leri arasında bulunan I. makas tünelinde uygulanan Kazı-Destekleme işlemleri Şekil-4a'da gösterilmiştir.

Önce 1a ve 1b no'lu kısımların kazısı ve desteklemesi (Çelik iksa+Hasır çelik+Kaya bulonu+Püskürtme beton) yapılmıştır. 2 ve 3 no'lu bölge tarafında kalan kazı yüzeyine ise sadece çelik hasır ve 20 cm kalınlığında püskürtme betondan oluşan geçici destekleme uygulanmıştır.

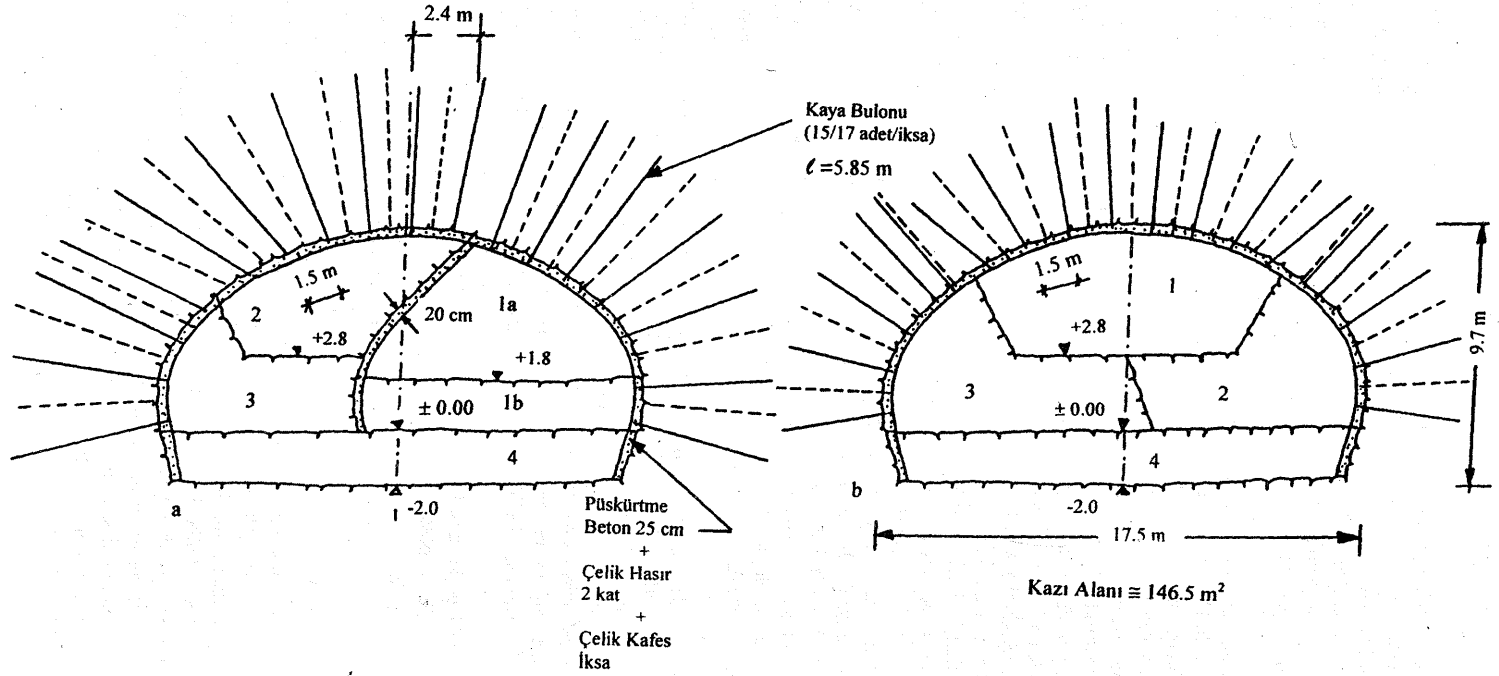
1a ve 1b kazıları kademeli olarak kesit sonuna kadar yapıldıktan sonra tekrar geri dönülerek 2 ve 3 no'bölgelerin destekleme işlemine başlanmıştır. Kazı 2 ve 3 no'lu bölgeler de benzer şekilde kademeli olarak yürütülmüştür.

**Destekleme Elemanları**

1. Püskürtme Beton
2. Çelik Kafes İksa
3. Çelik Hasır
4. Kaya Bulonu



Şekil 3: Nene Hatun Tüneli Destekleme Sistemi ve Kazı Aşamaları



Şekil-4: Makas Tünelleri ve İstasyon Tünelinde Uygulanan Kazı Aşamaları ve Destekleme Sistemi

1a bölgesindeki iksa parçası ile 2 no'lu kazı bölgesine yerleştirilecek iksanın birleştirilebilmesi için önceden yerleştirilen iksanın üzerindeki püskürtme beton, kazıdan sonra kırıcı tabancalarla temizlenmekte ve bindirme için bırakılan donatı çubukları ortaya çıkarılmaktadır. Daha sonra 2 ve 3 no'lu kazı bölgesi tarafındaki iksalar yerleştirilmektedir.

Ancak temizleme operasyonunun zaman alıcı olması ve dolayısıyla ilerleme hızının düşük olması nedeniyle bu kazı yönteminden vazgeçilmesi kararlaştırılmıştır. Ayrıca donatı bindirmesi için bırakılan çubuklar kırma işlemi sırasında hasar görmekte, buraya yeniden bindirme donatısı ilave edilmesi gerekmektedir.

II. Makas tüneli ve İstasyon tüneline, az-çok çift hat tüneline uygulanan yöntem benzer bir kazı şeklinin uygulamasına geçilmiştir. (Şekil-4b) Ancak üst yarı'nın geometrisi kullanılan çelik iksa uzunluğu ve kullanılan kazı makinasının boyutlarına bağlı olarak çift hat tüneline kısmen farklılık göstermektedir. Üst yarının sağında ve solunda "V" şeklinde topuklar bulunmaktadır. Bu metotta önce 1 no'lu bölgede arka arkaya iki iksanın kazısı yapılmaktadır. Daha sonra alt yarı; 2 ve 3 no'lu bölgelerin kazısı birlikte 2 adım olarak yapılmaktadır. Bu kazı şeklinde de ayna stabilitesinin sağlanması amacıyla üst yarı ile alt yarı arasında daima 2-3 iksa aralığı mesafe bulunmaktadır.

Kazı şeklinin değiştirilmesi ile :

- İlerleme hızında önemli ölçüde artış kaydedilmiştir. I. Makas tüneline ortalama ilerleme hızı 0.58 m/gün iken II. Makas Tüneli ve İstasyon Tüneline bu değer sırasıyla 0,86 m/gün ve 1,27 m/gün olarak gerçekleşmiştir. Böylelikle toplam kazı süresinde 136 günlük bir kazanım elde edilmiş ve yaklaşık olarak ~6300 adam.saat tutarında işçilik tasarrufu sağlanmıştır.
- İki kazı bölgesi arasındaki geçici destekleme sistemi için kullanılacak olan  $\approx 370 \text{ m}^3$  püskürtme beton ve  $\approx 8,2$  ton miktarında çelik hasır tasarrufu gerçekleşmiştir.

## 5. İLERLEME İSTATİSTİKLERİ

Nene Hatun Tünelinde kazı çalışmalarına 18 Mayıs 1995 tarihinde Yeşilyurt giriş şaftının yapıyla başlanmıştır.  $\phi = 15 \text{ m}$  çapındaki şaftın kazı işleminde hidrolik kırıcı beko türü makina kullanılmıştır. Kazılan malzeme  $\sim 2.5 \text{ m}^3$  hacimli kovaya yine aynı makina ile yüklenmiş ve bir mobil vinçle yukarı alınarak kamyonu yüklenmiştir. Şaftın duvarlarının desteklemesi ilk 10 m'lik derinliğe kadar yerinde dökme donatılı betonla yapılmış, tünel ekipmanlarının şantiyeye mobilizyonunu takiben bu derinlikten tabana kadar olan kısımda

duvarların desteklenmesi için 25 cm kalınlıkta püskürtme beton, çift kat hasır çelik (Q221/221) ve kaya bulunu ( $L=3.85 \text{ m}$   $\phi = 26 \text{ mm}$  nervürlü çelik çubuk) ile yapılmıştır. 32.5 m derinliğindeki şaftın kazısı toplam 195 takvim gününde tamamlanmış olup ortalama kazı ilerleme hızı 0.17 m/gün olarak gerçekleşmiştir. Şaft tabanında aynanın hazırlanmasından sonra tünel kazısına 26 Aralık 1995 tarihinde başlanmıştır. Bahribaba şaftının tamamlanmasıyla tünel aynası oluşturulmuş ve 26 Mayıs 1996 tarihinde bu taraftan da kazıya başlanmıştır. Güzergah hattındaki kazı iki tünel aynasının 25 Ağustos 1997'de km 0+654.40'de birleşmesiyle tamamlanmıştır. Tablo-4'de farklı tünel kesimlerinin açılma süreleri belirtilmiştir. Aynı tabloda anılan tünel kesimlerinde gerçekleşen ortalama ilerleme hızları ve ulaşılan maksimum günlük ilerleme hızı da gösterilmiştir.

Haftalık ilerleme miktarı esas alınarak hesaplanan ortalama günlük ilerleme miktarının güzergah boyunca değişimi ise Şekil-5'de gösterilmiştir. Farkedileceği üzere hem Üçyol, hemde Bahribaba tarafında başlangıçtan itibaren ilk 100 m'lik bölümdeki ilerleme hızları 1.5 m/gün civarındadır. Bu durum oluşturulan tünel kazı ekibinin işe uyum sağlama aşamasında olması, kazı malzemesinin yükleme ve taşınmasında kısmen aksamaların varlığı ve püskürtme beton üretim santralinin henüz işletmeye alınmaması gibi nedenlerden kaynaklanmıştır. (Yüksel, 2000) Kazı ekibinin zamanla deneyim kazanması ve yukarıda sözü edilen aksamaların giderilmesiyle ilerleme hızı giderek artış göstermiş 3.5~4.0 m/gün.ayna mertebelerine kadar ulaşmıştır.

Grafikte (0-100-0+000) (0+000-0+100) ve (0+100-0+300) km aralıklarında izlenen yatay değişimler I,II. Makas tünelleri ve İstasyon tünellerindeki ortalama hızları ifade etmektedir. Bu kesimde 4 no'lu taban kazısının (Şekil-4) daha sonra yapılması nedeniyle tünel boyunca günlük ilerleme hızı değişimi verilememiştir. Merdiven tünelleri ve Buca bağlantı tünelleri hariç, güzergah boyunca ortalama ilerleme hızı 2.32 m/gün.ayna olarak gerçekleşmiştir.

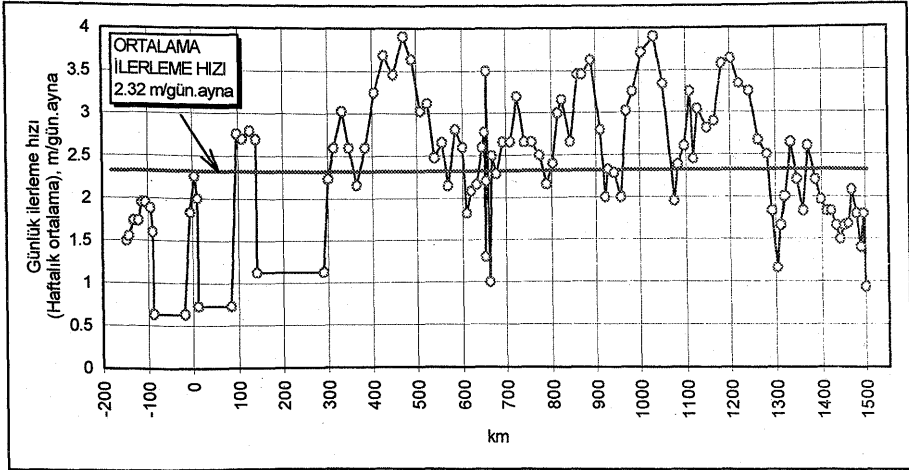
Tünel aynasında ölçülen RQD değerleri ile ilerleme hızı birlikte değerlendirilmiş ve bu iki büyüklük arasındaki ilişki bir grafik üzerinde gösterilmiştir (Şekil-6). RQD ile ilerleme hızı arasındaki ilişkinin korelasyonu çok düşüktür. Açıktrki, bu büyüklükler arasındaki ilişkinin korelasyonunun düşük olması, geçilen kısımlarda ayrışma derecelerinin çok sık değişmesi ve bu nedenle kestirilen RQD değerinin geçilen ortamı tam olarak temsil edememesi, zaman zaman malzeme teminindeki gecikmeler ve beklenmeyen mekanik arızaların ilerleme hızı üzerinde oluşturduğu gölgelenmeden kaynaklanabileceği ifade edilebilir.

Çizelge 3: Kazı-Destekleme İşlemleri (Yüksel, 2000)

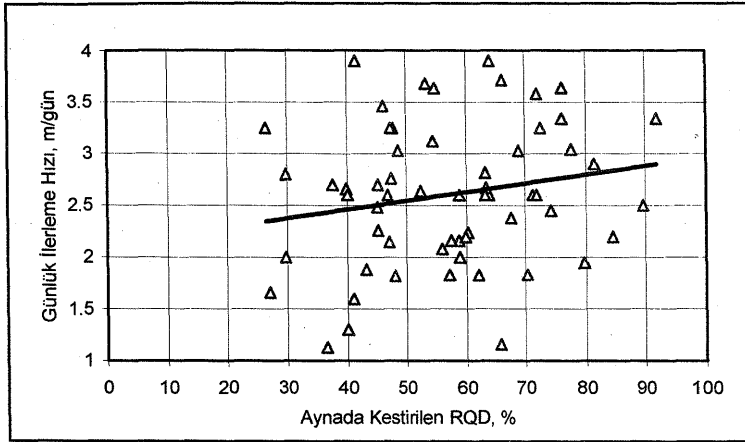
| Uygulama Aşaması                                                          | İşlem Türü                                                                                                                                                                                                                                                           | Geometrik Boyutlar ve Miktarı                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ÜST YARI                                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Önsüren (Gerektiğinde)</li> <li>• Kazı</li> <li>• Ön Püskürtme Beton (Gerektiğinde Ayna ve Kazı Yüzeyine)</li> <li>• Hasır Çelik Yerleştirme</li> <li>• İksa Yerleştirme</li> <li>• Püskürtme Beton</li> </ul>              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>L=3.0-3.60</math> m, <math>\phi=26</math> mm nervürlü çubuk, 10-30 adet, (Her iki iksada bir)</li> <li>• <math>0.8</math> m - <math>1.30</math> m , Arka arkaya 2-3 adım (iksa)</li> <li>• 5 cm kalınlığında BS20, Priz hızlandırıcı katkılı</li> <li>• Q 221/221 Tip, <math>W=3.47</math> kg/m<sup>2</sup> , 30 cm bindirme. ("B" tipi destekleme sisteminde tek kat , "C" tipi destekleme sisteminde çift kat)</li> <li>• Üst yarı için üç parçalı</li> <li>• BS20 beton sınıfında, Priz hızlandırıcı katkılı, ("B" tipi destekleme sisteminde 20 cm , "C" tipi destekleme sisteminde 25 cm kalınlıkta)</li> </ul> |
| ALT YARI                                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kazı</li> <li>• Ön Püskürtme Beton (Ayna ve Kazı Yüzeyine Gerektiğinde)</li> <li>• Hasır Çelik Yerleştirme</li> <li>• İksa Yerleştirme</li> <li>• Püskürtme Beton</li> <li>• Kaya Bulonu (Üst Yarı ile Birlikte)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (1.6-3.9m) İlerleme, 2-3 Adım birlikte</li> <li>• 5 cm kalınlığında BS20, Priz hızlandırıcı katkılı</li> <li>• Q221/221 Tip, <math>W=3.47</math> kg/m<sup>2</sup> , 30 cm bindirme</li> <li>• Alt Yarı için iki parçalı (Sağ ve Sol Ayaklar)</li> <li>• BS20 Beton sınıfında , Priz hızlandırıcı katkılı, ("B" tipi destekleme sisteminde 20 cm , "C" tipi destekleme sisteminde 25 cm kalınlıkta)</li> <li>• "B" Tipi destekleme sisteminde 7-8, adet/iksa, "C" Tipi destekleme sisteminde 11-12 adet/iksa, <math>L=3.85</math> m, <math>\phi=26</math> mm nervürlü çubuk +çimento enjeksiyonu</li> </ul>                 |
| TABAN (İNVERT)<br>Tortul Kayaçların<br>Bulunduğu Bölgede<br>Uygulanmıştır | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kazı</li> <li>• Hasır Çelik Yerleştirme</li> <li>• Püskürtme Beton</li> <li>• Geçici Dolgu</li> </ul>                                                                                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 4 kazı adımı birlikte</li> <li>• Q221/221 Tip, <math>W=3.47</math> kg/m<sup>2</sup> , 30 cm Bindirme</li> <li>• 20 - 25 cm kalınlıkta priz hızlandırıcı katkılı</li> <li>• 1.0 m Kalınlıkta</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

Çizelge 4: Tünel Kesimlerinin Açılma Süreleri ve İlerleme Hızları

| Tünel Kesimi               | Başlangıç-Bitiş Tarihi          | Ortalama İlerleme Hızı, m/gün | Maksimum İlerleme Hızı, m/gün |
|----------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Çift Hat Tüneli            |                                 |                               |                               |
| Üçyol Tarafı               | 26.Aralık.1995-25.Ağustos.1997  | 1.711                         | 5.2                           |
| Bahribaba Tarafı           | 26.Haziran.1996-25.Ağustos.1997 | 1.89                          | 5.2                           |
| Geniştirilmiş Kesim        |                                 |                               |                               |
| I. Makas Tüneli            | 29.Mart.1996-18.Temmuz.1996     | 0.58                          | -                             |
| II. Makas Tüneli           | 8.Ağustos.1996-14.Kasım.1996    | 0.98                          | 2.4                           |
| İstasyon Tüneli            | 13.Aralık.1996-24.Nisan.1997    | 1.27                          | 2.4                           |
| Tek Hat Bağlantı Tünelleri |                                 |                               |                               |
| Buca Sağ Hat               | 30.Eylül.1996-4.Kasım.1996      | 0.61                          | 1.3                           |
| Buca Sol Hat               | 18.Kasım.1996-19.Aralık.1996    | 1.17                          | 2.6                           |
| Merdiven Tünelleri         | 29.Temmuz.1997-1.Haziran.1998   | 1.82                          | -                             |



Şekil 5: Günlük İlerleme Hızının Güzergah Boyunca Değişimi



Şekil 6: Günlük İlerleme Hızı - RQD İlişkisi

## 6. İŞÇİLİKLER VE MALZEME KULLANIM İSTATİSTİKLERİ

Tüneldeki kazı-destekleme işlemlerinde her iki ayna için yeralan ortalama işçi sayıları (Çizelge-5) 'de belirtilmiştir. Sadece çift hat tüneli değerlendirildiğinde toplam işçilik tutarı yaklaşık olarak 54500 adam.gün olup tünel birim kazı hacmi başına düşen işçilik miktarı ise 14.5 adam.saat/m<sup>3</sup> olarak gerçekleşmiştir. Makas Tüneli ve İstasyon Tüneli için aynı büyüklükler sırasıyla 29600 adam.gün, 17.2 adam.saat/m<sup>3</sup>'dür.

Tünel delme işlemleri sırasında tutulan saha kayıtları (Yüksel, 2000) istatistiksel değerlendirmeye tabi

tutulmuş ve kazı-destekleme <sup>(2)</sup> operasyonlarında yer alan işlemlerin ortalama süreleri belirlenmiştir. Yapılan bu değerlendirmeye göre bir adımlik ilerleme (0.80-1.3 m) için işlemlerin toplam süresi bekleme ve ara verme süreleri dahil 670 dakikadır. Şekil-7'de ortalama işlem sürelerinin dağılımı gösterilmiştir. Bu dağılımdan farkedileceği üzere en fazla süreyi %29 oranla "ayna kazısı" almaktadır. Bunu yakın bir oranla (%27) "püskürtme beton" işlemi izlemektedir.

<sup>(2)</sup> İşlem süreleri dağılımı için çift hat tüneli değerlendirmeye alınmıştır.

Çizelge 5: Çift Hat Tüneli İşçilik Sayıları

| İşçi Niteliği               | İşçi Sayısı (*)<br>(adet/gün) |
|-----------------------------|-------------------------------|
| • Formen                    | 4                             |
| • Formen Yardımcısı         | 6                             |
| • Makina Operatörü          | 6                             |
| • Jumbo Operatörü           | 6                             |
| • Keççe Operatörü           | 8                             |
| • Kamyon+Transmikser Töförü | 12                            |
| • Tünelci                   | 42                            |
| • Şaft İşçisi               | 8                             |
| • Elektrik+MekanikTamirci   | 8                             |
| <b>Toplam</b>               | <b>100</b>                    |

(\*) İki kazı aynasındaki üç vardiya toplamıdır.

Farklı operasyonlar ile, kayacın jeomekanik özelliklerini karakterize eden RQD değeri arasındaki ilişkiler değerlendirmeye alınmıştır. Şekil-8'de RQD-toplam işlem süresi arasındaki ilişki görülmektedir. Bu iki büyüklük arasındaki ilişkinin düşük bir korelasyona sahip olmasına rağmen toplam kazı süresi, RQD değerinin %60-80 aralığında minimum değerlerde olmaktadır. Bunun nedeni şöyle açıklanabilir; zayıf formasyon şartlarında kazı işi kolay yapılmasına karşın püskürtme beton işlemi daha fazla süre almaktadır. Diğer yandan sağlam formasyon şartlarında ise kazı işlemi zorlaşacağı için toplam süre yine fazla olacaktır. Keza bu durum RQD-Kazı Süresi ve RQD- püskürtme beton süresi arasındaki ilişkilerde istatistiksel olarak belirlenmiş, ancak söz konusu büyüklükler arasındaki değişimin korelasyon katsayısı düşük olduğundan burada verilmemiştir.

Nene Hatun Tüneli, kazı-destekleme çalışmalarında kullanılan malzeme miktarları aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 6: Nene Hatun Tüneli Malzeme Tüketim Miktarları

| Malzeme                             | Birim          | Miktar          |
|-------------------------------------|----------------|-----------------|
| Çelik                               | adet           | 1482            |
| İksa                                | ton            | 529.481         |
| Hasır Çelik                         | ton            | 446.786         |
| Kaya Bulonu                         | adet           | 17660           |
|                                     | ton            | 321.655         |
| Süren Çubuk                         | adet           | 481             |
|                                     | ton            | 6.196           |
| <b>Toplam Çelik Donatı Tüketimi</b> | <b>ton</b>     | <b>1304.118</b> |
| Püskürtme Beton                     | m <sup>3</sup> | 30939           |
| Priz Hızlandırıcı                   | ton            | 817.605         |
| Kazı                                | m <sup>3</sup> | 163330          |

Projede öngörülen destekleme tiplerinden (A) tipi destekleme sistemi <sup>(3)</sup> yer yer jeolojik anomalilerden ve daha çokta güzergahın yoğun yerleşim alanında olması yüzünden daha emniyetli tarafta kalınma gerekçesiyle uygulanmamıştır. Bunun yerine (B) tipi destekleme sistemi kullanılmıştır. Nitekim yerüzünde oluşturulan 53 oturma ölçüm noktasında yapılan 994 adet ölçümde belirlenen maksimum oturma miktarı 9 mm olarak gerçekleşmiş olup güzergah üzerinde yer alan binalarda "yapısal hasar" oluşturabilecek bir bulguya rastlanmamıştır.

Çizelge-7'de ise birim tünel uzunluğu başına gerçekleşen malzeme tüketim miktarları özetlenmiştir. Aynı tabloda birim kazı hacmi başına düşen malzeme miktarları da verilmiştir. Anılan değerler benzeri tünel projelerinin tasarımında mühendise yol gösterecek niteliktedir.

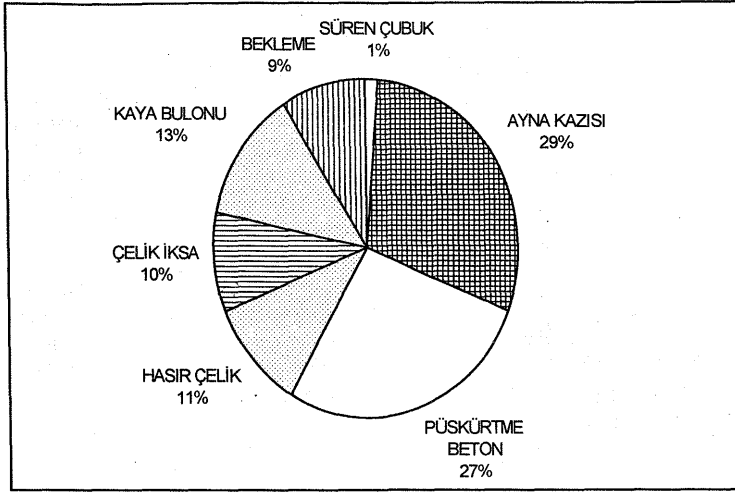
Çizelge 7: Malzeme Tüketim Parametreleri

| Malzeme            | Birim Tünel Uzunluğunda Malzeme Tüketimi |        | Birim Kazı Haciminde Malzeme Tüketimi |        |
|--------------------|------------------------------------------|--------|---------------------------------------|--------|
|                    | Birim                                    | Miktar | Birim                                 | Miktar |
| İksa               | adet/m                                   | 0.70   | adet/m <sup>3</sup>                   | 0.009  |
| Kaya Bulonu        | adet/m                                   | 8.4    | adet/m <sup>3</sup>                   | 0.11   |
| Süren Çubuk        | adet/m                                   | 0.23   | adet/m <sup>3</sup>                   | -      |
| Topl. Çelik Donatı | ton/m                                    | 0.618  | kg/m <sup>3</sup>                     | 7.98   |
| Püskürtme Beton    | m <sup>3</sup> /m                        | 14.67  | m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>        | 0.19   |

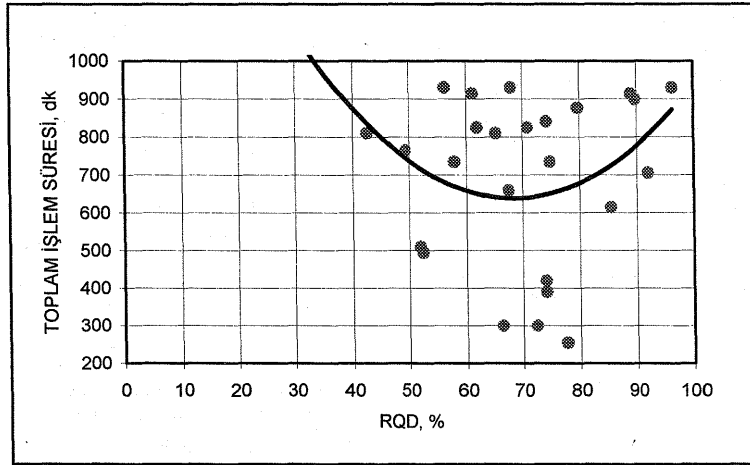
İstanbul Hafif Raylı Sistem Güzergahında yer alan ve yapımını Yapı Merkezi-ABB Konsorsiyumu'nun üstlendiği "Mevhibe İnönü Tüneli" (1340 m, kazı alanı~68 m<sup>2</sup>) (Arnoğlu ve Ark, 1995) ile incelenen tünel karşılaştırıldığında aşağıda belirtilen sonuçlar öne çıkmaktadır:

- İşlem süreleri dağılımın ele alındığında incelenen tünelde ayna kazısı işlem süresi daha fazla iken, M. İnönü Tünelinde destekleme işlemi daha fazla süre almaktadır.

<sup>(3)</sup> "A" Tipi Destekleme sistemi Çelik hasır (tek kat)+Kaya bulonu (7-8 adet/iksa)+Püskürtme beton (15 cm), "B" Tipi Destekleme sistemi ise Çelik kafes iksa+Çelik hasır (tek kat)+Kaya bulonu (7-8 adet/iksa)+Püskürtme beton (20 cm)'dan oluşmaktadır



Şekil 7: Ortalama İşlem Sürelerinin Dağılımı



Şekil 8: Aynada Kestirilen RQD-Toplam İşlem Süresi Arasındaki İlişki

Bu durum konsolide kil, silt ve ayrılmış marnlı kireçtaşları içerisinde geçen M. İnönü Tünelinin daha zayıf formasyon şartlarına sahip olması, dolayısıyla kazı operasyonunun daha kolay, ancak buna karşın destekleme işlemlerinin daha zor olması ile açıklanabilir.

- Bu duruma paralel olarak ortalama ilerleme hızı M. İnönü Tünelinde 2.76 m/gün.ayna iken daha sağlam formasyon şartlarına sahip Nene Hatun tünelinde 2.32 m/gün.ayna düzeyinde gerçekleşmiştir.

- Diğer taraftan ana üretim girdilerinden birisi olan birim tünel uzunluğundaki toplam çelik miktarı M. İnönü Tünelinde 0.876 t/m iken Nene Hatun Tünelinde 0.618 t/m'dir
- Püskürtme beton için bu değerler her iki tünel için sırasıyla 16.01 ve 14.67 m<sup>3</sup>/m'dir. Ancak Nene Hatun Tünelinde farklı geometrilerde tünel kesitlerinin bulunduğu ayrıca dikkate alınmalıdır.

## 7. SONUÇLAR

- Tünel kazısı sırasında bir adımlık (0.80-1.3m) ilerleme ortalama olarak 670 dakikada tamamlanmaktadır İşlem sürelerinin dağılımında en fazla payı %29 ile kazı operasyonu almakta, bunu yakın bir oranla (%27) püskürtme beton işlemi izlemektedir.(Şekil-7)
- Nene Hatun Tüneli güzergahı boyunca ortalama ilerleme hızı 2.32 m/gün-ayna olarak gerçekleşmiş olup çalışma sırasında 5.2 m/gün-ayna maksimum hıza ulaşılmıştır. (Şekil-5)
- Aynada kestirilen RQD değerinin % 60-80 aralığında toplam işlem süresi minimum değerini almaktadır. (Şekil-8) Başka bir deyişle optimum kazı şartları "Orta - İyi" Kaya Kalite sınıf aralığında gerçekleşmektedir.
- Tünel desteklemesinde birim tünel uzunluğu başına malzeme tüketimleri; çelik donatı için 0.618 ton/m, püskürtme beton için ise 14.67 m<sup>3</sup>/m olarak bulunmuştur.(Çizelge-7)

## TEŞEKKÜR

Yazarlar bu çalışmanın yapılmasında gösterdikleri yakın ilgi ve akademik destek için Yapı Merkezi Holding Grubu Yönetim Kurulu Başkanı Sn Dr. Müh. Ersin ARIÖĞLU'na ve İzmir Metrosu İnşaatı Proje Müdürü Sn Müh. Naim İŞLİ'ye burada teşekkür etmeyi yerine getirilmesi gereken görev sayarlar. Çalışmada belirtilen tüm görüş ve değerlendirmeler doğrudan doğruya

yazarlarına ait olup herhangi kurum ve kuruluşu bağlamaz..

## KAYNAKLAR

- Arioğlu, E., Yüksel, A., 1999, *Tünel ve Yeraltı Mühendislik Yapılarında Çözümlü Püskürtme Beton Problemleri*, Maden Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul, (Temmuz).
- Yüksel, A., Arioğlu, E., 1999, *Yeraltı Yapılarında Püskürtme Beton*, Maden Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, Çalışma Raporu-8, İstanbul, (Şubat).
- Arioğlu, Başar, Yüksel, A., ve Arioğlu, Ergin, 1995, *İncirli M. İnönü Tüneli Yapım Çalışmaları ve Üretim Parametreleri*, I. Ulaştırma ve Yeraltı Kazıları Sempozyumu, Maden Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul, (Şubat).
- Rabcewicz, L., 1964, *The New Austrian Tunneling Method*, Water and Power, November.
- Sauer, G., 1990, *NATM in Soft Ground*, World Tunneling, Vol.3, No.6, (November).
- Yapı Merkezi, 1997, *Nene Hatun Tüneli Saha Kayıtları*, Yapı Merkezi, İzmir Metrosu, İzmir.
- Yüksel, A., 2000, *Nene Hatun Tüneli Üretim Raporu*, Yapı Merkezi, İstanbul, (Şubat).
- Yüzer ve Ark., 1993, *İzmir Metrosu Fahrettin Altay-Basmane Güzergahının Mühendislik Jeolojisi*, İTÜ Maden Fakültesi Mühendislik Jeolojisi ve Kaya Mekaniği Çalışma Grubu, İTÜ Maden Fakültesi, İstanbul, (Eylül).



## İZMİR-KARŞIYAKA TÜNELLERİNDE KAZI VE İŞ-ZAMAN ETÜDÜ

### EXCAVATION AND WORK-TIME IN İZMİR-KARŞIYAKA TUNNELS

**Ç. TATAR**

DEÜ Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü, İZMİR

**M. E. ERTEM**

Kutlutaş-Dillingham, İZMİR

**ÖZET:**Ulaşım, sulama ve madencilğin temel yapılarından olan tünel, son yıllarda gelişen teknoloji ile beraber, giderek artan bir önemle uygulama alanları bulmaktadır. İzmir çevre yolu projesi bünyesinde yer alan ve Bornova ile Karşıyaka'yı birbirine bağlayan Karşıyaka Tünelleri İzmir'in kuzey kesimindeki Yamanlar Dağı'nın altında inşa edilmişlerdir.

Karşıyaka Tünelleri'nde kazı ve destekleme için Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi uygulanmıştır. Bu çalışmada, Karşıyaka Tünelleri'nde yapılan kazı ve iş-zaman etütleri anlatılmıştır. Tünel açma sırasında ortaya çıkan sorunlara çözümler üretilmiş ve uygulamaya konmuştur.

**ABSTRACT:** The tunnels which are base structures of transportation, irrigation and mining facilities have been finding new application areas in recent years as a result of advancing technology. The Karşıyaka tunnels which are contained in the İzmir Beltway project to connect Bornova to Karşıyaka are being built under the Yamanlar mountain in the North of the city of İzmir.

The New Austrian Tunnelling Method (NATM) has been utilized in the Karşıyaka Tunnels for excavation and support work. In this study, the excavation and work-time studies carried out in the Karşıyaka Tunnels are presented. The problems encountered during the tunneling work and the measures to overcome these problems are also summarized.

#### 1. GİRİŞ

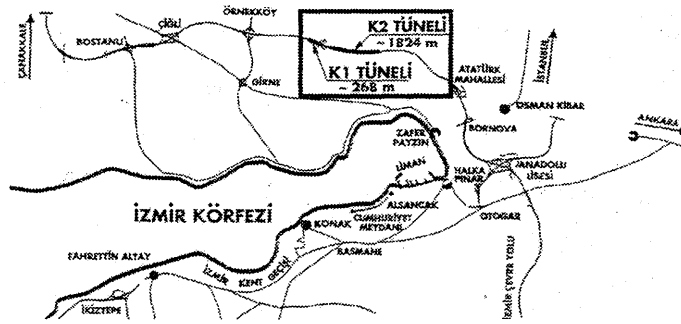
Madencilik, enerji, ulaşım, sulama v.b. alanlarda yeni yapıların hızla çoğalmasının nedeni, dünya nüfusunun artan bir ivme içinde olması ve insanların, gereksinimlerini karşılamak için çözüm arayışlarına girmeleridir. Ulaşım, sulama ve madencilikte temel yapı taşlarından olan tünel, son yıllarda gelişen teknoloji ile beraber, giderek artan bir önemle uygulama alanları bulmaktadır.

Kazılabilen ve tahkim edilebilen yer altı geçişine "tünel" diyoruz. Mühendislikte, bu tür yeraltı yapıları, yapım metotları ve ölçülerine göre ayrılırlar. Dünya üzerindeki büyük toplulukların genel problemleri arasında yeni yerler inşa etmek için gerekli boş alan bulunması yer almaktadır. Yani mevcut yapı yoğunluğu, yeni gelişmelere izin vermemektedir. Bunun ötesinde, trafikte yüksek ve karmaşık bağlantılar kullanmak yerine, daha basit ve kısa bağlantılar tercih edilmektedir.

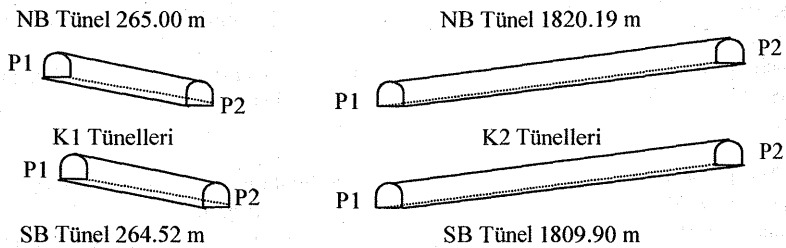
Araç geçişi için inşa edilmiş olan tüneller, gerçek trafik bağlantıları olmaktadır. Böylelikle, bir tünel, bir yolun veya demiryolunun önemli bir parçası olarak görev almaktadır. Boş alan azlığı ve çevre sorununun yaşanmadığı önceki yıllarda tünelcilik sadece, zorlu dağ engellerini aşmak için düşünülürken günümüzde yer yokluğu ve çevre etkisi daha kolay yöntemlerle (örneğin hafriyat) çözümlenebilecek yapılarda bile insanları tünellere yönlentmektedir.

#### 2. KARŞIYAKA TÜNELLERİ

Karşıyaka Tünelleri, İzmir'in kuzey kesimindeki Yamanlar Dağının altında inşa edilmişlerdir (Şekil 1). Tüneller Aydın-İzmir Otoyolu, İzmir Çevre Yolu projesinin bir parçası olarak 4 tüpten oluşan, üçer şeritli gidiş ve geliş hattı olmak üzere iki yönlüdür. Tünellerin uzunlukları ve isimlendirme sistematiği Şekil 2 de verilmiştir.



### Şekil 1. Karşıyaka Tünellerinin Yeri



Şekil 2. Karşıyaka Tünellerinin Uzunlukları

### 3. KARŞIYAKA TÜNELLERİNİN KAZI ETÜDÜ

İzmir çevre yolu projesi bünyesinde yer alan ve Bornova ile Karşıyaka'yı birbirine bağlayan Karşıyaka Tüneli, Yamanlar Volkanikleri içerisinde geçmektedir. Yamanlar Volkaniklerinde tünel kazısı esnasında; altere-çok altere andezitler (Yaşlı andezitler), andezit-dasit bileşimli lav akmaları (Genç andezitler), aglomeralar, dasitik tüf ve dayk girmeleri ile karşılaşmıştır. (Turhan, 1999)

### 3.1. İşletmede Etüt Safhasında Yapılan ile DEÜ Maden Mühendisliği Bölümü'nde Yapılan Tek Eksenli Basınç Deneylerinin Karşılaştırılması

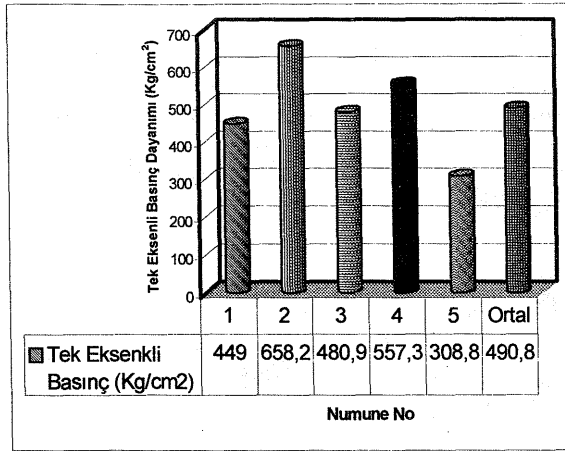
Etüt safhasında sondaj karotlarından alınan andezit numunelere yapılan tek eksenli basınç deneyi sonuçları aşağıda verilmiştir, (Kutlutaş-Dillingham, 1999)

K2P1 tarafı tek eksenli Basınç Dayanımı: 187.2-415.2 kg/cm<sup>2</sup>

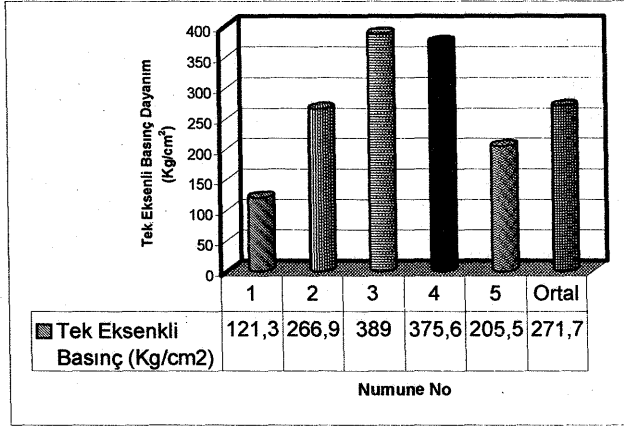
K2P2 tarafı tek eksenli Basınç Dayanımı: 115.2-552.0 kg/cm<sup>2</sup>

Maden Mühendisliği Bölümü'nde yapılan deney sonuçları Şekil 3 ve Şekil 4'de verilmiştir. K2P1SB tüneline alınan andezit numuneler, tünel ağzına 957 m uzaklıkta ve tabii zeminin 105 m. altındaydı. K2P1NB Tünelinden alınan altlere olmuş andezit numuneler ise tünel ağzına 783,10 m uzaklıkta ve tabii zeminin 94,74 m altındaydı.

DEÜ laboratuvarında yapılan deneylerde bulunan tek eksenli basınç değerleri ortalaması K2P1NB Tünelinde  $271.66 \text{ kg/cm}^2$ , K2P1SB Tünelinde  $490.84 \text{ kg/cm}^2$ , işletmenin değerleri K2P1Tünelinde  $187.2 \text{ kg/cm}^2$ - $415.2 \text{ kg/cm}^2$  olarak görülmektedir. Görüleceği üzere işletmenin verileri ile DEÜ Maden Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında yapılan testlerin sonuçları birbirleriyle benzerlikler göstermektedirler.



Şekil 3. K2P1SB Tünelinden Alınan Numunelerin Tek Eksenli Basınç Dağılımı



Şekil 4. K2P1NB Tünelinden Alınan Numunelerin Tek Eksenli Basınç Dağılımı

### 3.2. Karşıyaka Tünellerinde Uygulanan Tünel Açma Yöntemi

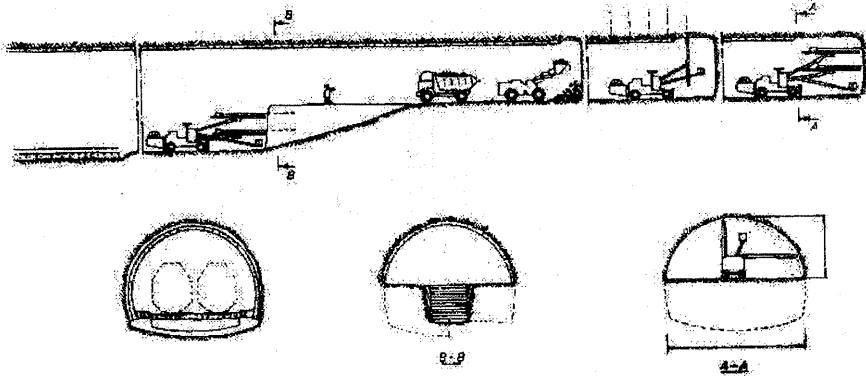
Karşıyaka Tünelleri'nde kazı ve destekleme için Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi uygulanmıştır. Yeni Avusturya Yöntemi; tünelin kendisini açıldığı kaya ortamına taşıtma ilkesine dayanmaktadır. Açılan boşlukta, boşluğu çevreleyen yan taşlarda ortaya çıkan yeni kuvvetlerin kontrolü ile seçilen tahkimatın uygulanması bu yöntemin ana dayanakları olmaktadır (Jodl,1995). Ayna, üst yarı, alt yarılar ve rampa olmak üzere 3 parça halinde

kazılmıştır (Şekil 5). Kazı delme (jumbolarla) ve patlatma ile yapılmıştır. Ettüt safhasında 4 kaya sınıfı belirlenmesine rağmen uygulamada 3 sınıf kullanılarak, tünellerin ekonomikliği artırılmıştır.

### 3.3. Kaya Sınıfları için Tünelde Kazı ve Destekleme

Karşıyaka Tünellerinde kazı ve desteklemenin toplam açılan tünel uzunluğuna göre %3'ü kaya sınıfı P'ye göre, %34'ü kaya sınıfı 5'e ve %63 kaya sınıfı 6'ya göre yapılmıştır. Standart destekleme

elemanları ve miktarları ilgili kaya sınıfları için Çizelge 1 ve Çizelge 2’de verilmiştir.



Şekil 5. Yeni Avusturya Yöntemi’nde Çalışma Safhaları (Köse ve diğ. 1992)

Çizelge 1. Üst Yarı için Standart Destekleme Sistemi

| Kaya Sınıfı               | Birim          | 4           | 5           | P           |
|---------------------------|----------------|-------------|-------------|-------------|
| İlerleme Uzunluğu         | m              | 1.5-2.5     | 1.0-1.5     | 1.2         |
| Püskürtme Beton Kalınlığı | cm             | 15          | 25          | 25          |
| Çelik Profil              | Tip            | GI 110      | GI 140      | GI 140      |
| Çelik Hasır               | Kat            | 1           | 2           | 2           |
| Kaya Bulonu               | 4 m            | Sayı        | 6-7         | 5-6         |
|                           | 6 m            |             | 4           | 8-9         |
|                           | 9 m            |             | -           | 4           |
| Ayna Püskürtme Betonu     | cm             | 3-5         | 5           | 3-5         |
| Süren Uygulaması          | Sayı           | 10          | 25          | 37          |
|                           | Tip            | 2" boru enj | 2" boru enj | 2" boru enj |
|                           | Uzunluk        | 4 m         | 3 m         | 2.5 m       |
| Kazı Alanları             | m <sup>2</sup> | 158.37      | 167.70      | 167.70      |

Çizelge 2. Alt Yarı için Standart Destekleme Sistemi

| Kaya Sınıfı               | Birim | 4      | 5      | P      |
|---------------------------|-------|--------|--------|--------|
| İlerleme Uzunluğu         | m     | 3-5    | 2-3    | 2.4    |
| Püskürtme Beton Kalınlığı | cm    | 15     | 25     | 25     |
| Çelik Profil              | Tip   | GI 110 | GI 140 | GI 140 |
| Çelik Hasır               | Kat   | 1      | 2      | 2      |
| Kaya Bulonu               | 4 m   | Sayı   | 4      | -      |
|                           | 6 m   |        | -      | 6      |
|                           | 9 m   |        | -      | 4      |
| Ayna Püskürtme Betonu     | cm    | -      | 3      | 3-5    |
| Taban Betonu              | E/H   | Evet   | Evet   | Evet   |

### 3.4. Delme ve Patlatma Düzeni

Patlatma düzeni ateşçilerin inisiyatifinden alınıp her kaya sınıfı için standart patlatma düzeni ve kullanılması gereken patlayıcı madde miktarı belirlenmiştir. Patlatma düzenleri Şekil 6, Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9'da verilmiştir. Her kaya sınıfı için standart bir düzen belirlenmekle beraber, en yüksek verim için ayna delgiden önce teknik eleman tarafından kontrol edilip, düzende değişiklikler yapılmaktadır. Aynı formasyonlarda bile ayna değişik özellikler gösterebilmektedir.

Kazılan yarı kazı yüzey alanı ile delik uzunluğu çarpılırsa patlatma sonucu açığa çıkan pasa bulunur. Kullanılan patlayıcı madde miktarı bulunan hacme bölündüğünde birim hacim için kullanılan patlayıcı madde miktarı bulunur. Kaya sınıfı 4'te üst yarı için kullanılan patlayıcı madde miktarı:

$$64.307 \text{ m}^2 \cdot 2 \text{ m} = 128.614 \text{ m}^3$$

$$171.7 / 128.614 = 1.34 \text{ kg/m}^3$$

Kaya sınıfı 4'te alt yarı için kullanılan patlayıcı madde miktarı 40.18 kg, toplam kullanılan patlayıcı madde miktarı 227.8 kg'dır. Kaya sınıfı 5'te üst yarı için kullanılan patlayıcı madde miktarı:

$$64.307 \text{ m}^2 \cdot 1.5 \text{ m} = 96.461 \text{ m}^3$$

$$132.25 / 96.461 = 1.37 \text{ kg/m}^3$$

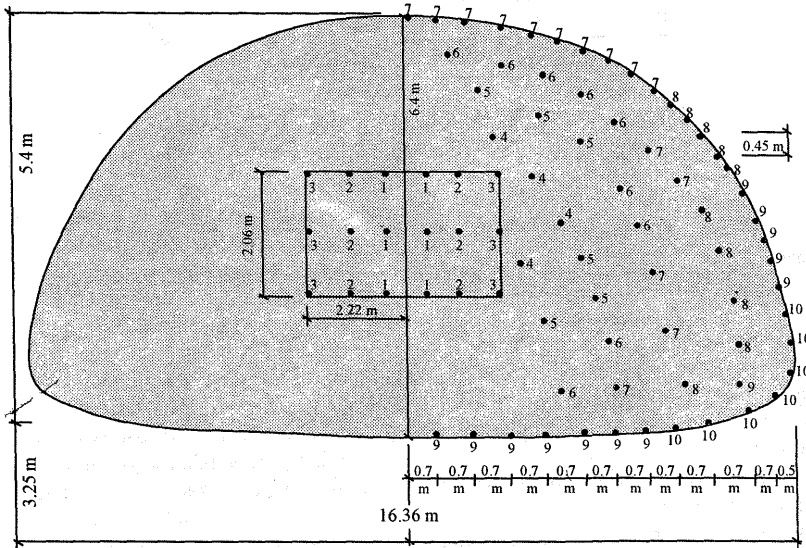
Kaya sınıfı 5'te alt yarı için kullanılan patlayıcı madde miktarı 36.18 kg, toplam kullanılan patlayıcı madde miktarı 184.35 kg'dır. Kullanılan patlayıcının özellikleri Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Patlayıcı Madde Özellikleri (Kutlutaş-Dillingham 1998).

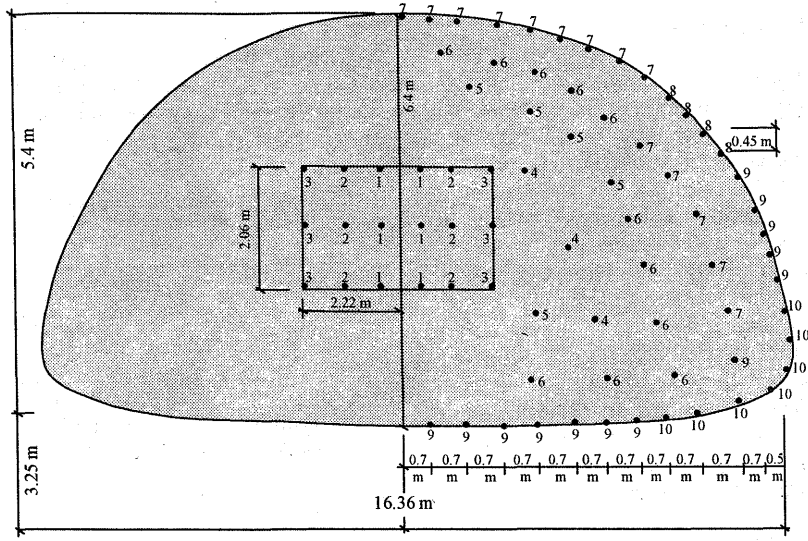
|                       |                         |
|-----------------------|-------------------------|
| Patlayıcı tipi        | Powergel Magnum         |
| İdeal Patlama Hızı    | 6345 m/s                |
| İdeal Patlama Basıncı | 119350 ATM              |
| Sıcaklık              | 2502 °C                 |
| Yoğunluk              | 1.20 gr/cm <sup>3</sup> |
| Suya Dayanımı         | Çok İyi                 |
| Patlama Sıcaklığı     | 3684 KJ/Kg              |

### 3.5. İş-Zaman Etüdü

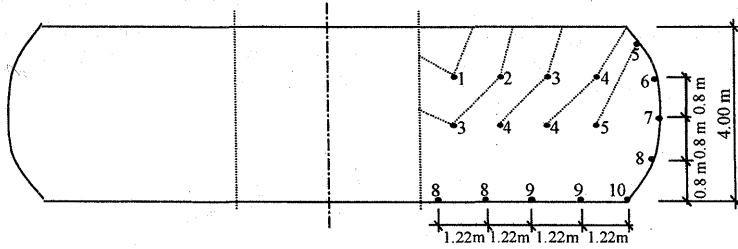
Her iş kalemi için bir aylık zaman ölçümleri yapılmış ve kaya sınıfı 4'te 1.5 ve 2 m'lik ilerleme boyları için yapılan bu ölçümlerin ortalama değerleri Çizelge 4'de verilmiştir. Ayrıca bir ay için, 45-435 dak/ay-insan kaynaklı kayıp zaman, 605-625 dak/ay-makina kaynaklı kayıp zaman belirlenmiştir.



Şekil 6. Kaya Sınıfı 4'te Üst Yarı için Patlatma Düzeni



Şekil 7. Kaya Sınıfı 5'te Üst yarı için Patlatma Düzeni



Şekil 8. Kaya Sınıfı 4 ve 5'te alt yarı için Patlatma Düzeni

#### 4. SONUÇ

Tünellerin inşasına Ekim 1997 yılında başlanmış ve Ağustos 1999 da yapımı tamamlanmıştır. 2 yıldan daha az sürede ~2000 m'lik 16 m genişliğinde çift tüplü otoyol tünellerinin kazısı gerçekleştirilmiştir. Karşıyaka Tünellerinde, kaya sınıfı belirlemelerinin yerinde ve uygun olarak yapılması -ki bunlar tünel güzergahı boyunca deformasyon gözlemlerinden anlaşılmaktadır- ilerleme hızının yüksek olması ve tünellerin 2 yıl gibi kısa bir sürede tamamlanabilmesini sağlamıştır.

270 m'lik K1 ve 1825 m'lik K2 tünellerinin inşasına başlanmadan önce yapılan kaya mekanik testleri ve kaya sınıfı belirleme çalışmaları sayesinde Karşıyaka Tünelleri inşasında deformasyona bağlı sorunlarla karşılaşılması. Deformasyonlar

projede öngörülen 0-10 cm aralığında kalmıştır. İşletmede K2P1 Tünelinde, etüt safhasında yapılan, tek eksenli basma deneyi sonuçları  $187.2 \text{ kg/cm}^2$ - $415.2 \text{ kg/cm}^2$  aralığında bulunmuştur.

DEÜ, Maden Mühendisliği Bölümü'nde laboratuvar çalışmalarında yapılan testlerde K2P1 Tünelinde bulunan tek eksenli basma deneyi sonuçları olan  $271.66 \text{ kg/cm}^2$ - $490.84 \text{ kg/cm}^2$  ile benzerlik göstermiştir. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemine göre yapılan kaya sınıfı belirleme ve bu sınıflara uygun kazı çalışmalarında, işletme tarafından önceden yapılan etütlerle belirlenen kaya sınıfı 4-5-6 ve portal sınıflarına uygulanması gereken tahkim özellikleri, uygulamada kaya sınıfı 4-5 ve portal sınıflar için belirlenen tahkim özellikleri uygulanmıştır. Böylece maliyetlerin azaltılması mümkün olmuştur.

Çizelge 4 Yapılan işlerin İş-Zaman Ortalamaları

| İş Kalemi                       | Süre            | Notlar                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Jumbo için hazırlık             | 30-45 dk        | Püskürtme beton makinasının aynadan inip, jumbonun delgiye başladığı tüm zamanı kapsar.(Bu süre içinde, delgilerin ınsıl ve doğru yapılması için zeminin aletli kepçeler veya Cat 966 Lastikli yükleyici ile sıyırılması süresi de dahildir. |
| Jumbo ile Delgi                 |                 |                                                                                                                                                                                                                                              |
| -4 m'lik bulon delgisi          | 2.25 dk         | Bulon delgisi için                                                                                                                                                                                                                           |
| -Rot alma süresi                | 14 sn           |                                                                                                                                                                                                                                              |
| -Lokasyon değiştirme            | 16 sn           | Ayna delgisi için                                                                                                                                                                                                                            |
| -6 m'lik bulon delgisi          | 3.35 dk         |                                                                                                                                                                                                                                              |
| -Rot alma süresi                | 40 sn           | Ayna delgisi için                                                                                                                                                                                                                            |
| -Lokasyon değiştirme            | 16 sn           |                                                                                                                                                                                                                                              |
| -1.6 m ayna delgisi             | 21 sn           | Ayna delgisi için                                                                                                                                                                                                                            |
| -2.2 m ayna delgisi             | 27 sn           |                                                                                                                                                                                                                                              |
| -Lokasyon değiştirme            | 8 sn            | Ayna delgisi için                                                                                                                                                                                                                            |
| -3 m'lik süren delgisi          | 2 dk 5 sn       |                                                                                                                                                                                                                                              |
| -4 m'lik süren delgisi          | 2 dk 25 sn      | Ayna delgisi için                                                                                                                                                                                                                            |
| -Toplam 4 m'lik bulon delgisi   | 17 dk 50 sn     |                                                                                                                                                                                                                                              |
| -Toplam 6 m'lik bulon delgisi   | 7 dk 52 sn      | Ayna delgisi için                                                                                                                                                                                                                            |
| -Toplam süren delgisi (3 m'lik) | 16 dk 45 sn     |                                                                                                                                                                                                                                              |
| -Toplam süren delgisi (4 m'lik) | 26 dk 50 sn     | Ayna delgisi için                                                                                                                                                                                                                            |
| -Toplam ayna delgisi (1.6 m)    | 66 dk 36 sn     |                                                                                                                                                                                                                                              |
| -Toplam ayna delgisi (2.2 m)    | 75 dk 48 sn     | Ayna delgisi için                                                                                                                                                                                                                            |
| -Toplam delgi süresi            | 1 s 41 dk 11 sn |                                                                                                                                                                                                                                              |
| -Toplam delgi süresi            | 2 s 18 sn       | 1.5 m ilerleme için<br>2.0 m ilerleme için                                                                                                                                                                                                   |
| Enjeksiyon ve bulonlama         | 52 dk           |                                                                                                                                                                                                                                              |
| -6 m bulon enjeksiyonu          | 2 dk 32 sn      | Delğine hortum sokulup enj. basma<br>Bulon demirinin yerleştirilmesi<br>Delğine hortum sokulup enj. basma<br>Bulon demirinin yerleştirilmesi                                                                                                 |
| -6 m bulon montajı              | 3 dk 03 sn      |                                                                                                                                                                                                                                              |
| -4 m bulon enjeksiyonu          | 2 dk 21 sn      |                                                                                                                                                                                                                                              |
| -4 m bulon montajı              | 1 dk 27 sn      |                                                                                                                                                                                                                                              |
| Sıkılama ve Atım                | 1 s 25 dk       | 1.5 m ilerleme için                                                                                                                                                                                                                          |
|                                 | 1 s 45 dk       | 2.0 m ilerleme için                                                                                                                                                                                                                          |
| Havalandırma                    | 10 dk           |                                                                                                                                                                                                                                              |
| Kazı ve Tarama                  | 35 dk           | 1.5 m ilerleme için                                                                                                                                                                                                                          |
|                                 | 40 dk           | 2.0 m ilerleme için                                                                                                                                                                                                                          |
| Pasa Nakli (1)                  | 59 dk 15 sn     | Kesit 65 m <sup>2</sup> , İlerleme 2.2 m, Kazı 143 m <sup>3</sup><br>Kepçe hacmi: 5.4 m <sup>3</sup> , Yükleme: 4*5.4= 21.6 m <sup>3</sup> , Pasa 143/21.6=6.6 (%20 em)=8 kamyon, Kamyon sayısı:2                                            |
| -Kamyon çevirim periyodu        | 7 dk 25 sn      |                                                                                                                                                                                                                                              |
| -Kamyon dolum süresi            | 6 dk 45 sn      |                                                                                                                                                                                                                                              |
| -Topukların top. için bekleme   | 17 dk           |                                                                                                                                                                                                                                              |
| Pasa Nakli (2)                  | 1 s 21 dk 20 sn | Kesit 65 m <sup>2</sup> , İlerleme 1.6 m, Kazı 104 m <sup>3</sup><br>Kepçe hacmi: 5.4 m <sup>3</sup> , Yükleme: 4*5.4= 21.6 m <sup>3</sup> , Pasa 104/21.6=4.8 (%20 em)=6 kamyon, Kamyon sayısı:2                                            |
| -Kamyon çevirim periyodu        | 7 dk 25 sn      |                                                                                                                                                                                                                                              |
| -Kamyon dolum süresi            | 6 dk 45 sn      |                                                                                                                                                                                                                                              |
| -Topukların top. için bekleme   | 25 dk           |                                                                                                                                                                                                                                              |
| Ön Püskürtme Betonu             | 30 dk           | 2 m <sup>3</sup> Aliva ile kuru püskürtme betonu                                                                                                                                                                                             |
| Hasır Montajı                   | 25 dk           |                                                                                                                                                                                                                                              |
| Etüt ve İksa Montajı            |                 |                                                                                                                                                                                                                                              |
| -Etüt ve segment kaynağı        | 45 dk           | 1.5 m ilerleme için<br>2 m ilerleme için                                                                                                                                                                                                     |
| -İksa montajı                   | 25 dk           |                                                                                                                                                                                                                                              |
| -Kaynak (1)                     | 60 dk           |                                                                                                                                                                                                                                              |
| -Kaynak (2)                     | 1 s 20 dk       |                                                                                                                                                                                                                                              |
| İksa Püskürtme Betonu           | 1 s 22 dk       | 7 m <sup>3</sup> *2*42 dk, 15 dk makina montaj, 1.5 m ilerleme için 7 m <sup>3</sup> *2+5 m <sup>3</sup> , 42*2+30, 15 dk makina montaj, 2.0 m ilerleme için                                                                                 |
|                                 | 1 s 52 dk       |                                                                                                                                                                                                                                              |
| Toplam Zaman                    | ~11 s 40 dk     | 1.5 m ilerleme için                                                                                                                                                                                                                          |
|                                 | ~15 s 29 dk     | 2.0 m ilerleme için                                                                                                                                                                                                                          |

Bu da, tünellerin inşaatlarında yapılan etütler her ne kadar sağlıklı olursa olsun, Yeni Avusturya Yöntemi'nin dinamik bir yapı gösterdiğini kanıtlamaktadır. Bu dinamik yapı doğrultusunda, çalışma esnasında iş sahibi, yüklenici ve kontrol arasındaki uyumlu çalışma ve alınan ortak sorumlulukla beraber değişebildiğini göstermiştir. Aynı zamanda Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi'nin ölçme ve birebir takiple değişken, hareketli bir tahkimat ve kazı sistemine sahip olduğunun kanıtı olmuştur. Uy-gulanan kaya sınıfı sistemleri ve bu sistemler için belirlenmiş kazı ve tahkimat sistemi başarılı olmuştur.

İş kalemlerinin, üçlü vardiye düzeni ile zaman kaybedilmeden birbirini takip etmesi periyodu 10 saate düşürdüğü gibi, günlük ilerleme 8 m'yi bulabilmiştir. İş zaman etütlerinde de gözlemlendiği gibi gereksiz zaman harcamalarının az olması, iş verimini genel olarak yüksek düzeyde tutmuştur.

Tüneller için farklı formasyonlarda ve ilerleme boylarında yapılan iş zaman analizlerinde, 2sa:15dk:10sn-5sa:52dk:10sn, %17-33 (toplam zamana göre) zaman aralığı ile, jumbo ile ayna, bulon ve süren delgileri en fazla zamanı almış, ikinci sırada 1sa:30dk:00sn-2sa:55dk:50sn, %9-19 zaman aralığı ile, etüt, iksa montajı ve kaynağı almıştır. Bundan sonra sırasıyla, püskürtme beton, sıkılama ve atım, pasa nakli toplam iş zamanı içinde en çok yeri alan birimler olarak tespit edilmişlerdir. Jumbo ile yapılan delgilerin süresinin uzun olması birkaç sebebe dayanmaktadır; bunlar zeminin durumu, makinanın durumu ve operatörlerin durumu olarak sıralanabilir. İlk iki sebebe müdahale ederek zaman azaltma pek kolay olmamaktadır. Ancak jumbo operatörlerinin verimli bir şekilde makineyi kullanmalarının sağlanması ve bom sayısı kadar jumbo operatörü ile çalışılması süre kısaltılması bakımından daha çok şans vermektedir. Formasyonlara göre yapılan zaman etütlerine bakıldığında çok altere andezit, altere andezit ve bloklu altere andezit yüzdesinin fazla olduğu aynalarda zemine bağlı olarak delme sürelerinde ve genel olarak periyot çevrim sürelerinde gözle görülür bir artış görülmüştür. K2SB 600+803.60 da %80 çok altere andezitli aynada 14sa:59dk:44sn, K2SB 600+048.20'da %90 altere andezitli aynada 15sa:38dk:20sn ve %85 bloklu altere andezitli aynada 16sa:32dk:25sn'lik periyot çevrim süreleri gözlemlenmiştir. İş zaman etütlerine bir aylık ortalamalar alınarak bakıldığında ise, kaya sınıfı 4'te 1.5 m'lik ilerleme için 11 saat 40 dakika, 2.0 m'lik ilerleme için 15 saat 29 dakikalık süreleri bulunmuştur.

Diğer yandan zaman kayıplarının bir aylık ortalamalarına bakıldığında 45-435 dakika/ay insan kaynaklı zaman kaybı süresi, 605-625 dakika/ay makina kaynaklı zaman kaybı süresi tespit edilmiştir. 435 dakikalık insan kaynaklı zaman kaybı süresi, doğru yönetim uygun planlama ve organizasyonla azaltılabilir görülmektedir. O halde Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi'nin gerekliliklerinden olan, dinamik ve değişken çalışma biçimi teknik kadro tarafından iyi özümseyip alt kadrolara iletilmelidir.

İşletme sahasında kazı etüdü ile ilgili çalışmalar esnasında, işletmenin ilgili sınıfları için belirli bir patlatma düzeni olmadığı belirlenmiş ve her sınıf için üst yarı, alt yarı ve rampa patlatma düzenleri saptanarak kullanılması gereken patlayıcı madde miktarları deneme yanılma yöntemiyle belirlenmiştir. Yapılan denemelerden kaya sınıfı 4'te üst yarı için, Şekil 6 daki patlatma düzeni, 170 kg patlayıcı, alt yarı için Şekil 8'deki patlatma düzeni, 40.18 kg patlayıcı, 4-5-P sınıfları rampa patlatmaları için Şekil 7'deki patlatma düzeni ve 239 kg patlayıcı ve kaya sınıfı 5 üst yarı için Şekil 7 deki düzene göre, 132.25 kg patlayıcı, alt yarı için Şekil 8 deki düzen için 36.18 kg patlayıcı madde kullanımının en uygun olacağı tespit edilmiştir. Tüm sınıflar için patlatma düzeninde V tipi orta çekme (60°) kullanılmıştır. Uygulamada aynı düzen ve patlayıcı madde kullanımında aynı verim alınamayabilmektedir. Bununla birlikte, ilk zamanlarda patlatma düzeninin bulunmayışı, delme sürelerinin uzunluğu, gereksiz veya yetersiz delik düzeni ile patlatma yapılması patlayıcı madde sarfiyatının artması, sorunları ortaya çıkarmıştır. Belirlenen düzen ile birlikte kazı veriminin arttığı gözlemlenmiştir. Ancak, kaya sınıflarının aynı olduğu yerlerde bile, bu belirlenen patlatma düzenin hareketli olması tercih edilmiş ve dinamik bir yapıya kavuşturulmuştur.

Tünel maliyetleri ise, 1 m'lik ilerleme için kaya sınıfı 4'te 5789 \$, kaya sınıfı 5'te 8366.2 \$ ve portal sınıfta 9004.6 \$ olarak hesaplanmıştır. Uygun patlayıcı maddenin uygun düzende patlatılması ve Yeni Avusturya Yöntemi'nin gereği olan uygulamadaki dinamiklik ve değişkenliğin sağlanmasının yanında, jumboların bom sayısı kadar operatörle daha verimli kullanılmasının bu maliyetleri daha da azaltacağı görüşü ortaya çıkmaktadır. Ancak sözü geçen sorunlara uygulanan çözümlerin maliyetlere yansımaları çalışma süresi boyunca veri olarak elde edilemediğinden, alınan önlemlerden sonraki maliyetler ve önceki maliyetler arasındaki farkların hesaplanması mümkün olmamıştır.

## KAYNAKLAR

- Jodl, H. G: (1995). Construction Method NATM New Austrian Tunneling Method Summercourse July 2-July 8 1995, IACES, Bureau of Vienna
- Köse, H., Gürgen S., & Onargan, T. (1992). Tünel ve Kuyu Açma (2.Baskı). İzmir, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Basım Ünitesi
- Kutlutaş-Dillingham Ortak Girişimi. (1998). Selattin ve Karşıyaka Tünelleri. İzmir
- Kutlutaş-Dillingham Ortak Girişimi. (1999). Karşıyaka Tünelleri. İzmir
- Turhan, R. (1999, Şubat 20). (Kişisel Görüşme)



## **BİLECİK-OSMANELİ KARAYOLU TÜNELLERİNİN ÖNTASARIMINDA AMPİRİK VE ANALİTİK YAKLAŞIMLAR**

### **EMPRICAL AND ANALYTICAL APPROACHES FOR THE PRELIMINARY DESIGN OF THE BİLECİK-OSMANELİ HIGHWAY TUNNELS**

**T. ÇAN**

Çukurova Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 01330 Balcalı-ADANA

**A. ERTUNÇ**

Süleyman Demirel Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 32260 ISPARTA

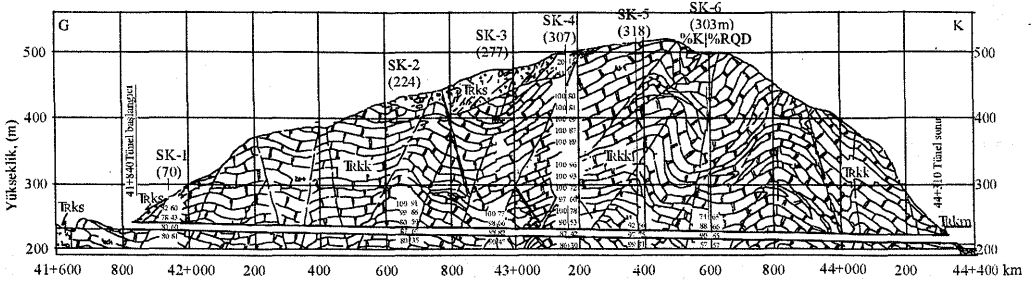
**ÖZET:** Bozüyük-Bilecik-Osmaneli-Mekece (BBOM) alternatif karayolu projesinin Bilecik-Osmaneli arasında biri 2500m, diğeri ise 700m uzunluğunda iki tünel yapılması planlanmaktadır. Tüneller, Alt Triyas yaşlı Karakaya Formasyonu içerisinde olistolit olarak bulunan Üst Permian yaşlı Derbent Kireçtaşı içerisinde açılacaktır. Bu çalışmada, arazi ve laboratuvar çalışmaları sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda tünellerin öntasarım çalışmaları yapılmıştır.

Tünel tasarımlarında ilk olarak ampirik metodlardan RMR ve Q kaya sınıflamaları kullanılmıştır. Bu sınıflamalara göre tünellerin büyük bir bölümünün sırasıyla iyi-orta kalite kaya sınıfı içerisinde oldukları saptanmıştır. Daha sonra analitik yaklaşımlardan numerik metodlar uygulanarak değişik örtü kalınlığı, yerinde gerilmeler ve kaya kütle dayanımı değerlerine göre tünellerde meydana gelebilecek gerilme-deformasyon analizleri ve kazı-destek etkileşimleri araştırılmıştır. Yapılan analizlerde tünellerde meydana gelebilecek duraysızlıkların, örtü kalınlığının 80m'ye (maksimum örtü kalınlığı=320m) kadar olduğu durumlarda, daha çok süreksizliklerin kontrolünde gelişebileceği görülmüştür. Örtü kalınlığının daha fazla olması durumunda ise tünel çevresindeki yenilmelerin gerilme dağılımına bağlı olarak gelişebileceği ve genelde bulon ve 10-20cm kalınlığında püskürtme betonu gibi destek elemanları birlikte kullanılarak, gerekli destek basıncının sağlanacağı bulunmuştur.

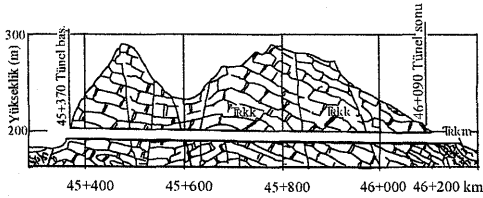
**ABSTRACT:** In the Bozüyük-Bilecik-Osmaneli-Mekece (BBOM) highway project it has been planned to construct two tunnels of 2500m and 700m length between Bilecik-Osmaneli section. The tunnels will be excavated in the Upper Permian age Derbent limestone, which is olistotite in the Lower Triassic age Karakaya formation. The aim of this study is to find out the preliminary design parameters of the tunnels, according to available field and laboratory data.

RMR and Q rock mass classifications from empirical methods have been used as a first approach. According to these classifications, mainly good-fair quality rock mass classes are prevailed along the tunnel alignments. Afterwards, using numerical methods, stress analysis and rock-support interactions have been achieved, taking into consideration different overburden thickness, *in situ* stress and rock mass strengths. According to the stress analyses, the instability could be mainly controlled by discontinuities up to a depth of 80m ( $d_{max}=320m$ ). From 80m, systematic bolting together with 10-20cm thick of shotcrete would support the plastic failure zone around the tunnel section in general.





Şekil 2. Kaletepe tüneli jeolojik boy kesiti.



Şekil 3. Kocatepe tüneli jeolojik boy kesiti.

dayanımlı, çok, yer yer tamamen ayrılmıştır. Spilitler ile Derbent kireçtaşları yer yer faylı dokanaklıdır. Kumtaşları ise boz renkli volkanik kökenli, zayıf-orta dayanımlı, ince-orta tabakalı, orta ayrılmıştır.

Kaletepe tüneli güzergahı boyunca yapılan altı adet sondajdan ve Kocatepe tüneli kotunun altında seyreden demiryolu yarmalarından yeraltı su seviyesinin her iki tüneli kotundan da aşağıda olduğu saptanmıştır. Yeraltı suyu seviyesinin güzergah ile birlikte seyretmekte olan Karasu deresi ile aynı olması beklenmektedir. Kaletepe tünelinin üst kısımlarında bulunan spilitlerde mevsimsel olarak çok düşük debilerde tüneli su kaynakları bulunmakla birlikte, bu kaynakların tüneli çalışmaları üzerine herhangi bir etkisi beklenmemektedir.

Tüneli tasarımlarında kullanılacak verileri elde etmek amacıyla ayrıntılı saha ve laboratuvar çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

### 2.1. Süreksizlik Çalışmaları

Süreksizlik sistemlerinin kaya kütlelerinin davranışı üzerindeki etkilerini anlamak ve sayısal olarak ifade etmek amacıyla her iki tüneli geçkisi boyunca yüzeyden ve sondaj karotlarından elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Bu sayede tüneller ve çevresindeki kaya birimleri içerisindeki yapısal

jeoloji, kaya sınıflamaları ve kaya kütle dayanımı parametreleri için veriler toplanmıştır.

Süreksizlik ölçümleri sondaj ve yüzlek tarama şeklinde ISRM (1978)'e uygun olarak yapılmıştır. Bunlar içerisinde 4 nolu sondaj kuyusu sürekli karot almak suretiyle yapılmış, diğerlerinde ise karot alımı son 60 metrede gerçekleştirilmiştir. Yapılan sondajlarda yönlü karot alınmamış ancak eklemelerin eğimi, aralıkları ve eklem dolguları gibi özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Buna göre genelde eklemelerin eğimi 45-90° arasında değişmektedir. Bu durum yüzeyden alınan ölçümlerle de uyum göstermektedir. Eklem açıklıkları ise genelde 1 mm'den küçüktür.

Süreksizlikler orta aralıkta, bloklu sınıftadır. Süreksizlik düzlemleri ve pürüzlülükleri genelde ondulasyonlu-düzlemsel ve pürüzlüdür. Yüzeyden yapılan ölçümler toplu olarak değerlendirildiklerinde Kaletepe tünelinde ana süreksizliklerin eğim/eğim yönü değerlerinin 73/063, 65/319, 70/279, 68/113 şeklinde, Kocatepe tünelinde ise 75/070, 69/320, 71/276 ve 72/220 olarak dört bölgede kutuplaştığı görülmüştür. Ölçümlerin alındığı yüzlekler tek tek ele alındığında ise genelde iki eklem takımı ve düzensiz eklemelerin bulunduğu gözlenmiştir.

### 2.2. Laboratuvar Deneyleri

Kaletepe tüneli güzergahı boyunca yapılan 6 adet sondajdan elde edilen karot numuneleri üzerinde birim hacim ağırlık, tek eksenli basınç( $\sigma_c$ ), üç eksenli basınç, indirekt çekme( $\sigma_t$ ), deneyleri ile elastisite modülü (E) ve poisson oranı (v) tayinleri yapılmıştır (Çizelge 1). Kocatepe tünelinde tek eksenli basınç değerleri Schmidt çekici kullanılarak belirlenmiştir. Buna göre ortalama Schmidt sertliğinin 35-50 arasında yer aldığı, buradan tek

eksenli basınç değerlerinin 65-90 MPa arasında değiştiği saptanmıştır. Deneyler ISRM (1981)'e uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 1. Derbent kireçtaşlarında yapılan laboratuvar deney sonuçları.

| Sondaj No | $\gamma$ , gr/cm <sup>3</sup>                                             | $\sigma_c$ , MPa                                                      | $\sigma_t$ , MPa                                                        | Üç ek. Bas.    |              | $E_s$ , MPa | $\nu$ |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------|-------------|-------|
|           |                                                                           |                                                                       |                                                                         | $c$ , MPa      | $\phi$ , (°) |             |       |
| SK1       | n=64<br>2.67 <sub>ort</sub><br>2.59 <sub>min</sub><br>2.71 <sub>max</sub> | n=4<br>51 <sub>min</sub><br>76 <sub>ort</sub><br>90 <sub>max</sub>    | n=7<br>7.7 <sub>ort</sub><br>6.1 <sub>min</sub><br>9.0 <sub>max</sub>   | 21.74          | 34.4         | 69.7        | 0.25  |
| SK2       |                                                                           | n=17<br>92 <sub>ort</sub><br>61 <sub>min</sub><br>128 <sub>max</sub>  | n=17<br>6.8 <sub>ort</sub><br>3.9 <sub>min</sub><br>9.4 <sub>max</sub>  | 22.82<br>21.23 | 40.9<br>34.9 | 77.6        | 0.30  |
| SK3       |                                                                           | n=10<br>77 <sub>ort</sub><br>41 <sub>min</sub><br>158 <sub>max</sub>  | n=10<br>7.7 <sub>ort</sub><br>6.3 <sub>min</sub><br>9.0 <sub>max</sub>  | 13.3           | 45.0         | 79.1        | 0.22  |
| SK4       |                                                                           | n=12<br>105 <sub>ort</sub><br>64 <sub>min</sub><br>169 <sub>max</sub> | n=13<br>7.7 <sub>ort</sub><br>3.9 <sub>min</sub><br>11.7 <sub>max</sub> | 14.3<br>15.3   | 43.9<br>46.0 | 74.1        | 0.25  |
| SK5       |                                                                           | n=17<br>88 <sub>ort</sub><br>62 <sub>min</sub><br>141 <sub>max</sub>  | n=10<br>8.6 <sub>ort</sub><br>6.8 <sub>min</sub><br>4.3 <sub>max</sub>  | 16.7           | 43.7         | 73.7        | 0.29  |
| SK6       |                                                                           | n=11<br>109 <sub>ort</sub><br>69 <sub>min</sub><br>140 <sub>max</sub> | n=14<br>7.4 <sub>ort</sub><br>4.9 <sub>min</sub><br>11.6 <sub>max</sub> | 14.2<br>18.7   | 40.3<br>41.7 | 76.8        | 0.29  |

### 3. AMPİRİK YAKLAŞIMLAR

Tünel tasarımlarında günümüzde giderek standart olarak benimsenen iki ayrı yöntem bulunmaktadır. Bunlardan birincisi ampirik yaklaşımlar, diğeri ise analitik yaklaşımlardır. Günümüzde, teknolojinin her alanında olduğu gibi tünelcilikte de gelişen teknoloji ile artık yalnız ampirik yöntemler kullanılmamaktadır. Bunlar daha çok fizibilite ve öntasarım aşamalarında elde edilen sınırlı kaya kütlesi, gerilme durumu ve hidrolojik bilgilere dayandırılarak yapılmaktadırlar. Ampirik ve analitik yaklaşımlar, biri diğeri seçenек olmaktan çok

birbirlerini tamamlayıcı durumundadırlar. Kaletepe ve Kocatepe tünellerinde yapılan kaya sınıflamaları ve tahmini destek sistemleri aşağıda kısaca verilmiştir.

#### 3.1. Kaletepe ve Kocatepe Tünelleri RMR Sınıflaması

Kaletepe tüneli giriş ve çıkış portallarında yüzeyleyen spilit ve kırıntılıların genellikle çok ayrılmış, yer yer orta-tamamen ayrılmış zayıf-çok zayıf dayanımlı olması nedeniyle kaldırılması önerilmektedir. Kaletepe tüneli diğer kesimlerinde herbir sondajın belirli bir alanı temsil ettiği düşüncesinden yola çıkılarak hareket edilmiştir.

Eklemlerle ilgili açıklık, pürüzlülük ve dolgu malzemesi gibi parametreler yüzey verilerinden çok sondajlarda gözlenen verilere dayandırılmıştır. Eklemlerin aralığı ile ilgili verilerde ise eldeki RQD değerlerine uygun aralıklar kullanılmıştır.

Bu değerlendirmeler sonucunda Kaletepe tüneli sondaj karotlarından elde edilen verilere göre 4 nolu sondaj kuyusu hariç diğerlerinde eklemler için 'pürüzlü yüzeyli, açıklık < 1mm ve az ayrılmış eklem duvarları' tanımlaması kullanılmıştır. 4 nolu sondajda ise eklemler kil, demir oksit sıvama, az ayrılmış, eklem açıklıkları 0.1-1mm tanımları kullanılmıştır.

Eklemlerin eğim açıları 45-90° arasında, genelde iki takım olarak belirlenen bu süreksizlikler bir yerden diğeri farklılık göstermektedirler. Bu nedenle RMR sınıflamasında iki takımdan birisinin doğrultusu tünel eksenine dik, diğeriinki ise paralel alınarak eklem yönelimleri için 'orta derecede elverişli' ifadesi kullanılmıştır.

Kocatepe tüneli kaya sınıflamalarında kullanılan parametreler, tünel kotunun altında tünel güzergahı ile birlikte seyretmekte olan Ankara -İstanbul demiryolu yarmalarından elde edilmiştir. Demiryolu yarmalarında tabakalanma KM 45+550 - 45+700 bölgesi dışında genelde çok belirgindir. Tabaka doğrultuları tünel eksenine dik, eğimleri ise 26-45° arasında KB'ya doğrudur. KM 45+550 - 45+700 bölgesinde yer yer tünel eksenine dik kesen küçük ölçekli fay ve ezik zonlar bulunmaktadır. Fay zonu çevresinde kayalar sık eklemlili ve yönelimleri düzensizdir. RQD değerleri Palmström (1982)'ye göre belirlenmiştir.

Süreksizlik aralıkları 8 -60 cm arasında değişmektedir. Süreksizlik düzlemleri pürüzlü, orta-çok ayrılmıştır. Bu kriterlere göre Kocatepe tüneli KM45+370-45+550, KM45+550-45+700 ve KM 45+700-46+090 bölümlere ayrılarak kaya sınıflamaları gerçekleştirilmiştir.

### 3.1.1. Destek Sistemleri ve Kazı Yöntemi

RMR sınıflamalarında her iki tünelde de kaya kalitesi, 'İyi Kalite Kaya' ve 'Orta Kalite Kaya' olmak üzere iki sınıf bulunmuştur (Çizelge 2-3). 'İyi Kalite Kaya' destek sistemi ve kazı yöntemi için aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

-Tavanda yer yer 2.5 m aralıklı, 3 m uzunluğunda bulon, tel örgüyle birlikte kullanılmalı.

-Tavanda gerektiğinde 5 cm kalınlığında, püskürtme betonu uygulanmalı.

-Tam kesit kazı, ilerleme adımı 1.0-1.5m. Aynadan 10 m geride tam destek sistemi uygulanmış olmalı.

'Orta Kalite Kaya' destek sistemi ve kazı yöntemi için ise aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

-Tavanda tel örgü olmak üzere, tavanda ve yan duvarlarda 1.5-2.0m aralıklı 4.00 m uzunluğunda, 20 mm çapında enjeksiyonlu, gerdirmeli bulonlar uygulanmalı.

-Tavanda 50-100mm, duvarlarda 30 mm kalınlığında püskürtme betonu.

-İki aşamalı kazı, 1.5-3.0 m kazı adımı. Her adımdan sonra destekleme başlamalı. Aynadan 10.0m geride tam destek sistemi uygulanmış olmalı.

### 3.2. Kaletpe ve Kocatepe Tünelleri Q Sınıflaması

Kaletpe Tüneli RMR sınıflamasında belirtilen parametrelerden değişik olarak, Q sisteminde süreksizlik sayısı için 2+düzensiz tanımlaması kullanılmıştır. RMR sınıflamasında öneri destek sistemi 10m'lik kazı açıklığı için geçerli olurken, Q sisteminde kazı eni 12 m, kazı yüksekliği 9 m olarak gerçek tünel boyutları kullanılmıştır. Q sistemine göre kullanılan süreksizliklerin pürüzlülüğü için kontak halinde, veya 10cm kaymadan önce kontak halinde, pürüzlü düzensiz, ondülasyonlu tanımlı kullanılmıştır.

Şüreksizlik yüzeylerinin ayrışma derecesi için ise, hafif ayrışmış, eklem düzlemleri yumuşak olmayan mineral kaplamalı, kumlu, kaya parçacıklı veya yer yer az killi dolgu tanımlı kullanılmıştır. Buna göre Q sınıflamasına göre Kaletpe tüneli kaya kalitesi 'Orta' ve 'Zayıf' sınıflarında yer almaktadır (Çizelge 2).

Kocatepe Tüneli Q Sınıflamaları süreksizlik özellikleri yukarıda açıklandığı gibi ancak 3+düzensiz olarak alınmıştır. Yapılan hesaplamalarda KM45+370-45+550 arasının iyi kalite kaya, KM45+550-45+700 arasının zayıf kalite

kaya ve KM45+700-46+090 arasının ise genelde orta kalite kaya sınıfı ile temsil edileceği görülmüştür (Çizelge 4).

### 3.2.1. Destek Sistemlerinin Değerlendirilmesi

Classex (2.1) programında verilen destek sistemi ile ilgili bilgiler Barton vd. (1974)'e göre elde edilmiştir. Ancak, Grimstad ve Barton (1993) yeraltı kazılarında çelik lifli püskürtme betonunun yaygın olarak kullanılmasından dolayı, Q sınıflaması destek sistemi ile ilgili yeni düzenleme yaparak, destek sınıfını 9 kategoriye ayırmışlardır. Buna göre Kaletpe tüneli Q sistemi destek sınıfları Barton vd.(1974) ve Grimstad ve Barton (1993)'e göre karşılaştırılmalı olarak aşağıda verilmiştir.

• Zayıf kaya sınıfı için Barton vd. (1974);

-Tavanda 1.0-1.5m aralıklı gerdirmeli bulonlama. Çelik hasır takviyeli, 50-100 mm kalınlığında püskürtme betonu. Ortalama bulon boyu 3.87m.

-Yan duvarlarda, gerdirmeli, çelik hasır takviyeli, 1.5-2.0m aralıklı bulonlama. Ortalama bulon boyu 3.87m.

• Zayıf kaya sınıfı için Grimstad ve Barton (1993);

-1.7-2.1m aralıklı sistematik bulonlama, bulon boyu 3.5m.

-50-90 mm kalınlığında çelik lifli püskürtme betonu.

• Orta kaya kalite sınıfı için Barton vd. (1974);

-Tavanda gerdirmeli, 1.5-2.0 m aralıklı bulonlama, zincir örgü takviyeli. Ortalama bulon boyu 3.87m.

-Yan duvarlarda, gerdirmesiz, enjeksiyonlu lokal bulonlama. Ortalama bulon boyu 3.50m.

• Orta kalite kaya sınıfı için Grimstad ve Barton (1993);

-2.1-2.3 m aralıklı sistematik bulonlama, bulon boyu 3.0m,

-40-50 mm kalınlığında çelik lifli püskürtme betonu.

• İyi kaya kalite sınıfı için Barton vd. (1974);

-Enjeksiyonlu gerdirmesiz, 1.5-2.0 m aralıklı bulonlama, ortalama bulon boyu 3.87m.

-Yan duvarlarda, destek gerekmez.

• İyi kalite kaya sınıfı için Grimstad ve Barton (1993);

-lokal bulonlama,

Çizelge 2. Kaletpe tüneline yapılan RMR ve Q sınıflamaları sonuçları.

| Lokasyon (Km)                         | 41+840<br>Giriş<br>Portal         | 42+675<br>SK2   | 42+950<br>SK3   | 43+165<br>SK4   | 43+380<br>SK5   | 43+590<br>SK6   | 44+300<br>Çıkış<br>portal | Lokasyon (Km)                   |
|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|---------------------------------|
| RMR parametreleri                     | RMR / Q parametreleri puan durumu |                 |                 |                 |                 |                 |                           | Q parametreleri                 |
| Tek eksenli basınç,<br>$\sigma_c$     | 7.6/60                            | 8.9/67          | 7.6/82          | 9.7/42          | 8.5/75          | 10/65           | 7.5/55                    | RQD                             |
| RQD                                   | 11.9/6                            | 13.2/6          | 16.1/6          | 8.5/6           | 14.7/6          | 12.8/6          | 10.9/6                    | Eklem takım sayısı, Jn          |
| Süreksizliklerin<br>aralıkları        | 6.8/3                             | 7.1/3           | 8/3             | 6.5/3           | 7.5/3           | 6.9/3           | 6.9/3                     | Eklem pürüzlülük sayısı,<br>Jr  |
| Süreksizlik durumu                    | 23/4                              | 23/2            | 25/2            | 18/2            | 26/2            | 25/2            | 10/2                      | Eklem alteras. say. Ja          |
| YAS durumu                            | 10/1                              | 15/1            | 15/1            | 10/1            | 15/1            | 15/1            | 10/0.94                   | Su azaltma faktörü, Jw          |
| Süreksizliklerin yönelim düzeltilmesi | -5/0.9                            | -5/2.6          | -5/4.1          | -5/3.2          | -5/4.2          | -5/3.0          | -5/7.3                    | Gerilme azaltma faktörü,<br>SRF |
| <b>Toplam RMR</b>                     | <b>54.3/8.3</b>                   | <b>62.2/6.3</b> | <b>66.7/5.0</b> | <b>47.7/3.2</b> | <b>66.7/4.4</b> | <b>64.7/5.3</b> | <b>40.3/7.3</b>           | <b>Q</b>                        |
| Kaya Kalitesi                         | ORTA/<br>ORTA                     | İYİ/<br>ORTA    | İYİ/<br>ORTA    | ORTA/<br>ZAYIF  | İYİ/<br>ORTA    | İYİ/<br>ORTA    | ORTA/<br>ORTA             | Kaya Kalitesi                   |

Çizelge 3. Kocatepe tüneline yapılan RMR sınıflamaları sonuçları.

| Lokasyon (Km)                         | 45+370-<br>45+550             | 45+550-<br>45+770 | 45+700-<br>46+090 |
|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------|
| RMR parametreleri                     | RMR parametreleri puan durumu |                   |                   |
| Tek eksenli basınç,                   | 9                             | 7.4               | 8.6               |
| RQD                                   | 14.8                          | 9.8               | 12.6              |
| Süreksizlik aralıkları                | 9.2                           | 7.3               | 8.6               |
| Süreksizlik durumu                    | 22.6                          | 14.3              | 25.3              |
| YAS durumu                            | 15                            | 15                | 15                |
| Süreksizliklerin yönelim düzeltilmesi | -4.6                          | -5                | -3.3              |
| <b>Toplam RMR</b>                     | <b>66</b>                     | <b>48.8</b>       | <b>66.8</b>       |
| Kaya Kalitesi                         | İYİ                           | ORTA              | İYİ               |

Çizelge 4. Kocatepe tüneline yapılan Q sınıflamaları sonuçları.

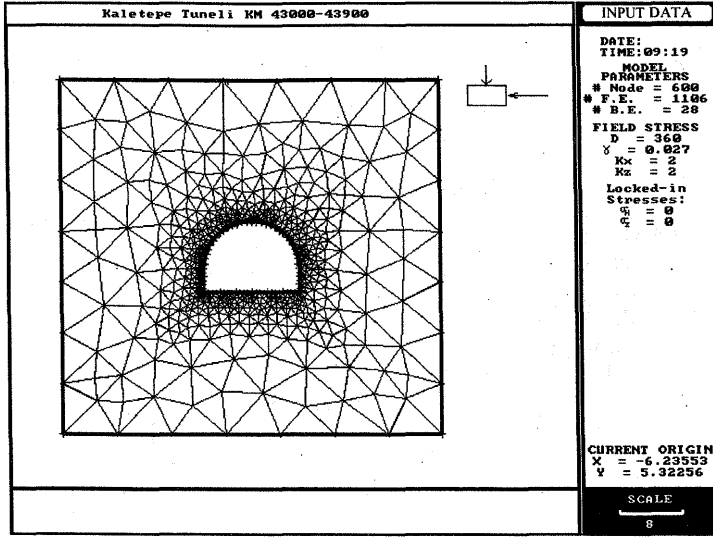
| Lokasyon (Km)   | 45+370-<br>45+550           | 45+550-<br>45+770 | 45+700-<br>46+090 |
|-----------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|
| Q parametreleri | Q parametreleri puan durumu |                   |                   |
| RQD             | 76                          | 49                | 64                |
| Jn              | 9                           | 15                | 12                |
| Jr              | 3                           | 4                 | 3                 |
| Ja              | 1                           | 4                 | 2                 |
| Jw              | 1                           | 1                 | 1                 |
| SRF             | 0.664                       | 1.353             | 0.872             |
| <b>Q</b>        | <b>38.1</b>                 | <b>2.4</b>        | <b>9.1</b>        |
| Kaya Kalitesi   | İYİ                         | ZAYIF             | ORTA              |

#### 4. ANALİTİK YAKLAŞIMLAR

Analizlerde kullanılan Phases programı, Toronto Üniversitesi tarafından yeraltı kazılarının modellenmesinde kaya kütlelerindeki yenilme sonrası davranışların ve bunların uygulanan destek sistemi ile etkileşiminin ortaya konulması amacıyla yapılmış iki boyutlu ortamda çalışan ve sonlu elemanlar ve sınırlı elemanlar yönteminin ayrı ayrı veya birlikte kullanılabildiği (hybrid) bir programdır. Programda kazı yakın çevresindeki kaya kütlelerinin heterojen ve lineer olmayan davranışları sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmektedir. Kazıdan uzak kesimlerde gerilme koşullarının

modellenmesinde ise sınırlı elemanlar yöntemi kullanılmaktadır. 12x9m boyutlarındaki tünel kesiti yan duvarları 3m yüksekliğinde ve dik, tavan ise 6m yarıçaplı dairenel olarak tasarlanmıştır (Şekil 4). Tünel kazısı çok zayıf kaya kalitesiyle temsil edilen bölgede iki aşamalı, diğerlerinde tam kesit olarak gerçekleştirilmiştir. Modeldeki sonlu elemanlar sayısı, destek sistemi olarak püskürtme betonu veya iki aşamalı kazı şartları girilmesi durumuna göre artıp azalabilmektedir.

Tüneller saha gözlemleri, sondaj verileri, laboratuvar deneyleri, kaya sınıflamaları ve üzerlerindeki örtü kalınlığı göz önünde bulundurularak ayrı ayrı bölümler altında incelenmiştir. Kaletpe KM 41+840-41890 ile KM 44+260-44+310 (giriş ve çıkış portalları),



Şekil 4. Tünel kesiti ve sınır koşullarının Phases programında modellenmesi.

KM41+890-42+600 ile KM 43+900-44+260, KM 42+600-43+000 ile KM 43+400-43+900 ve KM 43+000-43+400 arası olmak üzere toplam 4 bölümde incelenmiştir (bkz. Şekil 2). Kocatepe tüneli ise KM 45+370-45+550 ile KM 45+700-46+090 (giriş ve çıkış kesimleri), ve KM 45+550-45+700 arası olmak üzere 2 bölümde incelenmiştir (bkz. Şekil 3). Gerilme-deformasyon analizleri her bir tünel kesimi için desteksiz, yalnız sistematik bulonlama ve püskürtme betonu - kaya bulunu birlikte kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

#### 4.1. Kaya Kütle Dayanım Parametreleri

Sağlam kaya özellikleri belirlendikten sonra nümerik analizlerde kullanılmak üzere, tünel güzergahı boyunca yapısal özellikler de gözönüne alınarak, değişen şartlara göre tüm kaya kütlelerini temsil eden mühendislik parametreleri (Hoek-Brown, 1997)'e göre belirlenmiştir (Çizelge 5). Burada  $m_i$  Hoek-Brown sabiti, üç eksenli deney verilerinden, GSI değeri ise RMR sınıflamalarından elde edilmiştir. Analizlerde kullanılan kaya kütlelerinin davranışı plastik, yenilme kriteri olarak Hoek-Brown yöntemi seçilmiştir. Tüm analizlerde  $m_b$  ve  $s$  kalık değerleri sırasıyla 1.0 ve 0.01 olarak alınmıştır.  $\sigma_c$  ve  $\nu$  değerleri için laboratuvar verileri kullanılmıştır. Bu şartlar altında kaya izotrop olarak modellenmiştir. Tünel kesiti eşit parçaya bölünmüş 76 elemandan

oluşmaktadır. Dış sınır şartları tünel kazı açıklığının iki katı olarak alınmıştır.

Çizelge 5. Derbent Kireçtaşlarının Hoek-Brown (1997)'ye göre kaya kütle dayanım parametreleri.

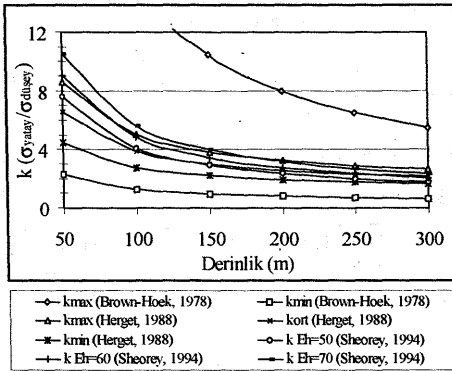
|                     | SK1    | SK2    | SK3    | SK4    | SK5    | SK6    |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\sigma_c$ (MPa)    | 76,81  | 92,88  | 77,73  | 105,0  | 88,60  | 110,00 |
| $m_i$               | 8,49   | 10,72  | 12,83  | 8,88   | 10,65  | 8,48   |
| GSI                 | 60     | 63     | 67     | 52     | 67     | 66     |
| $r^2$               | 0,983  | 0,999  | 0,997  | 0,998  | 0,998  | 0,998  |
| $m_b$               | 2,03   | 2,86   | 3,95   | 1,60   | 3,28   | 2,52   |
| $s$                 | 0,0117 | 0,0164 | 0,0256 | 0,0048 | 0,0256 | 0,0229 |
| $\sigma_{tm}$ (MPa) | -0,44  | -0,53  | -0,50  | -0,32  | -0,69  | -1,00  |
| $E_m$ (MPa)         | 15585  | 20369  | 23458  | 11220  | 25045  | 25119  |

#### 4.2. Yerinde Gerilmelerin Belirlenmesi

Yeraltı kazılarının tasarımında en önemli parametre, kazı öncesi yerinde gerilme ( $k = \sigma_{yatay} / \sigma_{dişey}$ ) değerlerinin bilinmesidir. Kazı sonrası açıklık çevresinde oluşan yeni gerilmelerin yönü ve

büyüklüğü  $k$  faktörüne bağlıdır. Ülkemizde tünel ve benzeri mühendislik projelerinde jeoteknik araştırmalara ayrılan pay yeterli değildir. Bu nedenle yerinde gerilmelerin belirlenmesinde overcoring, flatjack ve hidrolik çatlatma gibi teknikler yaygın olarak kullanılmamaktadır. Bu nedenle  $k$  faktörünün tahmininde Brown-Hoek (1978), Herget (1988) ve Sheorey (1994)'ün ortaya koydukları yaklaşımlar kullanılmıştır. Tüm yaklaşımlarda  $k$  değeri derinliğe bağlı olarak, Sheorey (1994)'te ise buna ek olarak kayacın yatay yöndeki Elastisite modülü( $E_h$ ) değeri kullanılmaktadır. Worotnicki (1993) karbonatlı kayalar üzerinde yaptığı ölçümlerde  $E_{max}/E_{min}$  oranlarının 1.7 nin altında olduğunu ortaya koymuştur. Buna göre  $k$  değerleri için  $E_h$  50, 60, ve 70 MPa alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Tünellerin üzerindeki örtü kalınlığına bağlı olarak  $k$  değerlerinin değişimi Şekil 5'te verilmiştir.

Brown-Hoek (1978) yaklaşımı  $k$ 'nın minimum ve maksimum değerleri için geniş bir aralık verse de Sheorey (1994) ve Herget (1988) yaklaşımları birbirine yakın değerler sunmaktadır. Bu yaklaşımlara göre 300m derinlikte  $k$  değerlerinin 2 dolaylarında çıktığı görülmüştür. Diğer yandan  $k$  değeri bilinmediğinde genellikle önçalışmalarda alınması Hoek (1998) tarafından tavsiye edilen 1.5, 2.0 ve 3.0 değerlerinden ikincisinin alınması uygun görülmüştür.



Şekil 5.  $k$  değerlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi.

#### 4.3. Destek Sistemleri Teknik Özellikleri

Analizlerde kullanılan destek elemanlarından bulonların teknik özellikleri; tam kesit tutturmalı, 20mm çapında, 4m uzunluğunda, maksimum taşıma yükü 0.18MN, kalık taşıma yükü 0.02MN olarak

alınmıştır. Bulonlar tünel kesitine dik ve yenilme zonuunun durumuna göre 1.5 veya 2m aralıklarla yerleştirilmiştir. Bulonların yerleştirilmesine kadar tünelde oluşacak kemerlenmeyi de göz önünde bulundurmamak açısından bulonlar, tünele etki edecek gerilmelerin %30'una ulaşıldıktan sonra yerleştirilmiştir.

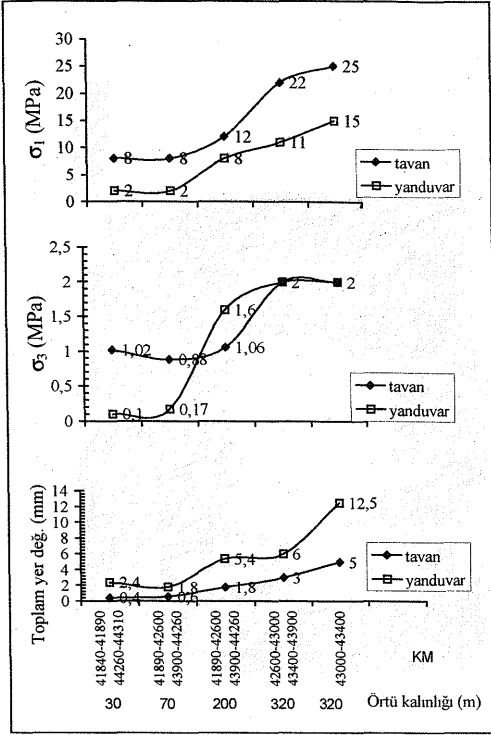
Püskürtme betonunun teknik özellikleri ise  $E=20000\text{MPa}$ ,  $\nu=0.2$ ,  $\sigma_c=35\text{MPa}$ ,  $m=8$ ,  $s=1$  olarak alınmıştır (Hoek vd.1995, Hoek 1998). Püskürtme betonu, tünel yan duvarlarında ve tavanda gerilme dağılımına bağlı olarak değişik kalınlıklarda (10-20 cm) uygulanmıştır.

#### 4.4. Kaletepe Tüneli Gerilme-Deformasyon Analizleri

Tüneller saha gözlemleri, sondaj verileri, laboratuvar deneyleri, kaya sınıflamaları ve üzerlerindeki örtü kalınlığı( $d$ ) göz önünde bulundurularak ayrı ayrı bölümler altında incelenmiştir. Kaletepe KM 41+840-41+890 ile KM 44+260-44+310 (giriş ve çıkış portalları  $d_{max}=30\text{m}$ ), KM 41+890-42+600 ile KM 43+900-44+260 ( $d=30\text{-}200\text{m}$ ), KM 42+600-43+000 ile KM 43+400-43+900( $d=320\text{m}$ ) ve KM 43+000-43+400( $d=320\text{m}$ ) arası olmak üzere toplam 4 bölümde incelenmiştir. Kocatepe tüneli ise KM 45+370-45+550 ile KM 45+700-46+090 (giriş ve çıkış kesimleri  $d_{max}=80\text{m}$ ), ve KM 45+550-45+700 ( $d_{max}=50\text{m}$ ) arası olmak üzere 2 bölümde incelenmiştir. Gerilme-deformasyon analizleri her bir tünel kesimi için desteksiz, yalnız sistematik bulonlama, püskürtme betonu ve kaya bulonu birlikte kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Giriş çıkış portallarında  $d=30\text{m}$ ,  $k=5$  alındığında ve KM 41+890-42+600 ile KM 43+900-44+260 70m derinlikten itibaren tünel çevresinde tansiyon ve makaslama yenilmelerinin olduğu görülmüştür. Kaletepe tünelinde önceki bölümlerde verilen parametreler doğrultusunda yapılan gerilme-deformasyon analizlerinde tünel tavan ve yan duvarlarında meydana gelen minimum ve maksimum asal gerilmeler ile toplam yer değiştirmeler Şekil 6'da özetlenmiştir.

##### 4.4.1. KM 41+840-41+890 ile KM 44+260-44+310 (giriş ve çıkış portalları)

Tünelin giriş ve çıkış portallarından itibaren 50m uzunluğundaki kısımlarının incelendiği bu bölümde örtü kalınlığı maksimum 30m'dir. Analizlerde kaya kütle dayanım parametreleri olarak 1 nolu sondaj verileri kullanılmıştır. Yüzeye yakın kesimlerde  $k$  değerinin birden çok büyük olacağı gerçeği göz



Şekil 6. Kaletpe tünel kesiti çevresi yan duvar ve tavanında  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  ve toplam yer değiştirme değerleri.

önünde bulundurularak yapılan analizlerde  $k$ 'nın 5'ten büyük olduğunda tünel yan duvarlarında tansiyon ve makaslama yenilmelerinin oluştuğu görülmüştür. Deneyimlere göre, genelde örtü kalınlığı maksimum tünel açıklığının 1.5 katından fazla olmadıkça, tünel çevresindeki kaya kütlelerinin kendi kendini destekleme özelliği bulunmamaktadır (Hoek 1998). Bu bölümlerde tünelde meydana gelebilecek yenilmeler gerilme dağılımından çok süreksizliklerin kontrolünde gelişeceği düşünülmektedir.

#### 4.4.2. KM 41+890-42+600, KM 43+900-44+260

Tünelin bu kesimlerinde 1, 2 ve 6 nolu sondajlar bulunmaktadır. Analizlerde en düşük değerlere sahip, 1 nolu sondaj verileri kullanılmıştır. 30-200m örtü kalınlığına sahip tünelin bu kesimlerinde  $k$  değeri 2 alınarak gerilme deformasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Örtü kalınlığı 70m'ye

ulaştığında tünel çevresinde çok az sayıda elemanda makaslama yenilmeleri gözlenmiştir. Bu bölümdeki maksimum derinlik olan 200m de ise tünel tavanında yaklaşık 1.5m, tabanda 2m kalınlığında bir zonda plastik yenilmeler oluşmaktadır. Tabandaki yenilmeler tünel taban kesitinin düz ve kenarların köşeli olmasında kaynaklanmaktadır. Bu yenilmeler tünel yüksek gerilme koşulları etkisi altında kalmadığı sürece tüneli olumsuz etkilemeyeceği düşünüldüğünden bundan sonraki analizlerde de üzerinde durulmayacaktır.

İlk olarak tünel, tavan 2m aralıklı, 9 adet bulon ile desteklenerek analizler yapılmıştır. Bulonların değişik kesit aralıklarına etki eden maksimum yükler çoğunda kapasitelerinin yarısı olarak bulunmuştur. En fazla yük 0.10 MN olarak bulunmuştur. Tünel çevresindeki yenilme zonunda çok büyük bir değişiklik görülmemiştir. Bunun nedeni bulonların tünele etki eden gerilmelere karşı ancak 0.30 MPa gibi çok küçük bir destek basıncı oluşturmasıdır. Destek sistemlerinin görevi kaya kütleisindeki yenilmeleri tamamıyla engellemek yerine, bu yenilmeleri belirli sınırlar içerisinde tutabilmektir (Hoek vd. 1995).

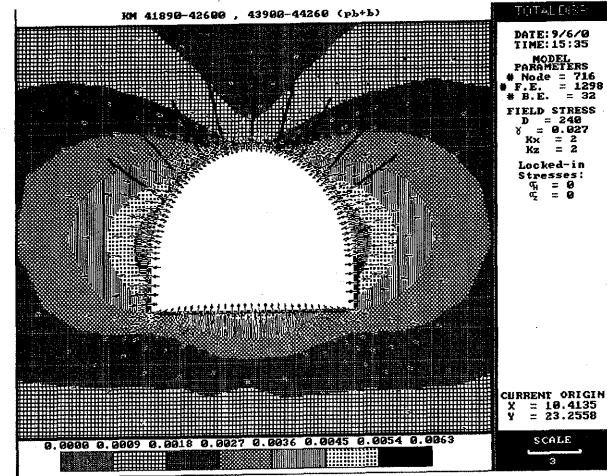
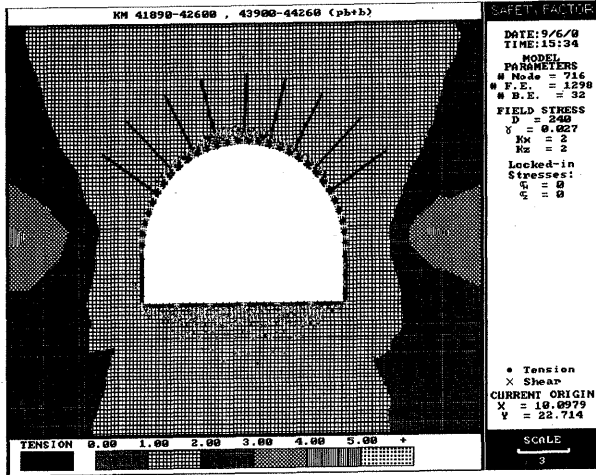
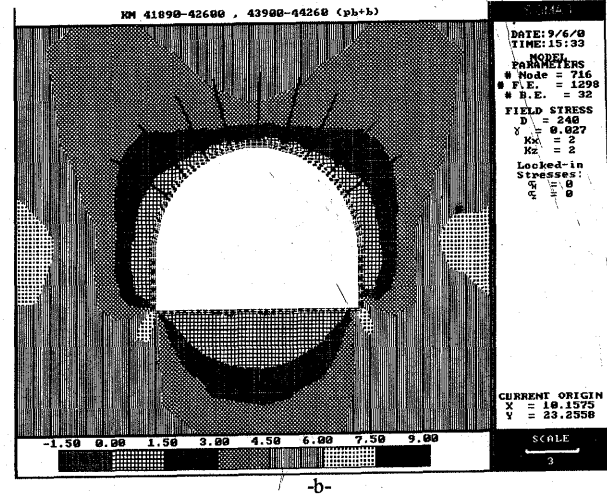
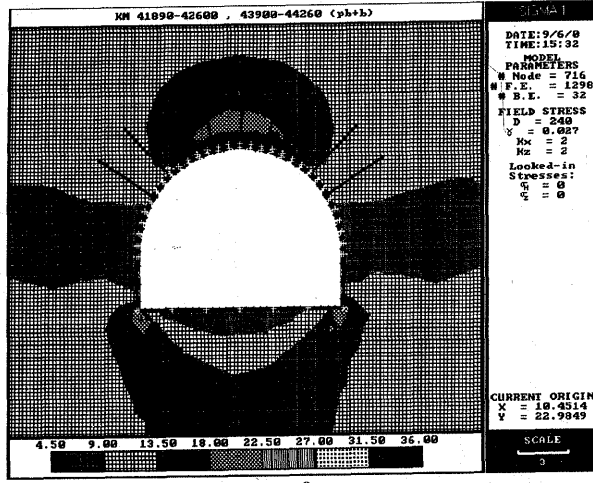
Son olarak püskürtme betonu ve kaya bulonları birlikte kullanılarak elde edilecek destek ve bu durumda tünel çevresinde oluşacak gerilme-deformasyon analizleri için yan duvarlarda 10cm, tavan 15cm kalınlığında püskürtme betonu kazı çevresinde ayrı bir malzeme olarak eklenmiştir. Püskürtme betonu ve kaya bulonları beraber uygulandığında tünel çevresinde oluşan  $\sigma_1$  ve  $\sigma_3$  asal gerilmeleri, güvenlik sayısı ve toplam yer değiştirme Şekil 7'de verilmiştir. Kullanılan parametreler doğrultusunda yenilme zonunun kalınlığı önemli ölçüde azalmış olup, yenilmeler püskürtme betonu içinde değil, kaya kütleisinde gelişmektedir.

#### 4.4.3. KM 42+600-43+000, KM 43+400-43+900

Bu kısımda maksimum örtü kalınlığı 320 m olup, analizlerde 6 nolu sondaj parametreleri kullanılmıştır. Yan duvarlarda 10cm ve tavan 20cm kalınlığında püskürtme betonu, 2m aralıklı yedi adet bulonla birlikte uygulandığında gerekli destek basıncının sağlanacağı görülmüştür.

#### 4.4.4. KM 43+000-43+400

İlk olarak tam kesit tünel kazısı şartlarında ve  $k$  değeri yine diğerlerinde olduğu gibi 2 olarak alınarak tünel çevresinde oluşacak gerilme ve deformasyonlar incelenmiştir. Tam kesit tünel kazı şartlarında tünel tavan ve taban kesimleri



Şekil 7. Kaletepe tünelli KM 41+890-42600, 43900-44260 arası (d=200m) kaya bulonu ve püskürtme betonu ile destekleme sonrası tünel kesiti çevresinde σ (a), σ (b), güvenlik sayısı(c) ve toplam yerdeğiştirme(d) değerlerinin dağılımı..

çevresinde maksimum  $\sigma_1$  gerilmelerinin 25-30 MPa'a kadar çıktığı görülmüştür.  $\sigma_3$  gerilmelerinin ise tünel köşelerinde 8 MPa, diğer kesimlerde ise 2 MPa olarak etkidildiği görülmüştür. Bu gerilme şartları altında tünel kesitinin tamamında makaslama veya tansiyon yenilmeleri gözlenmektedir.

Plastik yenilme zonunun kalınlığı tünel tavan ve tabanında 2m'den fazla, yan duvarlarda ise yaklaşık 1.5m civarındadır.

Bu durumda tünel yan duvarlarının doğrusal olan kısmından ikiye bölünerek, iki aşamalı kazı şartları altında analizler gerçekleştirilmiştir. Üst kazı kesiti için tavanda 25cm kalınlığında yan duvarlara doğru ise 20cm kalınlığında püskürtme betonu uygulanmıştır. Püskürtme betonunun tek eksenli basınç değeri 50 MPa'a çıkarılmış, diğer parametreler ise önceki bölümlerdeki gibi alınmıştır. Aynı zamanda 1.5m aralıklı 4 m uzunluğunda 0.20MN maksimum kapasiteli ve 25mm çapında 13 adet bulon yerleştirilmiştir. Bulonlara maksimum kapasitelerinin yarısı kadar bir öngerilme uygulanmıştır. Ancak, iki aşamalı kazıda dahi tünel tavanında yenilmeler meydana gelmektedir. 25 cm kalınlığında ve diğerlerine göre daha dayanımlı püskürtme betonu ve bulon bileşenleri kullanılarak dahi tam destek sağlanamamaktadır. Kullanılan parametreler doğrultusunda tünelin bu kesimlerinde ağır çelik kafesler ile de destekleme gerekecektir.

#### 4.5. Kocatepe Tüneli Gerilme-Deformasyon Analizleri

KM 45+370 – 46+090 arasında yeralan Kocatepe tüneli arazi gözlemleri, süreksizlik çalışmaları ve kaya sınıflamalarına göre tünelin 45+550-45+700 kilometreleri arasında süreksizliklerin ve ezilme zonlarının yoğun olduğu bölüm hariç diğer kesimleri birlikte incelenecektir. Tünel giriş ve çıkış kesimlerinde Kaletpe tünelinde incelendiği gibi gerilmelerin etkisinden çok tünelde meydana gelebilecek duraysızlıklar, süreksizliklerin kontrolünde gelişebilecektir. Kocatepe tünelinde sondaj yapılmadığından, gerek arazi gözlemleri, gerekse kaya sınıflamalarından elde edilen sonuçlara göre tünelin orta kısmı için 4 nolu, diğer kesimleri için 5 nolu sondaj deney sonuçları kullanılmasının uygun olacağı düşünülmüştür.

##### 4.5.1. KM 45+370-45+550, KM45+700-46+090

Buna göre  $\sigma_1$  gerilmeleri tünel köşelerinde 10MPa, tünel taban ve tavanında ise 6-8 MPa arasında değişmektedir. Yan duvarlarda ise 4 MPa'lık bir gerilme oluşmaktadır.  $\sigma_3$  gerilmeleri ise tünel

köşelerinde 3, diğer kısımlarda ise 0.60 MPa gibi oldukça düşük değerdedirler. Bu gerilme şartları altında güvenlik sayısı tünel çevresinde 1'den büyüktür ve herhangi bir yenilme oluşmamaktadır. Maksimum deformasyon ise tünel yan duvarlarında 0.0015 m'dir.

##### 4.5.2. KM 45+550-45+700

Bu gerilme şartları altında  $k=2$  alındığında tünel çevresinde herhangi bir yenilme gözlenmemektedir.  $k=3$  alındığında ise tünel kesitine oldukça yakın mesafede çok sınırlı sayıda elemanda yenilmeler gözlenmiştir. Maksimum toplam deformasyon 0.003m ile  $k=3$  alındığında tünel yan duvarlarında meydana gelmektedir.

#### 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sondaj karotlarından yapılan laboratuvar deneyleri ve süreksizlik durumları, topoğrafya ve yerinde gerilmelerin etkisi altında tüneller değişik alt bölümlere ayrılarak çalışılmıştır. Tünel tasarımlarında ilk olarak ampirik yöntemlerden RMR ve Q sınıflamaları kullanılmıştır. Buna göre Kaletpe tünel güzergahının KM 43+000-43+400 ile Kocatepe tünel güzergahının KM45+550-45+700 kilometreleri arasının orta-zayıf, diğer kesimlerinin ise iyi-orta kalite kaya sınıfı içerisinde sınıflandırılabilceği bulunmuştur.

Analitik yaklaşımlarda Kaletpe tünelinde, tünel örtü kalınlığının 80m'ye kadar olduğu durumlarda tünel çevresinde meydana gelen duraysızlıkların süreksizliklerin kontrolünde gelececeği sonucuna varılmıştır. Tünellerin bu kesimlerinde RMR ve Q sistemine göre elde edilen destek sistemleri önerilmektedir.

Genelde kabul edilen  $k=2$  değerine göre 80m derinlikten itibaren tünel tavan ve tabanında aşırı gerilmelerin etkisi altında yenilmelerin oluşacağı, bunlarda özellikle tavanın desteksiz duramayacağı anlaşılmıştır. Bu durumda Kaletpe tüneli KM 43+000-43+400 arası hariç tavanda 10-25cm, yan duvarlarda 5-15 cm kalınlığında değişen püskürtme betonu, kaya bulonları ile birlikte uygulandığında gerekli destek basıncının sağlanacağı bulunmuştur. Kaletpe tünelinin KM 43+000-43+400 arasının gerek mühendislik parametreleri açısından ve gerekse üzerindeki örtü kalınlığından dolayı sadece yukarıda belirtilen destek elemanları ile duraylı kalamayacağı, ağır çelik kafeslerin de mutlaka belirli aralıklarla kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Kocatepe tünelindeki stabilite problemlerinin, örtü kalınlığı maksimum 80 m

olduğundan, düşük gerilme koşulları altında daha çok süreksizliklerin kontrolünde gelişebileceği bulunmuştur.

Yukarıda elde edilen sonuçlar mevcut kaya kütle parametreleri ve kabul edilen yerinde gerilme değerleri için geçerlidir. Değişen şartlar altında analizler tekrar edilmelidir.

Son olarak ülkemizin karmaşık jeolojik yapısı ve tektonik olarak aktif kuşakları düşünülerek, yeraltı kazılarında mutlaka yerinde gerilme değerlerinin doğru bir şekilde belirlenerek tasarımlarının yapılması önerilmektedir.

## KAYNAKLAR

- Altınlı, İ.E., Gürpınar, O., ve Erşen, S., 1970. Erenköy-Derekasırı(Bilecik İli) Alanının Jeolojisi., *İ.Ü. Fen Fak. M. Seri B, Cilt XXXV, Sayı 1-2*, s.77-83.
- Barton, N., Lien, R. And Lunde, J. 1974. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. *Rock Mech.* 6(4), 189-239.
- Bieniawski, Z.T., 1989. Engineering Rock Mass Classifications. New York: Wiley
- Bingöl, E., Akyürek, B. ve Korkmazer, B. 1973. Biga Yarımadasının Jeolojisi Ve Karakaya Formasyonunun Bazı Özellikleri. *Cumhuriyetin 50. Yılı Yerbi. Kong., Tebliğler: MTA*, s. 70-77.
- Brown, E.T. and Hoek, E. 1978. Trends In Relationships Between Measured Rock *In situ* Stresses and Depth. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 15, 211-215.
- Genç, Ş.C., and Yılmaz Y., 1995. Evolution of The Triassic Continental Margin, NW Anatolia: *Tectonophysics*, V.243, P.193-207.
- Grimstad, E. and Barton, N. 1993. Updating The Q-System For NMT. *Proc. Int. Symp. On Sprayed Concrete - Modern Use Of Wet Mix Sprayed Concrete For Underground Support*, Fagernes, (Eds Kompen, Opsahl And Berg).
- Gürpınar, O., 1976. Geological Investigation Of The Bilecik-İnegöl-Yenişehir Territories Together With A Study Of Engineering Properties Of The Bilecik Limestone. *İ.Ü. Fen Fak. Mec. Seri B, Cilt 40, Sayı1-4*, S.80-113.
- Herget, G. 1988. *Stresses In Rock*. 179p. Rotterdam/Balkema/Brookfield.
- Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden. W.F. 1995. *Support Of Underground Excavations In Hard Rock*. Rotterdam: Balkema
- Hoek, E. and Brown, E.T. 1997. Practical Estimates of Rock Mass Strength. *Intnl. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomechanics Abstracts*. 34(8), 1165-1186.
- Hoek, E., 1998. Practical Rock Engineering. <http://www.rockeng.utoronto.ca/> Hoek's Corner. 313p.
- ISRM 1978 Commission On Standardisation Of Laboratory And Field Tests. Suggested Methods For The Quantitative Description Of Discontinuities In Rock Masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 15, 319-368.
- ISRM 1981. Rock Characterisation, Testing And Monitoring - *ISRM Suggested Methods*. Oxford: Pergamon.
- KGM 1995. Bozüyük-Bilecik-Osmaneli Mekece Yolu Mühendislik Ön Proje Raporu. 412 S., Ankara.
- Palmström, A. 1982. The Volumetric Joint Count – A Useful And Simple Measure Of The Degree Of Rock Jointing. *Proc. 4<sup>th</sup> Congr. Int. Assn. Engng. Geolo.*, Delhi 5, 221-228.
- Sheorey, P.R. 1994. A Theory For In Situ Stresses In Isotropic And Transversely Isotropic Rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 31(1), 23-34.
- Sutcliffe, M.L., Rogers, S.F., Whittaker, B.N., and Roberts B.H., 1990. Integrated Approach To Geotechnical Assesment Of Rock Tunnel Stability And Performance. *Tunnel Construction '90. Institution Of Mining And Metallurgy*. Pp. 145-153. Stephen Austin/Hertford. England.
- Yılmaz, Y., Genç, Ş.C., Yiğitbaş, E., Bozcu, M., and Yılmaz, K., 1995. Geological Evolution Of The Late Mesozoic Continental Margin Of Northwestern Anatolia: *Tectonophysics*, V. 243, P.155-171
- Yılmaz, Y., Tüysüz, O., Yiğitbaş, E., Genç, Ş.C., and Şengör, A.M.C., 1997. Geology and tectonic evolution of the Pontides, in *A.G. Robinson, ed., Regional and Petroleum geology of the Black Sea and sur. region: AAPG Memoir 68*, p.183-226.

## **ADANA – GAZİANTEP (TAG) OTOYOLU KIZLAÇ (T3-A) TÜNELİNDE OLUŞAN GÖÇÜKLER VE SAĞLAMLAŞTIRMA UYGULAMALARI**

### **COLLAPSES AND REINFORCEMENT APPLICATIONS IN KIZLAC (T3-A) TUNNEL OF ADANA – GAZİANTEP (TAG) MOTORWAY**

**A. KILIÇ**

Çukurova Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, 01330 Balcalı / ADANA

**ÖZET:** Bu çalışma Tarsus Ayrımı – Adana – Gaziantep (TAG) Otoyolu Kızlaç Tüneli'ndeki göçükler ve sağlamlaştırma uygulamaları ile ilgilidir. Bahçe bölgesi Nur ve Amanos dağlarının karmaşık jeolojik yapısına sahiptir. Kızlaç tünelinin Batı girişinden itibaren, sağ geçit 275 – 300'üncü metreler arasında iki kez göçük olayı meydana gelmiş ve tünelcilik çalışmalarının 1 yıl süre ile duraklamasına neden olmuştur. Tüneldeki göçük bölgelerinin sağlamlaştırılması amacıyla 816890 kg enjeksiyon, 1272 m uzunluğunda nervürlü kaya saplamaları, 1540 m uzunluğunda İbo saplamalar, 17071 kg kavisli çelik bağ, 11228 kg çelik hasır, 4004 m uzunluğunda önsüren ve 1005 m<sup>3</sup> püskürtme beton kullanılmıştır. Önsağlamlaştırma ve tahkimat işlemleri sonucunda tüneldeki deformasyonlar kabul edilebilir seviyelere indirilerek çalışmalara devam edilmiştir.

**ABSTRACT:** The study area is related to Kızlaç Tunnel in Bahçe area of Adana – Gaziantep motorway. The Bahçe area has a complex geological structure of Nur and Amanos mountains. Two collapses occurred along the west entrance between 275 and 300 m of right tube of Kızlaç tunnel. This has caused to stop the tunnel works for one year. For the reinforcement of collapsed areas in tunnel; 816000 kg of cement injection, 1272 m in length of cement grouted rock bolts, 1540 m in length of İbo bolts, 17071 kg steel arch, 11228 kg wire mesh, 4004 m in length of forepoles and 1005m<sup>3</sup> of shotcrete have been used. As a result of prereinforcement and support, tunnel deformations have been decreased to appropriate values and tunnel works have been continued.

## **1. GİRİŞ**

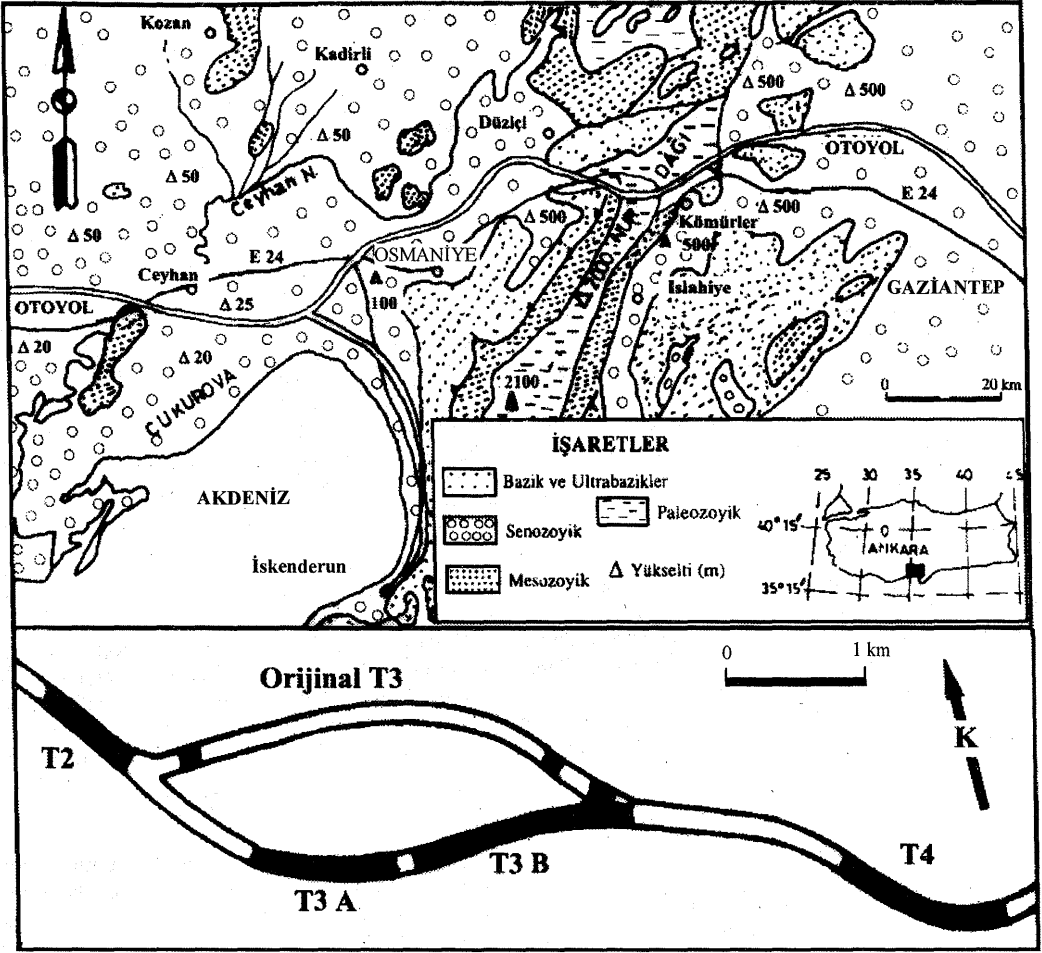
Bu çalışmada Tarsus ayrımı – Adana – Gaziantep (TAG) otoyolu Bahçe yöresindeki T3-A tünelinde meydana gelen göçükler ve bu göçüklerin yeniden tahkim edilerek tünelcilik faaliyetlerinin devamı için alınan tedbirler incelenmiştir.

Türkiye'nin önemli altyapı projelerinden biri olan TAG otoyolu; toplam 258 km uzunluğunda olup, bünyesinde 600 menfez, 94 altgeçit, 58 üstgeçit, 23 köprü, 12 viyadük, 2 özel viyadük ve 4 tünel bulundurmaktadır. Toplam 5 kesimden oluşan otoyol projesinin 4 kesimi tamamlanmış olup, araştırma konusu tüneli (T3-A) içerisinde bulunduran 25 km uzunluğundaki dördüncü kesimdeki çalışmalar da son aşamasına gelmiştir.

Bölgede 4 adet çift geçişli tünel mevcut olup, bunlardan 3 tanesi mühendislik açısından fazla sorun teşkil etmeden tamamlanmıştır. Orijinal olarak, bölgeyi boydan boya kesen geçidin kuzey yamacında 2750 m uzunluğunda bir tünel (T3) açılması planlanmış olmasına rağmen, yapılan sondaj çalışmaları ve incelemeler sonunda bu

bölgede heyelanların ve yeraltı sularının tespit edilmesi nedeniyle söz konusu tünelin geçidin güney tarafında ve 2 ayrı tünel (T3-A ve T3-B) olarak yapılmasına karar verilmiştir (Şekil 1). Ancak, Nur ve Amanos dağları gibi Türkiye'nin en karmaşık jeolojik yapısına sahip bölgedeki 1043 metre uzunluğundaki Kızlaç (T3-A) tünelinin batı girişinden itibaren 275 ila 300'üncü metreleri arasında 2 kez göçük olayı meydana gelmiştir. Bu göçüklerden birincisinde 650 m<sup>3</sup> ve ikincisinde 800 m<sup>3</sup> olmak üzere toplam 1450 m<sup>3</sup> zemin malzemesi henüz yerleştirilmiş olan "Püskürtme beton + Çelik hasır + Kavisli çelik bağ + Kaya saplamaları" ile oluşturulan tahkimat elemanlarını tahrip ederek tünel içerisine boşalmış ve tünelcilik çalışmalarının 1 yıl süre ile duraklamasına sebep olmuştur.

Göçük bölgesinin tahkimatı ve kazı işlemlerinin devamı için; zeminin mekanik özelliklerinin korunması, artırılması ve ilave sağlamlaştırma tedbirlerinin alınması sonucunda kazı boşluğu çevresinde oluşan deformasyonlar emniyetli aralıklara indirilebilmiş ve çalışmalara devam edilmiştir.



Şekil 1. İnceleme bölgesinin genel jeoloji haritası (M.T.A., 1989; Darling, 1994)

## 2. JEOLojİ

### 2.1. Genel ve Yapısal Jeoloji

Kızlaç (T3-A) tüneline içine alan Orta Amanoslar (Nur Dağı) bölgesinde metamorfik, tortul, ofiyolitik ve volkanik kayalar gözlenmektedir.

Bölgede temel litolojiyi Paleozoyik yaşlı ve meta kırıntılı kayalar, dolomitik kireçtaşları ve silisleşmiş dolomitik kireçtaşları oluşturur. Ofiyolitik birimler çalışma alanının batısında yer alır. Üst Miyosen yaşlı, filliş karakterli tortul birim bu ofiyolitlerin üzerinde uyumsuz olarak bulunmaktadır. Serpantin, spilitik bazalt, radyolarit, rekristalize kireçtaşı ve tortul seviyeler bu birimin esas bileşenleridir.

Yapısal açıdan; Amanos dağları dünya çapında bilinen tektonik zonların kesişim yerlerinde veya etki alanlarında bulunur. Bölgeyi etkileyen başlıca tektonik olaylar; Arabistan levhasının K-KB yönünde, Orta Anadolu levhasının batı yönünde hareketi sonucu gelişmiş ve gelişmeye devam etmektedir. Van Gölü'nün kuzeyinden başlayıp Hazar Gölü - Gölbaşı yönünü takip eden sol yönlü doğrultu atımlı Mersin - Kayseri doğrultusundaki Ecemiş Fay koridoru bölgede etkili olan ana faylardır. Nur Dağı'nda kıvrımlanma ve faylanmaların karakteristik özellikleri gözlenebilmektedir. Değişik ölçekte devrik, sürüklenme ve yatık kıvrımlanma mevcuttur. Sistöze yükselmeyi oluşturan kuvvet yönüne dik gelişmiştir. Özellikle mika oranı yüksek olan

seviyelerde çok belirgindir. Yaygın olarak bindirme, ters ve tabakalanma fayları gözlenir. Nur dağında ileri derecedeki tektonik itme devrik kıvrımlanmaları, şistozite ve ters fayları meydana getirmiştir (Duman, 1993). Hidrojeolojik olarak kaynak ve sızıntılar batı tarafında yoğunlaşmakta olup, yapısal jeolojiye bağlı olarak süreksizlik zonlarında gözlenmektedir (Yılmaz, 1995). Bu kaynak ve sızıntılar ana kayada önemli ölçüde ayrılmaya yol açmıştır. Jeolojik birimlerin mühendislik özellikleri yapısal jeolojiye, hidrojeolojiye ve kayaç türlerine bağlı olarak bir bölgeden diğerine çok büyük değişiklikler göstermektedir (Yılmaz v.d., 1992).

## 2.1. Mühendislik Jeolojisi

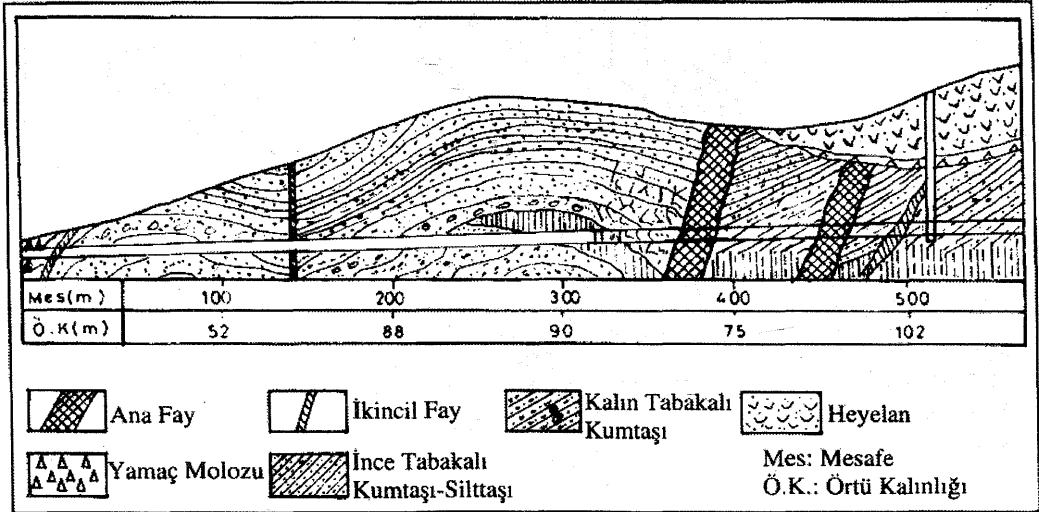
T3-A tüneli kalın tabakalı kumtaşı, kuvars kumtaşı, ince tabakalı kumtaşı – silttaşı yapısı içinde geçilir (Şekil 2). Ayrışmanın etkisinden dolayı tabakalar kahverengiden griye renk değiştirir. Ana kayanın mukavemet özellikleri orta sert – az sert arasındadır. Batı kısımlarda ince kil dokusu ve tamamen bozulmuş volkanik dayklar vardır ki bunlar zayıf kırıklı zonlardır. Tünel kazısı sırasında göçükler bu kısımda meydana gelmiştir. Göçükten sonra yapılan ölçümlerde su gelirin çok yüksek olduğu (25 lt/sn) gözlenmiştir. Ancak, müteakip 30 gün sonunda su debisi giderek azalmış ve 2,78 lt/sn ye kadar düşmüştür (Kılıç, 1997).

Göçük bölgesi iki küçük faydan dolayı genellikle gevşemiş ve çok çatlaklı – oldukça çatlaklı ve

ayrışmış yapıya sahiptir. Fay zonları fay killeri ve tamamen ayrılmış volkanik dayklardan oluşmaktadır. Tüneldeki ve tünelin üst kotundaki tabaka kazma ve kürekle kazılabilen ve el ile iri ve ince parçalara ufalanabilen ince tabakalı, koyu gri ve siyah şeyldir. Ayrıca, plastik killi milonit zonları ve ince tabakalı kahverengi, gri kumtaşı tabakaları bulunmaktadır. Tabakaların tamamı yoğun bir şekilde çatlamış olup, eklemler içinde biraz kil ve demiroksit bulunmaktadır. Göçüğe neden olan şeylin bölgede hakim olan kumtaşı içerisindeki mercerlerden oluştuğu görülmüştür. Suyu doygun olmasına rağmen şeyl malzemesinin tabii su akımına karşı geçirimsiz bir tabaka gibi davrandığı ve yeraltı suyunu toplayarak tünel kaplamasının delinmesine yol açtığı belirlenmiştir. Yapılan elek analizlerinde zemini oluşturan en iri parça boyutunun 100 mm'nin altında olduğu tespit edilmiştir.

## 3. TÜNELDE OLUŞAN GÖÇÜKLER

1043 metre uzunluğundaki T3-A tüneli Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) ile inşa edilmektedir. T3-A sağ geçit- batı girişi tünel kazısının 283'üncü metresinde ((165'inci have) kazı yapıp, pasa naklinin ardından açık yüzeylere çelik hasır ve çelik bağ yerleştirilip püskürtme beton atılmasını müteakip tünel kazı aynasının sağ üst kısmından 12 m<sup>3</sup> kadar bir zemin malzemesi âni olarak baca oluşturacak şekilde akmıştır. Daha sonra zemin akışı devam ederek 650 m<sup>3</sup> kadar

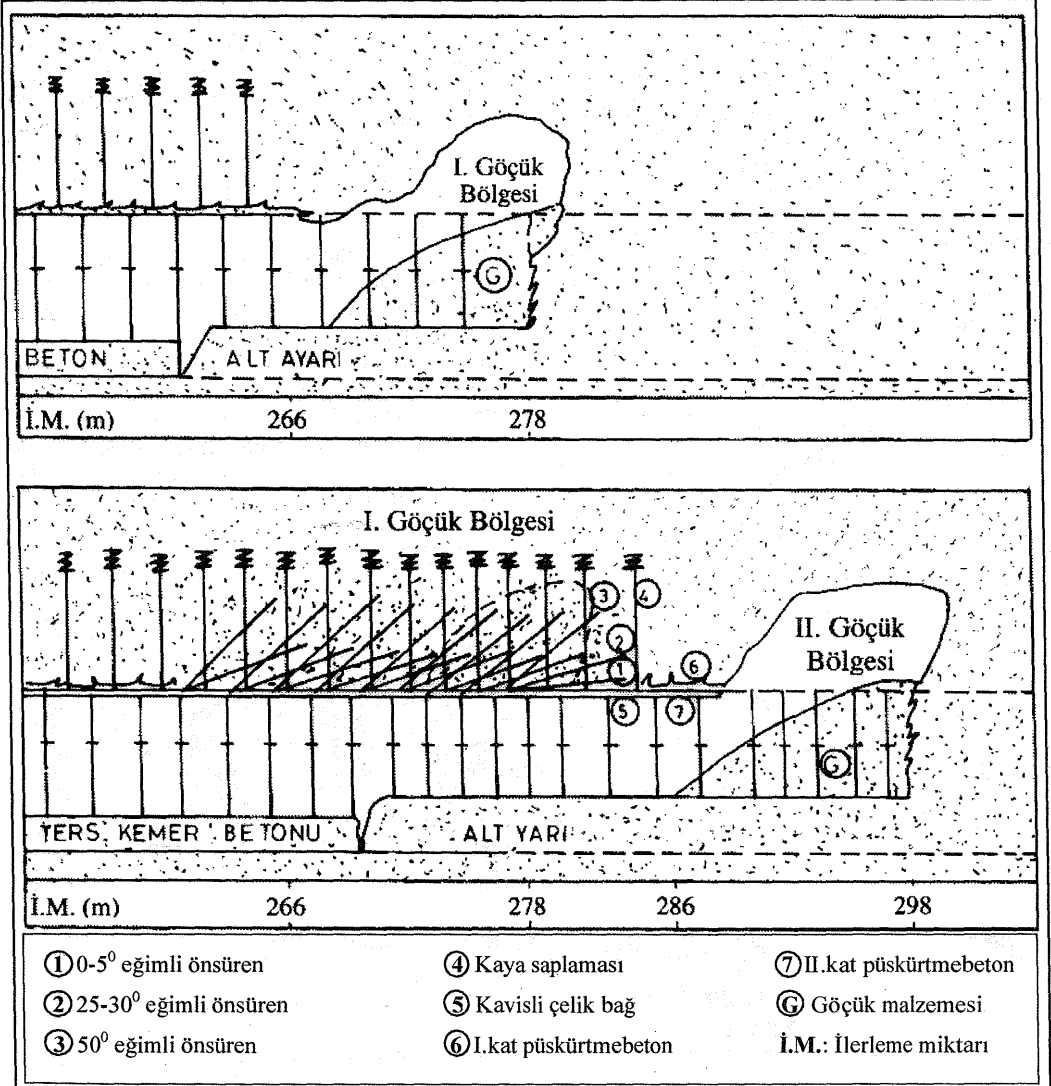


Şekil 2. Kızlaç (T3-A) tüneli kesit görünüşü (0 – 600 m. arası)

malzemenin tünel boşluğuna dolmasına ve bu arada 5 havelik (7 m) kısımda tahkimat elemanlarının tamamen yıkılmasına, 2 havelik (3 m) kısımda tahkimat elemanlarının ağır hasar görmesine ve 3 havelik (4,5 m) kısımda ise tünel tavanının 30 cm kadar çökmesine ve tahkimat elemanlarının kısmen hasar görmesine neden olmuştur (Şekil 3 - I. Göçük Bölgesi).

Altı ay boyunca süren zemin ıslahı, önsağlamlaştırma ve tahkimat işlemleri sonunda tünelde kazı çalışmaları tekrar başlamıştır. Ancak, birinci göçük içerisinde 7m ve bakir zemin

içerisinde de 7m ilerleme yapıldıktan sonra üst yarı kazısı 298'inci metreye (179'uncu haveye) ulaşmış ve bu havenin kavisli bağı henüz yerleştirilmeden 174'üncü havende tünel tavanında 30 cm kadar çökmenin ardından 173, 174 ve 175'inci havelerdeki püskürtme beton çatlamaya ve dökülmeye başlamıştır. Dökülmeler öne doğru aynaya ve geriye doğru 172'nci haveye olacak şekilde devam etmiş ve kazı boşluğu 800m<sup>3</sup> kadar göçük malzemesi tarafından tamamen doldurulmuştur (Şekil 3 - II. Göçük Bölgesi). Başlangıçta 25 lt/sn olan su geliri azalarak 30 gün sonunda 3 lt/sn ye kadar düşmüştür.



Şekil 3. T3-A tüneli I. ve II. göçük bölgeleri.

### 3.1. Zemin Islahı

Göçük bölgesindeki zeminin ıslah edilmesi amacıyla göçüğün meydana geldiği ilk haveden 5 – 6 m geride ve çelik bağların üst kısmında olacak şekilde çevresinde delikler açılmış olan 51 mm çapında ve 6 m boyundaki önsüren boruları ile tavanda kademeli olarak bir “Önsüren Şemsiyesi” oluşturulmuştur (Şekil 4).

Birinci kademe önsüren boruları tünel eksenine 0-5°, ikinci kademe önsüren boruları 25-30° ve üçüncü kademe önsüren boruları 50° açı yapacak şekilde yerleştirilmiştir. Sürenler arası mesafe zeminin durumuna bağlı olarak 30 – 60 cm arasında olup, bir haveye yerleştirilen süren sayısı 50 – 69 arasındadır.

Önsüren şemsiyesinin yapılmasını müteakip süren borularının içerisinden zemine enjeksiyon uygulanmaktadır. Birinci kademe enjeksiyonda çimento/su oranı 100/50 olup, basınç 5 – 10 kg/cm<sup>2</sup> dir. İkinci ve gerekirse üçüncü kademedeki enjeksiyonda çimento/su oranı 100/70 tir. Her bir boruda basınç 10 kg/cm<sup>2</sup> ye ulaşıncaya enjeksiyon işlemi durdurulur. Havedeki bütün borulardan yapılan enjeksiyon sonucu tünel çevresinde yaklaşık 4m kalınlığında bir “Enjeksiyon Kemer” oluşturulmaktadır. Enjeksiyon işlemine başlanmadan önce tünel kazı aynası ve tünel çevresine 6 – 8m uzunluğunda drenaj boruları yerleştirilerek zeminin susuzlandırılması sağlanmış olur. Böylece; zeminin kohezyonu (c) ve içsel sürtünme açısı (φ) artırılmış ve zemin ıslah edilmiştir. Birinci ve ikinci göçük bölgelerinde zemin ıslahı için kullanılan enjeksiyon ve önsüren miktarları Çizelge 1’ de verilmektedir.

Çizelge 1. Göçük Bölgelerinde Kullanılan Enjeksiyon ve Önsüren Miktarı.

| Kullanılan Malzeme  | I. Göçük Bölgesi | II. Göçük Bölgesi | Toplam |
|---------------------|------------------|-------------------|--------|
| Enjeksiyon (kg)     | 460536           | 356354            | 816890 |
| (φ51mm) Önsüren (m) | 1614             | 2390              | 4004   |

### 3.2. Zemin Sağlamaştırma

Zemin ıslah yöntemlerinin uygulanması ve enjeksiyonun prizlenmesinin ardından tünel çevresine 28 mm çap ve 6 – 9 m uzunluğunda yüksek mukavemetli çelikten mamul, çimento ankrajlı kaya saplamaları bir have boyu (80 cm) aralıklarla yerleştirilmiştir. Saplama deliklerinin geçerek kapanmasına neden olabilecek kadar zayıf zeminlerde nervürlü saplamalar yerine İbo saplamalar kullanılmıştır. Tüm açık yüzeyler 20 cm

kalınlığında birinci kat püskürtme beton ve çelik hasır ile kaplandıktan sonra bir have boyu aralıklarla kavisli çelik bağ yerleştirilmiştir. Kavisli çelik bağ yerleştirilmesinin ardından yüzeyler 20cm kalınlığındaki ikinci kat püskürtme beton ve ikinci kat çelik hasırla kaplanmıştır. Göçük bölgelerinde kullanılan sağlamaştırma elemanları ve miktarları Çizelge 2’ de verilmektedir.

Çizelge 2. Göçük Bölgelerinde Kullanılan Sağlamaştırma Elemanları ve Miktarları.

| Kullanılan Malzeme                | I.Göçük Bölgesi | II.Göçük Bölgesi | Toplam |
|-----------------------------------|-----------------|------------------|--------|
| (φ28mm) Kaya saplaması (m)        | 300             | 972              | 1272   |
| (φ25mm) İbo saplama (m)           | 807             | 733              | 1540   |
| Kavisli çelik bağ (kg)            | 9696            | 7375             | 17071  |
| Püskürtme Beton (m <sup>3</sup> ) | 496             | 509              | 1005   |
| Çelik hasır (kg)                  | 4681            | 6547             | 11228  |

### 3.3. Kazı

Kazı işleminin emniyetli bir şekilde devamını sağlamak amacıyla; kazı aynası alt ve üst yarı olmak üzere iki kısma ayrılmıştır. Ayrıca, üst yarı kazı aynası da üç bölgeye ayrılmıştır. Üst yarı kazı aynasının alt-orta kısmında göçüğe neden olabilecek deformasyonların önlenmesi amacıyla yaklaşık 4 – 5 m uzunluğunda bir “Destek Çekirdeği” bırakılmaktadır. Kazı aynasında aşırı deformasyonların ve göçmelerin önlenmesine yönelik olarak sırası ile aşağıdaki işlemler yapılmıştır:

1 – Kazı aynası dahil olmak üzere tüm açık yüzeyler 20-25cm kalınlığında bir kat püskürtme betonla kaplanır.

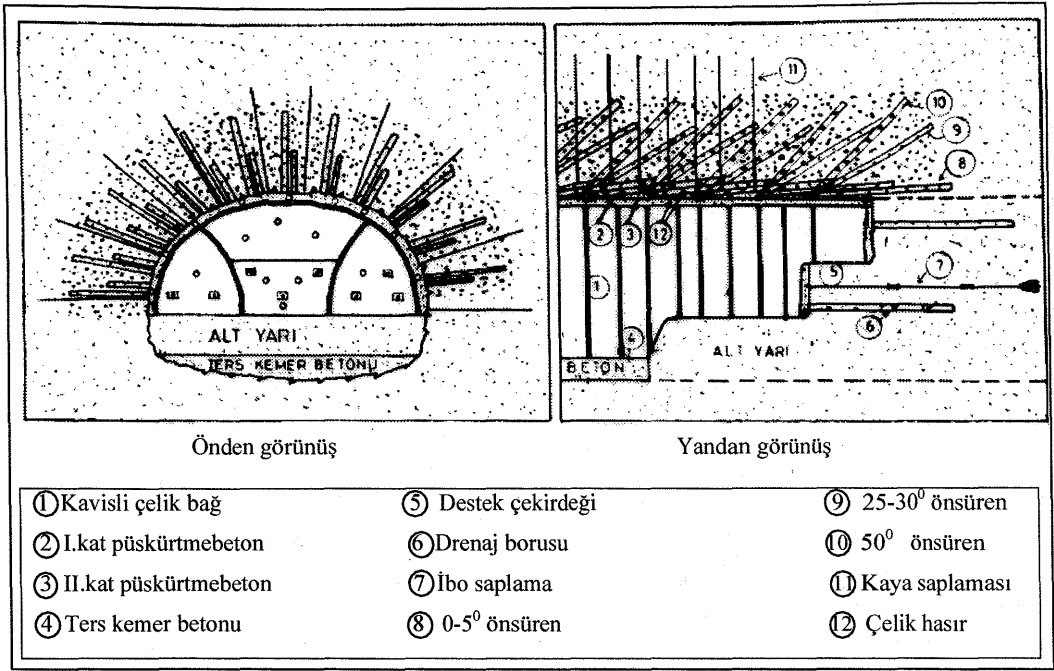
2 – Kazı aynasına tünel eksenine paralel olacak şekilde 51mm çapında ve 8m uzunluğunda drenaj boruları yerleştirilir.

3 – Kazı aynasına 25mm çap ve 12m uzunluğunda İbo saplamalar yerleştirilir.

4 – Tünel çevresine nihai ve tünel üst yarısındaki ayrı bölgelere de geçici olmak üzere kavisli çelik bağlar yerleştirilir.

5 – Üst yarıdaki ayrılmış bölgeler belli bir sıra ile ve patlayıcı madde kullanılmaksızın kazı makineleri yardımı ile kazılır.

6 – Kazı sonrasında drenaj boruları ve İbo saplamaların açığa çıkan kısımları kesilir ve geçici çelik bağlar kaldırılır.



Şekil 4. Önsüren şemsiyesi ve enjeksiyon kemerinin oluşturulması.

#### 4. SONUÇLAR

Tarsus ayrımı – Adana – Gaziantep (TAG) otoyolu Bahçe yöresi Kızlaç (T3-A) tüneline yapılan çalışmalardan çıkarılan belli başlı sonuçlar şu şekilde sıralanabilir.

Zayıf zeminlerde yeraltı kazı boşluklarının açılması sırasında karşılaşılan yeraltı sularının kazı boşluğu çevresine etki eden arazi basınçlarına ilave bir basınç oluşturmaları nedeniyle kazı emniyeti bakımından önemli sakıncaları vardır. Ayrıca, bu sular zeminin mekanik parametrelerinden kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ) değerlerini azalttığından zemin akıcı bir hal alabilir. Bu nedenle kazıdan önce; kazı aynası ve kazı boşluğu çevresi boyunca delinecek delikler yardımıyla bu tür suların uzaklaştırılarak zeminin drenajı sağlanmalıdır. Bu işlem, aynı zamanda, çalışma randımanının da artmasına yardımcı olur.

Zemindeki yeraltı sularının uzaklaştırılması ve zeminin sağlamlaştırılması için yapılan enjeksiyon çalışmaları oldukça iyi sonuçlar verir. Ayrıca, enjeksiyon işlemi boşluk çevresinde sağlam bir kemer oluşturarak zeminin kendi kendini taşıma kapasitesini artırır, gerilmeleri düzenler ve daha

sonra yerleştirilecek kaya saplamalarının sağlam bir zemine tutturulabilmesini (ankrajını) sağlar.

Zayıf zeminlerde açılan yeraltı kazı boşluklarında önsağlamlaştırma maliyetleri yüksektir. Ancak, göçük nedeni ile ortaya çıkan ek maliyetlerle karşılaştırıldıklarında önsağlamlaştırma maliyetleri oldukça düşük mertebelerde kalır. Çünkü; göçük olayının meydana geldiği bölgedeki zemin taşıma mukavemetini tamamen kaybettiği için gerekli olan tahkimat elemanlarının miktarı önsağlamlaştırma elemanlarının miktarından çok daha fazla olacaktır. Bu ise kullanılan malzeme miktarının ve maliyetinin artmasına, ilerleme hızının azalmasına ve inşaatın tamamlanma zamanının gecikmesine neden olur.

Zayıf zeminlerde kazı yapılırken tahkimatsız açıklığın ayakta kalma süresi çok kısa olduğu için bir çevrimde yapılacak ilerleme boyu (have uzunluğu) mümkün olduğunca kısa tutulmalıdır.

Boşluk çevresinde kazı eksenine paralel olacak şekilde yerleştirilen önsüren boruların zemin malzemesinin boşluk içerisine akmasını önlediği gibi kavisli çelik bağ üzerine gelen basınçların da düzenli olmasını sağlar. Kazı eksenine farklı açılarla yerleştirilen ve enjeksiyon malzemesi ile sağlamlaştırılan önsüren boruları ise kaya saplamaları gibi çalışır ve boşluk çevresinde koruyucu bir önsüren kemerinin oluşmasını sağlar.

Sağlam zeminlerde kazıyı müteakip kazı boşluğu çevresinde bir miktar deformasyonun gelişmesi kaya kütlelerinin kendi kendini destekleme özelliğine katkı sağlarken, zayıf zeminlerde kazı boşluğu çevresinde gelişen deformasyonlar kazıyı çevreleyen zemini daha da zayıflatacağından istenmeyen bir durumdur. Ancak, deformasyonlar hiçbir şekilde sıfır seviyesinde tutulamayacağından mümkün olan asgari seviyede tutulmaları gerekir. Zayıf zeminlerde sağlamlaştırma ve tahkimat işlemlerine yönelik olarak önsüren, enjeksiyon ve kaya saplamalarının birlikte kullanılmaları kazı boşluğu çevresinde oluşabilecek deformasyonun asgari seviyede tutulmasında en etkili ve ucuz yöntemdir.

#### KAYNAKLAR

Darling, P., 1994, *Road tunnels support agricultural revival*. Tunnels and Tunnelling, January, pp.17-20.

Duman, T.Y., 1993, *Tarsus Ayrımı-Adana-Gaziantep Otoyolu (TAG) Tünel 2 - Tünel 4 Arasının Mühendislik Jeolojisi*. Yüksek Lisans Tezi. Ç.Ü. Fen. Bil. Ens. Adana.

Kılıç, A., 1997, *Tarsus Ayrımı-Adana- Gaziantep (TAG) Otoyolu Bahçe Yöresindeki Tünellerin Kaya Sınıflandırmaları ve Kaya Bulonlarıyla Desteklenmesi*. Doktora Tezi. Ç.Ü. Fen. Bil. Ens. Adana.

M.T.A., 1989, *Türkiye jeoloji haritası, ölçek 1/500.000, Hatay paftası*. Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü, Ankara.

Yılmaz, İ.; Ertunç, A. and Erhan, F., 1992, *Engineering Geology of the Düziçi - Kömürler Region*. 1<sup>st</sup> Int. Sym. Eastern Mediterranean Geology. Cukurova University, Turkey. pp. 77-89.

Yılmaz, İ. , 1995, *Significance of discontinuity surveying in motorway alignment selection, southern Turkey*. Engineering Geology. Vol. 40, pp. 41-48.



## YERALTI AÇIKLIKLARININ DİNAMİK TASARIMI

### DYNAMIC DESIGN OF UNDERGROUND OPENINGS

M. GENİŞ ve H. GERÇEK

Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, ZONGULDAK

**ÖZET:** Bu bildiride, dinamik yüklemelerin (örneğin; deprem) ve dinamik değiştirgelerin (parametrelerin) derin ve masif kaya kütlelerinde kazılan yeraltı açıklıkları çevresinde oluşan yenilme bölgesinin geometrisine olan etkisi araştırılmıştır. İki boyutlu bir yeraltı açıklığının statik koşullardaki elasto-plastik gerilme çözümlemesi yapıldıktan sonra, dinamik yüklemeler uygulanmıştır. Statik ve dinamik çözümlemelerde, FLAC<sup>2D</sup> bilgisayar programı kullanılmıştır. Deprem mühendisliğinde, depremlerin şiddetini ve oluşan hasarın değişimi incelenirken kullanılabilen en büyük arazi ivmesi değeri bir girdi değiştirgesi olarak seçilmiştir. Dinamik dalga şekli olarak da artan-azalan genlikli bir sinüs fonksiyonu kullanılmıştır. Ayrıca, sismik dalgaların frekansının ve açıklığa göre yayılma yönünün de etkileri incelenmiştir

**ABSTRACT:** In this paper, the effect of dynamic loads (e.g. an earthquake) and dynamic input parameters on the geometry of the failure zone occurring around underground openings, excavated in deep and massive rock masses, has been investigated. After an elasto-plastic stress analysis of a two-dimensional underground opening under static conditions, dynamic loads have been applied. In the static and dynamic analyses, FLAC<sup>2D</sup> computer program has been utilized. Maximum ground acceleration value, which is used in earthquake engineering and also can be employed for investigating earthquake intensity and damage, is selected as an input parameter. A sinus function with increasing-diminishing amplitude has been used as the dynamic wave form. In addition, the effects of the frequency and the direction of propagation of the seismic waves with respect to the opening have been studied.

## 1. GİRİŞ

Yeraltı açıklıkları, işlevleriyle uyumlu bir duraylılığı kendilerinden beklenen hizmet süreleri boyunca gösterebilmelidir. Bu bağlamda, bazı bölgelerde (örneğin; ülkemizde), açıklıkların statik yükler altında gösterecekleri davranış yanında, dinamik yükler altında gösterecekleri duraylılık performansı da önem taşımaktadır. Açıklığın oluşturulduğu ortamda daha sonraları oluşabilecek bir dinamik etkinin (örneğin; deprem gibi), açıklıkta oluşturacağı ilave etkilerin önceden belirlenmesi gerekebilir. Eğer açıklık çevresinde aşırı gerilmelerin oluşması kaçınılmazsa, bu potansiyel yenilme bölgesinin geometrisi (büyüklük ve şekli) hem statik hem de dinamik yükler altında belirlenmelidir.

Bildiride, bazı dinamik değiştirgelerin yeraltı açıklığının duraylılığını ne yönde etkiledikleri araştırılmıştır. İlk olarak, jeolojik ortamda oluşan sismik dalga yayılımı ve yeraltı açıklıklarının sismik

yükler altındaki davranışları hakkında bilgiler verilmiştir. Sonra, elasto-plastik davranış gösteren bir kaya kütlesi içinde oluşturulan iki boyutlu bir yeraltı açıklığının statik ve dinamik çözümlemeleri sunulmuş ve bulgular tartışılmıştır.

## 2. SİSMİK DALGA YAYILIMI

Sismik bir kaynaktan yayılan enerji, dalgalar ile iletilir. Jeolojik ortamda yayılan sismik dalgalar başlıca iki sınıfta toplanabilir. Bunlar:

- kayaç içerisinde ilerleyen cisim dalgaları ve
- arazi yüzeyine yakın veya yüzeyinde ilerleyen yüzey dalgalarıdır.

Cisim dalgaları, P dalgaları (dilatasyon veya basınç dalgaları) ve S dalgaları (şekil bozucu veya kesme dalgaları) olarak ikiye ayrılırlar. P ve S dalgaları parçacık hareketine neden olur ve hareket, sırasıyla yayılma doğrultusuna paralel ve diktir. Bu hareketler

Şekil 1.a'da gösterilmiştir. Yayılma hızları ortamın fiziksel ve geometrik özelliklerine bağlıdır. Örneğin sonsuz, türdeş (homojen), eşyönlü (izotropik) ve elastik bir ortamda P ve S dalga hızları, sırasıyla:

$$C_p = \sqrt{\frac{(1-\nu) \cdot E}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu) \cdot \rho}} \quad (1.a)$$

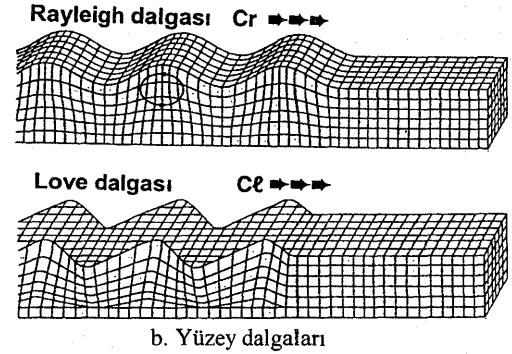
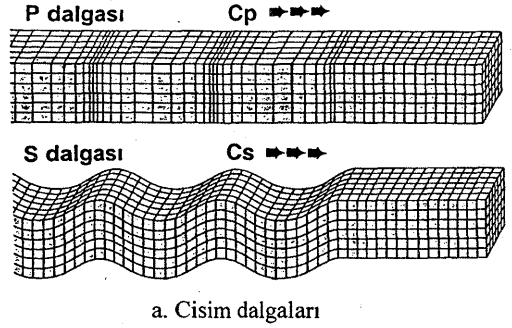
$$C_s = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu) \cdot \rho}} \quad (1.b)$$

şeklinde verilmektedir. Burada; E, ortamın Young modülü;  $\nu$ , ortamın Poisson oranı ve  $\rho$  da ortamın yoğunluğudur. Bu eşitliklerden de görülebileceği gibi, sonsuz bir ortamda P dalgasının yayılma hızı, S dalgasının yayılma hızından en az  $\sqrt{2}$  kat daha fazladır (Brady, 1993). P dalgasının yayılma hızı, yeryüzünde 1,5-8 km/s arasındadır.

Yüzey dalgalarının en önemli türleri Rayleigh dalgaları ve Love dalgalarıdır. Çoğunlukla yüzeyde oluşan en yaygın dalga Rayleigh dalgasıdır. Rayleigh dalgasının yayılma hızı ( $C_r$ ), aşağıda verilen denklemin pozitif gerçek köküdür (Brady, 1993; Brady ve Brown, 1993):

$$4 C_s^3 [(C_p^2 - C_r^2) (C_s^2 - C_r^2)]^{1/2} = C_p (2C_s^2 - C_r^2)^2 \quad (1.c)$$

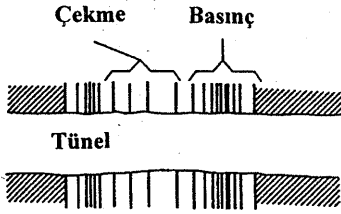
Rayleigh dalgaları, eliptik ve gittikçe kötüleşen parçacık hareketlerini oluşturur. Diğer bir ifadeyle, parçacık hareketinin yatay ve düşey bileşenleri dalga yayılımı düzleminde oluşur. Love dalgaları, yatay ve daha çok yayılma doğrultusuna dik doğrultuda parçacık hareketi oluşturur (Şekil 1.b). Rayleigh dalgasının yayılımı, yaklaşık S dalgası hızında olmasına rağmen, Love dalgasının yayılma hızı, yüzey tabakasındaki ve alt tabakadaki S dalgalarının yayılma hızları arasındaki bir değerde olur. Kaynak bölgesinden yayılan sismik dalgalar, geçiş yolu üzerindeki geometri ve malzeme özelliklerinden etkilenir. P ve S dalgaları geçiş yolu boyunca farklı malzeme özelliklerine sahip tabakaların arayüzleriyle karşılaştıklarında yansır veya kırılırlar. Bu dalgalar arasında farklılık, enerji kaynağından çıkan dalgaların genliklerinde bölgesel bir artış veya azalışla sonuçlanabilir. Geçiş yolundaki diğer düzensizlikler (yüzey topoğrafyası, süreksizliklerdeki ve malzeme özelliklerindeki değişimler vb.) yansıma ve kırılma olaylarını büyük bir karmaşıklığa sokar. Yüzey topoğrafyası ve yüzeye yakın tabakalanma da yüzey dalgalarının özelliklerini etkiler (John ve Zahrah, 1987).



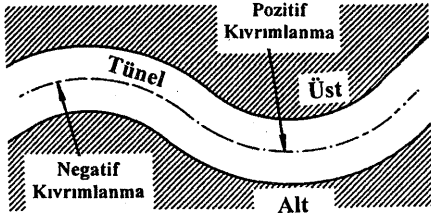
Şekil 1. Deprem dalgalarının oluşturduğu arazi hareketleri (Bolt, 1976).

### 3. YERALTI AÇIKLIKLARININ SİSMİK YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞI

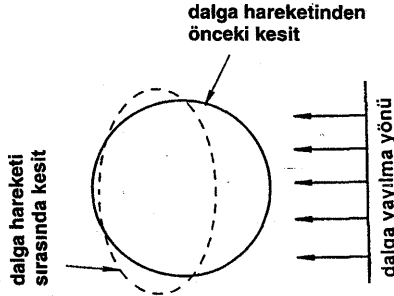
Kayada oluşturulan yeraltı yapıları, zeminde oluşturulan yapılardan oldukça farklıdır. Genelde, yeterli sağlamlıktaki kaya kütleleri daha geniş açıklıklara olanak tanır; ayrıca, bu gibi ortamlarda açılan yeraltı açıklıklarının tahkimat gereksinimi en az seviyededir. Bu durum, statik gerilme ve duraylılık çözümlemeleriyle incelenebilir. Öte yandan, dinamik yükleme durumları için tünel eksenine dik ve tünel eksenine paralel sismik dalga yayılımları göz önünde bulundurulmalıdır (Şekil 2). Tünel eksenine dik dalga yayılımları açıklık çevresindeki gerilmelerde, dinamik gerilme yığılmalarına neden olur ve bu tür çözümlemeler, iki boyutlu düzlem birim şekil değiştirme (plane strain) problemi olarak modellenebilir.



a. Eksenel şekil değiştirme



b. Tünel eksenine boyunca kıvrımlanma



c. Tünel eksenine dik doğrultudaki dalga yayılımının oluşturduğu şekil değişikliği

Şekil 2. Dinamik yükler sonucu bir yeraltı açıklığında oluşan şekil değiştirme türleri (John ve Zahrah, 1987).

Tünel eksenine paralel doğrultudaki dalga yayımları; tünelin eksenel olarak uzamasına veya kısalmasına ya da kıvrımlanmasına yol açabilecek şekil değişikliklerine neden olur. Tünel eksenine paralel sismik dalga yayımları için gerilme çözümlmeleri, üç boyutlu yaklaşımları ve modelleri gerektirmektedir (Adhya, 1989).

### 3.1 Yeraltı Yapılarının Hasar Şekilleri

Stevens (1977), Owen ve Scholl (1981); yeraltı açıklıklarında görülen sismik yüklemelerin değerlendirmesinde faylanma, arazi yenilmesi ve sarsıntı olarak üç hasar şekli tanımlamışlardır (Brady ve Brown, 1993).

#### 3.1.1 Faylanma

Ana kayacın doğrudan kesme birim şekil değiştirmesi sonucu faylanması, genelde, göreceli olarak dar ve sismik olarak etkin fay bölgeleriyle sınırlıdır. Birkaç santimetreden başlayıp, metrelere değere ulaşan ana yer değiştirmeleri sınırlamak için bir yeraltı yapısı tasarımı yapmak pratik değildir. Duyarlı bölgelerden kaçınmak veya yer değiştirmeleri kabul etmek; hasarı sınırlı tutmak ve tamir yapmayı sağlamak daha uygundur (Adhya, 1989; Erlingsson, 1997). Sismik bir olaydan önce, fay yakınlarındaki elastik ve plastik şekil değişikliği birikimi bilgileri, tünelde hasar azaltılması için planlamada büyük bir önem taşır (Erlingsson, 1997).

#### 3.1.2 Arazi Yenilmesi

Arazi yenilmesinin neden olduğu hasar; kaya veya zemin kaymaları, zeminlerde sıvılaşma, zemin çökmesi ve arazi hareketlerinin diğer etkileri ile ilintilidir. Bu tür hasarlar, tünellerin giriş-çıkış ağzlarının çevresinde ve diğer sığ açıklık alanlarında yapılacak dikkatli arazi araştırmalarıyla azaltılabilir (Adhya, 1989).

#### 3.1.3. Sarsıntı

Tahkimatlı tüneller için sarsıntının neden olduğu hasar, küçük parça şeklinde kopmaları (kavlak düşmesi), kaplamanın çatlamasını veya yenilmesini içerebilir. Sarsıntı, tüneli çevreleyen zemin veya kaya kütlelerinin dayanımını azaltabilir ve tünelin tahkimat sistemi sarsıntıyı takiben ilave yüklere karşı koymak zorunda kalabilir Bu tür bir titreşimli hareket; tahkimatsız tüneller için blok hareketlerine, küçük parça kopmasına, kaya düşmesine veya eklemlerin açılmasına neden olabilir. Bir yeraltı yapısının sarsıntıya tepkisi; açıklık şeklinden, açıklığın derinliğinden, açıklık çevresindeki zemin veya kaya kütlelerinin mekanik özelliklerinden ve arazi hareketinin büyüklüğünden etkilenmektedir (Adhya, 1989).

### 3.2 Deprem Hasarlarının Sınıflaması

Dowding ve Rozen (1978), yeraltı kazılarının depremden kaynaklanan hasarlarını sınıflamak için bir yaklaşım geliştirmiştir. Bu araştırmacılar, rapor edilen hasar ile en büyük arazi ivmesi ve en yüksek parçacık hızı arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Göz önünde bulundurulmuş arazi değıştirmelerinin yerinde (arazide) kaydedilmediği ancak görgül ilişkilerden elde edildiği belirtilmektedir. Bulgulara göre; en büyük arazi ivmesi yaklaşık 0,2g'den daha az ise hasar oluşmaması beklenmelidir (g: yerçekimi ivmesidir); ayrıca, 0,2g ile 0,4g arasında yalnızca çok az hasar oluşacağı deneyimlerden gözlenmiştir (John ve Zahrah, 1987). McGarr vd.'ne (1981) göre en yüksek hız, hasarın ilişkilendirildiği en uygun hareket değıştirgesidir. Çünkü bu büyüklük, arazi dalgasındaki en yüksek geçici (transitional) gerilme ile doğrudan ilişkilendirilebilmektedir. Hızın karesi dinamik şekil değıştirme enerjisi ile ilişkilidir (Brady ve Brown, 1993). Dowding ve Rozen (1978), uzun süreli yeraltı kazılarının dinamik tasarımında görgül bir tasarım ölçütü olarak; önemsiz hasar için 20 cm/s ve önemli hasar için de 40 cm/s'lik hasar eşik değerlerinin alınabileceğini göstermiştir. En yüksek parçacık hızı 20 cm/s değerinin altında olduğu zaman, incelenen yeraltı kazılarında hiç bir hasar gözlenmemiştir. Bu değer, kaya içindeki yeraltı yapıları için de geçerlidir (John ve Zahrah, 1987).

## 4. DİNAMİK ÇÖZÜMLELER

Bu çalışmada, yeraltı açıklıklarının elasto-plastik çözümlemelerinde FLAC<sup>2D</sup> programı kullanılmıştır. Tüm statik ve dinamik çözümlemeler iki boyutlu, düzlem birim şekil değıştirme durumunda yapılmıştır. FLAC<sup>2D</sup> programının dinamik çözümlemeleri deprem mühendisliği, sismoloji vb. disiplinlerde olduğu kadar, madencilikteki kaya patlamaları gibi sismik olguları incelemek amacıyla da kullanılmaktadır. Dinamik çözümlemeler oldukça karmaşık olup, yapılması ve sonuçlarının değerlendirilmesi deneyim gerektirmektedir (Itasca, 1995).

### 4.1 Açıklık Geometrisi

Çözümlemelerde, temel olarak, genişlik/yükseklik oranı W/H = 1 olan kemer tavanlı bir açıklık geometrisi seçilmiştir. Bunun nedeni; genişliği yüksekliğine yakın olan yeraltı açıklıklarının, birincil gerilmelerden ve açıklığın kesit şeklinden

hemen hemen bağımsız olarak, duraylılık açısından en olumlu sonucu vermesidir. Sonlu farklar ağının açıklık geometrisine uygun bir şekilde oluşturulmasında da Gerçek (1997) tarafından geliştirilen bir bağıntı kullanılmıştır.

### 4.2 Birincil Gerilme Alanı

Çalışmada, yönlere göre değışen (anizotropik) bir birincil gerilme alanı göz önünde bulundurulmuştur. Düşey birincil gerilme, çoğu bölgelerde ölçüldüğü gibi, yatay birincil gerilmelerden küçük seçilmiştir. Yine birçok bölgede olduğu gibi, yatay birincil gerilmelerin asal bileşenleri de birbirinden farklı seçilerek, açıklığın uzun ekseninin bunlardan büyük olanına paralel olduğu varsayılmıştır. Bu varsayım, hem düzlem birim şekil değıştirme çözümlemesine izin vermiş hem de duraylılığı artırmak için pratikte alınan bir önlemlerle uyum sağlamıştır. Buna göre, birincil gerilmelerin asal bileşenleri şu şekilde alınmıştır:

- düşey birincil gerilme,  $P_v = 10 \text{ MPa}$ ;
- yatay birincil gerilme,  $P_h = 20 \text{ MPa}$  ve
- eksenel birincil gerilme,  $P_z = 30 \text{ MPa}$ .

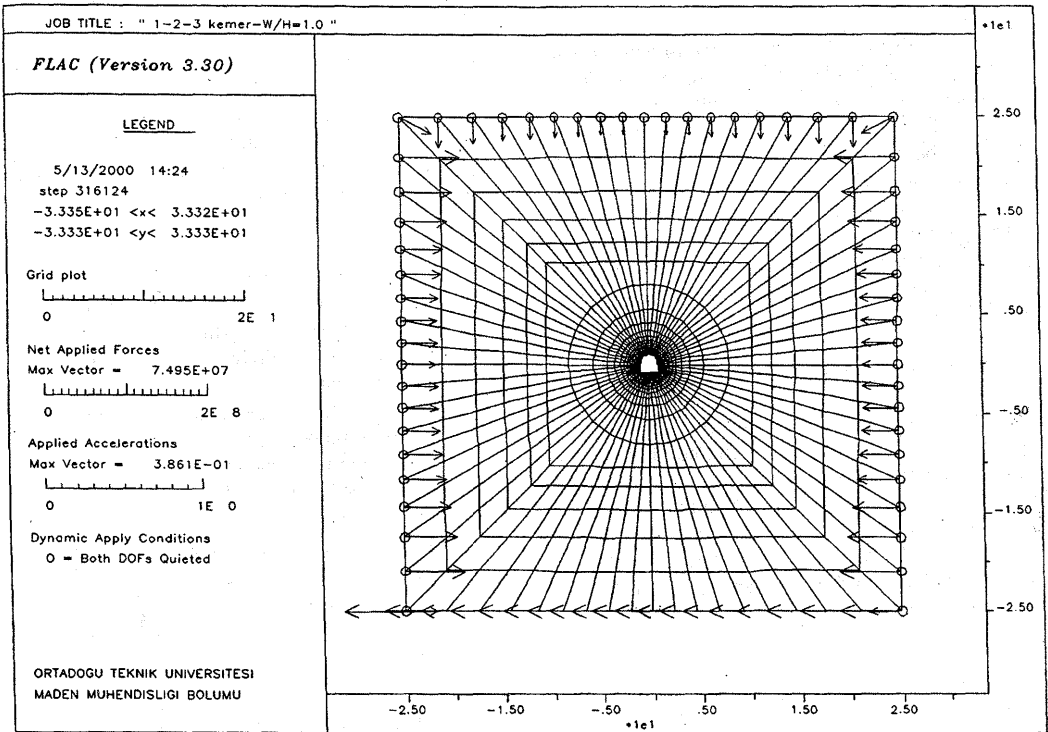
### 4.3 Kaya Kütlesinin Özellikleri ve Dayanımı

Açıklığı çevreleyen kaya kütlesinin, elasto-plastik olarak davrandığı ve dayanımının Hoek-Brown görgül yenilme ölçütü ile tanımlandığı varsayılmıştır. Kaya kütlesinin elastik özellikleri olarak, Young modülü  $E = 10 \text{ GPa}$  ve Poisson oranı  $\nu = 0,25$  alınmıştır; ayrıca, birim hacim ağırlığı da  $25 \text{ kN/m}^3$  olarak seçilmiştir. Eşitlik (1.a) ve (1.b) kullanılarak, ortamdaki P ve S dalgalarının yayılma hızlarının, sırasıyla,  $C_p = 2190 \text{ m/s}$  ve  $C_s = 1265 \text{ m/s}$  olduğu hesaplanmıştır.

Hoek-Brown görgül yenilme ölçütü,

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} (m_b \sigma_3' / \sigma_{ci} + s)^\alpha \quad (2)$$

bağıntısıyla verilmektedir (Hoek ve Brown, 1997). Burada;  $\sigma_1'$  ve  $\sigma_3'$ , yenilme anındaki (sırasıyla) en büyük ve en küçük asal etkin gerilmeler ve  $\sigma_{ci}$  de sağlam örneklerin (kaya malzemesinin) tek eksenli basınç dayanımıdır. Ayrıca;  $m_b$ ,  $s$  ve  $\alpha$  ise Hoek-Brown dayanım değıştirmeleridir ve bunların değerleri kaya kütlesinin niteliğine bağlı olarak, Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) yardımıyla ve görgül bağıntılarla hesaplanabilmektedir (Hoek ve Brown, 1997).



Şekil 3. Dinamik çözümlemelerde kullanılan sonlu farklar ağı ve vizkoz sınır koşulları.

Sayısal çözümlemelerde;  $\sigma_{ci} = 75$  MPa,  $m_i = 10$  ve  $GSI = 60$  ( $m_b = 0,24 \cdot m_i$ ,  $s = 0,0117$  ve  $\alpha = 0,5$ ) değerleri kullanılmıştır. Ayrıca, kırılmış kaya kütlelerine ait değerler olarak da  $m_r = 1$  ve  $s_r = 0,005$  alınmış, dilatasyon açısının sıfır olduğu varsayılmıştır.

#### 4.4 Sınır Koşulları ve Dinamik Yükleme

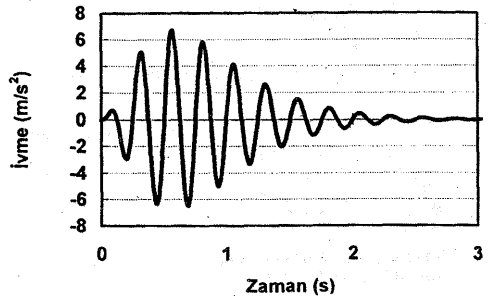
Açıklığın oluşturulduğu modelin sınır koşulu olarak yeraltı açıklıklarının dinamik çözümlemesinde kullanılabilecek, modelde dışa doğru yayılan dalgaların modelin içine yansımaya engel olan ve gerekli enerji yayılımına izin veren "viskoz sınır koşulu" seçilmiştir. Bu sınır koşulu model içine yayılan dalgaların model sınırından geri dönmesini (yansımaları) en aza indirmektedir. Şekil 3'te dinamik çözümlemelerde kullanılan sonlu farklar ağı (mesh) ve vizkoz sınır koşulları gösterilmiştir.

Deprem mühendisliğinde, arazinin en büyük ivme değeri önemli bir girdi değişirgesidir. Bu çalışmadaki dinamik yüklemelerde; artan-azalan genlikli sinüs işlevi şeklindeki bir arazi ivme değişimi, oluşturulan modelin tabanına

uygulanmıştır. Bu dalga şekli aşağıda verilen bağıntı ile elde edilmektedir (Itasca, 1995).

$$a = \sqrt{\beta e^{-\alpha t}} \cdot t^\gamma \sin(2\pi f t) \quad (3)$$

Burada;  $a$ , arazi ivmesi;  $f$ , dalga frekansı;  $t$ , zaman;  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\gamma$  ise dalga şeklini etkileyen değişirgelerdir. Dalga şekli Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Dinamik çözümlemelerde modele uygulanan dalga şekli.

Dalga'nın model içinde doğru yayılabilmesi için; en büyük sonlu farklar ağı boyutunun 8 - 10 katı kadarlık bir dalga boyu ile hesaplanacak frekansın (örneğin;  $f = C_s / \lambda = 0.1 C_s / \Delta t$ ;  $\lambda$  = dalga boyu,  $\Delta t$  = ağ boyutu), girdi dalgasının frekansından büyük olması gerektiği belirtilmektedir.

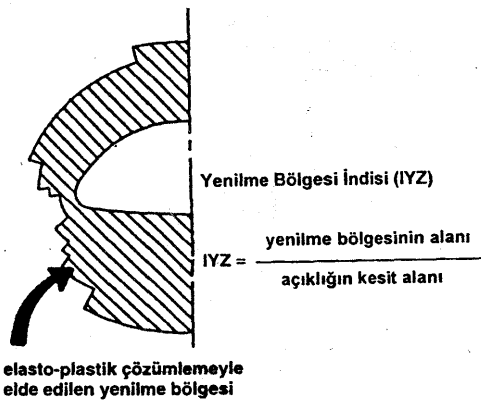
Modelde dinamik girdinin uygulandığı sınır hem x-doğrultusunda (yatay) hem de y-doğrultusunda (düşey) otomatik olarak sabitlenmektedir. Bu, modelin dönmesini (rijit cisim hareketini) engellemektedir.

#### 4.5 Duraylılığın Karşılaştırılması

Hem statik hem de dinamik yüklemeler sonucunda açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgelerinin büyüklüklerini karşılaştırmada, bu amaçla geliştirilmiş basit bir indis kullanılmıştır. Yeraltı açıklığı çevresindeki yenilme bölgesi alanının açıklığın kesit alanına oranı "yenilme bölgesi indisi" (IYZ) olarak tanımlanmıştır (Gerçek ve Geniş, 1999) (Şekil 5).

### 5. DİNAMİK ÇÖZÜMLELER

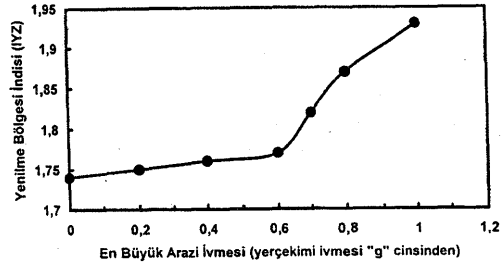
Çalışmada, önce bir statik çözümleme yapılmış ve açıklık çevresindeki yenilme bölgesi belirlenerek,  $(IYZ)_{statik} = 1,74$  değeri hesaplanmıştır. Daha sonra, çeşitli girdi değişirgeleri kullanılarak dinamik çözümlemeler yapılmış ve her bir durum için ayrı ayrı  $(IYZ)_{dyn}$  değerleri hesaplanmıştır. Sonra, statik ve dinamik çözümlemelerden elde edilen IYZ değerleri karşılaştırılarak, dinamik girdilerin duraylılığı ne şekilde etkilediği irdelenmiştir.



Şekil 5. Yenilme bölgesi indisinin tanımlanması.

### 5.1 En Büyük Arazi İvmesinin Etkisi

Önce, en büyük arazi ivmesindeki ( $a_{max}$ ) değişimin, yeraltı açıklığının duraylılığını ne yönde değiştirdiği incelenmiştir. Dalga frekansı aynı ( $f = 4$  Hz) kalmak koşuluyla,  $a_{max}$  değerleri değiştirilmiştir. Bir S dalgası, yukarıya doğru yayılacak şekilde, modelin tabanına uygulanmıştır. Söz konusu yüklem arazide yatay titreşime neden olmuştur. En büyük ivme değerinin artışı ile açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesinin büyüklüğü de artmıştır. Şekil 6'da  $a_{max}$  değişiminin IYZ değerleri üzerine etkisi sunulmuştur. Şekle göre;  $a_{max} \leq 0,6g$  olduğu zaman, yenilme bölgesindeki değişim (artış) en az seviyede kalmıştır; ancak,  $a_{max} > 0,6g$  olduğu zaman IYZ de hızla artmaktadır.



Şekil 6. En büyük arazi ivmesindeki değişimin yenilme bölgesi büyüklüğüne etkisi.

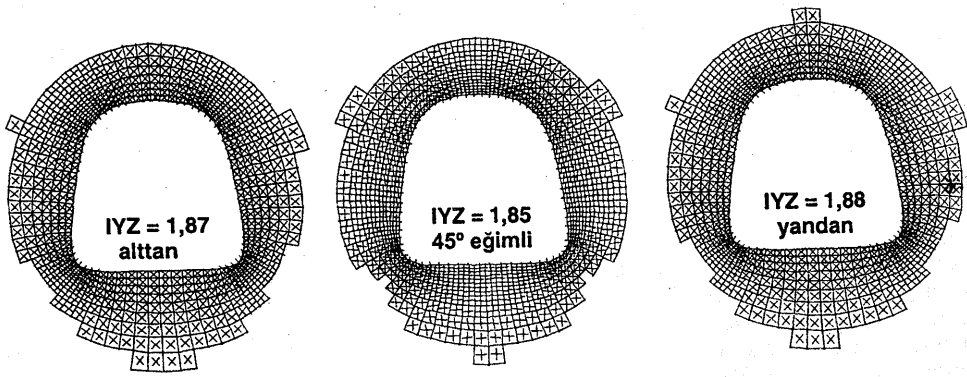
### 4.3 Dalga Yayılma Yönünün Etkisi

Sonra, en büyük arazi ivmesi ve frekans aynı kalmak koşuluyla ( $a_{max} = 0,7g$  ve  $f = 4$ ), sismik dalga'nın yayılma yönünün etkisini araştırmak için yeraltı açıklığına

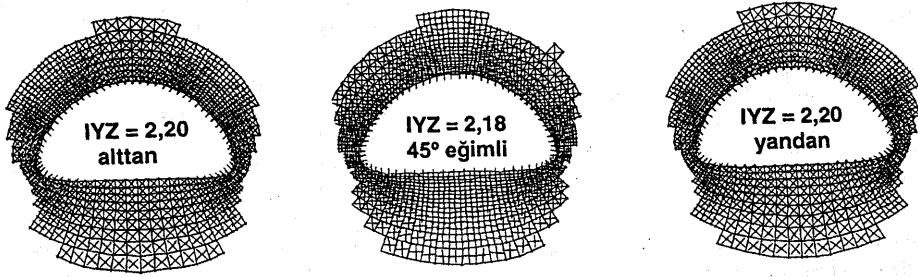
- yalnızca alttan,
- aşağıda yukarıya doğru  $45^\circ$  eğimle ve
- yalnızca yandan

dalga yayılmaları uygulanmıştır.

Dalga yayılma yönünün değişmesi, açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi geometrisi üzerinde ve IYZ değerlerinde önemli bir farklılık oluşturmamıştır (Şekil 7.a). Bu durumun açıklığın eksenler oranının  $W/H = 1$  olmasıyla ilgili olabileceği düşünüldükçe,  $W/H = 2$  olan yine kemer tavanlı bir açıklık için çözümlemeler yinelenmiştir. Ancak, IYZ değerleri  $W/H = 1$  durumuna göre artmışsa da,  $W/H = 2$  olan açıklıkta bile dalga yayılma yönünün önemli bir etkisi gözlenmemiştir (Şekil 7.b).

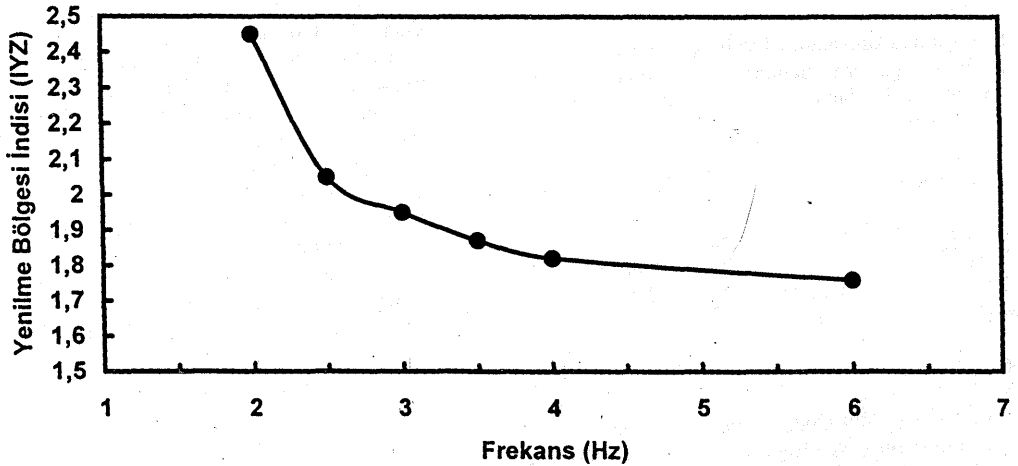


a. Genişlik/yükseklik oranı  $W/H = 1$  olan açıklıklar



b. Genişlik/yükseklik oranı  $W/H = 2$  olan açıklıklar

Şekil 7. Dalga yayılma doğrultusunun yenilme bölgesinin geometrisine etkisi ( $a_{\max} = 0,7g$  ve  $f = 4$ ).



Şekil 8. Dalga frekansı değişiminin yenilme bölgesinin büyüklüğüne (IYZ değerlerine) etkisi.

### 4.3 Dalga Frekansının Etkisi

Son olarak da, en büyük ivme değeri ( $a_{max} = 0,7g$ ) aynı kalmak koşuluyla, frekans değerleri değiştirilmiştir. Dalga modelin tabanına uygulanmıştır. Dalga frekansının azaldığı durumlarda, açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesinin büyüklüğü (IYZ değerleri) artmıştır. Çünkü aynı ivme değerinde, frekansın azalması, arazinin yer değiştirme miktarını artırmaktadır. Bu nedenle dalga frekansının azalması açıklık çevresinde yenilme bölgesinin artmasına neden olmuştur. Frekans arttıkça, (IYZ)<sub>dyn</sub> değeri (IYZ)<sub>statik</sub> değerine yakınsamaktadır. Dalga frekansı değişiminin IYZ değerlerine etkisi Şekil 8'de gösterilmiştir.

### 5. SONUÇLAR

İncelenen birincil gerilme durumu, kaya kütleli niteliği ve açıklık geometrisine göre elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Beklendiği gibi, arazideki en büyük ivme değerinin artması açıklık çevresindeki yenilme bölgesini büyültmüştür.
- Yalnızca alttan, aşağıdan 45° eğimle ve yalnızca yandan etkiyen dalga yayılma doğrultularında, yenilme bölgesinin geometrisi önemli derecede değişmemiştir.
- En büyük ivme değeri değişmemek koşuluyla, dalga frekansı arttıkça yenilme bölgesi küçülmemekte ve statik çözümden elde edilen yenilme bölgesine yakınsamaktadır.

Söz konusu çalışmanın farklı açıklık geometrileri ve birincil gerilme alanlarını da içerecek şekilde genişletilmesi daha anlamlı bulguları ortaya çıkaracaktır.

### TEŞEKKÜR

Yazarlar, dinamik çözümlemelerin yapılmasında FLAC<sup>2D</sup> programının kullanılmasına olanak veren ODTÜ Maden Mühendisliği Bölümü Başkanlığı'na teşekkürü bir borç bilir.

### KAYNAKLAR

Adhya, K.K. 1989 Underground structures through seismic zones. *Underground Structures: Design and Instrumentation*. Developments in Geotechnical Engineering 59A, Elsevier, Amsterdam.

- Bolt, B.A. 1976 *Nuclear Explosions and Earthquakes: The Parted Veil*, Freeman, San Francisco.
- Brady, B.H.G. 1993 Dynamic behaviour of rock. *Comprehensive Rock Engineering*, Vol.1. Fundamentals, Pergamon, London: 611-624.
- Brady, B.H.G. and Brown, E.T. 1993 *Rock Mechanics for Underground Mining*. Chapman and Hall, London.
- Dowding, C.H. and Rozen, A. 1978 Damage to rock tunnels from earthquake shaking. *ASCE J. of Geotech. Eng. Div.* 104 (GT2): 175-191.
- Erlingsson, S. 1997 Seismic design of subsea tunnels. *Proc. Int. Symp. on Rock Support - Applied Solutions for Underground Structures*, Lillehammer: 804-811.
- Gerçek, H. 1997 An elastic solution for stresses around tunnels with conventional shapes. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* 34 (3-4): paper no. 096.
- Gerçek, H. and Geniş, M. 1999 Effect of anisotropic in situ stresses on the stability of underground openings. *Proc. of the Ninth Intl. Congress on Rock Mechanics, ISRM*, Balkema, Rotterdam, 1: 367-370.
- Hoek, E. and Brown, E.T. 1997 Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* 34 (8): 1165-1186.
- Itasca 1995 *FLAC-Fast Lagrangian Analysis of Continua (Version 3.30)*. Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis.
- John, C.M. and Zahrah, T.F. 1987 Aseismic design of underground structures. *Tunnelling and Underground Space Tech.*, 2 (2): 165-197.
- McGarr, A., Green, R.W.E. and Spottiswoode, S.M. 1981 Strong ground motion of mine tremors: some implications for near-source ground motion parameters. *Bull. Seis. Soc. America*, 71 (1): 295-319.
- Owen, G.N. and Scholl, R.G. 1981 Earthquake engineering of large underground structures. FHNA / ro-80, 195, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C.: 171-174.
- Stevens, P.R. 1977 *Review of Effects of Earthquakes on Underground Mines*. US Geological Survey, Open File Report: 77-313.

## GEOMETRİK TASARIM DEĞİŞTİRGELERİNİN YERALTI AÇIKLIKLARININ DURAYLILIĞINA ETKİSİ

### EFFECT OF GEOMETRICAL DESIGN PARAMETERS ON THE STABILITY OF UNDERGROUND OPENINGS

H. GERÇEK ve M. GENİŞ

Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, ZONGULDAK

**ÖZET:** Bu bildiride, bazı geometrik tasarım değişitirgelerinin (şekil, genişlik/yükseklik oranı ve konum gibi) yeraltı açıklıklarının duraylılığına etkileri araştırılmıştır. Çalışmada; elips, ovaloid, kemer tavanlı ve dikdörtgen kesitli açıklık şekilleri ve her bir açıklık şekli için de yedi farklı genişlik/yükseklik oranı değeri göz önünde bulundurulmuştur. Ortamdaki asal birincil gerilmelerin açıklığa göre düşey, yatay ve eksenel doğrultularda etkidiği varsayılarak, düzlem birim şekil değiştirme çözümlemelerine olanak tanınmıştır. Her bir asal birincil gerilmenin sırasıyla en büyük, ortanca ve en küçük değerler aldığı, birbirine eşdeğer altı farklı birincil gerilme kombinasyonu için sayısal gerilme çözümlemeleri yapılmıştır. Bir açıklık çevresindeki ikincil gerilmelerin yol açtığı duraysızlık potansiyeli, elasto-plastik gerilme çözümlemesine olanak veren FLAC<sup>2D</sup> programı kullanılarak belirlenmiştir. Verilen bir birincil gerilme alanı için uygun açıklık geometrisinin ve olumlu konumun belirlenmesinde, açıklıklar çevresinde oluşan yenilme bölgelerinin bağlı büyüklükleri karşılaştırılmıştır.

**ABSTRACT:** In this paper, the effects of some geometrical design parameters (i.e. shape, width-to-height ratio and orientation) on the stability of underground openings have been studied. In the study; elliptical, ovaloidal, arched-roof and rectangular opening shapes and, for each shape, seven different width-to-height ratios have been considered. It has been possible to carry out plane-strain analyses by assuming that the principal components of the in situ stress field act in vertical, horizontal and axial directions with respect to the opening. Numerical stress analyses have been carried out for six different but equivalent in situ stress fields, in which every principal component assumes the maximum, intermediate and minimum values, respectively. The instability potential caused by stresses occurring around an opening has been determined by FLAC<sup>2D</sup> program, which allows elasto-plastic stress analysis. The relative sizes of yield zones occurring around the openings have been compared for the determination of appropriate opening geometry and favorable orientation for a given in situ stress field.

#### 1. GİRİŞ

Yeraltı açıklıkları çevresinde oluşan yüksek ikincil gerilmelerin neden olduğu yenilmeler; kaya kütlelerinin mekanik özelliklerine, ortamdaki birincil gerilmelere, açıklık şekline ve konumuna bağlıdır. Tasarımcı çoğu zaman bunlardan ilk ikisini olduğu gibi kabullenmek zorundadır. Eğer açıklık şekli ve konumu mühendislik sınırlandırmaları arasında değilse, tasarımcının bunlarda pratik ve ekonomik açıdan mümkün olan değişiklikleri yaparak yenilmeleri en düşük seviyede tutması beklenir.

Günümüzde, kaya mekanikçilerin bu amaçla kullandığı mühendislik araçları arasında, sayısal gerilme çözümlemeleri en başta gelmektedir.

Bilindiği gibi, sayısal gerilme çözümlemelerinin en yararlı yönlerinden biri de ikincil gerilmelerden kaynaklanan yenilmelerin kestirimi, kontrol edilmesi ve mümkünse de önlenmesi için tasarımcılara büyük bir olanak sağlamasıdır. Bu amaçla yapılan değiştirgesel (parametrik) çalışmalarda, çeşitli girdi varsayımlarının kabul edilebilir en büyük aralıkta değişimleri ve bunların çözümleme sonuçlarına etkileri belirlenir. Bu şekilde, olası çözümlerin de bir

aralığı (özellikle alt ve üst sınırları) elde edilerek, tasarımı ilgili karar verme aşamasında yardımcı olacak pratik bilgiler sağlanır. Bu şekilde yapılan çok sayıdaki çalışma sayesinde, yeraltı açıklıklarının tasarımı için önemli bilgiler ve değerli bulgular elde edilmiştir.

Örneğin; Gerçek ve Geniş (1998, 1999), yönlere bağlı birincil gerilme alanında açılan, genişlik/yükseklik oranı 1'den büyük ve küçük olan iki farklı kemer tavanlı tünelde en uygun konumlandırmanın araştırılması için bir dizi değiştirgesel çözümleme yapmıştır. En uygun konumun belirlenmesinde, düşey birincil gerilmenin en küçük ya da en büyük olmasına göre farklı bulgular elde edilmiştir. Düşey birincil gerilme en küçük bileşen olduğu zaman, tünelin büyük olan yatay birincil gerilmeye paralel olarak konumlandırılmasının daha olumlu bir yaklaşım olduğu görülmüştür. Bu bulgu, ilgili yayınlarda rapor edilen önerilerle ve yaklaşımlarla uyum göstermektedir. Daha ilginç olan bulgu ise; düşey birincil gerilmenin en büyük bileşen olduğu zaman, tünelin tam tersi (büyük olan yatay birincil gerilmeye dik) doğrultuda konumlandırılması gerektiğidir. Ancak, yukarıda sözü edilen bulguların diğer açıklık şekillerinde ve farklı genişlik/yükseklik oranlarında da geçerli olup olmadığı kesin olarak ortaya konmamıştır.

Bu çalışmada, şekil ve konum gibi iki önemli tasarım seçeneğinin yeraltı açıklıklarının duraylılıklarına etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, çeşitli birincil gerilme alanlarında açılan, farklı kesitlerdeki ve değişik genişlik/yükseklik oranlarındaki açıklıkların sayısal gerilme çözümlemeleri yapılmış, bunların çevresinde oluşan yenilme bölgeleri karşılaştırılarak, en uygun geometriler ve konumlar belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çerçevede, ilk olarak, çalışmada izlenen yaklaşım özetlenmiş; sonra, yapılan çözümlemelerin sonuçları sunulmuş ve bulgular tartışılmıştır.

## 2. ÇALIŞMADA İZLENEN YAKLAŞIM

Bu bölümde, çalışmada izlenen yaklaşım açıklanmıştır. Bu bağlamda; önce, göz önünde bulundurulmuş yeraltı açıklığı geometrileri hakkında bilgiler verilmiştir; sonra, çözümleme yapılan birincil gerilme durumları anlatılmış ve açıklığı çevreleyen kaya kütesinin dayanımıyla ilgili varsayımlar belirtilmiştir. Daha sonra da duraysızlıkların değerlendirilmesinde ve karşılaştırılmasında yararlanılan bir indis tanıtılmıştır.

### 2.1 Açıklık Geometrileri

Açıklık geometrileri açısından iki önemli özellik değiştirge olarak seçilmiştir: açıklık kesit şekli ve genişlik/yükseklik oranı.

#### 2.1.1 Kesit Şekilleri

Çalışmada, açıklık kesiti olarak dört farklı şekil göz önünde bulundurulmuştur. Bunlar:

- elips,
- ovaloid,
- kemer tavanlı ve
- dikdörtgen

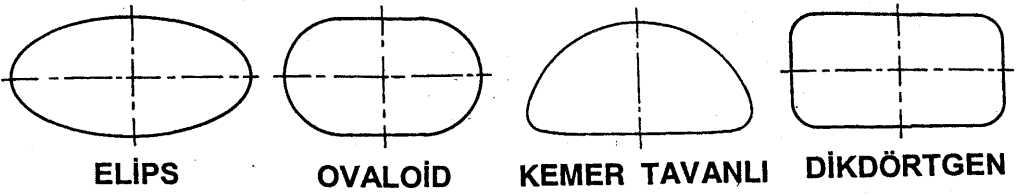
kesitlerdir (Şekil 1). Bu kesitlerden, yalnızca düşey simetri eksenini olan kemer tavanlı şekil hariç, diğerlerinde iki adet (yatay ve düşey) simetri eksenini vardır. İncelenen kesitlere göre pratik bir şekilde sonlu farklar ağı elde edebilmek için, çözümlemelerde kullanılan FLAC<sup>2D</sup> programındaki mevcut "Fish" işlevlerinde Gerçek (1988, 1993, 1997) tarafından geliştirilen özel bağlantılar kullanılmıştır. Bu sayede açıklık geometrisiyle uyumlu olan sonlu farklar ağıları elde edilmiştir.

#### 2.1.2 Genişlik/Yükseklik Oranı

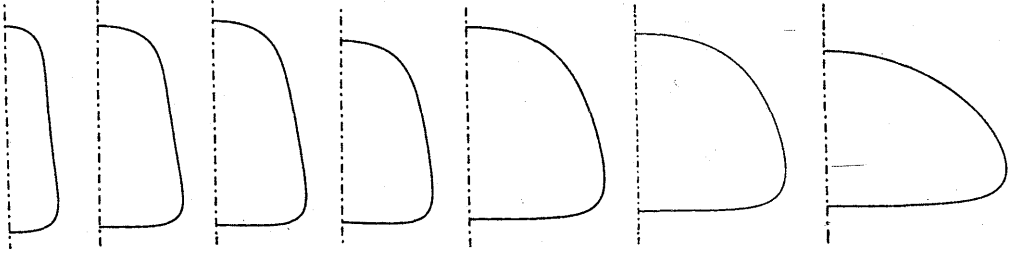
Göz önünde bulundurulmuş kesit şekillerinden her biri için yedi ayrı genişlik/ yükseklik (W/H) oranına göre çözümleme yapılmıştır. Bunlar: W/H = 0,4; 0,6; 0,8; 1; 1,25; 1,67 ve 2,5'tir. Örnek olarak, kemer tavanlı kesitlerin W/H oranlarıyla değişimi Şekil 2'de gösterilmiştir. Dikkat edilirse, W/H < 1 olan değerlerin W/H > 1 olan değerlerin tersleri olduğu görülebilir. Bu şekilde, hem yatay hem de düşey eksene göre simetri gösteren açıklık kesitlerindeki çözümleme sayısı azaltılabilmektedir.

### 2.2 Birincil Gerilme Alanı ve Konumlandırma

Bu çalışmada, yeraltı açıklığının oluşturulduğu bölgedeki asal birincil gerilmelerden birinin düşey konumda (Pv), diğerlerinin de yatay konumlarda olduğu ve hepsinin de birbirlerinden farklı büyüklükte bulunduğu varsayılmıştır. Çeşitli Pv seviyelerinde, yeraltı açıklığının uzun ekseninin yatay birincil gerilmelerden büyüğüne paralel ve dik olduğu konumlar karşılaştırılmıştır. Açıklığın uzun ekseninin yatay birincil gerilmelerden birine paralel olması, düzlem birim şekil değiştirme (plane strain) çözümlemelerine olanak sağlamıştır. Açıklığın uzun eksenine paralel olan yatay gerilme bileşenine ekşenel birincil gerilme (Pz) adı verilmiştir (Şekil 3).



Şekil 1. Göz önünde bulundurulmuş açıklık kesit şekilleri.

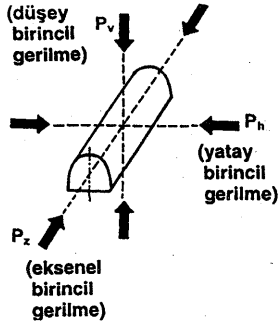


Şekil 2. İncelenen genişlik/yükseklik oranlarının kemer tavanlı kesitlerde görünümü (soldan sağa W/H = 0,4; 0,6; 0,8; 1; 1,25; 1,67 ve 2,5).

Açıklığın düşey simetri, eksenine dik konumdaki üçüncü asal bileşen de yatay birincil gerilme ( $P_h$ ) olarak tanımlanmıştır.

Ayrıca, asal birincil gerilmeler büyüklük sırasına göre,

- en büyük asal birincil gerilme:  $P_1 = 3P$ ,
  - ortanca asal birincil gerilme:  $P_2 = 2P$  ve
  - en küçük asal birincil gerilme:  $P_3 = P$
- olarak tanımlanmıştır. Buradaki  $P$  yalnızca bir gerilme ölçeği katsayısıdır.



Şekil 3. Asal birincil gerilme bileşenlerinin tanımlanması.

Buna göre, konum ve büyüklük açısından altı farklı birincil gerilme durumu söz konusu olmuştur. Düşey birincil gerilme ( $P_v$ ); bunlardan ikisinde en küçük ( $P_v = P_3$ ), ikisinde ortanca ( $P_v = P_2$ ) ve ikisinde de en büyük ( $P_v = P_1$ ) bileşendir. Burada vurgulanması gereken önemli bir husus, bu birincil gerilme durumlarının eşyönlü (izotropik) bir kaya kütesine ait yenilme yüzeyine göre eşdeğer noktalarda bulunduğudır. Başka bir deyişle; birincil gerilme noktaları asal gerilmeler uzayında aynı oktahedral düzlem üzerindedirler (Eşitlik 1.a), hidrostatik gerilme ekseninden eşit uzaklıktadırlar (Eşitlik 1.b) ve saf kesme durumunu temsil ederler (Eşitlik 1.c). Bu durumda, şu bağantılar yazılabilir:

$$I_1 = P_v + P_h + P_z = 6P \quad (1.a)$$

$$J_2^{1/2} = \{[(P_v - P_h)^2 + (P_h - P_z)^2 + (P_z - P_v)^2]/6\}^{1/2} = P \quad (1.b)$$

$$\theta = \{\arcsin [-1,5 J_3 (3/J_2^3)^{1/2}]\} / 3 = 0 \quad (1.c)$$

Burada;  $I_1$  = gerilme gereyinin (tansörünün) birinci değişmezi,  $J_2$  ve  $J_3$  = sapırtıcı gerilme gereyinin sırasıyla ikinci ve üçüncü değişmezleri ve  $\theta$  = Lode açısıdır.

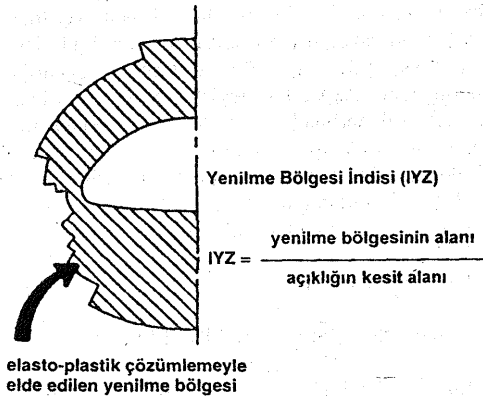
## 2.3 Kaya Kütlesinin Özellikleri ve Dayanımı

Açıklığı çevreleyen kaya kütlesinin, elasto-plastik olarak davrandığı ve dayanımının Hoek-Brown görgül yenilme ölçütü ile tanımlandığı varsayılmıştır. Çözümlemelerde, cisim kuvvetleri ihmal edilerek düzlem birim şekil değiştirme durumları göz önünde bulundurulduğu için ortamın Young modülünün gerilme dağılımları üzerinde bir etkisi olmamıştır. Açıklık çevresindeki eksenel ikincil gerilmelerin hesaplanmasında kullanılan Poisson oranı da  $\nu = 0,25$  alınmıştır. Hoek-Brown görgül yenilme ölçütü,

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} (m_b \sigma_3' / \sigma_{ci} + s)^a \quad (2)$$

bağıntısıyla verilmektedir (Hoek ve Brown, 1997). Burada;  $\sigma_1'$  ve  $\sigma_3'$ , yenilme anındaki (sırasıyla) en büyük ve en küçük asal etkin gerilmeler ve  $\sigma_{ci}$  de sağlam örneklerin (kaya malzemesinin) tek eksenli basınç dayanımıdır. Ayrıca;  $m_b$ ,  $s$  ve  $a$  ise Hoek-Brown dayanım değiştirgeleridir ve bunların değerleri kaya kütlesinin niteliğine bağlı olarak, Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) yardımıyla ve görgül bağıntılarla hesaplanabilmektedir (Hoek ve Brown, 1997).

Sayısal çözümlemelerde;  $\sigma_{ci} = 7,5P$ ,  $m_i = 10$  ve  $GSI = 60$  ( $m_b = 0,24$ ,  $m_i = 10$ ,  $s = 0,0117$  ve  $a = 0,5$ ) değerleri kullanılmıştır. Ayrıca, kırılmış kaya kütlesine ait değerler olarak da  $m_r = 1$  ve  $s_r = 0,005$  alınmış, dilatasyon açısının sıfır olduğu varsayılmıştır.



Şekil 4. Yenilme bölgesi indisinin tanımlanması (Gerçek ve Geniş, 1999; Gerçek vd., 2000).

## 2.4 Duraysızlıkların Değerlendirilmesi ve Karşılaştırılması

Elasto-plastik çözümlemelerde FLAC<sup>2D</sup> sonlu farklar bilgisayar programı (Itasca, 1995) kullanılmıştır. Açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgelerinin büyüklüklerinin karşılaştırılmasında, bu amaçla geliştirilmiş basit bir indisten yararlanılmıştır. Yeraltı açıklığı çevresindeki yenilme bölgesi alanının açıklığın kesit alanına oranı "yenilme bölgesi indisi" (IYZ: index of yield zone) olarak tanımlanmıştır (Gerçek ve Geniş, 1998, 1999) (Şekil 4). IYZ bir bakıma, yenilme bölgesinin bağlı büyüklüğünün bir ölçüsüdür.

## 3. ELASTOPLASTİK ÇÖZÜMLEMELER

Bu bölümde, yapılan elasto-plastik çözümlemenin sonuçları sunulmuş ve tartışılmıştır. Aslında; 4 farklı açıklık kesiti, 7 farklı W/H oranı ve 6 farklı birincil gerilme durumu için toplam olarak 168 çözümleme gerekirken; kesitsel simetri, uygun seçilen W/H oranı değerleri ve W/H = 1 olan elips ile ovaloidin dairesel açıklığı temsil etmeleri nedeniyle toplam 108 çözümleme yapılmıştır.

### 3.1 Çözümleme Sonuçları

Göz önünde bulundurulan birincil gerilme durumlarından her biri için, IYZ değerlerinin açıklığın W/H oranıyla değişimi, tüm açıklık şekillerini kapsamak üzere Şekil 5-7'de gösterilmiştir. Bu şekillerde; açıklığın uzun ekseninin yatay birincil gerilmelerden büyüğüne paralel olduğu durumlar üstte (a), dik olduğu durumlar da altta (b) verilmiştir.

Bu şekillerin incelenmesiyle ortaya çıkan en belirgin sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

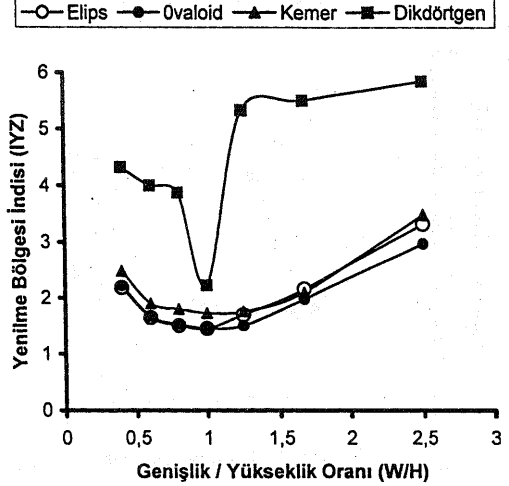
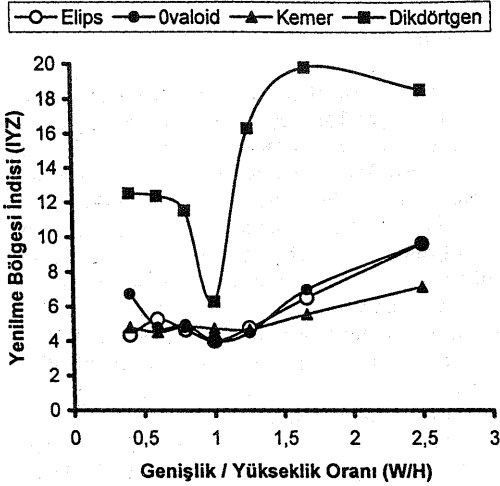
- İncelenen tüm açıklık şekilleri arasında, duraylılık açısından en kötü sonuçları dikdörtgen kesitli açıklıklar vermiştir. Bu geometrinin olumsuzluğunun nedeni, açıklığın köşelerinin (eğrilik yarıçapının küçük olduğu yerler) olmasından çok düz kenarlarının varlığıdır. Beklediği gibi, köşelerdeki yenilmeler dar bir bölgeyle sınırlı kalırken, düz kenarların (tavan, taban ve yan duvarlar) arkasındaki yenilme bölgeleri daha geniştir.
- Kemer tavanlı ve düz tabanlı kesitler, her zaman olmamakla birlikte, genellikle elips ya da ovaloid kesitlere göre biraz daha olumsuz bir duraylılık görüntüsü vermektedir.

- İncelenen tüm birincil gerilme koşullarında ve hemen hemen tüm açıklık şekillerinde, en uygun W/H oranı 1'dir.

- Daha önceki çalışmalarda rapor edilen iki önemli hususun, bu çalışmada incelenen tüm açıklık şekilleri için de geçerli olduğu doğrulanmıştır.

$P_v/P = 3; P_h/P = 1; P_z/P = 2$

$P_v/P = 2; P_h/P = 1; P_z/P = 3$

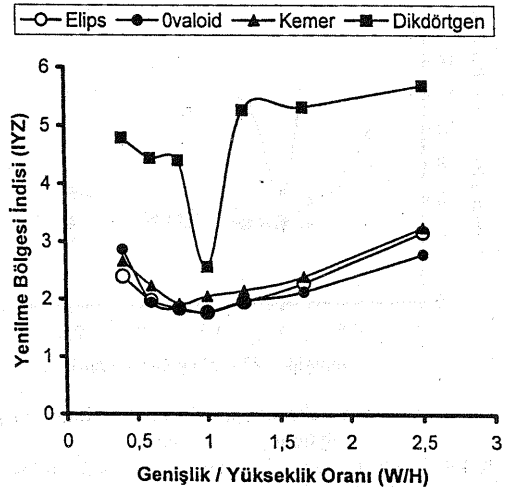
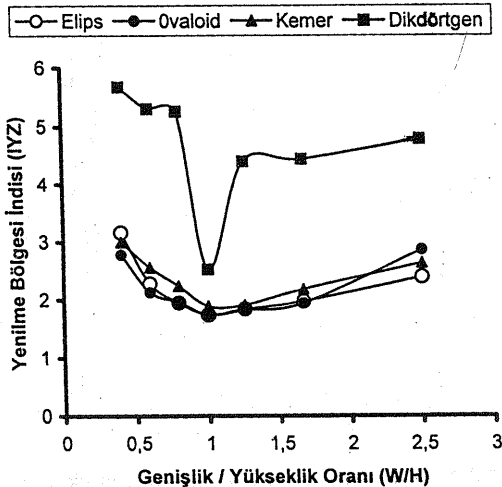


a. Açıklığın uzun eksen yatay birincil gerilmelerden büyüğüne paralel konumlu

a. Açıklığın uzun eksen yatay birincil gerilmelerden büyüğüne paralel konumlu

$P_v/P = 3; P_h/P = 2; P_z/P = 1$

$P_v/P = 2; P_h/P = 3; P_z/P = 1$



b. Açıklığın uzun eksen yatay birincil gerilmelerden büyüğüne dik konumlu

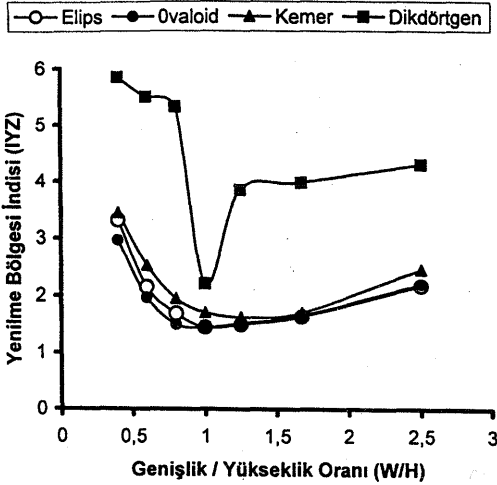
b. Açıklığın uzun eksen yatay birincil gerilmelerden büyüğüne dik konumlu

Şekil 5. Düşey birincil gerilme en büyük bileşen ( $P_v=P_1$ ) olduğu zaman, IYZ değerlerinin açıklığın W/H oranıyla değişimi.

Şekil 6. Düşey birincil gerilme ortanca bileşen ( $P_v=P_2$ ) olduğu zaman, IYZ değerlerinin açıklığın W/H oranıyla değişimi.

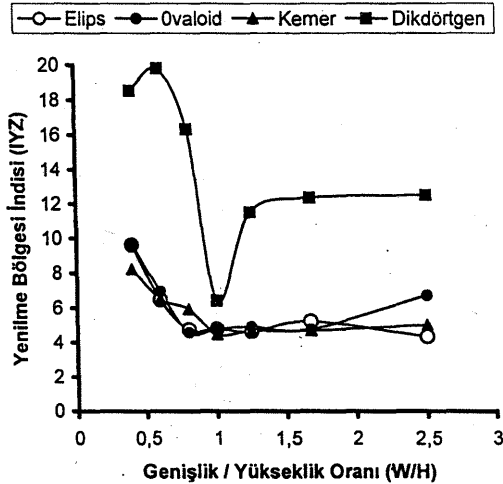
- Düşey birincil gerilme en büyük bileşen olduğu ( $P_v = P_1$ ) zaman, duraylılık açısından, açıklığı yatay birincil gerilmelerden büyüğüne dik olarak konumlandırmak gerekir (Şekil 5).

$P_v/P = 1$ ;  $P_h/P = 2$ ;  $P_z/P = 3$



a. Açıklığın uzun eksenini yatay birincil gerilmelerden büyüğüne paralel konumlu

$P_v/P = 1$ ;  $P_h/P = 3$ ;  $P_z/P = 2$



b. Açıklığın uzun eksenini yatay birincil gerilmelerden büyüğüne dik konumlu

Şekil 7. Düşey birincil gerilme en küçük bileşen ( $P_v = P_3$ ) olduğu zaman, IYZ değerlerinin açıklığın W/H oranıyla değişimi.

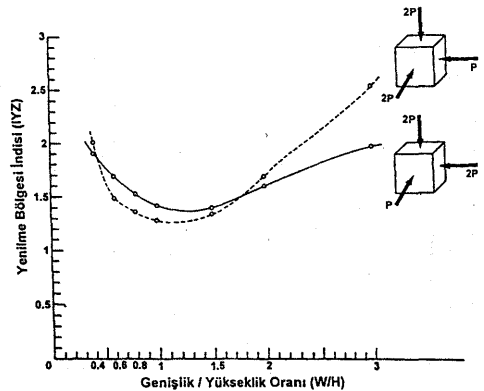
- Düşey gerilme asal birincil gerilmelerin ortancası olduğu ( $P_v = P_2$ ) zaman, en uygun konum açıklığın W/H oranına bağlıdır (Şekil 6).
- Düşey birincil gerilme en küçük bileşen olduğu ( $P_v = P_3$ ) zaman, duraylılık açısından, açıklığı yatay birincil gerilmelerden büyüğüne paralel olarak konumlandırmak gerekir (Şekil 8).

### 3.2 Tartışma

Bu çalışmada, birincil gerilmeler ve kaya kütlelerinin dayanımı o şekilde seçilmiştir ki: bütün kesit şekillerinde ve konumlarında, yeraltı açıklığını tamamen çevreleyen ve oldukça geniş olan yenilme bölgeleri elde edilmiştir. Bu yaklaşımla, IYZ değerlerinin belirlenmesinde ve duraysızlıkların karşılaştırılmasında kolaylık sağlanmıştır. Ancak, yenilme bölgesi kalınlığının daha az olması ya da açıklıklar çevresinde kısmi, yalnızca belirli kısımlarda, yenilmelerin olması durumlarında, bu bulguların ne derecede geçerli olacağı tartışılabilir. Bu nedenle, çalışma bu gibi durumları da kapsayacak şekilde genişletilmelidir.

Yukarıda açıklandığı gibi, çalışmada, birincil gerilmelerin asal bileşenleri birbirinden farklı olacak şekilde çözümlemeler yapılmıştır. En küçük bileşen en büyüğün üçte biri ve ortanca bileşenin de yarısı olarak alınmıştır. Bu nedenle, yukarıdaki bulguların daha farklı birincil gerilme koşullarında geçerli olup olmadığı da tartışmaya açıktır.

Nitekim, Gerçek vd. (2000) tarafından yapılan benzer bir çalışmada; asal bileşenlerden ikisinin eşit olduğu birincil gerilme alanlarında, kemer tavanlı açıklıklar için bir dizi elasto-plastik çözümleme yapılmıştır (Şekil 8). Söz konusu çözümlemelerde,



Şekil 8. Açıklığın uygun konumunun (düşük IYZ değerlerinin) açıklığın W/H oranından etkilenmesi örneği (Gerçek vd., 2000).

en büyük asal birincil gerilme, en küçüğün iki katı olarak alınmıştır. Düşey birincil gerilme, büyük asal gerilmelerden biri olduğu zaman, en uygun konumun biraz da açıklığın W/H oranına bağlı olduğu gözlenmiştir (Şekil 8).

## 5. SONUÇLAR

Bu bildiride, yeraltı açıklığının şekli ve konumu gibi iki önemli tasarım seçeneğinin ikincil gerilmelerden kaynaklanan duraysızlıklara etkisi incelenmiştir. Tüm asal bileşenlerin farklı olduğu bir birincil gerilme alanında açılan, değişik kesit şekilli ve çeşitli W/H oranlarındaki açıklıklar çevresinde oluşan yenilme bölgeleri karşılaştırılarak, en uygun geometriler ve konumlar belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan elasto-plastik çözümlemelere göre; bu tür duraysızlıklarda, uygun geometrinin ve konumun seçiminde göz önünde bulundurulması gereken en önemli unsurun ortamdaki birincil gerilme alanı olduğu bir defa daha ortaya çıkmıştır.

## KAYNAKLAR

- Gerçek, H. 1988 Calculation of elastic boundary stresses for rectangular underground openings. *Mining Science and Technology*, 7: 173-182.
- Gerçek, H. 1993 Qualitative prediction of failures around non-circular openings. *Proc. International Symposium on Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering* A.G. Paşamehmetoğlu et al. (eds.), A.A. Balkema, Rotterdam: 727-732.
- Gerçek, H. 1997 An elastic solution for stresses around tunnels with conventional shapes. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* 34 (3-4): paper no. 096.
- Gerçek, H. ve Geniş, M. 1998 Yönlere bağlı birincil gerilme alanının yeraltı açıklıklarının duraylılığına etkisi. 4. *Ulusal Kaya Mekaniği Semp. Bildiriler Kitabı*, T. Ünlü (ed.) TUKMD, Zonguldak: 147-158.
- Gerçek, H. and Geniş, M. 1999 Effect of anisotropic in situ stresses on the stability of underground openings. *Proc. of the Ninth Intl. Congress on Rock Mechanics*, G. Vouille and P. Berest (eds.), ISRM, A.A. Balkema, Rotterdam, 1: 367-370.
- Gerçek, H., Geniş, M. and Özarslan, A. 2000 Effect of transversely anisotropic in situ stresses on the stability of underground openings. *Proc. of the EUROCK 2000 Symposium*, DGGT (ed.), ISRM, Verlag Glückauf GmbH, Essen: 483-488.
- Hoek, E. and Brown, E.T. 1997 Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* 34 (8): 1165-1186.
- Itasca 1995 *FLAC - Fast Lagrangian Analysis of Continua (Version 3.30)*. Vols. I-IV, Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, Minnesota.



## YERALTI RADYOAKTİF ATIK DEPOLARININ TASARIMINI ETKİLEYEN KAYA MEKANİĞİ PARAMETRELERİ

### ROCK MECHANICS PARAMETERS EFFECTING THE DESIGN OF UNDERGROUND RADIOACTIVE WASTE REPOSITORIES

M.K. GÖKAY

Selçuk Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, KONYA

**ÖZET:** Yeraltında atıkların depolanması ve dikkat edilmesi gereken hususlar bu konuda çalışan araştırma enstitülerinin çalışma alanlarını oluşturmaktadır. Nükleer santrale sahip ülkeler kendi atıklarını saklamak zorunda oldukları için, bu konudaki bilgi eksikliğinin de farkına vararak araştırmaları yönlendirecek kurumlar kurmuşlardır. Yeraltında var olan veya yeni açılacak boşlukların atık deposu olarak kullanılması radyoaktif atıkların depolanmasında etkili bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Yeraltında, tehlikeli atıkların depolanması ve bu depoların tamamen yeryüzüyle ilişkilerinin kapatılması, bunların çok uzun süre insanları etkilemeden ve başlangıçtaki özellikleri bozulmadan ne kadar kalıp kalamayacakları ile ilgilidir. Radyoaktif atıklar içerdikleri radyoaktif izotoplara göre belirli zamanlarda ışın yayarak radyoaktiflikleri gittikçe azalacaktır. Bu atıkların radyoaktif özelliklerini tamamen kaybetmeleri bazı izotoplar için birkaç saat, bazıları için birkaç milyon yıl zaman almaktadır. Bu nedenle bu atıkların depolanacağı yerlerin seçiminde etkili olacak parametreler, araştırma kurumlarının üzerinde çalıştığı konular, özellikle Almanya ve İsveç örnekleri yerinde izlenerek dikkatle sıralanmıştır.

**ABSTRACT:** Underground waste repository design, determination of its advantages, and main design parameters are the main objectives of research centres studying on this subjects. In general countries which have nuclear power stations have their own research organisation on radioactive waste disposal which coordinates studies and collecting information on this subject which has very limited extend. Underground waste repository sites are effective and safe way of disposal with respect to other methods. After the disposal of radioactive wastes underground repositories are backfilled and sealed totally from the surface. Contamination in the waste container, seepage from it and then from the repositories depends on the mechanical condition of rock mass. Effectiveness of waste also depends on its isotopes. Some of them has a half life period only a couple of hours, some billions of years. Therefore site selection of underground waste repositories has several effective parameters which were searched at related countries' research centres. Especially the experience and the results of German and Sweden research centres were evaluated to list related parameters here in this study.

#### 1. GİRİŞ

Temel enerji kaynaklarını incelediğimiz zaman önümüze bilinen kaynaklar olarak; ısı, ışık, radyoaktivite, yerçekimi, manyetizma, kimyasal bileşikler, elektron akımı çıkmaktadır. Bunların kullanılması farklı güç çevrim santrallerinde elektrik enerjisine çevrilmeleriyle mümkün olmaktadır. Radyoaktif özellik temelde atom çekirdek yapısıyla ilgilidir, proton ve nötron sayısındaki farklılıklar elementleri etkilemektedir. Proton sayısı elementlerin cinsini belirlerken, çekirdekte bulunan aynı sayıdaki nötron çekirdek dengesi kararlı olan bir element oluşmasını sağlamaktadır. Bunun yanında evrende proton sayısı aynı fakat nötron

sayısı değişik elementler de bulunmaktadır. Bunların çekirdek yük dengeleri kararsız olduğu için her zaman kararlı duruma geçme eğilimi içindedirler. Radyoaktif enerji pratik olarak kararsız elementlerin kararlı duruma geçme aşamasında yaydıkları ısı ve ısıdır. Bu ısımlar alfa, beta ve gama parçacık yayımlarıdır. Bu parçacıkların canlı dokusuna girdiklerinde dokunun yapısını bozdukları bilinmektedir. Bu nedenle bu ısımlardan korunmak gereklidir. Genel olarak alfa parçacığı serbest halde birkaç santimetre uzağa anca gidebilmektedir. Bu parçacık bir kağıt engelde bile takılıp kalmaktadır. Beta parçacığını durdurmak için kağıt yetmemekte ama birkaç santimetrelilik bir tahta parçasını geçememektedir. Radyoaktif ısımlardan en

tehlikelisi gama ışıınımlı olup elektromanyetik özellikler gösterir. Bu nedenle etkisini uzun mesafelere iletebilmekte ve ancak birkaç santimetrelık beton duvarlar ancak durdurmaktadır. Bu radyoaktif ışıınımlar izotopların yarı-ömür denilen zamanlamalarında gerçekleşır ve her defasında radyoaktif izotopun yarısı bir sonraki denge durumundaki tamamen farklı izotopa dönüştür. Evrende birçok atomun yapısı kararlıdır örneğın,  $C^{12}$  izotopu çekirdeğindeki 12 proton ve 12 nötronla dengededir ve herhangi bir dış etki olmazsa sonsuza kadar  $C^{12}$  olarak kalır. Benzer şekilde  $O^{16}$  izotopu ve diğer bütün kararlı izotoplar aynı davranışı sergiler. Kararsız izotoplarda ise durum yarı-ömür kavramıyla açıklandığı gibi değışım halindedir. Bazı radyoaktif izotoplar ve bunların yarılanma ömürlerine örnek verilirse; Radon<sup>222</sup> (3,82 gün), İyot<sup>129</sup> ( $1,57 \times 10^7$  yıl), İyot<sup>131</sup> (8,04 gün), Radyum<sup>226</sup> (1600 yıl),  $C^{14}$  (5730 yıl),  $U^{235}$  ( $7,04 \times 10^8$  yıl),  $U^{238}$  ( $4,47 \times 10^9$  yıl) (EPA, 1998).

Yerkabuğunda doğal olarak radyoaktif özellik taşıyan izotoplar bulunmaktadır. Bunların kaynağı evrenin başlangıcından kalan izotoplar ve sonradan uzaydan gelenler olmak üzere ikiye ayrılır. Bunlara nükleer çalışmaların ilerlemesiyle insanların oluşturdukları izotopları da eklemek gereklidir. Dünyada doğal olarak radyasyon içeren kayaların içerisindeki önemli radyoaktif izotop serileri sıralanırsa,

- Uranyum serisi  $U^{238}$ ,  $U^{235}$  (sonunda  $Pb^{206}$  ve  $Pb^{205}$ )
- Toryum serisi  $Th^{232}$  (sonunda  $Pb^{208}$ )
- Potasyum serisi  $K^{40}$  (sonunda  $Ca^{40}$  ve  $Ar^{40}$ )

elde edilecektir. Bu izotopların yerkabuğundaki dağılımları Çizelge 1 de gösterilmiştir. Kayaçların mineralojik yapısı düşünüldüğünde,  $K^+$  nın kayaçların çoğunda yaygın bir şekilde bulunduğı görülecektir. Özellikle magmatik kayaçlarda  $K$  bulunma olasılığı çok yüksek olmaktadır. Buradaki kayaç oluşturan  $K$  elementinin çok küçük bir kısmı bile  $K^{40}$  izotopu olunca o kayaçta radyoaktivite belirlenmektedir. Çizelge 2 genel bazı maddelerdeki ve radyoaktif atıklardaki radyasyon seviyelerini özetlerken Çizelge 3 yapı malzemelerindeki radyasyon seviye ortalamalarını göstermektedir. Görüleceğı gibi belirli dozda radyasyon insanların

kendisinde olmakla birlikte her tarafta bulunmaktadır.

Çizelge 1. Yerkabuğundaki ortalama uranyum, toryum and potasyum içeriğı. (Schön, 1996).

|                | U (ppm) | Th (ppm) | K (ppm) |
|----------------|---------|----------|---------|
| Dünyada (ort.) | 2.10    | 7.80     | 2.10    |
| Okyanus kabuğı | 0.64    | 2.80     | 0.87    |
| Kıta kabuğı    | 2.80    | 10.00    | 2.60    |

Çizelge 2. Bazı nesnelerin radyoaktivliğı, NCRP,1987).

|                                                                |                |
|----------------------------------------------------------------|----------------|
| 1 insan                                                        | 7 000 Bq       |
| 1 kg kahve                                                     | 1 000 Bq       |
| 1 kg süperfosfat gübre                                         | 5 000 Bq       |
| Avustralya'da 100 m <sup>2</sup> lik bir evin havası           | 3 000 Bq       |
| 1 ev yangın dedektörü                                          | 30 000 Bq      |
| Tıbbi analiz için radyoizotop                                  | 70 000 000 Bq  |
| Tıbbi tedavi için radyoizotop                                  | 100 000 000 Bq |
| 1 kg 50-senelik camlaştırılmış yüksek seviyeli radyoaktif atık | 10 000 000 Bq  |
| 1 fosforlu ÇIKIŞ işareti (1970'li yıllar)                      | 1 000 000 Bq   |
| 1 kg uranyum                                                   | 25 000 000 Bq  |
| 1 kg uranyum cevheri (Kanada % 15)                             | 25 000 000 Bq  |
| 1 kg uranyum cevheri (Avusturalya % 0.3)                       | 500 000 Bq     |
| 1 kg düşük seviyeli rad.atık                                   | 1 000 000 Bq   |
| 1 kg kömür külü                                                | 2 000 Bq       |
| 1 kg granit                                                    | 1 000 Bq       |

Çizelge 3. Yapı malzemelerindeki uranyum, toryum and potasyum konsantrasyonları, (NCRP, 1994).

|                   | U (ppm) | Th (ppm) | K (ppm) |
|-------------------|---------|----------|---------|
| Granit            | 4.7     | 2        | 4.0     |
| Kum, kumtaşı      | 0.45    | 1.7      | 1.4     |
| Çimento           | 3.4     | 5.1      | 0.8     |
| Kireçtaşı-çimento | 2.3     | 2.1      | 0.3     |
| Kum beton         | 0.8     | 2.1      | 1.3     |
| Kuru duvar panosu | 1.0     | 3        | 0.3     |
| Doğal alçı        | 1.1     | 1.8      | 0.5     |
| Alçı türünleri    | 13.7    | 16.1     | 0.02    |
| Ahşap (ağaç)      | -       | -        | 11.3    |
| Kil tuğlası       | 8.2     | 10.8     | 2.3     |

## 2. RADYOAKTİF ATIKLAR

Nükleer santraller radioizotopların parçalanması sonucu oluşan ısının elektrik enerjisine çevrildiği yerlerdir. Ortaya çıkan ısının fazla olması nedeniyle ürettikleri elektrik enerjisi de fazla olmaktadır. Nükleer santrallerin yakıt olarak kullandığı izotoplar incelendiğinde atık olarak karşımıza çıkacak reaksiyon sonrası izotopların ne olabileceği de anlaşılabilecektir. Uranyumla çalışan reaktörlerde doğal  $U^{238}$  kullanılamamaktadır. Öncelikle bu cevher  $U^{235}$  izotopuna zenginleştirilmekte ve daha sonra içinde % 3-4 oranında  $U^{235}$  olan yakıt peletleri haline getirilmektedir. Bunlar parmak kalınlığında ve birkaç cm boyundadır. Bunların birçoğu arka arkaya yerleştirilerek yakıt çubukları haline getirilmekte, birçok çubuk da bir araya getirilerek kümeler halinde santralin merkez bölümüne yerleştirilmektedir. Nötron bombardımanı ile zincirleme değişim tetiklendikten sonra reaksiyonun hızı kontrol çubukları yardımıyla ayarlanmaktadır. Belirli bir süre sonunda reaksiyonlardaki izotop değişim hızı orijinal yakıttan ortaya çıkan yeni izotoplar nedeniyle azalmaktadır. Bu nedenle kullanılan bu çubukların zamanla değiştirilmesi gerekmektedir. Reaktörden çıkarılan kullanılmış pelet çubuklarının içinde ortalama: % 1  $U^{235}$ , %1 Pu-izotopları, %5 torun ürünler ( $Pu^{238}$  (87,7 yıl),  $Pu^{239}$  (24100 yıl),  $Pu^{240}$  (86550 yıl),  $Pu^{241}$  (14,4 yıl),  $Pu^{242}$  (370000 yıl)) ve % 0,1 aktinitler ( $Am^{241}$ ,  $Am^{242}$ ,  $Am^{243}$ ,  $Cm^{243}$ ,  $Cm^{244}$ ,  $Cm^{245}$ ,  $Np^{237}$ , .....gibi) yer almaktadır (Jostons, 1997). Santralden çıkan çubukların içindeki kullanılmamış yakıtın  $U^{235}$  içeriğinin tekrar kazanılması ekonomik olduğu için bu çubuklar tekrar zenginleştirme tesislerine gönderilmektedir. Reaktörden çıkan kullanılmış yakıtın kendisi ve zenginleştirme tesisinde ayrılan ürün izotoplar yüksek seviyeli radyoaktif atıklar olarak depolanmak ve insanlardan uzak tutulmak zorundadır. Bunların yarılanma ömürleri incelenirse bu depolamanın binlerce yılı bulması gerekmektedir. Nükleer santrallerden çıkan atıklar içindeki radyasyon seviyelerine göre gruplara ayrılmaktadır (IAEA, 1994).

- Yüksek seviyeli,
- Orta seviyeli (kısa ömürlü, uzun ömürlü),
- Düşük seviyeli (kısa ömürlü, uzun ömürlü),
- Diğerleri (kontamine olmayanlar).

Bu seviye ayırımında dikkate alınan kontrol parametreleri, atıklardaki radyoaktivitenin ne kadar süreceği, radyoizotop içeriği ve atığın ısı yayma özelliğidir. Genel olarak radyoaktif atıkların kaynağı incelenirse bunlar;

- Uranyum cevheri maden zenginleştirme konsantratör atıkları, (*Radyoaktivite düşük-uzun ömürlü atık*),
- Nükleer santral içinde kullanılan ve kontamine olan elbiseler, temizlik malzemeleri v.s. (*Radyoaktivite düşük-kısa ömürlü atık*),
- Nükleer santral yakıt atığı (tekrar kazanılmaya sokulmadan atılacak), (*Yüksek seviyeli-uzun ömürlü atık*),
- Nükleer santral yakıt atığı (tekrar kazanılma işleminden sonra, atılacak olan kısım, (işleme tekniğine bağlı olarak), (*Yüksek-orta-düşük seviyeli-uzun ömürlü atıklar karışımı*),
- Yakıtı alınmış nükleer santral binasının sökülmesi, bina ve makine parçaları, (*Düşük ve orta seviyeli-kısa ve uzun ömürlü atıklar*),
- Her türlü tıbbi ve mühendislik uygulamalarında kullanılan izotoplar, (*Düşük ve orta seviyeli-kısa ve uzun ömürlü atıklar*).

Radyoaktif atıkların kontrol altında tutulması gerektiği yukarıdaki radyasyon seviyelerinden anlaşılmaktadır. İstanbul'da 1998 yılı içinde hurdacıların eline geçen tıbbi radyoaktif atıkların yol açtığı felaket düşünüldüğünde aşağıda verilen ve bu atıkların kontrol altında tutulma nedenleri anlaşılabilmektedir.

- İnsan sağlığı ve çevresini korumak,
- Ulusal sınırlar dışını etkilememek,
- Gelecek nesillerin sağlığını korumak,
- Gelecek nesillere iş ve zorluk bırakmamak,
- Yasal zorunluluk,
- Radyoaktif atık üretiminin ve bertarafının organizasyonu,

Bu konularda dikkat edilecek faktörler ise; radyasyon dozajı ve kontaminasyon riski, bilinmeyenler, belirsizlikler, zaman ve insan etkisi ve alınacak tedbirlerdir. Bütün faktörler düşünüldüğünde radyoaktif atık depolama veya bertaraf yöntemleri olarak aşağıdakiler sıralanabilir.

- Basit yüzey tesisleri,
- Özel olarak tasarlanmış yüzey tesisleri,
- Terkedilmiş maden ocakları,
- Özel hazırlanmış yeraltı tesisleri,
- Tektonik plaka dalım zonları,
- Derin deniz boşluklarına bırakma,
- Kalın buz tabakaları içine gömme,
- Uzaya/güneşe gönderme, (Han et al., 1997).

Bu yöntemler arasında pratikte uygulanan yeryüzündeki depolarda kontrol altında tutulması ve kontrolünün yapılması gereken faktörler ise şu şekilde sıralanabilir;

- İyi bir tektonik geçmiş ve duraylılığa sahip olmak,

- b) Tektonik olarak gelecek konusunda kaygı oluşturmamak,
- c) Hidrojeolojik şartların iyi bir şekilde tanımlanmış olması gerekmektedir,
- d) Drenajı iyi olması gereklidir,
- e) Yapının su içeren akiferlerden kil ve benzeri geçirimsiz tabakalarla ayrılmış olması gerekmektedir.

### 3. YERALTI RADYOAKTİF ATIK DEPOLARI

Bu depolama şekli diğerlerine göre farklı özelliklere sahip olması nedeniyle özel olarak incelenmiştir. Dünyadaki uygulamalarda özellikle fazla atığı olan ülkelerde tercih edilen ve üzerinde araştırma yapılan bir depolama şeklidir. Bu depolama şeklinin diğer yöntemlere göre avantajlarını sıralarsak:

- a) Tamamen pasif bir atık deposudur, doldurulduktan ve çıkışlar iyice kapatıldıktan sonra insan etkisi yok denecek kadar azdır.
- b) Yeraltına gömülen atıkla insanların arasında yüzlerce metrelik doğal bir bariyer oluşmaktadır.
- c) Farklı ve su geçirmeyen bir çok formasyon içinde depolama yeri açılabilir.
- d) Var olan maden boşluklarının madencilik ve inşaat mühendisliği uygulamalarıyla atık deposu olarak kullanılabilir hale getirmek mümkündür.
- e) Hidrojeolojik olarak atık deposunun içinde bulunduğu kaya formasyonu sızan sıvıları geçirmeyecek şekilde tasarlandığı için uzun yıllar güvnlüdür.

Bu atıklar tarafından kirlenen herhangi bir yeraltı su sızıntısı radyoaktif parçacıkları yeryüzüne çıkarma olasılığına sahiptir. Bu nedenle bu atık depolarına, depolamadan sonra uzun yıllar su sızıntısı olmayacağı mühendislik çalışmaları ile açıklığa kavuşturulmalıdır. Açıkta depolanması tehlikeli olan atıkların insanlardan uzak yerlerde depolanması fikrini ilk olarak sanayileşmiş ülkeler ortaya çıkarmıştır. Bu amaçla kullanılan yerlerin başında eski maden galerileri gelmektedir. Bu maden ocakları insanlardan uzak mekan gereksinimini karşılamaktadırlar. Bunun yanında atıklardan sızacak sıvıların veya atıklardan etkilenen yeraltı sularının çevreye yapabilecekleri etkileşimlerinin özellikle incelenmesi gerekmektedir.

Radyoaktif atıklar günümüzde kimyasal atıklar gibi dikkat edilmesi gereken atıklar sınıfındadır. Bu atıkların geliştiği güzel açık arazide depolanması ve orada insanlara zararlı olmayacakları zamana kadar

bekletilmeleri (etraflarında koruyucu bir bariyer olmadan depolanmaları), düşünülemeyecek bir depolama şeklidir. Bu atıklar etkileri bakımından az, orta ve yüksek derecede radyoaktivite içerebilmektedir. Özellikle yüksek dereceli atıklar ayrıca etraflarına 200°C dereceye varan ısı da yaymaktadırlar. Az ve orta derecede radyasyon içeren atıklar radyoaktif izotop kullanan bütün araçların parçalarını ve atıklarını içine almaktadır. Bunlar nükleer santrallerde kullanılan elbiseler, aletler, radyasyonla yapılan tıbbi tedavi aletlerinin atıkları, radyoaktif izotop kullanan mühendislik ölçü ve iş aletlerinin atıkları bu sınıfa girmektedir. Bunların örneğin Almanya için miktarı yılda 10000 tonu bulmaktadır. Bu atıkların normal şehir çöplerine karışması akla bile getirilmemesi gereken bir konudur. Bu atıkların hepsi, özel olarak toplanmalı ve tahribata dayanıklı variller içine konulmalıdır, (Han et al., 1997).

Radyoaktif atıklar gibi tehlikeli atıkların depoları yeryüzünde yapılırsa, bunlar insan yerleşim yerlerinden uzakta yapılırsa da hertürlü kontrollü veya kontrolsüz giriş çıkışa müsaittirler. Bu nedenle tehlikeli atıklar için bu gibi yerler, içinde yıllarca kalacakları son depolama yeri olarak görülmemektedir. Radyoaktif maddelerin yarılma yollarının çok uzun olması bunların gözden uzak ve etrafında iyi bir bariyerle çevrili yerlerde saklanması konusunu düşündürmüştür. Bu konuda düşünülen yerlerin birisi de yeraltı depolarıdır. Bu konuda en uygun jeolojik yapının ne olduğu konusunda yapılan araştırmalar ABD ve Avrupa'da 1960'lı yıllardan bu yana sürmektedir. Bu konuda en uygun yerin, depremlerden, sellerden uzak yerler ve içine ileriki binlerce yılda su almayacak ve eğer radyoaktif atıkların saklandığı varillerde herhangi bir nedenle (gerilme, sıkışma, biyolojik etkiler, çürüme v.s.) sızıntı olursa, bu sızıntıyı yeraltı sularından uzak tutacak yerler olması amaçlanmaktadır. Bu konuda Almanya kaya tuzlarında, İsveç ve İsviçre granitte, Fransa ve Belçika killi formasyonlarda, ABD tüflü yapılarda, bu formasyonlar içine kurdukları yeraltı araştırma laboratuvarları yoluyla yıllardır araştırma yapmaktadırlar. Bu bildiri, bu çalışmaların çoğunda ön plana çıkan kaya mekanığı problemlerinin ve ölçümlerinin neler olduğunu içermektedir. Bu laboratuvarların tecrübelerinin bir kısmının aktarıldığı bu çalışmada incelenen kaya mekanığı ve jeolojik parametreler özetlenmekte ve hangi parametrelerin diğerlerine göre daha önem kazandığı belirtilmektedir.

#### 4. YERALTI ATIK DEPOLARI TASARIMINI ETKİLEYEN PARAMETRELER

Yeraltındaki boşlukların tasarımını etkileyen parametreler genel olarak önceki bölümlerde sıralanmıştır. Bu bölümde tasarımı etkileyen kaya mekanığı parametreleri daha detaylı incelenmekte ve böyle bir tasarımda nelerin bilinmesi gerektiği inceleme detay seviyesine göre sıralanmaktadır. Çünkü bazı atıklar için son depolama yerı olarak seçilen yeraltı boşlukları uzun bir süre kendi kendini tutabilmelidir, bu özellik etraftaki diğer boşlukların duraylılığını da etkileyecektir. Göz önünde tutulması gereken parametreler, kalitatif karar verme sistemi kapsamında aşağıda sıralanmıştır. Karar parametreleri P1-P5 ana kodlarla verildikten sonra bu parametreleri etkileyen alt faktörler P1ii-P5ii şeklinde kodlanarak alt bölümlere ayrılmıştır. Burada problem tımdengelim tekniğı içinde incelenmektedir. Öncelikle ana parametreler sıralanmakta sonra bunların detayı incelenmektedir. Aşağıda verilen parametreler yeraltı nükleer atık deposu olarak hazırlanan ve şu anda araştırma amacıyla birçok deneyin yapıldığı İsveç'deki Aspö yeraltı nükleer atık deposu raporları (SKI, 1996) ve çalışmaları yerinde incelenerek hazırlanmıştır.

##### Seviye-1:

###### EĞER

- P1. Jeolojik yapı olumlu,
- P2. Mekanik duraylılık sonuçları olumlu,
- P3. Yeraltı su durumu olumlu,
- P4. Hidrokimyasal sonuçlar olumlu,
- P5. Suya geçmiş maddelerin taşınma risk çalışmaları olumlu,

###### İSE

Karar: Aspö'de hazırlanmakta olan atık depo boşluğu ve galerileri duraylıdır, Yasalarda belirtilen süre (en az 10000 yıl) içinde canlıların kullandığı biyosfere beklenen bir sızıntı olmayacaktır.

##### Seviye-2

- P11. Litolojik birimler,
- P12. Süreksizlik yoğunluğu,
- P13. Kimyasal içerik,

- P21. Kaya kütlesi dayanımı,
- P22. Kazı boşluğu duraylılığı,
- P23. Kaya patlaması riski / durumu,

- P31. Hidrolik geçirgen birimler,
- P32. Hidrolik kaya kütlesi birim özellikleri,
- P33. Hidrolik durumu açıklayan eşitlikler,

- P41. Farklı kaynaktan suların karışımı,
- P42. Yeraltı suyu-kayaç ilişkisi (etkileşimi),

- P51. Adveksiyon (iyonik çekim gücü) parametreleri (adveksiyon ve hidrodinamik karışım),
- P52. Yayılma (difüzyon) parametreleri,
- P53. Dağılma (dispersiyon) parametreleri,
- P54. Elementlerin taşınması,

##### Seviye-3:

- P111. Yerel kaya kütlesi özellikleri, (Smöland graniti, Aspö dioriti, Greenstone ve ince taneli granitler)

- P121. Önemli süreksizlik zonları,
- P122. İkinci derece önemli süreksizlik zonları,
- P123. Küçük ölçekli kırılmalar-süreksizlikler,

- P131. Mineralojik içerik,
- P132. Alterasyonlar (özellikleri),
- P133. Petrofiziksel özellikler,

- P211. Elastik modülü,
- P212. Poisson oranı,
- P213. Çekme dayanımı,
- P214. Tek eksenli basma dayanımı,
- P215. Makaslama dayanım ilişkisi ( $\tau$ - $\sigma$ ),
- P216. Kohezyon,
- P217. İç sürtünme açısı,
- P218. Rijitlik modülü,
- P219. Yoğunluk,
- P221. Açıklığın şekli,
- P222. Kaya kütlesi devamlılığı (izotropi-homojenlik),
- P223. Kaya kalite indeksi (RQD- süreksizlik yoğunluğu),

- P224. Süreksizlik aralığı,
- P225. Süreksizlik durumu,
- P226. Süreksizlik konumu,
- P227. Süreksizliklerdeki yeraltı suyu,
- P228. Konverjans oranı,
- P229. Kazı tahkimat ihtiyaçları,
- P2210. Kazı boşluklarının planlanması ve birbirleriyle etkileşimi,
- P2211. Kazı yöntemi,
- P2212. Deponun kapatılması ve mühürlenmesindeki yöntemler ve problemler,
- P2213. Kazı mekanizasyon durumu,

- P231. Kaya kütlesi gerilme şartları,
- P232. Kaya kütlesi özellikleri (P21),
- P233. Kaya kütlesi süreksizlik paternleri,
- P311. Yerel hidrolik geçirgenlik değerleri,

- P312. Yayılma (bilinen hidrolik geçirgenliğin yaygınlığı),
- P313. Hidrolik geçirgenlik yönü,
- P314. Hidrolik geçirgen zonun genişliği,
- P321. Hidrolojisi belirlenen kaya kütlelerinin sınırları,
- P331. Devamlılık (kütlelerin korunumu) eşitlikleri,
- P332. Hareket eşitlikleri,
- P333. Durum eşitlikleri,
- P411. Referans su kütlesi ve son su elemanının karışım oranı,
- P412. Doygunluk indeksi,
- P413. Konsantrasyon eşitlikleri,
- P414. Yeraltı suyu özellikleri ve bekleme zamanı,
- P421. Kalsiyum doygunluğu,
- P422. Redoks ile açıklanabilen değişimler,
- P423. Biyolojik etkinlikler,
- P424. İyon değişimi,
- P511. Özgül deşarj, (m/s),
- P512. Akış hızı, (m/s),
- P513. Kinematik porozite,
- P514. Çözülmüş madde konsantrasyonu, (kg/m<sup>3</sup>),
- P515. Hareketsiz kısımdaki çözünmüş madde konsantrasyonu, (kg/m<sup>3</sup>),
- P516. Ana anizotropi yönünde dispersiyon tensörü, (m<sup>2</sup>/s),
- P517. Efektif difüzyon katsayısı, (m<sup>2</sup>/s),
- P518. Ana akış yönüne paralel hidrodinamik dağılma katsayısı, (m<sup>2</sup>/s),
- P519. Ana akış yönüne dik hidrodinamik dağılma katsayısı, (m<sup>2</sup>/s),
- P5110. Hacimsel (toplam) gözeneklilik,
- P5111. Zaman,
- P5112. Birim zamanda birim hacimdeki kütle değişimi,
- P521. Sıvı fazda moleküler difüzyon,
- P522. Efektif difüzyon katsayısı,
- P523. Geçirgenlik,
- P524. Akışa açık ortamın karakteristik uzunluğu,
- P525. Akış hızı,
- P531. Kanal akışına reaksiyon (sürtünme, (hız dağılımı),
- P532. Kanal açıklığındaki hız farklılıkları,
- P533. Kanal uzunluk farklılıkları,
- P541. Çözülmüş katı taşınması,
- P542. Çözülmüş katı taşınmasını etkileyen engeller,

#### Seviye-4:

Bazı parametreler için istenebilecek diğer detay bilgileri,

(P111, P112, P113, P114):

- a) Mineral özgül kütlesi,
- b) Minerallerin manyetik özellikleri,
- (P121, P122, P123):

- a) Süreksizlik konumları,
- b) Süreksizlik yayılımı, (uzunluğu),
- c) Süreksizlik konumu,
- d) Kırıklı zon genişliği,
- g) Süreksizlik Dolgu malzemesi özellikleri,
- h) Süreksizlik. Pürtüzlülüğü,
- i) Süreksizlik dalgalılığı,
- k) Süreksizlik yüzeyi alterasyonu,

## 5. ÜLKEMİZDEKİ UYGULAMALAR

Ülkemizde var olan nükleer atıkların neler olduğu ve bunların ne yapıldığını ortaya çıkarmak için üzerinde düşünülmesi gerekli faktörler şu şekilde sıralanabilir.

a) Tıbbi ve mühendislik işleri sonucu ortaya çıkan atıkların miktarı ve özellikleri kesin olarak belirlenmelidir.

b) Bu atıkların takibi için yetkili bir şirket oluşturulmalı ve bu şirket Türkiye atom enerjisi kurumu tarafından denetlenmelidir.

c) Kullanılan tıbbi ve mühendislik ekipmanlarının radyoaktif ışınımına maruz kalmış parçaları, ışın gördüğü muhtemel ve kullanılamaz durumdaki atıkları izlemeye alınmalıdır.

d) Türkiye'de kurulması düşünülen nükleer santrallerin atıkları konusunda şimdiden planlamalar yapılmalı bunların miktarı santral binası ve yedek parçalar dahil radyasyona maruz kalmış parçaların nerede saklanacağı konusu araştırılmaya başlanmalıdır.

e) TEAŞ nükleer santral atıklarını santral yakınında kurulacak depolarda saklanabileceğini internet sayfasındaki açıklamalarında belirtiyor, bunun maliyeti ve saklama süresi daha kesin olarak bu çalışmada verilen bütün parametrik inceleme faktörleri düşünülerek tekrar gözden geçirilmelidir.

f) Kurumsal olarak radyoaktif atıkların tek elden güvenli bir şekilde depolanması için sorumlu bir kurum oluşturulması gerekmektedir. Bu kurum Türkiye Atom enerjisi Kurumu adına yapılacak bütün çalışmaları kontrol etme yetkisine sahip olmalı ve oluşabilecek bütün radyoaktif atık saklama kazalarının sorumluluğunu taşımalıdır.

Türkiyede yeraltı nükleer atık deposu olarak değerlendirilebilecek yerlerin araştırılmadığı bilinmektedir. Bu konuda diğer ülkelerin üzerinde çalıştığı çalışmalar ülkemize bu konuda bir ışık tutabilecek düzeydedir. Bu çalışmaların yürütüldüğü merkezler ve buradaki kayaç türleri sıralanırsa;

- a) ABD; Kayatuzu yataklarında yapılan çalışmalar (10 yıl önce bu konudaki araştırmalar durdurulmuştur),

- b) ABD; Tüfitik formasyonlar, Utah.
- c) İngiltere; Sellafeld,
- d) Belçika; Killi formasyonlar, Moll,
- e) Fransa; Killi formasyonlar,
- f) Almanya; Kayatuzu formasyonları, Asse, Gorleben, Morsleben tuz madenleri, Konrad demir madeni.
- g) İsveç; Aspö araştırma merkezi, granit,
- h) İsveç; Alpler, granit.

Türkiyede radyoaktif atık depolanmasına uygun formasyonların bulunduğu yerlerin nereler olabileceği araştırılması gereken bir konudur. Tuz gölü civarında bulunan kayatuzu yataklarından, Aksaray ve Kırşehir'deki granitlerden, derin ve kalın killi formasyonların bulunduğu bölgeler araştırılmaya değerdir. Bunun yanında ülkemizde terk edilmiş ve hala sağlam kalabilmiş maden ocaklarının varlığı da nükleer atıkların son depolama yeri seçiminde düşünülebilir. Bunlar krom ocakları, civa ocakları, bazı kömür ocakları, tuf içinde açılmış maden galerileri, özellikle tufün çok olduğu ve kalın olduğu Nevşehir bölgesinde bu iş için açılacak galeriler sayılabilir.

Almanya'da radyoaktif atık depoları konusunda yapılan 30 yıllık çalışmalar sonunda, kayatuzu içinde açılan veya var olan depolama yerlerinde ön plana çıkan tasarım parametreleri şu şekilde sıralanmıştır;

- a) Konverjans oranı,
- b) Tuz domu içindeki sıvı ve basınç altındaki tuz paketlerinin hacmi,
- c) Kaya kütlelerinin (tuzun) geçirgenliği ve gözeneklilik özellikleri,
- d) Yer altı deposunun kapatılması sırasında çıkışların kapatılması (mühürlenme) ve bu mühürlerin geçirgenliği (permeabilitesi),
- e) Sıvılaşmış tuzun hareketi, açılan boşluklara akışı (akış süresi),
- f) Sıcaklık değişimleri,
- g) Yeraltı su akışı ve hızı,

Aynı şekilde ülkemizde de araştırma kurumları şimdiden bu konudaki çalışmalarını başlatmalı ve ülkemizdeki farklı kayaçlar için benzer kritik parametreler belirlenmelidir. Bu yapılmazsa radyoaktif atıklar konusunda gerekli incelemelerin ve mühendislik çalışmalarının yapılmamasından doğan hızlı ve yanlış kararlar verilebilecektir.

## 6. SONUÇ

Radyoaktif atıkların bertarafı konusunda incelenmesi gereken parametrelerin sıralandığı bu çalışmada yapılması gereken birçok araştırmanın

olduğu ortaya konulmuştur. Bu çalışmaların çoğunluğu depoların kayaçlar içerisinde saklanması düşünüldüğünde kaya mekanığı parametreleri olmaktadır. Bu aşamada özellikle üzerinde düşünülmesi gereken konular özetlenirse şu faktörler ön plana çıkacaktır. Nükleer santral kurulması çalışmalarında radyoaktif atıklar önemsenmelidir; Her ülke kendi atığını bertaraf etmek zorundadır; Türkiye'de tıbbi atıklar şimdiden tehlikeli olmaktadır, bunun nedenleri ortadan kaldırılmalıdır. Bütün bu parametrelerin araştırılması yerine "nasıl olsa halledilir" şeklinde işe başlanırsa mühendis olarak sonucu hesaplamak çok zorlaşacaktır ve geri dönülmez etkiler ortaya çıkacaktır. Gelecek nesil kanserle uğraşıp hastanelerde zaman kaybetmesin isteniyorsa her şeyin belirsizlik düzeyine kadar araştırılması gerekmektedir. Bu araştırmalar bu konuda çalışan ülkelerde birçok mühendislik dalında yeni hizmet şirketlerine iş olanağı sağlamaktadır, bu şekliyle teknoloji geliştirilmekte ve insanlara yeni istihdam olanakları sağlanmaktadır. Her mühendislik birimi kendi üzerine düşeni detaylı olarak araştırırsa ve proje olarak detaylar iyi yönetilirse nükleer enerji korkulacak bir enerji türü olmaktan çıkacaktır.

## KAYNAKLAR

- EPA (1998) Types of radiation, *Science and Radiation booklet*, USA.
- Han, K.W., Heinonen, J. Ve Bonne, A. (1997) Radioactive waste disposal: Global experience and challenges, *IAEA Bulletin*, V39, N1, p33.
- IAEA (1994) Classification of radioactive waste, *IAEA Safety Series*, No 111-G1.1 Vienna.
- Jostsons, A. (1997) Radioactive waste management and disposal, *Energy for Ever; Technological Challenges of Sustainable Growth*. Academy Symposium, ATSE, Australia.
- NCRP 1987. Recommendations on Limits for Exposure to Ionizing Radiation. *NCRP Report 91*. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, Maryland. June 1, 1987
- NCRP. 1994. Exposure of the Population in the United States and Canada from Natural Background Radiation. *NCRP Report No. 94*. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, Maryland
- Schön, J.H. (1996) Physical Properties of Rocks, *Fundamentals and Principles of Petrophysics*, Pergamon Press. USA.
- SKI-Report (1996) SKI site 94 Deep Repository Performance Assessment Projects, V1, Statens Karnkraftinspektion, Sweden.



## **TEHLİKELİ ATIKLARIN YERALTINDA DEPOLANMASININ DEĞERLENDİRİLMESİ VE KONUNUN KAYA MÜHENDİSLİĞİ AÇISINDAN ÖNEMİ**

### **EVALUATION OF UNDERGROUND DISPOSAL OF HAZARDOUS WASTES AND THE IMPORTANCE OF THE SUBJECT FOR ROCK ENGINEERING**

**A. ÖZARSLAN ve H. GERÇEK**

Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, ZONGULDAK

**ÖZET:** İnsan sağlığı ve çevrenin korunabilmesi için tekrar değerlendirileme olanağı bulunmayan ve çok uzun süreyle tehlikeli özelliklerini yitirmeyen radyoaktif ve zehirli-kimyasal atıkların ortadan kaldırılması gerekmektedir. Bu atıkların uzun vadeli yönetimi için, mevcut ortadan kaldırma yöntemleri arasında, yeraltında kesin (nihai) olarak depolanmaları en güvenli seçenek olarak kabul edilmektedir. Ancak, yeraltı atık depolarının oluşturulması ve uzun süreli güvenliklerinin sağlanmasının, en güç mühendislik çalışmaları arasında olduğu da bilinmektedir. Bu depoların yer seçimi, tasarlanması, inşaatı, işletilmesi ve kapatma aşamaları ile güvenliklerinin kanıtlanmasında, kaya mekanik biliminin sağladığı bilgilerin önemi büyüktür. Özellikle, madencilik ve tünelcilik çalışmalarından edinilen bilgi ve deneyimler, karşılaşılan sorunların çözümünde önemli katkılar sağlamaktadır. Bu çalışmada, önce yeraltında atık depolamanın temel felsefesini oluşturan çoklu engel sistemi açıklanıp mevcut durum değerlendirilmiştir. Ardından, depolama projelerinin tasarlanmasında ve gerçekleştirilmesinde kaya mühendisliğinin önemi incelenmiştir. Sonunda da konunun muhtemel geleceği tartışılmıştır.

**ABSTRACT:** In order to protect the human health and environment, the radioactive and toxic-chemical wastes, that cannot be recycled and which maintain dangerous properties for very long periods, should be disposed of. It has been accepted that, among the available disposal methods, the safest alternative for the long-term management of such wastes is to dispose of them permanently in underground repositories. However, the construction of underground waste repositories and providing their long-term integrity are considered to be among the most difficult engineering tasks. The information provided by the science of rock mechanics has a great importance for the site selection, design, construction, operation and closure phases of such repositories and also in proving their safety. Especially the knowledge and experience gained from the mining and tunneling activities contribute significantly to the solution of problems encountered. In this study, firstly, the multiple barrier system, i.e. the main philosophy of underground waste storage, is explained and existing situation is evaluated. Then, the importance of rock engineering in repository design and construction is investigated. Finally, the possible future of the subject is discussed.

#### **1. GİRİŞ**

Gelecek nesillerin ihtiyaçlarını koruma altına alan sürdürülebilir bir kalkınmanın sağlanması tüm topluluklara ve ülke yönetimlerine önemli sorumluluklar yüklenmektedir. Günümüz çevre sorunlarının, bizden sonraki nesiller için yaşamsal öneme sahip su, hava ve hammadde gibi kaynakları tehdit edecek boyutta geleceğe aktarılmasının önlenmesi, bu hedefe ulaşılmasında hayati bir öneme sahiptir. İnsan ve çevre sağlığını tehdit eden tehlikeli atıkların uzun vadeli ve güvenli bir şekilde yönetimi de bu sorunların başında gelmektedir.

Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin atık yönetimi politikalarında öncelikle atık oluşumunun önlenmesi veya atıkların ikincil bir hammadde olarak tekrar değerlendirilmesi öngörülmektedir. Teknolojik alanda günümüze kadar elde edilen tüm gelişmelere ve yasal önlemlere rağmen yine de tehlikeli atıkların oluşması kaçınılmazdır. Özellikle yeniden değerlendirilme olanağı bulunmayan ve uzun süreli olarak insan ve çevre sağlığı üzerinde tehlikeli özelliklerini yitirmeyen radyoaktif ve zehirli-kimyasal atıkların güvenli bir şekilde ortadan kaldırılması gerekmektedir. Gelişmiş ülkelerin atık yönetimi sistemlerinde, bu atıkların yeraltında uygun jeolojik formasyonlarda kesin olarak depolanması en

güvenli seçenek olarak kabul görmektedir (Pusch, 1994; Han vd., 1997; Dials, 1997; Lempert, 1999; Olsson, 2000). Bu amaçla, özellikle radyoaktif atıkların depolanması konusunda, dünyanın çeşitli bölgelerinde maliyeti oldukça yüksek olan ve uygulamalı kaya mekanığı araştırmalarına da önemli katkılar sağlayan, kapsamlı projeler yürütülmektedir. Bunun yanında, tehlikeli zehirli-kimyasal atıkların yeraltında depolanmasını uygulayan çeşitli işletmeler de faaliyette bulunmaktadır.

Yeraltında tehlikeli atıkların depolanması konusu, jeoloji ve hidrojeoloji gibi uzmanlık alanlarıyla birlikte maden ve inşaat mühendisliğindeki kaya mekanığı araştırmaları arasında ön sıralarda yer almaktadır. Konunun öneminin gelecekte daha da artması beklenmektedir. Özellikle depoların yer seçimi, tasarlanması, inşaatı, işletilmesi ve kapatılması aşamaları ile uzun süreli güvenliğin kanıtlanmasında kaya mekanığı biliminin yarım yüzyıla yaklaşan bilgi ve deneyim birikiminin önemi büyüktür. Bunun yanında, depo güvenliğini çok yönlü olarak etkileyen ve birbiriyle ilintili çok sayıda değişik faktörlerin varlığı ve göz önünde bulundurulması gereken uzun zaman aralığı (>10 bin yıl) nedeniyle, yeraltında atık depolama konusu kaya mühendisliğinin karşılaştığı en güç problemlerin başında gelmektedir.

Bu çalışmada, önce yeraltında atık depolamanın temel felsefesini oluşturan çoklu engel sistemi açıklanıp dünyadaki mevcut durum incelenmiştir. Sonra, bu tür atık depolama projelerinin tasarımı ve gerçekleştirilmesinde kaya mühendisliğinin önemi incelenmiştir. Daha sonra da konunun muhtemel geleceği değerlendirilmiştir.

## 2. TEHLİKELİ ATIKLARIN YERALTINDA DEPOLANMASI

Tehlikeli atık depolamanın ana amacı; bu atıkların sahip olduğu ve insan ile çevre sağlığını tehdit eden zararlı maddelerin, canlıların da üzerinde yaşadığı biyosfer, hidrosfer ve atmosfere kontrolsüz olarak ve izin verilebilir miktarlardan daha fazla iletilmesini engellemektir. Atıklardan zararlı maddelerin iletimi, başlıca su ve hava akımı aracılığıyla oluşabilmektedir. Yerüstü depoları, uzun süreler boyunca radyoaktif ve zehirleyici özelliklerini yitirmeyen atıklar için yeterli korumayı sağlayamamaktadır. Bunun başlıca sebebi, bunların biyosfere olan kısa mesafeleri ve engel sistemlerinin ağırlıklı olarak işlevsel ömürleri sınırlı (< 3 yüz yıl) olan malzemelerden oluşmasıdır (Martens, 2000). Bu nedenle, bu tür atıkların milyonlarca yıl önce

doğal olarak oluşmuş, uygun jeolojik ortamlara depolanması öngörülmektedir.

Yeraltı depolama ortamının ve engel yapılarının sahip olması gereken en önemli özellik, zararlı maddelerin yeraltı suyu aracılığıyla yerüstüne veya sığ derinlikteki yeraltı suyu katmanlarına iletilmesine olanak tanınamasıdır. Bu bağlantının daimi olarak engellenmesi için etkilisimli olarak işlev gören çeşitli doğal ve yapay engellerden yararlanılmaktadır. Doğal engel işlevini görecekt kaya kütlesi katmanlarında aranan en önemli özellikler arasında, (mümkün olabildiğince homojen bir dağılımla) yeraltı suyuna karşı geçirimsiz veya çok düşük geçirgenliğe ( $< 1 \times 10^{-10}$  m/s) sahip olması ve aynı zamanda etkin bir yeraltı suyu dolaşımı ile bağlantısının bulunmaması yer almaktadır (Drescher, 1997).

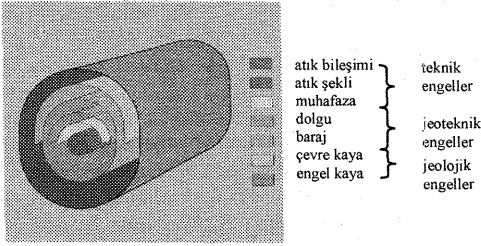
Yeraltında yeterli kalınlıktaki magmatik kristalli kayalar (granit, gnays vb.) ve tortul kilaşı oluşumları ile evaporitik tuz yatakları, potansiyel olarak bu aranan özelliklere sahip olabilmektedir. Kilaşıdan oluşan kaya kütleleri, düşük geçirgenlikte olmaları ve atıklardan çözülebilen zararlı maddeleri soğurabilmeleri karşılık, genelde, mekanik duraylılık bakımından bu tür yapılar için tek başına yeterli olmamaktadır. Bu nedenle, yeraltında atık depolanmasıyla ilgili projelerde, olası depolama ortamı olarak kristalli kaya (özellikle granit) ve tuz (özellikle kaya tuzu) yatakları üzerinde araştırmalar yoğunlaşmaktadır. Bu depolama ortamlarının killi birimler ile çevrilmiş olması ise uzun süreli güvenlik açısından oldukça olumlu etki yaratmaktadır. Çizelge 1'de kaya tuzu ve granit kaya kütlelerinin yeraltı atık depolama ortamı açısından bazı önemli özellikleri belirtilmiştir.

Çizelge 1. Kaya tuzu ve granitin yeraltı atık depolama ortamı açısından bazı önemli özellikleri (Fairhurst, 1993; DGGT, 1993; DGGT, 1994).

| Kaya Tuzu                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Granit                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Zamana bağlı plastik davranış nedeniyle çatlakların kendiliğinden kapanma özelliği vardır.</li><li>• Pratik olarak sıvı ve gazlara karşı geçirimsiz kabul edilmektedir.</li><li>• Tuz madenciliğinden kaynaklanan deneyim ve büyük açıklık hacimleri oluşturma olanağı vardır.</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Mekanik duraylılığı ve kimyasal dayanıklılığı yüksektir.</li><li>• Zararlı maddeleri soğurma yeteneği vardır.</li><li>• Isı iletme yeteneği nispeten düşüktür.</li><li>• Geçirgenliği çatlak ve eklem sistemlerine bağlıdır.</li></ul> |

## 2.1. Çoklu Engel Sistemi

Yeraltında atık depolamanın temel felsefesi, bir dizi engeller aracılığıyla, depolama ortamından biyosfere bir zararlı madde çıkışının sürekli ve tekrar bakıma ihtiyaç duyulmadan önlenmesine dayanmaktadır. Bu engeller sistemi "çoklu engel sistemi" olarak anılmakta olup başlıca jeolojik, jeoteknik ve teknik engellerden oluşmaktadır. Şekil 1'de çoklu engel sistemini oluşturan birimler iç içe geçmiş halkalar şeklinde gösterilmiştir. Çoklu engel sisteminin en önemli özelliği bir engel işlevini yitirse bile diğer engellerin bağımsız olarak zararlı madde çıkışını önlemeleridir.



Şekil 1. Çoklu engel sistemi (DBE, 1995).

Jeolojik engeller, atık deposunu çevreleyen kaya kütleleri katmanları ve zararlı madde çıkışını engelleyecek diğer jeolojik birimlerden oluşmaktadır. Jeoteknik engeller, çevre koşullarından faydalanılarak gerçekleştirilen mühendislik yapılarıdır ve asıl depolama ile servis açıklıklarının (galeri, kuyu) barajlanması ve doldurulması çalışmaları bu kapsama girmektedir. Jeoteknik engeller, aslında, jeolojik birimlerin kuyu ve galeriler ile geçilmesi suretiyle bozulan jeolojik engel yapısının eski doğal özelliklerine yakın olarak yeniden oluşturulması için gerçekleştirilen yapılardır. Teknik engel, ise atığın kendisi ve yerleştirildiği muhafazadan oluşmaktadır. Tehlikeli atık muhafazaları, göz önünde tutulması gereken zaman aralığına (> 10 bin yıl) kıyasla sınırlı ömüre sahip olmaları nedeniyle, uzun süreli güvenliğin kanıtlanmasında değerlendirilememektedir. Atık muhafazaları, özellikle atıkların naklinde ve işletme güvenliğinin sağlanmasında büyük önem taşımaktadır.

Bu engeller arasında, depoya herhangi bir sıvı girişini ve zararlı madde çıkışını önleyecek olan jeolojik engel, uzun süreli güvenlik açısından en önemli görevi üstlenmektedir. Jeolojik engelleri oluşturan bazı kaya kütleleri birimlerinin aynı

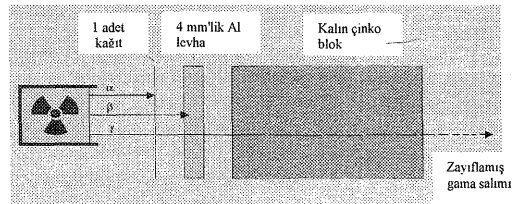
zamanda zararlı maddeleri soğurma yeteneklerinin bulunması nedeniyle, bu engel aynı zamanda bir jeokimyasal engel işlevini de yerine getirebilmektedir. Benzer şekilde, depolama ortamında hidrolik eğimin sınırlı olması veya yeraltı suyu yoğunluk farkı gibi etkenlerden dolayı, etkin yeraltı suyu dolaşımına katılmayan jeolojik engel bünyesindeki kaya kütleleri birimleri de bir nevi doğal hidrolojik engel işlevi görmektedir (Gerhardt vd., 1997).

## 2.2. Mevcut Durumun Değerlendirilmesi

Daha önce de belirtildiği gibi, tehlikeli özelliklerini uzun süreyle yitirmeyen atıkların yeraltında kesin olarak ortadan kaldırılması öngörülmektedir. Bu özelliklere sahip başlıca atıklar, radyoaktif ile zehirli-kimyasal atıklardır. Bunların yeraltında depolanmasında; birbirinden farklı zararlı madde bileşenleri, dış ortama yayılma mekanizmaları, sahip oldukları risk unsurları ve ömürleri, oluşan atık miktarları ve ortadan kaldırma maliyetleri nedeniyle ayrı yaklaşımlar izlenmektedir.

### 2.2.1 Radyoaktif Atıklar

İşınım (radiation), daima doğada var olan ve birlikte yaşadığımız bir olgudur. Radyoaktif elementler temel olarak alfa, beta ve gama olmak üzere üç tip işınım salımında (emission) bulunurlar. Alfa etkinlikli işınım, bir kağıt parçası tarafından durdurulabilmektedir. Beta işınımı salımları da ince (4 mm'lik) bir alüminyum levha tarafından engellenebilmektedir. Enerji dalgalarından oluşan gama işınımı, özel engellerde (örneğin; kalın çinko blok) enerjisinin önemli bir kısmını yitirmekte ve etkinliği zayıflamaktadır (Şekil 2). Depolama ortamı olarak 2 m kalınlığında çatlaksız bir kaya kütleleri (granit vb.), çinko bloğu ile yaklaşık aynı soğurumu yaratabilmektedir (DBE, 1995; Volkmer, 1998).



Şekil 2. Çeşitli işınım salımlarının durdurulması veya zayıflatılması (Volkmer, 1998).

Alfa etkili maddeler, salımlarının nispeten kolay yöntemlerle durdurulabilmesine karşılık, radyoaktif özelliklerini uzun süreler boyunca koruyabilmeleri ve organizmalara en çok zarar verebilen yayımlar olmaları nedeniyle oldukça tehlikelidir. Radyoaktif atıkları ve onlardan kaynaklanan ışınmayı asıl tehlikeli kılan özellik; maruz kalma süresine, ışınmının şiddetine ve maruz kalınan vücut bölgesine bağlı olarak, canlı hücrelerindeki genetik unsurları parçalayabilmesi ve başta kanser olmak üzere tedavisi mümkün olmayan hastalıklara yol açabilmesidir. Işınmın sadece etkidığı insana zarar vermekle kalmamakta, aynı zamanda uzun süreler boyunca canlı hayatı tahrip ederek, gelecek nesillerde kalıtım bozukluklarına neden olabilmektedir (Volkmer, 1998).

Radyoaktif atıklar çeşitli ölçütlere göre sınıflandırılabilir. Bu atıkların yönetimi ve izlenecek depolama yaklaşımı açısından, sahip oldukları etkinlikler, yarılanma ömürleri, insan sağlığına etkilerini yansıtan radyotoksiklik özellikleri ve ısı oluşumunu göz önünde tutan bir sınıflandırma sistemi önemli avantajlar sağlamaktadır. Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu (IAEA) tarafından bu amaçla geliştirilen bir sınıflandırma sistemi Çizelge 2'de verilmiştir (Pusch, 1994).

Çizelge 2. Radyoaktif atıkların sınıflandırılması (Pusch, 1994).

| Sınıf                                          | Karakteristik Özellikler                                                                                                                                                                                    |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I<br>(HLW)<br>yüksek etkinlik,<br>uzun ömürlü  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• yüksek beta/gama etkinliği</li> <li>• önemli alfa etkinliği</li> <li>• yüksek radyotoksiklik</li> <li>• yüksek ısı oluşumu</li> </ul>                              |
| II<br>(MLW)<br>orta etkinlik,<br>uzun ömürlü   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• orta beta/gama etkinliği</li> <li>• önemli alfa etkinliği</li> <li>• orta radyotoksiklik</li> <li>• sınırlı ısı oluşumu</li> </ul>                                 |
| III<br>(LLW)<br>düşük etkinlik,<br>uzun ömürlü | <ul style="list-style-type: none"> <li>• düşük beta/gama etkinliği</li> <li>• önemli alfa etkinliği</li> <li>• düşük-orta radyotoksiklik</li> <li>• ihmal edilebilir ısı oluşumu</li> </ul>                 |
| IV<br>(MLW-S)<br>orta etkinlik,<br>kısa ömürlü | <ul style="list-style-type: none"> <li>• orta beta/gama etkinliği</li> <li>• ihmal edilebilir alfa etkinliği</li> <li>• orta radyotoksiklik</li> <li>• sınırlı ısı oluşumu</li> </ul>                       |
| V<br>(LLW-S)<br>düşük etkinlik,<br>kısa ömürlü | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ihmal edilebilir beta/gama etkinliği</li> <li>• ihmal edilebilir alfa etkinliği</li> <li>• zayıf radyotoksiklik</li> <li>• ihmal edilebilir ısı oluşumu</li> </ul> |

Radyoaktif atıklar çeşitli kaynaklarda oluşabilmektedir. Düşük ve orta seviyeli atıklar, nükleer santrallerin işletilmesi (nükleer yakıt

çubukları hariç) ve kapatılması aşamasında, araştırma veya sağlık kuruluşlarında ve nükleer silah endüstrisinde oluşan atıklardan meydana gelmektedir. Yüksek seviyeli atıklar ise başlıca, nükleer santrallerde kullanılmış olan yakıt çubuklarından veya bunların tekrar işlenmesiyle ortaya çıkan atıklardan oluşmaktadır. Radyoaktif atıkların alfa etkinliği, ömürleri üzerinde en önemli belirleyici özelliktir. Radyoaktif atıkların ömürleri çeşitli ölçütlere göre sınıflandırılabilir. Avrupa Birliği'nin ortak bir sınıflandırma için önerdiği yaklaşıma göre, ilk yarılanma ömrü 30 yıldan kısa olan radyoaktif atıklar kısa süreli ve diğerleri de uzun süreli atıklar olarak tanımlanmaktadır (European Community, 1999).

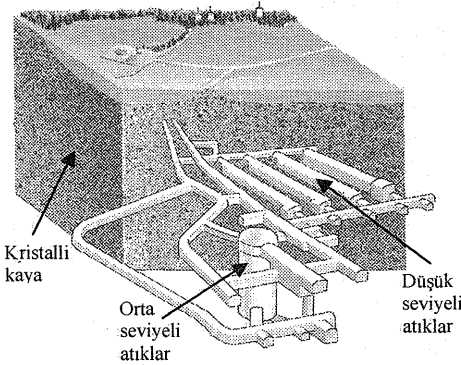
Düşük seviyeli atıklar iç koruması olmayan bir şekilde ve orta seviyeli atıklar da beton gibi malzemeler ile kaplanarak, metal fiçiler içinde güvenli olarak depolanabilir. Yüksek seviyeli atıklar ise, kullanıldıktan sonra etkinliğinin ve ısının önemli bir miktarını kaybetmesi için önce santral içindeki su havuzlarında ve, daha sonra da çeşitli işlemler sonrasında, özel olarak geliştirilmiş çelik kaplı muhafazalarda saklanabilir. Buna rağmen bu atıklar yeraltı depolama ortamında çevre kayanın ısısında 200°C'ye kadar bir artışa neden olabilmektedir. Tam kapasite ile çalışan 1300 MW'lık bir nükleer santral, yılda ortalama 530 m<sup>3</sup> düşük, 50 m<sup>3</sup> orta ve 5 m<sup>3</sup> de yüksek etkinliktir radyoaktif atığın oluşmasına yol açmaktadır (Volkmer, 1998). Bu nedenle, dünya üzerinde mevcut radyoaktif atıkların büyük bir bölümü düşük ve orta seviyeli atıklardan oluşurken, yüksek seviyeli atıkların miktarı nispeten sınırlıdır. Buna karşılık, yüksek seviyeli atıkların güvenli bir şekilde ortadan kaldırılmasında önemli güçlükler yaşanmaktadır ve yıllar süren araştırmalara ve projelere rağmen, günümüze kadar herhangi bir ortadan kaldırma işletmesi faaliyete geçememiştir. Dünyada bugüne kadar oluşan atıkların önemli bir kısmı hala özel tasarlanmış, geçici yerüstü depolama birimlerinde saklanmaktadır.

Dünyadaki mevcut yeraltı radyoaktif atık depolama tesisleri ve projeleri incelendiğinde, farklı atık sınıflarına göre çeşitli yaklaşımların uygulandığı anlaşılmaktadır. Daha önce Çizelge 2'de belirtilen atık sınıflarından; IV ve V no.'lu sınıflara dahil olan kısa ömürlü radyoaktif atıklar için özellikle İskandinav ülkelerinde sığ derinlikteki (40-70 m) masif ve kristalli (granit vb.) kaya kütlelerinde, özel amaçlı yeraltı açıklıkları ve depolama odaları oluşturulmaktadır (Çizelge 3). Şekil 3'te İsveç'te faaliyette olan bu tür bir atık depolama tesisi görülmektedir. 1987 rakamları ile bu tesisin toplam

maliyeti 740 milyon SEK civarında olmuştur (Pusch, 1994). Bu depoların işletme süreleri sınırlıdır (< 5 yüz yıl) ve kısa ömürlü atıkların etkinlikleri bu süre zarfında oldukça zararsız seviyelere düşmektedir (Stephansson, 1999). Bu depolardan aynı zamanda uzun ömürlü, düşük ve orta seviyeli atıklar için de (geçici depolama ortamı olarak) faydalanılmaktadır.

Çizelge 3. Sığ derinlikte, kristalli kaya kütlesi içerisinde, kısa ömürlü radyoaktif atıklar için oluşturulan yeraltı atık depolama tesisleri (Han vd., 1997; Baadsto, 2000; Autio ve Salo, 2000; Olsson, 2000; Stephansson, 2000).

| Ülke                          | Depo Özellikleri                                                                                                                                                              |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| İsveç, SFR tesisi 1988-       | 50 m derinlikte, kristalli (granit) kaya kütlesi içerisinde, depolama açıklığı: 1 silo ve 4 oda, depolama kapasitesi 63 bin m <sup>3</sup> , beton kaplama ve bentonit dolgu. |
| Finlandiya, VLJ tesisi 1995-  | 70-100 m derinlikte, kristalli kaya kütlesi içerisinde, 2 adet silodan oluşmaktadır (LLW+MLW), beton kaplama ve dolgu.                                                        |
| Norveç, Himdalen tesisi 1997- | 50 m derinlikte, kristalli kaya içerisinde, 4 adet depolama odası, 10 bin adet standart (200 t/lik) muhafaza kapasiteli.                                                      |



Şekil 3. İsveç'te kısa ömürlü, düşük ve orta seviyeli radyoaktif atıklar için, sığ derinlikte ve kristalli kaya kütlesi içerisinde oluşturulan yeraltı atık depolama (SFR) tesisi (Olsson, 2000).

Kısa ömürlü atıkların sığ derinlikteki kristalli kaya formasyonlarında depolanabilmelerine karşılık; uzun ömürlü radyoaktif atıkların, kesin olarak yeraltında ancak derin jeolojik formasyonlarda güvenli bir şekilde depolanması mümkün görülmektedir. II ve III no.lu sınıfa dahil olan radyoaktif atıklar için çeşitli ülkelerde derin yeraltı atık depolama tesisleri oluşturulmuştur. Bu tesislerden bir kısmı işletmeye alınmıştır ve bir kısmında da işletme izni için yasal işlemler devam etmektedir (Çizelge 4).

Çizelge 4. Düşük ve orta seviyeli radyoaktif atıkların yeraltında depolanması amacıyla oluşturulan önemli tesisler (Lempert, 1999; Matthews vd., 2000).

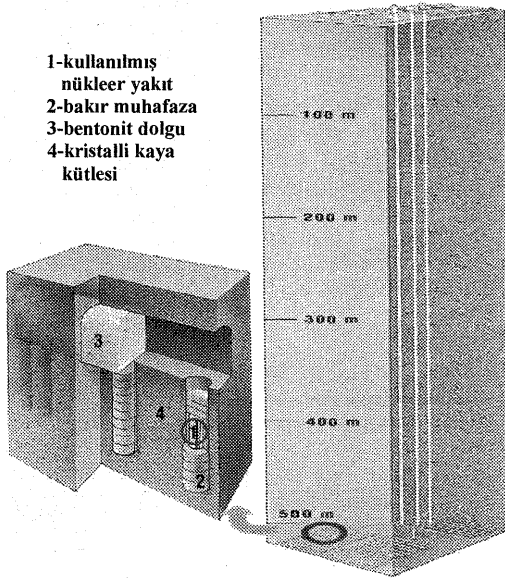
| Ülke                           | Depo Özellikleri                                                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ABD, WIPP 1999-                | Depolama seviyesi yerüstünden 655 m derinlikte, 250 milyon yaşlı ve 600 m kalınlığındaki tuz formasyonları, özel amaçlı oluşturulmuş depolama tesisi ve odaları (100×10×4m), uzun ömürlü düşük seviyeli radyoaktif (transuranik) atıklar. |
| Almanya, Morsleben 1979-1998   | 400-800 m arasında kalınlığa sahip tuz domu, eski kaya tuzu madeni, depolama ortamı 500 m derinlikte, 43 bin m <sup>3</sup> düşük ve orta seviyeli atık depolanmıştır.                                                                    |
| Almanya, Konrad (izin aşamast) | Eski demir madeni, depolama ortamını çevreleyen kalın kıllı tabakalar jeolojik engel oluşturuyor, 800-1300 m derinlikte depolama amaçlı yeni açıklıklar oluşturuluyor.                                                                    |

En tehlikeli radyoaktif atıkları teşkil eden I no.lu sınıftaki yüksek seviyeli ve yüksek ısı oluşumuna neden olan atıklar için ise henüz bir yeraltı atık depolama tesisi işletmeye alınamamıştır. Çeşitli ülkelerde, bu tesislerin oluşturulabilmesi için depolamanın öngörüldüğü sahalarda kapsamlı projeler ve araştırmalar yürütülmektedir. Çizelge 5'te çalışmaların ileri bir aşamada bulunduğu ABD'deki Yucca Mountain ve Almanya'daki Gorleben projeleri hakkında özet bilgiler verilmiştir. Yucca Mountain saha araştırma projesi için şimdiye kadar 2,6 milyar USD harcanmıştır (Hudson, 1999). Gorleben depolama işletmesinin 4,7 milyar DEM'e mal olacağı tahmin edilmektedir. Gorleben projesinde araştırmalar, kuyu ve yeraltı açıklıklarının oluşturulması için 1999 yılı itibarıyla 2,4 milyar DEM harcama yapılmıştır (Lempert, 1999).

Çizelge 5. Yüksek seviyeli radyoaktif atıkların yeraltında depolanması amacıyla yürütülen önemli projeler (Boyle ve Datta, 1999; Lempert, 1999).

| Ülke                        | Depo Özellikleri                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ABD, Yucca Mountain Projesi | Araştırılan depolama formasyonu 350 m kalınlığında volkanik tuf, yeraltı su seviyesi 800 m derinlikte ve öngörülen depolama ortamı bu seviyenin 300 m üzerinde, bağlantı ve araştırma tünelleri oluşturulmuştur, bire bir ölçekli deneyler yapılmaktadır. |
| Almanya, Gorleben Projesi   | 260-3600 m arasında kalınlığa ve 45 km <sup>2</sup> genişliğe sahip tuz domu, kuyu ve galerilerden oluşan 180 bin m <sup>3</sup> açıklık oluşturulmuştur, bire bir ölçekli deneyler yapılmaktadır.                                                        |

Çeşitli ülkelerde (Kanada, İsveç, Finlandiya, Norveç, İsviçre vb.) araştırmalar ağırlıklı olarak derin ve kristalli kaya (granit, gnays) formasyonlarının depolama ortamı olarak kullanılması üzerinde yoğunlaşmaktadır. Buradaki temel yaklaşım, derinlerde (> 500 m) ve çok düşük geçirgenliğe sahip kristalli kaya birimlerinde bu atıkların kesin olarak depolanmasıdır. Depolama ortamına bağlantının kuyu ve galeriler ile sağlanması öngörülmektedir. Atıkların ise kristalli kaya birimlerinde belli bir düzen içinde birbirine paralel olarak oluşturulacak galeriler içinde açılacak geniş çaplı sondaj deliklerine yerleştirilmesi planlanmaktadır (Şekil 4). Başlıca engeller; camı iç muhafaza ile bakırdan oluşan dış muhafaza, delik içerisinde sıkıştırılmış bentonit dolgu, galerilerde oluşturulacak dolgu ve barajlar ile kristalli çevre kayadan oluşmaktadır (Pusch, 2000). Depolama ortamını çevreleyen jeolojik formasyonlar ise diğer jeolojik engelleri oluşturmaktadır.



Şekil 4. Yüksek seviyeli radyoaktif atıkların derin ve kristalli kaya kütlesi katmanlarında ortadan kaldırılması için oluşturulması öngörülen depolama şekli (Olsson, 2000).

## 2.2.2 Zehirli-Kimyasal Atıklar

Tehlikeli ve zehirli-kimyasal atıklar da, genelde radyoaktif atıklar kadar riskli olmamalarına karşılık, insan ve çevre sağlığını tehdit etmektedir. Radyoaktif atıkların, yarılanma ömürlerine bağlı olarak, zamanla etkinlikleri azalmasına rağmen zehirli-kimyasal atıklar neredeyse hiç değişmeden tehlikeli özelliklerini korumaktadır. Bu nedenle bu atıkların ortadan kaldırılacağı ortamlarda, depodan olası bir zararlı madde çıkışı sürekli olarak engellenmelidir. Daha önde de belirtildiği gibi yeraltı atık depolarından zararlı madde yayılımı ancak yeraltı suyu veya hava akımı aracılığıyla gerçekleşebilmektedir. Zehirli-kimyasal atıklar radyoaktif salım özelliklerine sahip değildir; bunun yanında, gaz yayabilen atıkların da yeraltında depolanmasına izin verilmediğinden, bu tip atıklardan bir zararlı madde çıkışı ancak yeraltı suyu ile mümkün olabilecektir. Bu nedenle, kimyasal atıkların yeraltında kesin olarak ortadan kaldırılması için, geçirimsiz ve yeraltı suyu bulunmayan ortamlarda depolanması gerekmektedir. Bunun için sıvı ve gazlara karşı pratik olarak geçirimsiz kabul edilen tuz formasyonları (kaya tuzu vb.) büyük bir potansiyel teşkil etmektedir. Bu formasyonların çoğunun milyonlarca yıl önce oluşmuş olmasına rağmen, günümüze kadar doğal özelliklerini koruyabilmeleri uzun süreli güvenliğin kanıtlanmasında önemli bir husus olarak değerlendirilmektedir.

Genelde, yüksek ağır metal içerikleri veya su içerisinde çözünürlük özellikleri nedeniyle yerüstü depolarında ortadan kaldırılmaları (uzun süreli güvenlik açısından) sakıncalı olan atıkların (örneğin; atık yakma tesisi artıkları vb.) yeraltında depolanması öngörülmektedir. Bu atıklar, zehirli özellikleri nedeniyle insan ve çevre sağlığını tehdit etmektedir. Zehirli-kimyasal atıklar, fazla miktarlarda oluştukları için nispeten ekonomik bir şekilde ortadan kaldırılmak zorundadır. Bu atıkların istenilen koşullar altında, güvenli bir şekilde ortadan kaldırılması için, özellikle kaya ve potasyum tuzu madenlerinde oluşturulan yeraltı açıklıkları büyük bir potansiyel teşkil etmektedir. Almanya'da tuz madenlerinde, toplam kapasitesi 500 bin ton/yıl olan üç adet yeraltı atık depolama tesisi işletilmektedir. Çizelge 6'da bu tesisler hakkında özet bilgiler verilmiştir. Bu tesislerde depolama maliyeti atık türüne ve miktarına bağlı olarak 100-400 Euro/ton arasında değişmektedir. Bunun dışında çeşitli ülkelerde (Fransa, Avusturya vb.) bu tür tesisler için izin alma işlemleri devam etmektedir.

Çizelge 6. Almanya'da, tehlikeli zehirli-kimyasal atıkların ortadan kaldırılması için işletilen yeraltı atık depolama tesisleri (Dörhörfer vd., 1993).

| Tesis               | Depo Özellikleri                                                                                                                                          |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Herfa Neurode 1972- | Depolama ortamı 700-800 m derinlikte, 300 m kalınlığında tuz formasyonları, oda-topuk yöntemi uygulanmış tuz madeni, depolama kapasitesi 200 bin ton/yıl. |
| Heilbronn 1987-     | Depolama ortamı 200 m derinlikte, 40 m kalınlığında kaya tuzu yatağı, depolama kapasitesi 200 bin ton/yıl.                                                |
| Zielitz 1997-       | Depolama ortamı derinliği 400-500 m, 300-500 m kalınlığında tuz formasyonları, depolama kapasitesi 100 bin ton/yıl.                                       |

### 3. KONUNUN KAYA MÜHENDİSLİĞİ AÇISINDAN ÖNEMİ

Yeraltında derin jeolojik formasyonlarda tehlikeli atıkların depolanması çeşitli mühendislik disiplinleri (jeoloji, maden, inşaat, çevre, kimya, hidrojeoloji, jeofizik vb.) arasında sıkı bir işbirliğini gerektirmektedir. Bu uzmanlık dalları arasında, maden ve inşaat mühendisliğindeki kaya mekaniği bilgi ve deneyim birikiminin, projelerin tasarlanması ve gerçekleştirilmesinde önemi büyüktür.

Bu bölümde, diğer yeraltı depolama yaklaşımlarına kıyasla kaya mekaniği ile kaya mühendisliği uygulamalarının öneminin fazla olması nedeniyle, sadece uzun ömürlü radyoaktif atıkların özel amaçlı, derin ve kristalli kaya kütleleri içerisinde depolanması incelenmiştir. Tehlikeli zehirli-kimyasal atıkların yeraltında, özellikle tuz formasyonlarında, depolanması ve bu amaçla yeraltı madenlerine ait alt yapıların jeoteknik açıdan değerlendirilmesi konusunda ise çeşitli yayınlardan bilgi alınabilir (DGGT, 1993; ITA, 1994; Özarslan ve Gerçek, 1998).

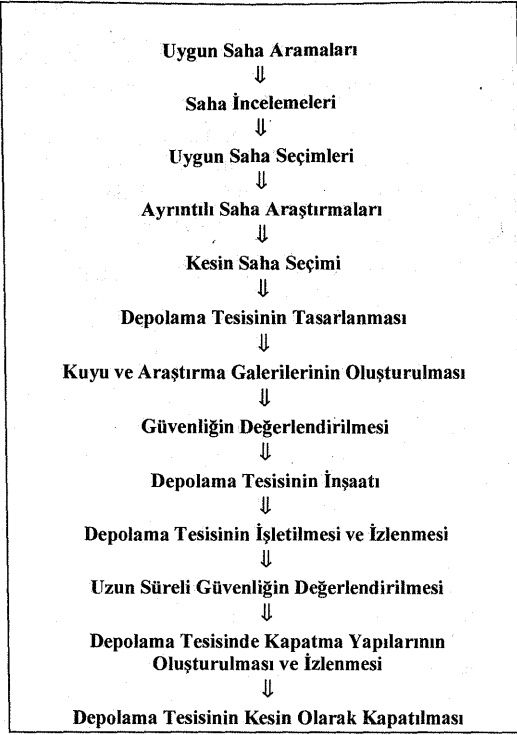
Radyoaktif atık depolamada kristalli kaya kütlelerinin tercih edilmesinin bazı nedenleri daha önceki bölümlerde açıklanmıştır. Bu kaya kütlelerinin depolama ortamı olarak kaya mekaniği ve mühendisliği açısından sağladığı önemli avantajlar arasında; derinliğin artmasıyla birlikte genelde geçirgenliklerinin azalması, ortamda etkili olan gerilmelere karşı yüksek mekanik dayanım ve sınırlı deformasyon oluşumu, işletme süreleri boyunca yeraltı açıklıklarının tahkimatsız olarak duraylılıklarının sağlanması sayılabilmektedir. Bu kaya kütlelerinin atık depolamak açısından önemli dezavantajları ise, genelde az veya çok süresizliklerle sınırlandırılmış olmaları ve

belirlenmesi güç olan eklem ve çatlak sistemlerine içermeleridir. Bu durum, zararlı maddelerin iletilme olasılığı açısından çok önemli olan, kaya kütlelerinin gerçek geçirgenliklerinin belirlenmesinde büyük güçlüklerle yol açmaktadır.

Uzun ömürlü radyoaktif atıklar için özel amaçlı atık depolama tesislerinin tasarlanması ve gerçekleştirilmesi, kaya mühendisliğinde aşılması gereken sorunlar ve yaşanan zorluklar açısından emsalsiz olarak değerlendirilmektedir (Hudson, 1999). Göz önünde tutulması gereken uzun zaman dilimi nedeniyle, olayların ve olası senaryoların, arazi verileri de kullanılarak sayısal yöntemlerle modellenmesi gerekmektedir. Depo işlevini ve güvenliğini karşılıklı olarak etkileyen çeşitli faktörlerin varlığı, gerçeğe yakın modellerin oluşturulabilmesi için birleşik modellerin (mekanik-hidrolik-termal-kimyasal) kullanımını zorunlu kılmaktadır (Hudson, 1999; Stephansson, 1999; Piet ve Blümling, 2000). Bu durum ise uygulamada büyük sorunlara yol açmaktadır. Yine örneğin jeoteknik engel yapılarının oluşturulmasında yapay malzemelerin (çimento, katkı malzemeleri vb.) uzun süreli dayanıklılığı ve davranışlarının yeterli güvenilirlikte tahmin edilememesi nedeniyle, ancak doğal olarak oluşan malzemelerden (kil, bentonit) faydalanılması gerekmektedir (Pusch, 1994; Gerhardt vd., 1997). Bu durum aynı zamanda, yapay malzemelerden faydalanılamaması nedeniyle, yeraltı açıklıklarının duraylılığının tahkimatsız olarak sağlanması koşulunu yaratmaktadır.

Bu tür depolar için saha seçiminin nispeten özel olarak yapılabilmesi, tasarım açısından en ideal durumu oluşturma imkanını yaratırken, sahaya ait yeraltı verilerinin (jeolojik süresizlikler, kaya kütlesi özellikleri vb.) eksik olması ve deneyim bulunmaması güçlükler yaratmaktadır. Bu nedenle, bu tür tesislerin tasarlanması ve gerçekleştirilmesi hem uzun zaman almakta hem de büyük maliyetlere yol açmaktadır. Şekil 6'da özel amaçlı bir yeraltı atık depolama tesisinin işletmeye alınması ve daha sonra kesin olarak kapatılmasına kadar geçilmesi gereken aşamalar, basitleştirilmiş olarak, bir akım şeması şeklinde verilmiştir.

Saha aramaları ve incelemeleri aşamalarında; bölgeyle ilgili jeolojik, hidrojeolojik, topoğrafik vb. veriler, jeofizik ölçümler ve sondajlar aracılığıyla sahanın uygunluğu değerlendirilmeye çalışılır. Sondajların, depodan ileride bir zararlı madde iletim yolu oluşturmaması açısından, koşullar elverdiğince kuyuların açılacağı yerlerde yapılmasının büyük faydası vardır. Potansiyel olarak uygunluğu belirlenen sahalarda daha sonra ayrıntılı araştırmalara karar verilmektedir.



Şekil 6. Özel amaçlı bir yeraltı atık depolama tesisinin oluşturulmasında faaliyet aşamaları.

Yeraltı kaya mekanîği araştırmaları aslında sondajlardan elde edilen örneklerin incelenmesi ve sondaj kuyusu içerisinde gerçekleştirilebilen ölçümler ile başlamaktadır. Sondajların açılmasıyla, kesilen jeolojik birimlere ait kaya malzemesi ve kütlesi özellikleri belirlenebilmektedir. Sondaj kuyusu aracılığıyla ayrıca, hassas olmamakla birlikte, dolaylı olarak ortalama birincil gerilmeler, süreksizlikler, geçirgenlikler gibi özellikler saptanabilmektedir. Bu verilerden sayısal modellerin oluşturulması ve geliştirilmesinde yararlanılır. Ancak, bu veriler sınırlı bir bölgeyi temsil etmektedir ve ortalama değerlerdir. Örneğin; birincil gerilme dağılımı, konuma göre önemli farklılıklar gösterebilmektedir. Benzer şekilde, zararlı maddelerin iletimi için su içeren katmanlarla (eklemler aracılığıyla) tek bir bağlantının bile yeterli olması nedeniyle, jeolojik katmanların hidrojeolojik açıdan ortalama geçirgenliklerinin belirlenebilmesi, ancak genel bilgiler sağlayabilmektedir. Bu aşamada edinilen bilgiler, sahanın uygunluğunun daha ayrıntılı olarak değerlendirilmesi ve araştırmalara

devam ediliş edilmeyeceği kararının alınması üzerinde etkilidir.

Yeraltı atık depolarının uzun süreli güvenliği; ancak deneyimler, gözlenen jeomekanik olayların kavramsal modellenmesi, atık-depo yapısı ve çevre kaya formasyonu ile zararlı madde iletimini engelleyecek jeoteknik engellerin (işletme sırasında ve işletme sonrası dönemlerdeki) duraylılıkları ile geçirgenliklerinin sayısal yöntemlerle tahmin edilmesiyle değerlendirilebilmektedir. Elde edilen jeolojik, hidrojeolojik, jeomekanik vb. veriler ve değerlendirmeler, sahanın uygunluğunu desteklediği zaman, yeraltı radyoaktif atık depolama projelerinde bir ileri aşama olan kuyu ve araştırma galerilerinin açılmasına karar verilmektedir. Yerinde (arazide) gerçekleştirilen kaya mekanîği araştırmalarının bu aşamadan sonra kapsamı ve önemi artmaktadır (Riekkola ve Salo, 1999).

Uzun ömürlü radyoaktif atıklar için yeraltında depolama seçeneğini ön gören bazı ülkelerde, kesin saha seçimleri yapılmış olup, halen çalışmalar buralarda özel olarak oluşturulmuş yeraltı araştırma laboratuvarlarında devam etmektedir. Bu laboratuvarlardan bazıları depolamanın ön görüldüğü sahalarda işletilirken, bazıları da olası saha koşullarına yakın özelliklere sahip bölgelerde açılmış durumdadır. Kristalli kaya kütlelerinde oluşturulan önemli yeraltı araştırma laboratuvarları olarak; İsveç'teki "Aspö Sert Kaya Laboratuvarı," İsviçre'deki "Grimsel Kaya Laboratuvarı" ve Kanada'daki "Yeraltı Araştırma Laboratuvarı (URL)" sayılabilmektedir.

Yeraltı radyoaktif atık depolama projeleri için oluşturulan yeraltı laboratuvarlarında, kaya mekanîği ve kaya mühendisliği açısından önemli olan başlıca araştırmalar şu şekilde sıralanabilir (DGGT, 1994; Pusch, 1994; Riekkola ve Salo., 1999; Stephansson, 1999; Autio ve Salo, 2000):

- Kaya kütlesi özelliklerinin belirlenmesi
- Eklem ve süreksizlik sistemlerinin tespiti ve geçirgenlik ile ilişkileri
- Birincil gerilmelerin yerinde ölçümü
- Açıklık çevresinde oluşan deformasyonların ölçümü
- Açıklık çevresinde gerilmelerin yarattığı yenilme bölgelerinin incelenmesi
- Farklı kazı yöntemlerinde, açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgelerinin tespiti
- Açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgelerinin kaya kütlesinin geçirgenliğine etkisi
- Kaya kütlesinin ısı etkisi altındaki davranışı
- Kapatma yapılarında kullanılması öngörülen malzemelerin gerçek ortam koşulları altında davranışlarının incelenmesi

- Jeoteknik engel oluşturacak kapatma yapılarının (baraj, dolgu vb.) geliştirilmesi ve denenmesi
- Jeoteknik engeller ile çevre kaya kütleli etkileşimlerinin izlenmesi ve değerlendirilmesi

Burada, gerçek koşullar altında elde edilen veriler yardımıyla, oluşturulan sayısal modellerin doğruluğu değerlendirilmekte ve modellerin geliştirilmesiyle de olası hata kaynakları giderilmeye çalışılmaktadır. Bunun dışında, bu tür araştırma laboratuvarları, geliştirilen depolama teknolojilerinin gerçek koşullarda denenmesini ve depolama tesislerinde görev alacak personelin gerçek ortam koşullarında eğitilmesini sağlamaktadır.

Kaya mekaniği araştırmaları, projelendirilen depoların farklı aşamalarında değişik önemlere sahiptir. İşletme öncesi aşamada gerçekleştirilen birincil gerilme ölçümleri, depoların yer seçiminde ve özellikle derinliklerin belirlenmesinde önemlidir. Yüksek gerilme yığılmalarının ve önemli derecede anizotropik gerilme durumlarının hakim olduğu bölgelerden kaçınılmaya çalışılmaktadır (Pusch, 1994). Ayrıca, ortamdaki etkili gerilme dağılımı; tasarım aşamasında, depolama açıklıklarının konumunun ve şeklinin belirlenmesi üzerinde etkilidir (Piet ve Blümling, 2000). İşletme aşamasında aranan en önemli özellik, işletme güvenliği için yeraltı açıklıklarının istenilen duraylılığı sağlayabilmeleridir (Autio ve Salo, 2000). Bu durumda, kaya kütlelerinin özellikleri ve ikincil gerilme dağılımı etkilidir. En önemli aşamayı temsil eden işletme sonrası aşamada ise engel yapılarının zararlı maddelere karşı koruma özelliklerinin uzun süreli olarak sağlanması önemlidir. Bu aşamada, depolama ortamından dışarıya bir zararlı madde çıkışına olanak tanıyabilecek durumların önlenmesi önemlidir. Kaya mühendisliği yapılarından muhtemel bir zararlı madde çıkışı, ya depolama açıklıkları çevresinde oluşan yenilme bölgeleri nedeniyle ya da jeoteknik engellerin (baraj, dolgu) işlevlerini yitirmesiyle oluşabilmektedir (Olsson, 2000; Piet ve Blümling, 2000). Bu nedenle, depolama açıklıkları öyle tasarlanıp inşa edilmelidir ki; yenilmeler nedeniyle geçirgenliği artmış olan bölge, çevre kayanın jeolojik engel işlevini etkilememelidir. Yine jeoteknik engellerin, hem tasarımı ve hem de malzeme seçimi ile bunların çevre kaya etkileşimi, uzun süreli geçirimsizliği etkileyecek boyutta deformasyonların oluşmasını önlemelidir. Bunun yanında, çevre kayada oluşan deformasyonlar jeoteknik engellere zarar verecek boyutta oluşmamalıdır (Pusch, 1994, 2000).

Yeraltı radyoaktif atık depolarının tasarımı, işletilmesi ve işletme sonrası güvenliğinin sağlanmasında kaya mekaniği araştırmalarının

sağladığı bulgular ile kaya mühendisliği deneyimleri çok önemli bir yer tutmaktadır. Bu araştırmaların bir diğer önemi ise, edinilen bilgilerin aynı zamanda kaya mekaniği bilimine ve zor koşullar altında gerçekleştirilen kaya mühendisliği yapılarının (tüneller, madencilik vb.) tasarlanması ve inşaatına büyük katkılar sağlamasıdır. Aynı şekilde, tünellerde ve yeraltı hidrolik santralleri gibi (zor koşullar altında gerçekleştirilen) kaya mühendisliği yapılarının inşaatı ve işletilmesinde kazanılan bilgi ve deneyimler de, yeraltı radyoaktif atık depolama projelerinin tasarlanmasına ve gerçekleştirilmesine önemli katkılar sağlamaktadır.

#### 4. TEHLİKELİ ATIKLARIN YERALTINDA DEPOLANMASININ GELECEĞİ

Yeraltında tehlikeli atıkların depolanması konusunda araştırmalar 1970'li yıllarda başlamıştır. Günümüze kadar konunun teknik açıdan çözümünde önemli gelişmeler kaydedilirken diğer alanlarda ise gerileme olmuştur. Depolanacak atıkların risklerinin fazla olması, projelerin maliyetlerinin çok fazla olması ve uzun süreli güvenliğin ancak bugünkü teknik bilgiler düzeyinde garanti edilebilmesi nedeniyle, bu depolara karşı oluşan tepkide önemli artışlar olmuştur. Diğer sorunların yanında, kesin depolama sorununun henüz çözülmemiş olması, bir çok ülkede nükleer enerjiden vazgeçme düşüncesini ortaya koymuştur. Buna rağmen, nükleer reaktörlerin faaliyetlerinin sona erdirilmesi durumunda bile, oluşmuş atıkların ortadan kaldırılması sorunu geçerliliğini korumaktadır. Bu durum, sürdürülebilir kalkınma için önemli bir engel oluşturmaya devam etmektedir.

Tehlikeli atıkların yeraltında depolanmasında unutulmaması gereken önemli bir husus da konunun yalnızca teknik değil, aynı zamanda politik ve sosyal içerikli olmasıdır. Teknik olarak konunun çözümünün mümkün görülmesiyle birlikte, geniş toplum kesimleri tarafından bu görüş henüz yeterince benimsenmemektedir. Günümüzde birçok proje, toplumsal tepkiler ve politik organların kararsızlığı nedeniyle durma aşamasına gelmiştir. Bu nedenle bu tür projelerde, toplumsal kuruluşların bilgilendirilmesi ve karar verme sürecine dahil edilmesi her zaman büyük önem taşıyacaktır.

#### 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, tehlikeli atıkların yeraltında kesin olarak depolanması projelerinde gelinen aşama

gösterilmiştir. Önce, yeraltında depolanması öngörülen tehlikeli atıklar ile bu alanda devam etmekte olan önemli projeler ve tesisler kısaca tanıtılmıştır. Sonra, kaya mekanığı araştırma ve çalışmalarının, projelerin gerçekleştirilmesindeki önemi değerlendirilip, uygulamada karşılaşılan bazı teknik güçlükler açıklanmıştır. Çalışmanın sonunda da konunun gelecekteki önemi belirtilmiştir.

## TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu konunun araştırılmasına verdikleri burs ile olanak tanıyan Alman Akademik Değişim Servisi'ne (DAAD), gösterdikleri yakın ilgi ve yardımlardan ötürü Aachen Teknik Üniversitesi Maden İşletme Enstitüsü Başkanı Prof. P.N. Martens'e ve ilgili birimdeki diğer tüm elemanlara teşekkür etmeyi borç bilirler.

## KAYNAKLAR

- Autio, J. and Salo, J.P. 2000 Tests in Olkiluoto Research Tunnel and Their Importance for the High-Level Nuclear Waste Repository Project in Finland. *Proc. of the EUROCK 2000 Symp.*, DGGT, Verlag Glückauf GmbH, Essen: 125-130.
- Baadsto, J.S. 2000 Himdalen Repository-Storage Facility for Low and Intermediate Radioactive Waste. *Proc. of the EUROCK 2000 Symp.*, Verlag Glückauf GmbH, Essen: 347-353.
- Boyle, W.J. and Datta, R.N. 1999 A Potential High-Level Nuclear Waste Repository at Yucca Mountain. *ISRM News Journal*, 6(1): 44-49.
- DBE 1995 *Endlager- und Deponieprojekte Weltweit: Planung, Bau und Betrieb*, Peine, 30 s.
- DGGT 1993 Geotechnik der Untertagedeponierung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen im Salzgebirge. *Bautechnik*, 12: 734-744.
- DGGT 1994 Felshohlräume zur Verbringung von Rest- und Abfallstoffen. *Bautechnik*, 5: 242-264.
- Dials, G.E. 1997 Opening the United States' First Nuclear Repository. *Felsbau*, 15: 435-439.
- Dörhöfer, G., Thein, J. und Wiggering, H. 1993 *Untertägige Entsorgung bergbaufremder Rückstände in Deutschland*, Ernst&Sohn, Berlin.
- Drescher, J. 1997 *Deponiebau*, Ernst&Sohn, Berlin.
- European Community 1999 *Commission Recommendation on A Classification System for Solid Radioactive Waste*, 1999/669/EC, Brussels.
- Fairhurst, C. 1993 Geological Isolation of Radioactive Waste: A Challenge That Must Be Met. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 8: 313-314.
- Gerhardt, H., Sitz, P., Wilke, F.L. und Wolff, H. 1997 Zum Problem der Langzeitsicherheit von Untertagedeponien. *Glückauf*, 133: 337-342.
- Han, K.W., Heinonen, J. and Bonne, A. 1997 Radioactive Waste Disposal: Global Experience and Challenges. *International Atomic Energy Agency Bulletin*, 39/1.
- Hudson, J.A. 1999 Guest Editorial. *ISRM News Journal*, 6(1): 10.
- ITA 1994 Underground Repositories for Non-Nuclear Waste: Considerations for Engineering Design. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 9: 461-469.
- Lempert, J.P. 1999 Geological Disposal of Radioactive Waste - the Basis of the German Waste Management Concept. *Proc. of Int. Cong. Mining for Tomorrow's World*, Verlag Glückauf GmbH, Essen: 243-246.
- Matthews, M., Hansen, F. and Rempe, N. 2000 Deep Geological Isolation at the WIPP. *Proc. of the EUROCK 2000 Symp.*, Verlag Glückauf GmbH, Essen: 95-100.
- Martens, P.N. 2000 *Kişisel Görüşme*. Institut für Bergbaukunde I, RWTH, Aachen.
- Olsson, O. 2000 Underground Storage for Nuclear Waste in Sweden. *Proc. of the EUROCK 2000 Symp.*, Verlag Glückauf GmbH, Essen: 117-124.
- Özarslan, A. ve Gerçek, H. 1998 Endüstriyel Atıkların Yeraltı Madenlerinde Depolanması ve Depo Duraylılığının Jeoteknik Açısından Kanıtlanması. 4. *Ulusal Kaya Mekanığı Semp. Bildiriler Kitabı*, TUKMD, Zonguldak: 147-158.
- Piet, Z. and Blümling, P. 2000 Rock Mechanics in the Development of Radioactive Waste Repositories in Switzerland. *Proc. of the EUROCK 2000 Symp.*, Verlag Glückauf GmbH, Essen: 111-115.
- Pusch, R. 1994 *Waste Disposal in Rock*. Developments in Geotechnical Engineering 76, Elsevier, Amsterdam.
- Pusch, R. 2000 Highly Compacted Bentonite for Isolation of Radioactive Waste in Crystalline Rock - A Matter of Soil and Rock Mechanics. *Proc. of the EUROCK 2000 Symp.*, Verlag Glückauf GmbH, Essen: 149-155.
- Riekkola, R. and Salo, J.P. 1999 Rock Engineering and Technical Design of the Finnish High Level Nuclear Waste Repository. *ISRM News Journal*, 6(1): 15-17.
- Stephansson, O. 1999 Rock Mechanics Research for Radioactive Waste Disposal in Sweden. *ISRM News Journal*, 6(1): 44-49.
- Volkmer, M. 1998 *Radioaktivität und Strahlenschutz*. Informationskreis Kernenergie, Bonn.

## **TÜRKİYE'DE KAYAÇ VE KÖMÜR KESMEDE KULLANILAN MEKANİK KAZI MAKİNELERİNİN PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

### **AN APPRAISAL OF MECHANICALLY ROCK AND COAL EXCAVATING MACHINES EMPLOYED IN TURKEY**

**O.Z. HEKİMOĞLU**

**M. AYHAN**

Dicle Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, DİYARBAKIR

**B. TIRYAKI**

Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Beytepe, ANKARA

**ÖZET:** Bu bildiride Türkiye'deki madencilik ve inşaat sektöründe kullanılan ve mekanik kesme yapan kazı makinelerinin performanslarının değerlendirilmesi anlatılmaktadır. Daha çok galeri açma makineleri ve tamburlu kesiciler ağırlıklı olan bu makineler üzerinde performanslarının artırılması için yapılan çalışmalar verilmiştir. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlardan, ülkemizde kullanılan bu tip makinelerin kesici kafaları yada tamburların tasarım düzeninin yetersiz oldukları sonucuna varılmıştır.

**ABSTRACT:** This paper outlines the performance evaluation of mechanically rock and coal excavating machines employed in Turkish mining and civil engineering industry. The machines mainly roadheaders and drum shearers are described the studies conducted on improving the overall cutting performance. Based upon these studies concluded that machines of these type, exhibit lower performance due to insufficient cutting head or drum desing as evident from poor cutting performance observed in practice.

#### **1. GİRİŞ**

Keski yada kesici uç kullanarak mekanik kesme yapan kayaç ve kömür kazı makineleri madencilik ve inşaat sektöründe önemli kullanım yerine sahiptir. Kullanışlı ve ekonomik olmaları nedeniyle kısmi cepheli kazı makineleri (galeri açma makineleri (GAM)) günümüzde yumuşak ve orta sertlikteki kayaç malzemelerinin kazısında başarı ile kullanılmaktadır. Bu makineler (Roadheaders, boom tunneling machines) daha çok madencilikte hazırlık galerilerinin yanı sıra, inşaat sektöründe demiryolu ve karayolu tünelleri ile metro tünellerinin açımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca madencilikte özellikle yeraltı kömür üretiminde tamburlu kesiciler vazgeçilmez kazı makineleri olarak bilinirler. Anılan bu kazı makinelerinden başarılı performans elde etmek için bazı faktörlerin gözetilmesi gerekmektedir. Önce kazılacak formasyona uygun iyi bir makina seçiminin yapılması gerekir. Bundan sonra, seçimi yapılan makineden istenilen verimin alınabilmesi için kazı işlemini etkileyen diğer makine ve işletme parametrelerinin dikkate alınması söz konusu olmaktadır. Aksi taktirde uygun makine

seçiminin anlamı ortadan kalkar. Kazı makinelerinin performansı makine, kayaç ve işletim faktörleri gibi bütünlük oluşturan öğelere bağlıdır. İyi bir makine performansı için kullanıcının bu konuda yeterli bilgi ve deneyim birikimine sahip olması gerekir.

Ülkemizde mekanik kesme yapan kazı makinelerinin kullanımı 1970 li yıllarda GAP çerçevesindeki Urfa sulama tünellerinin açımı sırasında kullanılmış ve bugüne değin başta kömür madenciliği olmak üzere çeşitli sektörlerle uzanan geniş bir yayılım göstermiştir. Ancak bu kullanım süreci incelendiğinde bu makineler ile ilgili uygulamada bilgi ve deneyim eksikliğinden kaynaklanan bazı sorunların var olduğu görülmektedir. Özellikle makine tasarımında dünyada halen bazı eksiklikler bulunmaktadır. Anılan bu sorunların anlaşılıp uygun çözümlerle giderilmesi kazı mühendisliğine kuşkusuz önemli katkılar sağlayacaktır.

Bu makalede ülkemizde kullanılmakta olan galeri açma makineleri (GAM) ve tamburlu kesici gibi bazı mekanik kazı makineleri ile ilgili uygulamada karşılaşılan sorunlar ortaya konularak bunlara getirilen çözümler verilmekte ve ülkemiz koşullarında bu tür makinelerden verimli çalışma

elde etmek için nelerin yapılması gerektiği konuları tartışılmaktadır.

## 2. MEKANİK KESME YAPAN KAZI MAKİNELERİNİN PERFORMANSLARI VE BUGÜNKÜ DURUM

Mekanik kazı makinelerinin performansları uygun kayac koşullarına uygun makine seçimi, makine tasarımı, işletme koşulları ve kazı işleminin tahkimat, nakliye ve havalandırma gibi birim işlemlerle olan etkileşimi gibi faktörlere bağlıdır (Fowell ve Johnson, 1982). Makine kullanıcısı açısından daha çok işletme ve makine tasarımı ile ilgili konular öne çıkmaktadır. Kazı ortamındaki anılan birim işlemlerle bütünlük sağlamış olan bir makinenin değişen kazı koşullarına göre uygun hale getirilmesi gerekir. Bu konuda makinenin kesici kafa tasarımı ve kesici uçların tipi büyük önem taşımaktadır. Ancak bugüne kadar yapılan araştırmalarda kullanıcı yönünden olduğu kadar makine imalatçısı açısından bazı eksikliklerin var olduğu anlaşılmakta ve bu durum çeşitli sorunlara yol açmaktadır.

Ülkemizde özellikle tünelcilikte ve yeraltı maden işletmeciliğinde kısmi cepheli galeri açma makineleri (GAM) ve tamburlu kesiciler kullanılmaktadır. Bu makinelerin kesici kafaları yada kesici tamburlarının tasarım şekli işletme safhasında çok önem taşımaktadır. Yeterli güçteki bir GAM ile çalışılırken, değişen kaya formasyonları uygun kesici kafalar kullanılarak kazılabilir.

Kesici kafa yada tambur tasarımında egemen olan parametreler bu güne değin yapılan çalışmalarla ayrıntılı olarak belirlenmiştir (Hurt, 1980; Hekimoğlu, 1984). Ancak buna karşın uygulamada özellikle makine tasarımında imalatçı firmalardan kaynaklanan bazı eksiklikler bulunmaktadır. Bu eksiklikler ülkemizde daha önce TKİ'ye bağlı olan OAL İşletmesinde yapılan geniş ve uzun vadeli çalışmalarla araştırılmış ve bu konuda önemli bulgular elde edilmiştir. Bu araştırmaların ayrıntıları ilerdeki bölümlerde verilmiştir.

Ülkemizde ilk galeri açma makinesinin kullanımı Şanlıurfa Sulama Tünellerinin açılması sırasında başlamıştır. Ancak çok geniş ve önemli ölçüde yaygınlaşmaları TKİ Kurumuna bağlı OAL İşletmesinde oluşmuştur. Bu işletmede çeşitli tipte GAM ve tamburlu kesiciler kullanılmaktadır. Daha sonra büyük kentlerde metro ve kanalizasyon tünellerinin açımında çeşitli makine kullanımı söz konusu olmuştur.

Yeraltında kullanılan mekanik kazı makinelerinin yanı sıra ülkemizde Afşin Elbistan Linyit İşletmesinde döner kepçeli kazıcılar açık ocak işletmeciliğinde de kullanılmaktadır.

## 3. TÜRKİYEDE MEKANİK KAZI MAKİNELERİNİN PERFORMANSLARININ ARTIRILMASI KONUSUNDA YAPILAN BAZI ÇALIŞMALAR

Türkiye'de özellikle madencilik sektöründe geniş bir kazı makinesi kullanımı söz konusudur. Bu bölümde verilen çalışmalar TKİ kömür havzasındaki OAL İşletmesinde yapılan araştırma sonuçlarını kapsamaktadır.

### 3.1. Galeri Açma Makineleri ile Yapılan Performans Çalışmaları

OAL İşletmesinde galeri açma makineleri 1970'li yılların sonlarında o dönemle Sovyetler Birliğinden alınan dört adet Pk9r tipi makinelerle başlamış ve daha sonra bunları üç adet İngiliz yapımı Dosco Mk2A ve beş adet Mk2B makineleri izlemiştir. Bu makineler daha çok damar içi galerilerinin açımında kullanılmıştır.

Sovyet Pk9r GAM'ları daha çok kömür gibi yumuşak formasyonların açımında kullanılmıştır. Daha sonra bunlarla nispeten sert formasyonların kazısı yapılmış ancak başarılı olunamamıştır. Bütün bunların iyi bir kesici kafa tasarımının eksikliğinden ileri geldiği anlaşılmış ve bunun üzerine bu bildirinin birinci yazarı tarafından yeni bir kesici kafa tasarımı yapılarak yeraltında denenmiş ve eski kesici kafalara göre çok yüksek bir performans elde edilmiştir. Buna göre 16 m<sup>2</sup> kazı kesitli galerilerdeki 1m ilerlemeye karşı gelen kesici uç sarfiyatı 3.39 adet'den 0.69' a inerek kesici kafa ömrü ise yaklaşık % 300 artış göstermiştir (Hekimoğlu ve Fowell, 1990a). Bu çalışmalar uygun kesici kafa kullanımının makine performansı üzerinde ne kadar önemli olduğunu açıkça ortaya koymuştur.

OAL'de damar içi galerilerinin açımı sırasında sert ve kalın bir ara kesme oluşturan marn malzemesinin Dosco Mk2B makinesinin performansını olumsuz olarak etkilediği görülmüştür. Kazı kesitinin 16 m<sup>2</sup> olduğu bu tür galeride, radyal tipteki kesici uçlarla donatılan mevcut kesici kafalarla sert ara kesme içersinde delme-patlama ile gevşeme yapılmasına karşın bir vardiyedeki ilerleme ancak 1m olarak gerçekleşmiştir. Yine bu 1m lik ilerlemeye karşı gelen radyal tipteki kesici uç sarfiyatı ise 8 adet

civarında oluşmuştur. Bunun üzerine, radyal keskilere yerine konik uçlu keskilere dönüşen bir kesici kafa yapılarak aynı yerdeki kazı işlemleri sırasında denenmiştir. Bunun sonucunda delme-patlatma ile gevşetme işlemi ortadan kalkarak vardiyedeki ilerleme iki metreye çıkmış ve kesici uç sarfiyatı ise 1.2 adete inmiştir (Hekimoğlu, 1990). Bu çalışma normal koşullar altında, değişen formlara karşı kullanıcı tarafından yapılması gereken müdahalenin önemini ortaya koymaktadır. Görüldüğü gibi yalnızca kesici uç kullanımı ile ilerleme iki katına çıkarak keski sarfiyatı yüksek düşüş göstermiş ve delme-patlatma gibi ikinci bir işleme hiç gerek duyulmamıştır.

OAL İşletmesinde imalatçı firmaların sağladığı orijinal kesici kafalardaki konik uçlu keskilere ve bunları sabitleyen keski tutucular üzerinde önemli aşınmaların olduğu ve bu durum karşısında sık sık kesici kafanın değişmesine gidiği gözlemlenmiştir. Bunun üzerine yapılan araştırmalar sonucu bu sorunun radyal hat diye tabir edilen ve bu güne dek bilinmeyen bir parametreden kaynaklandığı ortaya çıkarılmıştır. Bu parametrenin hayata geçirilmesi sonucu anılan sorunlar önemli ölçüde giderilmiştir (Hekimoğlu, 1995; Hekimoğlu, 1998). Bulunan bu bulgu aynı zamanda sondaj kuyularının ve patlatma deliklerinin açılmasında kullanılan döner tipli darbesiz delme matkaplarının tasarımı içinde kullanılabilir. Bu çalışmalarından elde edilen başarılar üzerine söz konusu GAM'ların orijinal kesici kafa tasarımları terkedilerek yeni geliştirilen tasarım şekli kullanılmıştır.

### 3.2. Tamburlu Kesicilerle Yapılan Performans Çalışmaları

Ülkemizde yeraltı mekanize kömür üretiminin ilk kez OAL Müessesesinde yapılması geniş anlamda tamburlu kesicilerin kullanımını da beraberinde getirmiştir. İlk etapta toplam yedi adet Eickhoff EDW-230 çift tamburlu kesiciler üretim çalışmaları için alınmıştır. Üretim panolarının tavan kömüründeki sert ve aşındırıcı silis yumrularının (sileks) etkisiyle bu makinelerin tambur ön gövdeleri kısa sürede önemli ölçüde tahrip olmuş ve yüksek keski sarfiyatı ortaya çıkmıştır. Anılan sorunlar tamburların arın plakası diye adlandırılan ve daha çok köşe kesicilerin bulunduğu kısımda ortaya çıktığından, bu plaka üzerinde bazı değişikliklerin yapılmasına karar verilmiştir. Bunun üzerine bu bildirinin birinci yazarı tarafından tamburun bu kısımdaki keskilere düzeni değiştirilerek yeni bir

tasarım şekli kullanılmıştır. Yeni tamburlar yeraltında denendiğinde, bir adet kesici uca karşı gelen kömür üretim miktarı eski orijinal tamburlara göre yaklaşık % 300 oranında bir artış göstermiştir (Hekimoğlu, 1991).

Tamburların arın plakası üzerinde yapılan çalışmalardan sonra yine aynı yazar tarafından geliştirilen ve bu kez tüm tambur üzerindeki spiral keskilere de içeren yeni bir tasarım değişikliğine gidilmiştir. Bu değişiklikler sırasında yalnızca tambur üzerindeki keskilere yerleri ve konumları değiştirilip, tambur boyutu ve spiral düzeni gibi pahalı işlemler gerektiren kısımlara hiç dokunulmamıştır.

Uzun vadeli yapılan çalışmalar sonucunda yeniden tasarlanan tamburlardan orijinal tamburlara göre çok başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Buna göre tamburların zor koşullardaki kazı hızı % 122 oranında artarak tambur ömrü % 55'e yükselmiş ve keski sarfiyatı % 45 oranında azalmıştır (Hekimoğlu, 1997; Hekimoğlu ve Tiryaki, 1998).

Yeni tamburların tasarımları sırasında bu bildirinin ilk yazarı tarafından geliştirilen ve kazı literatüründe ilk kez ortaya atılan "çevresel aralık düzeni" kavramı kullanılmıştır (Hekimoğlu ve Fowell 1990b). Bu kavramın uygulanmasıyla makine arızalarından kaynaklanan duruşlarda %30 oranında düşüş olmuştur. Makine arızalarının tamburlu kesicilerde daha çok kesme titreşimlerinden ileri geldiği göz önüne alınırsa, geliştirilen bu yeni kavramın makinedeki kazı titreşimlerinin en aza indirilmesi açısından önemli bir faktör olduğu ortaya çıkmaktadır. Nitekim bu durum söz konusu tamburlar üzerinde yapılan bilgisayar destekli titreşim analizleriyle de net olarak kanıtlanmıştır (Hekimoğlu ve Tiryaki, 1997; Tiryaki ve Hekimoğlu, 1998).

Tamburlarda yapılan bu tasarım değişiklikleri ile tambur ömrü ve kazı performansının artışının yanı sıra, kazı sırasında ortaya çıkan solunabilir toz oluşumu ve üretilen kömürdeki kaba ve ince parçaların tane dağılımı açısından da çok önemli başarılar sonuçlar alınmıştır. Yapılan karşılaştırmalı ölçümler sonucunda özellikle sığ kesme koşullarında solunabilir toz miktarı önemli ölçüde düşmüş ve kazılmış malzeme içerisinde iri tanelerin miktarı artarken ince taneler ise önemli ölçüde düşüş göstermiştir. Anılan bu ölçümlerin sonuçları bu konudaki literatürde ayrıntılı olarak verilmiştir (Tiryaki, 1998). Bu bulgular daha sonra yapılan laboratuvar ölçekli çalışmalar ile teyit olunmuştur (Ayhan, 1998).

### 3.3. Döner Kepçeli Ekskavatörler

Döner kepeçli ekskavatörler açık ocak işletmeciliğinde kullanılan ve mekanik kesme yapan yüksek kapasiteli kazıcılardır. Ülkemizde Afşin-Elbistan Termik Santraline kömür sağlayan linyit ocaklarında önemli çapta kullanılmaktadır. Bu makinelerin döner çarkı üzerindeki kovalar kesme ve yükleme işini birlikte gerçekleştirirler. Kepçelerdeki kesme işlemi, ön kısımda sağ ve sol yönlere konumlandırılmış birer adet kesici uçlarla gerçekleştirilmektedir. Başlangıçta döner çarkın yükleme yapmasını sağlayan asimetrik konumu nedeniyle bu kesici uçlar yanlış konumlandırılmış ve keskilerde uysuz bir aşınma ortaya çıkmıştır (sağ keski az aşınırken sol keski aşırı şekilde aşınmıştır). Daha sonra bu durum farkedilerek gerekli düzenleme yapılmış ve bu sorun giderilmiştir.

Ancak Afşin-Elbistan Linyit ocaklarındaki bu kazıcıların döner çarkında aşırı gerilmeden dolayı çekme çatlakları oluşmuştur. Bu bildirinin yazarları söz konusu döner kepeçli ekskavatörlerdeki ana sorunun kazıcı kepeçlerdeki keskilerden ileri gelen aşırı yüklenmeden kaynaklandığı görüşüne sahiptirler. Sorunun çözümü için kepeç üzerindeki keskilerin dinamik ve kinematik açıdan analiz edilerek, en uygun bir konuma getirilmeleri gerekmektedir. Ancak bu konuda herhangi bir ayrıntılı çalışmanın varlığı henüz yoktur.

### 4. MEKANİK KAZI MAKİNELERİNİN ÜLKEMİZDEKİ BUGÜNKÜ DURUMU

Ülkemizde TKİ 'ye bağlı diğer işletmelerin yanı sıra OAL işletmesinin üretime açılan ve özel sektöre işletilen sahalarında önemli sayıda GAM ve tamburlu kesiciler çalışmaktadır. Bu makinelerin imalatçı firmalarca sağlanan tamburların tasarım şekli incelendiğinde OAL'ye ilk gelen orijinal tamburların keski tasarımları ile tamamen benzer olduğu anlaşılmıştır. Yani OAL 'deki orijinal tamburlarla karşılaşılan düşük kazı performansı, düşük tambur ömrü ve yüksek toz oluşumu gibi sorunlar büyük olasılıkla buradada aynı şekilde ortaya çıkmaktadır.

Yapılan incelemeler kömür üretiminde kullanılmalarının yanı sıra çeşitli amaçlarla açılan diğer tünellerdede kullanılan GAM'ların kesici kafalarında tasarım sorunlarının var olduğu anlaşılmıştır. Bu makinelerin kesici kafalarının en ön kısımlarında bulunan keskilere muhtemelen

yanlış konumlandırılması nedeniyle keski ve kesici uç tutucularda aşınmalar oluşmaktadır. Bu aşınmalar yalnızca kesici uç ve tutucularda tahribat oluşturmayıp makinenin kesme verimini de düşürmektedir. Ülkemizde şu anda çalışmakta olan ve yukarıda anılan mekanik kazıcılardan daha iyi verim alınabilmesi için, bu makineler üzerinde daha önce yapılan ve bu bildiride özet olarak sunulan çalışmalardan elde edilen deneyim ve bilgi birikiminden yararlanılması kuşkusuz çok yararlı olacaktır.

### 5-SONUÇ

Ülkemizdeki madencilik ve inşaat sektöründe kazı makinelerinin kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Özellikle kömür madenciliğinde GAM ve tamburlu kesici sayısı giderek artış göstermektedir. Buna karşın bu makinelerin kesici tamburları ve kesici kafalarının keski tasarım şekillerinin istenilen düzeyde olmadığı anlaşılmaktadır. Bu bildiride sunulan çalışmalar, anılan makinelerin kesici kafa veya tamburları üzerindeki keski dizilim düzeninin uygun şekilde yeniden düzenlemeleri ile makinenin genel kazı veriminde yüksek artış elde edilebileceğini göstermektedir. Sözü edilen sorunların giderilmesi için bu bildiride sunulan çalışmaların sonuçlarının dikkate alınması çok yararlı olacaktır.

### KAYNAKLAR

- Ayhan, M. (1998) Kesici kafa ve tamburların bilgisayar yardımıyla tasarımı. Doktora Tezi. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara.
- Fowell, R.J. and Johnson, S.T. 1982 Rock classification for rapid excavation systems. Symposium on Strata Mechanics. University of Newcastle Upon Tyne, England.
- Hekimoğlu, O.Z. 1984 Studies in the Excavation of Selected Rock Materials with Mechanical Tools. Ph.D. Thesis. University of Newcastle Upon Tyne, England.
- Hekimoğlu, O.Z. 1990. OAL'deki Galeri Açma Makinelerinde Kazı Performansının Artırılması için yapılan değişiklikler. Türkiye 7. Kömür Kongresi, Zonguldak.
- Hekimoğlu, O.Z. 1991 OAL Müessesesindeki tamburlu kesiciler ve karşılaşılan sorunlar. Türkiye Madencilik Bilim. ve Teknik 12. Kong., Ankara.
- Hekimoğlu, O., Z. 1995 The Radial line concept for

- pick lacing arrangement for radial pick cutting heads. *Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and geomechanical Abstracts*, Vol. 32 (1995), No.4, pp. 301-311.
- Hekimoğlu, O.Z. 1997 Impacts of Drum Design on the Performance of Coal Shearers. *Journal of Mines, Metals and Fuels*. Vol XLV, No. 9&10, Sept.-Oct. (1997).
- Hekimoğlu, O. Z. 1998 Investigations in to Performance of Point Attack and Radial Type Rock and Coal Cutting Picks. *Transactions of IMM Section A*. Vol. 107, pp. A55-A59, January, (1998), London.
- Hekimoğlu, O. Z., and Fowell, R. J. 1990a From research into practice In-situ studies for design of boom tunnelling machine cutting heads. *31 st U.S. Rock Mechanics Symposium*. June 1990, Colorado School of Mines, USA.
- Hekimoğlu, O. Z., and Fowell R. J. 1990b Theoretical and practical aspects of circumferential pick spacing on boom tunnelling machine cutting heads, *Mining Science and Technology*, 13(1991) 257-270 Elsevier Science Pub. B.V. Amsterdam
- Hekimoğlu, O.Z. and Tiryaki, B. 1997 Investigations into the Effects of Drum Vibration on the Performance of Coal Shearers. *Transactions of IMM*, Section A, Vol. 106, pp. A91-A94, August 1997, London.
- Hekimoğlu, O.Z. and Tiryaki B. 1998 In-situ Investigations on Shearer Drum Design. *CIM Bulletin*. Vol. 91, Number 1018, pp 225-228, (1998).
- Hurt, K.G. 1980 Roadheader Cutting Heads :A Study of the Layout of Cutting Tools and a Rational Procedure for Design. MRDE Report No: 90. England.
- Tiryaki, B. 1998 Tamburlu kesicilerde keski dizilim parametrelerinin optimizasyonu, Doktora Tezi. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara.
- Tiryaki, B. ve Hekimoğlu, O.Z. 1998 Mekanik kazı Makinalarında Kesme Titreşimi Analizi. *Madencilik*. Cilt 37, Sayı 3, pp 3-19, Eylül (1998).



## DARBELİ DELME PERFORMANS ANALİZLERİNDE KAYAÇ GEVREKLİKLİĞİNİN ROLÜ

### THE ROLE OF ROCK BRITTLINESS ON ANALYSIS OF PERCUSSIVE DRILLING PERFORMANCE

R. ALTINDAĞ

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fak., Maden Mühendisliği Bölümü, 32260, ISPARTA

**ÖZET:** Kayaçların delinebilirliğine etki eden bir çok kayaç özelliğinden birisi de kayacın gevrekliğidir. Kayaç gevrekliğinin artışı delme hızının artmasına diğer bir ifadeyle delme veriminin artmasına neden olacağı kabul edilmektedir. Buna karşın ise henüz kayaçların delinebilirlik analizlerinde kullanılan universal bir gevreklik ölçütü bulunmamaktadır.

Bu çalışmada, literatürde gevreklik ölçütü olarak kabul edilen iki tane gevreklik ölçütü ve yazar tarafından önerilen yeni bir gevreklik ölçütünün, darbeli delme performans analizlerinde kullanılabilirlikleri irdelenmiştir. Bu amaçla, çeşitli araştırmacılar tarafından arazide ve laboratuvar da yapılan delme analizlerinden elde edilen işlenmemiş deney verileri kullanılarak gevreklik ile darbeli delme hızı arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

Kullanılan diğer iki ölçüte nazaran, önerilen yeni gevreklik ölçütü ile darbeli delme hızı arasındaki ilişkiler çok daha anlamlı bulunmuştur. Önerilen bu gevreklik ölçütü kullanılarak, darbeli delme performans analizlerinde kayaç gevrekliğinin etkisinin daha somut gözlenebileceği görülmüştür.

**ABSTRACT:** The brittleness of rock is one of the most important rock properties that effect rock drillability. It is accepted that the increasing rock brittleness cause an increase in penetration rate of drilling efficiency. In this study, the useability of two brittleness measurements accepted in literature, together with a new brittleness concept that is suggested by the author were investigated in percussive drilling analyses. However, there is not a universally accepted definition and measurement principle for rock brittleness used in drillability analyses.

The relationships between brittleness and penetration rates were examined by using raw-data obtained from the test results of (applied in laboratory and in field) some experiments in the literature.

Results obtained from the new concept were found to be more reliable than the two other measurement factors, implying the impact of rock brittleness in percussive drilling performance analyses.

### 1. GİRİŞ

Kayacın delinebilirliğinin belirlenmesinde etkin olabilecek kayaç özelliklerinin rolünü belirlemek için arazi ve laboratuvar çalışmaları yapılmaktadır. Bir çok araştırmacı kayaçların delinebilirlik analizlerinde, darbeli delme hızları ile kayacın fiziksel özellikleri arasındaki ilişkileri incelemiştir (Schmidt, 1972; Paone vd, 1969; Tandanand ve Unger, 1975). Bugüne kadar yapılan çalışmalarda, kayacın bir tek özelliğini dikkate alarak delme hızlarının tahminini yapmanın sağlıklı neticeler vermediği görülmüştür. Çünkü, kayacın delinebilirliğine, kayacın fiziko - mekanik özelliklerinin yanı sıra mineralojik özellikler ve

jeolojik yapısı (makro-mikro süreksizlikler, tabakalanma durumu vb.) gibi diğer faktörler de etki etmektedir.

Kayacın önemli mekanik özelliklerinden biri olan gevrekliğin, delinebilirlik analizlerindeki etkinliğinde tam olarak açıklanamamıştır.

Kayaç gevrekliğini ölçmek için, literatürde çok sayıda gevreklik kavramı ve ölçütü kullanılabilmektedir. Ancak, genel olarak kayacın basınç dayanımının çekme dayanımına oranı olarak tanımlanan gevreklik ölçütü (B1) kullanılmaktadır. Bu çalışmada da, B1 gevreklik ölçütünün ve diğer iki gevreklik ölçütlerinin kayaç

delinebilirlik analizlerinde kullanılabilirlikleri irdelenmiştir.

## 2.GEVREKLİK

Kayacın bir mekanik özelliği olan gevreklik kavramının tanımı hala tam olarak yapılamamıştır. Kayaç gevrekliğini ölçen veya tanımlayan evrensel bir ölçüt veya kavram, standart hale getirilemediğinden, literatürde çok geniş şekilde gevreklik ölçütleri önerilmekte ve/veya kullanılmaktadır (Evans ve Pomeroy,1966; Reichmuth,1968; Selmer-Olsen ve Bleindheim, 1970; Hucka ve Das,1974; McFeat-Smith,1977; Becker vd.,1984; Singh,1986; Göktan,1988 ve 1992; Inyang ve Pitt,1990; Inyang,1991; Shimada ve Matsui,1994).

Bu çalışmada ise ele alınan gevreklik ölçütleri aşağıda verilmiştir.

1- Basınç dayanımının çekme dayanımına oranından gevrekliğin belirlenmesi,

$$B1 = \frac{\sigma_c}{\sigma_T} \quad (1)$$

2- Basınç ve çekme dayanımından gevrekliğin belirlenmesi,

$$B2 = \frac{\sigma_c - \sigma_T}{\sigma_c + \sigma_T} \quad (2)$$

3- Basınç ve çekme dayanımının çarpımından gevrekliğin belirlenmesi,

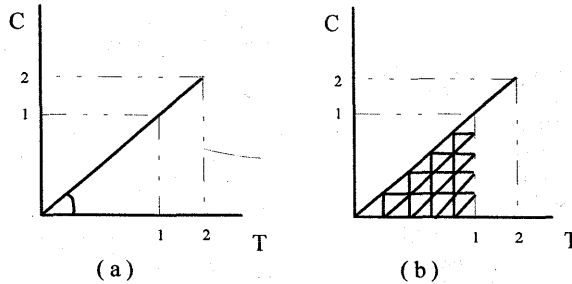
$$B3 = \frac{\sigma_c \times \sigma_T}{2} \quad (3)$$

Bu çalışmada incelenen, 1 ve 2 nolu eşitliklerde verilen B1 ve B2 gevreklik ölçütleri literatürde kullanılan gevreklik ölçütleri olup 3 nolu eşitlikle verilen B3 gevreklik ölçütü ise yazar tarafından önerilen gevreklik ölçütüdür.

Aynı B1 gevreklik değerine sahip farklı dayanım özelliği gösteren kayaçların kesilebilirlik/delinebilirlik işlemlerinde farklı spesifik enerji (SE) ve delme hızları elde edildiği bilinmektedir. Bu çalışmada da Çizelge 2'deki 1 ve 7 nolu kayaçlar, 2 ve 10 nolu kayaçlar aynı durumdadır.

Dayanımları farklı olan kayaçların hiç şüphesiz farklı gevreklik değerler göstermeleri beklenirken, aynı gevreklik değerini göstermeleri, B1 gevreklik ölçütünün sağlıklı bir gösterge olmadığını işaret etmektedir.

Kayacın B1 gevreklik değeri, basınç dayanımı - çekme dayanımı ilişkisi grafiğindeki ( Şekil 1-a ) doğrunun yatayla yapmış olduğu açının tanjant (tan θ)'ına eşittir. Aynı açı değerine sahip farklı dayanımdaki kayaçlar da aynı gevreklik değeri gösterebildiğine göre, kayacın mekanik mukavemetlerinin büyüklüğünün delme işlemindeki etkinliği gevreklik açısından yok gibi görülmektedir. Kayaçların mekanik mukavemetlerinin artması durumunda, delme hızlarının düştüğü bilindiğine göre, böyle bir gevreklik ölçütü kullanıldığında kayacın dayanım büyüklüklerinin gevreklik üzerine etkileri tam olarak irdelenememektedir. Bu durumda da B1 ve B2 gevreklik ölçütlerinin darbeli delme analizlerinde kullanılması sağlıklı görülmemektedir.



(1 : 1 nolu örnek kayacın dayanım değerleri; 2 : 2 nolu örnek kayacın dayanım değerleri)

Şekil 1. Basınç dayanımı - çekme dayanımı ilişkisi

Kayacın basınç dayanımı - çekme dayanımı ilişkisi doğrusunun eğimi (tan  $\theta$ ) (Şekil 1-a) yerine, doğrunun altında kalan alan (Şekil 1-b) dikkate alındığında, aynı B1 gevreklik değerine sahip iki kayacın farklı alanlara sahip olacağından bu alanların dikkate alınmasının daha güvenilir olacağı düşünülmektedir. Böylece, kayacın mekanik mukavemetlerinin gevreklik üzerine etkileri dikkate alınmış olacaktır. Bu düşünceden yola çıkarak; eğrinin altında kalan "alan", basınç dayanımının çekme dayanımı ile çarpımının 2'ye bölümüyle elde edilmiş ve bu "alan" ın, kayacın gevrekliğinin (B3) bir ifadesi olarak kullanılabilirliği irdelenmiştir. Daha önceki incelemelerde (Altındağ; 2000) B3 gevreklik ölçütünün darbeli delme analizinde delme hızları ile istatistiksel bir ilişki içinde olduğu görülmüştür. Değerlendirmelerde, önerilen bu gevreklik ifadesi, birimsiz bir büyüklük olarak kullanılmıştır.

### 3. DELİNEBİLİRLİK

Bir kayacın delinebilirliği, delici ucun delme hızı, burcu ömrü (Birinci ve Akçın,1990), delme işinde harcanan spesifik enerji (SE) (Teale,1965) gibi bir çok şekilde tanımlanabilmektedir. Delme hızını arttırmak için farklı delme metodları ve makinaları farklı kayacın tipleri için kullanılmaktadır. Öncelikle delici makinenin seçimi için, kayacın orijinin (mağmatik, metamorfik, sedimanter), sertliğinin, aşındırıcılığının, fiziksel özelliklerinin ve mekanik mukavemetlerinin bilinmesi gerekmektedir.

Yüksek sertlikte ve aşındırıcı özellikteki kayalar için ağır darbeli deliciler, orta dayanımlı kayalar için orta ağırlıktaki darbeli veya ağır döner deliciler, aşındırıcı ve gevrek kayalar için hafif darbeli deliciler veya döner delici makinalar kullanılmaktadır (Tamrock,1986).

Delinebilirliği ölçmek veya delme hızını tahmin etmek için çeşitli deney yöntemleri ve delinebilirlik göstergeleri geliştirilmiştir. En yaygın olanları ise delinebilirlik indeksi olarak bilinen delme hızı indeksi (DRI), uç aşınma indeksi (BWI) (Tamrock,1986) ve kayacın dayanım katsayısı (CRS) dir (Tandanand ve Unger,1975).

Bu çalışmada, kayacın delinebilirliğinin ifadesi olarak delme hızları seçilmiştir.

### 4. DENEYSEL VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Göktan (1992), B1 gevreklik değerleri ile delme

hızları arasında anlamlı bir ilişki bulamamıştır. Söz konusu bu gevreklik ölçütünü darbeli delme analizlerinde dikkate almanın bir sonuç vermeyeceğini vurgulamaktadır.

Gevreklik ile delme hızı arasındaki ilişkiyi incelemek için, laboratuvar ve arazi çalışmalarından elde edilen darbeli delme verileri değerlendirilmiştir. Bu amaçla, daha önceki çalışmalardan (Akçın vd, 1994; Inyang ve Pitt, 1990; Howarth, 1987 ve Howarth vd, 1986; Schmidt,1972) alınan deney verileri Çizelge 1 - 4 'de sırasıyla verilmiştir. Bu çalışmalarda sedimanter, metamorfik ve mağmatik kökenli, basınç dayanımı 35.1 – 464.2 MPa ve çekme dayanımı 2.4 – 30.5 MPa arasında değişen kayacın türleri yer almaktadır.

Alınan bu dört çalışmadaki deney koşulları birbirinden farklı olduğundan, her çalışmanın verileri kendi içinde değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada, çeşitli araştırmacıların sonuçlarından alınan verilerden, literatürde bulunan diğer gevreklik ölçütleri (B1,B2) ve önerilen gevreklik ölçütü (B3) dikkate alınarak kayaların gevreklik değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan B1, B2 ve B3 gevreklik değerleri ile delme hızları (PR) arasındaki ilişkiler grafiksel olarak incelenmiştir (Şekil 2-4).

Bu ilişki grafikleri incelendiğinde, B1 ve B2 gevreklik değerleri ile PR arasında istatistiksel açıdan anlamlı bir ilişki görülmez iken (Şekil 2-3), B3 gevreklik değerleri ile PR arasında daha anlamlı korelasyon katsayılı ilişkiler elde edilmiştir (Şekil 4).

Böylece kayaların delinebilirlik analizlerinde gevrekliğin etkisinin belirlenebilmesi için, diğer iki gevreklik ölçütüne nazaran B3 gevreklik ölçütünün dikkate alınarak gevrekliğin delme hızlarıyla ilişkisinin daha sağlıklı irdelenebileceği görülmektedir.

B3 gevreklik ölçütleri ile PR arasındaki ilişki denklemleri aşağıda verilmiştir. Bu ilişkilerin korelasyon katsayıları (r); 0.792 ile 0.998 aralığında yer almaktadır.

Şekil 4-a,b,c,d'deki ilişkilere ait eşitlikler sırasıyla 4,5,6 ve 7 nolu eşitliklerde verilmiştir.

$$PR = 185.730 - 45.472 \log (B3) , r = -0.998 \quad (4)$$

$$PR = 63.352 - 15.381 \log (B3) , r = -0.792 \quad (5)$$

$$PR = 51.238 - 10.278 \log (B3) , r = -0.878 \quad (6)$$

$$PR = 160.353 - 34.038 \log (B3) , r = -0.873 \quad (7)$$

Çizelge 1. Kayaçların mekanik özellikleri (Akçın vd, 1994)

| Kayaç No | Kayaç Tipi               | $\sigma_C$ (MPa) | $\sigma_T$ (MPa) | PR (cm/dak) | B1    | B2    | B3    |
|----------|--------------------------|------------------|------------------|-------------|-------|-------|-------|
| 1        | Kireçtaşı (Armutçuk)     | 139.4 ± 10.6     | 10.33 ± 1.87     | 22          | 13.50 | 0.862 | 720.0 |
| 2        | İnce Tn.Kmşt. (Armutçuk) | 61.7 ± 3.20      | 4.14 ± 0.35      | 30          | 14.90 | 0.874 | 127.7 |
| 3        | Orta Tn. Kmşt (Armutçuk) | 40.2 ± 2.43      | 2.29 ± 0.30      | 34          | 17.55 | 0.892 | 46.0  |
| 4        | İnce Tn Kmşt. (Gelik)    | 99.2 ± 5.57      | 7.18 ± 0.28      | 25          | 13.82 | 0.865 | 356.1 |
| 5        | İnce Tn.Kmşt. (Asma)     | 105.2 ± 6.86     | 6.23 ± 0.49      | 25          | 16.89 | 0.888 | 327.7 |

$\sigma_C$  = Tek eksenli basınç dayanımı;  $\sigma_T$  = Çekme dayanımı (Brazilian deneyi); PR = Delme hızı; B1, B2, B3 = Gevreklik ölçütleri; Delik çapı = 38 mm

Çizelge 2. Kayaçların mekanik özellikleri ( Howarth vd, 1986; Howarth, 1987)

| Kayaç No | Kayaç Tipi           | $\sigma_C$ (MPa) | $\sigma_T$ (MPa) | PR (cm/dak) | B1   | B2    | B3     |
|----------|----------------------|------------------|------------------|-------------|------|-------|--------|
| 1        | Gosford Kumtaşı      | 44.1 ± 6.7       | 3.3 ± 0.3        | 32.39       | 13.4 | 0.861 | 72.8   |
| 2        | Mt.Crosby Kumtaşı    | 36.6 ± 1.0       | 2.4 ± 0.1        | 38.51       | 15.3 | 0.877 | 43.9   |
| 3        | Helidon Kumtaşı      | 35.1 ± 1.3       | 3.0 ± 0.2        | 53.96       | 11.7 | 0.843 | 52.7   |
| 4        | Carrara Mermer       | 93.6 ± 15.3      | 4.2 ± 1.2        | 20.15       | 22.3 | 0.914 | 196.6  |
| 5        | Ulan Mermer          | 49.9 ± 5.8       | 3.0 ± 0.5        | 24.10       | 16.6 | 0.887 | 74.9   |
| 6        | Beenleigh Hornfels   | 100.5 ± 26.9     | 13.5 ± 2.7       | 19.16       | 7.4  | 0.763 | 678.4  |
| 7        | Mt.Morrove Bazalt    | 219.8 ± 94.9     | 16.4 ± 2.0       | 15.38       | 13.4 | 0.861 | 1802.4 |
| 8        | Caboolture Trakit    | 202.4 ± 41.3     | 8.2 ± 1.5        | 15.90       | 24.7 | 0.960 | 829.9  |
| 9        | Moogerah Microsienit | 137.1 ± 19.0     | 8.0 ± 1.9        | 20.20       | 17.1 | 0.890 | 548.4  |
| 10       | Ashgrove Granit      | 234.0 ± 18.0     | 15.2 ± 2.1       | 18.64       | 15.4 | 0.879 | 1778.4 |

$\sigma_C$  = Tek eksenli basınç dayanımı;  $\sigma_T$  = Çekme dayanımı (Brazilian deneyi); PR = Delme hızı; B1, B2, B3 = Gevreklik ölçütleri; Delik çapı = 29 mm; Baskı kuvveti (thrust force) = 44 kg

Çizelge 3. Kayaçların mekanik özellikleri ( Inyang ve Pitt, 1990 )

| Kayaç No | Kayaç Tipi       | $\sigma_C$ (MPa) | $\sigma_T$ (MPa) | PR (cm/dak) | B1   | B2    | B3     |
|----------|------------------|------------------|------------------|-------------|------|-------|--------|
| 1        | Mankato Stone    | 53               | 9.3              | 81.28       | 5.7  | 0.701 | 246.4  |
| 2        | Kasota Stone     | 101.6            | 6.3              | 86.36       | 16.1 | 0.883 | 348.4  |
| 3        | Rockville Granit | 141.3            | 10.6             | 43.69       | 13.3 | 0.860 | 750.0  |
| 4        | Rainbow Granit   | 194              | 14.0             | 38.1        | 13.9 | 0.865 | 1358.0 |
| 5        | Charcoal Granit  | 229.6            | 11.7             | 30.48       | 19.6 | 0.903 | 1343.2 |
| 6        | Dresser Bazalt   | 306.7            | 17.1             | 12.45       | 17.9 | 0.894 | 2622.3 |
| 7        | Jasper Kuvarsit  | 388.7            | 18.3             | 34.29       | 21.2 | 0.910 | 3556.6 |
| 8        | Taconit A        | 442.4            | 30.5             | 18.04       | 14.5 | 0.871 | 6746.6 |
| 9        | Taconit B        | 464.2            | 20.9             | 29.21       | 22.2 | 0.914 | 4850.9 |

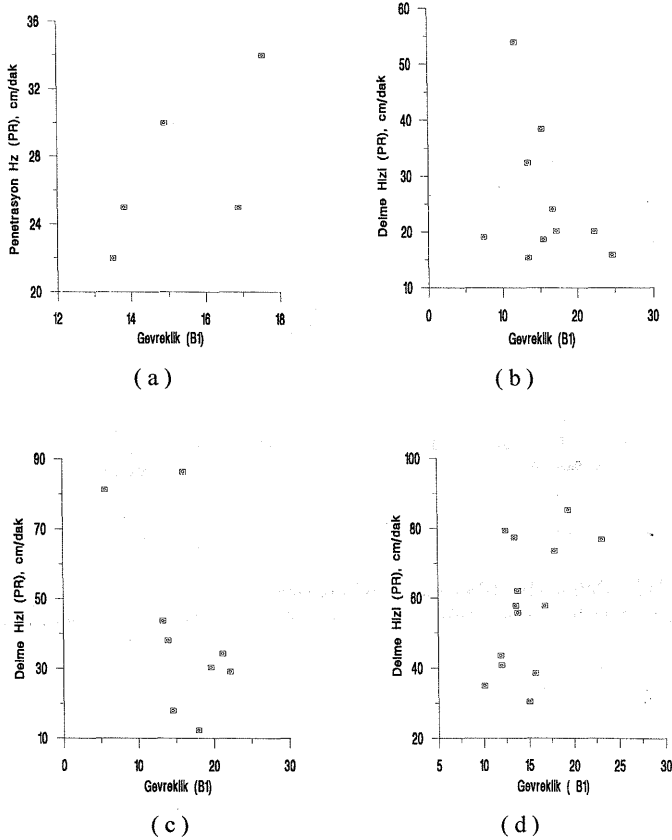
$\sigma_C$  = Tek eksenli basınç dayanımı;  $\sigma_T$  = Çekme dayanımı; PR = Delme hızı; B1, B2, B3 = Gevreklik ölçütleri; Delik çapı = 38.1 mm; Baskı kuvveti (thrust force) = 90.6 kg

Çizelge 4. Kayaçların mekanik özellikleri ( Schmidt,1972 )

| Kayaç No | Kayaç Tipi       | $\sigma_C$ (MPa) | $\sigma_T$ (MPa) | PR (cm/dak) | B1   | B2    | B3     |
|----------|------------------|------------------|------------------|-------------|------|-------|--------|
| 1        | Wausau Argillite | 216.4            | 18.1             | 40.89       | 12.0 | 0.846 | 1958.4 |
| 2        | Winona Dolomit   | 95.1             | 4.1              | 76.9        | 23.2 | 0.917 | 195.0  |
| 3        | Mankota stone    | 122.7            | 6.3              | 85.4        | 19.5 | 0.902 | 386.5  |
| 4        | Rockwille Granit | 151              | 9.0              | 57.91       | 16.8 | 0.888 | 679.5  |
| 5        | Charcoal Granit  | 199.5            | 12.7             | 38.61       | 15.7 | 0.880 | 1267.0 |
| 6        | D.Gray Granit    | 167.8            | 12.3             | 57.91       | 13.6 | 0.863 | 1032.0 |
| 7        | Dresser Bazalt   | 281.1            | 27.7             | 35.05       | 10.1 | 0.821 | 3893.0 |
| 8        | Mt.Iron Takonit  | 353.8            | 29.8             | 43.69       | 11.9 | 0.845 | 5271.6 |
| 9        | Babbitt Diyabaz  | 367              | 24.5             | 30.48       | 15.0 | 0.875 | 4495.8 |
| 10       | Ely Gabro        | 204              | 14.8             | 55.88       | 13.8 | 0.865 | 1509.6 |
| 11       | Trap Rock        | 67.5             | 5.0              | 77.47       | 13.5 | 0.862 | 168.8  |
| 12       | Anortozit        | 128.9            | 10.3             | 79.50       | 12.5 | 0.852 | 663.8  |
| 13       | Mermer           | 125.1            | 7.0              | 73.66       | 17.9 | 0.894 | 437.9  |
| 14       | Primax Gabro     | 172.6            | 12.5             | 62.23       | 13.8 | 0.865 | 1078.8 |

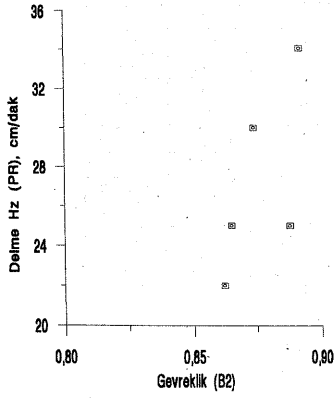
$\sigma_C$  = Tek eksenli basınç dayanımı;  $\sigma_T$  = Çekme dayanımı; PR = Delme hızı;

B1, B2, B3 = Gevreklik ölçütleri, Uç çapı = 38 mm, Çalışma basıncı = 7.03 kg/cm<sup>2</sup>

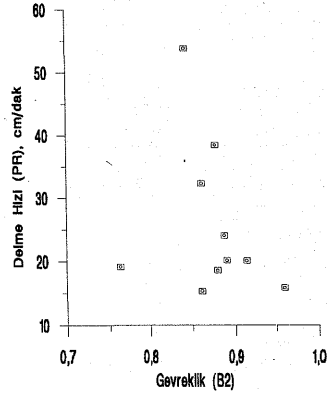


Şekil 2. Gevreklik (B1) ile Delme hızı (PR) arasındaki ilişkiler

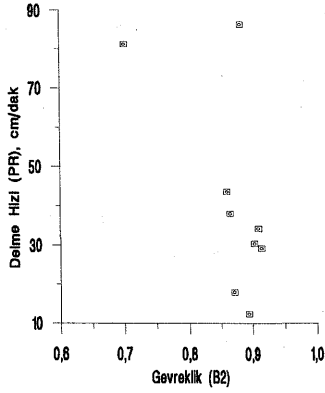
( Şekil a : Çizelge 1, Şekil b : Çizelge 2, Şekil c : Çizelge 3 ve Şekil d : Çizelge 4'deki verilerden çizilmiştir.)



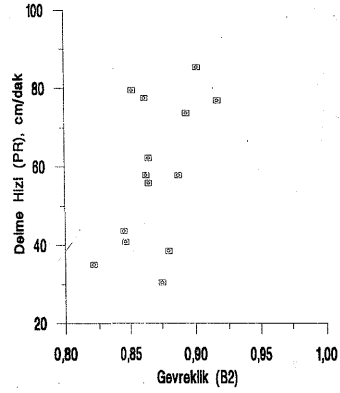
( a )



( b )



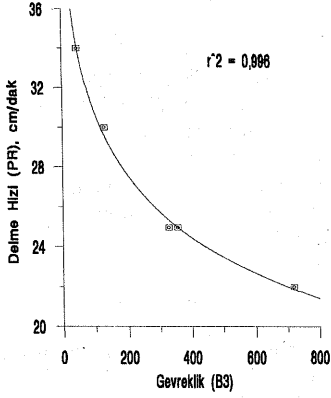
( c )



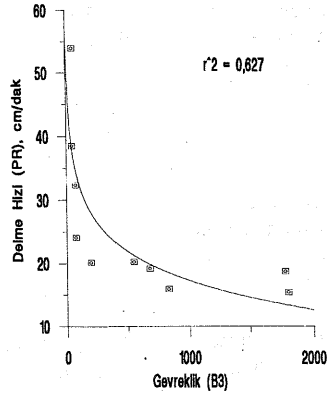
( d )

Şekil 3. Gevreklik (B2) ile Delme Hızı (PR) arasındaki ilişkiler

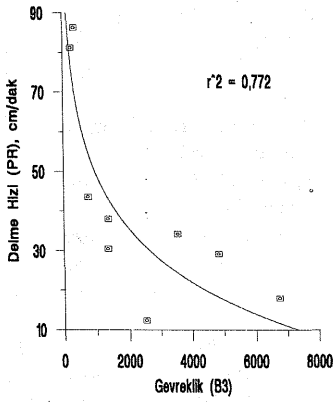
( Şekil a: Çizelge 1, Şekil b: Çizelge 2, Şekil c: Çizelge 3 ve Şekil d: Çizelge 4' deki verilerden çizilmiştir.)



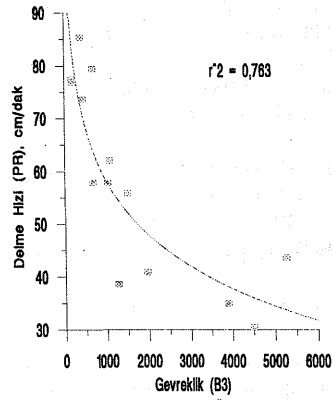
( a )



( b )



( c )



( d )

Şekil 4. Gevreklik (B3) ile Delme Hızı (PR) arasındaki ilişkiler

( Şekil a : Çizelge 1, Şekil b : Çizelge 2, Şekil c : Çizelge 3 ve Şekil d : Çizelge 4' deki verilerden çizilmiştir.)

## 5.SONUÇLAR

İrdelenen gevreklik ölçütlerinde B1 ve B2 gevreklik ölçütleri ile delme hızları arasında istatistiksel açıdan anlamlı ilişkiler elde edilememiştir. Buna karşın, önerilen B3 gevreklik ölçütü ile delme hızları arasında daha anlamlı ilişkiler gözlenmiştir. Dolayısıyla, B1 ve B2 gevreklik ölçütleri dikkate alınarak darbeli delme analizlerinde delme verimi

hakkında bir fikir elde edilemeyeceği anlaşılmaktadır. Farklı mekanik mukavemet özelliklerine sahip kayaların farklı gevreklik değerleri göstermeleri beklenirken, aynı B1 gevreklik değerini göstermeleri bu gevreklik değerinin Spesifik Enerji (SE) açısından delme verimine etkisi tam olarak anlaşılamamaktadır. Halbuki, aynı durumda B3 gevreklik ölçütü dikkate alındığında farklı gevreklik değerleri ve

Spesifik enerji değerleri elde edileceğinden, gevrekliğin delme verimindeki rolü daha açık gözlenebilecektir.

Kayacın basınç ve çekme dayanımları, önerilen bu gevreklik ölçütünde daha etken bir biçimde dikkate alınmış olmaktadır.

## 6.KAYNAKLAR

- Akçın,N.A., Müftüoğlu,Y.V., Baş,N. (1994) Prediction of drilling performance for electro-hydraulic percussive drills, *Proceedings of Mine Planning and Equipment Selection (Ed.Paşamehmetoğlu)*, 483-487.
- Altındağ, R. (2000) Darbeli delmede gevreklik analizi, *Geosound/yerbilimleri dergisi*, (Basımı kabul edilmiştir).
- Becker,H.,Lemmes,F., Schommer,M. (1984) Testing of rock mechanics as a basis for improved cutting technology, *Glückauf + Translation*, 120,N.8,122-124.
- Birinci, A.,Akçın,N.A. (1990) Asma işletmesi yeraltıdelik delme işlerinde kullanılan burguların performansını etkileyen faktörler, *Türkiye 7. Kömür Kongresi*,51-64.
- Evans,I.,Pomeroy,C.D. (1966) The strength, Fracture and workability of coal, *Pergamon Press*, ss.227.
- Gökten R.M. (1988) Kayaç sökülebilirliğinin teorik ve uygulamalı analizi, *İTÜ Fen Bil. Enst., (Doktora Tezi)*, ss.108.
- Gökten,R.M. (1992) Kayaç kırılabilirlik oranının darbeli delme performans analizlerinde kullanılabilirliği, *Anadolu Üniv., Müh. Mim. Fak. Dergisi*, C. VIII, Sayı 1, 89-99.
- Howarth,D.F., Adamson,W.R., Berdt, J.R. (1986) Correlation of model tunnel Boring and Drilling Machine Performances with rock properties, *Int.J.Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* V.23,171-175.
- Howarth,D.F. (1987) The effect of pre-existing microcavities on mechanical rock performance in sedimentary and Crystalline rocks, *Int.J.Rock Mech. Min.Sci. & Geomech. Abstr.* V.24,N.4,223-233.
- Hucka, V., Das,B. (1974) Brittleness determination of rocks by different methods, *Int.J.Rock Mech.Min.Sci. & Geomech. Abstr.* V.11,389 - 392.
- Inyang,H.I., Pitt,J.M. (1990) Standardization of a percussive drill for measurement of the compressive strength of rocks, *Rock Mech. Contributions and Challenges (Eds., Hustrulid and Johnson)*, 489-496.
- Inyang,H.I. (1991) Development of a preliminary rock mass classification scheme for nearsurface excavation, *Int.J.Surface Min. and Reclamation*, 5, 65-74.
- McFeat-Smith,I. (1977) Rock property testing for the assesment of tunnelling machine performance, *Tunnels and Tunnelling*, March, 23-33.
- Paone,J.,Madson,D., Bruce,W. (1969) Drillability studies- laboratory percussive drilling, *Bu Mines RI* 7300, 20.
- Reichmuth,R.D. (1968) Point load testing of brittle materials to determine tensile strength and relative brittleness, *Proc.9<sup>th</sup>. Symp.Rock.Mech.*, Univ. of Colorado,134-159.
- Schmidt,R.L. (1972) Drillability studies- percussive drilling in field, *Bu Mines RI* 7684,31.
- Selmer-Olsen,R., Blindheim.D.T. (1970) On the drillability of rock by percussive drilling, *2<sup>nd</sup>. Congress of the Int. Soci. for rock mech.*, Belgrade,65-70.
- Shimada,H., Matsui,K. (1994) Prediction of machine performance in mine tunnel drivage, *Proceedings of mine planning and equipment selection Symp.*, 509-514.
- Singh,P.S. (1986) Brittleness and the mechanical wining of coal, *Min.Sci. and Tech.*,V.3,173-180.
- Tamrock, (1986) Handbook of underground drilling, *2<sup>nd</sup> Edition*, Tampere, Finland, ss.328
- Tandanand,S., Unger,H.F. (1975) Drillability determination-A drillability index for percussion drills, *Bu Mines RI* 8073, 20.
- Teale,R., (1965) The concept of specific energy in rock drilling, *Int.J.Rock Mech. Min.Sci. & Geomech. Abstr.* V.2,57-73.

## ÖMERLER MEKANİZE AYAKTA YÜRÜYEN TAHKİMATLARDAKİ BASINÇLARIN İZLENMESİ VE İNCELENMESİ

### INVESTIGATION AND EVALUATION OF PRESSURES ON POWERED SUPPORTS IN ÖMERLER COAL MINE

**H. AKDAŞ**

Osmangazi Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Bademlik / ESKİŞEHİR

**N. DESTANOĞLU**

G.L.İ. İstihsal Yeraltı Şube Müd., Tunçbilek / KÜTAHYA

**S. ÖĞRETMEN**

G.L.İ. Ömerler Yeraltı Mekanize Ocak, Tunçbilek / KÜTAHYA

**M. YAVUZ**

Osmangazi Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Bademlik / ESKİŞEHİR

**ÖZET:** Tavan tabakası ve yürüyen tahkimat üniteleri arasındaki etkileşimi analiz etmek için ünitelerdeki hidrolik direklerde basınç değişiklikleri kayıt edilebilir. Bu tebliğde, Ömerler Kömür Ocağı ve M2 olarak adlandırılan mekanize pano kısaca tanıtıldıktan sonra M2 panosuna tesis edilen üç tip yürüyen tahkimat ünitesi açıklanmaktadır. Yürüyen tahkimat ünitelerinin direklerinde basınç değişimlerini ölçme ve kaydetme için yapılan ölçme planı verilmektedir. Sonra tam mekanize M2 panosundaki ünitelerin direklerinden elde edilen basınç bilgileri tavan tabakasının etkilerini değerlendirmek için kullanılmıştır. Basınç değişiklikleri ölçme için iki farklı zaman periyodu planlanmıştır. Birinci zaman periyodu, üretim çalışmalarının yapılmadığı ve uzunayağın tatil için durdurulduğu 9 günlük süredir. İkinci zaman periyodu ise 9 günlük boş süre sonunda uzunayağın üretim faaliyetlerine başladığı 7 günlük süredir. Genel olarak, bu ölçümlerden hidrolik direklerde dört farklı basınç değişimi karakteri belirlenmiştir. Ayrıca bu bilgiler periyodik olarak yapılan kazı ve üretim çalışmaları ile ilişkileri için de değerlendirilmiştir.

**ABSTRACT:** Hydraulic leg pressure changes in powered support can be recorded for analysis the interaction between the shield and the roof strata. In this paper, after Ömerler Coal Mine and mechanized panel called as M2 are shortly described, three types of powered support used in M2 panel are introduced. An instrumentation plan is given for measuring and recording the pressure changes on the legs of powered supports. Then, the shield leg pressure data obtained from M2 panel that are installed full-mechanized longwall system were used to evaluate the effects of roof behavior. Measurement of pressure changes was planned for two different time periods. First one is idle time period that there is not any mining activity in longwall for 9 days. Second one is 7 days time period that mining activities and production start at the end of idle time period. Generally, four types of pressure development on legs of powered supports were determined from recorded data. Also, These data were evaluated for relationships in terms of different mining cycles in longwall face.

## 1. GİRİŞ

Günümüzde modern bir uzunayak, kesici-yükleyici, nakliyat üniteleri ve yürüyen tahkimat üniteleri ile donatılmış olarak bilinmektedir. Oldukça pahalı bir yatırım olan yürüyen tahkimat sistemi, karmaşık ve hidrolik olarak kontrol edilebilen bir mekanik sistemdir. Yatırımın büyüklüğü nedeniyle sistemin verimli çalıştırılması, arızaların minimum seviyede

tutulması ve üretimin sürekliliği en önemli hedefler olmalıdır. Bu hedeflere ulaşılmasında en önemli hususlardan biride yürüyen tahkimatların tavan tabakasını kontrol altında tutabilmesidir. Yani yürüyen tahkimat ünitelerinden beklenen en önemli görevlerden birisi de tavan taban yüklerini karşılayarak ayak açıklığını muhafaza etmesidir. Yürüyen tahkimat üniteleri üzerindeki tavan tabakalarının yüklerini ve davranış karakteris-

tiklerini direk olarak belirlemek hemen hemen imkansızdır. Bu nedenle hidrolik direklerdeki basınç değişimlerinin sürekli olarak izlenerek değerlendirilmesi en etkili yollardan biridir.

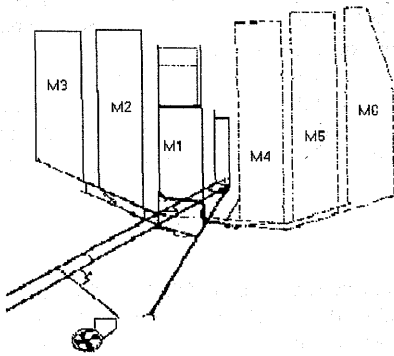
Bu tebliğde Ömerler Yeraltı Ocağındaki M2 panosundaki tahkimat ünitelerden elde edilen basınç değişimleri açıklanmaktadır.

## 2.ÖMERLER YERALTI OCAĞI

Ömerler Yeraltı Ocağı faaliyetlerine 1985 yılında başlamıştır. Damar, ortalama 8 m kalınlığında olup 200-210 m derinliktedir. Damarın hemen üzerinde kalınlığı 25-50 cm arasında değişen yumuşak kıltaşı formasyonu bulunmaktadır. Bu kıltaşı üzerinde ise toplam kalınlıkları 17 metre ve ortalama tek eksenli basınç dayanımı  $141 \text{ Kg/cm}^2$  olan diğer kıltaşı formasyonları izlenmektedir. Kıltaşı formasyonlarını üzerinde 10 m kalınlığında bir marn formasyonu olup ortalama tek eksenli basınç dayanımı  $500 \text{ Kg/cm}^2$  'dir. Bunu takiben killi marn ve tekrar kalın marn formasyonları yeryüzüne kadar izlenmektedir.

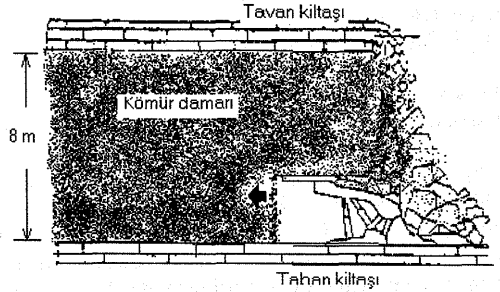
Kömür damarı kesitinde üç adet ara kesme bulunup, aşağıya doğru olacak şekilde sırasıyla 0.15, 0.75 ve 0.55 m kalınlıklarında olan kıltaşılarıdır.

Ömerler Yeraltı Ocağında pilot mekanizasyon uygulaması için 6 adet pano planlanmıştır. Pano uzunlukları sahanın yapısına göre belirlenmiştir. Planlanan panolardan M1 panosunun üretimi tamamlanmış ve M2 panosunda da üretim henüz bitirilmiş ve mekanize sistem M3 panosuna transfer edilmektedir. Panoların ayak uzunluğu 90 m olup boyları ise 450 - 600 m arasında değişmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Ömerler mekanize panoları plan görünümü (ölçeksiz).

Ömerler Ocağında 8 m kalınlığındaki kömür damarı, blok göçertmeli uzunayak üretim yöntemi ile kazanılmaktadır. Bu yöntemde kömür damarının taban tabakasından itibaren 2.8 metrelik kısmı çift tamburlu kesici yükleyici olan yürüyen tahkimat sistemi ile kazılırken, üstte kalan 5.2 metrelik kısım ise yürüyen tahkimat ünitelerinde bulunan pencerelerden göçertilerek üretilmektedir. Bu yöntem tek taban ayaklı üretim metodu olarak da adlandırılmaktadır (Şekil 2). Arından ve ayak arkasından elde edilen üretim ayak içinde tek zincirli konveyör ile nakledilmektedir.



Şekil 2. M2 panosunda üretim metodu.

## 3. YÜRÜYEN TAHKİMAT ÜNİTELERİ VE ÖZELLİKLERİ

Ömerler mekanize ayaktaki M2 panosunda üç tip yürüyen tahkimat ünitesi kullanılmaktadır. Bunlar :

- a) Ayak içi yürüyen tahkimat üniteleri,
- b) Ayak geçişi yürüyen tahkimat üniteleri,
- c) Ayak başı yürüyen tahkimat ünitesidir.

Panoda toplam 61 adet yürüyen tahkimat ünitesi bulunmaktadır. Bu üniteler özellikle kalın damarların üretimi için tasarlanmış ve geliştirilmiştir.

### 3.1. Ayak İçi Yürüyen Tahkimat Üniteleri

M2 panosunda ayak içi yürüyen tahkimat ünite sayısı toplam 55 adettir. Bu ünitelerin her birinde uzatılabilen kalkanı olup üç adet hidrolik direk bulunmaktadır. Hidrolik direklerden ikisi ana taşıyıcılık görevini üstlenirken ortadaki üçüncüsü ise arka ve üst kömürün alınmasını sağlayan pencerenin açılıp kapanmasında kullanılmaktadır. Bu ünitelerin bazı geometrik ve teknik özellikleri aşağıda verilmektedir (CMEC, 1996).

|                                 |                   |
|---------------------------------|-------------------|
| Boyutlar                        | 5450x1500x1800 mm |
| Tah. Yüksekliği aralığı         | 1800-3200 mm      |
| Tah. çalışma yüksekliği         | 2700-2900 mm      |
| Çalışma eğimi                   | $\mp 10^0$        |
| İki ünite merkezleri mesafesi   | 1500 mm           |
| Kömür akıtma pen. boyutları     | 1750-800 mm       |
| Kömür akıtma pen. eğimi         | $40^0$            |
| Taban şase boyutları            | 2300x1370x700 mm  |
| Ana taşıyıcı direk adedi        | 2                 |
| Tahkimat çekme kuvveti          | 462 kN            |
| Konveyör itme kuvveti           | 291 kN            |
| Pompa istasyon basıncı          | 300 bar           |
| 2800 mm çalışma yüksekliğinde : |                   |
| Ön yükleme (setting load)       | :2804 kN          |
| Emniyet yükü (yield load)       | :3300 kN          |
| Ünite ağırlığı                  | 16.2 ton          |

### 3.2. Ayak Geçişi Yürüten Tahkimat Üniteleri

Ayak geçişini sağlayan bu üniteler uzunayağın giriş kısımlarına yerleştirilmekte olup toplam sayısı 5 adetdir. Bunlardan üç tanesi kuyruk yolundan itibaren iki tanesi de sabit yolundan itibaren (ayak başı tahkimatından sonra) yerleştirilmektedir. Bu üniteler ayak içi tahkimatlarına göre görünüm yönünden fazla bir farklılıkları olmayıp bazı özellikleri ve boyutlarında farklılıklar bulunmaktadır. Aşağıda ayak geçiş tahkimatlarının bazı özellikleri verilmiştir (CMEC, 1996).

|                                 |                   |
|---------------------------------|-------------------|
| Boyutlar                        | 5500x1500x2000 mm |
| Tah. Yüksekliği aralığı         | 1800-3500 mm      |
| Tah. çalışma yüksekliği         | 2700-3200 mm      |
| İki ünite merkezleri mesafesi   | 1500 mm           |
| Tahkimat genişliği              | 1430-1580 mm      |
| Kömür akıtma pen. eğimi         | $30^0$            |
| Tahkimat çekme kuvveti          | 603 kN            |
| Konveyör itme kuvveti           | 343 kN            |
| Tahkimat ilerlemesi             | 600 mm            |
| 3200 mm çalışma yüksekliğinde : |                   |
| Ön yükleme (setting load)       | :2804 kN          |
| Emniyet yükü (yield load)       | :3300 kN          |
| Ünite ağırlığı                  | 19 ton            |

### 3.3. Ayak Başı Yürüten Tahkimat Ünitesi

Ayak başı tahkimatı yukarıda verilen ünitelerden hem yapısal hem de kapasite olarak oldukça farklı ve üç parçalı bir ünite dir. Ayak başı ünite sayısı bir tanedir ve sabit yoluna kurulmaktadır. Bu ünitenin görevleri arasında ayak başında emniyetli çalışma alanı sağlayarak sabit yolu arkasındaki kömürün kazanılmasına yardımcı olmaktadır. Aynı zamanda zincirli konveyör baş kısmı ve tahrik üniteleri ile diğer yükleme ünitelerine yeterli genişlikte alanı

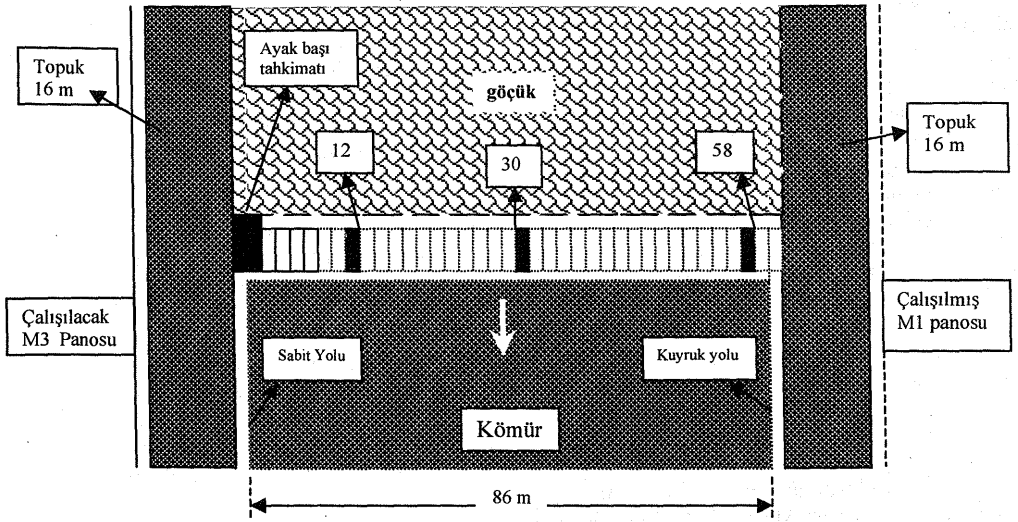
emniyetle muhafaza ederek bu ünitelerin ilerletilmesini sağlamaktadır. Yaklaşık olarak 2.5x5m 'lik alanı tahkim etmektedir. Bazı özellikleri aşağıdaki gibidir (CMEC, 1996).

|                                                  |                      |
|--------------------------------------------------|----------------------|
| Tahkimat tipi                                    | üç parçalı bir ünite |
| Tah. çalışma Yüksekliği                          | 2200-3500 mm         |
| Tahkimat genişliği                               | 3000-3100 mm         |
| Ön yükleme yükü                                  | 9971 kN              |
| Emniyet yükü                                     | 11200 kN             |
| Pompa istasyon basıncı                           | 30 MPa               |
| Tahkimat ağırlığı                                | 48,873 ton           |
| Ana ünite bölümü (4 hidrolik direkli) :          |                      |
| Ön yükleme                                       | 4985.5 kN            |
| Emniyet yükü                                     | 5600 kN              |
| İtme kuvveti                                     | 1885 kN              |
| Yan üniteler (2'şer hidrolik direkli iki ünite): |                      |
| Ön yükleme                                       | 2492.75 kN           |
| Emniyet yükü                                     | 2800 kN              |
| İtme kuvveti                                     | 682.7 kN.            |

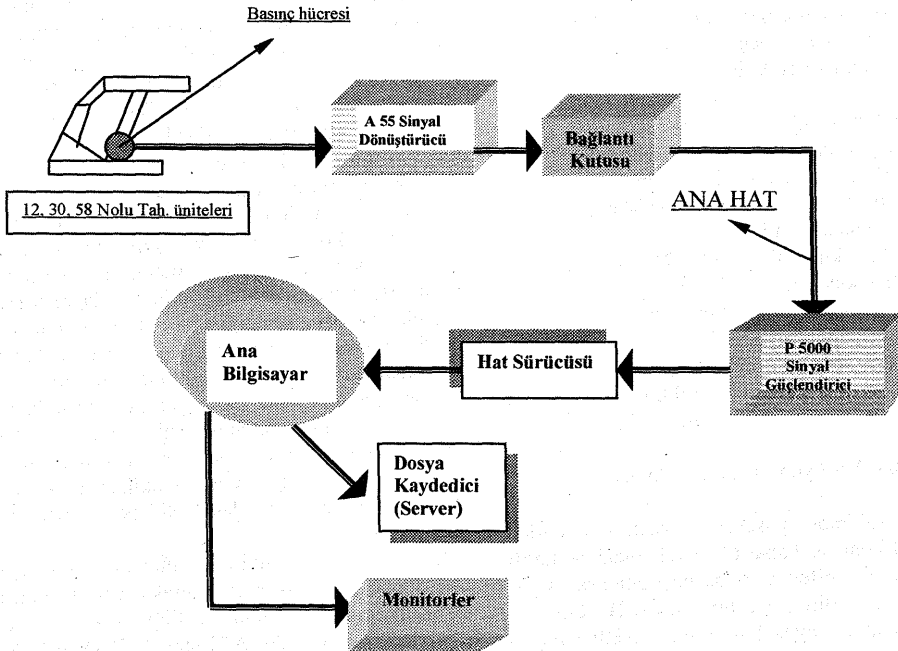
### 4. TAHKİMAT ÜNİTELERİNDEKİ BASINÇ DEĞİŞİMLERİNİ ÖLÇME VE KAYDETME SİSTEMİ

Tahkimat ünitelerindeki basınç değişimlerini kaydetmek ve izlemek amacıyla M2 panosundaki üç yürüten tahkimat ünitesine basınç hücreleri yerleştirilmiştir. Bu üç ünite ayak boyunca farklı konumlarda bulunmaktadır. İlk Basınç hücresi sabit yolundan itibaren yaklaşık 12'nci üniteye yerleştirilmiştir. 12'nolu ünite sabit yolundan itibaren 18 metre mesafede bulunmaktadır. 12'nci ünitenin seçilmesindeki neden sabit yolu üzerinde bulunan farklı kapasite ve yapıdaki ayak başı tahkimatı ile ayak geçiş tahkimatlarının etkisi altında kalmaması içindir (Şekil 3.). İkinci ve üçüncü basınç hücrelerinin yerleştirildiği 30 ve 58 'nolu üniteler ise sabit yolundan itibaren sırasıyla 45. ve 86. Metrede bulunmaktadır. Dikkat edilirse 30'nolu ünite uzunayağın ortalarına denk gelirken 58'nolu ünite ise uzunayak sonuna yani kuyruk yolunun başlangıcına tekabül etmektedir. Bu planlama ile ayak başları ve ortasındaki tahkimat üniteleri ile tavan tabakası arasındaki etkileşimi belirlemek amaçlanmıştır.

Basınç hücreleri, tahkimat ünitelerinin ana taşıyıcı direklerine yerleştirilmiştir. Direklerdeki sıvı basıncı ve değişimini algılamak için bu basınç hücreleri yeraltındaki A55-sinyal dönüştürücüsüne bağlanmakta buradan da bağlantı kutusu aracılığı ile ana hata verilmektedir. Ana hat üzerindeki P 5000 sinyal güçlendiricisi ile yeryüzündeki yönetim binasında bulunan ana bilgisayara bilgiler



Şekil 3. M2 panosunda mekanize ayağın plan görünümü ve basınç hücrelerinin yerleştirildiği üniteler.



Şekil 4. Ömerler M2 mekanize panoda ünitelerdeki basınç değişimlerini ölçme sistemi.

Ulaştırılmaktadır (Şekil 4). Bu bilgiler bilgisayar ortamında işlem görerek kaydedilmekte ve grafik haline dönüştürülerek incelenebilmektedir.

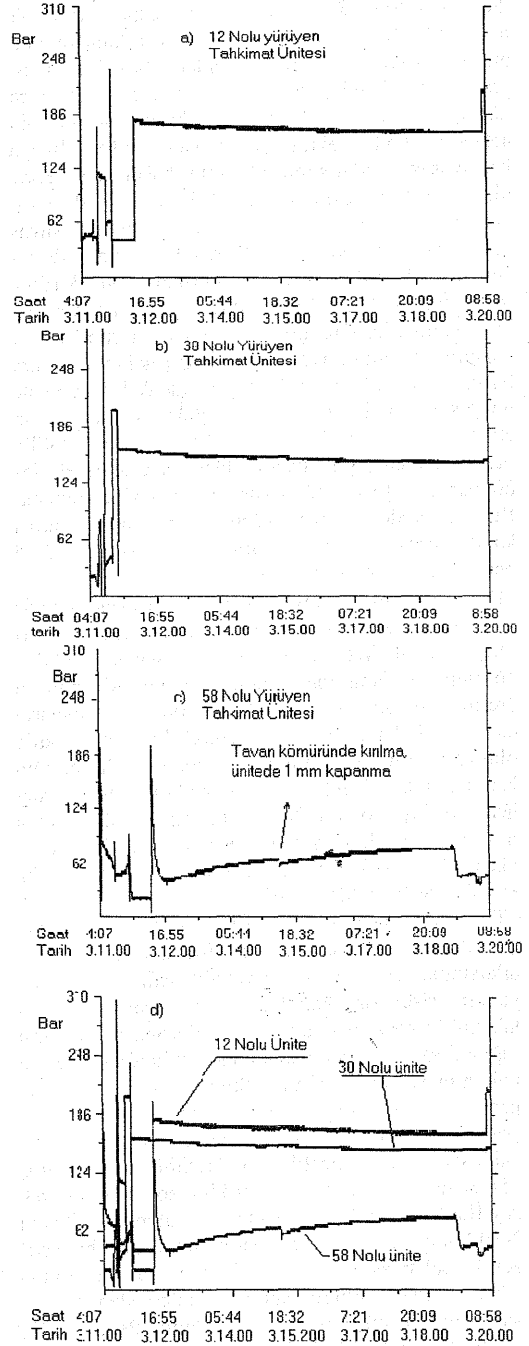
## 5. ÖLÇÜMLER VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Tek taban mekanize ayaklı 8 metrelik kalın damarın üretimi ile klasik kalınlıktaki (2,5–3 m) bir damarın uzun ayak mekanize üretimi arasında iki önemli farklılık bulunmaktadır. Bunlardan birincisi kalın damarlarda tavan tabakası yine damarın kendisidir. İkincisi ise kömür olan tavan tabakasının da ayak arkasından üretilme zorunluluğudur. Bu sebeple tavan tabakası davranışı hem yürüyen tahkimatların etkili kullanımı hem de arka kömürün üretimi yönünden önemlidir. M2 panosunda iki ayrı zaman dilimi için ölçme ve izleme programı yapılmıştır. Birinci zaman dilimi ayakta üretimin mart ayındaki 9 günlük bayram tatili için durdurulduğu yani herhangi bir üretim ve faaliyetin olmadığı süredir. İkinci zaman dilimi ise hemen tatil sonrası üretim ve kazı faaliyetlerinin başladığı haftadır.

### 5.1. Mekanize Ayağın Durdurulduğu Zaman Periyodu

Mekanize ayakta 12 Mart 2000 tarihinde başlayan 9 günlük tatil öncesi bazı hazırlık çalışmaları yapılmıştır. Üretime ara verilmenden iki gün önce arın kazısı ve ilerlemesi durdurulmuştur. Normal üretim faaliyetlerinde ünitelerin pencerelerinden iki vardiya arka kömürü üretimi gerçekleştirilmektedir. Tatil öncesi yaklaşık 6-7 vardiya sadece ünitelerin pencerelerinden ayak arkası üretimi yapılmıştır. Bu ayak arkası çalışmasıyla hem kömür hem de kömür ile karışık olarak tavan taşları da üretilmiştir. Bu ayak arkası üretimin amacı tavan tabakalarının göçük alana oturmasını sağlamak ve hava girişini önleyerek yangın riskini gidermek olmuştur.

Tatil süresince üç değişik tahkimat ünitelerinden alınan basınç değişimleri şekil 5 a, b, c ve d de verilmektedir. Tatil öncesi ünitelere verilen ön yükleme değerleri her ünite için birbirinden farklı olup yaklaşık olarak ölçülen başlangıç değerleri 12 nolu ünite için 180 bar, 30 nolu ünite 155 bar ve 58 nolu ünite 210 bar'dır. Şekil 5 a ve b incelendiğinde sabit yolu girişine yakın ünite ile ayak ortasındaki ünite (12 ve 30 nolu üniteler) hemen hemen yok denecek kadar bir değişim izlenmiştir. Bu üniteler basınç artışı yerine çok küçük basınç düşmeleri ile seviyelerini muhafaza etmişlerdir. Bu ünitelerin tatil süresince herhangi bir tavan yüküne maruz kalmadığı anlaşılmaktadır. Küçük basınç değişimi



Şekil 5. Tatil süresince 12, 30 ve 58 nolu yürüyen tahkimat ünitelerindeki basınç değişimleri.

ise ancak sistemdeki mevcut kayıplardan olabileceği düşünülebilir. 58 nolu ünite de daha farklı bir davranış gözlenmiştir (Şekil 5c). Bu üniteye tatil öncesi verilen 210 barlık ön yükleme basınç seviyesi birkaç saat içinde 35-40 barlık minimum basınca düştüğü görülmektedir. Bu ani basınç düşmesinin ardından ünite tekrar yavaş yavaş yük almaya başlayarak üç gün sonra 65 barlık basınç seviyesine ulaşmıştır. Bu noktada ani bir basınç düşmesi yaparak 55 bar seviyesine inmiş ve tekrar yavaş yavaş yük almaya devam ederek seyrine devam etmiştir. Burada tavan kömüründe bir kırılma meydana geldiği söylenebilir. Aynı zamanda bu kırılmanın olduğu gün ünitenin de 1 mm'lik bir kapanma yaptığı kaydedilmiştir. Bu noktadan sonra basınç artışı dikkat edilirse çok küçük bir eğim ile doğrusal olarak tatilin son gününe kadar devam etmektedir. Tatilin son günü tekrar tatilin başlangıcındaki gibi basınç düşmesi göstererek 75-80 bar'dan 40 bar'lık basınç seviyelerine inmiştir. Bu seviyede tekrar küçük bir basınç artışı kaydedilmiş ve tekrar ani olarak basınç 32-35 bar'lık seviyeye düşmüştür.

Bilindiği gibi uzunayak panolarında ayak önünde ve pano kenarlarında düşey basınç konsantrasyonları oluşmaktadır. M1 ve M2 panosu arasında bırakılan 16 metre genişliğindeki emniyet topuğu M1 panosu üretimi sonucu oluşan düşey pik basınçların etkisinde kalarak kırıklı ve çatlaklı bir yapıya sahip olmuştur. Aynı şekilde 8 metre yüksekliğinin kazılmasıyla birlikte tavan tabakalarının hem yatay hem de düşey olarak M1 panosunun göçük alanına doğru hareketleri söz konusudur. Bu hareketler klasik kazı yüksekliklerine göre (2.5-3m) daha büyük olacağı beklenmelidir.

Tatil süresince yapılan ölçümlerden iki sonuç çıkarılabilir. Birincisi tatile girmeden önce ayak arkasından yapılan 6-7 vardiyalık çalışma ile hem yangın riski ortadan kaldırılmış hem de tavan tabakaları başarılı olarak ayak arkasına oturtulması sağlanarak yürüyen tahkimat ünitelerinin fazla yüklenmesi önlenmiştir. İkinci sonuç ise M1 panosunun komşu konumda bulunan ve kuyruk yolundan itibaren yatay olarak pano boyunca yaklaşık 10-15 metrelik zon, üretimi tamamlanmış M1 panosunun etkisi ile kırıklı yapıya dönüşerek zayıflamıştır. Dolayısıyla kuyruk yolundan itibaren 7-10 ünite (51 den 61'e kadar olan üniteler) bu zayıf zonda çalışmaktadır. 58 nolu ünite de bu zonun etkisi altında olduğundan ön yüklemenden hemen sonra basınç düşmesi göstermektedir. Peng (1990) tarafından da belirtildiği gibi zayıf tavan şartlarında ünitelerde sık sık basınç düşmeleri izlenmektedir. Diğer iki ünitelerde basınç değişimi yönünden

önemli sayılabilecek bir değişim kaydedilmemiştir. Bu basınç değişimlerinin izlenmesi yanı sıra aynı ünitelerin tatil süresince kapanma ölçümleri de günlük olarak kaydedilmiştir. Bu ölçümlere göre 12 ve 30 nolu tahkimat ünitelerinde herhangi bir kapanma oluşmamıştır. Buna karşılık 58 nolu ünite üç gün (12, 13 ve 14 Mart) kapanma yapmazken 15 Mart tarihinde 1 mm'lik bir kapanma yaparak bu seviyede devam etmiştir. Bu kapanma tavan kömüründe Şekil 5c'de basınç değişim grafiğinden de izlendiği gibi bir ani kırılma sonucu meydana geldiği anlaşılmaktadır.

## 5.2. Tatil Sonrası Üretim Faaliyetlerinin Başladığı Zaman Periyodu

Uzun tatil sonrası periyodik üretim faaliyetlerinin başladığı hafta içinde elde edilen basınç değişimleri Şekil 6 a,b,c ve d' de verilmektedir. Burada alınan ölçmeleri değerlendirebilmek ve anlayabilmek için ayakta yapılan periyodik kazı çalışmalarını belirtmekte fayda vardır. Mekanize ayakta üretim ve kazı faaliyetleri üç vardiya olup günlük ilerleme 1.2 metredir. I. vardiya da (8<sup>00</sup>-16<sup>00</sup>) arın kazısı (kesimi) yapılmaktadır. Arın kazısı 0.6 metrelik ilerleme ile iki kademede gerçekleştirilmektedir. Her kademede tahkimat üniteleri kazıyla birlikte ilerletilmektedir. II vardiya da (16<sup>00</sup>-24<sup>00</sup>) bakım ve tamir ile birlikte tahkimat üniteleri pencerelerinden üretime başlanmaktadır. Bu vardiya da, gerek görüldüğü durumlarda askıda kalan tavan kömürünü parçalamak ve pencerelerden akışını sağlamak için 3-5 metre delikler delinerek ateşleme yapılmaktadır. Zaman zaman pencerelerden kömür gelmediği durumlarda üniteler ferdi olarak indirilip kaldırılarak kömür gelmesine çalışılmaktadır. Son vardiya da (00<sup>00</sup>-08<sup>00</sup>) arka kömür üretim çalışmasına devam edilmektedir.

Üretim faaliyetlerinin başladığı 20 Mart günü ve sonrasında elde edilen basınç değişim ve periyodik kazı çalışmaları ile ilişkileri Şekil 6a' da verilmektedir. 12 nolu ünite ilk kesim öncesi 160 bar'lık seviyede iken yeniden yükleme ile 210 bar'lık ön yükleme seviyesine ve bu yükleme seyrinde ilk arın kazısı yapılmıştır. Bunu takiben bu ünite indirilerek ilerletilmiş ve 65 -70 bar seviyelerinde ön yükleme yapılarak ikinci arın kesimi gerçekleştirilmiştir. II vardiya da daha düşük seviyelerde (40 Bar) arka kömürü üretimi yapılmıştır. Arka kömürü üretimi esnasında ünite birkaç kez indirilip kaldırıldığı da izlenebilmektedir. Dikkat edilirse tatil sonrası ilk üç vardiya çalışmaları esnasında 12 nolu ünite üzerinde önemli basınç değişimleri kaydedilmemiştir. Sadece operatörün ünitenin ilerlemesinden sonra verdiği ön



yükleme basıncında kalmıştır. Ayın 21 'nde I. vardiyada ikinci arın kesimi ve ön yüklemeden sonra ünite yük almaya başlamış ve bu yük alma II. vardiyada da devam etmiştir. Bu durum tavan tabakalarının tatil sonrası hareketinin başladığını ve yükünü ünitelere verdiği anlamına gelmektedir. Şekillerdeki basınç değişim grafiklerinde görülen düşey düz çizgiler operatörün üniteyi indirip kaldırarak ön yüklemeyi yaptığını belirtmektedir.

Ayak ortasında konumlanan 30 nolu ünite de 12 nolu üniteye benzer basınç değişimleri izlenmiştir (Şekil 6b). 30 nolu ünite ile 145 bar seviyesinde ilk arın kazısı (kesimi) ve bunu takiben ilerletilerek 105 barlık ön yüklemeye ile ikinci arın kazısı ve tekrar 45 barlık ön yüklemeye ile arka kömürü üretim çalışması yapılmıştır. Tatil sonrası ilk günkü bu çalışmalarda 30 nolu ünite üzerinde önemli basınç değişimleri kaydedilmemiştir. Ancak 12 nolu ünite gibi, ikinci günde (21 Mart) ilk arın kazısından sonra 30 nolu ünite de yük almaya başlamış ve ikinci arın kesimiyle birlikte ön yüklemeden sonra tekrar yük almaya devam etmiştir. Bu ünite üzerinde basınç artışının II. vardiyada da devam ettiği görülmektedir (Şekil 6b). Basınç artışı arka kömür üretim vardiyasında tekrar düşerek benzer karakterde seyrine devam etmiştir. Pano sonuna yaklaşıldığı için 30 nolu üniteye ölçmeler durdurularak 12 nolu üniteden gelen değişimler izlenmeye devam edilmiştir.

Sonraki günlerde 12 nolu ünite de çok önemli bir değişiklik görülmemiştir. Ancak uzunayak sisteminin yeni panoya taşınma hazırlıkları ve üretimin durdurulduğu 12 Nisan ile 17 Nisan arasında basınç değişimi sabit iken, bu tarihten sonra ünite yük almaya başlamıştır. Basınç artışı çok yavaş ve lineer olarak gelişerek 5. günde (22 Nisan) 330 bar emniyet basıncına kadar yükselmiştir. Bu basınç seviyesinde 10 bar'lık bir azalma ve tekrar 330 bar seviyesine yükselme seyri göstermiştir. Bu küçük basınç kaybı ve basınç alma seyri emniyet basıncı civarında 10 sefer tekrarlı olarak gelişmiş ve 25 Nisanda üniteye müdahale edilmiştir. Bu müdahaleden sonra 115 bar'lık ön yüklemeye ünite tekrar basınç almaya devam ederek 300 bar seviyelerine ulaşmıştır. Üretimin yapılmadığı bu uzun zaman aralığındaki sürekli basınç artışı ancak ana tavan tabakalarının etkisi ile olabilir. Bu olayın dışında ölçüm yapılan ünitelerde emniyet basıncına kadar yükselen basınç gelişimi kaydedilmemiştir.

Ayak sonunda yada kuyruk yoluna yakın olan 58 nolu ünite, tatil sonrası diğer ünitelere göre çok farklı basınç değişim grafiği vermiştir (Şekil 6c). Genel olarak değişim grafiğine bakıldığında iki önemli farklılık görülmektedir. Birinci farklılık 58

nolu ünitenin yüklemelerden sonra çoğunlukla 2-4 saatlik zaman dilimlerinde basınç düşmeleri göstermesidir.

Diğer önemli farklılık ise ünitenin daha fazla sayıda indirilip kaldırıldığı görülmektedir. Bunun nedeni üretimi bitirilmiş M1 panosu etkisiyle bu kısımlarda tavan kömürü kırıklı ve çatlaklı yapıya dönüşerek zayıflamasıdır. Bu tavan koşullarında bulunan üniteler kısa aralıklarla daha fazla sayıda manevralarla ayarlama gerektirmektedir. Tatil sonrası yaklaşık 50 bar basınç seviyesinde ilk arın kesimi yapıp ilerletildikten ve 160 barlık ön yüklemeye verildikten sonra hızla yaklaşık 2-2.5 saat içerisinde basınç düşmesi izlenmiştir. Ünite tekrar iki sefer indirilip kaldırıldıktan sonra 135 barlık ön yüklemeye verilmiştir. Bu ön yüklemeden sonra ünite basınç düşmesi yaparak 80 barlık seviyeye inmiştir ve tekrar basınç artışı ile 115 bar'lık seviyeye yükselmiştir. Bu seviyede hafif bir basınç düşmesi (5-10 bar) kaydedilmiştir. İkinci arın kazısını takiben ilerletilerek 190 bar'lık ön yüklemeye ünite yaklaşık 6 saatlik zaman zarfında doğrusal olmayan nitelikte bir basınç düşmesi göstermiştir. Bu basınç düşmesi II vardiyada yani arka kömürü üretiminde gerçekleşmiştir. III vardiyada tahkimatta basınç düşmesi devam etmiş ve tekrar yükselme eğilimi ile 110 bar'lık seviyede ikinci günün ilk vardiyasında ilk kazıya kadar aynı seviyelerde devam etmiştir. Bu ünite tatil sonrası ikinci günkü (21 Mart) ilk vardiyada benzer karakterde basınç değişimi vermiştir. II. vardiya başında kabloda oluşan bir problem nedeniyle ölçmelere son verilmiştir.

Sonuç olarak basınç değişim grafiklerinden 12 ve 30 nolu üniteler tatil sonrasında ilk üretim gününden sonra (24 saat) tavan hareketlerinin başlayarak ikinci günün ilk vardiyasında ön yüklemenin üzerinde fazla yük almasından anlaşılmaktadır. Ayrıca bir başka tespit olarak ünitelerde arka kömürü üretiminden sonra basınç artışları meydana gelmektedir. 58 nolu ünitenin zayıf tavan koşullarında çalıştığı ve bunun sonucunda çoğunlukla ön yüklemelerden hemen sonra basınç düşmesi gösterdiği anlaşılmaktadır. Ancak basınç düşmesi seyrinin genel anlamda 105 - 115 bar'lık seviyelerde devam ettiği anlaşılmaktadır. Üniteye müdahale edilmeksizin üzerindeki basıncın maksimum bu seviyelere kadar yükselebildiği görülmektedir.

## 6. SONUÇLAR

İzlenen ünitelere bağlı olarak elde edilen basınç değişim grafiklerinden ve vardiyalardaki periyodik

üretim çalışmalarına göre ön yüklemelerden sonra dört farklı basınç değişimi tespit edilmiştir.

- a) *Yüksek basınç etkisinde durgun tip* : Ön yükleme yapıldıktan sonra üniteye herhangi bir basınç değişiminin saptanmadığı durumdur. Bu durum genellikle 150-220 bar seviyelerinde ön yüklemenin miktarına bağlı olarak gelişmektedir. Ayrıca normal tavan koşullarında oluşabilmekte ve herhangi bir tavan yükü üniteye gelmemektedir. Bu durum ilk arın kazısı öncesi görülmektedir.
- b) *Düşük basınç etkisinde durgun tip* : Üniteye verilen düşük basınç seviyelerinde ön yükleme sonrası izlenen durumdur. Basınç 100-150 bar seviyelerinde olup üniteye fazla basınç yüklenmesi gelişmeden mevcut seviyesini muhafaza etmesidir. Genellikle ikinci arın kazısı esnasında izlenmektedir.
- c) *Artan tip* : Ön yüklemeyen hemen sonra üniteye gelen tavan yükleri nedeniyle basınç artışının gelişmesidir. Bu durum daha çok II. ve III. vardiyalardaki arka kömür üretiminin tamamlanmasından sonra gelişmektedir. Bu da arka kömür üretimi ile birlikte tavan hareketlerinin başlayarak ünitelere yükleme yaptığına işaret etmektedir.
- d) *Azalan tip* : Üniteye ön yükleme basıncı verildikten sonra zamana bağlı olarak basıncın parabolik olarak azalmasıdır. Çoğunlukla kırıklı, çatlaklı ve zayıf tavan koşullarında gözlenmektedir. Bu durum özellikle kuyruk yoluna yakın üniteye gözlenmiştir.

Ünitelerin arka kömürü üretme pencerelerinin açılması hidrolik direklerde küçük basınç düşmeleri verirken, arka kömürü üretimi ile birlikte direklerdeki basınç beklendiği gibi düşmektedir ve düşük basınç seviyelerinde arka kömürü üretimi yapılmaktadır. Ancak arka kömürü üretimi tamamlandıktan sonra bunu takiben yapılan arın kazısıyla birlikte tavan hareketlerinin başladığı sonucu çıkarılabilir.

Operatörlerin ünitelere verdiği ön yükleme değerlerinde önemli farklılıklar görülmektedir. Bu farklılıklar özellikle ikinci kazının yapılmasına takiben ilerletildikten sonra yapılan ön yüklemelerde görülmektedir. Bu farklı ön yüklemeler komşu üniteler arasında farklı yüklenmelere sebep olacaktır. Ayrıca operatörün üniteler üzerinde ön yükleme miktarını görme imkanı olmadığından bir problem olarak düşünülmelidir.

Düşük ön yüklemelerle çalışma tavan kömürünün konverjansına bir miktar müsaade etmektedir. Bunun da arka kömürü kazanılmasına olumlu bir katkısı olabilir. Fakat fazla konverjansın oluşması

arına yakın kısımlarda tavan kontrol problemlerini ortaya çıkarabilir.

Zayıf tavan koşullarının olduğu kuyruk yolu bölgesinde ünitelere ön yükleme verilmesine takiben basınç düşmesi görülmektedir. Bu basınç düşmesi 110-115 bar seviyelerinde denge konumunu muhafaza etmeye çalışmaktadır. Dolayısıyla zayıf tavan koşullarında fazla ön yükleme tavanın daha da zayıflamasına sebep olmaktadır.

Genelde üniteler emniyet basıncından (330 bar) çok daha düşük seviyelerde ön yükleme ile çalışmaktadır. Pompa basıncı ise 300 bar'dır. Bu basınç ünitelere hortumlardaki kayıplar ve yıpranmalar nedeniyle tam anlamıyla üniteye verilemez yani bir azalma söz konusudur. Genel kabul olarak ön yükleme basıncı emniyet basıncının %60-90 'nı arasında gerçekleşmektedir. (Peng ve ark., 1986, 1987). Grafiklerden tatil öncesi maksimum ön yüklemenin 200 ile 250 bar seviyelerde ön yükleme yapılmışken, tatil sonrası kazı ve üretim faaliyetlerinde ön yükleme basınçlarının 150-200 bar seviyelerinde yapıldığı görülmektedir.

Kısa zaman aralığında ve özel durumları analiz etmek amacıyla yapılan bu çalışmaların daha genelleştirilebilmesi için diğer parametreleri de içine alan 5 ve daha fazla sayıda ünitelerle uzun süre izlemek yararlı olacaktır. İleriye dönük olarak yapılacak çalışmalarda bu izlenecek süre bir panonun başlangıcından sonuna kadar yapılmalıdır. İzlenen üniteler ile komşu ünitelerin birbirlerine etkileri, kazı makinesinin üniteler üzerindeki etkisi, optimum ön yükleme miktarları ve hangi kazı faaliyetlerinde oluşması gerektiği gibi tüm parametreler dikkatlice kaydedilerek izlenmelidir. Elde edilen bu bilgiler istatistiksel olarak değerlendirilerek optimum çalışma koşulları belirlenmesinde kullanılabilir.

## KAYNAKLAR

- CMEC, 1996, Coal Mining Engineering Equipment Group Corp., *Materials of longwall equipment supplied to Turkey*, Vol 1-10, April. China.
- Peng, S. S., 1990, *Design of active horizontal force for shield supports for controlling roof falls*, June, pp 457-461, The Mining Engineer.
- Peng, S. S., Wu, J., Li, H.C. and Chen, S.L., 1986, *How to determine yield load of longwall roof supports*, Coal Mining, October, pp 40-43.
- Peng, S. S., Hsiung, S. M., and Jiang, J. M. 1987, *Methods of determining the rational load capacity of shield supports at longwall faces*. Mining Engineer, October, pp. 161-167.



## SERT KAYAÇLARDA DİSKLİ KESİCİLERLE KESME İŞLEMLERİNDE AŞAĞI VE YUKARI KESME YÖNTEMLERİNİN ÇEKİLEN AKIM ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

### INVESTIGATION OF THE AFFECT OF UP AND DOWN CUTTING PARAMETER ON THE CURRENT CONSUMED IN THE PROCESS OF CUTTING WITH DISC IN HARD ROCKS

Y.ÖZÇELİK, A.S.EYÜBOĞLU, S.KULAKSIZ, İ.C.ENGİN, A.ÖZGÜVEN

Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, 06532, Beytepe, ANKARA

**ÖZET:** Sert kayaçların kesilebilirliğine etki eden, önemli değiştirilebilir makine parametrelerinden biri olan aşağı ve yukarı kesme türünün farklılığı çekilen akım değerine dolayısıyla da soketlerin aşınma miktarına ve ekonomik kesim yapılıp yapılmadığına etki etmektedir. Bu çalışmada, Ankara-Çubuk Andezitlerinin elmaslı dairesel kesicilerle kesilmesi sırasında kayaç özellikleri ile aşağı ve yukarı kesme yöntemlerinin, çekilen akım değerleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma kapsamında farklı fiziksel ve mekanik özellik gösteren 10 farklı andezit örneği kullanılmıştır. Bu andezit örneklerinde 8 cm, 14 cm, 25 cm kesme derinliklerinde aşağı ve yukarı kesme yöntemlerine göre çekilen akım değerleri ile kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Bu ilişkilerin aşağı ve yukarı kesme yöntemlerine göre nasıl bir değişim gösterdiği belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan bu çalışma sonucunda 1.3 mm kesme derinliğinde aşağı kesme yönteminin uygulanmasının ve kesilen kayacın sertliğindeki artışın motorun çektiği akım değerini artırdığı belirlenmiştir.

**ABSTRACT:** One of the most important independent machine parameters that affect the sawability of hard rock is the direction of cutting. Cutting in the up and down direction affect the electric current consumed and therefore degree of wear and efficiency of sawability. In this study, the relationship between rock properties and up and down cutting parameters during the sawing with discs were examined. In the scope of this study, 10 different andesite samples from Ankara Çubuk region having different physical and mechanical properties, were used. Relationship between the physical and mechanical properties of rock and electric current consumed during up and down cutting operations for 8, 14 and 25 cm cutting depths, were investigated for the samples. Consequently, the current consumed has been increased with an increase in the hardness of samples and down cutting operations at 1.3 mm cutting depth.

## 1. GİRİŞ

Son yıllarda sert kayaca olan talebin artması, bu sektörde çok önemli bir gelişmeye ve yatırıma sebep olmuştur. Ülkemiz sert kayaç yatakları ve çeşitleri bakımından zengin bir ülke olmasından dolayı bu hızlı talep rüzgarından etkilenen ülkeler arasında yer almaktadır. Bu istekleri karşılamak üzere son teknoloji ile donatılmış sert kayaç işleme tesisleri büyük bir hızla kurulmaktadır. Kesme işlemine etki eden bir çok faktörü ayarlayarak en az maliyetle en fazla verimi elde edecek kesimi yapmak çok itinalı bir mühendislik hizmeti gerekmektedir. Türkiye’de son yıllarda artan sert taş işleme fabrikalarına rağmen disk seçiminde bu

faktörlerin yeteri kadar gözönüne alınmaması, beklenenden daha kısa bir zamanda disklerin sistem dışı kalmasına, çok büyük bir enerji maliyetine ve artı bir işletme giderine sebep olmaktadır.

Bütün bu amaçlar doğrultusunda bu bildiriye öncelikle sert kayaç kesme işlemiyle ilgili genel bilgiler kısaca verilmiş, kesme işlemine etki eden faktörlere değinilmiştir. Bu faktörlerden biri olan ve enerji maliyetine etkisi çok büyük olduğu düşünülen aşağı ve yukarı kesme parametrelerinin, farklı andezitlerin kesimine etkisi fabrikada kesim esnasında incelenmiş ve ortaya çıkan enerji farklılıkları tartışılmıştır. Sonuçta ise, elde edilen sonuçlar göz önüne alınarak, maliyeti azaltmak için yapılması gereken işlemler üzerinde durulmuştur.

## 2. ELMASLI DİSKLİ KESİCİLER

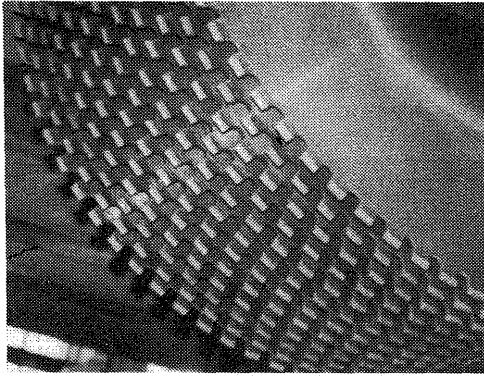
Sert kayaç yataklarından çıkarılan bloklar talebe göre çeşitli ebatlarda işlenmek üzere fabrikaya getirilmekte ve istenilen boyutlara, elmaslı diskli kesicilerle getirilmektedir

Granit türü kayaçların sertliğinin ve aşınmaya karşı direncinin yüksek olması sebebi ile kayacın yüzey kalitesi yüksek olmaktadır. Sert kayaçların kesiminde karşılaşılan problemlerin başında elmaslı soket giderlerinin fazlalığı ile zaman zaman makinaların normalin üzerinde yüke binneleri sonucu tamir bakım giderlerinin yüksek olması gelmektedir. Diğer yünden elmas diskli kesiciler mükemmel iş parçası kalitesi, azalan kayıplar, azalan maliyet ve artan üretim gibi avantajlara sahiptir (Karagöz ve Zeren, 1997).

Elmaslı diskli kesiciler iki ana gruba ayrılmaktadır;

- a. Elmas soketli çok bıçaklı testereler.
- b. Elmas soketli dairesel testereler

Bu bildiride elmas soketli diskli kesiciler üzerinde ölçümler yapılmıştır. Kullanılan diskli kesiciler Şekil.1'de gösterilmiştir.

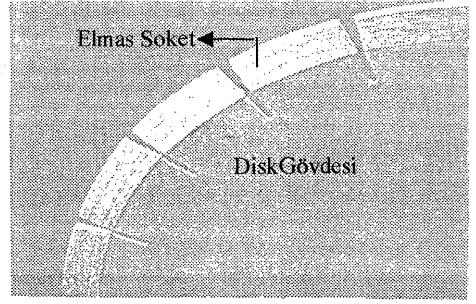


Şekil 1. Elmas soketli diskli kesici

Sert kayacı aktif olarak kesen bölüm kesicinin dişleri üzerine hassas ısı, zaman ve basınç kontrolü altında kaynak edilmiş olan elmas soketlerdir. Elmas soketler ve diskin gövdesi Şekil.2' de gösterilmiştir.

Elmaslı soketlerin iki ana görevi vardır; Bunlar;

- Sert kayacı aşındırarak kesmek.
- Aşınma işlemi esnasında körelen elmasların yerine yeni elmasların çıkmasına olanak sağlamak.



Şekil 2. Elmas Soketlerin Görünümü

Elmaslı diskli kesicinin bütün bu görevleri yerine getirebilmesi için kesilecek malzemenin özellikleri dikkatlice tetkik edilmeli ve kesici bıçaklar kesilecek malzemeye dikkate alınarak tasarlanmalı veya alınmalıdır.

Verimli bir kesme işleminin sağlanması için sert kayaç kesilebilirliğine etki eden faktörler çok iyi bilinmeli ve kesme işlemi bu faktörler ayarlanarak yapılmalıdır.

Sert kayaç kesilebilirliğine etki eden faktörler üç ana gruba ayrılmaktadır. Bu faktörler Çizelge 1'de verilmektedir.

Çizelge 1. Kayaç kesilebilirliği ile ilgili, sabit, değişken ve yarı değişken parametreler

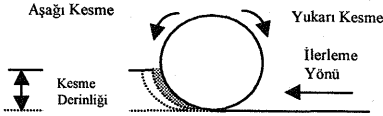
| Sabit Parametreler                                        |  |
|-----------------------------------------------------------|--|
| ◆ Kesilecek malzemenin Mühendislik Özellikleri            |  |
| ⇒ Fiziko-mekanik Özellikler                               |  |
| ⇒ Kimyasal Özellikler                                     |  |
| ⇒ Minerolojik Özellikler                                  |  |
| ⇒ Petrografik Özellikler                                  |  |
| ⇒ Tane-Yönlmesi ve Dolgulu, Dolgusuz Süreksizlikler       |  |
| ⇒ Dokusal Özellikler                                      |  |
| Değişken ve/veya Yarı Değişken Parametreler               |  |
| ◆ Kesme Ekipmanının Özellikleri                           |  |
| ⇒ Disk Çapı                                               |  |
| ⇒ Soket Durumu                                            |  |
| ⇒ Metalurjik Matris Yapı                                  |  |
| ⇒ Tolerans Limitleri                                      |  |
| ⇒ Elmas Tipi ve Oluşumu                                   |  |
| ⇒ Disklerdeki Aşınma                                      |  |
| ◆ Kesme Ortamında Çalışma Koşullarının Teknik Özellikleri |  |
| ⇒ Kesme Kuvveti                                           |  |
| ⇒ Su Miktarı                                              |  |
| ⇒ İlerleme Hızı                                           |  |
| ⇒ Motor Devri                                             |  |
| ⇒ Çevresel Hız                                            |  |
| ⇒ Kesme Derinliği                                         |  |
| ⇒ Aşağı ve Yukarı Kesme Parametreleri                     |  |

Çizelge 1'de görüldüğü gibi sert kayaç kesilebilirliğine bir çok faktör etki etmektedir.

Değiştirilebilir parametreler sınıfına giren aşağı ve yukarı kesme parametrelerinin özellikle soket aşınmaları üzerinde ve bu bildiride incelenecek olan enerji maliyetleri üzerinde çok önemli bir etkisi bulunmaktadır.

Bu bildiride üzerinde çalışılan aşağı ve yukarı kesme işleminde, eğer, diskin dönüş yönü ile makina ilerleme yönünün aynı olduğu duruma *Yukarı Kesme*, makina ilerleme yönü ile diskin dönüş yönü aynı değilse bu duruma *Aşağı Kesme* metodu denilmektedir (Ertinghausen, 1985).

Aşağı ve yukarı kesme metodlarının çalışma prensibi Şekil 3'de gösterilmektedir (Eyüboğlu, 2000).



Şekil 3. Aşağı ve yukarı kesme işleminde kesme gelişimi

Aşağı ve yukarı kesme yöntemleri üzerine Ertinghausen (1985) tarafından bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre aşağı ve yukarı kesme yöntemlerinin birbirlerine göre üstünlükleri ve olumsuz yönleri aşağıda verilmiştir;

- Aşağı kesme işleminde diskteki düşey kuvvetler, yukarı kesme işlemine göre büyük, yatay kuvvetler ise küçüktür. Bu yüzden aşağı kesmede; disk kesilen parçayı tabana doğru bastırmaya çalışacak, yukarı kesme işleminde ise disk kesilen parçayı yukarı kaldırmaya çalışacaktır. Bu durumda yukarı kesmede malzeme yukarı kalkmak istediğinden çalışma koşulları bozulacak ve elmas soketlerde beklenenden daha fazla aşınmalar meydana gelecektir.
- 20-25 mm'ye kadar kesme derinliklerinde, yukarı kesmede enerji harcamasının daha düşük, kesme derinliği arttıkça da aşağı kesmenin enerji harcamasının daha düşük olduğu görülmüştür.
- Aşağı kesme metoduyla çalışan disklerdeki soketlerde düzenli olmayan bir radyal aşınmanın meydana geldiği ve diskte titreşime sebep olarak, kesilen yüzeyin kalitesini azaltmakta ve diskin zamanından önce

körlenmesine ve sistem dışı kalmasına sebep olmaktadır.

Ayrıca, değişik araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda şu sonuçlara ulaşılmıştır (Eyüboğlu, 2000);

- Yukarı kesmede, disk kayaca ani olarak temas etmekte ve büyük bir hacmi kesmeye çalışmaktadır. Özellikle sert kayaların kesilmesinde bu durum elmas soketin ömrünü azaltacak, çatlamasına ve düşmesine neden olacaktır.
- Aşağı yönlü kesmede, disk öncelikle küçük bir hacim kesmeye çalışmakta bu nedenle sokete uygulanan gerilim de düşük olmaktadır. Bu soket ömrünün artmasını sağlayacağından sert kayaların kesimi için alternatif bir yöntemdir.

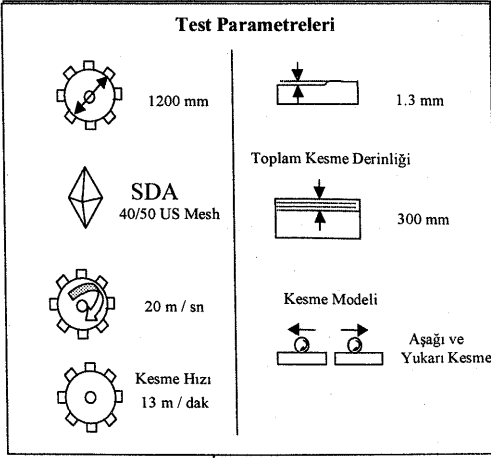
### 3. YERİNDE VE LABORATUVARDA YAPILAN ÇALIŞMALAR VE ELDE EDİLEN SONUÇLAR

Sert kayaç kesiminde kullanılan disk ile kesme yöntemi uygulamalarında, aşağı ve yukarı kesme metodlarının uygulanması sırasında enerji ölçümlerinin yapılması, yöntemin doğru ve ekonomik bir biçimde kullanılabilirliğinin tespiti açısından büyük önem taşımaktadır.

Andezitlerin diskli kesicilerle kesme işlemi sırasında meydana gelen enerji değişimlerinin tespitine yönelik çalışmalar, Ankara – Çubuk bölgesinde Aydınar A.Ş.'ye bağlı sert taş işleme fabrikasında yapılmıştır.

Bu çalışma kapsamında kullanılan blok kesme makinasında aşağı ve yukarı kesme yöntemleri birlikte kullanılmaktadır. 10 farklı blok andezit numunesi blok kesme makinasında kesme işlemine tabi tutulmuş ve bu kesme işlemi sırasında harcanan enerji aşağı ve yukarı kesme yöntemi için de ölçülmüştür.

Bu çalışma kapsamında kullanılan her bir andezit için, Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Kaya Mekaniği Laboratuvarında fiziko mekanik testler yapılmıştır. Burada dikkat edilen en önemli husus, her bir andezitin kesimi sırasında blok kesme makinalarının aynı kesme hızında, kesme derinliğinde ve ilerleme hızında olması ve böylece her bir örnek için aynı şartların sağlanmış olmasıdır. Sabit tutulan blok kesme makina parametreleri Şekil 4'de gösterilmiştir. Bu parametrelerden en önemlisi kesme derinliğidir. Bu çalışmada çok bıçaklı diskli blok kesme makinasının kullanılmasından ve andezit kesiminden dolayı kesme derinliği 1.3 mm olarak ayarlanmıştır. Bu aşamada aşağı kesmenin avantajlı duruma geçtiği 25 mm den fazla kesme derinliğinde çalışmaya imkan bulunamamıştır.



Şekil 4. Blok kesme makinasının sabit tutulan parametreleri

Fabrika aşamasında yapılan enerji ölçümleri sonrasında kesilen andezitlerin fiziko mekanik özelliklerinin tespitine yönelik yapılan laboratuvar çalışmalarından elde edilen sonuçlar Çizelge 2’de sunulmuştur.

Fabrikada yapılan çalışmalarda, üç derinlik kademesi baz alınmış, bunlar; 8 cm, 14 cm ve 25 cm’dir. Bu üç kesme derinliğinde aşağı ve yukarı kesme metodları esnasındaki enerji akımları ölçülmüş. Her bir andezit için ölçülen enerji sonuçları Çizelge 3’de verilmiştir.

Yapılan ölçümlerde görüldüğü gibi yukarı kesme işlemi sırasında açığa çıkan enerjinin, aşağı kesme yönteminde açığa çıkan enerjiden düşük olduğu görülmüştür. Kesilen kayacın fiziko-mekanik özelliklerinin enerji ölçümlerine etkisi ve birbirleri arasındaki ilişki Şekil 5’de gösterilmiştir

#### 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

♦ Kesme derinliği arttıkça harcanan enerji miktarının arttığı görülmüştür.

♦ Aynı kesme derinliğinde, yukarı kesme işleminde harcanan enerjinin aşağı kesme işleminde harcanan enerjiye kıyasla daha az olduğu tespit edilmiştir.

♦ Mermer kesimi yapan tek bıçaklı ST blok kesme makinaları bir defada kesim işlemi yaparken, geri boş dönmektedirler. Burada dikkat edilecek en önemli husus ise makina ilerleme yönüyle, bıçağın dönme yönüdür. Kesme derinliğine bağlı olarak yapılacak ayarlamalarla, fazla enerji harcamasını ve bunun sonucunda oluşabilecek olan soket aşınmalarını minimuma indirebilmek mümkün olabilir.

♦ Granit ve benzeri sert kayaç (Andezit.v.b.) kesimi yapan çok bıçaklı blok kesme makinalarında aşağı ve yukarı kesme yönteminin birlikte kullanılmasından dolayı, bu makinalarda aşağı, yukarı kesme parametrelerinin etkilerini kontrol etmek zordur. Burada sadece kesme derinliği optimumda tutularak meydana gelebilecek enerji harcaması minimumda tutulmalıdır.

#### KAYNAKLAR

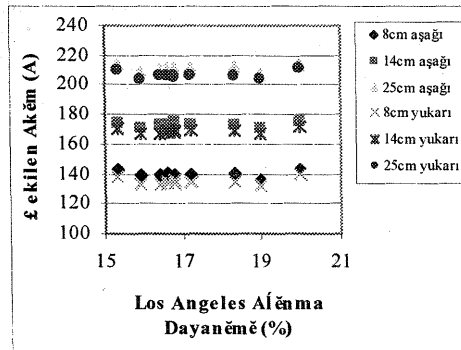
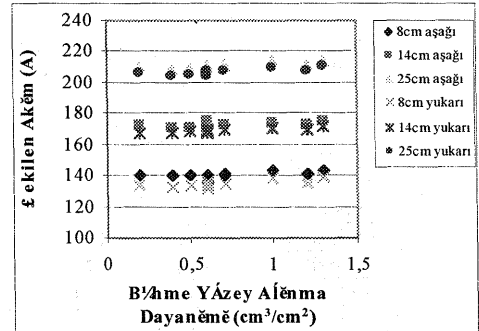
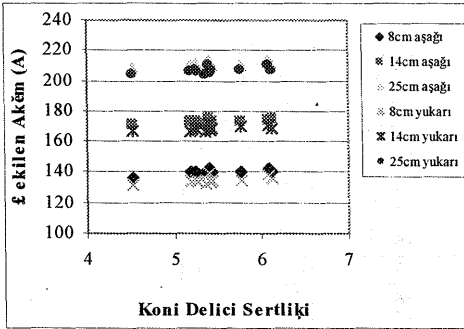
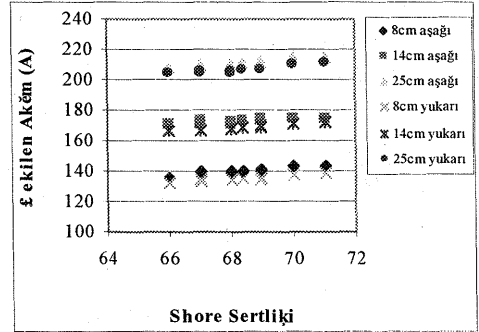
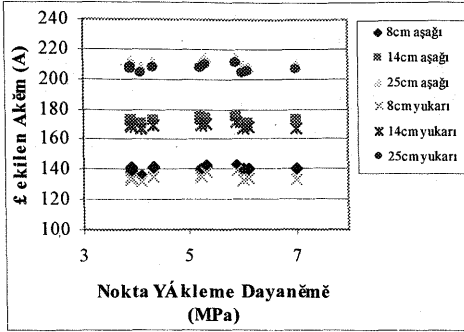
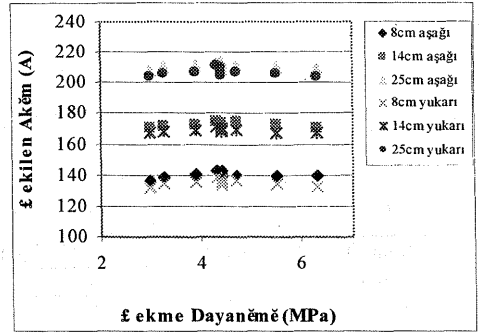
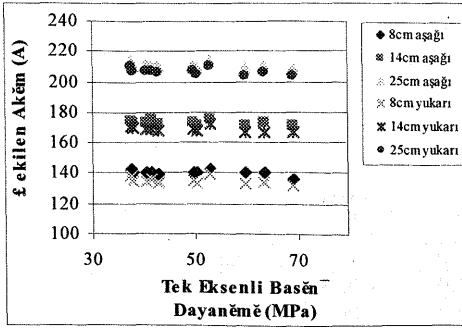
- Ertingshausen, W., 1985, Wear processes in sawing hard stone. *Industrial Diamond Review* (5/85), pp 254-258.
- Eyüboğlu, A. S., 2000, Diskli kesici soketlerindeki aşınmaların Ankara andezitlerinde incelenmesi, H.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Mühendislik Tezi, Ankara, 132 s.
- Karagöz, Z.Ş., ve Zeren, M., 1997, Elmas kesici takımların mikroyapısal dizaynı, *Türkiye’de Mermer Yapı ve Dekorasyon*, Sayı:51, sayfa 20-25.

Çizelge 2. Andezit örneklerinin fiziko-mekanik test sonuçları

| Örnek No   | Tek Eks. Basınç Dayanımı (MPa) | Çekme Gerilmesi (MPa) | Is(50) (MPa) | Ort. Shore Sertliği | Ort. Konik Delici Sertliği | Ort. Böhme Yüzey Aşınma Değeri (cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> ) | Los Angeles (500) Aşınma Değeri |
|------------|--------------------------------|-----------------------|--------------|---------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Andezit 1  | 69.0                           | 3.0                   | 4.1          | 66.0                | 4.53                       | 0.6                                                                | 19.0                            |
| Andezit 2  | 53.0                           | 4.3                   | 5.9          | 71.0                | 5.40                       | 1.3                                                                | 20.0                            |
| Andezit 3  | 63.5                           | 5.5                   | 7.0          | 67.0                | 5.18                       | 0.2                                                                | 16.4                            |
| Andezit 4  | 37.9                           | 3.9                   | 4.3          | 69.0                | 5.77                       | 1.2                                                                | 16.6                            |
| Andezit 5  | 60.0                           | 6.3                   | 6.0          | 67.0                | 5.36                       | 0.4                                                                | 15.9                            |
| Andezit 6  | 37.5                           | 4.4                   | 5.3          | 70.0                | 6.07                       | 1.0                                                                | 15.3                            |
| Andezit 7  | 41.4                           | 4.7                   | 5.2          | 69.0                | 6.11                       | 0.6                                                                | 16.8                            |
| Andezit 8  | 40.4                           | 4.4                   | 3.9          | 69.0                | 5.24                       | 0.7                                                                | 18.3                            |
| Andezit 9  | 42.9                           | 3.3                   | 3.9          | 68.0                | 5.26                       | 0.6                                                                | 16.6                            |
| Andezit 10 | 50.4                           | 4.4                   | 6.1          | 68.0                | 5.41                       | 0.5                                                                | 16.8                            |
| Ort.       | 49.6                           | 4.4                   | 5.2          | 68.4                | 5.43                       | 0.7                                                                | 17.2                            |

Çizelge 3. Andezit örneklerinin enerji ölçüm sonuçları

| Örnek No   | Aşağı Kesme Yöntemi |       |       | Yukarı Kesme Yöntemi |       |       |
|------------|---------------------|-------|-------|----------------------|-------|-------|
|            | Kesme Derinliği     |       |       | Kesme Derinliği      |       |       |
|            | 8 cm                | 14 cm | 25 cm | 8 cm                 | 14 cm | 25 cm |
|            | Akım Değerleri (A)  |       |       | Akım Değerleri (A)   |       |       |
| Andezit 1  | 136                 | 171   | 208   | 132                  | 167   | 204   |
| Andezit 2  | 143                 | 175   | 214   | 139                  | 172   | 211   |
| Andezit 3  | 140                 | 173   | 210   | 134                  | 167   | 206   |
| Andezit 4  | 141                 | 173   | 211   | 135                  | 170   | 207   |
| Andezit 5  | 140                 | 171   | 209   | 133                  | 167   | 204   |
| Andezit 6  | 143                 | 174   | 214   | 138                  | 171   | 210   |
| Andezit 7  | 140                 | 175   | 211   | 136                  | 169   | 207   |
| Andezit 8  | 141                 | 173   | 212   | 135                  | 169   | 207   |
| Andezit 9  | 139                 | 172   | 210   | 134                  | 168   | 206   |
| Andezit 10 | 140                 | 171   | 209   | 134                  | 168   | 205   |
| Ort        | 140                 | 173   | 211   | 135                  | 169   | 207   |



Şekil 5. Andezit örneklerinin fiziko-mekanik özellikleri ile 8-14-25 cm kesme derinliğinde aşağı ve yukarı kesme sırasında çekilen akım miktarları arasındaki ilişkiler

## KAYA MÜHENDİSLİK YAPILARININ DURAYLILIK ANALİZLERİNDE KULLANILAN KAYA YENİLME ÖLÇÜTLERİ

### THE ROCK FAILURE CRITERIA USED IN THE STABILITY ANALYSES OF THE ROCK ENGINEERING STRUCTURES

İ. ÖZKAN

Selçuk Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 42079, KONYA.

R. ÖZEL

Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı, Araştırma Merkezi, 06520, ANKARA.

**ÖZET:** Bu çalışmada, Bieniawski, Hoek-Brown ve Coulomb yenilme ölçütlerine bağlı olarak bir dizi yenilme analizi yapılmıştır. Analizler sırasında öncelikle ODTÜ-Maden Mühendisliği Bölümü Araştırma Grubu tarafından TTK-Gelik ve ETİBANK (Eti Holding)-Bigadiç (Simav) Kolemanit Ocağı için gerçekleştirilen proje çalışmaları esnasında göz önüne alınan numuneler için yapılan kaya mekaniği deney sonuçlarına, sondaj ve arazi etütlerine bağlı bir yeri tabanı oluşturulmuştur. Bu veri tabanına ve gündemdeki görgül yenilme ölçütlerine bağlı 24 adet kaya birimi için 217 adet yenilme karakteristiği belirlenmiş ve sonuçlar grafiksel şekilde gösterilmiştir. Son olarak, bu çalışmada göz önüne alınan tüm ölçütler grafik sonuçlarına göre birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

**ABSTRACT:** In this study, a series of failure analyses have been carried out depending on a failure criterion namely, Bieniawski, Hoek-Brown and Coulomb. During the analyses, firstly, a data base was constructed based on standart rock mechanics laboratory tests, drill core and field observations. Specimens used in these tests have been obtained from TTK-Gelik Hard Coal Mine Project and ETİBANK (Eti Holding Company)-Bigadiç (Simav) Colemanite Mine Project which were carried out by the METU-Mine Research Group. The two hundred seventy failure analyses for twenty four rock units, based on the data base and these failure characteristic have been determined and results are presented as graphical outputs. Finally, all the criteria considered in this study are compared to each other depending on their graphical trends.

#### 1. GİRİŞ

Kaya yenilme ölçütleri, kaya yenilme davranışını temsil etmeleri açısından çok önemlidir. Klasik mukavemet teorileri normal gerilmenin bazı değerlerinden sonra kaya yenilme davranışını tam olarak temsil edemediği için çok sayıda görgül (ampirik) kaya yenilme ölçütü (kriteri) geliştirilmiştir. Bu ölçütler Mohr yenilme eğrisinde normal gerilmenin artan değerleri için görülen aşağıya bükülmeyi ve çekme gerilmesi bölgesindeki çekme kesmelerini de göz önüne alarak çok sayıda kaya üzerinde çeşitli dayanım testleri yapılarak geliştirilmişlerdir.

Bugün, görgül yenilme ölçütleri yapısal kaya mekaniği ile ilgili tasarım çalışmalarında vazgeçilmez bir mühendislik aracı haline gelmişlerdir. Özellikle yeraltı ve yerüstü kaya yapılarının gerilme duraylılık analizlerinde, matematiksel ya da sayısal yaklaşımlar da yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, geniş bir kaynak araştırması yapılarak halen mevcut olan 21 adet teorik ve

görgül kaya yenilme ölçütü belirlenmiştir (Çizelge 1 ve 2). Teorik yenilme ölçütlerden bugün yaygın olarak kullanım alanı bulabilen yaklaşımlar; Coulomb, Mohr Zarfı ve Griffith çatlak teorisidir. Bu çalışmada, sadece görgül (ampirik) yaklaşımlar yardımı ile bazı maden ocaklarındaki kaya birimleri üzerinde ayrıntılı yenilme karakteristikleri çıkarılmıştır. Bu nedenle teorik yenilme ölçütleri üzerinde durulmamış ancak görgül yenilme ölçütleri üzerinde genel bilgiler takip eden bölümlerde sunulmuştur.

Bu bildiride, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Araştırma Grubu tarafından gerçekleştirilen ETİBANK (Eti Holding)-Bigadiç (Simav) Ocağı galeri ve uzun ayaklar için tahkimat tasarımı (Paşamehmetoğlu vd., 1988) ve TTK-Gelik Taşkömürü Ocağı'ndaki uzun ayaklar için yapılan tahkimat tasarımı (Paşamehmetoğlu vd., 1989) çalışmalarından elde edilen veriler göz önüne alınmıştır. Bu iki ocakta karşılaşılan 24 adet kaya birimine ait elde edilen laboratuvar ve arazi verisine bağlı bir veri tabanı hazırlanmış ve görgül yenilme ölçütlerinin karşılaştırılması için kullanılmıştır.

Çizelge 1. Kaya Maddeleri için Geliştirilmiş Başlıca Yenilme Ölçütleri (Bieniawski, 1984)

| Ölçütün İsmi                                 | Geliştiren Kişi   | Geliştirildiği Tarih | Yayınlandığı Kaynak     |
|----------------------------------------------|-------------------|----------------------|-------------------------|
| Coulomb-Navier                               | Coulomb           | 1773                 | Jaeger ve Cook, 1979    |
| Maksimum Kayma Gerilmesi                     | Tresca            | 1864                 | Nadai, 1950             |
| Maksimum Asal Gerilme                        | Rankine           | 1869                 | Nadai, 1950             |
| Maksimum Elastik Birim Uzama                 | St. Venant        | 1870                 | Nadai, 1950             |
| Sabit Elastik Deformasyon Enerjisi           | Beltrami          | 1885                 | Nadai, 1950             |
| Makaslama Yenilmesi                          | Mohr              | 1900                 | Jaeger ve Cook, 1979    |
| Sabit Oktehdral Kesme Gerilmesi              | Huber             | 1904                 | Jaeger ve Cook, 1979    |
| Saptırıcı Gerilme Gereğinin İkinci Değişmezi | Von Mises         | 1913                 | Jaeger ve Cook, 1979    |
| Orijinal Griffith                            | Griffith          | 1921                 | Griffith, 1921, 1924    |
| İstatiksel Yenilme Teorisi                   | Weibull           | 1939                 | Weibull, 1952           |
| Çatlak Tokluğu Teorisi                       | Irwin             | 1960                 | Irwin, 1960             |
| Düzeltilmiş Griffith                         | Mc Clintock-Walsh | 1962                 | Mc Clintock-Walsh, 1962 |
| Griffith Uzantısı                            | Murrell           | 1963                 | Murrell, 1963           |
| Görgül Kaya Kütle Dayanımı                   | Hoek-Brown        | 1980                 | Hoek-Brown, 1980        |

Çizelge 2. Kaya Maddeleri için Son Zamanlarda Geliştirilmiş Görgül Yenilme Ölçütleri

| Ölçütün İsmi                | Geliştiren              | Geliştirildiği Tarih | Yayınlandığı Kaynak                 |
|-----------------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| Orijinal Bieniawski         | Bieniawski              | 1974                 | Bieniawski, 1974                    |
| Orijinal Hoek-Brown         | Hoek-Brown              | 1980                 | Hoek ve Brown, 1980                 |
| Düzeltilmiş Bieniawski      | Yudhbir ve Prinzl       | 1983                 | Yudhbir ve Prinzl, 1983             |
| Ramamurthy                  | Ramamurthy              | 1986                 | Ramamurthy, 1986                    |
| Carter                      | Carter                  | 1991                 | Carter vd., 1991                    |
| Düzeltilmiş Hoek-Brown      | Hoek, Wood ve Shah      | 1992                 | Hoek vd., 1992                      |
| Genelleştirilmiş Bieniawski | Kalamaras ve Bieniawski | 1993                 | Kalamaras ve Bieniawski, 1993, 1995 |
| Genelleştirilmiş Hoek-Brown | Hoek                    | 1995                 | Hoek vd., 1995                      |

## 2. GÖRGÜL KAYA YENİLME ÖLÇÜTLERİ

Klasik mukavemet teorileri normal gerilmenin bazı değerlerinden sonra tam olarak kaya yenilme davranışını temsil edemediklerinden, çok sayıda görgül yenilme ölçütü bir çok kaya üzerinde çeşitli dayanım testleri yapılarak geliştirilmiştir. Bu ölçütler, Mohr yenilme eğrisinde normal gerilmenin artan değerleri için görülen aşağıya bükülmeyi ve çekme gerilmesi bölgesindeki çekme kesmelerini de göz önüne almaktadır.

Görgül kaya yenilme ölçütleri ile ilgili yapılan kaynak araştırması esnasında kaya mekaniği çalışmalarında yaygın olarak kabul görüp kullanılan ölçütler belirlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan ve Çizelge 2'de sunulan yenilme ölçütlerinin gelişimiyle ilgili ayrıntılı bilgiler yerine burada sadece önerilen yenilme eşitlikleri ve girdi parametresi olan kütle dayanım sabitleri ile ilgili önerilen eşitlikler topluca Çizelge 3'de

sunulmuştur. Görgül kaya yenilme ölçütlerinin sıkça kullanılmasına neden olan kaya kütle karakteristiğini yansıtan kaya kütle dayanım sabitlerinin kullanılması olmuştur. Bu dayanım sabitleri Bieniawski'nin genelde RMR sınıflama sistemine bağlı büyüklüklerdir (Çizelge 3). Ancak Hoek ve arkadaşları tarafından yapılan araştırmalar neticesinde önerdikleri Düzeltilmiş ve Genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme ölçütünde, RMR sistemi ile ilişkili geliştirdikleri yeni bir sınıflama sistemi olan Jeolojik Dayanım İndeksi-GSI'ni (Hoek vd., 1995) kullanmışlardır. Araştırmacılara göre;

$RMR'76 > 18$  koşulu için  $GSI = RMR'76$  [1]  
olarak alınmalıdır.

Burada;

$RMR'76$ : Bieniawski'nin 1976 yılında yeniden önerdiği RMR sınıflama sistemi için hesaplanan kaya kütle indeksi değeridir (Bieniawski, 1976).

Çizelge 3.Kaynak Araştırması Esnasında Belirlenen ve Yaygın Olarak Kullanılan Görgül Kaya Yenilme Ölçütleri

| Yenilme Ölçütünün İsmi      | Model No | Önerilen Yenilme Ölçütü Eşitliği                                                         | Kaya Kütle Dayanım Sabitleri                                                                                                                                                                                                                  |
|-----------------------------|----------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Orijinal Bieniawski         | 1        | $\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = A \left[ \frac{\sigma_3}{\sigma_c} \right]^k + 1$           | 1. $m_i = 1,22 A^{1,764}$ (Gerçek ve Müftüoğlu, 1993)<br>2.Orijinal Bieniawski yenilme ölçütü için A sabiti önerileri (Bieniawski,1974)<br>3.Kaya birimleri için k=0,75 (Bieniawski,1974)                                                     |
| Düzeltilmiş Bieniawski      | 2        | $\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = B \left[ \frac{\sigma_3}{\sigma_c} \right]^{0,6} + A$       | $A = \exp \left[ \frac{1}{12} (RMR - 100) \right]^*$<br>$B = \exp \left[ \frac{1}{52} (RMR + 20) \right]^*$                                                                                                                                   |
| Genelleştirilmiş Bieniawski | 3        | $\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = 4 \left[ \frac{\sigma_3}{\sigma_{cm}} \right]^{0,6} + 1$    | $\sigma_{cm} = \sigma_c \exp \left[ \frac{1}{24} (RMR - 100) \right]^*$                                                                                                                                                                       |
| Orijinal Hoek-Brown         | 4        | $\sigma_1 = \sigma_3 + (m \sigma_c \sigma_3 + s \sigma_c^2)^{\frac{1}{2}}$               | $m = m_i \exp \left[ \frac{RMR - 100}{28} \right]$<br>$s = \exp \left[ \frac{RMR - 100}{9} \right]$<br>$m = m_i \exp \left[ \frac{RMR - 100}{14} \right]**$<br>$s = \exp \left[ \frac{RMR - 100}{6} \right]**$                                |
| Düzeltilmiş Hoek-Brown      | 5        | $\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left[ m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} \right]^a$          | $m_b = m_i \exp \left[ \frac{GSI - 100}{28} \right]$ (GSI<25 ve GSI>25 için)<br>$s = \exp \left[ \frac{GSI - 100}{9} \right]$ (GSI>25 için)<br>$s = 0$ (GSI<25 için)<br>$a = 0,5$ (GSI>25 için)<br>$a = 0,65 - \frac{GSI}{200}$ (GSI<25 için) |
| Genelleştirilmiş Hoek-Brown | 6        | $\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left[ m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right]^a$      | $m_b = m_i \exp \left[ \frac{GSI - 100}{28} \right]$ (GSI<25 ve GSI>25 için)<br>$s = \exp \left[ \frac{GSI - 100}{9} \right]$ (GSI>25 için)<br>$s = 0$ (GSI<25 için)<br>$a = 0,5$ (GSI>25 için)<br>$a = 0,65 - \frac{GSI}{200}$ (GSI<25 için) |
| Coulomb                     | 7        | $\sigma_{max} = N_\phi \sigma_{min} + \sigma_c$                                          | $N_\phi = (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi)$                                                                                                                                                                                                  |
| Ramamurthy                  | 8        | $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_3} = B \left[ \frac{\sigma_{cm}}{\sigma_c} \right]^a$ | $\frac{\sigma_c}{\sigma_{cm}} = \exp \left[ \frac{1}{31} (RMR - 100) \right]^*$                                                                                                                                                               |
| Carter                      | 9        | $\frac{\sigma_1}{\sigma_{cm}} = \left[ 1 - \frac{\sigma_3}{\sigma_c} \right]^R$          | $\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_c} = \exp \left[ \frac{1}{22} (RMR - 100) \right]^*$<br>$R = \exp[-0,03 - 0,0025 RMR]^*$                                                                                                                           |

\* Kömür damarı için önerilen kaya kütle dayanım sabitleri

\*\* Rahatsız edilmiş kaya kütleleri için dayanım sabitleri.

RMR'89 > 23 koşulu için GSI = RMR'89-5 [2]

Burada;

RMR'89: Bieniawski'nin 1989 yılında yeniden önerdiği RMR sınıflama sistemi için hesaplanan kaya kütleli indeks değeridir (Bieniawski, 1989).

RMR'76 < 18 ve RMR'89 < 23 koşulu için ise Bieniawski'nin RMR sistemi yerine Barton'un Q sınıflama sisteminin kullanılması ile aşağıdaki eşitlik yardımıyla GSI değerine ulaşılması önerilmektedir.

$$GSI=9\ln Q+44 \quad [3]$$

Burada;

GSI : Jeolojik Dayanım İndeksi (Geological Strength Index)

Q : Barton'un Q Kaya Kütle Sınıflama Sistemi (Barton, 1974)

Literatürde kaya kütle dayanım sabitlerinin belirlenmesindeki zorlukların aşılması amacıyla çeşitli araştırmacılar tarafından bazı kaya birimlerine ait  $m_i$  değerlerinin verildiği görülmektedir. Bu konuda Gerçek (1996) tarafından derlenen ve ayrıca kendi çalışmalarını da içeren 41 farklı kaya birimi için hazırlanan geniş bir  $m_i$  kaya malzeme dayanım sabitlerini gösteren bir liste, III. Ulusal Kaya Mekanik Toplantısında sunulmuştur.

### 3.KAYA YENİLME ANALİZLERİ İÇİN VERİ TABANININ HAZIRLANMASI

Bu çalışmada ilk önce ETİBANK (Eti Holding)-Bigadiç-Simav Kolemanit Ocağı'nda uzun ayak için yapılan tahkimat tasarımı çalışmaları (Paşamehmetoğlu vd., 1988) göz önüne alınmıştır. Tavan tabakalarının kaya kütle karakteristiklerinin belirlenmesinde karşılaşılan 7 farklı kaya birimine ait laboratuvar test sonuçları ve bu araştırmanın arazi etütleri çalışmalarında belirlenen RMR (Bieniawski, 1973) sınıflama sistemine ait kaya kütle sınıflama sonuçları dikkate alınmıştır. Ayrıca bu proje çalışmasında bulunan iki araştırmacı tarafından zayıf, tabakalı ve kil içerikli kaya kütleleri için geliştirilen M-RMR (Ünal ve Özkan, 1990 ve Ünal, 1996) sınıflama sonuçları da bu çalışmada dikkate alınmıştır. Bu her iki sistemi de göz önüne almadaki amaç, görgül kaya yenilme ölçütlerinde kullanılan kaya kütle sabitlerini burada belirtilen her iki sistemle ayrı ayrı belirleyerek genel yenilme karakteristikliğini çıkarmak ve sonuçlarını değerlendirmek olmuştur. ETİBANK (Eti Holding) Simav Ocağı'nda sık karşılaşılan yedi farklı kaya birimine ait mekanik laboratuvar testlerinden tek eksenli basınç dayanımı sonuçları ile içsel sürtünme açısı değerleri ve bu kaya birimlerinin oluşturduğu tavan tabakalarına ait kaya kütle sınıflama sonuçları topluca Çizelge 4'te sunulmuştur. Hazırlanan veri tabanının ikinci kısmında ise TTK-Gelik Taş Kömürü Ocağı için yapılan bir proje çalışmasında (Paşamehmetoğlu vd., 1989) karşılaşılan on yedi adet kaya birimine ait mekanik ve kütle özellikleri dikkate alınmıştır. Çizelge 5'te, kaya birimlerine ait tek eksenli basınç dayanımları, içsel sürtünme açısı değerleri ve Bieniawski (1979) sınıflama sistemine göre kütle sınıflama değerleri görülmektedir.

Çizelge 4. ETİBANK (Eti Holding) Simav Ocağında Karşılaşılan 7 farklı Kaya Birimini Yansıtan Karakteristik Değerler.

| Kaya Birimi                | Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa) | İçsel Sürtünme Açısı (°) | RMR | M-RMR |
|----------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-----|-------|
| Kolemanit                  | 10.65                             | 41.00                    | 31  | 29    |
| Üleksit                    | 14.24                             | 31.00                    | 23  | 12    |
| Kiltaşı Laminalı Kireçtaşı | 21.66                             | 24.00                    | 37  | 44    |
| Kireçtaşı                  | 25.65                             | 15.00                    | 21  | 27    |
| Altere Kireçtaşı           | 5.82                              | 10.40                    | 39  | 37    |
| Tüfit                      | 7.39                              | 20.00                    | 52  | 48    |
| Ara Tüf                    | 34.98                             | 22.40                    | 36  | 34    |

Çizelge 5. TTK-Gelik Taş Kömürü Ocağında Karşılaşılan On yedi Adet Kaya Birimine Ait Bazı Değerler (Paşamehmetoğlu vd., 1989).

| Kaya Birimi                              | Tek Eksenli Basınç<br>Dayanımı<br>(MPa) | İçsel Sürtünme<br>Açısı<br>(°) | RMR   |
|------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------|-------|
| Kumtaşı (Tavan Taşı)                     | 107.20                                  | 35.3                           | 64-87 |
| Çok İnce taneli Kumtaşı (Tavan Taşı)     | 112.77                                  | 31.7                           | 64-87 |
| Çok İnce taneli Kumtaşı (Taban Taşı)     | 97.55                                   | 21.4                           | 64-87 |
| Orta Taneli Kumtaşı (Tavan Taşı)         | 103.68                                  | 38.8                           | 64-87 |
| Orta Taneli Kumtaşı (Taban Taşı)         | 82.67                                   | 37.7                           | 64-87 |
| Çakıllı Orta Taneli Kumtaşı (Tavan Taşı) | 90.40                                   | 44.7                           | 64-87 |
| Çakıllı Orta Taneli Kumtaşı (Taban Taşı) | 102.00                                  | 45.1                           | 64-87 |
| Silttaşı (Tavan Taşı)                    | 77.55                                   | 26.6                           | 60-87 |
| Silttaşı (Taban Taşı)                    | 70.05                                   | 37.2                           | 60-87 |
| Orta Taneli Silttaşı (Taban Taşı)        | 91.33                                   | 31.9                           | 60-87 |
| Kaba Taneli Silttaşı (Tavan Taşı)        | 64.10                                   | 35.7                           | 60-87 |
| Kaba Taneli Silttaşı (Taban Taşı)        | 89.24                                   | 26.3                           | 60-87 |
| Bantlı Silttaşı-Kumtaşı (Tavan Taşı)     | 88.70                                   | 24.8                           | 44-54 |
| Bantlı Silttaşı-Kumtaşı (Taban Taşı)     | 110.80                                  | 32.1                           | 44-54 |
| Kiltaşı (Tavan Taşı)                     | 83.30                                   | 34.8                           | 28-34 |
| Siltli Kiltaşı (Tavan Taşı)              | 89.30                                   | 26.0                           | 44-54 |
| Siltli Kiltaşı (Taban Taşı)              | 89.60                                   | 28.5                           | 44-54 |

#### 4. MODEL KAYA BİRİMLERİ ÜZERİNDE YENİLME ÖLÇÜTLERİNİN KULLANILMASI

Bu çalışmada, kaynak araştırması sonucunda belirlenen dokuz adet kaya yenilme ölçütünden (Çizelge 3) yaygın olarak kullanılan Orijinal Bieniawski, Orijinal Hoek-Brown, Düzeltilmiş Hoek-Brown, Genelleştirilmiş Hoek-Brown ve Coulomb yenilme ölçütü eşitlikleri göz önüne alınmıştır. Literatürde Düzeltilmiş Bieniawski, Genelleştirilmiş Bieniawski, Ramamurthy ve Carter yenilme ölçütlerine ait kaya kütle dayanım sabitlerinin kömür damarları için verildiği tespit edildiğinden bu çalışmada göz ardı edilmişlerdir. Analizler esnasında öncelikle TTK-Gelik Kömür Ocağı'nda karşılaşılan 17 adet kaya birimi daha sonra ise Etibank-Bigadiç Simav Kolemanit Ocağı'nda karşılaşılan 7 adet kaya birimi göz önüne alınarak bir seri yenilme analizleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar ile değerlendirmeler aşağıdaki bölümlerde sunulmuştur.

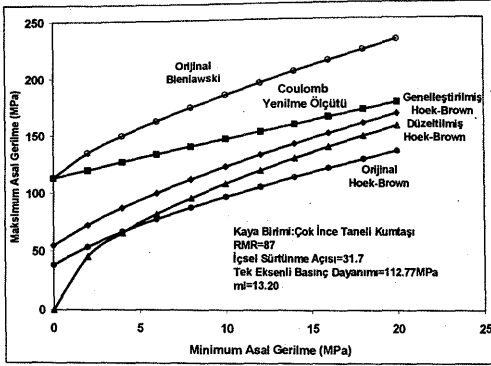
##### 4.1. TTK-Gelik Ocağı'nda Karşılaşılan Kaya Birimleri Yenilme Karakteristiklerinin Tesbiti

TTK-Gelik Kömür Ocağı'nda karşılaşılan 17 adet kaya birimi için yenilme ölçütlerine ait toplam 119 adet yenilme analizi yapılmış ve elde edilen

sonuçlar 17 adet grafikte sunulmuştur. Çizelge 5'te görüldüğü gibi RMR sınıflama değerleri bir aralık dahilinde verilmiş olup bu bildiride sadece üst sınır değerlerine sahip olan çok ince taneli kumtaşı (RMR = 64-87) ile alt sınır değerine sahip olan kiltası (RMR = 28-34) kaya birimleri için elde edilen yenilme karakteristiği sonuçlarına ait grafikler sırasıyla Şekil 1 ve 2'de sunulmuştur.

Şekil 1 ve 2'de görüldüğü gibi sadece Hoek-Brown yaklaşımlarına bakıldığında Orijinal Hoek-Brown ölçütünün daha tutucu olduğu tespit edilirken Orijinal Bieniawski yaklaşımının diğer yaklaşımlara nazaran çok daha az tutucu olduğu görülmektedir.

RMR değeri düşüldükçe direkt kaya kütle sınıflama değerine bağlı dayanım sabitleri ile Hoek-Brown yaklaşımları hemen duyarlı davranıp daha tutucu olurken Orijinal Bieniawski ve Coulomb yenilme ölçütleri bu duyarlılığı çok az gösterebilmektedirler. Coulomb yenilme ölçütü kaya malzeme parametrelerine bağlı olduğu için yüksek yenilme değerlerinde yenilmenin olacağını gösterirken, Hoek-Brown ölçütleri gibi kaya kütle özelliklerine bağlı Orijinal Bieniawski ölçütü ise sahip olduğu eşitliğin karakteristiğinden dolayı yüksek maksimum asal gerilme değerlerinde yenilmenin olacağını savunmaktadır.



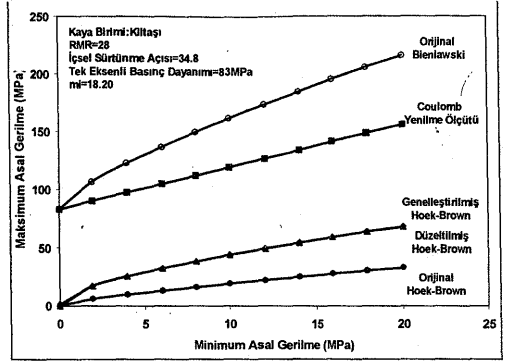
Şekil 1. Çok ince taneli kumtaşı kaya birimine ait yenilme ölçüt sonuçları

#### 4.2. ETİBANK-Bigadiç-Simav Ocağı'nda Karşılaşılan Kaya Birimlerine Ait Yenilme Karakteristiklerinin Belirlenmesi.

Simav-Kolemanit yeraltı ocağında karşılaşılan 7 kaya birimi için yenilme analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerin bir bölümü, Orijinal RMR (Bieniawski, 1973) sistemine bağlı yapılrken diğer bir bölümü ise M-RMR (Ünal ve Özkan, 1990) sistemine bağlı olmak üzere toplam 98 adet yenilme analizi gerçekleştirilmiştir. Bu bildiride her iki sınıflama sistemi için en yüksek ve en küçük kaya kütle sınıflama değerine sahip tüfit ve üleksit kaya birimlerine ait analiz sonuçları sırasıyla Şekil 3, 4, 5 ve 6'da sunulmuştur.

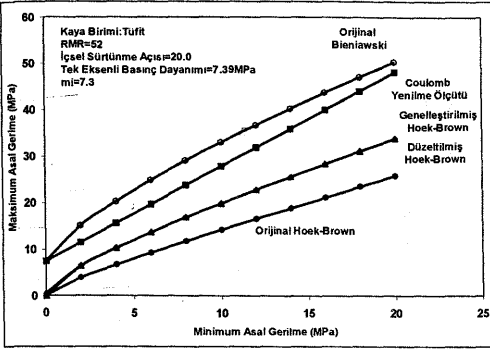
Bu maden ocağında karşılaşılan en büyük ve en küçük RMR değerleri için en tutucu yaklaşımın Hoek-Brown yaklaşımlarından Orijinal Hoek-Brown ölçütü olduğu tespit edilirken (Şekil 3 ve 4), Orijinal Bieniawski yaklaşımının ise daha az tutucu davrandığı dikkat çekmektedir. Hoek-Brown yenilme ölçütleri azalan kaya kütle indeks değerine bağlı olarak yenilme değerlerini hissedilir biçimde küçültürken diğer görgül ölçüt için bu durumu söylemek zordur. Coulomb yenilme ölçütü ise kaya malzeme özelliklerine bağlı olduğundan dolayı yine yüksek dayanım değerlerini savunmakta olduğu tespit edilmiştir.

Simav maden ocağı için ayrıca bu çalışmada yenilme karakteristikleri sunulan tüfit ve üleksit kaya birimleri için elde edilen M-RMR sınıflama

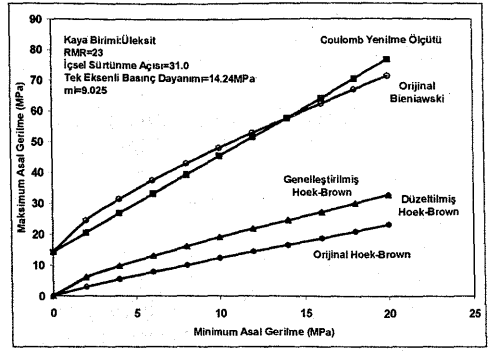


Şekil 2. Kıltaşı kaya birimine ait yenilme ölçüt sonuçları

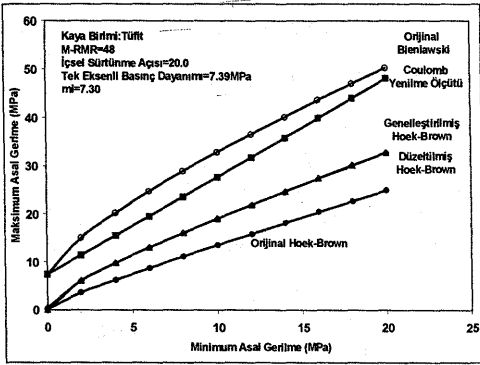
sistemi değerleri kullanılarak kaya kütle dayanım sabitleri elde edilmiş ve buna bağlı yenilme karakteristiklerinin elde edilen sonuçları grafikler halinde Şekil 5 ve 6'da verilmiştir. Şekil 5 ve 6'da görüldüğü gibi diğer örnekler üzerinde elde edilen yapı burada da görülmektedir. Orijinal Hoek-Brown ölçütü en tutucu ölçüt olurken, Orijinal Bieniawski ölçütünün yine en az tutucu ölçüt olduğu tespit edilmiştir. Coulomb yaklaşımının ise Orijinal Bieniawski ölçütü gibi daha yüksek maksimum asal gerilme değerlerinde yenilmenin olacağını savunduğu görülmektedir. Bu çalışmada göz önüne alınan Orijinal Hoek-Brown ölçütünde, kaya kütle sabitleri (m, s) için rahatsız edilmiş kaya kütleli eşitlikler kullanılmıştır (Çizelge 3). Özellikle zayıf, tabakalı ve kil içerikli kaya kütleleri için geliştirilmiş M-RMR (Ünal ve Özkan, 1990) kaya kütle değerleri için ayrıca rahatsız edilmemiş formdaki eşitlikler kullanılarak Orijinal Hoek-Brown yenilme ölçüt sonuçları karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler neticesinde M-RMR değerlerine göre rahatsız edilmemiş kaya kütle sabitleri için elde edilen Orijinal Hoek-Brown yenilme ölçütünün rahatsız edilmiş formdaki yenilme ölçütüne göre daha yüksek maksimum asal gerilme değerlerinde yenilmenin olacağını savunmakta olduğu tespit edilmiştir. Ancak rahatsız edilmemiş kaya kütle dayanım sabitlerinin (m,s) kullanıldığı durumda elde edilen yenilme sonuçlarının Düzeltilmiş ve Genelleştirilmiş Hoek-Brown ölçütleri ile hemen hemen aynı yenilme değerlerini verdiği dikkat çekmiştir.



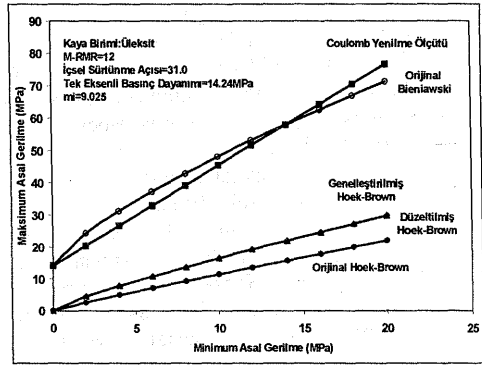
Şekil 3. Tüft kaya birimine ait yenilme karakteristiği



Şekil 4. Üleksit kaya birimine ait yenilme sonuçları



Şekil 5. M-RMR sistemine bağlı tüft kaya birimine ait yenilme sonuçları



Şekil 6. M-RMR sistemine bağlı üleksit kaya birimine ait yenilme karakteristiği.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, literatürde tespit edilen ve yaygın olarak kullanılan görgül yenilme ölçütlerini karşılaştırmak amacıyla bazı kaya birimlerine ait yenilme karakteristikleri belirlenmiştir. Çalışma esnasında TTK-Gelik Kömür Ocağı ve Etibank-Simav Kulemanit Ocağı'nda karşılaşılan toplam 24 adet kaya birimi kullanılmış ve elde edilen 217 adet yenilme karakteristiği sonucunda yapılan değerlendirme sonuçları aşağıda sunulmuştur;

1. Hoek-Brown yenilme ölçütleri içerisinde en tutucu durumun Orjinal Hoek-Brown yaklaşımında olduğu tespit edilmiştir. Hoek-Brown yenilme ölçütleri tarihsel gelişim içerisinde tutucu bir karakterden daha az tutucu bir karakter sergileyen daha büyük maksimum asal gerilme değerlerinde yenilmenin olmasını

sağlayacak bir gelişim gösterdiği tespit edilmiştir.

2. Kaya kütle sınıflama indeks değerinin değişimi Orjinal Bieniawski ölçütünde çok az hissedebilmekte iken, Hoek-Brown yaklaşımlarının bu durumu daha iyi hissederek geçerli parametreler için daha küçük veya büyük yenilme değerlerini verebilmektedir.
3. Düşük kaya kütle sınıflama indeks değerlerinde, s kaya kütle değerinin küçülmesine bağlı olarak Düzeltilmiş ve Genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme ölçütleri hemen hemen aynı maksimum asal gerilme değerlerinde yenilmenin olacağını göstermektedirler.
4. Orjinal Bieniawski ölçütü için verilen eşitliğin yetkinliğine bağlı olarak tek eksenli basınç dayanımının eşitlikte çarpan olarak yer almasından dolayı, düşük kaya kütle sınıflama

indeks değerlerinde ancak yüksek tek eksenli basınç dayanımı söz konusu ise bu durumda ölçüt Coulomb gibi yüksek yenilme değerlerini verebilmektedir (Şekil 2).

5. Orjinden geçen tek ölçüt Düzeltilmiş Hoek-Brown yenilme ölçütüdür. Diğer ölçütlerin minimum asal gerime değeri sıfır dahi olsa maksimum asal gerilme değerleri sıfırdan farklı olabilmektedir.
6. Özellikle azalan tek eksenli basınç dayanımı değerleri ile Coulomb ve Orijinal Bieniawski yenilme ölçütleri birbirlerine iyice yaklaştığı tespit edilmiştir. Orijinal Bieniawski yenilme ölçütü lineer olmayan karakterde gelişirken artan minimum asal gerilme değerlerinde Coulomb ölçütüne göre daha küçük seviyelerde yenilmenin olacağını göstermektedir.
7. RMR ve M-RMR kaya kütle sınıflama sistemlerine bağlı rahatsız edilmemiş kaya kütle dayanım sabitlerinin ( $m_s$ ) kullanıldığı durumda elde edilen yenilme sonuçlarının Düzeltilmiş ve Genelleştirilmiş Hoek-Brown ölçütleri ile hemen hemen aynı yenilme değerlerini verdiği dikkat çekmiştir.
8. Kaya maddesinin içsel sürtünme açısı ve tek eksenli basınç dayanımı değerlerine bağlı Coulomb yenilme ölçütü ile yapılan bütün analizlerde, ölçütün Hoek-Brown ölçütüne göre daha büyük maksimum asal gerilme değerlerinde yenilme olacağını savunduğu tespit edilmiştir. Buna karşın özellikle büyük RMR indeks değerlerinde Orijinal Bieniawski ölçütünün daha altında yer alırken düşük RMR değerlerinde bu iki ölçütün birbirlerine yaklaştıkları görülmüştür.
9. Bu çalışmada görgül yenilme ölçütleri içerisinde en tutucu sonuçların Orijinal Hoek-Brown yenilme ölçütünde olduğu tespit edilirken buna karşı en az tutucu yaklaşımın Orijinal Bieniawski ölçütünde olduğu görülmüştür. Düzeltilmiş ve Genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme ölçütlerinin bu iki sınır çizgi arasında kaldığı belirlenmiştir. Düzeltilmiş ve Genelleştirilmiş Hoek-Brown ölçütleri her ne kadar düşük kaya kütle sınıflama indeks değerlerinde hemen hemen aynı karakteri sergileseler de büyük sınıflama indeks değerlerinde Genelleştirilmiş Hoek-Brown ölçütü göreceli olarak daha büyük yenilme değerlerinde duraysızlık probleminin olduğunu vurgulamaktadır.

## KAYNAKLAR

- Barton, N.R., Lien, R. ve Lunde, J. 1974. *Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support*. Rock Mech.6(4): 189-239.
- Bieniawski, Z.T. 1973. *Engineering Classification of Jointed Rock Masses*. Trans.S. Afr. Inst. Civ. Eng. 15 : 335-344.
- Bieniawski, Z.T. 1974. *Estimating the Strength of Rock Materials*. J. S. Afr. Inst. Min. Metall. 74 : 312-320.
- Bieniawski, Z.T. 1976. *Rock Mass Classification in Rock Engineering*. Symp. On Exploration for Engineering Bakema: 97-106.
- Bieniawski, Z.T. 1979. *The Geomechanics Classification in Rock Engineering Applications*. Proc. 4<sup>th</sup> Int. Congress on Rock Mechanics, ISRM, Balkema: 51-58.
- Bieniawski, Z.T. 1984. *Rock Mechanics Design in Mining and Tunnelling*. Balkema: 272.
- Bieniawski, Z.T. 1989. *Engineering Rock Mass Classification*. John Wiley & Sons: 251.
- Carter, B.J., Duncan, S.E.J. ve Lajtai, E.Z. 1991. *Fitting Strength Criteria to Intact Rock*. Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 9: 73-81.
- Gerçek, H. ve Müftüoğlu, Y.V. 1993. *Failure Characteristics of Coal Measure Rock*. Proceedings, International Symp. On Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering, Edited by A.G. Paşamehmetoğlu et al., A.A. Balkema, Rotterdam: 329-334.
- Gerçek, H. 1996. *Hoek-Brown Yenilme Ölçütünün Gelişimi*. III. Ulusal Kaya Mekaniği Semp.: 251-262.
- Griffith, A.A. 1921. *The Phenomenon of Repture and Flow in Solids*. Philosophical Transactions, Vol. 222: 163-198.
- Griffith, A.A. 1924. *Theory of Repture*. Proc. 1<sup>st</sup> Int. Cong. Applied Mechanics, J. Waltman, Jr. Press, Delft: 53-66.
- Hoek, E. ve Brown, E.T. 1980. *Underground Excavations in Rock*. Institution of Mining and Metallurgy: 527.
- Hoek, E., Wood, D. ve Shah, S. 1992. *A Modified Hoek-Brown Failure Criterion for Jointed Rock Masses*. Proc. ISRM-EUROCK'92:209-214.
- Hoek, E., Kaiser, P.K. ve Bawden, W.F. 1995. *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. Balkema: 215.
- Irwin, G.R. 1960. *Fracture Mechanics*. Structural Mechanics, Pergamon Press, New York: 557-592.

- Jaeger, J.G. ve Cook, N.G.W. 1979. *Fundamentals of Rock Mechanics*. Chapman and Hall, London, 3<sup>rd</sup> Edition: 88-106.
- Kalamaras, G. S. ve Bieniawski, Z.T. 1993. *A Rock Mass Strength Concept for Coal Seams*. 12<sup>th</sup> Conf. on Ground Control in Mining: 274-283.
- Kalamaras, G. S. ve Bieniawski, Z.T. 1995. *A Rock Mass Strength Concept for Coal Seams Incorporating the Effect of Time*. Proceedings, 8<sup>th</sup> International Cong. on Rock Mechanics, ISRM, A. A. Balkema, Rotterdam, 1:295-302.
- McClintock, F.A. ve Walsh, J. 1962. *Friction on Griffiths's Cracks in Rocks Under Pressure*. Proc. 4<sup>th</sup> U.S. National Cong. Appl. Mech., Berkeley: 1015-1021.
- Murrell, S. 1963. *A Criterion for Brittle Fracture of Rocks and Concrete Under Triaxial Stress and the Effect of Pore Pressure on the Criterion*. Proc. 5<sup>th</sup> U.S. Rock Mech. Sepm., Minneapolis, Minnesota: 563-573.
- Nadai, A. 1950. *Theory of Flow and Fracture of Solids*. McGraw-Hill Book Co., New York: 207-228.
- Paşamehmetoğlu, A.G., Ünal, E. ve Tutluoğlu, L. 1988. *Etibank Bigadiç Madenleri İşletmeleri Müessese Müdürlüğü Simav Yer altı Ocağı Kaya Mekaniği Etütleri*. Nihai Rapor. ODTÜ: 361.
- Paşamehmetoğlu, A.G. ve ark. 1989. *Rock Mechanics Studies at Karadon-Gelik*. Final Report. METU: 222.
- Ramamurthy, T. 1986. *Stability of Rock Masses*. Indian Journal (Geotechnical), Vol.16 : 1-74.
- Ünal, E. ve Özkan, İ. 1990. *Determination of Classification Parameters for Clay Bearing and Stratified Rock Mass*. Proc. 9<sup>th</sup> Conf. on Ground Control in Mining.: 250-259.
- Ünal, E., 1996. *Modified Rock Mass Classification: M-RMR System; Milestones in Rock Engineering A Jubilee Collection*; Edited by Z.T.Bieniawski, Balkema: 203-223.
- Weibull, W. 1952. *A Survey of Statistical Effects in the Field of Material Failure*. Appl. Mech. Review, Vol. 5: 449-451.
- Yudhbir, L.B. ve Prinzl, F. 1983. *An Empirical Failure Criterion for Rock Masses*. Proc. 5<sup>th</sup> ISRM Cong.: B1-B8.



## SÜREKSİZLİK YÜZEYLERİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

### MATHEMATICAL MODELLING OF DISCONTINUITY ROUGHNESS

**M.K. GÖKAY**

Selçuk Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, KONYA

**A. TURANBOY**

Selçuk Üniversitesi, Seydişehir MYO, KONYA

**ÖZET:** Kaya kütleleri oluşumlarını tamamlarken veya daha sonraki jeolojik zamanlarda, çok farklı nedenlerden dolayı oluşan etkilenebilirliklerden masif ve sürekli olan bütünlüklerini yitirmektedirler. Magmatik kayaların oluşumu sırasındaki soğuma çatlaklarında, tortul kayalarındaki tabaka yüzeylerinde ve gerilmelerle oluşan her türlü kırık ve faylanmalarda olduğu gibi sonsuz şekil ve boyutta (mikro ve makro ölçeğe) süreksizlik oluşabilmektedir. Bu çalışmada, süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülüğünün ortaya çıkarılması ve bu pürüzlülüğün matematiksel olarak ifade edilmesine çalışılmıştır. Süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülüğü, bu yüzeyin herhangi bir makaslama gerilmesine karşı nasıl davranacağını belirlemek açısından önemlidir. Pürüzlü yüzeylerin sürtünme katsayılarının fazla olması yanında, pürüzlülüklerin birbirleri içine geçecek şekilde zorlanması bu yüzeyin kaymasını tamamen önleyebilecektir. Bu gibi durumlarda yüzeydeki pürüzlülükler kırılmaya zorlanacak ve onların kırıldığı en yüksek makaslama dayanımı geçildikten sonra süreksizlik yüzeyleri birbirlerine göre farklı konumlara hareket edeceklerdir. Bu mekanizmanın temelini oluşturan pürüzlülük yüzeylerinin türleri daha önceki çalışmalarda sınıflandırılmışlardır, (ISRM, 1978). Bu çalışma sırasında pürüzlülüklerin bu sınıflandırmada verilen şekillerinin matematiksel olarak ifade edilmesi üzerinde durulmuştur. Bunların yanında farklı şekil ve formdaki pürüzlülüklerin de matematiksel fonksiyonlarla ifadeleri araştırılmıştır.

**ABSTRACT:** Rock masses have been fractured during their origination time or later in geological era; therefore, they can not be found without any fractures. Magmatic rocks have their different contracting forces in their body which cause new fractures in them. Sedimentary rocks themselves have strata levels and further cracks across the tabular strata. Discontinuities, therefore, could be found in many different forms in rock masses. In this research, roughness of the discontinuities has been determined and their roughness tried to be mathematically modelled. Roughness of the fractures is very important if the shear strength of the that fracture is effective in sliding along the fracture. If the surfaces are rough and they are locked to each other this fracture surface sliding is very difficult that might be cause stable blocks near galleries or slopes. Discontinuity surface roughness had been already classified (ISRM, 1981). In this research different forms of surface roughness are also worked out if it is possible to express them by mathematical formulations.

## 1. GİRİŞ

Süreksizliklerin matematiksel modellenmesi amacıyla yürütülen çalışmalarda pürüzlülüklerin iki ve üç boyutlu görünüşlerinin grafiksel anlatımına önem verilmiştir. Genel olarak makaslama dayanımında  $i$  açısı olarak belirlenen süreksizlik yüzey açıları Mohr-Coulomb yenilme ölçütünde yenilmeyi engelleyici faktör olarak formülasyonda yerini almıştır. Bu çalışmada, 10x10cm ve 15x15cm boyutundaki yüzeyler üzerindeki pürüzlülük değişimlerinin belirlenmesi ve buradaki dalgalanmaların (iki ve üç boyutta) değerlendirilmesi önem kazanmıştır. Farklı

mermerlerde yapılan deney çalışmalarında, homojen mermer blokları eğilmeye zorlanarak kırılmış ve ortaya çıkan yüzeylerin pürüzlülükleri 5 mm aralıklarla ölçülmüştür. Üç boyutlu (x,y,z) koordinatları bulunan yüzey pürüzlülüklerinin yüzey grafikleri çizilerek bunların belirlenen taban alanı üzerindeki dağılımları gözlenmiştir. Bu aşamadan sonra bu yüzeylerin farklı x-x' ve y-y' değerlerindeki kesit grafiklerinin matematiksel ifadeleri üzerinde çalışılmıştır. Bunların standart pürüzlülük ölçeğinde verilen şekillerden farklılığı formülasyonlarla gösterilmiştir. Bu aşamadan sonra elde edilen yüzey topoğrafik şekillere üç boyutlu matematiksel ifadelerle oluşturulan yüzey kabukları

düzeyindedir. "büyük" ölçekli dalgalılık durumları ayrıca değerlendirmeye alınarak orta ve küçük seviyedeki değerlendirmelerle karşılaştırılır, (ISRM,1981).

## 2. SÜREKSİZLİK YÜZEYLERİNİN PÜRÜZLÜLÜK DURUMU

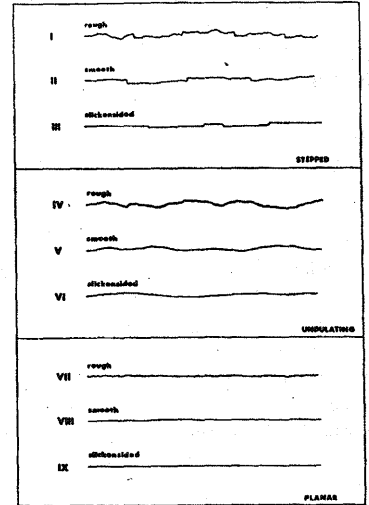
Kaya kütlelerinde kırılma, çatlama mekanikğine göre oluşan ştreksizliğin yönü ve doğrultusunun farklı olduğu bilinmektedir. Tek eksenli bir basınç altında örneğin kaya kütleli bu baskıya paralel yönde veya bu yöne maksimum 45° açı yapacak şekilde çatlaklar oluşturarak kırılmaktadır. Bu ve benzeri çatlamalarda veya var olan çatlakların maksimum arazi gerilmesine paralel olarak ilerlemesi sırasında bunların yüzeylerinde oluşan pürüzlülükler de farklılaşmaktadır.

Çekme, basma, eğilme, bükülme ve makaslama gerilmesinin etkisiyle kırılan kayaların yüzey pürüzlülüklерlerinin farklı olacağı açıktır. Bununla birlikte kayacı oluşturan mikro düzeydeki malzeme özellikleri de pürüzlülüğü etkilemektedir. Kaya kütesinin kristal yapısının büyük veya küçük olması, kayacın dayanımının farklılığı (masif kırılğan veya gevşek malzemeden plastik masif malzemeye, oradan da tamamen kırılmış gevşek malzemeye kadar farklı malzeme türleri) pürüzlülük yapısını etkilemektedir. Bu etkiler de farklı türde pürüzlülük oluşumuna neden olmaktadır. Genel olarak, Uluslararası Kaya Mekanіği Derneğı (ISRM) pürüzlülüкlerin kaya mühendisliğinde kullanılmak amacıyla aşağıdaki gibi bir sınıflandırmaya sokulabileceğini önermektedir.

**Çizelge 1. Süreksizlik pürüzlülüklerinin sınıflandırılması (ISRM, 1981).**

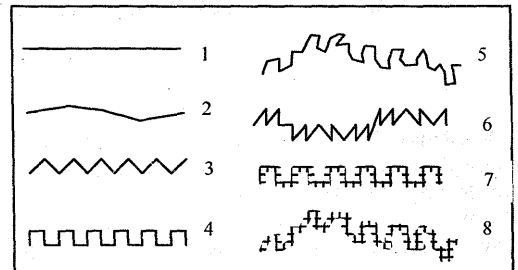
| Sınıf | Tanımı                  |
|-------|-------------------------|
| I     | Pürüzlü basamaklı       |
| II    | Düz basamaklı           |
| III   | Kayma yüzeyli basamaklı |
| IV    | Pürüzlü dalgalı         |
| V     | Düz dalgalı             |
| VI    | Kayma yüzeyli dalgalı   |
| VII   | Pürüzlü düzlemsel       |
| VIII  | Düz düzlemsel           |
| IX    | Kayma yüzeyli düzlemsel |

ISRM pürüzlülüklerin sınıflandırılması sırasında kaya kütlelerinin bükülük ölçüğünü de dikkate alarak, üzerinde çalışılan süreksizlik yüzeyinin boyutuna göre tanımlamalar yapılmasını önermektedir. İlk ölçek "küçük" boyuttaki pürüzlülükler içindir ve santimetre düzeyindeki boyutları içine alır. İkinci ölçek "orta" seviyededir ve burada ölçek metre



Şekil 1.. Tipik pürüzlülük grafikleri ve önerilen terimler (ISRM, 1981).

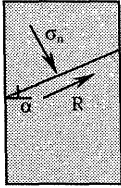
Yüzey pürüzlülüğünün önemi özellikle kaya kütlesi içinde blokların kendisini sınırlayan süreksizlikler boyunca yenilmesi ile ön plana çıkmaktadır. Bir kaya kütesinin mevcut süreksizlikler boyunca yenilmesi ve yenilme yüzeyinde meydana gelen makaslama ve normal gerilmeler iki boyutlu doğrusal ilişkilerle ortaya konulmaktadır. Bir yüzey boyunca yenilme üç boyutlu ele alınarak, özellikle kinematik analizlerde, dinamik bir yüzey olan kayma yüzeyi için daha anlamlı yaklaşımlarda bulunulabilecektir.



Şekil 2. İki boyutlu yüzey pürüzlülüğünün kombinasyonları, 1; Düz, 2; Dalgali, 3; Zigzagli, 4; Basamakli, 5; Basamakli-dalgali, 6; Zigzagli-dalgali, 7; Zigzagli-basamakli, 8; Zigzagli-basamakli-dalgali.

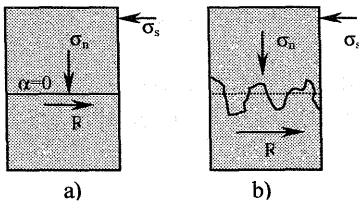
Pürüzsüz bir yüzeyde sürtünmenin olmadığı varsayılarak ideal olarak düzden zigzaglı, basamaklı, ve dalgalı süreksizliklere kadar tüm geçişlerin yenilme yüzeyindeki etkisi farklı olacaktır. Çünkü bu geçişlerle toplam temas yüzeyi farklı olacak sonuçta süreksizlik üzerinde etkili olan normal ve makaslama gerilmelerinin etkileri değişik olacaktır.

Kinematik analizlerde yenilme yüzeylerinin iki boyutlu ele alınması, dinamik bir yüzey olan kayma yüzeylerinde yanlışlıklara neden olacaktır. Bir yüzey boyunca yenilme üç boyutlu ele alınarak daha anlamlı yaklaşımlar elde edilebilecektir. Pürüzsüz bir yüzeyde sürtünmenin olmadığı varsayılarak ideal olarak düzden zigzaglı-basamaklı- dalgalı' ya kadar tüm geçişler yenilme yüzeyinde değişik etkilerde bulunacaktır. Ayrıca toplam temas yüzeyi (A), aynı sıra için artacak ve  $\sigma = (W \cos \alpha) / A$  ifadesinde olduğu gibi normal gerilmeyi azaltıcı, kaymaya karşı koyan makaslama gerilmesini artırıcı  $R = \tau A$  formülünde olduğu gibi artırıcı yönde etkide bulunacaktır (Şekil 3).



Şekil 3. Süreksizlik içeren bir blokta normal gerilme ve kaymaya karşı koyan makaslama gerilmesi.

İki boyutta aynı model üzerinde farklı pürüzlülük ve dalgalılıkta süreksizlik olsun (Şekil 4). Toplam temas yüzeyi ok yönünde artacaktır. Bu aynı zamanda kaydırıcı kuvveti azaltıcı, kaymaya karşı koyan makaslama gerilmesini artırıcı yönde etkide bulunacaktır



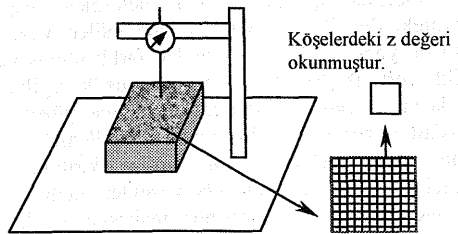
Şekil 4. Dalga ve pürüzlülüğün toplam temas yüzeyinde minimum (a) ve maksimum (b) etkileri.

Ayrıca  $\tau = \sigma \tan(\phi + i)$  formülünde gösterildiği gibi pürüzlülük açıları (i) normal ve makaslama gerilmeleri üzerinde etkilidir. Makaslama dayanımının belirlenmesinde önemle üzerinde durulan ve ölçülmesi istenen i açıları Mohr-

Coulomb yaklaşımında  $\tau$ - $\sigma$  egrisinin (Mohr zarfı) eğimini etkilemektedir. Yaygın olarak kaya mekanik çalışmaları kullanılan stereonet grafiklerde ve blok teorisi ile yapılan yenilme analizlerinde, yenilme yüzeylerinin 3 eksen boyunca düz olduğu kabulü yapılmaktadır. Bu analizlerde pürüzlülük ve dalgalılık sınıflandırmaları 3 eksen boyunca yapılır ve pürüzlülüklerdeki değişimler 3 eksen boyunca gözönüne alınırsa hangi eksen boyunca daha pürüzlü yüzeyler var anlaşılacaktır. Bu analizlerde süreksizliğin konumu yanında bu eksenle kaymaya karşı gelecek sürtünmenin fazla olacağını göstermesi açısından önemlidir. Oryantasyon şartları uygun olmak şartıyla daha az pürüzlü hatta düz yüzeylerin olduğu eksenler boyunca kayma daha çabuk olacaktır. Böylece analizlerde daha gerçekçi sonuçlara ulaşılabilecektir. Bu tanımlamalar kayaç içinde hareket eden suyun hidromekanik davranışlarını açıklamada da kullanılabileceğinden çok önemlidir.

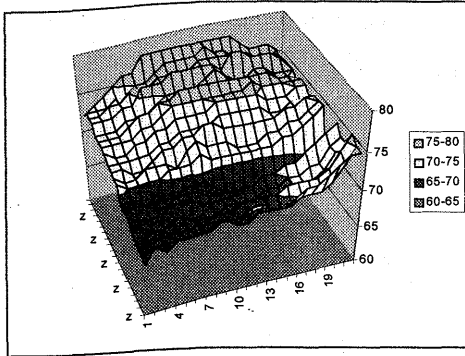
### 3. PÜRÜZLÜLÜKLERİN LABORATUVARDA İNCELENMESİ

Yüzey pürüzlülüklerinin farklı yapılarını ve bunların özelliklerini ortaya koymak amacıyla farklı boyutlarda hazırlanan mermer ve dasit blokları kırılarak yani taze pürüzlü yüzeyler elde edilmiştir. Bu kayaç türlerinin seçilmesinin en önemli nedeni bunların homojen ve masif karakteristikleridir. Bu yüzeylerin incelenmesine öncelikle, yüzeylerin topoğrafik 3-boyutlu olarak haritalanmasıyla başlanmıştır. Bu çalışmada kullanılan 50 numunenin yüzey profillerini çizmek için öncelikle yüzey alanı 5x5 mm lik kare alanlara bölünmüş ve bu kare alanların köşe noktalarına gelen koordinatlardaki (x,y değerlerindeki) z değerleri ölçülmüştür. Bu ölçme sistemi için kullanılan düzenek Şekil 5'de verilmektedir. Ölçümler sırasında 0.01 mm hassasiyete kadar inilmiş ve ölçümler ve değerlendirmeler bu hassasiyet seviyesinde yapılmıştır.



Şekil 5. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm düzeneği.

Kullanılan numune yüzeyleri genellikle 100x100 mm dir. Numunelerden birkaçı 50x100 ve 40x150 mm boyutundadır. Sonuçta elde edilen koordinat ölçümleri 100x100 mm numune için örneğin 400 adet olmuştur. Bu değerde yaklaşık olarak 25 mm<sup>2</sup> lik bir pürüzlülük alanı için bir yükselti değerinin okunması anlamına gelmektedir. Bu ölçümlerden elde edilen değerler daha sonra Microsoft-Excell grafik yazılımında kullanılmış ve her numune için Şekil 6 deki gibi yüzey grafikleri elde edilmiştir.



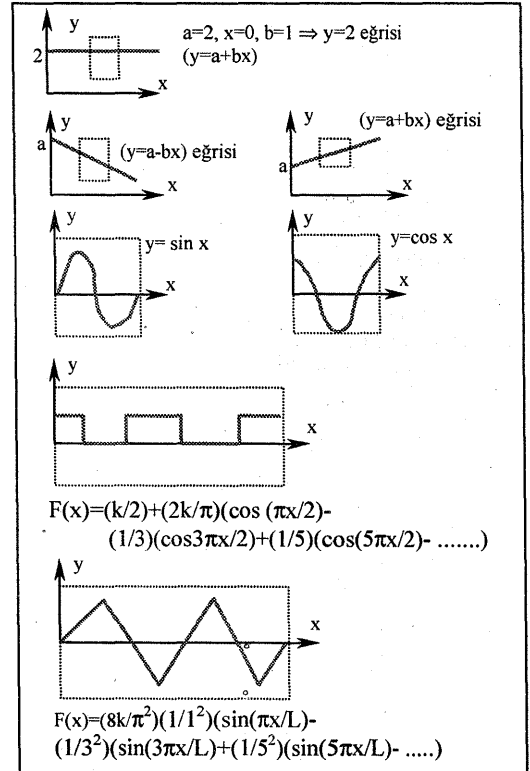
Şekil 6. Deney numunesi yüzey grafik örneği.

Süreksizlik yüzey profillerinin çıkartılmasıyla ilgili birçok çalışma yapılmıştır, (Koca v.d., 1996; Tse ve Cruden, 1978; Lee, v.d. 1990; Develi ve Vardar, 1998). Bu çalışmalarda farklı ölçüm sistemleri kullanılmıştır. Bu yöntemler arasında süreksizlik tarağı, komparatör, elektrik motorlu ve elektronik kumandalı elektronik seviye ölçerler ve lazer profilometreler sayılabilir. Bütün bu sistemlerde amaç, yüzeyin profilini en kolay ve hassas bir şekilde elde etmektir. Bu çalışma kapsamında komparatör ölçüm sistemi kullanılmış ve ölçüm hassasiyeti 0,01 mm olarak tespit edilmiştir. Ölçümler sırasında kullanılan yüzey pürüzlülükleri farklı mermer türlerinde ve dasit kayalarından eğilmeye zorlanarak elde edilmiştir. Bu kayaların çoğunluğu homojen yapıya sahiptir. Ancak Elazığ vişne mermeri yapısı gereği heterojen yapı göstermektedir. Bu mermerden elde edilen yüzey profili bu yapı gereği diğerlerinden farklı olmuş ve profilede sert çıkışlar ve inişler görülmüştür. Eğilme yoluyla yüzey profili elde etmekteki amaç yüzeyde makaslama gerilmesi oluşumunu engellemek ve oluşan pürüzlülüklerin bu yolla kırılmasını önlemektir. Deneyler sırasında yüzeyler ölçümden önce incelenmiş ve üzerlerinde makaslama etkisi olup olmadığı her numune için kontrol edilmiştir.

#### 4. ÖLÇÜMLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

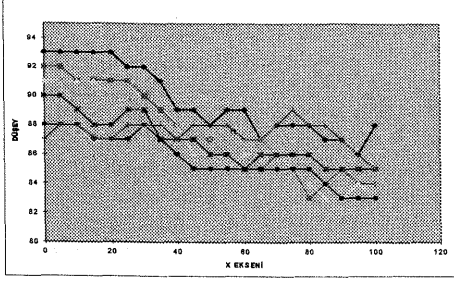
Pürüzlülük standartları pürüzlülük kesit görüntüler şeklinde verildiği için, elde edilen ölçümlerden numune yüzeylerinin x ve y doğrultularında belirli aralıklarla (5 mm) profilleri çıkarılmıştır. Bunlar şekil 1'de verilen start profillerle karşılaştırılarak düz, basamaklı veya kayma yüzeyli olarak sınıflandırılmışlardır. Bu kotlamalar aynı numune yüzeyinde pürüzlülüğün değiştiğini fakat genel anlamda aynı tür kayada benzerlikler gösterdiğini vurgulamıştır. Mermer türüne göre, mermer kristallerinin boyutuna göre bu çalışmada elde edilen pürüzlülük yüzeyleri değişmektedir.

Elde edilen yüzey profillerine ait grafikler kullanılarak bunları en iyi temsil edenin formülü çıkarılmıştır. Bu eğri denklemleri, üzerinde deney yapılan örneğin pürüzlülüğünü temsil etmektedir. Böylece, farklı mermer türlerinde eğilmeye zorlamayla elde edilen yüzey pürüzlülüğündeki farklılıklar matematiksel olarak da gösterilmiştir.

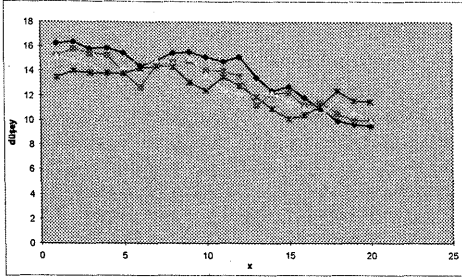


Şekil 7. İki boyutlu grafiklerin matematiksel ifadeleri.

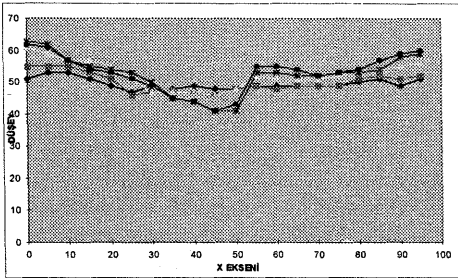
Matematiksel olarak ifade edilen iki boyutlu grafiklerin fonksiyonları incelendiğinde bunların bu araştırmada elde edilen yüzey kesit profillerine ne kadar benzedikleri değerlendirilmiştir. Şekil 7 bilinen belirli grafikleri ve bunların matematiksel ifadelerini göstermektedir. Şekil 8'de verilen profil örnekleri incelendiği zaman Şekil 7'de verilen kesit formülasyonlarının kombinasyon halinde uygulanmasıyla bu profillerin açıklanabileceği fark edilmektedir. Bu profiller birçok konuda Şekil 1 ve 7'de verilen profil şekillere benzemektedir.



a) Manisa beyaz mermer, (A), x boyunca kesitler (her 5 mm'de bir kesit).



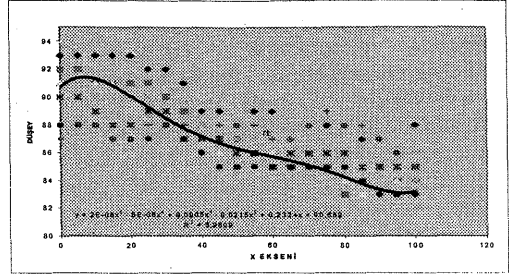
b) Manisa beyaz mermer, (C), x boyunca kesitler (her 5 mm'de bir kesit).



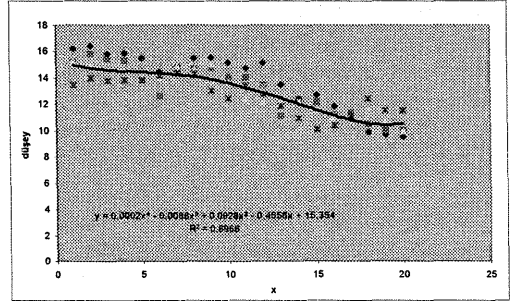
c) Elazığ vişne, (F), x boyunca kesitler (her 5 mm'de bir kesit).

Şekil 8. Ölçümlerden elde edilen örnek yüzey kesit profilleri.

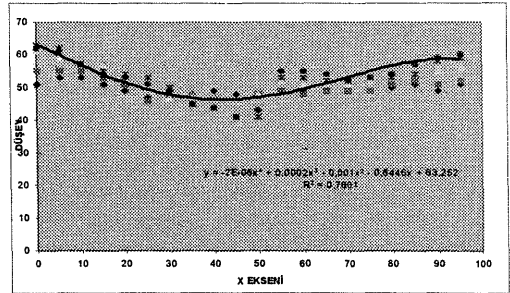
Karşılaştırmalı gözlem sonucunda ölçümü yapılan deney numunelerinin yüzey profilleri hem standart yüzeylerle sınıflandırılmış hemde benzer formüllerle ifade edilmişlerdir.



a) Manisa beyaz mermer, (A), x boyunca elde edilen kesitleri temsil eden polinom açılım  
 $y = 2E-08x^5 - 5E-06x^4 + 0,0005x^3 - 0,0215x^2 + 0,2324x + 90,689$  ( $R^2 = 0,960$ )



b) Manisa beyaz mermer, (C), x boyunca elde edilen kesitleri temsil eden polinom.  
 $y = 0,0002x^4 - 0,0088x^3 + 0,0928x^2 - 0,4556x + 15,354$  ( $R^2 = 0,8968$ ).



c) Elazığ vişne, (F), x boyunca kesitler den elde edilen polinom.  
 $y = -2E-06x^4 + 0,0002x^3 - 0,001x^2 - 0,6446x + 63,252$  ( $R^2 = 0,7601$ ).

Şekil 9. Ölçümlere uyumlu, onları temsil eden örnek polinomlar ve  $R^2$  katsayıları.

## 5. SONUÇLAR

Yeraltında ve yüzeydeki kazı boşluklarının etrafında oluşan süreksizlik kayması problemleri incelendiğinde süreksizlik pürüzlülüğünün önemli olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada taze oluşturulan pürüzlülüklerin yüzey profillerinin koordinatları ölçülmüştür. Bu değerler kullanılarak pürüzlülüklerin 3 boyutlu haritaları çıkarılmıştır. Literatürde verilen standart pürüzlülük şekilleri kullanılarak elde edilen ölçümlerden çizilen iki boyutlu kesit profilleri teker teker incelemeye alınmış ve bunlar standart şekillere göre sınıflandırılmışlardır. Bu işlemden sonra elde edilen profillerin ortak temsili uyum grafikleri çıkarılarak bunların genel olarak hangi sınıf pürüzlülük olduğuna karar verilmiştir. Elde edilen bu temsili eğrinin matematiksel ifadesi ayrıca verilmiştir. Şekil 8 ve 9 da gösterilen örnek A, C ve F kayalarına ait kesitler ve bunların formülüze edilmiş durumunda da görüldüğü gibi Manisa beyazı (A) kayacı sağa doğru eğimli ve basamaklı-pürüzlü bir yapı göstermektedir, bu şekliyle kayaç yüzey pürüzlülük sınıfı I olarak seçilmiştir. Ayrıca bu yüzey pürüzlülüğü Şekil 2'de verilen kombinasyon şekillerden 6.sınıf içerisinde de değerlendirilebilir. Benzer şekilde bütün kayaçların kesitleri karşılaştırmalı değerlendirmeye alınmıştır.

Çalışmalar sonunda benzer kayaçların pürüzlülükleri de birbirlerine benzemektedir. Homojen kaya kütlelerinde pürüzlülük, kristal yapısına ve kayacın dayanımına bağlı olmaktadır. Heterojen kayaçalarda pürüzlülüğü, kayaç içindeki farklı yapıların sınırları belirlemektedir.

## KAYNAKLAR

- Develi, K. ve Vardar, M. (1998) Süreksizliklerin yüzey pürüzlülüğünün geometri yardımıyla sayısal tanımı. 4. *Ulusal Kaya Mekanik Sempozyumu*, Zonguldak, ss 217-225.
- ISRM (1981) Rock Characterization testing and monitoring, (E.T.Brown, ed.), ISRM, Pergamon Press. USA.
- Koca, M.Y., Atıdan, Ö. Ve Türk, N. (1996) Andezitlerdeki süreksizliklerin pürüzlülük ölçümleri, 3. *Ulusal Kaya Mekanik Sempozyumu*, Ankara, s101-112.
- Tse, R. Ve Cruden, D.M. (1978) Estimating joint roughness coefficients. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* V16, pp303-307.
- Lee, Y.H., Carr, J.R., Barr, R.D. and Hass, C.J. (1990) The fractal dimension as a measure of the roughness of rock discontinuity profiles. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. And Geomech. Abstr.* V27, N6, pp453-464.

## SU İÇERİĞİNİN KAYAÇLARIN DAYANIMI VE ELEKTRİK İLETKENLİĞİNE ETKİSİ

### EFFECTS OF WATER CONTENT ON STRENGTH AND ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF ROCK MATERIALS

M.K. GÖKAY, İ. ÖZKAN

Selçuk Üniversitesi, Maden Müh. Bölümü, KONYA.

**ÖZET:** Bu çalışmanın ana gayesi, kaya malzemesinin su içeriğine göre dayanımının ve elektrik iletkenliğinin nasıl değiştiğini gözlemlemektir. Bu ilişkiye bağlı olarak geliştirilecek yaklaşımlar, yeraltı ve yerüstü madencilik çalışmalarında kaya kütlelerinin duraylılık analizlerinde kullanılabilecektir. Öncelikle homojen, masif kayaçlar üzerinde deneylerin yapılması planlanmış ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sırasında ilk olarak kaya birimlerinin suya doygunluk değerleri belirlenmiştir. Bu testlerde kaya birimleri ilk 15-20 dakika içinde %90-95 doygunluk derecesine ulaşmışlardır. Elde edilen bu sonuçlardan sonra aynı kaya birimlerinin farklı su içeriklerine karşılık gelen elektrik dirençleri belirlenmiştir. Literatürde belirtildiği gibi kaya birimlerindeki su içeriği arttıkça elektriksel direncin logaritmik olarak azaldığı tespit edilmiştir. Sonraki işlemler sırasında, bu değerlendirmenin grafiksel ifadesinin kalibrasyon eğrisi olarak kullanılabileceğine karar verilmiştir. Böylece herhangi bir kaya biriminin elektriksel direncinin ölçülmesi durumunda hazırlanan direnç-su içeriği eğrileri yardımıyla, kaya biriminin su içeriğinin bulunabileceği görülmüştür.

**ABSTRACT:** The main aim of this research is determination of rock material properties and electrical conductivity values with respect to water content. Since this relation could be very useful and can be used at underground and open-pit mining stability problems. The tests were planned to perform firstly on homogeneous, massive, rock samples. Therefore the saturation degree of selected rock samples were determined firstly. It was observed that all the samples reached their 90 % saturation degree in 15-20 minutes time. These values were used as a base to determine the samples electrical conductivity (resistance) values with respect to their water contents. As the earlier research reported in literature, the resistance values decreased logarithmically while the water content of the samples were increased. It is observed and decided that, the result of the tests could be used as a calibration curve for the tested rock samples to determine their water content if their electrical resistance values are known.

#### 1.GİRİŞ

Maden mühendisliği çalışma alanlarını kapsayan birçok kazı çalışmasında, özellikle yeraltı galerileri ve boşluklarının tasarımı, açık işletmelerdeki çevre problemlerinin çözümünde duraylı kayaç davranışının elde edilmesinde kaya malzemesi ve kütlesi özellikleri önemlidir. Su kimyasal ve fiziksel olarak sağlanmaya çalışan duraylılığı negatif yönde etkileyen önemli parametrelerin başındadır. Kaya kütlesi içindeki su içeriğinin bilinmesi ve suyun hareketinin incelenmesi madenciler için önemli olduğu kadar yer altı boşluklarını farklı amaçlar için kullanan farklı mühendislik birimlerinde de önem taşımaktadır. Kaya malzemesi ve arazide kaya kütlesi parametrelerinden birisi olan su içeriğinin hızlı ve güvenilir bir yöntemle ucuz bir şekilde

belirlenmesine yönelik çalışmalar incelendiğinde, temel malzeme özelliklerinin kullanılmakta olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada da benzer şekilde elektrik özelliği kullanılarak kaya malzemesinin su içeriği belirlenmeye çalışılmıştır. Elektriksel direnç ölçüm tekniklerine bağlı olan bu yöntemde kullanılan yaklaşımlarda elektrik akımı ölçmesi ve değerlendirmesi hızlı olduğu için tercih edilmiştir. Bu amaçla su içeriğinin belirlenmesi için seçilen deney örnekleri üzerinde öncelikle laboratuvar deneylerinin yapılması planlanmıştır.

Bu amaçla seçilen kaya birimlerinin nem içerikleri, sırasıyla % 0.0, %60, %75, %85 ve %95 değerlerine hazırlandıktan sonra, tek eksenli basınç dayanım deneyi, çekme deneyi (Brazilian), ve nokta yükleme deneyleri, Selçuk Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Kaya Mekaniği Laboratuvarında

yapılmıştır. Deneylerde kullanılan kaya birimlerinin suya doygunluk derecesi arttıkça bu kaya birimlerinin dayanımları izlenen laboratuvar deneylerinde gittikçe azalmıştır. Bu azalma tek eksenli basma deneyinde logaritmik olarak gözlenmiştir. Aynı kayaç birimlerinde yapılan elektriksel direnç ölçümleri için öncelikle deney düzeneği hazırlanmış, daha sonra bu düzeneğe kullanılarak kayaçların elektriksel dirençleri indirekt olarak ölçülmüştür. Kayaçların normal şartlarda yalıtkan olduğu düşünüldüğünde, bunların elektriksel dirençlerinin ölçümünde neden indirekt yöntemlerin seçildiği anlaşılabacaktır. Yapılan çalışmaların sonuçları incelendiğinde elektriksel direncin su içeriğiyle bağıntılı olduğu ve su içeriği arttıkça elektriksel direncin azaldığı gözlenmiştir. Bu sonuç yeraltı veya yeryüzüne açık boşlukların çevresinde su bulunup bulunmadığını öğrenmeye yönelik çalışmalarda veya su içeriğinin dağılımının çıkarılmasında elektriksel direnç değişim miktarlarının ölçülmesinin iyi bir yöntem olabileceğini ortaya çıkarmaktadır. Elektriksel direnç ölçüm noktalarını düzenli olarak ayarlayarak kayaç içinde belirli bir derinliğe kadar su dağılım eğrilerinin çıkarılabileceği farklı çalışmalarda gösterilmiştir, (GRS, 1977).

## 2. ÖRNEK KAYAÇLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Bu araştırmada, 15 ayrı kaya birimi örnek olarak seçilmiştir. Örnek kaya birimleri üzerinde elektriksel iletkenlik (direnç) özelliğinin belirlenmesinden önce birimlerin bazı mekanik karakteristikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada göz önüne alınan kaya birimleri ve bunların deney kodları sırasıyla şu şekildedir; A-tüf (A1-pembemsi yumşak tüf, A2-beyaz yumşak tüf), B-Andezit (B1-mavimsi andezit, B1'-altere mavimsi andezit, B2-pembemsi andezit, B3-grimsi andezit) C-iri taneli kireçtaşı (kalsit dolgulu çatlakları var), D-kristalize kireçtaşı (yer yer ince taneli mikritik yapıda), E-kireçtaşı (ince taneli ve bol çatlaklı, çatlaklarda yer yer demiroksit sıvamaları var, F-ince taneli kireçtaşı (kalsit dolgulu çatlakları var), G-iri taneli kireçtaşı, H-killi ince taneli kireçtaşı (çatlaklarda mangan izleri var), I-ince taneli kireçtaşı, J-kireçtaşı (yer yer kalın bantlı demiroksit sıvamalar var).

Örnek kaya birimlerine ait mekaniksel özelliklerin belirlenmesine yönelik çalışmalarda, öncelikle su emebilme kapasiteleri ve yoğunlukları belirlenmiştir. Bu test sonuçlarına göre orijinal nem içerikleri %0,0 ile %18,25 arasında iken genelde 20 dakika

içerisinde suya doygunluk dereceleri %90'nın üzerine çıkmaktadır. Çizelge 1'de gösterildiği gibi örnek kaya birimlerine ait kuru yoğunlukların 1,64 gr/cm<sup>3</sup>-2,812 gr/cm<sup>3</sup> arasında değişirken tabii yoğunluklar 1,66 gr/cm<sup>3</sup>-2,815 gr/cm<sup>3</sup> arasında değiştiği tespit edilmiştir.

Deneyler sırasında örnek kaya birimleri ISRM (1981) standartlarına göre orijinal nem içeriklerinde hazırlanarak test edilmişlerdir. Numunelerin mekaniksel özelliklerini belirlemek amacıyla sırasıyla tek eksenli basınç dayanımı ve nokta yükleme indeks deneyleri gerçekleştirilmiştir, (Çizelge 2). Mekanik test sonuçlarına göre örnek kaya birimlerinin ISRM kaya dayanım sınıflamasında genelde düşük ve düşük/orta sınıf aralığında olduğu tespit edilmiştir (Bieniawski, 1989). Ayrıca bu çalışmada belirli mekanik deneyler için A1, A2, B1, B2 ve B3 model kaya birimleri üzerinde çeşitli fiziksel etkileşimler uygulayarak sonuçlar numunelerin duraylılığı açısından incelenmiştir (Çizelge 3).

Çizelge 1. Örnek kaya birimlerinin su emebilme kapasiteleri ile kuru ve tabii yoğunlukları

| Numune Kodu | Orijinal nem içeriği (%) | Su emme seviyesi (24 saat) (%) | Kuru yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> ) | Tabii yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> ) |
|-------------|--------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| A1          | 18,25                    | 95,05                          | 2,05                                | 2,07                                 |
| A2          | 13,79                    | 93,60                          | 1,64                                | 1,66                                 |
| B1          | 8,75                     | 90,96                          | 2,66<br>(1,67)*                     | 2,67<br>(1,69)*                      |
| B2          | 6,45                     | 90,57                          | 2,16                                | 2,17                                 |
| B3          | 10,85                    | 91,00                          | 1,88                                | 1,90                                 |
| C           | 0,23                     | 92,20                          | 2,80                                | 2,803                                |
| D           | 0,228                    | 94,40                          | 2,812                               | 2,815                                |
| E           | 0,0                      | 96,60                          | 2,699                               | 2,701                                |
| F           | 0,0                      | 95,60                          | 2,706                               | 2,715                                |
| G           | 0,0                      | 94,60                          | 2,768                               | 2,770                                |
| H           | 0,0                      | 92,70                          | 2,673                               | 2,679                                |
| I           | 0,13                     | 90,60                          | 2,710                               | 2,715                                |
| J           | 0,14                     | 92,60                          | 2,690                               | 2,692                                |

\* Altere olmuş kaya birimi (B1)

Yapılan bu deneylerden anlaşılabacağı gibi örnek kayaçlarda su içeriği yükseldikçe, kayaçların belirgin mukavemet parametresi olan tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı ve nokta yükleme indeks değerinde azalma belirginleşmektedir (Çizelge3 e1 ve e3 etkileşimleri). Bu sonuçlara göre galeriler etrafında suya doymuş kayaçların bulunması halinde bu kayaçların dayanımının

Çizelge 2. Orijinal nem içeriklerinde hazırlanan örnek kayaçların test sonuçları.

| Kod | Tek eksenli Basınç Dayanımı (Mpa) | Nokta yükü dayanım İndeksi (MPa) |
|-----|-----------------------------------|----------------------------------|
| A1  | 9,60                              | 0,86                             |
| A2  | 12,24                             | 0,59                             |
| B1  | 89,67 (10,16)*                    | 4,27 (0,52)*                     |
| B2  | 37,29                             | 2,53                             |
| B3  | 16,56                             | 1,61                             |
| C   | 28,03                             | 1,05                             |
| D   | 61,79                             | 1,66                             |
| E   | 50,82                             | 1,92                             |
| F   | 52,71                             | 3,42                             |
| G   | 15,87                             | -                                |
| H   | 53,81                             | 2,01                             |
| I   | -                                 | 2,03                             |
| J   | 43,49                             | 1,95                             |

\* Altered olmuş kaya birimi (B1)

Çizelge 3. Üzerlerinde fiziksel etkileşim oluşturulmuş örnek kayaçların test sonuçları.

| Kod | Tek eksenli basınç dayanımı, (MPa) |       |       |       |       |       |
|-----|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     | e1                                 | e2    | e3    | e4    | e5    | e6    |
| A1  | -                                  | -     | -     | -     | -     | -     |
| A2  | 16,57                              | 18,25 | -     | -     | -     | -     |
| B1  | 57,11                              | 64,21 | 32,79 | -     | 72,78 | 32,79 |
| B1' | 11,94                              | 13,08 | 3,67  | 3,65  | 2,85  | 2,0   |
| B2  | 37,78                              | 32,36 | 30,46 | 36,10 | 62,56 | 52,93 |

| Kod | İndirekt çekme dayanımı, (MPa) |      |      |      |      |      |
|-----|--------------------------------|------|------|------|------|------|
|     | e1                             | e2   | e3   | e4   | e5   | e6   |
| A1  | 0,64                           | 0,11 | 0,14 | 0,16 | 0,15 | 0,26 |
| A2  | 0,59                           | 0,70 | 0,01 | 0,17 | 0,01 | 0,07 |
| B1  | 5,68                           | 4,40 | 3,48 | 3,19 | 4,42 | 3,01 |
| B2  | 5,68                           | 3,26 | 3,01 | 1,87 | 2,32 | 1,33 |
| B3  | 6,62                           | 1,07 | 2,92 | 1,03 | 2,41 | 2,18 |

| Kod | Nokta yükü dayanım indeksi, $I_{s(50)}$ , (MPa) |      |      |      |      |      |
|-----|-------------------------------------------------|------|------|------|------|------|
|     | e1                                              | e2   | e3   | e4   | e5   | e6   |
| A1  | 1,18                                            | 1,62 | 0,19 | 0,32 | 0,33 | 0,11 |
| A2  | 1,35                                            | 1,01 | 0,06 | 0,09 | 0,01 | 0,84 |
| B1  | 5,33                                            | 7,72 | 1,97 | 2,77 | 5,55 | 3,70 |
| B1' | 0,54                                            | 1,01 | 0,18 | 0,56 | 0,60 | 1,73 |
| B2  | 3,40                                            | 3,43 | 3,45 | 1,38 | 1,44 | 1,19 |
| B3  | 2,61                                            | -    | -    | 0,78 | 0,33 | 0,24 |

\*Etkileşimler: e1:kurutulmuş numuneler, e2:sıcak-soğuk soklanmış numuneler, e3:suya tamamen doyurulmuş numuneler, e4:15dak. suya doyurulmuş numuneler, e5:45dak. suya doyurulmuş numuneler, e6:75dak. suya doyurulmuş numuneler.

normalden az olacağı unutulmamalı ve maden kazıları ile ilgili tasarımlar buna göre hazırlanmalıdır. Kaya birimlerinin su içeriklerinin belirlenmesi arazi şartlarında uygulanabilecek deneylerle yapılmak zorundadır. Elektriksel direncin belirlenmesi bu konuda uygulamada kolaylıklar getirebilecek bir yöntem olabilecektir.

### 3. KAYAÇLARIN ELEKTRİK İLETKENLİĞİ

Her malzemenin elektrik akımını iletmesi farklı özellikler göstermektedir. Bazı maddeler özellikle metalik bağ yapısına sahip maddeler elektriği çok iyi iletirken, cam, hava ve plastik gibi malzemeler elektriği çok az iletirler. Elektriğin bir maddeden geçmesi iki uç arasındaki potansiyel farka bağlıdır. Bu fark fazla olduğunda bütün maddelerden elektrik geçmeye çalışacaktır. Normal şartlarda 220 voltluk bir potansiyel fark için kayaçlar, plastikler, hava, cam, porselen gibi maddeler yalıtkan özellik gösterir ve elektriği geçirmezler.

Elektrik akımının geçişine engel olan güç malzemenin içindeki elektron hareketinin direnç görmesi ve harekete geçmemesidir. Bu direnç malzemelerin türüne, kesit alanına ve uzunluğuna bağlı olarak değişmektedir (Schön, 1996). Elektriksel direnç birimi ohm'dur. Standart bir değer olan öz direnç değeri 1 metre boyunda ve 1 mm<sup>2</sup> kesitinde çubuk haline getirilmiş maddeler üzerinde 20°C sıcaklıkta ölçülür. Buna göre bazı metallerin öz direnci Çizelge 4'de verilmiştir.

Çizelge 4. Bazı iletkenlerin öz dirençleri, (Schön, 1996).

| İletken türü | Öz direnç (Ohm-mm <sup>2</sup> -m) |
|--------------|------------------------------------|
| Gümüş        | 0,0163                             |
| Bakır        | 0,0178                             |
| Altın        | 0,0227                             |
| Alüminyum    | 0,0285                             |
| Demir        | 0,100                              |
| Platin       | 0,100                              |
| Krom-nikel   | 1,100                              |

İletken bir katı malzemede elektrik akımı elektriksel potansiyel farkın büyüklüğüne göre o malzemeden farklı akım yoğunluğunda geçerler. Bu katı maddeden geçebilen akımın miktarı aynı zamanda o malzemenin elektrik akımına gösterdiği dirençe de bağlı olduğu için Ohm kanununda ifade edildiği gibi  $R=U/I$  formülünden hesaplanabilir. Burada R Ohm olarak direnci, U Volt olarak

uygulanan potansiyel farkı, I Amper olarak geçen akımı göstermektedir.

Bir kayacı oluşturan kristaller genellikle yalıtkan olduklarından o kayaçtan elektriğin geçmesi kayacın çatlaklılık derecesine, çatlaklardaki su içeriğine, kayac içindeki kil mineralleri ve bunların kayac içindeki pozisyonları ve su tutma kapasitelerine bağlı olarak değişmektedir. Buradan yola çıkarak kayaçların yapısı incelendiğinde genelde iki grup kaya kütlesiyle karşılaşmak mümkündür. Masif çatlaksız kaya kütleleri ve çatlaklı ve gözenekler içeren kaya kütleleri. Masif kayaçların su emme ve içlerinde su tutma kapasiteleri türlerine göre farklı olmakla birlikte, çatlaklı kayaçlardan çok çok az olduğu için bunların elektriksel dirençleri fazla çıkacaktır.

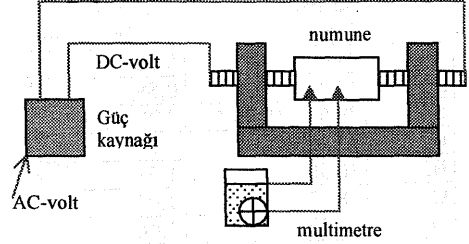
#### 4. SU İÇERİĞİ İLE ELEKTRİKSEL DİRENÇ ARASINDAKİ İLİŞKİ

Kayaçların yalıtkan olması ve içerisindeki su ve gözenekli yapılarına göre elektriği iletmeleri bunlar üzerinde elektriksel iletkenliği ölçmeyi zorlaştırmaktadır. Normal şartlarda kuru ortamda bu ölçümü yapmak için kaya numunesi uçlarına çok fazla elektriksel potansiyel fark verilmesi gerekmektedir. Bu ölçüm şekli pratik açıdan tehlikeli olduğu için bu çalışma sırasında elektrik akımının bir başka özelliğinden yararlanılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Yalıtkan malzemelere verilen elektrik akımı bunlardan geçemekte fakat bu malzeme içerisinde ikinci bir potansiyel alan oluşturmaktadır. Bu potansiyel alan malzeme içerisinde malzemeye dokunan kontakt yüzeyleri arasında oluşmakta ve alan değerleri malzemenin yapısal bozukluklarına uyum sağlayarak bazı yerlerde fazla bazı yerlerde az olabilmektedir.

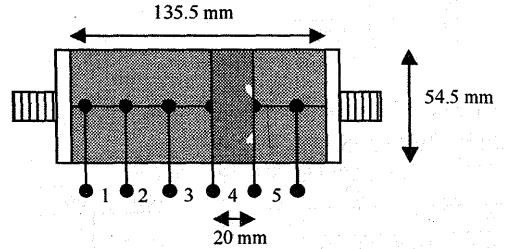
Bu özelliğin kullanıldığı 4 noktalı Wenner elektriksel iletkenlik ölçüm yöntemi farklı uygulamalarda kullanılmaktadır (GRS, 1997;1998). Bu yöntemi uygulayabilmek için öncelikle kaya mekanığı laboratuvarında elektriksel direnç ölçüm düzeneği tasarlanmıştır. Bu deneyde kullanılacak doğru akım güç kaynağı da deney şartlarına uygun olacak şekilde (0-350 DC-volt çıkış ayarlı) özel olarak yapılmıştır.

Deney düzeneği Şekil 1'de gösterildiği gibi ayarlandıktan sonra numunelerin elektriksel dirençleri ölçülmeye başlanmıştır. Deney örnekleri silindirik şeklinde ve çoğunluğu NX karot boyutunda hazırlanmıştır. Örneklerin üzerine 110-DC-volt uygulanmış ve bu voltajın oluşturduğu potansiyel

seviyeler numune üzerinde bir doğru boyunca işaretlenen ölçüm noktaları arasında ölçülmüştür (Şekil 2).



Şekil 1. Örnek numunelerin elektriksel direncinin ölçüldüğü deney düzeneği.

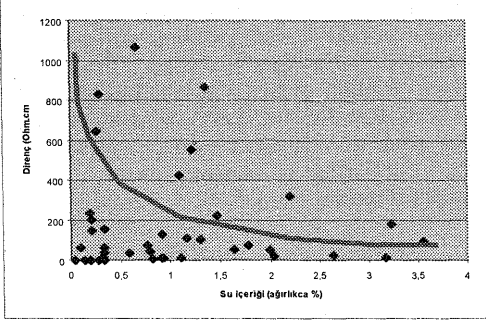


Şekil 2. Deneye hazırlanan örneklerin eksenli boyunca işaretlenen ölçüm noktaları.

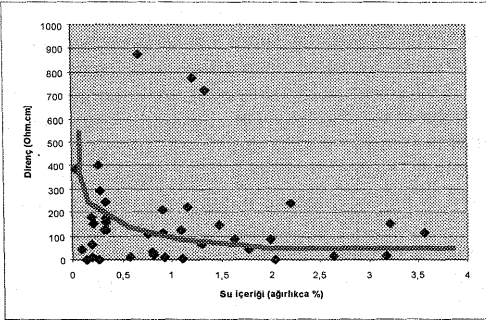
Ölçümler sırasında öncelikle numune uçlarına uygulanan DC-voltaj ölçülmüş ve bu voltajın 110 volt olması güç kaynağından ayarlanmıştır. Bu voltajın kaya numunesinden geçmeye zorladığı akımda ölçüldükten sonra kayac üzerindeki ölçme noktaları arasındaki voltaj değerleri (potansiyel voltaj seviyeleri) sırayla ölçülmüştür. Bu işlem sırasında ölçümler 1-2, 2-3, 3-4, 4-5 ölçme nokta aralıklarında alındıktan sonra 1-2, 1-3, 1-4, 1-5 aralıkları arasında da tekrarlanmıştır. Ölçülen değerlerden MS-Excel yazılımı kullanılarak bir veri bankası oluşturulmuştur. Bu ölçümler sırasında numuneler farklı su içeriklerinde ölçüme alınmış ve elektriksel potansiyel değer değişimleri bu farklılıklara göre değerlendirilmiştir.

Bu bildiride, analizlere tipik bir örnek olması açısından D kodlu numuneye ait ölçüm sonuçları üzerinde durulmuştur. D numunesi kristalize kireçtaşıdır ve farklı yerlerinde çatlaklar mevcuttur. Bu numune DSİ gölet yapımları sırasında Konya bölgesindeki çalışmaları sırasında karot olarak alınmıştır. Numunenin masif olan bölümlerinde kristaller homojen dağılım göstermektedir, fakat

çatlakların yüzeyinde ikincil derece kalsit kristalleri ve kırmızımsı yüzey boyamaları vardır. Bu numuneden elde edilen değerlerin incelenmesiyle; numune su içeriği artışının, numunenin elektriksel iletkenlik ölçümlerinde farklılaşmaya neden olduğu gözlenmiştir. Şekil 3'de görüldüğü gibi numune içerisinde su içeriği arttıkça elektriksel direnç değerleri azalmaktadır.



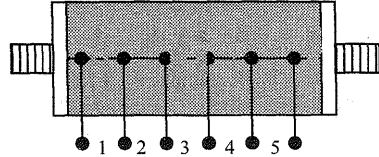
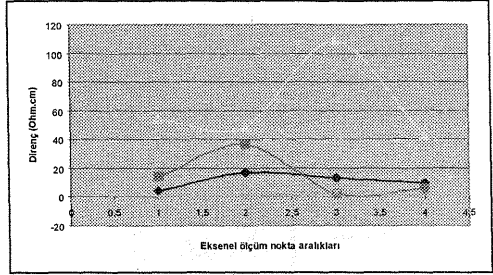
Şekil 3a. Kristalize kireçtaşındaki su içeriği elektriksel direnç değişimi, (tüm boy ölçümler, 1-5 aralığı).



Şekil 3b. Kristalize kireçtaşındaki su içeriği elektriksel direnç değişimi, (ölçüm aralıklarının ortalaması).

Genel anlamda numune içindeki su dağılımının farklı olduğu eksen boyunca ölçülen direnç değerleri incelendiği zaman görülebilmektedir (Şekil 4). Bütün diğer değişkenler sabitken ölçme noktalarının arası uzaklık 20 mm olarak sabitlenmişken, beklenen elektriksel direnç değerlerinin birbirine yakın olmasıdır. Fakat Şekil 4'de görüldüğü gibi elektriksel direnç değerlerinde belirgin farklılaşmalar gözlenmektedir. Bunlar numune içerisinde su içeriğinin homojen dağılmadığını göstermektedir. Bazı bölgelerde daha fazla su bulunmakta ve buralarda direnç düşük olarak

hesaplanmaktadır. Ölçümlerdeki farklılaşmaları numunelerin ölçüm noktaları ile karşılaştırsak, değerlerdeki sapmalarla numunenin içinde bulunan farklı yapıdaki kristaller, çatlaklar, dolgular göze çarpmaktadır. Bu farklı bölgelerin suyu emiş özellikleri farklı olduğundan elektriksel direnç ölçüm sonuçları buralarda normalden sapmaktadır.



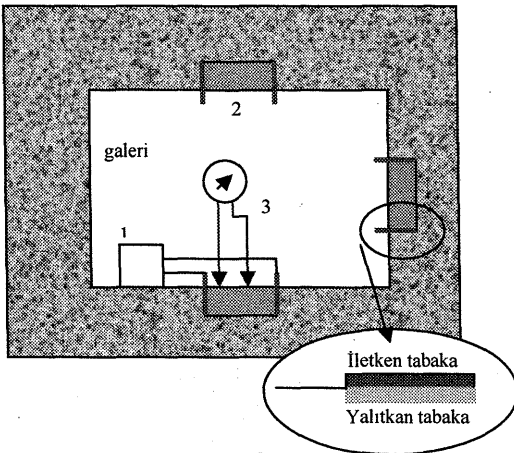
Şekil 4. Numune (D) eksen boyuna elektriksel direnç dalgalanmaları, (4 ayrı deney sonucu).

Bu özellik kullanılarak numune üzerinin kaplanmış (sıvanmış) olması durumunda bile numune içinde hangi bölgede farklı bir oluşum olduğu bilinebilecektir. Bu özellik yeraltındaki kayaçların su içermesi halinde farklı noktalarından açılacak sondajlar yardımıyla içerisindeki su dağılımına göre elektriksel dirençlerinin belirlenmesiyle kayacın çatlak ve bozukluk durumunu açıklığa kavuşturmak mümkün olabilecektir. Bu özelliği açıklığa kavuşturmak için bu çalışmada dikkate alınan D türü başka bir örnekten alınan ölçümlere göz atıldığında (Şekil 5), yine örnek üzerindeki masif ve çatlaklı bölümlerin ölçümleri etkilediği açıkça gözlenmektedir. Şekil 4 ve 5 de görüldüğü gibi numunelerin ölçüm nokta aralığı eğer masif bir yapıdaysa, burada çatlak ve farklı bir yapılaşma yoksa bu ölçüm aralığında direnç artış göstermektedir. Çatlakların olduğu aralıklarda ölçümler çoğunlukla dirençin düştüğünü işaret etmektedir.

Bu prensiplerden yola çıkarak arazi şartlarında gözle görülemeyen bazı çatlakların mühendislik amaçlı izlenmesi yapılabilmektedir. Böylece galeri tabanlarında veya yan kayaçlardaki çatlaklar gözle

The graph illustrates the change in diameter (cm) of a tree trunk over time (days) for two different treatments. The Y-axis represents Diameter (cm) from 0 to 200. The X-axis represents Time (days) from 0 to 3.5. Two data series are plotted: one with solid circles and one with open circles. The solid circle series shows a significant increase in diameter over time, while the open circle series remains relatively stable.

| Time (days) | Diameter (cm) - Solid Circles | Diameter (cm) - Open Circles |
|-------------|-------------------------------|------------------------------|
| 1.0         | 102                           | 48                           |
| 1.5         | 92                            | 52                           |
| 2.0         | 95                            | 55                           |
| 3.0         | 190                           | 45                           |



150

elde edilen bilgilerin aktarıldığı bu raporda kayaçların su içeriğinin kayaçların elektriksel iletkenliklerinin belirlenmesiyle bulunabileceği gösterilmiştir.

#### KAYNAKLAR

Bieniawski, Z.T. (1989) Engineering Rock Mass Classification, Wiley-Interscience Publ. P251.

GRS (1997) Preliminary investigations for the characterization and selection of a test field for a two-phase flow experiment in the Aspö Hard

two-phase flow experiment in the Aspö Hard rock laboratory-Sweden, GRS-Report (Flach, D., Jockwer, N., Kull, H., Komischke, M. and Rothfuchs, T. Eds). Braunschweig, Germany.

GRS (1998) Geoelectrical mapping using Wenner configuration, GRS Handouts, Braunschweig, Germany.

ISRM (1981) Rock Characterization testing and monitoring, /E.T.Brown, ed.), ISRM, Pergamon Press. USA.

Schön, J.H. (1996) Physical properties of rocks, *Fundamentals and principles of petrophysics*, Pergamon Press. USA.



## SIVI KARBONDİOKSİTLE KAYAÇ PARÇALAMANIN MEKANİZMASI

### THE MECHANISM OF ROCK BREAKAGE BY LIQUID CARBONDIOXIDE

N. A. AKÇIN

Karaelmas Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, ZONGULDAK

T. ÖZKAN

TTK Genel Müdürlüğü, ZONGULDAK

**ÖZET :** Bu bildiride; özel bir tüp içinde depolanan sıvı CO<sub>2</sub> ile kayaç parçalamanın mekanizması açıklanmaya çalışılmıştır. Sıvı CO<sub>2</sub> ile dolu tüp kayaç içinde açılan bir deliğe yerleştirilmektedir. Daha sonra da, sıvı CO<sub>2</sub> kimyasal bir ısıtıcı ile genişletilerek gaz haline dönüştürülmektedir. Gaz haline geçerken hacmi 600 kat artmakta ve tüpün içinde 250 MPa'lık bir basınç oluşmaktadır. Bu basınç tüpün bir ucunda bulunan diskin kesilmesine neden olmakta ve tüpün içindeki CO<sub>2</sub> gazı özel bir deşarj kafasından kayaca aktarılmaktadır. Bu aktarma işlemi milisaniyelik bir sürede bir şok dalgası şeklinde olmaktadır. Mekanizma olarak patlayıcı maddelerle parçalamaya benzemektedir. Ancak, bu sistemde sarsıntısız bir patlatma gerçekleşmektedir. Gazın ani olarak boşalması sırasında, büyük bir soğuma etkisi görülmektedir. Bu çalışmada, kayaca ne kadar bir enerjinin aktarıldığı, enerji aktarma süresi, soğuma miktarı hesaplamaları yapılmıştır.

**ABSTRACT:** In this paper, the mechanism of breakage by liquid carbondioxide (CARDOX) which is stored in a special tube is explained. The tube filled with liquid CO<sub>2</sub> is inserted into a hole drilled in the rock. Afterwards, the liquid CO<sub>2</sub> is expanded by a chemical energiser and during this expansion the liquid CO<sub>2</sub> changes into gas state. During this process the volume of CO<sub>2</sub> increases 600 times and the pressure in the tube reaches to 250 MPa. This pressure results in rupturing of the mild – steel disc and CO<sub>2</sub> installed in the tube is discharged into the surrounding rock via discharge head. The discharge process takes place within a millisecond period in the form of a shock pressure. In terms of breakage mechanism it resembles to explosive fracturing. But, the resulting explosion in this system is free from vibration. During the discharge of CO<sub>2</sub> a considerable cooling effect occurs. In this work, the sum of energy transferred to the rock, its transfer period and amount of cooling are calculated.

### 1. GİRİŞ

Sıvı karbondioksitle kayaç parçalama çalışması eskiden beri bilinmektedir. Sıvı karbondioksit belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılınca gaz haline geçmekte ve büyük oranda genişlemektedir. Bu genişleme anında ortaya çıkan enerji kayaç kazısında ve daha bir çok alanda kullanılmaktadır. Enerjinin ortaya çıkışı, patlayıcı maddelerin patlatılmasındaki gibi olduğu için bu sistem CARDOX olarak bilinmektedir.

Sistemin kullanımı oldukça basittir. Sıvı CO<sub>2</sub> dolu özel tüpler parçalanmak istenilen kayaç içinde açılan bir deliğe yerleştirilir. Sıvı CO<sub>2</sub>'nin genişlemesi için tüpün içinde bulunan kimyasal ısıtıcı 12 V'lık bir el manyetosu ile ateşlenir. Isıtıcı 1170°'lik bir sıcaklık verir ve tüp içindeki sıvı CO<sub>2</sub>

gaz haline döner. Bu esnada hacmi 600 kat artarak genişler ve tüpün içindeki basınç 250 MPa'a çıkar. Tüpün deşarj kafasına yerleştirilmiş olan özel alaşımlı disk bu basıncın etkisiyle kesilir (Şekil 1). Bunun sonucunda, deşarj kafasından tüpün çevresindeki kayaca büyük bir şok dalgası uygulanır. Bu şok dalgası deşarj kafasından iki yönde yayılır. Şok dalgaları kayacın en derin ve en ince süreksizliklerine kadar etki eder ve bunun sonucunda da kayacın parçalanması sağlanır (CARDOX, 1994).

Bu çalışmada; CARDOX sisteminin kullanım alanları, bu alanlarda sağladığı yararlar ve diskin kesilmesinden itibaren sistemin parçalama mekanizması irdelenecektir.

## 2. CARDOX SİSTEMİNİN KULLANIM ALANLARI

CARDOX sistemi, bir patlayıcı olarak kabul edilmemektedir. Bu nedenle; taşıma, depolama ve kullanımı için özel izin veya ehliyet gerekmemektedir. Yaygın bir kullanım alanı vardır. Tüp tipi kullanılacağı yere göre belirlenmektedir (Çizelge 1).

Kömür kazısında hem yeraltı ve hem de açık işletmelerde kullanılmaktadır. Patlayıcı olarak kabul edilmediği ve ateşleme sonucunda ortaya çıkan CO<sub>2</sub> gazı çevrede soğutma etkisi yaptığı için grizulu ocaklarda güvenli olarak kullanılabilir. Toksik bir etkisi bulunmadığı için patlatmadan hemen sonra havalandırma yapmadan çalışma alanına girmek olanaklıdır. Patlatma sırasında önemli bir sarsıntı ve geri sıçratma etkisi yaratmamaktadır. Bu sayılanlar klasik patlayıcı maddelere göre üstünlükleridir. Parçalama mekanizması şok dalgalarına dayandığı için kömür iri parçalar halinde üretilmektedir. Şok dalgaları herhangi bir süreksizliğe rastladığında sönümlenmektedir. Bu sayede arakesme ile kömür ayrımı kolaylıkla yapılabilir. Ayrıca, tavan taşı ve tahkimatı bozmadan patlatma yapma olanağı sağlamaktadır (Başaran ve Başaran, 1996; CARDOX, 1998). Açık işletmelerde, yerleşim birimlerinin yakınında sarsıntı yaratmadan komple basamak atımlarında kullanılabilir.

Taş ocaklarında, çatlaksız iri kaya bloklarının elde edilmesinde ve ön gevşetme çalışmalarında CARDOX tüpleri başarıyla kullanılabilir. Bir tüp ile 2 m<sup>3</sup> civarında granit kazısı yapılabilir. Kireçtaşı, kalsit v.b. ocaklarında da kullanılmaktadır. Tünel ve kuyu açma çalışmalarında kullanımı yaygındır. Baraj inşaatında

derivasyon tünellerinin açılmasında sarsıntı yaratmadan ve çevre kayaları bozmadan kazı yapılabilmesi büyük bir avantajdır.

En yaygın kullanım alanlarından birisi de beton parçalama çalışmalarıdır. Bina yıkımında ve betondan yapılan makina lokasyonlarının çevreye zarar vermeden sökülmesinde kullanılmaktadır. Güvenli, hızlı, etkin ve ekonomik olduğu diğer yöntemlere göre üstünlükleridir. Kıрма çalışmalarında şok dalgalarının eklemlerde sönümlenmesi ve diğer kısımların patlatmadan etkilenmemesi bir başka tercih nedenidir.

Sualtı kazı çalışmalarında patlayıcılar için iyi bir alternatiftir. Sualtı patlatmalarında kullanılması başlıca nedeni canlılara ve sarsıntı ile ses etkisi olmadığı için dalgıçlara zarar vermemesidir.

Tıkanan siloların açılması ve dönel fırınlarda oluşan kemerleşmelerin sökülmesinde de CARDOX sisteminden yararlanılmaktadır. Tıkanıklığın olduğu yere veya kemerleşme bölgesine yerleştirilen tüp patlatılmaktadır. Darbe etkisi olmadığı için bu patlatmadan silo veya fırın cidarı zarar görmemektedir. Toksik bir etkisi olmadığı için tahıl ve un silolarının açılmasında güvenli bir şekilde kullanılabilir.

CARDOX sistemi ülkemizde ilk kez Keban Barajı inşaatı sırasında dolu savak betonlarının yatağa zarar vermeden kırılmasında kullanılmıştır (CARDOX, 1994). Daha sonrada, Tire Linyit İşletmesi'nin Akçaşehir köyü altındaki kömür ocaklarında kullanılmıştır. Burada kullanılmasının asıl nedeni köyün altında sarsıntı yaratmadan parça kömür üretmektir (Başaran ve Başaran, 1996). Sistem halen ülkemizin tek taşkömürü üreticisi olan TTK'nın Kozlu ve Amasra Müessesesi ocaklarında pilot olarak denenmektedir (Akçın ve Kel 1999; Yamudi, 1999).

Çizelge 1 CARDOX tüpü tipleri ve kullanılma alanları (CARDOX, 1994)

| Tüp Tipi                          | B20                                             | B37                                                                                       | F57                                                                          | C74                                                                                                     |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tüp Çapı (mm)                     | 45                                              | 45                                                                                        | 51                                                                           | 64                                                                                                      |
| Tüp Uzunluğu (mm)                 | 686                                             | 1 118                                                                                     | 1 245                                                                        | 1 093                                                                                                   |
| Tüp Ağırlığı (kg)                 | 5,45                                            | 8,18                                                                                      | 12,73                                                                        | 16,82                                                                                                   |
| Sıvı CO <sub>2</sub> Miktarı (kg) | 0,29                                            | 0,60                                                                                      | 0,82                                                                         | 1,25                                                                                                    |
| Delik Çapı (mm)                   | 51                                              | 51                                                                                        | 57                                                                           | 76                                                                                                      |
| Disk Kalınlığı (mm)               | 2,8-3,6                                         | 2,9-3,6                                                                                   | 2,4-3,6-4,4-5,2                                                              | 3,2-4,8                                                                                                 |
| Oluşan Basıncı (MPa)              | 190-236                                         | 190-236                                                                                   | 126-276                                                                      | 126-190                                                                                                 |
| Uygulama Alanı                    | - İnce beton kırma<br>- İkincil kayaç parçalama | - İnce beton kırma<br>- İkincil kayaç parçalama<br>- Kömür kazısı<br>- Tıkanıklık giderme | - Kömür kazısı<br>- Masif beton kırma<br>- Kayaç parçalama<br>- Taş ocakları | - Poroz ve çatlaklı kayaç kazısı<br>- Masif beton kırma işlemi<br>- Silo ve fırın temizleme çalışmaları |

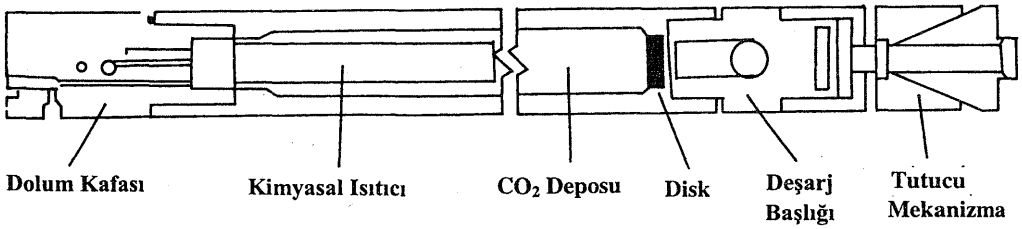
### 3. PARÇALAMA MEKANİZMASI

Sistemin parçalama mekanizması, deşarj kafasındaki diskin kesilmesinden sonra açıklanmaya çalışılacaktır. Tüpün içinde gaz haline geçen CO<sub>2</sub> disk kesildikten sonra kafanın iki yanından kayaya etki etmektedir. Bu işlemler milisaniye mertebesinde gerçekleşmektedir. Bu nedenle tüp ile kayaya (çevre) arasında herhangi bir ısı alışverişi olmadığı kabul edilmektedir. Tüpün içinden çıkışa kadar olan hal değişimleri sürtünmesiz ve şok düzlemine kadar olan genişlemenin “İzantropik” olduğu kabul edilmiştir.

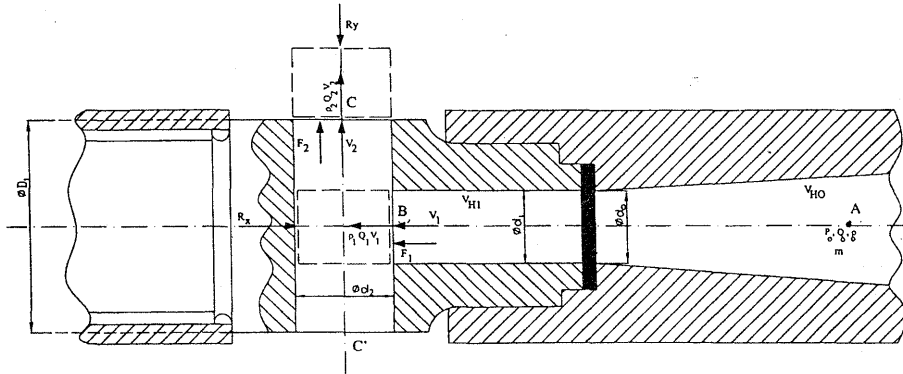
Mekanizmayı açıklamak için tüpün içinden çıkışa kadar hal değişiminin olduğu üç bölgeden söz edilecektir (Şekil 2.). Bu bölgeler sırasıyla CO<sub>2</sub> 'nin depolandığı A bölgesi, diskin hemen arkasında bulunan B bölgesi ve şok dalgalarının deşarj kafasını terk ettiği C-C' bölgeleridir. Sistemde, A

bölgesinden B bölgesine ve bu bölgeden tüpün çevresindeki kayaya geçerken olmak üzere, iki kontrol hacmi belirlenmiştir. Şekil 2'de kesikli çizgilerle gösterilen kontrol hacimleri için “**Hareket Miktarı Kuramı**” uygulanmış ve mekanizma bu yolla açıklanmaya çalışılmıştır. Bu kuram; “herhangi bir kontrol yüzeyi ile çevrili sabit ve imajiner bir kontrol bölgesine uygulanan dış kuvvetlerin toplamı bu bölge içinde birim zamanda hareket miktarındaki artma ile, birim zamanda bu bölgeden çıkan kuvvet miktarının toplamına eşittir” şeklinde tanımlanmaktadır (Özgür, 1966; Büyüktürk, 1985; Çengel ve Boles, 1994).

Sistemin mekanizması kömür kazısında kullanılan F57 tipi tüpün verilerine göre çözümlenmiştir. Bu tüple ilgili olarak Şekil 2'de belirtilen bölgelere ait bazı veriler aşağıda verilmiştir:



Şekil 1. CARDOX tüpü (F57)



Şekil 2. CARDOX sisteminin parçalama mekanizması

A bölgesinde;  
tütün içindeki sıvı CO<sub>2</sub> miktarı, m=0,82 kg  
patlama sonucu oluşan basınç, P<sub>o</sub>= 236 MPa  
diskin kesilen kısmının çapı, d<sub>o</sub>= 23,6 mm  
bu bölgenin hacmi, V<sub>Ho</sub>=7,25x10<sup>-4</sup> m<sup>3</sup>  
diskin kalınlığı, S= 4,4 mm

B bölgesinde;  
bu bölgenin çapı, d<sub>1</sub>= 23,5 mm  
bu bölgenin uzunluğu, L<sub>1</sub>= 42,5 mm  
bu bölgenin hacmi, V<sub>H1</sub>= 1,8434x10<sup>-5</sup> m<sup>3</sup>

B bölgesinde kontrol hacmine etki eden kuvvet F<sub>1</sub>  
ile gösterilmiştir. Kontrol hacmine giren kuvvet  
miktarı ρ<sub>1</sub> · Q<sub>1</sub> · θ<sub>1</sub> şeklinde ifade edilebilir.

C bölgesinde;  
deşarj kafası çıkış çapı, d<sub>2</sub>= 25 mm

C bölgesinde kontrol hacmine etki eden kuvvet F<sub>2</sub>  
ile gösterilmiştir. Bu bölgedeki kontrol hacmine  
giren hareket miktarı ρ<sub>2</sub> · Q<sub>2</sub> · θ<sub>2</sub> şeklinde  
belirtilebilir.

Deşarj anında, düşey yönde R<sub>y</sub> tepki kuvveti ve  
yatay yönde kontrol hacmine etki eden R<sub>x</sub> tepki  
kuvveti oluşur. R<sub>x</sub> tepki kuvveti, tüpü delikten  
dışarıya doğru sürüklemeye çalışır. Bunu önlemek  
için deşarj kafasının sonuna bir sıkılama  
mekanizması konulmuştur.

A bölgesindeki akışkanın yoğunluğu aşağıdaki  
eşitlikten hesaplanabilir.

$$\rho_o = \frac{m}{V_{Ho}} \quad [1]$$

Bu eşitlikte değerler yerine konulursa  
ρ<sub>o</sub> ≈ 1131 kg/m<sup>3</sup> olarak bulunur.

Disk kesilmeden hemen önce bu bölgedeki  
mutlak sıcaklık, T<sub>o</sub>, aşağıdaki eşitlikten  
hesaplanabilir:

$$T_o = \frac{P_o}{\rho_o \cdot R} \quad [2]$$

CO<sub>2</sub> için gaz sabiti değeri  
R=188 J/kg.°K olarak alınırsa mutlak sıcaklık  
T<sub>o</sub> ≈ 1110 °K olarak bulunur.

A bölgesinden B bölgesine geçişin “Sanki-  
Dengeli Hal Değişimi” (Quasi-Equilibrium state)  
ile açıklanabileceği kabul edilirse aşağıdaki eşitlik  
yazılabilir.

$$P_o \cdot V_{Ho} = P_1 \cdot (V_{Ho} + V_{H1})^k \quad [3]$$

Değerler yerine konularak bir hesaplama yapılırsa  
B bölgesindeki basınç değeri P<sub>2</sub> = 228,5 MPa  
olarak bulunur. Mutlak sıcaklık için aşağıdaki  
bağıntı yazılabilir:

$$\frac{T_1}{T_o} = \left( \frac{P_1}{P_o} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad [4]$$

CO<sub>2</sub> için k= 1,289 değeri kullanıldığında mutlak  
sıcaklık T = 1102 °K olarak bulunur.

B bölgesine geçen akışkanın yoğunluğu aşağıdaki  
bağıntıdan bulunabilir:

$$\rho_1 = \frac{P_1}{R \cdot T_1} \quad [5]$$

Değerler yerine konulursa yoğunluk ρ<sub>1</sub> = 1103  
kg/m<sup>3</sup> olarak bulunur.

İki bölge arasındaki enerji denklemi aşağıdaki  
gibi yazılabilir:

$$c_p \cdot T_o + \frac{\theta_o^2}{2} = c_p \cdot T_1 + \frac{\theta_1^2}{2} \quad [6]$$

Burada;

c<sub>p</sub> = sabit basıncındaki spesifik ısıyı

θ<sub>o</sub> ve θ<sub>1</sub> = akış hızını göstermektedir.

A bölgesindeki hız θ<sub>o</sub> = 0 olduğuna göre B  
bölgesindeki akış hızı [6] nolu eşitlikten aşağıdaki  
şekilde bulunabilir:

$$\theta_1 = \sqrt{2 \cdot c_p \cdot (T_o - T_1)} \quad [7]$$

CO<sub>2</sub> için c<sub>p</sub> = 841,8 J/kg.°K olarak alınırsa θ<sub>1</sub> =  
116 m/s olarak bulunur.

B bölgesinden C ve C' bölgelerine geçişte  
süreklilik denklemi (veya enerjinin korunumu  
denklemi) aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$A_1 \cdot \rho_1 \cdot \theta_1 = 2 \cdot A_2 \cdot \rho_2 \cdot \theta_2 \quad [8]$$

Burada;

A<sub>1</sub> = B bölgesinin kesit alanını (kesilen disk alanı)

A<sub>2</sub> = C bölgesinin kesit alanını göstermektedir.

B bölgesinden sonra akış iki kola ayrılmaktadır.  
Geçiş anı için enerji denklemi aşağıdaki gibi  
yazılabilir:

$$c_p \cdot T_1 + \frac{\vartheta_1^2}{2} = c_p \cdot T_2 + \frac{\vartheta_2^2}{2} \quad [9]$$

[8] ve [9] nolu eşitlikler kullanılarak bu bölgedeki mutlak sıcaklık  $T_2 \cong 461,3$  °K olarak bulunur.

C bölgesinden çevre kayaca etki eden basınç aşağıdaki bağıntıdan bulunabilir:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad [10]$$

Değerler yerine konulursa mutlak basınç  $P_2 = 4,7$  MPa olarak bulunur. Bu da önemli bir darbe etkisinin olmadığını gösterir.

Bu bölgedeki akışkanın yoğunluğu da aşağıdaki bağıntıdan hesaplanabilir:

$$\rho_2 = \frac{P_2}{R \cdot T_2} \quad [11]$$

Yoğunluk değeri  $\rho_2 = 54,2$  kg/m<sup>3</sup> olarak bulunur. Akış hızı ise aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanabilir:

$$2 \cdot c_p \cdot (T_1 - T_2) = \vartheta_2^2 - \vartheta_1^2 \quad [12]$$

Hız değeri  $\vartheta_2 = 1045$  m/s olarak bulunur. Bu değer hızın süpersonik olduğunu gösterir.

Deşarj kafasının her iki yanından çıkan akışkanın vermiş olduğu patlama enerjisi aşağıdaki bağıntıdan hesaplanabilir:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \vartheta_2^2 \quad [13]$$

Bu enerji 448 kJ olarak hesaplanmıştır. Bu demektir ki; tüpün içinde depolanan 0,82 kg CO<sub>2</sub> gazı ısıtılarak genişlikten sonra parçalanacak çevre kayaca bu büyüklükte bir patlatma enerjisi vermektedir. Bu değer daha anlamlı olabilmesi için kömür veya kayaç kazısında kullanılan bir patlayıcı maddenin patlama reaksiyon enerjisi ile karşılaştırılması yerinde olur. Kömür kazısında kullanılan grizu güvenli dinamitin (grizutin) patlama reaksiyon enerjisi 2,620 MJ/kg'dır (Barutsan, 1999). Bir patlatma deliğine 0,25 kg grizutin şarj edildiği düşünülürse alınacak reaksiyon enerjisi  $E_{D1} = 655$  kJ olmaktadır. CARDOX sisteminde de deliğe bir tüp yerleştirildiğine göre CARDOX ile grizutin vermiş olduğu reaksiyon enerjilerinin oranı  $E_c / E_{D1} = 0,68$  'dir. Bu da CARDOX

sistemiyle daha iri parçalı ürün elde edilmesinin bir göstergesidir.

Deşarj kafasının bir tarafından çıkan CO<sub>2</sub> kütlesi aşağıdaki bağıntıdan bulunabilir:

$$m_2 = A_2 \cdot \rho_2 \cdot \vartheta_2 \quad [14]$$

Değerler yerine konulursa CO<sub>2</sub> kütlesi  $m_2 = 27,8$  kg/s olarak bulunur. Deşarj süresi ise aşağıdaki bağıntı yardımıyla bulunabilir:

$$t_2 = \frac{m / 2}{m_2} \quad [15]$$

Deşarj süresi yukarıdaki bağıntıdan  $t_2 = 15$  ms olarak bulunur.

4,7 MPa'lık bir basınçla ortama yayılan CO<sub>2</sub> gazının mutlak sıcaklığı  $T_e$  aşağıdaki bağıntıdan bulunabilir:

$$\frac{T_2}{T_e} = \left( \frac{P_2}{P_e} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad [16]$$

Burada çevre basıncı  $P_e = 0,1$  MPa olarak alınır, mutlak sıcaklık  $T_e = 194,5$  °K olarak bulunur. Bu da -78,5 °C'ye karşılık gelmektedir. Bu sonuç patlatma anında büyük bir soğutma etkisinin olduğunu göstermektedir. Grizulu ocaklarda kullanılmasının asıl nedenlerinden birisi budur.

Şok dalgasının C bölgesindeki yayılma hızı aşağıdaki eşitlikten bulunabilir:

$$c_2 = \sqrt{k \cdot R \cdot T_2} \quad [17]$$

Değerler yerine konulduğunda hız  $c_2 = 334,35$  m/s olarak bulunur. Bu iki bölge için (C ve C' bölgeleri) geçerli olan Mach Sayısı aşağıdaki eşitlikten elde edilebilir:

$$M_2 = \frac{\vartheta_2}{c_2} \quad [18]$$

Mach Sayısı; akışkan hızının aynı ortamdaki hava hızına oranıdır. Bu oran 1'den büyükse süpersonik bir hız söz konusudur (Çengel ve Boles, 1994). Bu bağıntıdan elde edilen Mach Sayısı  $M_2 = 3,12$  'dir. Mach Sayısı birden büyük olduğu için burada süpersonik bir hız söz konusudur. Bu da deşarj kafasından çıkışta CO<sub>2</sub> gazının şok dalgalarını meydana getirdiğinin bir göstergesidir. Şok

dalgasının ardından basınç ve sıcaklık aniden yükselmekte ve hız ses-altı düzeye inmektedir.

CO<sub>2</sub> gazının şoktan önceki değerleri;  $\vartheta_2, P_2, T_2$  ve  $\rho_2$  ise şoktan sonraki değerleri;  $\vartheta_3, P_3, T_3$  ve  $\rho_3$  olsun. Bu geçişteki Mach Sayısı  $M_3$ , aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$M_3^2 = \frac{1 + \frac{k-1}{2} \cdot M_2^2}{k \cdot M_2^2 - \frac{k-1}{2}} \quad [19]$$

Değerler yerine konulduğunda Mach Sayısı  $M_3 = 0,44$  olarak bulunur. Bu da hızın ses-altına indiğinin bir göstergesidir. Bu bölgedeki basınç aşağıdaki bağıntıdan bulunabilir:

$$\frac{P_3}{P_2} = \frac{1 + k \cdot M_2^2}{1 + k \cdot M_3^2} \quad [20]$$

Bu basınç  $P_3 = 50,9$  MPa olarak bulunur. Şoktan sonraki sıcaklık ise aşağıdaki eşitlikten elde edilebilir:

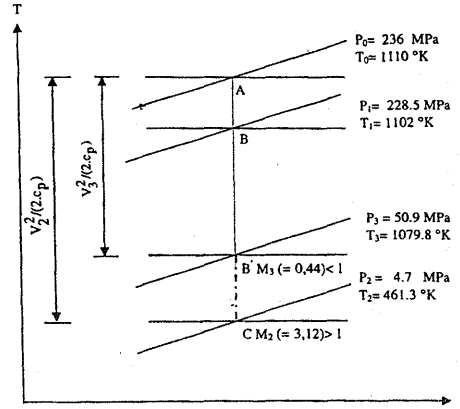
$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{1 + \frac{1}{2} \cdot (k-1) \cdot M_2^2}{1 + \frac{1}{2} \cdot (k-1) \cdot M_3^2} \quad [21]$$

Değerler yerine konulduğunda mutlak sıcaklık  $T_3 = 1079,8$  °K olarak bulunur. Bu noktadaki hız da aşağıdaki bağıntıdan bulunabilir:

$$\frac{\vartheta_3}{\vartheta_2} = \frac{\frac{2}{M_2^2} + (k-1)}{k+1} \quad [22]$$

Bu bağıntı yardımıyla hız  $\vartheta_3 = 225$  m/s olarak bulunur. Bu bağlamda yapılan tüm hesaplamaların sonuçları Şekil 3'deki sıcaklık-entropi (T-s) diyagramında gösterilmiştir.

Bu hesaplamalar; deşarj kafasında kullanılan disk kalınlığı ve deşarj kafası tipi değiştirilerek tekrarlanabilir. Bu çalışmalarda çıkış çapı da büyütülebilir ve hatta iki yandan olan boşalma tek taraftan yapılabilir. Tek çıkışlı deşarj kafaları daha ziyade galeri veya tünel kazılarında sıfır tarama çalışmalarında kullanılabilir.



Şekil 3. Mutlak sıcaklık (T) ve entropi (s) değişim grafiği

#### 4. SONUÇLAR

Sistemin mekanizmasını açıklamaya yönelik çalışmalar; CARDOX sisteminde asıl parçalamanın şok dalgalarıyla yapıldığını göstermektedir. Bu nedenle de patlatmadan sonra sarsıntı etkisi görülmemektedir ve darbe etkisi daha azdır. F57 tipi bir tüple yapılan patlatmada deşarj kafasının iki yanından toplam olarak 448 kJ enerji çıkmaktadır. Bu enerjisi de 0,25 kg'lık bir grizutin lokumunun reaksiyon enerjisinin % 68'ine karşılık gelmektedir. Tek bir taraftan çıkan enerji ise bunun yarısı kadardır. Patlatmadan sonra oluşan -78,5 °C'lik soğumanın oluşması kömür madenciliğinde kullanılmasının başka bir nedenidir. Ayrıca, sistem laboratuvar ortamında % 9'a kadar metan içeren ortamlarda test edilmiş ve herhangi bir riskin olmadığı tespit edilmiştir (CARDOX, 1998).

Bu çalışmanın sonuçları, sistemin halen pilot olarak denenmekte olduğu TTK ocaklarındaki kazı çalışmalarında kullanılacaktır. Kömür damarlarının sertliğine göre hangi tip tüpün kullanılacağı, disk kalınlığı ve delikler arası mesafe önceden belirlenmeye çalışılacaktır.

## KAYNAKLAR

- Akçın, N. A. ve Kel, K. 1999. Zonguldak Kömür Havzasında Klasik Üretim Yöntemlerine Alternatif Olarak Denenmekte Olan Yöntemler. *Türkiye'de Kömür Politikaları ve Temiz Kömür Teknolojileri Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Ankara, s.62-68.
- Barutsan, 1999. Barutsan A.Ş.'nin Patlayıcı Ürünleri ile Orica-Nitro ve Nitromak A.Ş. Patlayıcı Ürünlerinin Teknik ve Ticari Açıdan Karşılaştırılması. *Barutsan Dergisi, Yıl: 7, Sayı : 1999/1*, Barutsan-Ankara, s.5-13.
- Başaran, C. & Başaran, S. C. 1996. Cardox Kırma Ünitesi ve Uygulama Sonuçları. *II. Delme Patlatma Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Ankara, s.233-240.
- Büyüktürk, A. R. 1985. *Termodinamik*. Cilt:2, Uludağ Üniversitesi Yayınevi, Bursa, 400 s.
- CARDOX, 1994 *Technical Documentation*, Bristol, UK, 34p.
- CARDOX, 1998. Cardox the Real Alternative to Explosives. *Technical Documentation*. Cardox Int. Ltd., Bristol, UK.
- Çengel, Y. A. & Boles, M. A. 1994. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGrawHill, New York, 867 pp.
- Özgür, C. 1966. *Uygulamalı Hidromekanik*. İTÜ Kütüphanesi No:660, İstanbul.
- Yamudi, C. 1999. CARDOX Kazı Sisteminin TTK Kozlu Ocaklarında Kullanımının Araştırılması. ZKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yük. Müh. Tezi, Zonguldak, 78s.



## **SEKKÖY AÇIK KÖMÜR OCAĞI'NDA PATLATMALARDAN KAYNAKLANAN YER SARSINTILARININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

### **EVALUATION OF GROUND VIBRATIONS INDUCED BY BLASTING AT SEKKÖY SURFACE COAL MINE**

**H.A. BİLGİN, S. ESEN & M. KILIÇ**  
ODTÜ, Maden Mühendisliği Bölümü, ANKARA

**T. İPEK**  
BARUTSAN A.Ş., Elmadag, ANKARA

**ÖZET:** Bu bildiriye, TKİ Yeniköy Linyit İşletmesi (YLİ) Bölge Müdürlüğü'ne ait Sekköy Açık Kömür Ocağı'nda dekapaj için yapılan patlatmaların yol açtığı yer sarsıntıları incelenmiş, ölçüm ve denetim aşamalarında izlenen yöntem sunulmuştur. TEAŞ'ın Sekköy Ocağı'na yakın olması ve şikayetlerin buradan ortaya çıkması nedeniyle yer sarsıntısı ölçümleri TEAŞ yönünde gerçekleştirilmiştir. Bu yönde zeminde 40 adet kayıt alınmış ve yanal, düşey, boyuna ve en yüksek bileşke eksenlerinde en yüksek parçacık hızı ve ölçekli mesafe ilişkileri %95 güvenirlilikte belirlenmiştir. Ölçümlerin sonuçları ayrıntılı olarak analiz edilmiş ve hem zeminin hem de binanın etkin frekansları ve büyüme faktörleri saptanmıştır. Dört farklı binada ve zeminde yapılan ölçümler değerlendirildiğinde binaların rezonansa girdiği ve bu yapılardan birisinin zemine gelen dalganın genliğini 4.3 kat arttırdığı görülmüştür. Bu ocak için her gecikmede güvenle ateşlenebilecek patlayıcı madde miktarı hesaplanmış ve önerilmiştir. Bu miktarın belirlenmesinde %95 güvenlik aralığı kriteri, USBM RI8507 ve OSMRE ölçütü, zeminin ve yapının etkin frekansları, büyüme faktörü ve insanların sarsıntıya tepkileri göz önüne alınmıştır.

**ABSTRACT:** In this paper, the ground vibrations induced by blasting for stripping work at Sekköy Open Cast Coal Mine belonging to TKİ Yeniköy Lignite Mine (YLİ) are investigated and the procedure for measurement and control of ground vibrations is presented. Ground vibration measurements are conducted in the direction of Turkish Electricity Authorities' Yeniköy Establishment and social facilities because of the complaints and annoyance arising from this site. Forty ground vibration records are taken in this direction and relationships between peak particle velocity and scaled distance in transverse, vertical and longitudinal components are determined at 95% confidence interval. Measurement results were analysed in detail and dominant frequencies of both ground and structure and amplification factors were determined. When the measurements carried out at four different structures together with the ground are evaluated, it is observed that structures resonate and one of the apartment buildings is amplified the amplitude of longitudinal component 4.3 times. The maximum allowable amount of explosive that can be fired safely at this mine is calculated and recommended on. In the determination of safe amount, 95% confidence line, USBM RI8507 and OSMRE criteria, the dominant frequencies of both ground and the structure, amplification factor and the human response are taken into account.

#### **1. GİRİŞ**

Gerek madencilik sektöründe gerekse inşaat sektöründe patlayıcı madde kullanarak kaya kazısı yapan kuruluşların en çok karşılaştıkları sorunların başında çevreden gelen şikayetler yer almaktadır.

Şikayet nedeni olarak patlatmadan kaynaklanan yer sarsıntısı gösterilmektedir. Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de şikayetler üç temel grupta toplanmaktadır (Erkoç, 1995): gerçek hasara bağlı

şikayetler, endişe ve yetersiz bilgiye bağlı şikayetler, kötü niyetle çıkar sağlamaya yönelik şikayetler.

Yer sarsıntısı ölçümleriyle, uzlaşmazlığa neden olan bu çevresel sorunun çözülebilmesi mümkündür. Bu şekilde şikayetin esas kaynağı ortaya konabilir. Şikayetler haklı ise hem yapılarda eşik hasar hem de insani tepkiler oluşmamasını sağlamak amacıyla işletmenin patlatma tasarımlarını değiştirerek yer sarsıntısı denetimi yapması gerekir. Bu şekilde işletme çevreyle barışık olarak faaliyetlerini

yürütebilecek ve yüksek tazminat ödemek olasılığından kurtulacaktır.

TKİ YLİ Bölge Müdürlüğü Sekköy Açık Kömür Ocağı'nda dekapaj için yapılan patlatmaların yol açtığı yer sarsıntıları, işletmenin talebi üzerine ölçülmüş; alınan sonuçlar tüm yönleri ile yorumlanıp değerlendirilmiştir (Bilgin vd., 1999a).

## 2. PATLATMA KAYNAKLI YER SARSINTILARININ ÖZELLİKLERİ VE HASAR KRİTERLERİ

### 2.1. Yer Sarsıntılarının Özellikleri

Patlatma ile çevreye verilen olumsuzlukların en önemlisi yer sarsıntısıdır. Yer sarsıntıları depreme benzer etkiler yapmaktadır. Dolayısı ile oluşan yapı hasarları benzerlik göstermektedirler. Patlatma ile oluşan sarsıntılar taşıdıkları enerji düzeyinde hasara neden olmaktadır. Sarsıntıların enerji düzeyleri şu parametrelerle ölçülmeye çalışılmaktadır; parçacık yer değiştirmesi (mm), parçacık hızı (mm/s), parçacık ivmesi ( $\text{mm/s}^2$ ) ve dalga frekansı (Hz).

Binalara verilen hasarda, sarsıntıların taşıdığı enerji düzeyinin yanı sıra binaların yapıım tekniği, boyutları ve üzerine oturdukları zemin özellikleri de etkin olmaktadır (Siskind vd., 1980). Bu nedenlerle sarsıntıya bağlı hasar etüdlerinde çok kapsamlı çalışmak gerekmektedir. Hasar etüdlerinde batılı ülkelerde saptanmış sınır değerler bulunmaktadır. Ülkemizde bu konuda bir yönetmelik bulunmadığından, mühendisler ancak diğer ülkelerdeki sınır değerleri kullanarak yorum yapmaya çalışmaktadırlar.

Ocak patlatmalarından kaynaklanan yer sarsıntıları kısa süreli (gelip-geçici) ve düzensiz yer hareketleridir. Zemindeki bir parçacığın hareket hızına parçacık hızı denir. Parçacık hızı sıfırdan başlar, en yüksek değerine ulaşır ve giderek sönümlenir. Şu halde yer sarsıntısı incelemelerinde en önemli özelliklerden biri en yüksek parçacık hızıdır. Çünkü en yüksek hız değeri ne kadar büyük ise bina da o denli yüksek şiddette sarsılır.

Frekans (f) ise, zemindeki bir parçacığın 1 saniyede kaç kez (devir/saniye) sarsıldığını gösterir. Frekans Hertz (Hz) birimi ile ifade edilir.

Yer sarsıntısının özellikleri ve niteliği, patlatma yerine yakın kesimlerde daha çok patlatma parametreleri, özellikle bir seferde ateşlenen patlayıcı miktarı, ateşleme aralığı (gecikme süresi) ve bir yere kadar da ateşleme yönünden etkilenir. Diğer bir deyişle bu etmenlere bağlı olarak oluşan parçacık hızı önemli bir hasar göstergesidir. Ancak

patlatma yerinden uzaklarda, sarsıntının özellikleri ve niteliği daha çok yer sarsıntısı dalgasının iletildiği kaya veya zemin ortamının özelliklerinden etkilenir. Diğer bir deyişle arazi katsayıları ve yer sarsıntısının frekansı da hasar oluşumunda veya oluşmamasında önemli ve tayin edici etmenlerdir. A.B.D. Maden Dairesi (USBM) ve Açık Ocak Maden Bürosu (OSMRE) ölçütleri hem en yüksek parçacık hızını (PPV) hem de frekansı (f) gözönüne aldıkları için bu çalışmada sonuçları yorumlamak için seçilmişlerdir.

Kömür ocaklarında oluşan yer sarsıntısı dalgaları, metal madeni ve taş ocakları ile inşaat kazılarındaki patlatma dalgalarından farklılık gösterir. Kömür madenlerindeki patlatmalardan kaynaklanan yer sarsıntı dalgaları büyük genlikleri ve düşük frekansları ile bilinirler. Kömür ocaklarındaki yer sarsıntısı dalgaları, esas olarak bu özellikleri nedeniyle ve ayrıca büyük dilim kalınlıkları, çok sayıdaki delikten oluşan büyük atım grupları ile sedimanter kaya formasyonları ve dalgaların uzak mesafelere iletim kabiliyetleri sebebiyle yapılarda hasar oluşumu açısından son derece önemlidirler (Siskind vd., 1980). Bu nedenle kömür açık ocaklarındaki sarsıntı problemleri özel analiz ve yorum gerektirirler.

### 2.2. Frekansın Önemi, Rezonans ve Büyütme Faktörü

Yersarsıntılarının frekans özellikleri başlıca iki unsurdan etkilenirler. Bunlar jeoloji (kaya türleri) ve gecikmeli ateşlemelerde gecikme aralığıdır (Dowding, 1985). Çan örneğinde (Bilgin vd., 1998; Bilgin vd., 1999b) olduğu gibi sürekli şikayetlerin çoğunda, parçacık hızı 12.7 mm/s değerinin çok altında olduğu ve hiçbir hasarın meydana gelmediği durumlarda dahi ciddi titreşim hissedildiği yönündeki his ve endişeler tamamen düşük frekans özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Çünkü düşük frekanslı dalgaları insanlar kolayca hissedebilirler. Frekans yüksek olduğunda ise insanların bunları algılaması çok zordur ve bu nedenle fazla endişeye kapılmazlar. Ayrıca 10 Hz değerinin altındaki frekanslar zeminde büyük yerdeğişimler ve yüksek düzeyli birim deformasyonlar yarattığı için hasar olasılığını da artırır (Siskind vd., 1980).

Binalarda hasar olasılığı, zeminde patlatmanın oluşturduğu uyarıcı dalganın frekansı ile sözkonusu binanın doğal (özyapısal) frekansının birbirleri ile olan ilişkisine bağlıdır. Patlatmalarda en kritik durum zemindeki uyarıcı dalganın frekansının, bir veya iki katlı binalarda genellikle 5-10 Hz arasında değişen bina özyapısal frekansına eşit veya buna yakın değerde olduğunda oluşur. Bu durumda bina

rezonansa girer ve zemindeki uyarıcı dalga geçip gittiği halde bina sarsılmaya devam eder. İşte insanların hissedip, endişeye kapılmalarına neden olan da budur. Bina rezonans halindeyken, parçacık hızı sınır değerlerin oldukça altında ise binada hasar oluşmaz ama kişiler rahatsız olur. Fakat bina rezonans halindeyken parçacık hızı da yeterli büyüklükte (genlikte) ise binada hasar oluşur. Bir diğer durum zemindeki uyarıcı dalganın genliği tam yeterli düzeyde olmasa bile rezonans halindeki binanın bu genliği birkaç kat artırması sonucu bina yine de hasar görebilir. Zemindeki uyarıcı dalganın binaya iletilmesi sonucu binada ölçülen genlikte zemindeki genliğe göre artış olmasına büyütme; binadaki genliğin zemindeki genliğe oranına da büyütme faktörü denir.

Konut tipi (1-2 katlı) binaların özyapısal frekanslarının 5-10 Hz arasında değiştiği hatırlandığında (Dowding, 1992), en yüksek parçacık hızında meydana gelebilecek artım olasılığının, zemin hareketinin (uyarıcı dalganın) frekansının da 5-12 Hz arasında olması durumunda oluşacağı açıktır.

### 2.3. Hasar Sınıflaması

A.B.D. Madencilik Dairesi'nin geliştirdiği sınıflamada "Eşik Hasar", "Hafif Hasar" ve "Esaslı Hasar" olmak üzere üç hasar sınıfı tanımlanır (Siskind vd., 1980). Boya ve sıvada kılcal çatlakların olduğu "eşik hasar" sadece görünüm bozucu niteliktedir. Sıva düşmesi, çatlakların 3 mm'ye kadar genişlemesi şeklinde görülen "hafif hasar" göreceli olarak daha fazla rahatsız edici olmasına rağmen yapıların dayanımını ve yapı elemanlarının yük taşıma kabiliyetlerini etkilemez. Duvarlarda geniş çatlaklar, duvar ve bacalardan taş, tuğla düşmesi sonucu yapıda kalıcı deformasyonlar oluşturan ve yapıyı zayıflatan tek hasar türü ise "esaslı hasar" sınıfıdır.

Bu çalışmanın ilerideki bölümlerinde yapılacak olan irdeleme ve değerlendirmelerde hasar sözcüğü "eşik hasar" anlamında kullanılacaktır.

### 2.4. Konut Tipi Yapılar için Emniyetli Yer Sarsıntısı Düzeyleri

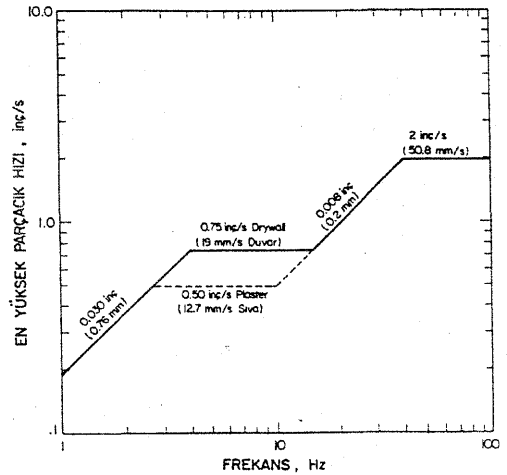
Çizelge 1'de konut tipi yapılarda hasar yaratmayacak emniyetli sarsıntı düzeyleri yapı türlerine göre verilmiştir (Siskind vd., 1980). Burada verilen değerler binaların layıkıyla yapılmış temeller üzerine oturduğu, iki kattan daha yüksek olmadığı ve zemindeki dalgaların patlatma kaynaklı ve birkaç

saniyeden fazla sürmeyen dalgalar olduğu kabulleri için geçerlidir.

Çizelge 1'de verilen sınır değerler A.B.D.'deki yerinde ölçüm ve gözlemlerde eşik hasar olduğu gözlenen düzeylerden daha düşük seçilmiştir. Bu değerler yüzeysel çatlak oluşum olasılığının en fazla %5 olabileceğini kabul eder. Diğer bir deyişle yüzeysel çatlak oluşmamasını %95 oranında garanti eder. Buna rağmen frekans değerlerini daha hassas olarak gözeten alternatif bir değerlendirme ölçütü Şekil 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Emniyetli yer sarsıntısı düzeyleri (Siskind vd., 1980).

| Yapı Türü                     | Yer sarsıntısı en yüksek parçacık hızı (mm/s) |                         |
|-------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------|
|                               | Düşük frekans (<40 Hz)                        | Yüksek frekans (>40 Hz) |
| Modern Evler                  | 19.0                                          | 50.8                    |
| Eski Yapılar (Ahşap Elemanlı) | 12.7                                          | 50.8                    |



Şekil 1. Konut tipi binalarda hasar başlangıcı sınır değerleri (Siskind vd., 1980).

### 3. YÜZEY DALGALARI

Açık kömür işletmelerinde mevcut örtü kayalarının özellikleri sonucu, buralarda yapılan patlatmalardan kaynaklanan yer sarsıntısı dalga formlarının tipik karakteri düşük frekanslı ve büyük genlikli

olmalarıdır. Ayrıca arazinin yapısal jeolojisi de (fay, dokanak yüzeyi, tabakalanma, eski heyelan yüzeyleri vb.) sarsıntı ölçer cihazların kaydettiği dalga formlarında etkiler yapmaktadır ve bu etkiler değerlendirilmelidir. Sarsıntı kayıtları dalga formları dikkate alınmadan olduğu gibi (ham olarak) değerlendirildiğinde arazi (iletim ve sönümlenme) katsayıları doğru bir şekilde belirlenememektedir (Erkoç ve Esen, 1998; Bilgin vd., 1998).

Patlatma ile oluşan dalga formları incelendiğinde, ölçüm noktasına ilk önce P ve S dalgalarının ulaştığı görülmektedir. P ve S dalgaları genelde kaya yapısının derinliklerine kadar nüfuz etmeleri ile “gövde dalgaları” olarak isimlendirilmektedirler. Ancak kaya yapılarında kaçınılmaz olarak bulunan süreksizlik yüzeylerinde, çökelti katmanları yüzeylerinde veya kaya-toprak örtüsü kontaklarında yansıma ve kırılmaya bağlı olarak değişik dalga formları oluşmaktadır. Bunlara “yüzey dalgaları” (Rayleigh, Love dalgaları, vb.) ismi verilmektedir (Siskind vd., 1989).

Rayleigh (R) dalgaları en bilinen ve etkin olan bir dalga formudur. Tanımlanması gerekirse; boyuna ve düşey ekseninde elemanları olan, ters dönüşlü eliptik hareketlere neden olan bir dalga formudur (Siskind vd., 1989). Love (L) dalgaları ise boyuna ve yanal eksenlerde elemanları bulunan dalga formudur (Siskind vd., 1989).

Yüzey dalga formlarının temel benzerlikleri, kaya yapısında bulunan yüzeylerde polarizasyon ile oluşmaları, düşük frekanslı olmaları, düşük yayılma hızı nedeni ile ölçüm noktalarına P ve S dalgalarından sonra ulaşmalarıdır. Ancak bu dalgalar genlikleri büyük olduğundan ve yavaş sönümlendiklerinden hasar riskini arttırmaktadırlar.

#### 4. EN YÜKSEK PARÇACIK HIZI – ÖLÇEKLİ MESAFE İLİŞKİSİNİN BELİRLENMESİ

Sismograflar ölçüm yapılacak yerlere yerleştirilip patlatma yapılan bölgeye yönlendirilerek kayıtlar alındıktan sonra yanal, düşey, boyuna ve en yüksek vektörel bileşke eksenlerinde en yüksek parçacık hızı ve ölçekli mesafe ilişkisinin belirlenmesi gerekir. Bu ilişki aşağıdaki eşitlik ile gösterilebilir (Dowding, 1985):

$$PPV = k \left( \frac{R}{Q^{1/2}} \right)^{-\beta} \quad (1)$$

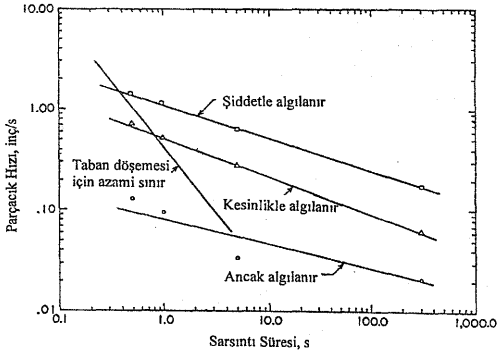
Yukarıdaki eşitlikte; PPV en yüksek parçacık hızı (mm/s), R ölçüm noktasının patlatma yerinden olan uzaklığı (m), Q her gecikmede devreye giren patlayıcı madde miktarı (kg), k ve  $\beta$  sarsıntı iletim ve sönümlenme katsayılarıdır.

Bu eşitlik çoğu araştırmacı tarafından %50 güvenilirlikte kullanılmıştır. Ancak %50 güvenilirlikte elde edilen eşitliğin korelasyon katsayısı (R) bire yakın olursa eşitlik güvenilir olarak kullanılabilir. Ancak korelasyon katsayısının çok düşük olduğu durumlarda bu eşitlikler kullanılmamalıdır. Bu gibi durumlarda bazı araştırmacılar (Erkoç ve Esen, 1998; Bilgin vd., 1999b) ayrıntılı analizlerle korelasyon katsayılarında tatmin edici artış sağlamaya çalışmışlardır ve bunda da başarılı olmuşlardır. Ayrıntılı analizler kapsamında FFT analizi ve filitreleme işlemleri yer almaktadır. Ancak bu işlemler oldukça kapsamlıdır ve sismografin yazılımının bunları yapabilecek bir yazılım olması gerekir (Bilgin vd., 2000).

Günümüze kadar geliştirilen en pratik ve güvenilir yöntem ham verilerle bulunan bu eşitliği %95 güvenilirlikte belirlemektir. %95 güvenilirlik, gerçekleşmesi olası sarsıntı değerinin %95 olasılıkla hesaplanan değerden küçük olması anlamına gelir. Bu yaklaşımı sismografla birlikte verilen bazı yazılımlar (ör: White firmasına ait “Sismograf Veri Analizi” yazılımı) sağlayabilir ya da Dowding (1985)’in hesaplama yöntemiyle kullanıcı kendisi hesaplayabilir (Bilgin vd., 2000).

#### 5. İNSANLARIN PATLATMA KAYNAKLI YER SARSINTILARINA TEPKİLERİ

İnsanların patlatma kaynaklı yer sarsıntılarına olan tepkileri yer sarsıntısı kontrol aşamasında bazen en belirleyici etmen olabilir. İnsanlar yer sarsıntılarına karşı çok duyarlıdır ve duyarlı oldukları sarsıntı değerleri yapılar da eşik hasar yaratmayacak emniyetli sarsıntı düzeylerinin çok altındadır. Yer sarsıntısının çoğu insan tarafından algılanabileceği parçacık hızı 1.5 mm/s civarında olup, bazı koşullarda bu değer 0.5 mm/s gibi çok düşük değerler olabilir. İnsanların sarsıntıya tepkisi yer sarsıntısının genliğinin yanısıra frekansına ve süresine de bağlıdır (Bilgin vd., 2000). Şekil 2’de sarsıntı süresine bağlı olarak insanların değişik seviyelerde algıladıkları parçacık hızı değerleri görülmektedir (Siskind vd., 1980).



Şekil 2. Sarsıntısı süresine göre değişik seviyelerde insanların algıladıkları parçacık hızı değerleri (Siskin vd., 1980).

İnsanların evlerinde uyurken, TV seyredirken, okurken, yemek yerken, vb. durumlarda rahatsız olacak şekilde yer sarsıntısına maruz kalması onları etkiler ve rahatsızlık duyarlar. Evdeki insanlar için en ciddi yer sarsıntısı problemi evde hasar olması korkusu ya da yaralanmadır (Siskind vd., 1980; Siskind vd., 1993). Yapısal hasar düzeyinin çok altında olmasına rağmen insanların güncel hayatında (yemek yerken yemek masasının sallanması, rafların içindeki malzemelerin hareket etmesi ve düşmesi, vb.) hoşnutsuzluk olması bu gibi samimi tepkilerin sarsıntı denetimi aşamasında mutlaka dikkate alınmasını gerektirir (Bilgin vd., 2000).

## 6. TKİ YLI SEKKÖY OCAĞI'NDA YER SARSINTISI ÖLÇÜM SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

### 6.1. Yerinde İncelemeler ve Ölçüm İstasyonlarının Seçimi

Sekköy Ocağı üst kotlarında müteahhit tarafından yapılan dekapaj patlatmaları ince tabakalı ve çok altere olmuş marn kayasında gerçekleştirilmekte olup atımlar bazen serbest aynaya bazen de önu önceden patlatılmış ancak henüz alınmamış malzemeye engelli aynalara karşı yapılmaktadır. Bu ocakta, yüklenici firmanın kullandığı delik çapı 6" (152 mm) ve delik düzeni 5m x 6m'dir. Tek tij delikler (delik boyu 6-8 m) delinmekte, delik başına 60-75 kg ANFO şarj edilmekte ve delikler 0 numaralı kapsüllerle ateşlenmektedir. Atımlarda 4-10 delik seri olarak bağlanıp birlikte ateşlenmektedir.

Bu çalışmada, üç adet 4 kanallı InstanTel Minimate, bir adet 8 kanallı InstanTel Blastmate III cihazı kullanılmıştır. Dolayısı ile bir patlatma aynı anda beş ayrı noktadan ölçülebilmektedir. Bu durum arazi (yer sarsıntısı iletim ve sönümlenme) katsayılarının çıkartılmasında kolaylık sağlamıştır.

Sekköy Ocağı'nda yapılan patlatmalar TEAŞ bölgesinde şikayete neden olduğundan yer sarsıntısı ölçüm çalışmaları Sekköy-TEAŞ yönünde yapılmıştır. Ölçümlerin amacı; şikayetlerin haklı olup olmadığını saptamak ve haklıysa denetlenebilmesi için gereken önlemleri almaktır. Belirlenen bu yönde zeminde toplam 40 kayıt, TEAŞ bölgesinde seçilen 4 farklı binada toplam 20 kayıt alınmıştır.

Cihazların araziye yerleştirilerek sarsıntı kaydı alınmasında, arazi katsayılarını bulmak ve olur ise faylardan veya mühendislik özellikleri çok farklı formasyonlardan kaynaklanan değişim veya artışları saptamak amaçlanmıştır. Yapılarda yapılan ölçümlerin amaçları ise alınan kayıtları A.B.D. hasar ölçütlerine göre yorumlamak; yapının doğal frekansını ve rezonansa girip girmediğini ve büyütme faktörünü saptamak ve insanların sarsıntıya tepkisinin nasıl olduğunu araştırmaktır.

Ocakta uygulanan patlatma düzenlerine tarafımızdan hiçbir müdahale yapılmamıştır. Sadece incelemek ve cihaz kullanarak kayıt almak şeklinde yürütülmüştür.

### 6.2. Sarsıntı Ölçer Cihaz Çıktılarının Ön Değerlendirilmesi

Sismograf tarafından kaydedilen yer sarsıntısı ve hava şoku kayıtları cihazla birlikte sağlanan yazılım kullanılarak bilgisayara aktarılmıştır. Yanal, düşey ve boyuna bileşenlerde en yüksek parçacık hızı, en yüksek ivme ve en yüksek yer değiştirme, en yüksek vektörel bileşke, gürültü, yanal, düşey, boyuna ve mikrofon kanallarında kaydedilen dalga formları, seçilen standartta (USBM R18507 ve OSMRE, DIN4150 vb.) parçacık hızı/frekans grafiği ölçüm raporunda verilmektedir. Yazılımın en önemli özelliklerden birisi olan FFT (Fast Fourier Transform) analiziyle yapıların ve zeminin etkin frekansları saptanmıştır.

Alınan bütün kayıtlar değerlendirildiğinde, zeminde kaydedilen sarsıntı değerlerinin A.B.D. USBM ve OSMRE ölçütlerine tümüyle uyduğu gözlenmiştir. Bir başka deyişle, hasar oluşmaması için izin verilen sınır değerler aşılmamaktadır. Kayıtlar ölçütlere uyduğu halde, patlatmalardan kaynaklanan yer sarsıntılarının yarattığı korku ve

endişenin devam etmesi, yer sarsıntısı dalgalarının yayılma mekanizmasının ayrıntılı bir şekilde incelenmesini gerekli kılmıştır. Nitekim sarsıntı dalga formları incelendiğinde, düşük frekanslı ve yüksek genlikli yüzey dalgalarının hakim olduğu görülmüştür. Tespitlerimize göre bu durum genellikle açık kömür madenlerinde görülen tipik bir durumdur. Şekil 3'te 5 katlı bir TEAŞ Lojmanının zemininde ve 5. katında alınan bir kayıtların dalga formu verilmiştir. Tran, Vert ve Long zeminde yanal, düşey ve boyuna bileşenlerde; Tran2, Vert2 ve Long2 5. katta yanal, düşey ve boyuna bileşenlerde kaydedilen sarsıntı dalga formlarıdır.

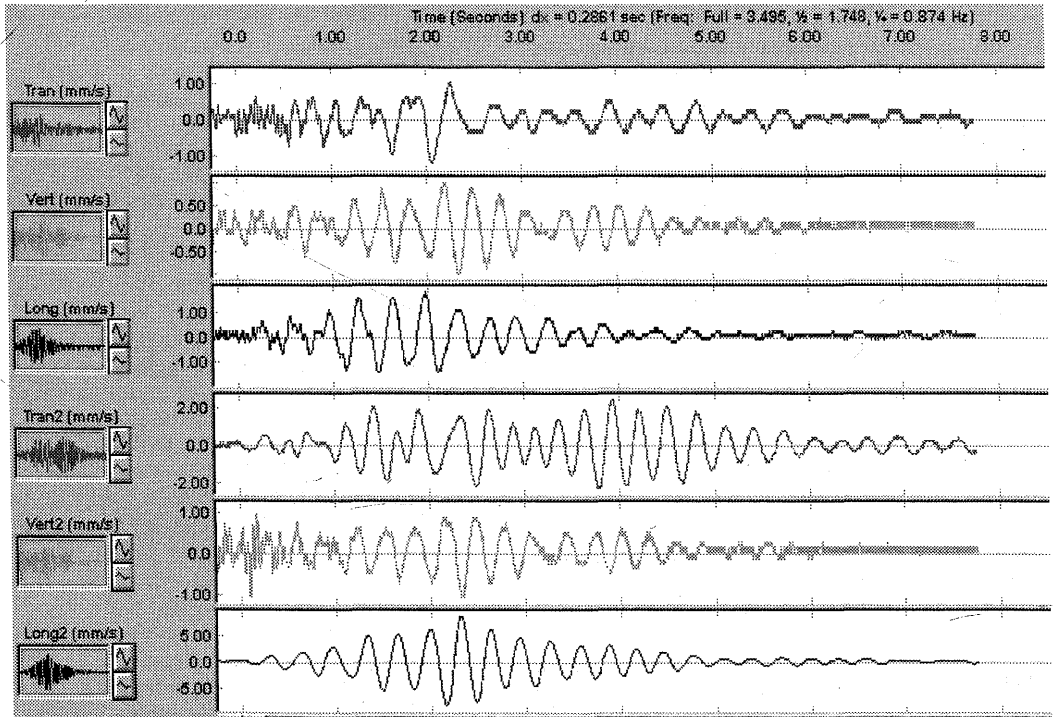
Sismograflar tarafından zeminde kaydedilen bütün kayıtların dalga formları incelendiğinde; Sekköy-TEAŞ yönünde genellikle Love dalgalarının hakim olduğu görülmüştür. Burada unutulmaması gereken husus aynı dalga formunda hem gövde dalgaları hem de yüzey dalgalarının belli derecelerde

etkisi olduğudur.

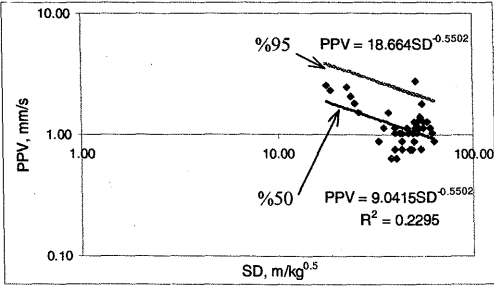
Şekil 3'te zeminde P, S, L ve R dalgalarının geliş zamanları dalga formlarının (Tran, Vert, Long) üzerinde gösterilmiştir. Rayleigh dalgaları en çok düşey bileşende, Love dalgaları ise en çok yanal bileşende etkindir. Genel olarak Love dalgaları Rayleigh dalgalarından daha hızlıdır. Geliş zamanlarına göre dalgaları sırasıyla P, S, L ve R dalgaları şeklinde sıralayabiliriz.

### 6.3. En Yüksek Parçacık Hızı ve Ölçekli Mesafe İlişkilerinin Belirlenmesi

Sekköy-TEAŞ yönünde yanal, düşey ve boyuna bileşenler için en yüksek parçacık hızı (PPV) - ölçekli mesafe (SD) grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 4'de boyuna ekseninde zeminde ölçümleri içeren ham verilerle %50 ve %95 güvenilirlik aralığında bulunan eşitlikler verilmiştir.



Şekil 3. 5 katlı bir TEAŞ Lojmanının zemininde ve 5. katında alınan tipik bir sarsıntı dalga formu.



Şekil 4. Boyuna ekseninde %50 ve %95 güvenilirlikte PPV-SD ilişkisi.

Çizelge 2 ve Çizelge 3'te yanal, düşey ve boyuna bileşenler için bulunan %50 ve %95 güvenilirlikteki eşitliklerin iletim ve sönümlenme katsayıları verilmiştir. Çizelge 2'de %50 güvenilirlikte belirlenen eşitliklerin korelasyon katsayılarının çok düşük olduğu görülmektedir. Korelasyonun düşük olmasının nedeni, arazinin yapısal jeolojisinden (fay, dokanak yüzeyleri vb.) kaynaklanan artçıl dalgaların varlığıdır. Bu nedenle bu ocakta yapısal jeolojik unsurların sarsıntı üzerine etkisinin daha ayrıntılı araştırma yapılarak ortaya çıkartılması gereği bulunmaktadır. %50 güvenilirlikte bulunan eşitliklerin düşük korelasyon katsayılarına sahip olması bu eşitliklerin yerine, %95 güvenilirlik aralığında ham verilerle elde edilen eşitliklerin kullanılması gereğini ortaya koymuştur. Böylece elde edilen bu ilişkiler %95 güvenilirlikle sarsıntı tahminlerinde kullanılabilecektir.

Çizelge 2. %50 güvenilirlikte belirlenen iletim ve sönümlenme katsayıları.

| Eksen  | k      | $\beta$ | $R^2$  |
|--------|--------|---------|--------|
| Yanal  | 32.887 | -0.8794 | 0.4581 |
| Düşey  | 2.341  | -0.2161 | 0.0919 |
| Boyuna | 9.0415 | -0.5502 | 0.2295 |

Çizelge 3. %95 güvenilirlikte belirlenen iletim ve sönümlenme katsayıları.

| Eksen  | k      | $\beta$ |
|--------|--------|---------|
| Yanal  | 62.462 | -0.8794 |
| Düşey  | 4.2849 | -0.2161 |
| Boyuna | 18.664 | -0.5502 |

#### 6.4. Etkin Frekansın ve Büyütme Faktörünün Belirlenmesi

Yapıların etkin frekanslarının ve büyütme faktörlerinin belirlenmesi için TEAŞ bölgesinde 4 adet bina seçilmiştir. Bu binalardan birisi 2 katlı bir İlköğretim Okulu olup diğerleri 3, 4 ve 5 katlı lojmanlardır. İlköğretim Okulu'nda (2 katlı) 6 adet; 3, 4 ve 5 katlı TEAŞ Lojmanlarında sırasıyla 7, 3 ve 4 adet yer sarsıntısı kaydı alınmıştır. Yapılarda yer sarsıntısı ölçümleri yapının en üst katında gerçekleştirilmiştir. Bunun nedeni çok katlı binaların en yüksek katında daha yüksek büyütme faktörünün beklenmesidir. Bununla birlikte, büyütme faktörünün yapı ve zemin özelliklerine bağlı olduğu hatırlanmalıdır.

Ölçüm aşamasında sismografların birisi zeminde (yapının ön köşesine) diğeri de yapının en üst katına yerleştirilmiştir. Çizelge 4'te aynı anda hem binada hem de zeminde gerçekleştirilen ölçümlerden dört örnek sunulmuştur. Çizelge 4'te görüldüğü gibi tüm ölçümler incelenip, yapının zeminine gelen dalgaların etkin frekansları yapının doğal frekansı ile karşılaştırıldığında birbirleriyle uyuştukları anlaşılmıştır. Bunun sonucunda zeminden gelen uyarıcı dalga geçip gittiği halde yapının rezonansa girip bir süre daha kendi kendine sallandığı ve genlik büyümesi sonucu insanların bundan son derecede endişelendikleri görülmüştür.

Binalarda kaydedilen tüm kayıtlar ele alındığında bunların etkin frekans ve büyütme faktör aralıkları sırasıyla Çizelge 5 ve Çizelge 6'da verilmiştir. Çizelge 6'da 3 katlı TEAŞ lojmanının boyuna bileşende yer sarsıntısının genliğini 4.3 kat artırdığı görülmüştür.

#### 6.5. Yer Sarsıntısının Denetlenmesi

USBM RI8507 ve OSMRE ölçütüne (Şekil 1) göre yanal, düşey ve boyuna bileşenlerde yapıların Çizelge 5'te verilen frekanslarına karşılık gelen ve yapıya hasar vermeyecek izin verilebilir PPV değerleri saptanmıştır. Bu değerler her bileşen için büyütme faktörüne bölünerek (Çizelge 6) zeminde izin verilebilir PPV değeri hesaplanmıştır. Müteahhit tarafından dekapaj yapılan panonun TEAŞ İlköğretim Okulu'na, 3, 4 ve 5 katlı lojmanlara en yakın uzaklıkları sırasıyla 642 m, 1061 m, 1077 m ve 1045 m'dir. Değerlendirme sonunda en kritik yapının 5 katlı TEAŞ Lojmanı olduğu ve bu yapıyı sırasıyla 3 ve 4 katlı Lojmanlar ve İlköğretim Okulu'nun izlediği belirlenmiştir. 3 ve 4 katlı TEAŞ Lojmanlarının yer sarsıntısının boyuna bileşenine; 5

Çizelge 4. Aynı anda hem binada hem de zeminde alınan kayıtların etkin frekans değerlerinden bazı örnekler.

| Ölçüm Tarihi | Ölçüm Yeri                | Yanal Bileşen Etkin Frekans, Hz | Düşey Bileşen Etkin Frekans, Hz | Boyuna Bileşen Etkin Frekans, Hz |
|--------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 12.07.1999   | Zemin                     | 5.750                           | 3.500                           | 5.375                            |
|              | İlköğretim Okulu (2. kat) | 5.875                           | 3.500                           | 6.125                            |
| 14.07.1999   | Zemin                     | 3.437                           | 3.187                           | 4.937                            |
|              | TEAŞ Lojman (3. kat)      | 5.062                           | 3.250                           | 4.937                            |
| 15.07.1999   | Zemin                     | 3.250                           | 3.250                           | 3.625                            |
|              | TEAŞ Lojman (5. kat)      | 3.625                           | 3.250                           | 3.250                            |
| 16.07.1999   | Zemin                     | 3.500                           | 4.062                           | 3.625                            |
|              | TEAŞ Lojman (4. kat)      | 3.812                           | 4.652                           | 4.125                            |

Çizelge 5. Binaların etkin frekanslarının belirlenmesi.

| Yapı               | Yanal Bileşende, Hz | Düşey Bileşende, Hz | Boyuna Bileşende, Hz |
|--------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| İlköğretim Okulu   | 3.9-6.1             | 3.5-6.1             | 4.3-6.1              |
| TEAŞ Lojman 3. Kat | 5.0-5.3             | 3.3-5.3             | 4.9-5.5              |
| TEAŞ Lojman 5. Kat | 3.3-3.6             | 3.3-3.8             | 3.3-4.0              |
| TEAŞ Lojman 4. Kat | 3.8-3.9             | 3.3-8.0             | 3.6-4.1              |

Çizelge 6. Binaların büyütme faktörlerinin belirlenmesi.

| Yapı               | Yanal Bileşende | Düşey Bileşende | Boyuna Bileşende |
|--------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| İlköğretim Okulu   | 1.0-1.5         | 0.9-1.0         | 1.4-1.8          |
| TEAŞ Lojman 3. Kat | 1.5-2.9         | 1.1-2.6         | 1.4-4.3          |
| TEAŞ Lojman 5. Kat | 2.8-4.2         | 0.8-1.1         | 2.3-3.2          |
| TEAŞ Lojman 4. Kat | 1.9-2.0         | 0.6-0.7         | 2.3-3.0          |

katlı lojman ile İlköğretim Okulu'nun ise yanal bileşene karşı daha hassas oldukları tespit edilmiştir. Bu yapılar arasında en kritik olanları 5 ve 3 katlı lojmanlardır. Konu yapısal (eşik) hasarın önlenmesi açısından değerlendirildiğinde bir seferde güvenle ateşlenebilecek patlayıcı madde miktarının 932 kg'ı aşmaması gerektiği saptanmıştır.

Diğer taraftan, insanların yer sarsıntısına tepkileri de gözeticiler bu dört yapı için ayrı ayrı analiz yapılmıştır. Kayıtlardan, yer sarsıntısının İlköğretim Okulu'nda yanal, düşey ve boyuna bileşenlerde sırasıyla 7, 4 ve 7 saniye; 3 katlı TEAŞ Lojmanı'nda 5, 3 ve 5 saniye; 5 katlı TEAŞ Lojmanı'nda 8, 5 ve 7 saniye; 4 katlı TEAŞ Lojmanı'nda 7, 4 ve 7 saniye sürdüğü görülmüştür. Ölçülen bu sarsıntı sürelerine karşılık gelen "kesinlikle algılanabilir" parçacık hızı değerleri Şekil 2'den saptanmıştır. Bu değerlerin biraz altında bir değer seçilerek ve büyütme faktörüne bölünerek insani tepkilerin azami fakat kabul edilebilir seviyede olmasını sağlayacak, zemin için izin verilebilir PPV değerleri her yapının yanal, düşey ve boyuna bileşenlerinde hesaplanmıştır. Bu değerlere karşılık gelen bir seferde ateşlenebilecek patlayıcı madde miktarları belirlenmiştir. 3 katlı TEAŞ lojmanında oturan insanların yer sarsıntısına daha duyarlı olduğu ve yapıda oluşan sarsıntının boyuna bileşeninin daha kritik olduğu saptanmıştır. Yapılan analizlere göre, konu insani tepkileri makul düzeyde tutmak açısından değerlendirildiğinde, bir seferde güvenle ateşlenebilecek patlayıcı madde (ANFO) miktarı en fazla 159 kg olarak belirlenmiştir. Bu miktar yapısal hasar yaratmayacak güvenli miktarın yaklaşık altında birine eşittir. Görüldüğü üzere, insanlar düşük frekanslı dalgalara karşı daha hassastır.

Sekköy Ocağı müteahhit panosunda yürütülen bu çalışma sırasında draglayn panosunda yapılan bir adet patlatmanın sarsıntısı da zemine   , binaya bir adet cihaz yerleştirilerek ölçülmüştür. Draglayn panosunda geçmişte 2 ya da 3 deliğin (birka y z kilogram patlayıcı maddenin) aynı anda ateşlendiği bilgisi edinilmiştir. Ancak müteahhit panosu ölçümlerinden %95 güvenilirlikle çıkartılan en yüksek parçacık hızı ölçekli mesafe ilişkisi kullanılarak, bir kestirim yapıldığında; aynı anda ateşlenebilecek miktarın 202 kg dolayında olabileceği tahmin edilmiştir. Bunu sağlamak üzere her deliğin ayrı ayrı ateşlenmesi (her delikten sonra bir gecikme rölesi kullanılması) istenmiş ve ölçüm bu koşullarda yapılmıştır.  l  m sonuçları, %95 güvenilirlik eşitliği kullanılarak kestirilen değerlerle karşılaştırıldığında örneğin boyuna bileşende tahmin edilen 1.62 mm/s hız değerinin üzerinde 1.90 mm/s'lik hız ölçülmüş bulunmaktadır. Bu durum fay zonu üzerinde, ocağın en derin kesiminde yapılan bu patlatmanın yol açtığı sarsıntıların farklı mekanizmalar örneğin yapısal jeolojik unsurlardan etkilendiğini ve özel bir araştırma ve inceleme gerektirdiğini ortaya koymuştur.

## 7. SONUÇLAR

TKİ YLİ Sekköy Ocağı'nda yapılan patlatmaların yer sarsıntıları TEAş yönünde ölçülmüş ve 40'ı zeminde ve 20'si binalarda olmak üzere toplam 60 adet sarsıntı kaydı alınmıştır. Ölçülen değerlerin tamamı ABD USBM ve OSMRE ölçütlerine tümüyle uymaktadır. Diğer bir deyişle, çalışmamız süresince kılcal çatlak türünde de olsa herhangi bir yapısal hasar oluşmamıştır. Ancak, patlatmalardan kaynaklanan yer sarsıntılarının yarattığı korku ve endişenin var olması ayrıntılı sarsıntı denetim çalışmalarını gerekli kılmıştır.

Sismograflarla zeminde kaydedilen kayıtların dalga formları incelendiğinde; sarsıntı dalgalarının genel karakterinin düşük frekanslı ve yüksek genlikli ve Love dalgalarının etkin olduğu görülmüştür. Yanal, düşey ve boyuna bileşenler için en yüksek parçacık hızı - ölçekli mesafe ilişkileri %95 güvenilirlik aralığında belirlenmiştir.

Zeminden gelen uyarıcı dalgaların etkin frekanslarının binaların doğal frekansı ile uyuruğu ve bunun sonucunda binaların rezonansa girdiği saptanmıştır. Rezonans durumu söz konusu olduğundan, bina yerden gelen sarsıntıdan daha büyük genlikli bir titreşime maruz kalmakta ve binada bulunan kişiler endişe, korku ve kızgınlık duymaktadırlar. Yapısal hasar düzeyinin çok altında

olmasına rağmen insanların güncel hayatında (yemek yerken yemek masasının sallanması, rafların içindeki malzemelerin hareket etmesi ve düşmesi, vb.) hoşnutsuzluk olması bu gibi samimi tepkilerin sarsıntı denetimi aşamasında mutlaka dikkate alınmasını gerektirmektedir. Ölçümlerin gerçekleştirildiği İlk retim Okulu (2 katlı), 3, 4 ve 5 katlı TEAş Lojmanlarından, 3 katlı TEAş Lojmanının boyuna bileşende büyütme faktörünün 4.3 olması sarsıntı denetiminde büyütme faktörünün ne denli önemli olduğunu göstermiştir.

Yer sarsıntısının denetimi için yapılan analize göre bir arada güvenle ateşlenebilecek en yüksek patlayıcı madde miktarı 159 kg'ı aşmamalıdır. Buna göre; eğer bir deliğe 60-75 kg ANFO şarj edilecekse her gecikmede en fazla 2 delik birlikte ateşlenmelidir. Bu miktarın belirlenmesinde %95 güvenlik aralığı kriteri, USBM RI8507 ve OSMRE  l  t , zeminin ve yapının etkin frekansları, büyütme faktörü ve insanların sarsıntıya tepkileri göz önüne alınmıştır. Sekköy Açık Ocağı'nda gerçekleştirilen bu çalışmayla, müteahhitin  vresel etkiyi en aza indirecek (hem yapılara eşik hasar vermeyecek hem de insani tepkiler doğurmayacak) şekilde patlatma yapması mümkün g r lm ştir.

Ancak 9"  aplı delikler ve daha yüksek patlayıcı madde miktarları ile çalışan işletmenin ekskavatör basamakları ile draglayn panosunda kendi yaptığı patlatmaların sarsıntı etkilerinin ayrıntılı olarak araştırılması zorunluluğu bulunmaktadır.

## 8. TEşEKKüR

Bu araştırmaya olanak sağlayan BARUTSAN A.ř.'ye ve arazi çalışmalarında her türlü desteği veren TKİ YLİ yetkililerine teşekkürü bir borç biliriz.

## KAYNAKLAR

- Bilgin, H.A., Esen, S. ve Kılıç, M., 1998, *TKİ  an Linyit işletmesinde Patlatmaların Yol Açtığı  evre Sorunlarının Giderilmesi için Araştırma*, Proje Kod No: 97-03-05-01-08, ODTÜ, Ankara, 100 sayfa.
- Bilgin, H.A., Esen, S. ve Kılıç, M., 1999a, *Yeniköy Linyit işletmesi Açık Ocaklarında Kömür Boyut Dağılımının iyleştirilmesi ve Patlatma Kaynaklı Yer Titreşimlerinin İncelenmesi*, Proje Kod No: 99-03-05-01-03, ODTÜ, Ankara, 70 sayfa.
- Bilgin, H.A., Esen, S. ve Kılıç, M., 1999b, *Patlatma Kaynaklı Yer Sarsıntılarının Binalar  zerindeki*

*Etkisi ve Büyütme Faktörünün Önemi*, Türkiye 16. Madencilik Kongresi, Ankara, s. 25-32.

Bilgin, H.A., Esen, S., Kılıç, M. ve Aldaş, G.G.U., 2000, *Yeniköy Linyit İşletmesi'nde Patlatma Kaynaklı Yer Sarsıntılarının İncelenmesi*, 4. Delme ve Patlatma Sempozyumu, Ankara, s. 147-158.

Dowding, C.H., 1985, *Blast Vibration Monitoring and Control*, Prentice-Hall, 297 pages.

Dowding, C.H., 1992, *Monitoring and Control of Blast Effects*, SME Mining Engineering Handbook, pp. 746-760.

Erkoç, Ö.Y., 1995, *Patlatma ile Çevreye Verilen Sarsıntıda Frekansın Önemi ve Değerlendirilmesi*, Türkiye 14. Madencilik Kongresi, Ankara, s. 73-80.

Erkoç, Ö.Y. ve Esen, S., 1998, *Patlatma Kaynaklı*

*Yer Sarsıntılarının Ölçülmesi ve Sarsıntı Ölçer Cihaz Çıktılarının Değerlendirilmesi*, 3. Delme ve Patlatma Sempozyumu, Ankara, s. 139-147.

Siskind, D.E., Stagg, M.S., Kopp, J.W., Dowding, C.H., 1980, *Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration from Surface Mine Blasting*, RI 8507, Bureau of Mines, 74 pages.

Siskind, D.E., Crum, S.V., Otterness, R.E., Kopp, J.W., 1989, *Comparative Study of Blasting Vibrations From Indiana Surface Coal Mines*, RI 9226, Bureau of Mines, 41 pages.

Siskind, D.E., Crum, S.V., Plis, M.N., 1993, *Blast Vibrations and Other Potential Causes of Damage in Homes Near a Large Surface Coal Mine in Indiana*, RI 9455, Bureau of Mines, 62 pages.

## **PATLATILMIŞ YIĞININ PARÇA BOYUT DAĞILIMININ BELİRLENMESİNDE KULLANILAN SAYISAL STANDART FOTOĞRAF YÖNTEMİNİN GÜVENİRLİLİĞİ**

### **THE RELIABILITY OF THE DIGITAL STANDARD PHOTOGRAPHIC METHOD IN DETERMINATION OF SIZE DISTRIBUTION OF BLASTED MUCKPILE**

**H. T. ÖZKAHRAMAN**

SDÜ, Müh.-Mim. Fakültesi, Maden Müh. Bölümü, ISPARTA

**ÖZET:** Atım kütlelerinin değerlendirilmesinde daha pratik ve kısa sürede sonuç veren standart fotoğrafların çekimi için laboratuvarında 50 kg'lık yedi adet yapma yığın oluşturulmuştur. Sonra bu yığınların bir sayısal fotoğraf makinası kullanılarak görüntüleri alınmıştır. Alınan görüntüler bilgisayara aktarılmış ve fotoğraf kağıdına basılmıştır. Böylece her bir düzgünlük (n) değeri için farklı ölekte 3 adet olmak üzere toplam 21 adet standart fotoğraf elde edilmiştir. Bu fotoğraflarla Göltaş kireçtaşı ocağındaki atım kütlelerinin boyut dağılımı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Split yönteminin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Split yazılımı dağılımın düzgünlük derecesini sağlıklı bir şekilde verebilmektedir. Ancak fraksiyon boyutlarında her iki yöntem farklı sonuçlar vermiştir. Yığın fraksiyonlarının boyutlandırılmasında Split yönteminin doğruluk derecesini denemek için boyut dağılımı önceden bilinen yapma yığınların analizi yapılmıştır. Sonuçta her iki yöntemin de dağılımın düzgünlük derecesini sağlıklı bir şekilde verebildiği kanıtlanmıştır. Ancak fraksiyonların boyutlandırılmasında her iki yöntemin de limitasyonları olduğu belirlenmiştir. Atım kütlelerinin değerlendirilmesinde daha pratik ve kısa sürede sonuç veren yeni dijital standart fotoğraf yönteminin de kullanışlı bir yöntem olduğu anlaşılmıştır.

**ABSTRACT:** Seven artificially made model rockpiles each weighing 50 kg. are created for the preparation of standard digital photographs which gives practical and quick results in the evaluation of size distribution. Later close-up digital photos were taken of each rockpile by Digital Camera. The images are transferred to computer and using photo-deluxe programme the images are magnified accordingly and more accurate and clear prints are obtained from the printer. As a result for each value of uniformity index (n), a total of 21 standard pictures are obtained at three different scale values. These photos are used to determine size distribution of blasted muckpile from Göltaş limestone quarry. The results are compared with the results obtained from Split software. It's determined that Split software gave an accurate value of fragmentation gradient but different values on fraction sizes. Therefore, artificial model rockpiles with known fragmentation are analysed by Split software and its accuracy is tested. It is shown that Split software together with standard photo technique give quite accurate values for fragmentation gradient but have limitations in finding fraction sizes. So, digital standard photos technique is a valuable method in estimation of muckpile fragmentation since being quick, practical and reasonably accurate.

#### **1. GİRİŞ**

Çimento fabrikalarında kireçtaşı üretim patlatmalarında ana hedef istenilen boyutta homojen bir şekilde kırılmış ve iri parça (patar) yüzdesi düşük olan bir yığın elde etmektir. Böyle bir atım kütlesi için patar atmaya gerek olmadığı gibi, kırıcıların kapasitesi de artar. Ayrıca kırıcıların arızalanması azaldığı için bakım ve onarım süreleri de azalır. Böylece işletmede verim artışı sağlanabilir. Atım kütlesi içinde iri parça yüzdesinin istenilenden fazla olmasının mahsurları bununla da bitmez. Öncelikle yükleme makinasının kapasitesini düşürür. Çünkü iri parçaların birbiri ile köprü oluşturmaları nedeniyle kepçe tam doldurulamaz. Ayrıca iri parça yüzdesi

çok olan bir yığının içine kepçenin daha büyük bir güçle daldırılması gerekir ki, bu da makinada daha fazla güç harcanmasına neden olur. Bundan başka iri ve ağır bloklar aşırı sürtünme kuvvetleri doğurarak hem kepçenin aşınmasını artırır hem de kepçede dişlerin gevşemesi, çıkması ve kırılması gibi mekanik arızalara neden olur. Yığının parçalanma boyutu irileştikçe kazılma ve yükleme maliyetinin de arttığı görülmüştür (Özkahraman, 1996). Bu nedenlerle patlatma atım kütlelerinin boyut dağılımının belirlenerek, gerek atım geometrisinin gerekse gecikme sürelerinin ayarlanması önem arz eder. Patlatma sonucu oluşan parçalanmanın değerlendirilmesi, atımın başarılı ya da başarısız olduğu hakkında bilgi verir.

Parçalanmanın değerlendirilmesinde en doğru yöntem tüm pasanın elek analizinin yapılmasıdır. Ancak bu da, hem pahalı hem de çok zaman alıcı olduğundan ekonomik değildir. Bu nedenle son yıllarda sayısal görüntü işleme yöntemleri uygulanmaktadır. Bu yöntemlerin kolaylığı ve pratikliği yanında maliyeti de düşüktür.

Parçalanma boyutunun belirlenmesinde sayısal standart fotoğraf yöntemi ile Split yazılımı kullanılmıştır. Her iki yöntemde de görüntüler aynı sayısal kamera ile çekilmiştir.

## 2. YENİ SAYISAL STANDART FOTOĞRAF YÖNTEMİ

Yeni sayısal standart fotoğraf yöntemi normal fotoğraf makinası ile elde edilen standart fotoğrafların bu defa dijital, çözünürlüğü yüksek zumlu bir kamera ile çekilmesi ve bilgisayar yazılımlarıyla düzenlenmesi (büyütülmesi) ve yazıcılarda bastırılması esasına dayanmaktadır.

Eski yöntem olan standart fotoğraflarla boyut dağılımının belirlenmesi yöntemi, Özkahraman (1996) tarafından daha önce açıklandığı için burada açıklanmamıştır. Eski yöntemde yeni yöntemden farklı olarak, görüntüleri filme çeken kamera kullanılmıştır. Büyütme işlemi filminden optik olarak büyütülerek fotoğraf kağıdına basılmıştır. Yeni yöntemle hem fotoğraf kalitesi artırılmış, hem de büyütme bilgisayar ortamında hassas ve daha doğru olarak yapılmıştır.

### 2.1. Yapma Yığınların Oluşturulması

Yapma yığınların oluşturulması için gerekli malzeme Göltaş Çimento Fabrikasının kireçtaşı ocağından alınmıştır. Alınan bu malzemeden düzgünlük indisi değerleri (n) farklı olan yedi ayrı yapay yığın oluşturulmuştur. Bunun için malzeme laboratuvarında elenmiştir. Elek serisindeki her bir boyut aralığına ait elek üstü (R) yüzde miktarları, Rosin-Rammler formülü (1)'den hesaplanarak bulunmuştur (Van Aswegen ve Cunningham, 1986).

$$\frac{R}{100} = e^{-0.693 \left( \frac{X}{K_{50}} \right)^n} \quad (1)$$

R: x tane iriliğinden iri tanelerin yüzde oranıdır.

X: Tane iriliğidir;

K<sub>50</sub>: Yığının %50'sinin geçtiği tane iriliğidir;

n: Rosin-Rammler tane dağılım eğrisinin eğimidir.

Her bir 'n' değeri için ayrı ayrı hesaplanan bu miktarlar karıştırılarak toplam ağırlığı 50 kg olan yapay yığınlar oluşturulmuştur. Farklı 'n' değerlerine göre hesaplanan dağılım yüzdeleri Çizelge 1'de verilmiştir.

### 2.2. Yapma Yığınların Fotoğraflarının Çekilmesi

Çalışmalar öncesinde, malzemenin dökülmesi ve fotoğrafların düzgün bir şekilde çekiminde kolaylık sağlaması açısından 1.2x1.0x0.1 m. boyutlarında tahta kasalar hazırlanmıştır. Görüntüsü çekilecek yığın bu kasa içerisine dökülüp görüntüsü çekilmiştir. Bu yığınlar karakteristik boyutu X<sub>c</sub>=10 mm, düzgünlük indisi (n); 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75 ve 2.00 olacak şekilde, yedi adet yığın hazırlanmıştır. Her bir düzgünlük indisi değeri için oluşturulan bu yapma yığınların belli bir tekstürü olduğu ve bu tekstürün fotoğraf ölçeğiyle değişmediği ancak n'e bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir. Fotoğraf çekimlerinde yığınların üzerine ortalama parça boyutlarını (K<sub>50</sub>) simgeleyen siyah renkli bir kare konmuştur. Daha sonra yapma yığınların görüntüsü 1-1,5 m. mesafeden sayısal kamera ile zum kullanarak çekilmiştir.

Sayısal kamera görüntüsü bilgisayar ortamında düzenlenerek, ortalama parça boyutunu (K<sub>50</sub>) gösteren karenin kenar uzunluğu 3, 4 ve 5 mm olacak standart fotoğraflar oluşturulmuştur. Karenin kenar uzunluğunun bilgisayarda ayarlanmasında, Photo Deluxe programından yararlanılmıştır. Böylece her bir düzgünlük (n) değeri için farklı ölçekte 3 adet olmak üzere toplam 21 adet standart fotoğraf elde edilmiştir. Bu standart fotoğraflar daha sonra Göltaş kireçtaşı ocağında yapılan galeri usulü patlatmadan elde edilen atım kütlelerinin boyut dağılımının belirlenmesinde kullanılmıştır. Elde edilen sonuç Split mühendislik firmasının geliştirdiği ve A.B.D.'de kullanılan Split yazılım programıyla da hesaplanmıştır (Esen vd., 2000). Her iki yöntemin sonuçları karşılaştırılmıştır. Oluşturulan yapma yığından sayısal fotoğraf makinasıyla çekilmiş ve bilgisayarda son şekli verilmiş bir fotoğraf Şekil 1'de görülmektedir.

### 3. SPLIT – DESKTOP SİSTEMİ

Split-desktop sistemi, bir sayısal kamera, bir bilgisayar ve bir yazıcıdan ibarettir. Kameradan elde edilen atım kütleleri görüntüsü, sayısal olarak

analiz edilir. Bu tekniğin sonuçlarının doğruluğuna etki eden en önemli hususlardan birisi kameranın (fotoğraf makinası) çözünürlüğüdür. Bundan dolayı sayısal fotoğrafların çekiminde 1024x1024 çözünürlüğe sahip zumlu kamera kullanılmıştır. Split yazılım madencilikte çeşitli kaya kırma aşamalarında kaya parçacıklarının (taşların) boyut dağılımını belirleyen bir görüntü işleme yazılımıdır (Esen vd., 2000).

Split yazılımının Desktop sürümünün beş ana kısmı vardır (Esen vd., 2000). Yazılımın ilk kısmı araziden alınan görüntülerin ölçeklenmesi, ikinci kısmı işlenen her görüntüdeki kaya parçacıklarının otomatik bölütlenmesiyle ilgilidir. Üçüncü kısım daha iyi sonuçlar elde etmek için bölütlenen görüntüye kullanıcının müdahale etmesini sağlar. Yazılımın dördüncü kısmı bölütlenmiş parçacıklardan alınan bilgilere dayalı olarak boyut dağılımının hesaplanmasını içerir. Son olarak, beşinci kısmı; boyut dağılım sonuçlarının ekranda gösterilmesi ve çıktıların verilmesini oluşturur.

### 3.1 Göltaş Atım Kütlelerinin Sayısal Fotoğraflarının Çekilmesi ve Split Yazılımı ile Parçalanma Derecesinin Belirlenmesi

Patlatma sonrası oluşan atım külesinden sayısal fotoğraflar çekilmiştir. Yığının üzerine "Split Engineering USA" firmasının gönderdiği kırmızı renkli iki adet 25,4 cm. çapında top konulmuştur. Topların ara mesafesi yaklaşık 3 m. olup, düşey doğrultuda konmaktadır. Bu topaların iki adet olmasının sebebi yığının eğik düzlem olmasından doğan perspektif hatasını yok etmek içindir. Fotoğraf makinası 1024x1024 çözünürlüğe sahip olup gayet net görüntüler elde edilmiştir. Çekilen sayısal fotoğrafların görüntüsü iki yöntemle analiz edilmiştir. Birinci yöntem Özkahraman, (1996) tarafından ayrıntılı bir şekilde açıklanan standart fotoğraflarla karşılaştırma yöntemidir. İkinci yöntem "Split Bilgisayar Yazılım" yöntemidir. Bu yöntem "Split Engineering USA" firmasının geliştirdiği bir yöntem olup ayrıntıları (Esen vd, 2000) tarafından verilmiştir. Atım külesinden çekilen sayısal fotoğraflar JPEG görüntüsü olarak internet aracılığıyla firmaya gönderilmiş ve analiz ettirilmiştir. Bu analizde SPLIT yazılımı kullanılarak yığının boyut dağılımı belirlenmiştir. Her iki yöntemle alınan sonuçlar aşağıdaki bölümde sunulmuştur. Karşılaştırmada kullanılan atım külesinin fotoğrafı Şekil 2'de gösterilmiştir.

### 3.2. Split Yazılımıyla Alınan Sonuç

Split yazılımı ile alınan sonuç Çizelge 2'de, gösterilmiştir. Çizelge 2'den  $K_{50} = 37,5$  cm.,  $n = 0,79$  olarak hesaplanmıştır.

### 3.3. Standart Fotoğraflar Kullanılarak Alınan Sonuç

Şekil 2.'deki gerçek atım kütesi fotoğrafı ile standart model fotoğrafların karşılaştırılması sonucu gerçek fotoğrafın Şekil 3'de görülen standart fotoğrafa tekstür ve parça boyut dağılımı açısından benzediği görülmüştür. Dolayısıyla gerçek fotoğrafın düzgünlük indisi 0.75 ve  $K_{50}$ 'si 3 mm.dir.

Çizelge 2. Atım külesinin Split yazılımı ile bulunan boyut dağılımı

| Tane Boyutu (cm.) | Elek altı yüzdesi |
|-------------------|-------------------|
| 190,5             | 100               |
| 127               | 98,93             |
| 63,5              | 70,96             |
| 38,1              | 50,48             |
| 25,4              | 39,41             |
| 20,32             | 33,56             |
| 15,24             | 27,40             |
| 10,16             | 20,69             |
| 5,08              | 12,56             |
| 3,81              | 10,21             |
| 2,54              | 7,63              |
| 1,91              | 6,22              |
| 1,27              | 4,68              |
| 0,95              | 3,81              |
| 0,64              | 2,95              |
| 0,48              | 2,2               |
| 0,20              | 0,93              |

Şekil 2 'de görülen topaların gerçek çapı 254 mm (10 inch), fotoğraftaki çapı ise öndekinin 5 mm arkadakinin ise 4 mm.'dir. Şekil 2'deki fotoğrafın küçülme oranı:

$$254/5=50.8 \text{ ile } 254/4=63.5 \text{ 'ün ortalaması } 57.2 \text{ dir.}$$

Ortalama parçalanma boyutu  $K_{50}$  ise  $57.2 \times 3$  mm =171.6 mm(~17.2 cm) 'dir. Buna göre yığının Rosin-Rammler dağılım formülü ise:  
 $R = 100 \exp -0.693(X/17.2)^{0.75}$  (2) olmaktadır.  
 Rosin-Rammler formülü (2) ye göre yığının boyut dağılımı ise Çizelge 3 'de görülmektedir.

Her iki yöntemin sonuçları karşılaştırıldığında düzgünlük katsayısı değerlerinin birbiriyle hemen hemen aynı olduğu (0,75'e karşılık 0,79) bulunmuştur. Ancak ortalama parça boyut değerlerinde her iki yöntemin limitasyonlarından doğan farklılık tespit edilmiştir.

Standart fotoğraf yöntemindeki hatanın karşılaştırılması yapılan standart fotoğrafın 1-1.5 m. gibi mesafeden çekilmesine karşılık gerçek yığının ise 30-40 m. mesafeden çekilmesinden kaynaklandığı zannedilmektedir. Çünkü standart fotoğrafta gerçekte kenar uzunluğu 6.1 mm. olan karenin görüntüde kenar uzunluğu 3 mm. dir. Yani 2 misli küçülmüştür. Atım kütlesi yığınınındaki küçülme oranı ise uzaktan çekildiği için 57 mislidir. Split yazılımında ortalama parça boyut değerinin daha büyük çıkmasının sebebi Bölüm 4'de belirtildiği gibi, düzgünlük katsayısının düşük değerlerinde yazılımının hatalı sonuç vermesinden kaynaklandığı zannedilmektedir. Çünkü yapma yığınlar split yazılımı ile analiz edilmiş düşük 'n' değerlerinde 'K<sub>so</sub>' değerindeki hata artmıştır.

Göлтаş kireçtaşı ocağında galeri patlatması sonucu oluşan atım kütlesinin dijital standart fotoğraflarla belirlenen parça boyut dağılımı Çizelge 3'de verilmiştir. Bu boyut dağılımına bakılarak atım kütlesinin yaklaşık %27'sinin 40 cm 'nin üzerinde, %13 'inin 70 cm 'nin üzerinde ve yaklaşık %7 'sının 100 cm 'nin üzerinde patar olduğu görülmektedir. Bunun anlamı, yerinde hacmi yaklaşık 13500 m<sup>3</sup> olan bir yığının patlatılacağı düşünülürse, özellikle 1 metreden büyük boyuta sahip malzeme miktarının çok fazla olduğudur, ( $\approx$  2500 ton). Bu da patlatma sonucunda elde edilen atım kütlesinin boyut dağılımının iyi olmadığını, yani iri malzeme miktarının çok olduğunu göstermektedir. Bunun başlıca nedeni kireçtaşı ocağında galeri patlatma yönteminin uygulanmasıdır (Özkahraman ve Şirin, 1996). Galeriyi patlatması genelde düzensiz kırılmaya neden olduğundan çok değişken boyutlarda malzemeler meydana gelmekte, iri boyut yüzdesi artmakta bu da maliyetleri yükseltmektedir. Ayrıca atım kütlesinin boyut iriliği nedeniyle malzemenin yüklenmesi, taşınması ve kırılmasında yüksek kapasiteli iş makineleri gerekmektedir. Galeriyi patlatma yöntemiyle elde edilen malzemenin boyut küçültme işlemleri aşamasında çıkabilecek arızalardan dolayı oluşacak zaman kayıpları nedeniyle bu yöntem pahalı bir yöntem olup çimento maliyetini arttırmaktadır.

Çizelge 3. Göлтаş ocağı atım kütlesinin boyut dağılımı

| Tane Boyutu (cm) | Elek altı kümülatif % miktarı |
|------------------|-------------------------------|
| 300              | 100                           |
| 200              | 98,73                         |
| 150              | 97,03                         |
| 100              | 92,53                         |
| 70               | 86,27                         |
| 50               | 78,62                         |
| 40               | 72,88                         |
| 30               | 65,07                         |
| 20               | 53,98                         |
| 15               | 46,50                         |
| 10               | 36,96                         |
| 5                | 23,99                         |

#### 4. YAPMA YİĞİMLERİN SPLIT YAZILIMI İLE ANALİZ SONUÇLARI

Boyut dağılımının belirlenmesinde Split yönteminin doğruluk derecesini test etmek için boyut dağılımı önceden bilinen yapay model yığınların analizi Split yazılımı ile yapılmıştır. Bunun için değişik 'n' değerlerine haiz (n=0,5; n=1,0; n=1,75) üç adet dijital standart fotoğraf görüntüsü, Split mühendislik firmasına gönderilmiş, Split yazılımı ile analiz edilmiş ve sonuçlar Çizelge 4 ve Çizelge 5'de olması gereken değerlerle karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Model yapay yığınların görüntüsü çekilirken üzerine sadece ölçüğü belirtmek açısından çapı 37,5 mm olan masa tenisi topu konmuştur. Böylece Split yazılımı test edilmiş, olması gereken değerlerle bulunan değerler arasındaki hata farkı tespit edilmiştir. Boyut dağılımının değişimi ile hata miktarlarındaki farklılıklar belirlenmiştir.

Çizelge 4. Yapay (model) yığınların Split yazılımıyla belirlenen düzgünlük indisi 'n' değerleri

| Yığın No | Standart fotonun Düzgünlük indisi | Split yazılım ile Bulunan değer |
|----------|-----------------------------------|---------------------------------|
| 1        | 0,5                               | 0,76                            |
| 2        | 1,0                               | 1,30                            |
| 3        | 1,75                              | 1,46                            |

Çizelge 5. Yapay (model) yığınların Split yazılımıyla belirlenen ortalama parça boyutu K<sub>50</sub> değerleri

| Yığın No | Yapma Yığın Gerçek K <sub>50</sub> değeri cm. | Standart fotonun Split yazılım ile Bulunan K <sub>50</sub> değeri cm. |
|----------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 1        | 0,48                                          | 1,047                                                                 |
| 2        | 0,69                                          | 1,208                                                                 |
| 3        | 0,81                                          | 0,872                                                                 |

Sonuçlar karşılaştırıldığında Split yazılımı, düzgünlük indisi değerlerinde sağlıklı sonuçlar verebilmektedir. n=0,5 değeri için +%52, n=1,0 için +%30, n=1,75 değeri için -%17 hata vermiştir. Dolayısıyla 'n' değeri büyüdükçe yani dağılımın homojenliği arttıkça hata payı azalmaktadır.

Çizelge 5' de standart fotoğrafı çekilen yapma yığının elek analizi ile belirlenen gerçek boyut değerleri ilk sütunda, Split yazılımı ile bulunan değerler ise ikinci sütunda verilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında ortalama parça boyutunun 'n' değeri büyüdükçe yani dağılımın homojenliği arttıkça hata payının % 8'e kadar düştüğü görülmektedir. Bu ise düşük n değerlerinde ince ve iri malzeme yüzdeleri Şekil 4'de görüldüğü gibi, ortalama boyuta göre arttığı için (bilhassa ince malzeme yüzdesi arttığından) meydana gelmekte hatada göreceli olarak büyümektedir. Hatanın, düşük 'n' değerlerinde büyümesi bilhassa ince boyutlu malzeme miktarının artmasından, artan ince malzemenin bölütlenmesinin zor olmasındandır. Şekil 5'de Split yazılımı analiz sonuçlarından elde edilen parçalanmanın grafiği görülmektedir. İnce malzemenin Split yazılımında bölütlenmesinde zorluklar yaşandığı ve parçacıkların kötü görüntü kalitesi, ışık vb. durumlarından dolayı tam olarak bölütleyemediği, kullanıcının bu durumlarda bölütleme kalitesini arttırmak amacıyla kullanıcı görüntü üzerinde düzenleme yaptığı, yazılımı yapan firma tarafından da belirtilmiştir.

## 5. SONUÇ

Yapma yığınların karakteristik boyutunun 10 mm. gibi çok küçük bir değerde olmasına ve bu nedenle parçacıkların bölütlenme güçlüğüne rağmen, her iki yöntemle de hesaplanan düzgünlük katsayıları değerlerinin birbirine yakın çıkması, Split yazılımının ve görsel karşılaştırma yönteminin oldukça doğru sonuçlar verdiğini göstermektedir. Bu

nedenle atım kütlelerinin parçalanma derecesinin değerlendirilmesinde, her iki yöntem de bilhassa düzgünlük indisinin tayininde sağlıklı olarak kullanılabilir. Bu da patlatmalarda yığının homojen bir şekilde kırılıp kırılmadığının belirtecidir ve işletme açısından çok önemlidir. Ancak fraksiyon boyutlarının belirlenmesinde fotoğrafın küçülme oranından dolayı oluşan hataları bertaraf etmek için hem arazide hem de görüntüler üzerinde hassas ölçümlerin yapılması gereklidir.

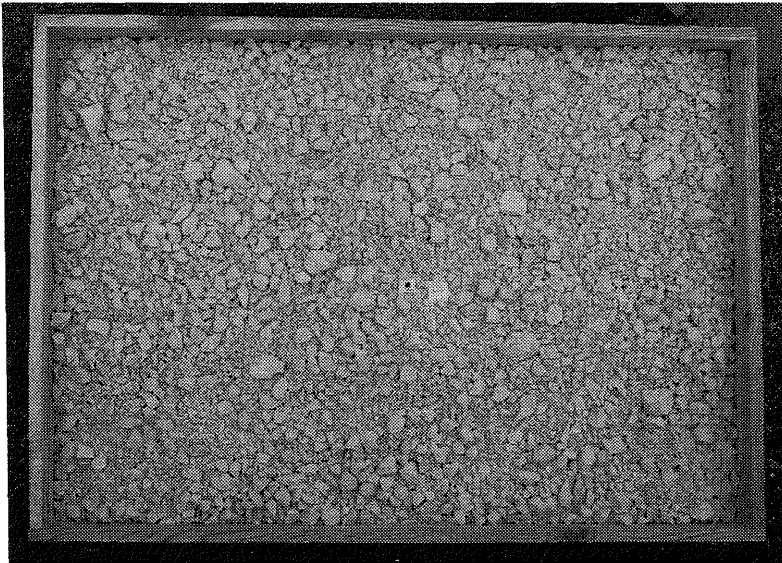
Göлтаş kireçtaşı ocağında patlatılmış yığının boyut dağılımında yeni geliştirilen sayısal standart fotoğraflar kullanılmış parçalanma çok çabuk değerlendirilmiştir. Galeri patlatması yapılan bu ocakta parçalanmayı iyileştirmek için gerekli ilk önlem olarak şev yüksekliği azaltılmıştır. Ancak parçalanmanın tümüyle iyileştirilmesi için bu ocakta en kısa zamanda basamak patlatmasına geçilmesi önerilmiştir. Şev yüksekliğini azaltma yoluyla patlatma verimini iyileştirmekle de yüklenme taşıma ve bilhassa kırma maliyetlerinde tasarruf yapılmıştır. Bu nedenle patlatma veriminin belirlenmesinde yeni geliştirilen "Sayısal standart fotoğraf yöntemi" bilhassa yığının düzgünlük katsayısının belirlenmesinde ucuz, çabuk ve sağlıklı sonuç verdiği için kullanılması tavsiye edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- Esen, S., Bilgin, H.A. ve Bobo, T. 2000 *Patlayıcının Parçalanmaya Etkisi*, 4'üncü Delme Patlatma Sempozyumu, pp.63-72., ANKARA.
- Özkahraman, H.T.; 1996. *Patlatılmış Yığının Parça Boyut Dağılımının Belirlenmesinde Pratik Bir Yöntem*, 3ncü Ulusal Kaya Mekanik Sempozyumu, Türk Ulusal Kaya Mekanik Derneği, Şubat-1996, pp. 213-223, ANKARA.
- Özkahraman, H.T. ve Şirin M., 1996. *Kireçtaşı Ocağında Yapılan Galeri Patlatma Tekniğinin Etüdü*, S.D.Ü., IX Mühendislik Sempozyumu, S.D.Ü. Müh. Mim. Fak., Maden Mühendisliği Sektörünü, Sayfa 11-18, ISPARTA.
- Van Aswegen, H. ve Cunningham, C.V.B., 1986 *The Estimation of Fragmentation in Blast Muckpiles by Means of Standard Photographs*, J.S.A.F.I.M.M., Vol.86, No.12. Rep of South Africa., pp.469-474.

Çizelge 1.Farklı n değerleri için boyut aralıklarındaki % Miktarlar

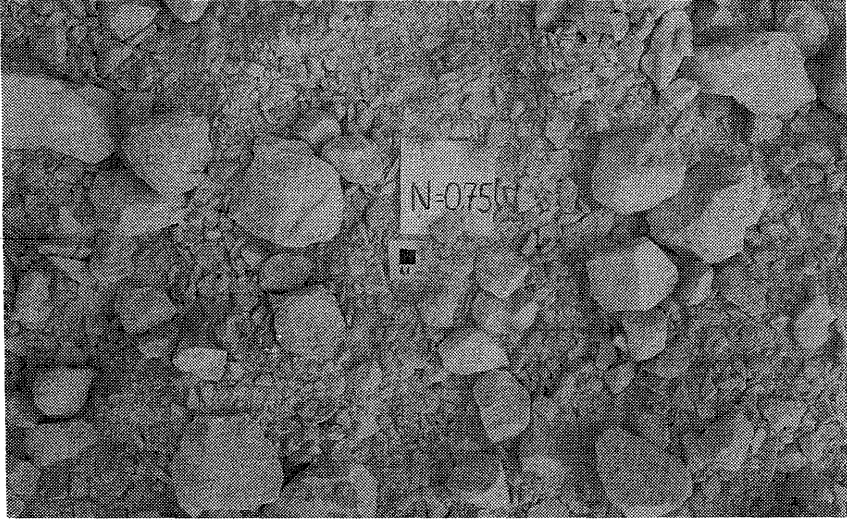
| Tane Boyutu<br>(mm)                 | Farklı n Değerlerine Göre Boyut Aralıklarındaki % Miktarlar |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                     | 0.50                                                        | 0.75  | 1.00  | 1.25  | 1.50  | 1.75  | 2.00  |
| +31.50                              | 17.0                                                        | 9.4   | 4.3   | 1.5   | 0.4   | 0.0   | 0.0   |
| -31.50 +30.00                       | 0.7                                                         | 0.8   | 0.7   | 0.4   | 0.2   | 0.1   | 0.0   |
| -30.00 +25.00                       | 2.9                                                         | 3.5   | 3.2   | 2.4   | 1.3   | 0.6   | 0.2   |
| -25.00 +19.05                       | 4.6                                                         | 6.1   | 6.7   | 6.4   | 5.3   | 3.9   | 2.5   |
| -19.05 +15.00                       | 4.2                                                         | 6.0   | 7.4   | 8.3   | 8.7   | 8.5   | 7.8   |
| -15.00 +12.50                       | 3.3                                                         | 4.9   | 6.4   | 7.7   | 8.8   | 9.7   | 10.5  |
| -12.50 +11.20                       | 2.0                                                         | 3.0   | 3.9   | 4.9   | 5.9   | 6.7   | 7.5   |
| -11.20 + 8.00                       | 6.2                                                         | 9.2   | 12.3  | 15.3  | 18.3  | 21.3  | 24.2  |
| - 8.00 + 6.70                       | 3.2                                                         | 4.8   | 6.3   | 7.6   | 8.9   | 10.1  | 11.1  |
| -6.70 + 5.60                        | 3.2                                                         | 4.6   | 5.9   | 7.1   | 8.0   | 8.7   | 9.3   |
| - 5.60 + 3.35                       | 8.8                                                         | 12.1  | 14.4  | 15.9  | 16.6  | 16.7  | 16.3  |
| -3,35 + 2.50                        | 4.6                                                         | 5.8   | 6.4   | 6.3   | 5.8   | 5.2   | 4.5   |
| - 2.50 + 1.70                       | 5.5                                                         | 6.5   | 6.5   | 5.9   | 5.0   | 4.1   | 3.3   |
| - 1.70 + 1.00                       | 6.7                                                         | 7.0   | 6.1   | 4.8   | 3.7   | 2.6   | 1.8   |
| - 1.00 + 0.20                       | 14.0                                                        | 11.1  | 7.5   | 4.8   | 2.8   | 1.7   | 1.0   |
| -0.20                               | 13.1                                                        | 5.2   | 2.0   | 0.7   | 0.3   | 0.1   | 0.0   |
| Toplam(%)                           | 100.0                                                       | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |
| Ortalama Tane Boyutu, $d_{50}$ (mm) | 4.8                                                         | 6.1   | 6.9   | 7.5   | 7.8   | 8.1   | 8.3   |



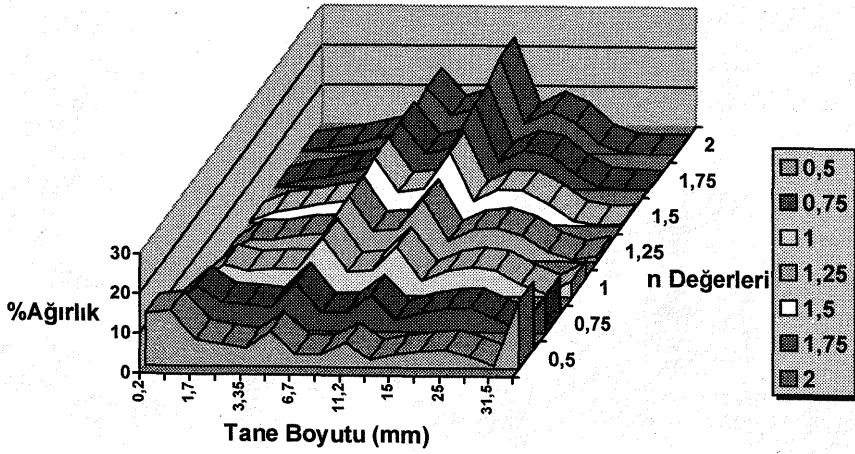
Şekil 1. Oluşturulmuş bir yapma yığının dijital fotoğraf makinası ile çekilmiş görüntüsü



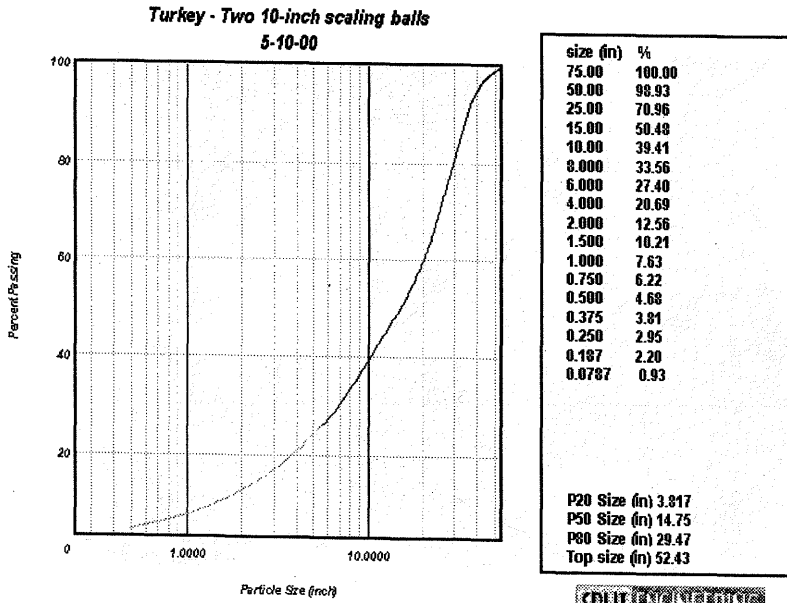
Şekil 2. Göltaş kireçtaşındaki bir atım kütlelerinin Kodak DC265 dijital kamera ile çekilmiş görüntüsü



Şekil 3.  $N=0.75$  ve  $K_{50}=3$  mm olan standart fotoğraf



Şekil 4 Değişik düzgünlük katsayısı 'n' değerleri için boyut dağılım yüzdeleri



Şekil 5. Split yazılım programıyla elde edilen Göltaş atım kütlelerinin fragmantasyonu

## UZUNAYAKLARDA GÖÇÜK MALZEMESİNİN SAYISAL YÖNTEMLERLE MODELLENMESİ

### NUMERICAL MODELLING OF CAVED MATERIAL IN LONGWALL PANELS

H. AKDAŞ

Osmangazi Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, ESKİŞEHİR

**ÖZET:** Göçertmeli uzunayak panolarında gerilme ve konverjans dağılımlarının tahmininde farklı sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Gerilme ve konverjans dağılımının tahmininde göçük malzemesinin özellikleri ve gerilme deformasyon karakteristiği önemli rol oynar. Bu tebliğde, ilk önce ayak arkası göçük malzemesi oluşumu, formu ve özellikleri verilmektedir. Sonra göçük malzemesinin araştırmacılar tarafından önerilen davranış ve modelleme teknikleri açıklanmaktadır. Çoğu araştırmacılar göçük malzemesinin gerilme deformasyon ilişkisinin doğrusal olmayan karakter gösterdiği şeklinde hemfikirlerdir. Göçük malzemesi, sonlu elemanlar yöntemlerinde simulasyon tekniği ve sınır elemanlar yöntemlerinde ise doğrudan sınır koşullar dahilinde konverjans ile bağıntısı kurularak kullanılmaktadır. Sonuç olarak da göçük malzemesi modellemesinde dikkat edilecek hususlar ve öneriler verilmektedir.

**ABSTRACT:** In order to predict induced stresses and convergence around longwall panels, different numerical techniques are used. Caved material properties and stress-strain relationship play important role for prediction of distribution of stresses and displacements. In this paper, first, the caving mechanism, form, and properties of caved waste behind longwall face are given. Then, the stress-strain relationship and modeling methods of caved waste suggested by different researchers are explained. Most of researchers have mentioned that caved material behavior is a non-linear stress-strain relationship. Behavior of caved material is modeled with simulation techniques in finite element methods. On the other hand, caved material is modeled with setting up a relation to convergence and boundary conditions in boundary element methods. Finally, some suggestions are given for the modeling of caved material behind face.

#### 1. GİRİŞ

Yeraltı kömür üretiminde başka bir yöntemin zorunlu olmadığı durumlarda göçertmeli uzunayak yöntemi en çok uygulanan ve tercih edilen bir yöntemdir. Göçertmeli uzunayak yöntemi seçiminde en önemli etkenler olarak ekonomik olması, kayıpların az olması, emniyetli olması ve mekanize uygulamalara olanak vermesi olarak belirtilebilir.

Geçmişte göçertmeli uzunayak panolarında tabakaların davranışları, gerilme dağılımları, tabakaların deformasyonları, tavan-taban yollarının stabilizesi gibi hususlar geniş çapta araştırılmıştır. Bu araştırmalar hem yerinde ölçmeler hem de teorik ve sayısal yöntemlerle desteklenmiştir. Özellikle bilgisayar teknolojisindeki olumlu gelişmelerin paralellğinde, göçertmeli uzunayak panolarının iki boyutlu ve üç boyutlu model çalışmaları da detaylı olarak geliştirilmiştir.

Modellemelerde kullanılan malzemelerin özelliklerini belirlemek sayısal yöntemlerde en önemli adımlardan biridir. Göçertmeli uzunayak modellerinin oluşturulmasında tabakalar ve kömür damarı için malzeme özellikleri nispeten belli

yaklaşımlarla tespit edilebilmektedir. Ancak göçük malzemesi hem kömür damarı hem de tavan – taban tabakalarına göre farklı ve doğrusal olmayan bir davranış verdiğinden, modellerde çoğunlukla simulasyon (benzetim) tekniği kullanılmaktadır.

Bu tebliğde göçük malzemesi üzerine yapılan araştırmalar, teorik görüşler ve modellenmesi hususunda ayrıntılar verilmektedir.

#### 2. AYAK ARKASI GÖÇÜK MALZEMESİ OLUŞUMU VE ÖZELLİKLERİ

Göçertmeli çalışan uzunayaklarda, kömür damarının dilim dilim kazılmasıyla birlikte ayak arkası damarın üzerindeki yalancı tavan tabakalarının kendi kendine kırılıp parçalanmasıyla dolmaktadır. Çoğunlukla bu malzeme doğal dolgu ya da moloz olarak tanımlanmaktadır. Burada doğal dolgu yerine göçük malzemesi terimi kullanılmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi, yalancı tavan tabakalarının kendiliğinden göçmesi sonucu insan eli değmeden kontrolsüz olarak büyük boyutlu bloklarda içerebilen agrega şeklinde farklı bir malzeme oluşması

nedeniyle göçük malzemesi deyimi kullanılmıştır. Aynı zamanda bu terim, sayısal yöntemlerde kullanılan malzeme terimini de içermektedir.

Ayak arkasında göçme olayı neticesi yalancı tavan tabakaları kırılma, parçalanma ve kabarma yaparak boşluklu bir şekilde dolguyu oluşturur. Başlangıçta, ana tavan tabakalarının yükünü karşılamadan önce göçük malzemesi gevşek bir yığın halindedir. Ayağın yeteri kadar uzaklığa erişmesinden sonra göçük malzemesi ana tavan tabakalarının yükü nedeniyle sıkışmaya başlar. Bu yükleme ile göçük malzemesi hiçbir zaman tam bir sıkışma yapamaz yani boşluksuz şekline gelemmez. Boşluksuz bir sıkışma olamaması nedeniyle ana tavan tabakaları düşey yönde yapacağı yer değiştirme hareketi (konverjans) için mesafe küçük olacaktır. Kazı yüksekliğine göre küçük olan bu düşey yöndeki yer değiştirme mesafesi nedeniyle ana tavan tabakalarının büyük bloklar halinde, tabaka formunu ve görünümünü fazla bozmadan göçük alanına doğru statik ağırlıklarını vermektedirler. Yani ana tavan tabakaları, tam anlamıyla formlarını bozabilecek düşey hareket mesafesinden yoksundurlar ya da yalancı tavan tabakaları gibi kırılıp, parçalanarak ve kabarmakla göçük malzemesi oluşturabilecek yeterli boşluğa sahip olmamaktadır.

Ayak arkası göçük malzemesinin oluşum mekanizması ve sonrasında basınç altında davranış karakteristiklerinin bilinmesi model çalışmalarında gereklidir. Göçük malzemesinin kaynağı olan yalancı tavan tabakalarının jeolojik ve yapısal özellikleri göçük malzemesi şeklinde önemli rol oynar. Göçük malzemesinin şeklini genel olarak üç farklı şekilde tanımlamak uygun olabilir.

Bunlar ;

- a) agregata şeklinde göçük malzemesi,
- b) agregata-blok şeklinde göçük malzemesi,
- c) yoğunlukla blok şeklinde göçük malzemesidir.

İlk grup olan agregata şeklindeki göçük malzemesi daha çok zayıf yalancı tavan formasyonlarından oluştuğu düşünülmelidir. Özellikle çok çatlaklı, kontrolü zor olan ve uzunayak tahkimatının çekilir çekilmez göçebilen nitelikteki formasyonları içerir. Bilindiği üzere bu tavan şartlarında çalışmak hem güçtür hem de yoğun tahkimat gerektirir. Buna karşın yürüyen tahkimat uygulamalarında tavan tabakası tam anlamıyla kapatıldığından önemli sorun teşkil etmemektedir.

İkinci grup olan agregata-blok şeklindeki göçük malzemesi, orta ve çok zayıf olmayan yalancı tavan formasyonların varlığı ile oluşabilmektedir. Bu tür göçük malzemelerinde agregata formu ile birlikte, çok büyük olmayan blok halindeki parçalar da görmek

mümkündür. Bu tür yalancı tavan formasyonları zaman zaman ayak arkasında göçmede gecikme yapan özellikteki formasyonlardır. Ya da ayak arkasına göçen yalancı tavan tabakaları arasında hem çok zayıf hem de iyi özelliklere sahip karışık formasyonların olması şeklinde düşünülebilir.

Üçüncü grup olan yoğunluğu büyük blokların oluşturduğu göçük malzemesi formudur ki daha çok sağlam ve çatlaksız yapıya sahip yalancı tavan formasyonlarından meydana gelir. Özellikle de masif kumtaşı ve konglomera gibi yalancı tavan tabakaları ayak arkasına göçmeyerek uzun süre askıda kalabilmektedir (Arioğlu ve Biron, 1981). Hatta patlatma ile göçertme müdahalesi gerektirmektedir. Böyle tavan şartlarında emniyet problemleri nedeniyle göçertmeli çalışma yerine dolgu çalışması tercih edilmektedir.

Yukarıda verilen ilk iki göçük malzemesi grubu, kömür ocaklarında sıklıkla karşılaşılmaktadır.

### 3. GÖÇÜK MALZEMESİNİN DAVRANIŞ ÖZELLİKLERİ VE MODELLEME TEKNİKLERİ

Bu bölümde çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen göçük malzemesinin basınç altındaki davranış ile gerilme-deformasyon ilişkileri verilmekte ve önerilen formüller ile modelleme teknikleri kısaca açıklanmaktadır.

#### 3.1. M.D.G. Salamon' nın Yaklaşımı

Salamon (1990), göçük malzemesinin basınç altında sıkışma karakteristiğinin agreganın gösterdiği davranışa benzer olduğunu ifade ederek basınç ve kabarma faktörü arasındaki ilişkiyi vermektedir. Bunun için aşağıda verilen ifadelerin gözden geçirilmesi gereklidir. Agreganın sıkışma özellikleri yönünden serbest hali  $\Delta Z_0$ , kısmen sıkışmış hali  $\Delta Z$  ve boşluksuz, yani katı hali  $\Delta Z_s$  ile tanımlanırsa, "boşluk oranı",  $e$  ;

$$e = \frac{(\Delta Z - \Delta Z_s)}{\Delta Z_s} \quad (1)$$

olarak yazılabilir. Katılardaki başka bir boşluk ifadesi bilindiği gibi "gözeneklilik",  $n$  ' dir.

$$n = \frac{(\Delta Z - \Delta Z_s)}{\Delta Z} \quad (2)$$

serbest haldeki agregata için boşluk oranı ve gözeneklilik yukarıdaki (1) ve (2) no' lu ifadelerde

ilgili deyimler  $e_0$  ve  $n_0$  olarak değiştirilmesi ile elde edilir. Bu durum için basit olarak birim deformasyon

$$\varepsilon = \frac{(\Delta Z_0 - \Delta Z)}{\Delta Z_0} \quad (3)$$

ile belirtilebilir. Maksimum birim deformasyon ( $\varepsilon_m$ ), (3) no.'lu ifadede  $\Delta Z = \Delta Z_s$  olduğunda ulaşılabilir. Madencilikte çoğunlukla kullanılan "kabarma faktörü",  $b$ , ise agreganın toplam hacminin katı haldeki hacmine oranı şeklinde tanımlanmaktadır. Bu durumda, kabarma faktörü;

$$b = \frac{\Delta Z}{\Delta Z_s} \quad (4)$$

olarak yazılabilir. Kabarma faktörü değeri, artan basınç ile birlikte ilk değerinden daha düşük değerler alacağı açık olarak bellidir. Sonuçta aşağıdaki ifadeler özet olarak yazılabilir.

$$b = 1 + e = \frac{1}{(1-n)} = \frac{(1-\varepsilon)}{(1-\varepsilon_m)}$$

$$b_0 = 1 + e_0 = \frac{1}{(1-n_0)} = \frac{1}{(1-\varepsilon_m)} \quad (5)$$

Kezdi tarafından verilen boşluk oranı ile basınç arasındaki ilişki ise

$$e = \frac{P_c(e_0 - e_{min})}{P + P_c} + e_{min} \quad (6)$$

şeklinde dir. Burada  $P_c$  malzeme katsayısı ve  $e_{min}$  sonsuz basınçta minimum boşluk oranıdır. Dolayısıyla  $e_{min}$  çok küçük bir değere sahip olacağından  $e_{min} = 0$  kabulü yapılabilir. (6) ifadesi (5) no.'lu ifadelerin kullanımı ile yeniden yazılırsa ;

$$b = \frac{(P + b_0 P_c)}{(P + P_c)} \quad (7)$$

$b$  : kabarma faktörü

$P$  : basınç

$b_0$  : ilk konumdaki kabarma katsayısı

$P_c$  : malzeme katsayısı ( $P_c \cong 0.5 - 5$  MPa)

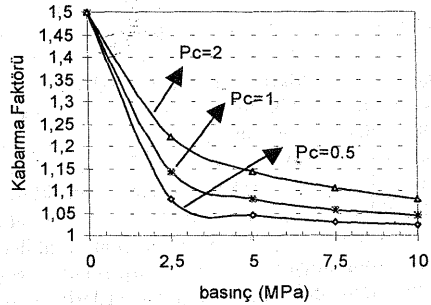
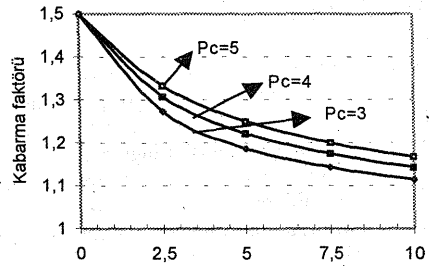
elde edilir (Salamon, 1990). Güney Afrika altın madenlerinde kullanılan dolgu malzemesi için gerilme - birim deformasyon ilişkisi aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$P = E_0 \varepsilon / \left( \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon_m} \right) \quad (8)$$

Burada  $E_0$  başlangıç tanjant modülü ve  $\varepsilon_m$  mümkün olan maksimum birim deformasyonu ifade etmektedir. (5), (7) ve (8) no.'lu ifadelerin kullanımı ile malzeme katsayısı olan  $P_c$ ;

$$P_c = E_0 \varepsilon_m \quad (9)$$

eşitliği elde edilir. Sonuç olarak Salamon tarafından önerilen (7) no.'lu ifade kayaçların oluşturduğu agreganın sıkışma karakteristiğini temsil ettiği söylenebilir. (7) no.'lu ifadede  $P_c$  malzeme katsayısı değerinin kömür madenciliği için normal koşullarda 2 MPa olduğu kabul edilmektedir (Salamon, 1990). Bu (7) no ile verilen ifadenin değişik malzeme katsayılarına göre grafiği hiperbolik olup Şekil 1.'de verilmektedir.



Şekil 1. Basınç ve kabarma faktörünün malzeme katsayısına bağlı olarak değişimi.

Salamon göçertmeli uzunayak panoları için önerdiği integral yöntemine dayalı lamina modeli için birbirine paralel, kayma gerilmeleri ve kohezyondan bağımsız, homojen tabakaların

bulunduğu sürekli ortam için düşey yerdeğiştirmeyi (w) tanımlayan ifadeyi kullanmaktadır. Bu ifade ;

$$\lambda^2 \nabla^4 w - \frac{\partial^2 w}{\partial^2 z} = 0 \quad (10)$$

dır. Burada  $\nabla^4$  yatay xy düzleminde biharmonik operatörü ve z düşey yönü temsil eder.  $\lambda^2 = t^2/(12(1-\nu^2))$  olup eşitlikte t, tabakanın düşey yönde kalınlığı ve  $\nu$  Poisson oranıdır. (10) no.'lu ifade ile ilgili olarak geliştirilen gerilme dağılım ve tavan-taban konverjans fonksiyonlarında (7) no.'lu ifadenin kullanılmasıyla ve sınır koşullarının da belirlenmesi ile pano üzerinde ve civarında gerilme dağılımı, konverjans ve tasman gelişimi hesaplanabilmektedir. Burada ilgili fonksiyonlar uzun olduğu için ve yer tutacağı nedeniyle verilmemiştir. Sonuç olarak (7) no.'lu ifade hiperbolik olup bir malzeme katsayısını içermektedir ve başlangıç kabarma faktörü yaklaşık olarak 1.5 olarak kabul edilmiştir.

### 3.2. Smart – Haley ve Trueman Yaklaşımı

Bilindiği gibi ayak arkasında göçük malzemesi üzerindeki basınç ayaktan uzaklaştıkça artmaktadır. Göçük malzemesi üzerindeki basınç seviyesinin ancak örtü tabakalarının oluşturduğu derinlik basıncı düzeyinde olabileceği ve bu basıncında pano kenarlarından itibaren derinliğin 0.3-0.4 katı bir mesafede olduğu belirtilmiştir (Whittaker, 1974; Wilson, 1981).

İngiltere’de yapılan bir araştırma sonucunda, göçük üzerindeki basıncın derinlik basıncına eşit olduğu mesafenin ayak arkasında pano kenarlarından itibaren derinliğin 0.12 katı olan bir noktada olduğunu şerit dolgu civarında yaptıkları ölçme ile bulmuşlardır. Göçük malzemesinin de özelliklerini dikkate alarak yapılan araştırmada ana tavan tabakalarının yatayla 2.5°’lik bir açı ile göçük malzemesi üzerine doğru eğilerek ağırlıkları ile sıkıştırdıkları izlenmiştir. Bunun sonucunda göçük malzemesinin %24 – 26’lık bir sıkışma yapabileceği ortaya konulmuştur. Bu araştırmada göçük malzemesinin çok geniş alanda taşlarla yapılan dolguya benzetilerek ve kabarma faktörünün de 1.5 olduğu varsayımı ile aşağıdaki gerilme birim deformasyon ilişkisi önerilmektedir (Smart ve Haley, 1987).

$$\sigma = 512.9\epsilon^4 - 294\epsilon^3 + 121\epsilon^2 - 1.7\epsilon + 0.007 \quad (11)$$

Bu ifadede  $\sigma$  göçük malzemesi üzerindeki düşey gerilmeyi (MPa) ve  $\epsilon$  düşey birim deformasyonu temsil etmektedir. Ancak bu ifade 1.5 kabarma faktörü ve maksimum %25’lik bir sıkışma durumunda geçerli olabilmektedir.

Smart ve Haley’in önerdiği (11) no.’lu gerilme deformasyon ilişkisi %33’lük nihai sıkışma konumu dikkate alınarak aşağıdaki formüle dönüştürülmüştür (Trueman, 1990).

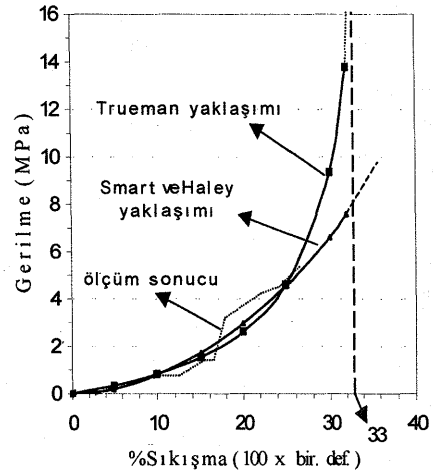
$$\sigma = \frac{\epsilon}{(0.164 - 0.44\epsilon)} \quad (\text{MPa}) \quad (12)$$

Bu ilişki yine 1.5 kabarma faktörü ve %33’lük nihai sıkışma konumu için geçerli olup, Şekil 2.’de grafikleri ve yerinde ölçüm sonuçları ile birlikte verilmiştir.

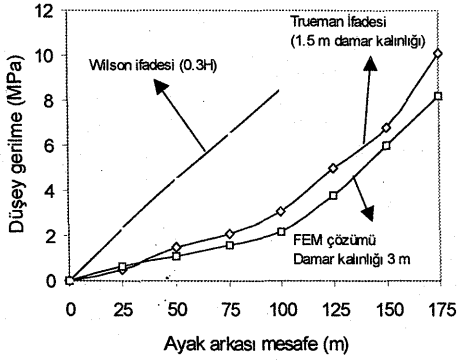
(12) no.’lu ifade yardımıyla simülasyon tekniği kullanılarak elasto-plastik sonlu elemanlar yönteminde uygun sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 3’te ABD, Colorado Eyaleti’nde 335 metre derinlikte bulunan bir kömür ocağının sonlu elemanlar yöntemi ile gerilme dağılımı analizi yapılmıştır. Bu modelleme sonucunda göçük üzerinde elde edilen gerilme dağılımı Şekil 3’te verilmektedir (Akdaş, 1993).

### 3.3. Maleki Yaklaşımı

Göçük malzemesi ayak arkasında hemen yük almadığı ve tavan-taban konverjansının gelişmesiyle belli bir noktadan sonra göçük malzemesi üzerinde gerilme artışının başlayarak doğrusal olarak artacağı



Şekil 2. 1.5 kabarma faktörüne göre göçük malzemesinin davranışı.



Şekil 3. Göçük malzemesi üzerinde düşey gerilme gelişimi (Akdaş, 1993).

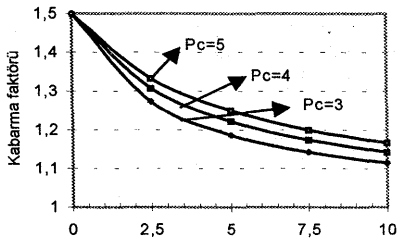
varsayımı da başka bir görüş olarak savunulmaktadır (Şekil 4). Bu modellerde göçük malzemesinin ön kapanma miktarları giriş bilgisi için gereklidir. Örnek olarak Amerika'nın batı bölgesindeki kömür ocakları için ön kapanma değerleri ;

300m derinlik için 25 cm,

450m derinlik için 30 cm,

550m derinlik için 34 cm

olarak kabul edilebileceği belirtilmektedir (Maleki, 1990).



Şekil 4. Göçük malzemesi gerilme deformasyon ilişkisi (Maleki, 1990) (ölçeksiz).

Bu karakterdeki göçük malzemesi davranışı askıda kalan yalancı tavan konumu ve zor göçebilen şartları temsil ettiği söylenebilir. Aslında Şekil 4 'te verilen iki kademeli doğrusal ilişki, doğrusal olmayan ilişkinin basitleştirilmiş durumu olarak yorumlanabilir. Verilen bu göçük malzemesi

davranışı, yer değiştirme süreksizliği sınır eleman metodu ve sonlu elemanlar yöntemi ile Batı Amerika kömür ocakları için model çalışmaları yapılarak, tavan-taban giriş yollarındaki topukların duraylılığı araştırılmaktadır.

### 3.4. Kripakov ve Arkadaşlarının Yaklaşımı

Amerika'da göçertmeli çalışan uzunayakların model çalışmaları için Amerika Madenler Bürosu (USBM) tarafından geliştirilen programda (MULSIM) göçük malzemesinin karakteristiği Salomon ve Mazumdar'ın görüşleri doğrultusunda geliştirilmiştir. Buna göre göçük malzemesi davranışı ;

$$P = k'w / (m + w) \quad (13)$$

şeklinde olup burada  $P$  göçük malzemesi direncini (psi)  $k'$  malzeme katsayısını (psi),  $m$  damar kalınlığını (ft) ve  $w$  ise göçük zonda tavan-taban konverjansını (ft) temsil etmektedir. (13) no.'lu ifade göçme yüksekliği dikkate alınarak gerilme-deformasyon ilişkisi şeklinde yazılırsa;

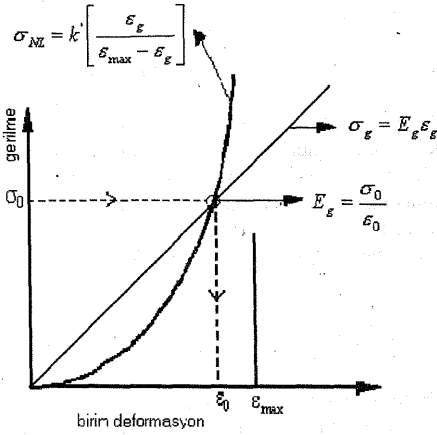
$$\sigma_{NL} = k' \frac{\epsilon}{(\epsilon_{max} - \epsilon_g)} \quad (14)$$

elde edilir. Bu ifadede  $\sigma_{NL}$  göçük malzemesi üzerindeki gerilmeyi,  $\epsilon_g$  göçük malzemesinin birim deformasyonunu ifade ederken  $k'$  malzeme katsayısı olup, Avrupa kömür ocakları için 0.9-1 MPa (133 psi) civarında olduğu rapor edilmektedir. (14) no.'lu ifadenin grafiği Şekil 5 'te verilmektedir. Bu değer Batı Amerika'daki ocaklar için çok küçük olduğunun tespiti ile Amerikan Madenler Bürosu'nun araştırması sonucu 12 MPa (1700 psi) olabileceği belirtilmektedir. Yerinde göçük malzemesinin kiriş modülü ise 138 MPa (20000 psi) olarak tespit edilmiştir (Kripakov vd., 1990).

Yer değiştirme süreksizliği sınır elemanlar yöntemine (displacement discontinuity) göre iki ve üç boyutlu olarak geliştirilen MULSIM programında göçük malzemesinin modellenmesinde (14) no.'lu ifade dikkate alınarak doğrusal yaklaşım tekniği kullanılmaktadır. Doğrusal modelleme ile hem program çalışma süresinin daha az olması hem de program kod yazılımının kısa ve pratik olması sağlanmıştır. Göçük malzemesinin Şekil 5 'te verilen doğrusal yaklaşımına göre yerinde kiriş modülü;

$$E_g = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \quad (15)$$

dır. Burada;  $\sigma_0$  göçük malzemesi üzerindeki derinlik basıncını ( $\gamma.H$ ) ve  $\epsilon_0$  göçük malzemesinin birim deformasyonunu ifade etmektedir.



Şekil 5. Mulsim programında göçük malzemesinin doğrusal modelleme tekniği (ölçeksiz) (Kripakov vd., 1990).

Mulsim programında göçük malzemesi giriş bilgisi olarak aşağıdaki ifadeyle belirlenen, düzeltilmiş göçük malzemesi modülünün verilmesi yeterli olmaktadır. Sonuç olarak,

$$E_{GM} = E_g \left( \frac{m}{g} \right) \quad (16)$$

yazılabilir. Burada  $E_{GM}$  göçük malzemesi modülü,  $m$  damar kalınlığı ve  $g$  ayak arkasında oluşan göçük yüksekliğidir.

### 3.5. Göçük Malzemesinin Modellenmesinde Benzetim (Simulasyon) Teknikleri

Daha önceki bölümlerde verilen doğrusal ya da doğrusal olmayan karakterdeki göçük malzemesinin sayısal yöntemlerde özellikle sonlu elemanlar yönteminde kullanılan modelleme tekniklerinden biri de benzetim (simulasyon) tekniğidir. Benzetim tekniğinde elemanlara ayrılan göçük malzemesine ayak arkasından göçüğe doğru giderek artan elastisite modülleri atanır. Bunun sonucunda modeldeki göçük malzemesi üzerinde giderek artan düşey gerilmeleri elde etmek mümkün olmaktadır. Benzetim tekniği, hazır paket programlarda göçük malzemesinin gerilme-deformasyon ilişkisini

matematiksel olarak uyarlama imkanı olmadığı durumlarda uygulanmaktadır.

Amerika Alabama Eyaleti'ndeki 600 m derinlikteki iki uzunayak için yapılan model çalışmalarında, ayak arkası göçük bölgesinin geometrik boyutları Wilson tarafından verilen yaklaşımlarla bulunarak model oluşturulmuştur. Ayak arkası göçük elemanları için 35 MPa (5000 psi) dan başlayarak 310 MPa 'a kadar artan elastisite modülleri kullanılmıştır. İlave olarak tüm göçük malzemesi elemanları için Poisson oranı olarak 0.45 değeri atanmıştır. Modellerde kırılma zonu da dahil edilerek göçme yüksekliği 75 m ve göçük üzerinde maksimum gerilmenin ayak arkasından itibaren 155 'm de 11 MPa olduğu ve doğrusal arttığı varsayılmıştır. Ayrıca bu çalışmada pano genişliği boyunca göçük zonunun, pano kenarlarından pano ortasına doğru bir kemer şeklinde geliştiği kabul edilmiştir (Duk-Won ve Andrew, 1990). Model analizleri için NASA tarafından geliştirilen MSC/NASTRAN paket programı kullanılmıştır. Detaylı olarak geliştirilen modellere uzunayaktaki yürüten tahkimat üniteleri de dahil edilmiştir.

Yine MSC/NASTRAN, sonlu elemanlar programı kullanılarak yapılan başka bir modellemede göçük malzemesi için benzetim tekniği uygulanmıştır. Bu modellemede göçük malzemesi kabarma faktörü 1.5 kabul edilerek 7.4 Mpa dan 289.66 Mpa'a kadar artan elastisite modülleri kullanılarak ayak arkasında doğrusal olmayan düşey gerilme dağılımı sağlanmıştır. Bu modelde göçük malzemesinin yaklaşık %22 'lik kapanma özelliği kabul edilmiştir (Hasenfus ve Su, 1992).

Türkiye'de, Tuncbilek Bölgesi kalın damarlar için sonlu elemanlar metodu ile üretim yöntemleri de göz önüne alınarak yapılan model çalışmalarında, göçük malzemesi için benzetim tekniği kullanılmıştır. Bu çalışmada göçük malzemesine ayak arkasından itibaren artan şekilde 75 ile 3500 MPa elastisite modülleri verilmiştir (Köse ve Çebi, 1988).

### 4. SONUÇLAR

Her ne kadar göçük malzemesi kömür damarı üzerindeki yalancı tavan tabakalarından oluşmasına ve aynı malzeme gibi düşünülmesine rağmen, oluşum biçimi veya şekli yönünden farklı bir malzeme olarak ele alınmalıdır. Göçük malzemesinin şekli birince derecede bölgenin jeolojik özelliklerine, yapısına, yalancı tavan tabakalarının zayıflık düzlemlerine ve çatlak sistemlerine bağlıdır. Bu yapısal özellikler, farklı kömür havzaları için değişik karakter gösterirler.

Göçük malzemesinin basınç altındaki deformasyon karakteristiği genel anlamda doğrusal olmayan ilişki şeklindedir. Bahsedilen yapısal özellikler ve göçük malzemesi formu nedeniyle doğrusal olmayan ilişki değişik şekillerde gelişebilmektedir. Nitekim, USBM'ın değişik şekilde kırılmış ve değişik formlarda oluşturulmuş malzeme yığınları üzerindeki yapılan sıkışabilme testlerinde ilişkinin doğrusal olmadığı ve sekant modüllerinin 7 MPa ile 325 MPa arasında değiştiği belirtilmektedir (Peng, 1978).

Genel olarak göçertmeli uzunayak panolarının sayısal yöntemlerle modellenmesinde, göçük malzemesi giriş bilgileri için bir ön çalışma gerektirmektedir. Bunun için şu tespitlerin yapılması başarılı bir modelleme için gereklidir:

- Göçük malzemesi şekli,
- Göçük malzemesi kabarma faktörü,
- Yalancı tavan tabakalarının göçme yüksekliği,
- Göçük malzemesinin davranış karakteristiğidir.

Dikkat edilirse bu maddelerin doğrudan belirlenmesi çok zordur. Bu nedenle yaklaşık olarak tespit edilme zorunluluğu vardır. Çoğu model çalışmalarında kabarma faktörü 1.5 olarak varsayılarak yapılmaktadır. Sabit kabarma faktörüne bağlı olarak da farklı malzeme katsayılarına bağlı göçük malzemesi davranış özellikleri seçilmekte ve sayısal modellere yansıtılmaktadır.

## KAYNAKLAR

Akdaş, H., 1993, *Two Dimensional Elasto-Plastic Finite Element Analysis of Longwall Panels in Coal*, Ph. D Thesis, CSM.  
 Arıoğlu, E. ve Biron C., 1980, *Madenlerde Tahkimat İşleri ve Tasarımı*, Birsan Kitabevi, İstanbul.  
 Duk-Won Park and Andrew E. Saab, 1990, *Simulation of longwall shields and their interaction with surrounding strata using three dimensional finite element modelling*. 8 th. Annual

Workshop, November 5 – 6, Reno, Nevada.  
 Hasenfus, G. J. and Su, D. W. H. 1992, *Comprehensive integrated approach for longwall development design*, Proceedings of the workshop on coal pillar mechanics and design, IC 9315, USBM  
 Köse, H. ve Çebi, Y., 1988, *Kalın kömür damarlarının üretilmesi sırasında oluşan gerilmelerin incelenmesi*, Türkiye 6. Kömür Kong., 23-27 Mayıs, Zonguldak.  
 Kripakov, N. P., Beckett, L. A., Donato, D. A. and Durr, J. S. 1990, *Computer Assisted mine design Procedures for lowwall mining*, RI9172, USBM.  
 Maleki, H. N., 1990, *development of modelling procedures of coal mine stability evaluation*, Rock Mechanics Contributions and Challenges, Proceedings of the 31 st. U.S. Symposium. 18-20 June, CSM, A. A. Balkema, Rotterdam.  
 Peng, S. S., 1978, *Coal Mine Ground Control*, John Wiley & Sons, NewYork.  
 Salamon, M. D. G., 1991, *Displacements and stresses induced by longwall mining in coal*, 7<sup>th</sup>. Int. Cong. On Rock Mech. Aachen, Deutschland.  
 Salamon, M. D. G., 1990, *Mechanism of caving in longwall coal mining*, Rock Mechanics Contributions and Challenges, Proceedings of the 31 st. U.S. Symposium. 18-20 June, CSM, A. A. Balkema, Rotterdam.  
 Salamon, M. D. G., 1989, *Course Notes*, Mining Engineering Dept., CSM.  
 Smart, B. G. D. And Haley, S. M., 1987, *Further deveopments of the roof strata tilt concept for pack design and the establishment of stress development in a caved waste*. Min. Sci. Technology, 5, No 2, 121-130.  
 Trueman, R., 1990, *A Finite element analysis for the establishment of stress development in a coal mine caved waste*, Mining Science and Tehnology, Vol.10, No:3, May 1990.  
 Wilson, A. H., 1981, *Stress and stablity in coal ribsides and pillars*, Conference on Gorund Contol in Mining, West Virg. Univ. July 1981.  
 Whittaker, B. N., 1974, *An Apprasial of strata control practice*, The Mining Engineer, No. 166.



# AÇIK OCAKLARIN MODELLEMESİNDE GOMETRİK BİR YAKLAŞIM

## AN APPROACH TO OPEN PIT GEOMETRICAL MODELLING

A.TURANBOY

Selçuk Üniversitesi Seydişehir Meslek Yüksekokulu Maden Bölümü, KONYA

**ÖZET:** Bu çalışmada, açık ocaklarda genel şev eğrileri ve süreksizlikler, izometrik perspektif yöntem ve matematiksel dönüşümler kullanılarak birarada gösterilmiştir. Öne sürülen yöntemde şev eğrileri ve süreksizlikler bir prizma içinde sunulmaktadır. Elde edilen matematiksel ifadeler, Doğanlı Güney Blok Açık Ocağına uygulanmış, arazi görünüşleri ve sonuçlar arasında benzerlikler sağlanmıştır.

**ABSTRACT:** In this research; general slope splines and discontinuities of the open pit mines were analyzed and showed by using isometric perspective methods and mathematical transformations. In the developed system slope splines and discontinuities were geometrical analysed in a prism. Developed mathematical expressions in this research were used in Doğanlı Güney Blok Open pit mine and was provided similarity between results and field visions.

### 1.GİRİŞ

Açık maden işletmeleri, diğer büyük mühendislik yapıları gibi emniyet ve ekonomik açıdan risk taşımaktadır. Riskin en aza indirilmesi için, küçük ölçekli modeller oluşturulup, işletmeye geçilmeden bu modeller üzerinde çalışma ve analizlerin yapılması işletme koşullarının seçimi ve karar aşamasında önemli katkılarda bulunmaktadır.

Projelendirme ve işletmecilik aşamalarında kullanılan modelleri şu başlıklar altında sıralayabiliriz;

- i) Geometrik modeller,
- ii) Jeostatistiksel modeller,
- iii) Jeomekanik modeller,
- iv) Saha sınırlarının belirlenmesine yönelik modeller.

Bu çalışmada, kaya kütlelerinde açılan açık ocakların geometrileri, içerdikleri süreksizliklerle birlikte lineer yaklaşımla incelenmiştir. Açık maden ocaklarının genel şekilleri ve içerdikleri süreksizlikler üzerinde matematiksel yaklaşımlarda bulunulmuş, izometrik perspektif yöntemleri kullanılarak ocağına ait oluşumlar ve süreksizlikler görüntülenmiştir. Elde edilen matematiksel yaklaşımlar ve yöntemler, Doğanlı Güney Blok Boksit Ocağına seçilen iki kesimine uygulanmıştır.

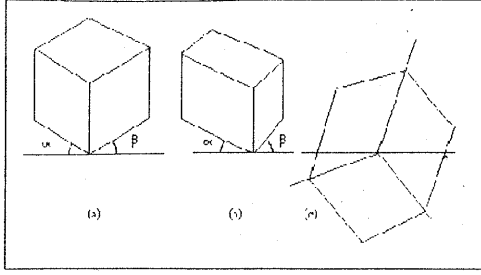
i) Modelleme çalışmaları, Analitik geometri, lineer cebir kuralları, İzometrik perspektif yöntemi

ve bu yöntemin matematiksel açıklaması adımlarından oluşup, ocağın tamamını modellemeye yönelik bir uygulama olup, kaya kütleleri ve içerdikleri süreksizliklerin birarada sunulduğu, Ortogonal model, (Snow, 1965, 1968), Rasgele yüzey modeli, (Priest ve Hudson, 1976), Müşterek düzlemsel çokyüzlü model, (Dershowitz, 1984 ve Young, 1990), Kaya kütle yapısının üç boyutlu geometrik analizi, (Ikegawa, 1992), Opluk projeksiyon yöntemi ile süreksizliklerin incelenmesi, (Gökay, 1993) gibi diğer geometrik modellere benzer bir yaklaşım sağlamayı amaçlamaktadır..

### 2.İZOMETRİK PERSPEKTİF

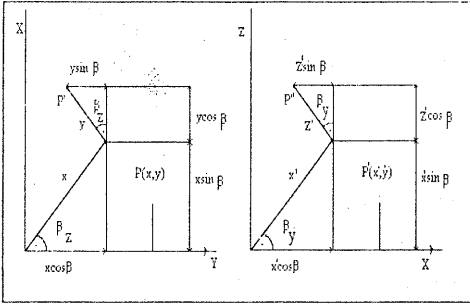
Herhangi bir üç boyutlu objenin iki boyutta, yani kağıt yüzeyine çizilmesi izdüşüm metodları ile yapılabilmektedir. İzdüşüm metodlarıyla objenin görünür yüzlerinin tek bir düzlem üzerinde gösterilme ihtiyacı anlatımda kolaylık sağlama amacıyla ortaya çıkmaktadır.

Objenin üç yüzünün de ayrı ayrı izdüşüm düzlemlerinde cisim izdüşüm düzlemine göre döndürülürse, objeye ait üç yüzeyin, bir izdüşüm düzleminde gösterilmesi mümkün olmaktadır. Bu şekilde elde edilen görüntülere aksonometrik resimler denilmektedir. Objelerin uzaysal konumlarının belli metodlarla gösterilmeleri bu resimlerle yapılabilmektedir. Aksonometrik perspektifler Şekil .1.' de sunulmuştur (Bağcı ve Bağcı, 1979).



Şekil 1. Aksonometrik perspektifler. a) İzometrik perspektif ( $\beta = \alpha$ , üçüncü açı = 0), b) Dimetrik perspektif ( $\beta \neq \alpha$ , üçüncü açı = 0), c) Trimetrik perspektif (üç eksene yapılan açı farklı).

Bunlardan İzometrik (eş ölçülü) izdüşüm yönteminde, örnek olarak alınan küp, OZ ekseninin yönünde  $45^\circ$ , OY ekseninin yönünde  $35^\circ 26'$  döndürülmekte ve izometrik izdüşüm elde edilmektedir. Dönüşümün geometrisi Şekil 2' de verilmiştir (Gasson, 1985).

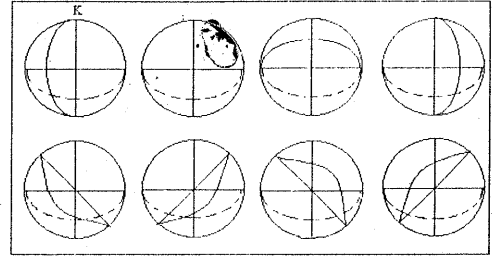


Şekil 2. İzometrik izdüşüm dönüşümünün geometrisi.

### 3. SÜREKSİZLİK KONUMLARININ TANIMLANMASI

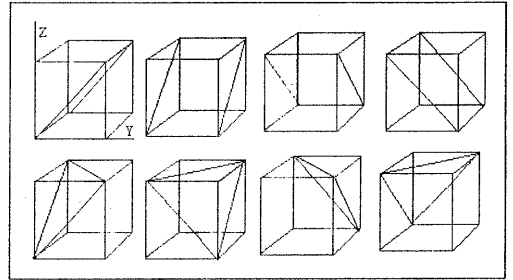
İzometrik görüntü üzerinde, süreksizliklerin de gösterilmesi model üzerinde mümkündür.

Herhangi bir düzlemin uzaysal konumunun, büyük daire gösterimi ve bu düzlemlerin izometrik dönüşüm öncesi referans bir küp içinde gösterimi Şekil 3 ve Şekil 4' de sunulmuştur. Bu gösterim, doğrusal süreksizlik oluşumları için ve şev aynasının Y, Z eksenlerine paralel olması durumuna karşılık gelmektedir. Şev aynasının ve süreksizlik düzleminin sekiz muhtemel konumu için 64 şev-süreksizlik konumu gösterilebilmektedir.



Şekil 3. Düzlemin mümkün uzaysal konumlarının büyük daire gösterimi.

Burada şev aynasını kesikli çizilen, süreksizlik düzlemini, kesiksiz büyük daireler temsil etmektedir. Ayrıca K-G doğrusu X ve D-B doğrusu Y eksenlerine karşılık getirilmektedir.



Şekil 4. Düzlemlerin referans bir küp içinde gösterimi.

Gerçekleştirilen süreksizliklerin modelleme adımları şöyle sıralanabilir,

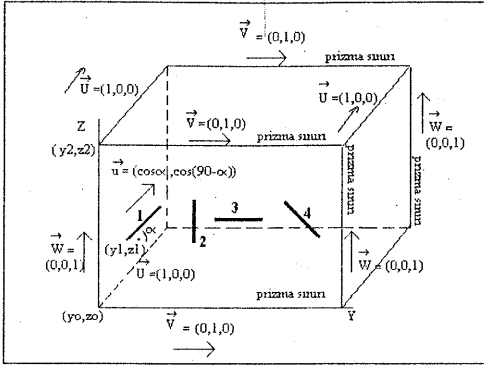
- Süreksizliğin uzaysal konumlarının tanımlanması,
- Süreksizliklerin ilgili koordinatlarının izometrik dönüşüm öncesi Y Z (kağıt düzlemi) düzlemine taşınması,
- Bu düzlemlerin izometrik dönüşümlerinin gerçekleştirilmesi.

Süreksizliğin uzaysal konumlarının tanımlanması için, arazi çalışmaları sonucu elde edilen değerlerden süreksizliğin eğim ve eğim yönü değerleri, şeritmetreyi hangi koordinat değerlerinde kestiği, şeritmetre hattının üstündeki iz uzunluğu kullanılmaktadır.

Süreksizliklerin ilgili koordinatlarının izometrik dönüşüm öncesi Y Z (kağıt düzlemi) düzlemine taşınması, süreksizliğin X eksenindeki değeri süreksizliğin iki boyuta paralel izdüşürülmesi ile

tanımlanmaktadır. Bu düzlemlerin izometrik dönüşümlerinin gerçekleştirilmesi ile süreksizlik modellenmektedir.

Süreksizliğin Y Z düzlemine taşınması ve şeritmetre üstünde kalan iz uzunluklarının şev üst noktasına kadar olanlarının izometrik prizma sınırlarında gösterimi ile anlam kazanacaktır. Yani boyutları izometrik prizma sınırlarında sürekli olduğu tahmin edilen süreksizlikler, izometrik prizma sınırlarına kadar çizgisel olarak modellenmesi, bir şev yüzeyi boyunca tespit edilen genel süreksizlikler için geçerli olacaktır. Şekil 5' de bir şev yüzeyinde mümkün süreksizlik konumlarının izleri, prizma sınırları, bu sınırları oluşturan doğrulara ve süreksizlik izlerine ait doğrultman vektörleri Y Z düzleminde topluca sunulmuştur.



Şekil 5. Bir şev yüzeyinde mümkün süreksizlik konumlarının izleri, prizma sınırları, bu sınırları oluşturan doğrulara ve süreksizlik izlerine ait doğrultman vektörlerin X Y, Y Z, X Z düzlemlerindeki görünümü.

Şekil 5. ' de doğrultman vektörü verilen süreksizliğin alt ve üst prizma sınırlarında tanımlanan doğruları kestiği varsayılın. Prizma üst  $(0, y_2, z_2)$  ve alt  $(0, y_0, z_0)$  sınırlarının parametrik denklemleri;

$$\begin{aligned} X &= 0 & X &= 0 \\ Y &= y_2 & Y &= y_2 \\ Z &= z_0 & Z &= z_2 \end{aligned}$$

olarak yazılabilir. Bu iki doğrunun ve bunlara paralel olan prizma sınırlarının oluşturduğu doğruların doğrultman vektörleri, aynı yönde olduklarından eşittir ve

$$v = (\cos \alpha_x, \cos \alpha_y, \cos \alpha_z) = (\cos 90^\circ, \cos 0^\circ, \cos 90^\circ) = (0, 1, 0)$$

benzer şekilde diğer sınırların doğrultman vektörleri;

$$\vec{u} = (1, 0, 0) \text{ ve } \vec{w} = (0, 0, 1) \text{ olarak yazılabilir.}$$

Y Z düzlemindeki süreksizlik izinin ise, Y ve Z eksenleri ile yaptığı açılardan doğrultman vektörü bulunabilir.

Buradan arazide ölçüm noktasından başlamak üzere süreksizliğin eğim yönü ve eğim değerlerinden faydalanarak yönelimi ve prizma sınırlarını hangi noktalarda kestiği hakkında sonuç elde edilebilir. Süreksizlik izinin başlangıç koordinatları  $(X_1, Y_1, Z_1)$  olarak verilirse, eğim yönü veya doğrultma değerlerinde de faydalanarak, Şekil 5.' de kalın çizgilerle gösterilen süreksizlik izlerinin mümkün yönelimleri Çizelge 1.' de doğrultu ve eğim yönü ve sınırlarında genelleştirilebilir.

Çizelge 1 . Süreksizlik izlerinin mümkün yönelimlerinin doğrultu / eğim yönü.

|                             | Doğrultu                  | Eğim yönü                  |
|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 1 nolu süreksizlik izi için | 90°-180°, 180°-270°, 180° | 180°-270°, 270°-360°, 270° |
| 2 nolu süreksizlik izi için | Tüm yönlerde              |                            |
| 3 nolu süreksizlik izi için |                           |                            |
| 4 nolu süreksizlik izi için |                           |                            |
|                             | 0 - 90°, 270°-360°, 0°    | 0 - 90°, 90°-180°, 90°     |

Buradan görüleceği gibi, Kuzey yönünün, X ( - ) alınması halinde, 1 ve 4 no' lu süreksizlikler eğim yönü veya doğrultu değerlerine göre yönelimleri genelleştirilebilmektedir.

Çizelge 1.' de verilen süreksizlik izi konumları için doğrultman vektörler ise, Çizelge 2.' de sunulmuştur.

Çizelge 2. YZ düzlemi için süreksizlik izi konumları için doğrultman vektörler.

|                              | Doğrultman vektörleri                                   |                                                         |
|------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
|                              | C-D prizma sınırına yönelim                             | A-B prizma sınırına yönelim                             |
| 1. nolu süreksizlik izi için | $(\cos 90^\circ, \cos \alpha, \cos(90^\circ - \alpha))$ | $(\cos 90^\circ, \cos(90^\circ - \alpha), \cos \alpha)$ |
| 2. nolu süreksizlik izi için | $(\cos 90^\circ, \cos 90^\circ, \cos 0^\circ)$          | $(\cos 90^\circ, \cos 90^\circ, \cos 0^\circ)$          |
| 3. nolu süreksizlik izi için | $(\cos 90^\circ, \cos 0^\circ, \cos 90^\circ)$          | $(\cos 90^\circ, \cos 0^\circ, \cos 90^\circ)$          |
| 4. nolu süreksizlik izi için | $(\cos 90^\circ, \cos(90^\circ - \alpha), \cos \alpha)$ | $(\cos 90^\circ, \cos \alpha, \cos(90^\circ - \alpha))$ |

Çizelge 2.' de verilen  $\alpha$  değerleri eğim açısı değerleridir. Süreksizliğin A-B ve C-D prizma

sınırlarını kestiği noktalar ise , süreksizliğin herhangi bir doğruya yönelim yaptığı andaki parametrik eşitliğin ilgili doğrunun parametrik eşitliğe eşit olması ile açıklanabilir. Şöyle ki ; C-D üzerinde doğrusu için,

$$Y \text{ kesim noktası} = Y_1 + Y_1 t = Y_2 + Y_2 \lambda$$

$$Z \text{ kesim noktası} = Z_1 + Z_1 t = Z_2 + Z_2 \lambda$$

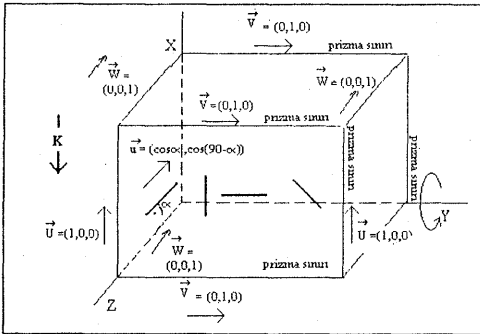
benzer şekilde, A-B noktası için ;

$$Y \text{ kesim noktası} = Y_1 + Y_1 t = Y_0 + Y_0 \lambda$$

$$Z \text{ kesim noktası} = Z_1 + Z_1 t = Z_0 + Z_0 \lambda$$

olarak verilebilir. Burada  $t$  ve  $\lambda$  parametreleri denklemler için katsayılarıdır.

Süreksizlik izlerinin XY düzleminde tanımlanması için ise, doğrultu veya eğim açılarından faydalanılabilmektedir, (Şekil 6).



Şekil 6. X Y düzleminde süreksizlik izlerinin

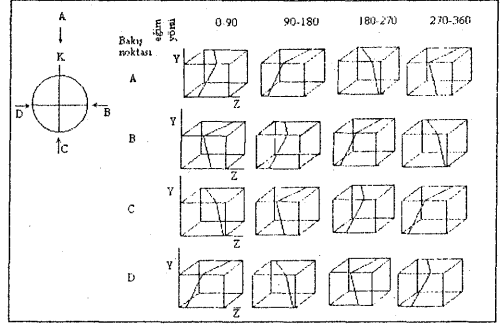
+ X ekseninin kuzey yönü alındığı varsayılımsın. Bu durumda, Z Y düzleminde tanımlanan ilişkilere benzer ilişkiler kullanılabilmektedir, (Çizelge 3).

Çizelge 3. Süreksizlik izlerinin mümkün yönelimlerinin doğrultu ve eğim yönü.

|                             | Doğrultu            | Eğim yönü           |
|-----------------------------|---------------------|---------------------|
| 1 nolu süreksizlik izi için | 0°-90°, 180°-270°   | 90°-180°, 270°-360° |
| 2 nolu süreksizlik izi için | 0, 180°             | 0, 270°             |
| 3 nolu süreksizlik izi için | 90°, 270°           | 180°, 360°          |
| 4 nolu süreksizlik izi için | 90°-180°, 270°-360° | 0°-90°, 180°-270°   |

1 ve 4 no' lu türden süreksizlik içeren kaya kütesinin herhangi bir prizma içinde gösterimi prizmanın kuzeye olan konumu göz önüne alınarak

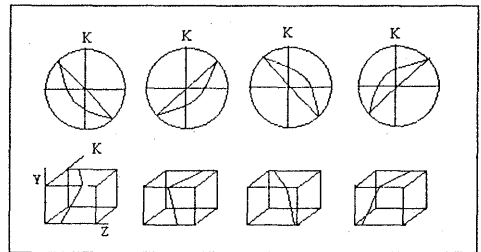
Şekil 7.' de genelleştirilmiştir. Burada süreksizliğin seçilen X, Y, Z eksenlerinden bir tanesine dik diğerlerine belirli bir açı ile yönelimi söz konusudur. Y ve Z eksenleri ile X ve Y eksenlerine dik ve yatay olan süreksizlik izleri (2 ve 3 no' lu) verilmemiştir.



Şekil 7. Kuzeye olan konumuna göre, süreksizlik içeren kaya kütesinin herhangi bir prizma içinde gösterimi.

Şekil 7.' de tanımlanan dört tür süreksizliğin prizma içinde gösteriminin büyük daire gösterim karşılıkları, Kuzey + X eksen yönünde olmak üzere Şekil 8.'de sunulmuştur.

Şekil 8 ve Şekil 9.'den izleneceği gibi, açık ocağın herhangi bir kesiminden kazı yüzeyi ve basamak üstünden elde edilecek süreksizliklerin eğim yönü veya doğrultu değerleri ile Şekil 5 ve Şekil 6.'de görüldüğü gibi Y Z ve X Y düzlemlerinde yönelimleri belirlenebilmektedir.

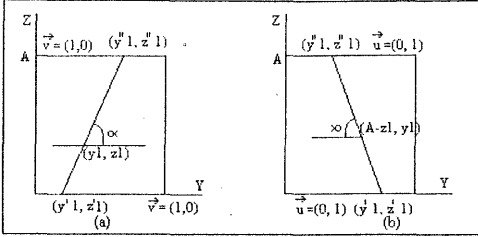


Şekil 8. Süreksizliklerin prizma içinde gösterimlerinin, büyük daire gösterim karşılıkları.

Yönelimi belirlenmiş süreksizliğin de şev tabanında yada Şekil 5 ve Şekil 6.'de verilen prizma sınırlarındaki kesim noktaları, doğrultulan vektörler kullanılarak tespit edilebilmektedir.

Kesim noktaları, kazı yüzeyi veya genelleştirilmiş haliyle süreksizliğin Y Z düzleminde eğim, basamak üstünde veya X Y düzleminde ise, eğim yönü veya doğrultu değerlerinin doğrultman vektör olarak kullanılmasıyla tespit edilip, bu noktaların birleştirilmesiyle süreksizlik iki düzlemde çizgisel olarak tanımlanabilecektir.

Şekil 5. ve Şekil 6.' de tanımlanan 1 ve 4 no' lu süreksizlik izlerinin Y Z düzlemine taşınıp prizma sınırlarındaki kesim noktaları ve ilgili doğrultman vektörler Şekil 9.' de sunulmuştur.



Şekil 9. a) 1, b) 4 no' lu süreksizlik izlerinin Y Z düzlemine taşınıp prizma sınırlarındaki kesim noktaları ve ilgili doğrultman vektörler.

Şekil 9 . a.' ya göre 1 no' lu süreksizlik için prizma kesim noktaları ;

$$y' = y_1 + t \cos \alpha = 0 + 1\lambda$$

$$y'' = y_1 + t \cos \alpha = 0 + 1\lambda$$

$$z' = z_1 + t \cos (90^\circ - \alpha) = 0 + 0\lambda$$

$$z'' = z_1 + t \cos (90^\circ - \alpha) = A + 0\lambda$$

Benzer şekilde, 4 no' lu süreksizlik için prizma kesim noktaları ;

$$z'_1 = (A - z_1) + t \cos (90^\circ - \alpha) = 0 + 0\lambda$$

$$z''_1 = (A - z_1) + t \cos (90^\circ - \alpha) = A + 0\lambda$$

$$y''_1 = y_1 + t \cos \alpha = 0 + 1\lambda$$

$$y'_1 = y_2 + t \cos \alpha = 0 + 1\lambda$$

olarak ifade edilebilir. Bu ifade X Y düzlemi için de benzer şekilde kullanılabilir. Ancak doğrultmak vektörler  $\alpha$  eğim açısı yerine,  $\beta$  eğim yönü açısı kullanılarak hesaplanabilmektedir.

Bu değerlerin izometrik perspektif bölümünde elde edilen;

$$p(y'', z'') = [0.7071(-a + b), 0.40820(a + b + 2c)]$$

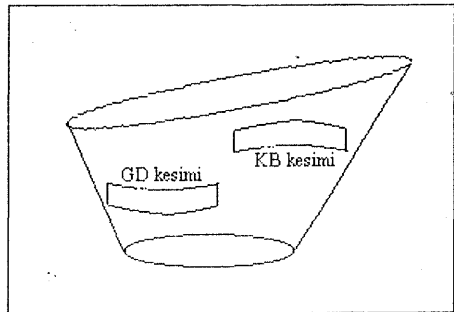
ifadesine göre, izometrik koordinatlarının bulunması ve bu koordinat noktalarının birer doğruyla birleştirilmesi ile süreksizlik, XY ve YZ düzlemlerinde gösterilebilecektir.

#### 4. GELİŞTİRİLEN MODELİN UYGULAMASI

Elde edilen yaklaşım ve matematiksel ifadelerin uygulaması, Doğankuzu Güney Blok Açık Ocağının iki kesimi örneklenerek sunulacaktır. İşlem sırası şu şekilde geliştirilmiştir ;

- Modellenecek kesimlerin oluşturulması,
- Prizma sınırları içinde ocak oluşumlarının izometrik görünümünün oluşturulması,
- Prizma sınırları içinde süreksizliklerin iki boyutlu ve izometrik görüntülerinin oluşturulması,
- Süreksizlikler ve ocak oluşumlarının bir arada gösterimi.

Süreksizlik ölçümlerinin yapıldığı, örneklenecek kesimler öncelikle harita, üzerinde prizma sınırları şeklinde tespit edilmiştir. Bu sınırlar, ocağın yaklaşık GD ve KB kesimlerine karşılık gelmektedir, (Şekil 10). Üçüncü boyuttan görüntülenebilmesi için GD kesiminde 1580 m. KB kesiminde 1550 m. Z ekseninin başlangıç noktası olarak alınmış ve çizim oluşturacak sınır noktaları yeni oluşturulan koordinat sistemine göre konumlandırılmıştır. Prizma sınırları tespit edilirken şeritmetre hatının uzunluğu ve süreksizliklerin ölçüm yükseklikleri dikkate alınmıştır.

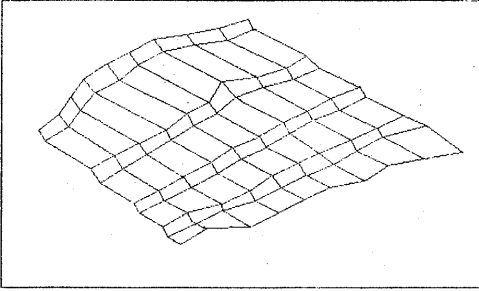


Şekil 10. Modelleme çalışmalarında kullanılan kesimlerin yaklaşık konumları.

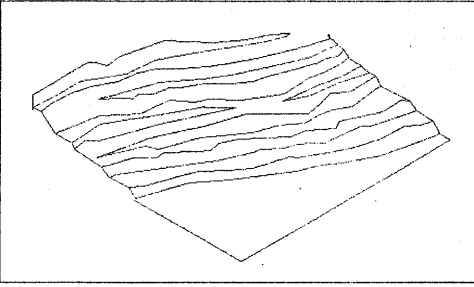
### 3.1. Prizma Sınırları İçinde Ocak Oluşumlarının İzometrik Görünümünün Oluşturulması

Öncelikle topografik haritalar üzerinde, oluşturulan prizma sınırları içerisinde şev eğrilerinin izometrik koordinatları hesaplanmış AutoCAD R14 programında görüntülenmiştir. GD kesimine ait görüntü Şekil 11.'de ve KB kesimine ait görüntüler ölçeksiz olarak Şekil 12.'de sunulmuştur.

GD kesiminde şev eğrileri boyunca her 2 cm. boyunca birim basamaklar oluşturulurken, KB kesiminde, farklı bir sunum olarak, şev eğrileri üzerinde dönüm noktalarının koordinatları tespit edilip, her bir kazı yüzeyi poligon oluşturacak şekilde ayrı ayrı kapatılmış ve bu poligonlar, (kazı yüzeyleri) koyu renkli görüntülenmiştir.



Şekil 11. AutoCAD R14 programında, GD kesimine ait görüntü.



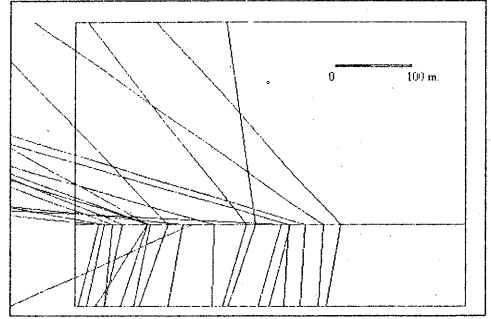
Şekil 12. AutoCAD R14 programında, KB kesimine ait görüntü.

### 3.2. Prizma Sınırları İçinde Süreksizliklerin İki Boyutlu ve İzometrik Görüntülerinin Oluşturulması

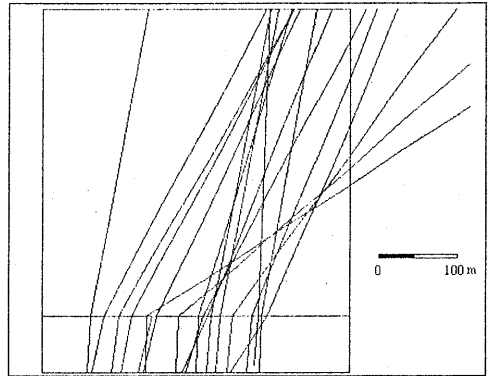
Araziden elde edilen 12 m. (şev üst noktasına kadar izlenebilen) iz uzunluğuna sahip süreksizliklerden, GD kesimi 1650 kademesinde 19, KB kesimi 1640

kademesinde 18 süreksizlik düzlemi seçilmiştir. Eğim ve eğim yönleri belli olan bu süreksizlikler Y Z düzlemine taşınmış ve sınıflandırılmış, Y ekseninde şeritmetreden ölçülen değerleri, X ve Z ekseninde ise, harita üzerinden koordinat değerleri dikkate alınarak her bir süreksizliğin, (x, y, z) konumları belirlenmiştir.

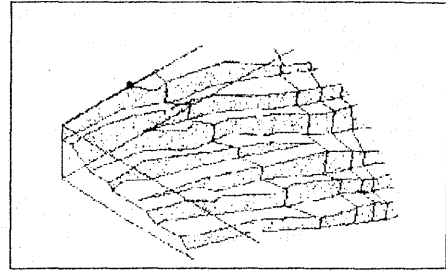
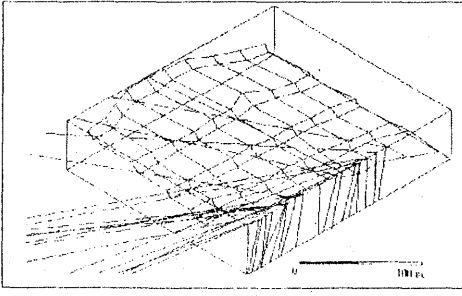
Prizma sınırlarında tespit edilen süreksizlik koordinatların Y Z ve X Y eksenlerindeki iki boyutlu görüntüleri, GD kesimi Şekil 13.'de, KB kesimi Şekil 14.'de sunulmuştur. Aynı kesimler için izometrik dönüşümler yapılarak izometrik görüntüler ise Şekil 15 ve 16' da sunulmuştur.



Şekil 13. GD kesimini iki boyutlu görünümü.

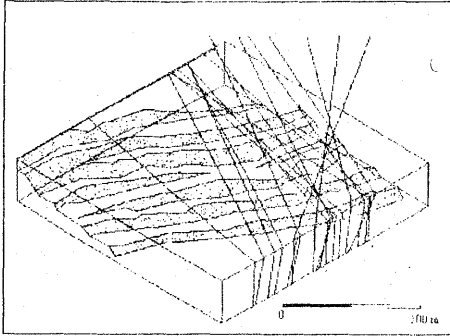


Şekil 14. KB kesimini iki boyutlu görünümü.



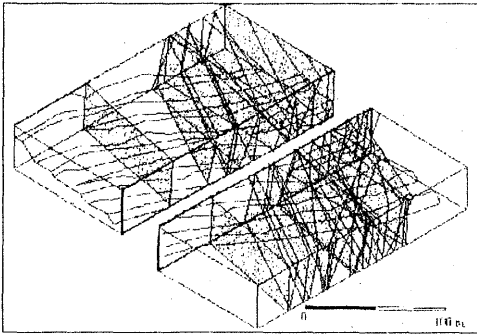
Şekil 15. GD kesiminde şev eğrileri ve süreksizliklerin bir arada gösterimi

Şekil 18. GD kesimindeki bloklaşmalar



Şekil 16. KB kesiminde şev eğrileri ve süreksizliklerin bir arada gösterimi.

Elde edilen bu görüntüler üzerinde benzer hesaplamalar yapılarak kesitler ve şev yüzeylerinde oluşan bloklaşmalarda elde edilebilmektedir. Bununla ilgili olarak Şekil 17'de KB kesimi için alınan bir kesit, Şekil 18'de GD kesimindeki bloklaşmalar sunulmuştur.



Şekil 17. KB kesimi için alınan bir kesit

#### 4. SONUÇ

Öne sürülen yöntem ve modellenen çalışma sahasından elde edilen sonuçların şöyle sıralanabilir. Aralarında şeritmetre ölçüm hatlarının başlangıç noktalarında itibaren yaklaşık dik 600 m. , şev yüzeyi boyunca 650 m. olan modellenen kesimler için ileri sürülen yöntemle oluşturulan görüntüler, hem kazı yüzeyinde gözlenen süreksizlik izleri hem de bu kesimlerdeki içbükeylik, dışbükeylik ve yaklaşık doğrusal hatlar benzerlik göstermektedir.

Süreksizliklerin iz uzunlukları dikkate alınarak gerçekleştirilen bu yöntemle ocağın ilgili kesimlerinde, süreksizliğin ocağın yüksekliği boyunca modellenmesi kinematik analizler için daha anlamlı yaklaşımlarda bulunabilecektir. Bir başka deyişle, süreksizliğin başka bir süreksizlikle kesilmediği veya kazı yüzeyinde yok olduğu durumlar dışında, kazı yüzeyi boyunca izlenebilen süreksizliklerin modellenmesi mümkün büyük çaplı kaymalar hakkında daha sağlıklı tahmin yapılabilmesi mümkün olmaktadır.

$0^{\circ}$  - $360^{\circ}$  arasında karşılıklı ve dik yerleştirilen süreksizlikler birbirlerini tamamlamaktadır. Bu gösterim, ocağın kazı sırasında, özellikle ilk ocak çukurunun açılacağı kesim ve planlanan ilerleme yönlerinde muhtemel süreksizlikler hakkında hızlı ve pratik karar verilebilmesini mümkün kılacaktır.

Hakim süreksizlik setlerinin konumları, kazı yüzeyine paralel olması durumunda en fazla atım kütlesi elde edilebilmektedir. Kazı yüzeyine dik konumlu süreksizlik takımlarının bulunması ise, kazı verimini artırdığı bir çok araştırmacı tarafından ortaya konulmuştur. Buradan yola çıkarak, süreksizlik ve/veya süreksizlik setlerinin, ocağın hangi kesiminde hangi konumda bulunduğu, kazı ve patlatma verimi hakkında önceden fikir edinilmesini sağlamaktadır. Çalışma sonucu elde edilen

matematiksel ifadeler ve görüntüler, bu konuda fikir edinilmesini sağlamaktadır.

Patlatma deliğinin hangi kod veya kodlarda süreksizlikleri keseceği, patlatma deliğinin bu süreksizliklere yaklaşma açısının hangi eğimlerde açılması halinde ne olacağı önceden ifade edilebilecektir.

Öne sürülen yöntemle, açık ocak çukurunun tamamı veya bir kısmı birim basamaklara bölünerek, seçilen bir üç boyutlu koordinat sistemine göre, kesit ve plan görünimleri bir arada gösterilebilmektedir.

İzometrik model iki boyuta indirgenebilmektedir. Ayrıca izometrik katsayıların kullanılmasıyla, geometrik büyüklüklerin gerçek ölçülerde kullanılabilmesi mümkün olmaktadır.

Uygulamada kontrol edilemez faktörler olarak ortaya çıkan süreksizliklerin çeşitli özellikleri ön izlemeye imkan vermektedir.

Modelleme eksenlerinden birisi veya ikisinin ölçüğü artırılarak ilgili ekseninde veya düzlemde tanımlanacak geometrinin detayı sağlanabilir.

Kaya kütlelerinin davranışı üzerinde etkili olan yapısal jeolojik birimler, lineer geometri ilkeleri ile açıklanarak izometrik görüntülerle ortaya konulan modelleme yöntemi, planlama ve işletme aşamalarında kullanılabilecek bir yaklaşım olarak teklif edilmektedir. Öne sürülen yöntem, modeli geliştirilmek için yukarıda sıralanan yapılabilecek çalışmalarıyla, detay analizlerde de kullanılabilecektir.

## KAYNAKLAR

- Bağcı, B. ve Bağcı, C. 1979. *Teknik Resim*, Bağcı Yayınevi, ANKARA
- Dershowitz, W. S. 1984. *Rock Joint System*. Ph.D. Thesis, MIT, Cambridge.
- Gasson, C. P. 1985. *Geometry of Spatial Forms*, Ellis Horwood Limited, West Sussex,
- Gökay, M. K. 1993. *Developing Computer Methodologies for Rock Engineering* Ph.D Thesis, Imp. Coll.Unv.of London, London.
- Ikegawa, Y. 1992. *Tree Dimensional Geometrical Analysis of Rock Mass Structure*. Ph.D Thesis, Imp. Coll.Unv.of London, London.
- Priest, S. D. & Hudson, J. A. 1976. *Discontinuity Spacing in Rock*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 13, pp. 135-148.
- Snow, D. T. 1965. *A Parallel Plate Model of Fractured Permeable Media*, Ph.D.Thesis, Univ. of California, Berkeley
- Snow, D. T. 1968. *Anisotropic Permeability of Fractured Rocks*, *Journal of Soil Mechanics*, Vol. 84, pp.73-91.
- Young, D. S. 1990, *Joint Modelling for Rock Mechanics*, *Mechanics of jointed and Faulted Rock*, Proc. Int. Conf., Vienna, Balkema Publishers pp. 543-550, Rotterdam.

## ELMAS TEL KESME YÖNTEMİNDE AÇI DEĞİŞİMİNE BAĞLI OLARAK KESİLEN ALAN DEĞERLERİNİN BELİRLENMESİ

### DETERMINATION OF CUTTING AREA VALUES DEPENDING ON THE CHANGE IN ANGLE IN DIAMOND WIRE CUTTING METHOD

Y. ÖZÇELİK, S. KULAKSIZ ve A. ÖZGÜVEN

Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü 06532 Beytepe / ANKARA

**ÖZET:** Mermercilikte kullanılan elmas tel kesme yöntemi uygulamalarında optimum çalışma koşullarının belirlenmesi, yöntemin doğru ve ekonomik bir biçimde kullanılabilirliğinin tespiti açısından büyük önem taşımaktadır. Optimallığın araştırılmasında en önemli parametrelerden bir tanesi de elmas telin yatayla yapmış olduğu açının değişimine bağlı olarak kesilen alan değerleridir. Bu çalışmada farklı kayaç türlerinde (mağmatik, kireçtaşı ve hakiki mermer) elmas tel kesme işlemi sırasında (yatay ve düşey kesim) açı değişimine bağlı olarak kesilen alan değerleri belirlenmiştir. Bunun için belirli açı değerlerinde elmas telin kayaç içerisinde aldığı pozisyonlar yatay ve düşey kesim türü için ayrı ayrı belirlenmiştir. Böylece, belirli açı değerlerinin değişiminde ne kadarlık bir alan kesildiği bulunmuştur. Sonuçta elmas telin kısaltma öncesi ve sonrası için açı değerleri ile kümülatif kesilen alan yüzdesi değerleri arasındaki ilişkiler ortaya konulmaya çalışılmıştır. Açı değişimine bağlı kümülatif kesilen alan yüzdesi değerleri incelendiğinde, kesim başlangıcında, ilk açı değerlerinde kesilen alanın az olduğu, daha sonra ise kesilen alan değerlerinde artış gösterdiği belirlenmiştir. Tel kendisine kayaç içerisinde eliptik yörünge oluşturduktan sonra ise, özellikle kısaltma sonrası, açı değişimlerine bağlı kesilen alan ilişkilerinin yaklaşık doğrusal bir yapı gösterdiği tespit edilmiştir. Sonuçta, açı değerleri ile kümülatif kesilen alan yüzdesi ilişkilerinin kayaç türüne bağlı olarak değişmediği, benzer şekilde kesim türüne bağlı olarak (yatay ve düşey kesim) da ilişkilerin yapısını koruduğu belirlenmiştir.

**ABSTRACT:** Determination of the optimum working conditions of diamond wire cutting in marble industry is important for an efficient and economical operation. One of the most important parameter in optimisation of cutting operation is the cutting area value depending on the change of the horizontal angle of diamond wire. In this study, cutting area values were determined depending on the change in angle during diamond wire cutting operation (horizontal and vertical cutting) on different rock types (magmatic, sandstone and origin marble). For this scope, position of diamond wire in rock were determined for both horizontal and vertical cutting types. In this way cutting area value was found during the change of definite angle. Consequently, relationships between the angle values of diamond wire before and after shortening of the wire and cumulative percentage of area of cut has been examined. By examining the cumulative percentage of area of cut due to the change of angle, cutting area has the minimum values in the first angle but after that it was increased. After the formation a cutting profile in the form of an elips, the relationship between the change of cutting and area cut was determined to be increasing linearly. As a conclusion, angle of cutting and the cumulative percentage of the area of cut was not changed with the type of rock cut, and depending on the type of cutting (vertical or horizontal cutting), the relationship was not changed.

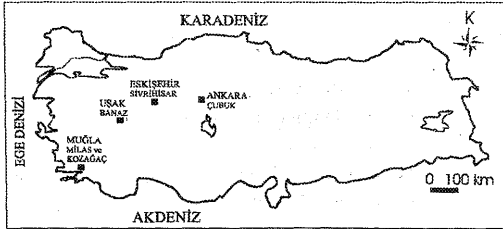
## 1. GİRİŞ

Mermercilikte kullanılan elmas tel kesme yöntemi uygulamalarında optimum çalışma koşullarının belirlenmesi, yöntemin doğru ve ekonomik bir biçimde kullanılabilirliğinin tespiti açısından büyük önem taşımaktadır. Elmas tel kesme makinasının çalışma performansını etkileyecek parametreler aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir (Özçelik, 1999);

- Kesme Açısı
- Açı Değişimine Bağlı Kesilen Alan Değerleri
- Boncuklarda Oluşan Aşınma Miktarları
- Kesme Zamanı
- Kullanılan Tel Uzunluğu
- Makina Pozisyonu
- Kesim Türü (Yatay ve Düşey)

Bugüne kadar elmas tel kesme makinaları üzerine yapılan çalışmalarda, yukarıda belirtilen parametrelerin birbirleriyle ilişkilerini detaylı bir şekilde inceleyen bir araştırma saptanamamıştır (Özçelik, 1999; Özçelik ve Kulaksız, 2000).

Bu çalışmada, üretim ortamında genelde kayaç parametrelerinde değişiklik olmayacağı ve küçük sapmaların ise ana sistemi etkilemeyeceği kabul edilmiş ve farklı kayaç türlerinde (mağmatik, hakiki mermer ve kireçtaşı) elmas tel kesme işlemi sırasında (yatay ve düşey kesim) açı değişimine bağlı olarak kesilen alan değerleri belirlenmiştir. Bunun için belirli açı değerlerinde elmas telin kayaç içerisinde aldığı pozisyonlar yatay ve düşey kesim türü için ayrı ayrı belirlenerek belirli açı değerlerinin değişiminde ne kadarlık bir alan kesildiği tespit edilmiştir. Sonuçta elmas telin kısaltma öncesi ve sonrası için açı değerleri ile kümülatif kesilen alan yüzdesi değerleri arasındaki ilişkiler ortaya konulmaya çalışılmıştır. Yukarıdaki amaca uygun olarak Türkiye'nin değişik bölgelerinde beş farklı ocak seçilmiştir. Buradaki amaç, farklı kayaç türlerinde yapılacak elmas tel kesme işlemlerinde ne tür değişikliklerin oluşacağını tespit edilmesidir. Ocaklar ile ilgili seçimler yapılırken, bugüne kadar Türkiye'de elmas tel kesme makinası ile sert kayaç kesiminde kuvars içerikli tek örnek olan andezit, sert kayaç türü olarak seçilmiştir. Andezitin diğer bir özelliği ise, dünyada hiç bir yerde elmas tel kesme makinasıyla kesilmemesidir. Diğer kayaç türleri ise, kireçtaşı ve hakiki mermer olarak tarif edilen karbonatlı kayaçlar seçilmiştir. Karbonatlı kayaçlar içerisinde ise kristal tane boyutları düşünülerek, farklı kristal boyutuna sahip mermerler üzerinde elmas tel kesme uygulamaları olan üretim ocakları seçilmiştir. Elmas tel kesme uygulamalarının yapıldığı mermer ocaklarının yer bulduru haritası Şekil 1'de verilmiştir. Mermer ocaklarında ölçümler alınırken daha doğru yorumlamalara ulaşabilmek için bazı makina parametrelerinin tüm kesimlerde sabit tutulmasına çalışılmıştır. Araştırmada kullanılan makina ve ekipmanlara ait sabit parametreler Çizelge 1'de verilmektedir.



Şekil 1. Elmas tel kesme uygulamalarının yapıldığı mermerlerin yer bulduru haritası

Çizelge 1. Araştırmada kullanılan makina ve ekipmanlara ait sabit parametreler

| Parametreler               | Sert Kayaç (Andezit)     | Karbonatlı Kayaçlar (Hakiki mermer ve Kireçtaşı) |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------|
| 1 Metredeki Boncuk Sayısı: | 37 Adet                  | 33 Adet                                          |
| Kullanılan Makina Gücü:    | 37.3 KW                  | 37.3 KW                                          |
| Makina Hızı:               | 750 rpm                  | 850 rpm                                          |
| Voltaj:                    | 380 Volt                 | 380 Volt                                         |
| Gerdirme Amperajı:         | 25 Amper                 | 35 Amper                                         |
| Geri Çekme Basıncı:        | 35.21 kg/cm <sup>2</sup> | 31.69 kg/cm <sup>2</sup>                         |
| Kasnak Çapı:               | 80 cm                    | 80 cm                                            |
| Delinen Delik Çapı:        | 90 mm                    | 90 mm                                            |

Bunların sabit tutulma nedenleri ise;

- ❖ Elmas tel kesme makinasının imalatından kaynaklanan nedenler,
- ❖ Çalışma esnasında elmas tel kesme makinasının üzerinde, çalışma esnasında değişiklik yapılmasına müsaade edilmemesi.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Arazi çalışmalarında verilerin alınmasında aşağıda belirtilen yöntem izlenmiştir. Bu yöntem ile ilgili şematik görünüm Şekil 2'de verilmiştir;

1. Kesim öncesi yapılacak ölçümler; blok boyutlarının tespiti, kullanılan tel uzunluğu, makinanın kesimi gerçekleştirilen kayaktan uzaklığı, deliklerden ve makinanın kasnağından geçirilen elmas telin yatayla yapmış olduğu açının belirlenmesi. Elmas telin yatayla yapmış olduğu açının kesim sırasında değişiminin belirlenmesinde ölçüm güvenilirliğini arttırmak amacıyla düzeçli büyük açı ölçer kullanılmıştır. Makinanın kesilecek bloktan olan yatay mesafesi ve tel kayaç içerisindeki pozisyonunun belirlenmesinde etkin olan diğer uzunluklar ise şeritmetre ile tespit edilmiştir.
2. Belirli bir kesim işleminin yapılması ve daha sonra makinanın durdurularak; makinanın kayaktan yeni uzaklığının, telin yatayla yapmış olduğu yeni açının tespit edilmesi. Bununla birlikte, belirli bir kesim işleminden sonra, telin blok içerisinde almış olduğu yeni pozisyonun

belirlenmesi amacıyla, Şekil 2'de gösterilen ölçüm sistemindeki her bir noktada (A, B, C, D, E, F, G) veriler alınmıştır. Ölçüm sistemindeki noktalar arası mesafe genel olarak blok boyutuna bağlı olarak eşit aralıklı alınmıştır. Ölçümlerde kısa mesafelerin ölçümlerinde şerit metre, şerit metrenin yetersiz kaldığı yerlerde ise 8 milimetre kalınlığında ince inşaat demiri kullanılmıştır. İnşaat demiri kesilen kısım içerisine uzatılarak demirin elmas tele temas noktasında yüzeydeki kısım işaretlenmiş ve demir dışarı alınarak mesafe şerit metre ile ölçülmüştür.

3. Farklı zamanlarda makinanın durdurulması ve 2. Aşamadaki işlemlerin tekrar edilmesi.
4. Elmas tel kesme makinasının üzerinde hareket ettiği rayın sonuna gelindiğinde makinanın durdurulması ve 2. Aşamadaki işlemlerin tekrar edilmesi. Daha sonra telin kısaltılarak makinanın öne alınması ve tel uzunluğunun, makinanın kayaçtan uzaklığının, elmas telin yatayla yapmış olduğu açının belirlenmesi.
5. Kesim bitene kadar 2. Aşamadaki işlemlerin farklı zamanlarda tekrar edilmesi ve kesim bittiğinde son durumların kaydedilmesi (Eğer gerekiyorsa ikinci tel kısaltma işleminin uygulanması ve 4. Aşamadan tekrarı).

Yukarıda belirtilen amaç doğrultusunda ve yöntemle ocak üretim birimlerinde yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen kesme uygulamalarına ait sonuçlar değerlendirilmiş ve aşağıda belirtilen veri gruplarına ulaşılmıştır;

Ocak üretim birimlerindeki kesime ilişkin detay çalışmalar kullanılarak kesim işlemine ait her bir durum, yani telin her bir kesim çalışmasında blok içerisinde aldığı pozisyonlar, ayrı ayrı milimetrik kağıt üzerine ölçekli olarak çizilmiştir. Böylece, her bir kesim işleminde elmas telin yörüngesinin kayaç içerisinde açığı değişimine bağlı olarak aldığı pozisyon şekilleri elde edilmiştir. Bununla ilgili bir örnek ise Şekil 3'de verilmiştir. Burada, kesim çalışmaları sırasında, telin yörüngesinin aldığı pozisyonlara ilişkin olarak ocak üretim birimlerinden elde edilen sonuçlar kullanılmıştır. Bununla birlikte, çizimlerde, telin dönüm noktalarında ölçüm alınamayan kısımlarının tahmininde, ocaklarda kayaçların elmas tele kesimi sırasında elmas telin kayacın kesim yüzeylerinde bırakmış olduğu izler baz alınmıştır. Milimetrik kağıt üzerinde yapılan çalışmalarda, telin her bir açığı değerinde mermer blok içerisinde aldığı pozisyona ait kesilen alan değerleri belirlenmiştir. Buradan gidilerek, kesilen alanların alt alta toplanmasıyla

kümülatif kesilen alan değerine ve bu kümülatif kesilen alanların toplam kesilen alan içerisindeki yüzdesinin alınmasıyla da kümülatif kesilen alan yüzdesi değerine ulaşılmıştır. Bu çalışmalar, farklı kesim incelemeleri ve bunların kendi içlerindeki durumlarını yani açılal pozisyonlarını kapsamaktadır.

Yukarıdan elde edilen veriler kesim sırasında makinanın ray sonuna geldiğinde telin kısaltılması öncesi ve sonrasını yansıtacak şekilde ayrı ayrı düzenlenmiştir. Düzenlenen bu veri grupları yapılan tüm kesim işlemlerinde yatay ve düşey kesim olarak ayrı ayrı kaydedilmiştir.

### 3. VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Elmas tel kesme makinalarıyla beş farklı ocakta yapılan elmas tel kesme çalışmalarında kümülatif kesilen alan yüzdesinin açığı değişimine bağlı olarak nasıl değiştiğinin belirlenmesi amacıyla elde edilen grafikler Şekil 4-a ve b ve Şekil 5-a ve b'de düşey ve yatay kesim türleri için ayrı ayrı verilmiştir. Şekil 4-a ve b ve Şekil 5-a ve b'de verilen grafikler yine telin kısaltılması öncesi ve sonrasını ayrı ayrı yansıtmaktadır.

Açığı değişimine bağlı kümülatif kesilen alan yüzdesi değerlerinin değişimine bakıldığında, kesim başlangıcında, ilk açığı değerlerinde kesilen alanın az olduğu, daha sonra ise kesilen alan değerlerinde artış gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 4-a ve b ve Şekil 5-a ve b). Bunun nedeni ise, kesim başlangıcında blok köşelerinin kesilmesinden dolayı, açığı değişimi daha kısa sürede olması ve açığı değişimi için daha az alan kesilmesidir. Tel kendisine kayaç içerisinde eliptik yörünge oluşturduktan sonra ise, özellikle kısaltma sonrası, açığı değişimlerine bağlı kesilen alan ilişkilerinin yaklaşık doğrusal bir yapı gösterdiği tespit edilmiştir.

Bununla birlikte, Şekil 4-a ve b ve Şekil 5-a ve b incelendiğinde, açığı değerleri ile kümülatif kesilen alan yüzdesi ilişkilerinin kayaç türüne bağlı olarak değişmediği, benzer şekilde kesim türüne bağlı olarak (yatay ve düşey kesim) da ilişkilerin yapısını koruduğu belirlenmiştir.

Elde edilen bu sonuçlar, daha önce belirtilen açığı ve zaman değerlerinde tel kısaltma işleminin gerçekleştirilmesinin homojen kesme işlemini sağladığı ve açığı değişimine bağlı olarak kesilen alan değerlerinin düzenli olduğunu göstermektedir. Bu nedenle mutlaka Çizelge 2'de belirtilen açığı değerlerinin altında kesme işleminin gerçekleştirilmemesi ve telin kısaltılması gerekmektedir.

Çizelge 2. Mermer ocak üretim birimlerinde yapılan elmas tel kesme uygulamalarında optimum tel kısaltma noktaları

| İnceleme Alanları    | Düşey Kesim Tel Kısaltma Noktaları |                  | Yatay Kesim Tel Kısaltma Noktaları |                |
|----------------------|------------------------------------|------------------|------------------------------------|----------------|
|                      | Açı* (Derece)                      | K.K.A.** Yüzdesi | Açı (Derece)                       | K.K.A. Yüzdesi |
| Çubuk9               | 25                                 | 46               | 15                                 | 32             |
| Çubuk10              | 25                                 | ~50              | 20                                 | 65             |
| Uşak Beyaz           | 18                                 | 50               | 23                                 | 36             |
| Milas Leylak         | 21                                 | 48               | 25                                 | 46             |
| Kozağaç Beyaz        | 18                                 | 46               | 18                                 | 52             |
| Sivrihisar Kireçtaşı | 23                                 | 47               | 23                                 | 50             |

\* : Elmas telin yatayla yapmış olduğu açı

\*\* : Kümülatif Kesilen Alan

#### 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

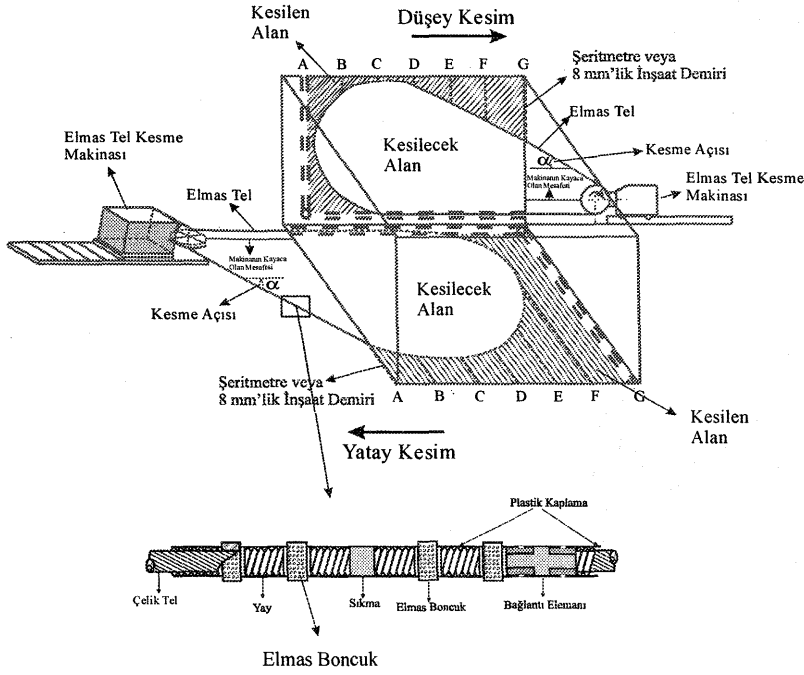
Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre elmas tel kesme (E.T.K.) makinasında kesme işleminde yapılacak işlemler şu şekilde sıralanabilmektedir;

1. Elmas telin yatayla yapmış olduğu açı değerinin sürekli yüksek tutulması gerekmektedir. Bu ise, kayaç ile elmas tel arasındaki etkileşimin fazla olmasını, dolayısıyla, kesme işleminin daha iyi olmasını sağlayacaktır.

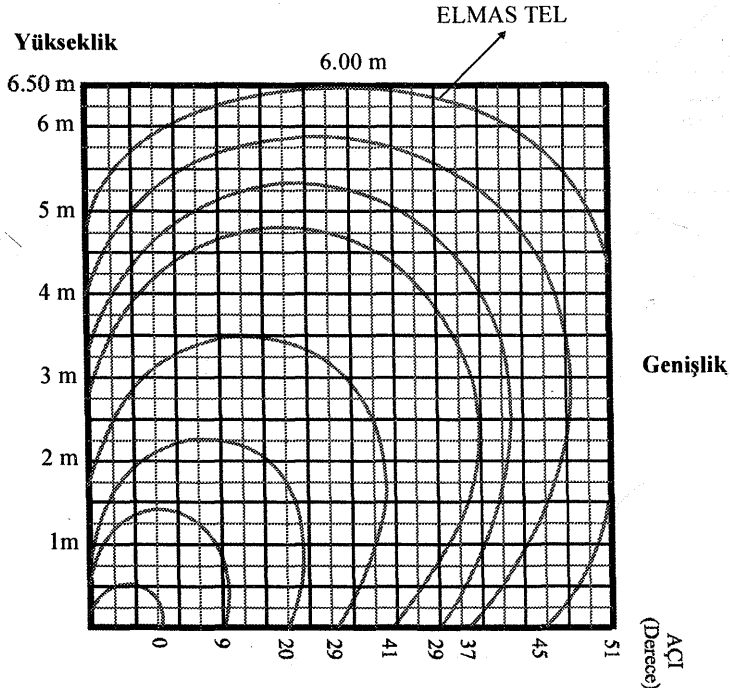
2. Elmas tel kesme makinası ile kesme işlemi devam ederken kayaç ve kesim türüne (yatay ve düşey kesim) bakılmaksızın 15°-25° derecelik açı değerleri arasına gelindiğinde makinanın durdurularak telin mutlaka kısaltılması ve kesim işlemine ondan sonra devam edilmesi ve veya telin yatayla yapmış olduğu açının bu değerlerin üzerinde tutulması gerekmektedir.
3. Eğer mümkünse, gerekli açı yükseltme işleminin makara sistemleri ile yapılması ve açının sürekli 25° derecenin üstünde olması tavsiye edilmektedir (Özçelik, 1999). Uygulamada bu durum, tel ekseninin sürekli doğrusal bir hareket ile blok içinde ilerlemesini sağlayacaktır. Makara sistemlerinin telin kısaltılması konumuna gelindiğinde devreye sokulması gerekmektedir. Ayrıca telin kısaltılması ve makinanın öne çekilmesi için harcanacak zamanın da üretime aktarılabilmesi, yani blok üretim zamanının kısalması sağlanacaktır.

#### KAYNAKLAR

- Özçelik, Y., 1999, *Mermencilikte Elmas Tel Kesme Makinalarının Çalışma Koşullarının İncelenmesi*, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 242 s. (Yayınlanmamış).
- Özçelik, Y., ve Kulaksız, S., 2000, *Investigation of the Relationship Between Cutting Angles and Wearing on Beads in Diamond Wire Cutting Method*, 9<sup>th</sup> International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, Greece, (Baskıda).



Şekil 2. Ocak üretim birimlerinde yapılan çalışmalarda kullanılan ölçüm sisteminin şematik görünümü



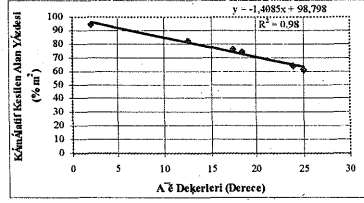
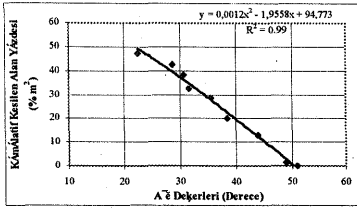
Şekil 3. İLİK Mermer A.Ş. 'ye ait Sivrihisar kireçtaşı mermer ocağında yatay kesim uygulamasına ait elmas telin yörüngesinin kayaç içerisinde açı değişimine bağlı olarak aldığı pozisyonların gösterimi

## Kısaltma Öncesi

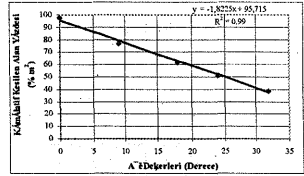
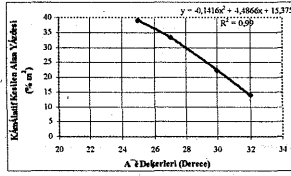
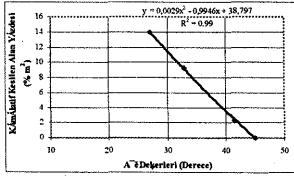
Ölçüm Yok

## Kısaltma Sonrası

### Çubuk8 Sonuçları



### Çubuk9 Sonuçları

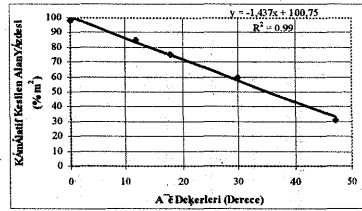
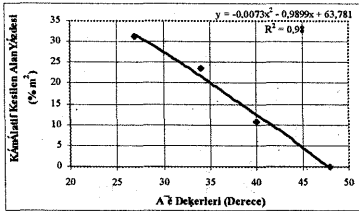


### Kısaltma Öncesi

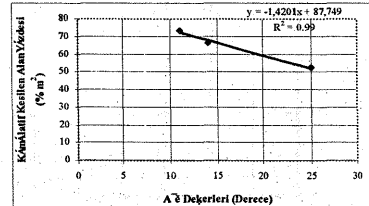
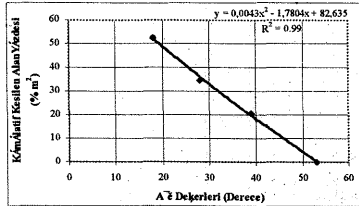
### 1. Kısaltma

### 2. Kısaltma Sonrası

### Çubuk10 Sonuçları



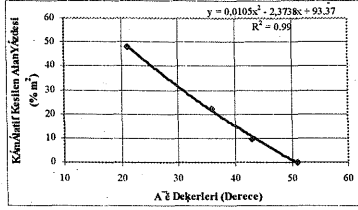
### Uşak beyaz 2. kesim sonuçları



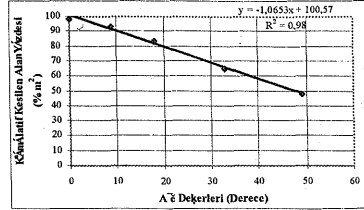
### Uşak beyaz 3. kesim sonuçları

Şekil 4-a. Beş farklı ocakta yapılan elmas tel kesme çalışmalarında düşey kesimlere ait açı değerleri-kümülatif kesilen alan yüzdesi ilişkilerinin elmas telin kısaltma öncesi ve sonrası gösterimi

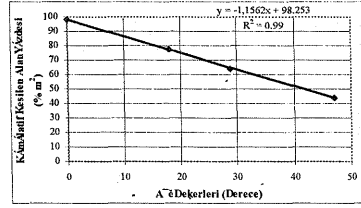
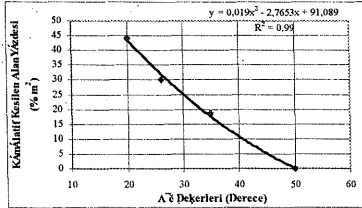
### Kısaltma Öncesi



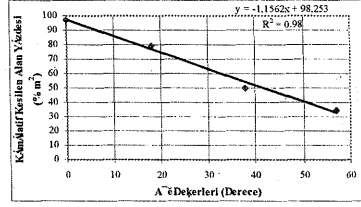
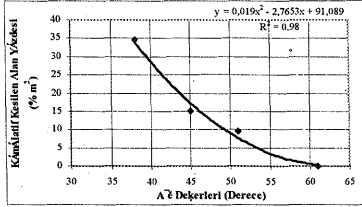
### Kısaltma Sonrası



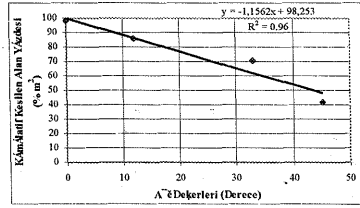
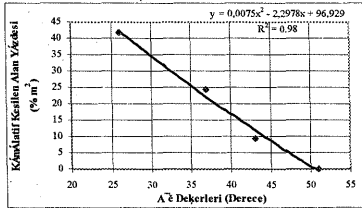
### Milas leylak 1 kesim sonuçları



### Kozağaç beyaz 1 kesim sonuçları



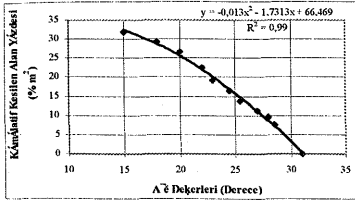
### Sivrihisar kireçtaşı 1 kesim sonuçları



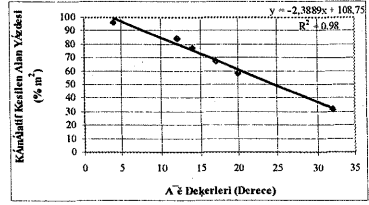
### Sivrihisar kireçtaşı 2 kesim sonuçları

Şekil 4-b. Beş farklı ocakta yapılan elmas tel kesme çalışmalarında düşey kesimlere ait açı değerleri-kümülatif kesilen alan yüzdesi ilişkilerinin elmas telin kısaltma öncesi ve sonrası gösterimi

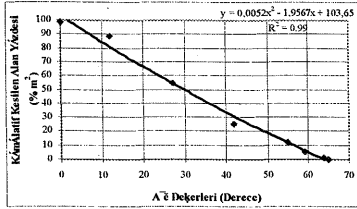
### Kısaltma Öncesi



### Kısaltma Sonrası

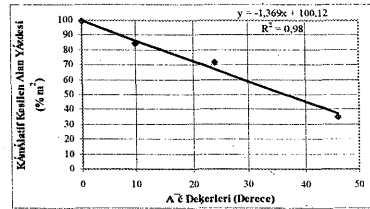
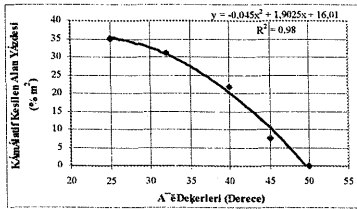


### Çubuk9 sonuçları

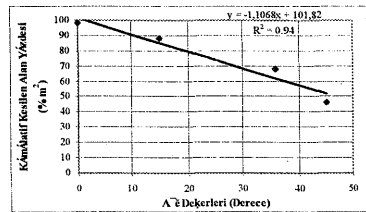
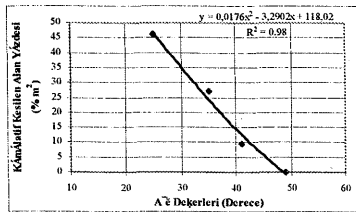


### Kısaltma Yok

### Çubuk10 sonuçları



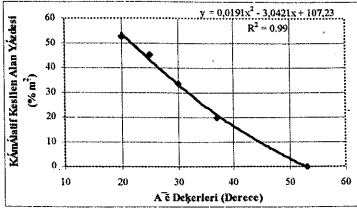
### Uşak beyaz 1. kesim sonuçları



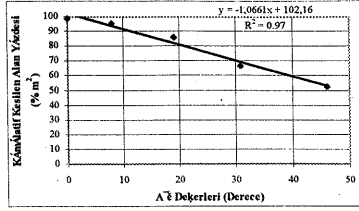
### Milas leylak 2. kesim sonuçları

Şekil 5-a. Beş farklı ocakta yapılan elmas tel kesme çalışmalarında yatay kesimlere ait açı değerleri-kümülatif kesilen alan yüzdesi ilişkilerinin elmas telin kısaltma öncesi ve sonrası gösterimi

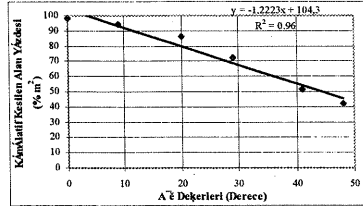
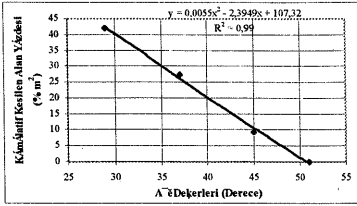
### Kısaltma Öncesi



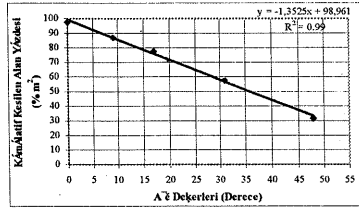
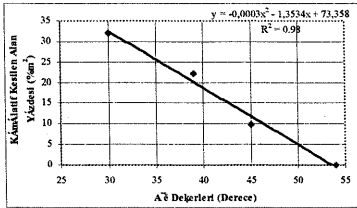
### Kısaltma Sonrası



### Kozağaç beyaz.2. kesim sonuçları

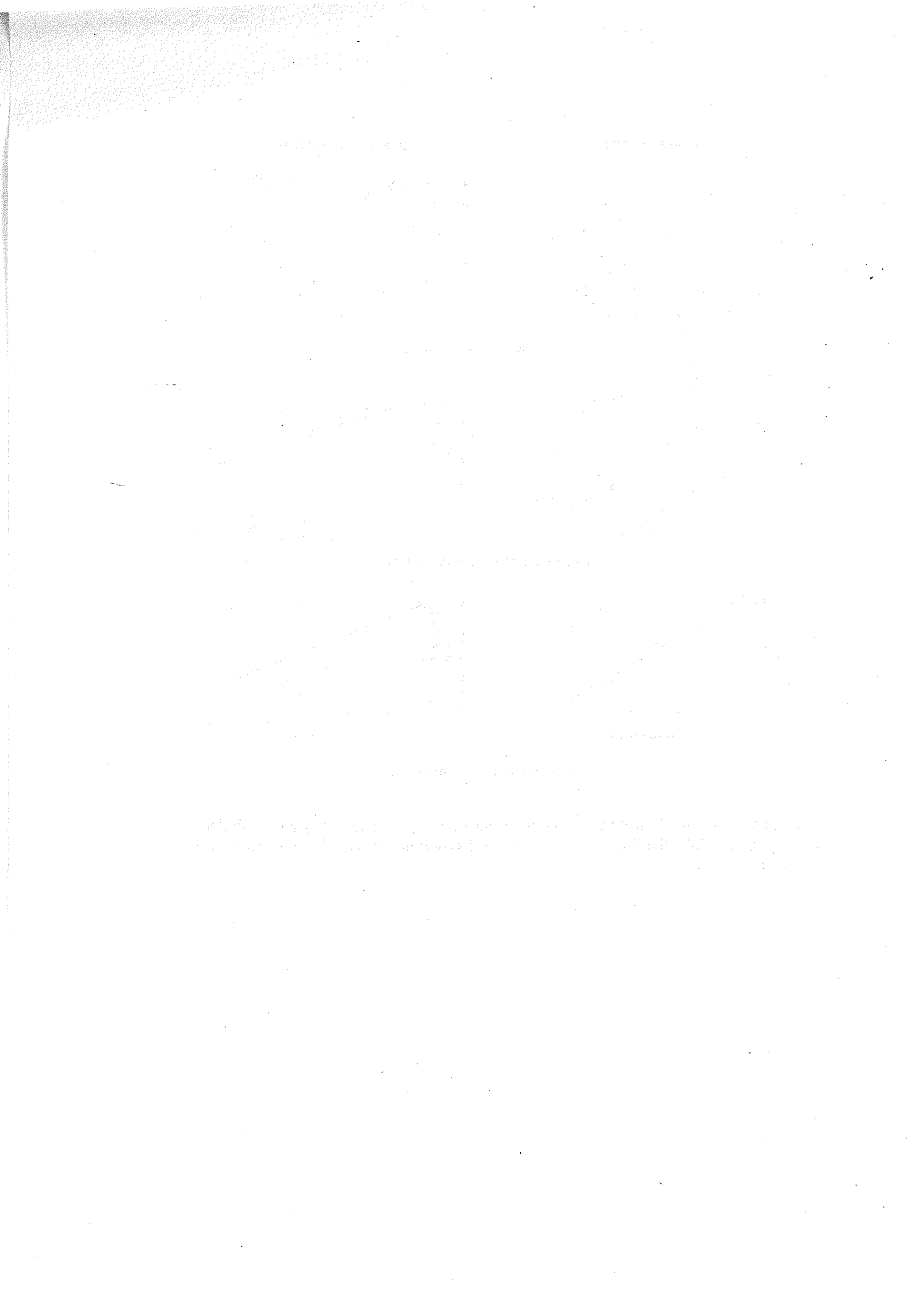


### Sivrihisar kireçtaşı 3 kesim sonuçları



### Sivrihisar kireçtaşı 4 kesim sonuçları

Şekil 5-b. Beş farklı ocakta yapılan elmas tel kesme çalışmalarında yatay kesimlere ait açı değerleri-kümülatif kesilen alan yüzdesi ilişkilerinin elmas telin kısaltma öncesi ve sonrası gösterimi



## POMZADAN MAMUL BLOK ELEMANLARINDA KAYAÇ PARAMETRELERİ - SES AKUSTİĞİ İLİŞKİSİ ÜZERİNE TEKNİK BİR ANALİZ

### A TECHNICAL ANALYSIS ON THE RELATIONSHIP BETWEEN THE ROCK PARAMETERS AND THE SOUND ACOUSTICS FOR THE PUMICE BLOCKS

L. GÜNDÜZ, İ. UĞUR

SDÜ Maden Mühendisliği Bölümü, ISPARTA

**ÖZET:** Yapı akustikliği ve ses yalıtımı, günümüz modern yapılarında önemli bir konu olmuştur. Yapılarda ses yalıtımını sağlayan başlıca etmen, kullanılan yapı malzemesi ve malzemenin ses akustik özelliğidir. İnşaat sektöründeki uygulamalarda hafif malzeme kullanımının giderek yaygınlaşması sebebiyle, pomza taşının hafif yapı malzemesi olarak kullanımı popüler bir hale gelmiştir. Bu makalede, pomzadan mamul duvar blok elemanlarının, kaya mekanikliği açısından irdelemeleri yapılarak, tekno-mekanik özellikleri ile ses yalıtımı özelliği arasındaki ilişkiler araştırılarak, detay proje çalışmaları sunulmuştur.

**ABSTRACT:** Building acoustics and sound insulation have been a very important subject in modern civil engineering structures nowadays. The basic important factor for sound insulation in buildings is the construction material used and its sound acoustics properties. Increasing utilisation of lightweight materials in civil structuring application is making pumice stone a very popular raw material as a lightweight rock. In this paper, the investigation of the pumice blocks made as a construction material was presented in the rock mechanics aspects. The relationship between the techno-mechanical properties and the sound insulation properties of the blocks were also analysed and the detailed research findings were presented.

#### 1. GİRİŞ

Pomzadan mamul hafif yapı elemanlarının üretimi ve uygulanan proses teknolojileri günümüzde giderek artan bir trend ile gelişmektedir. Uygulanan proseslerde elde edilen farklı tip ve geometrik şekillere sahip olan pomzalı blok ürünleri, bugün inşaat sektöründe farklı amaçlarla kullanılmaktadır. Gerek düşük birim hacim ağırlık değeri ve gerekse yüksek gözenekliliği itibarıyla, değişik tarz ürünlerin geliştirilmesine imkan sağlayan pomza oluşumları, bulunuş yerine ve orijinine göre farklı karakteristiklikler sergilemektedirler. Ancak, bu doğal volkanik kayaçtan çimento ile soğuk bağlı olarak elde edilen blok ürünlerinde, yüksek dayanımın arzu edilmesinin yanı sıra, akustik konfor da aranan başlıca özellikler arasında yer almaktadır. Pomzadan elde edilen hafif blok elemanlarında, ürünün akustik konfor parametresi olarak tanımlanabilen malzemenin ses yutuculuk değerine, malzeme ve üretim prosesine bağımlı bir çok değişken parametre etki etmektedir. Konu üzerine SDÜ Pomza Teknolojisi Laboratuvarında, geliştirilen ses akustikliği ölçüm düzeneği ile model pomza bloklar üzerinde akustik ses ölçüm analizleri yapılarak, pomzalı blok elemanlarının akustik konforunun irdelenmesi amacıyla, blok elemanının kayaç

parametreleri ile akustik yalıtım değerleri arasında algoritmik yaklaşımlar araştırılmış ve pratik olarak kullanılabilecek ampirik eşitlikler geliştirilmiştir. Bu makalede, blok elemanına ait basınç dayanımı, yoğunluk, elastisite modülü ve elastisite özelliklerine bağımlı ses akustikliği ile ilgili parametrik yaklaşımlar geliştirilmiş olup, matematiksel modellemeleri detay olarak verilmiştir.

#### 2. SES ETKİSİ - AKUSTİK KONFOR

Titreşim yapan cisimlerin denge durumundaki atmosfer basıncında oluşturdıkları, bu titreşimlerle uyumlu basınç değişikliği olarak tanımlanan ses, istenmediği durumlarda gürültü olarak belirtilmektedir. Diğer bir deyişle, düzensiz yapı ve farklı frekans bileşenlerine sahip olan ve genellikle zamana göre değişken sesler topluluğuna gürültü adı verilmektedir. Gürültü, insan sağlığı ve konforu üzerinde her biri ayrı uzmanlık alanlarında incelenmekte olan fiziksel, fizyolojik, psikolojik ve iş performansı yönlerinden ciddi olumsuz etkilenmeler yaratmaktadır. Bu nedenlerle, özellikle dış çevrede yaygın ses kaynaklarından ortaya çıkan gürültüler, artık çevre sorunu olarak ele alınmakta ve diğer çevre kirlilik türleri ile birlikte çevresel etki

değerlendirmeleri kapsamında incelenmektedir. Günümüzde gürültü sorunu, toplum yaşantısı ve teknikte görülen son gelişmeler ve aşırı şehirleşmeler sonucu, giderek büyük bir önem kazanmaktadır. Öte yandan, yapıların içinde de insanları etkileyen, başta mekanik ve elektronik sistemlerin gürültüleri olmak üzere insan eylemlerinden doğan çeşitli aşırı sesler, yapı içinde de gürültü kontrol konusunu zorunlu hale getirmektedir. Genel olarak ses kaynağından çıkan seslerin insan sağlığı ve konforu açısından kabul edilebilecek sınırlara indirgenmesi, etki süresinin azaltılması, akustik niteliği değiştirilerek yok edilmesi veya kabul edilebilecek bir ses ile maskelenmesi gibi pasif ve aktif yöntemlerle sakıncalı etkilerinin yok edilmesi, gürültü kontrolü ile sağlanabilmektedir. Yapı elemanlarında önlem alınması süreci, kimi zaman tek başına yeterli olmasa da sistemin bir parçasını oluşturmaktadır. Ancak yalıtımın doğru yapılması, gerek elde edilecek performans açısından, gerekse ekonomik yönlerden büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle yapı elemanları ve malzeme karakteristiği açısından sese karşı davranışlarının iyi bilinmesi gerekir (Huntington 1988)

Ses, gerilme dalgası halinde yayılır ve rastladığı cisme basınç dalgası olarak etkir. Gerilme dalgasının enerjisi sesin şiddetini, frekansı da tonunu belirler. Ses enerjisi çok küçüktür ve uygulamada *desibel* (dB) olarak adlandırılan bir birimle ölçülür. İnsan kulağının işitebileceği en zayıf sesin enerjisi  $E_0=10^{-16}$  watt/cm<sup>2</sup> dir. Bir cismin birim alanına gelen sesin enerjisi  $E$  (watt/cm<sup>2</sup>) ise, o ses dalgasının bağıl şiddeti şu bağıntı ile tanımlanır ve desibel olarak boyutlandırılır: (Everest, 1994)

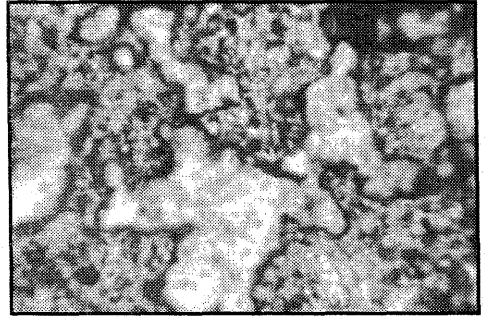
$$\beta = 10 \log_{10} \frac{E}{E_0} \quad [1]$$

Uygulayıcılar arasında, ses yalıtımı kavramı yaygın biçimde kullanılmakla birlikte, gerçekte ses şiddetine maruz kalan malzemelerin sese karşı davranışlarının bir bütün olarak incelendiği durumlarda; 'elemanın ses geçirimsizliği' veya 'ses geçiş kaybı' sözcükleri kullanılmaktadır (Knudsen ve Harris, 1988). Yalıtım kavramı kimi zamanda genel olarak gürültü kontrolü anlamında da kullanılmaktadır.

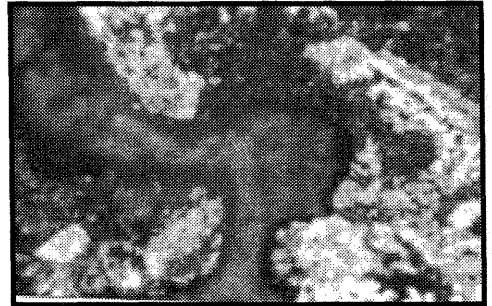
### 3. POMZA VE SES AKUSTİĞİ

Pomza, volkanizma faaliyetleri esnasında ani soğuma ve gazların bünyeyi terk etmesi sonucu

oldukça gözenekli bir yapı içeren ve dünya endüstrisinde yeni olmamakla beraber, ülkemiz endüstrisine son yıllarda girmeye başlamış ve değeri yeni anlaşılan volkanik kökenli bir kayadır. Pomza, kendisine özgü bazı özellikleri ile benzer volkanik camı kayaçlardan (perlit, obsidyen, peks-tayn) ayrılır. Bunlardan rengi, gözenekliliği ve kristal suyunun olmaması gibi özellikler sayılabilir. En çok renk benzerliği/yakınlığı ve kimyasal bileşimi bakımından perlit ile karıştırılmakta olup, bazı durumlarda perlitten ayırt edilmesi zorlaşabilmektedir. Pomzalı perlit/pomzatik perlit veya perlitik pomza olarak adlandırılabilen geçişli kayaçlarla petrografik analiz ve gözenek yapısı itibarıyla ayrılabilir. Pomzada gözenekler çoğunlukla birbirleriyle bağlantılı değildir. İçerdiği gözenekler gözle görülebilecek boyutlardan, mikroskobik boyutlara kadar sayısız miktarda olup, her biri diğerinden camı bir zarla yalıtılmıştır. Bu yüzden hafif, suda uzun süre yüzeabilen, izolasyon özelliği yüksek bir kayadır. Pomza taşının gözenek yapısına ilişkin tipik strüktürel formu Şekil 1 ve Şekil 2'de verilmiştir (Gündüz ve Uğur, 1998).

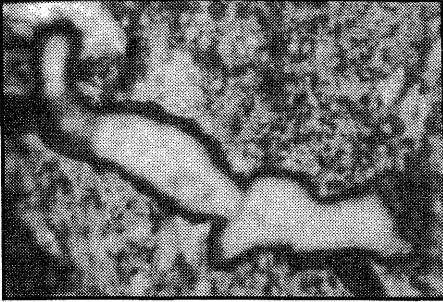


Şekil 1. Pomzanın strüktür yapıda gözenek yapısı



Şekil 2. Pomzanın strüktür yapıda gözenek yapısı .

Şekil 1 ve Şekil 2 incelendiğinde, açıkça görülmektedir ki, strüktür yapıda bulunan gözenekler, matriks yapıda yer alan bileşenler ile sınırları çok iyi belirlenmiş bir durumda olup, gözenek cidarları ikincil kuvars kristalleşmeleri ile camı görünümünde bir zarla çevrelenmiştir. Bu olgu, pomza gözenek karakteristiğinin en belirgin özelliklerinden birisi olmaktadır. Diğer önemli bir özellik ise, matriks yapıda gözenek yüzdesinin toplam strüktür yapı içerisindeki dağılım oranı ve geometrik form şekillerinin belirgin oluşudur. Ses izolasyonu açısından gözenek oluşum formunun konumu ve geometrisi son derece önemli olmakta ve gözenek formlarının yassı uzun kapalı kanallar şeklinde bulunması da arzu edilen bir olgudur. Bu olguya sembolik bir strüktür yapı örneği Şekil 3'de verilmiştir (Gündüz vd., 1998).



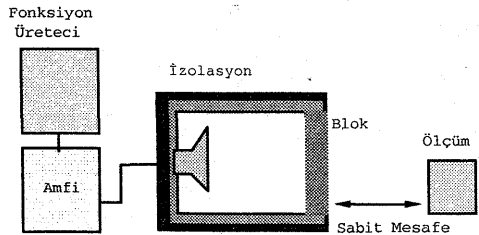
Şekil 3. Pomzanın strüktür yapıda kapalı kanal gözenek yapısı.

Pomza strüktür yapısında, gözenekler arasındaki et kalınlığının değişiminin, kayacın dayanımına etkisi kaçınılmaz bir olgudur. Bu konu üzerinde yapılan deneysel çalışmalar, boşluklar arası et kalınlıklarının artmasının, kayacın basınç dayanım değerinin arttığını göstermiştir (Gündüz vd., 1998).

Pomzanın fiziksel olarak sertliği mohs skalasına göre 5.5-6 dır. Bünyesinde kristal suyu yoktur. Kimyasal olarak tesirsiz ve %75'e varan silisyum oksit muhtevasına sahiptir. Pomza taşında genel olarak kimyasal bileşim şu şekildedir:

- % 60 - 75 SiO<sub>2</sub>
- % 13 - 17 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- % 1 - 3 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- % 1 - 2 CaO
- % 7 - 8 Na<sub>2</sub>O-K<sub>2</sub>O
- eser miktarda TiO<sub>2</sub> ve SO<sub>3</sub> bulunmaktadır.

Yapı sektöründe, gerek finansal ve gerekse teknik özellikler bakımından avantajları nedeniyle, hafif blok elemanlarının kullanımı da giderek yaygınlaşmaktadır. Bu hafif blok elemanlarının eldesinde, günümüzde doğal hafif agregalar olarak nitelendirilen, volkanik kayalar türleri (curuf, pomza, tüf ve tüfit v.b.) sıklıkla kullanılmakta olup, atmosfer ortam koşullarına yüksek dayanımı ve diğer fiziksel özellikleri açısından pomza taşına verilen önem giderek daha da artmıştır. Yukarıdaki paragraflarda da bahsedildiği gibi, pomza taşı yüksek gözenekli bir yapıya ve bağlantısız boşluklu bir strüktüre sahip oluşu, üzerine gelen ses şiddetinin büyük bir kısmının söndürülürölerek ses yalıtımı özelliği gösterdiği bilinen bir gerçektir. Ancak, günümüze kadar bu kayalar türünün ses yalıtım karakteristiği ve buna etki eden faktör ve parametrelerin neler olduğu üzerinde yeterli düzeyde inceleme ve teknik detay bilgilere pek rastlanılamamaktadır. Bu bakımdan, gözenekli ve yüksek poroziteye sahip doğal hafif agregalar olarak kullanılan kayaların akustik konfor özellikleri, detay bir inceleme konusu olmaktadır. Bu çalışmada, farklı karakteristik özellikler sergileyen pomza kayalarının, ses akustiği ve ses yalıtımı özellikleri ve ses yalıtımına etki eden kayalar parametrelerinin neler olduğu, doğal hafif agregalar olarak pomzadan mamul kübik ve prizmatik blok elemanları farklı dozajlardaki çimento karışımları ile yapı elemanları elde edilmiş ve 28 günlük doğal kürlenme işlemi sonrasında analizler yapılmıştır. Tekno-mekanik analizler ve ses ölçümü deneysel çalışmaları, SDÜ Pomza Teknolojisi ArGe laboratuvarında, geliştirilen ses ölçüm düzeneği ile yapılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Geliştirilen ses ölçüm düzeneği sistemi.

Yapılan ArGe çalışmasında, pomzanın ses yalıtım değerlerinin irdelenmesi, gerek pomzanın doğal hafif agregalar olarak kayalar özellikleri ve gerekse blok

elemanı olarak elde edilmesini müteakip oluşturulan pomza blokların özellikleri ile dış ortam gürültü şartları arasındaki ilişkiler olarak ayrı ayrı analiz edilmiştir. Pomza taşının kaya mekanığı prensipleri çerçevesinde kayaç ve pomza blok özellikleri ile ses yalıtım karakteristiği arasındaki ilişkiler tanımlanmıştır. Yapılan analiz çalışmalarında, pomza taşının *ses yalıtım değerine etki eden kayaç ve pomza blok parametrelerinin* irdelemesi yapılmış olup, aşağıda verilen parametrelerin etkisi araştırılmıştır:

- \*Pomzanın ve blok elemanın birim yoğunluğu,
- \*Pomza tane boyutları ve blok elemanın boyutları
- \*Strüktür yapı, gözenek büyüklüğü ve geometrisi,
- \*Strüktür yapıdaki gözenek dağılım oranı,
- \*Pomza blok elemanın basınç dayanım değeri,
- \*Pomza blok elemanın elastisite modülü,
- \*Pomza blok elemanın Poisson oranı,
- \*Pomza blok elemanın kesme modülü,
- \*Pomza blok elemanın eğilme sertliği,
- \*Pomza blok elemanın empedansı.

Bu parametrelerin büyüklükleri, pomzanın strüktür yapısındaki gözenek oluşumları ve yoğunluğu ile doğru orantılıdır. Bu bakımdan, ses dalgalarının pomza gözeneklerinden geçiş karakteristiği, bu parametrelerin değerleri ile de tanımlanabilmektedir. Ancak öncelikle, kayaç strüktüründeki gözeneklerden geçişi (ses iletimi) ve bu kayaç ile elde edilmiş blok elemandan da geçiş olgusunun iyi bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Yapı sektöründe geleneksel olarak kullanıla gelmiş blok ve/veya bölme elemanlarının ses iletimi üzerine yapılan çalışmalar oldukça eskiye dayanmaktadır. Ses yalıtımında elemanın kütesinin etkisi, ilk olarak 1911 yılında Berger tarafından belirlenmiş ve 1931 yılında Meyer tarafından tekrarlanmıştır. Bölme elemanlarının ses yalıtım değerlerinin detaylı olarak incelenip, elemanın sesi iletmesinin fiziksel kuram olarak eşitliklerle belirlenmesi ancak 1942 yılında Cremer tarafından yapılmış olup, konu London tarafından geliştirilmiştir (Everest, 1994). Önceleri sonsuz bölme elemanı temel alınarak belirlenen bu kuramlar daha sonraları sınırlı boyutlardaki bölme elemanlarına uygulanmaya başlanmıştır.

Ancak, pomzanın blok veya bölme elemanı eldesinde kullanımında, ses iletim özelliği, geleneksel olarak kullanılan malzemelere göre daha farklı bir karakteristik göstermektedir. Bu olgu genel olarak şu şekilde tanımlanabilmektedir. Gözenekli strüktüre sahip bir pomza blok elemanın ses yalıtımı (ses yutumu), genel olarak üç şekilde gerçekleşmektedir: (Moore, 1978)

1. Eleman yüzeyine çarpan ses enerjisinin bir kısmının yüzeyden yansımaya ve malzeme matriks yapısının titreşim yapması sonucu sürtünme ile,
2. Yüzeyden geçen enerjinin bir kısmının gözeneklerdeki havada yapışkanlık nedeniyle ile,
3. Gözeneklerdeki havada, ısı enerjisinin dönüşümü sonucu ısı iletimi ile.

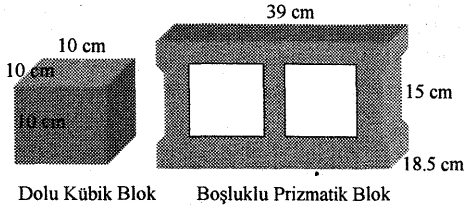
Strüktür yapının birim yoğunluğunun az olması ve bir kısım enerjinin gözeneklerden geçmesi, blok elemanın yalıtım değerinin özellikle düşük ses frekans değerlerinde düşük olmasına sebep olmaktadır. Ancak, blok elemanın oluşturduğu kayacın gözenek yapısı kapalı kanal gözeneklerden oluşması durumunda, bu olgunun iyileştiği gözlenmiştir. Pomza blok elemanlarında ses yutuculuğu, elemanın gözenekliliği, akış direnci ve etkin hava yoğunluğuna bağlı olarak gelişmektedir. Gözeneklerde malzemenin bazı kısımları hava ile beraber hareket ettirdiğinden, etkin hava yoğunluğu ( $m_q$ ), havanın yoğunluğu ( $q$ )'dan büyük olabilmektedir.

#### 4. POMZA BLOK ELEMANLARININ TEKNO-MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Pomza taşının hafif ve gözenekli olması sebebiyle, çimentolu harç karışımının belirli kalıp formlarına dökülmesi ile blok şeklinde hafif yapı elemanları elde edilmektedir. Bu tarz uygulamalar, oldukça yaygın olarak görülmekte olup, özellikle binalarda taşıyıcı olmayan dolgu ve örgü elemanları olarak değerlendirilmektedir. Pomzadan elde edilen bu hafif yapı elemanlarının ses akustik konfor özelliklerine, yukarıdaki bölümlerde de değinildiği gibi, kalıp formlara dökülmüş ve ürün haline dönüştürülmüş blok elemanlarının gerek hammadden kaynaklanan ve gerekse üretim sürecinde uygulanan basınç, su miktarı, vibrasyon v.b gibi faktörler sebebiyle, blok elemanlarının ses akustik özellikleri birbirlerinden farklılıklar göstermektedir. Bu açıdan değerlendirildiğinde, üretim sürecinde uygulanan vibrasyon şiddeti, su miktarı, çimento dozajı, kalıp baskı kuvveti, kütleme koşulları ve blok geometrisi gibi parametreler, pomza bloğun basınç dayanımına direkt etki eden parametrelerdir. Bu bakımdan, bu parametreler aynı zamanda, blok elemanın ses akustikine de direkt etken parametrelerdir. Blok elemanın, akustik konfor özelliği mekanik olarak incelendiğinde,

akustik parametrelerin bu özellikler ile ilişkisi araştırılarak, blok elemanın akustik karakteristiği bu parametre ve özelliklere bağımlı olarak tanımlanmalıdır. Bu tarz bir analiz yapabilmek için, sayılan tüm bu parametre ve özelliklerin farklı pomza blok karışım kombinasyonlarında laboratuarda detay olarak analiz edilmesi ile mümkün olabilmektedir. Ancak, burada karşılaşılan temel problemlerin başında, bire bir boyutlu kalıp formlarda elde edilen pomza blok elemanlarının tüm detay analizlerinin yapılmasının oldukça güç bir işlem olması sebebiyle, bu blokları sembolize eden ve kaya mekanik prensipleri çerçevesinde hazırlanan kübik formulu dolu pomza blok elemanları üzerinde detay analizler yapılmakta ve elde edilen bulguların prizmatik formulu bire bir boyutlu pomza blok elemanlarının değerleri ile ilişkilendirilebilmektedir.

Pomza blok elemanlarının basınç dayanım değerlerinin analizi için, dolu kübik formulu blok örneklerinin dayanım değerleri ile boşluklu prizmatik formulu blok elemanı örneklerinin dayanım değerleri arasındaki ilişki araştırılmış olup, analiz çalışmalarında kullanılan deney örneklerinin şekil, form ve boyutları Şekil 5’de verilmiştir.

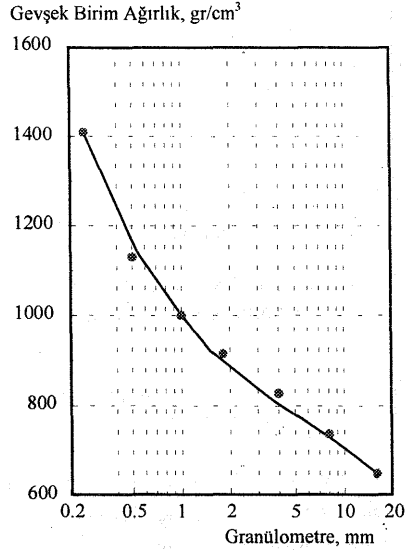


Şekil 5. Analizlerde kullanılan pomza blok örneklerine ait formlar.

Pomzalı blok elemanlarının basınç dayanım değerini belirlemek amacıyla, farklı çimento dozajlarında sabit bir granülometrik bileşime sahip olan pomza agregaları ile 10x10x10 cm ebatlı kübik örnekler hazırlanmış ve 28 günlük doğal ortam şartlarında küremeye bırakılmıştır. Analizlerde kullanılan pomza agregalarına ait kimyasal bileşim Çizelge 1’de gösterilmiş olup, granülometrik bileşim ve birim hacim ağırlık ilişkisi Şekil 6’da verilmiştir. 28 günlük kür sonrasında, örneklerin basınç dayanımları tek eksenli gerilme altında analizleri yapılarak tek eksenli basınç dayanımları belirlenmiştir.

Çizelge 1. Pomza agregalarının kimyasal bileşimi.

| Bileşim                        | Değer |
|--------------------------------|-------|
| SiO <sub>2</sub>               | 59.5  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 17.0  |
| CaO                            | 4.6   |
| MgO                            | 2.0   |
| Na <sub>2</sub> O              | 5.1   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4.8   |
| K <sub>2</sub> O               | 5.2   |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.6   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.4   |
| MnO                            | 0.1   |
| SO <sub>3</sub>                | 0.4   |
| A.K.                           | 1.3   |



Şekil 6. Pomza agregalarının granülometrik bileşim - birim hacim ağırlık ilişkisi.

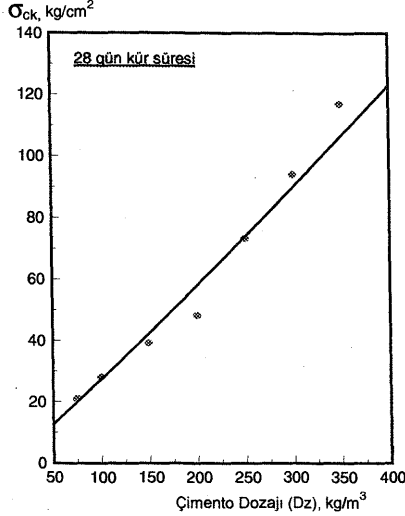
Yapılan analiz bulgularına göre, kübik blok elemanlarının basınç dayanımları değişiminin, kullanılan çimento dozajına göre değişim gösterdiği gözlenmiştir (Şekil 7), çimento dozajına bağımlı alt ve üst limit değerleri istatistiksel olarak belirlenmiştir. Elde edilen istatistiksel ilişkiler aşağıda verilmiştir:

$$\sigma_{c \min} = 14.538 \cdot e^{0.00595 \cdot Dz} \quad [2]$$

$$\sigma_{c \max} = 0.195 \cdot Dz^{1.093} \quad [3]$$

Burada,

$\sigma_c$  : Kübik pomza blok dayanım değeri,  $\text{kg/cm}^2$ ,  
 $Dz$  : Çimento dozajı,  $\text{kg/m}^3$ .

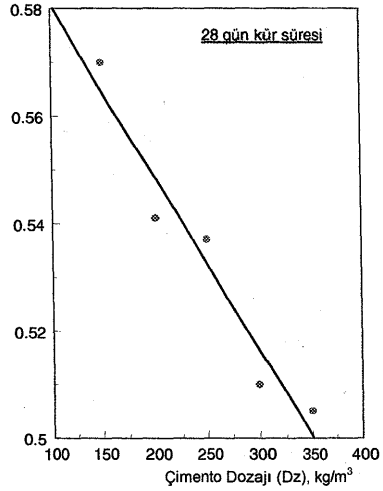


Şekil 7. Çimento dozajına bağımlı kübik pomza blok dayanım değeri değişimi.

Prizmatik forma sahip bir sıra boşluklu pomza blok örneklerinin basınç dayanımları da, ayrı analizlerle belirlenerek, prizmatik boşluklu pomza blok örneklerinin basınç dayanımları ( $\sigma_{pr}$ ) ile kübik pomza blok örneklerinin basınç dayanımları ( $\sigma_c$ ) arasındaki ilişki araştırılmış olup,  $\sigma_{pr}/\sigma_c$  oranının kullanılan çimento dozajına bağımlı olarak lineer bir değişim gösterdiği belirlenmiştir. Bu basınç dayanım oranı ( $\sigma_{pr}/\sigma_c$ ), analizlerde  $K_{pc}$  olarak sembolize edilmiştir. Elde edilen bulgu, grafiksel olarak Şekil 8'de gösterilmiş olup, lineer istatistiksel ilişki ise aşağıda verilmiştir.

$$K_{pc} = \sigma_{pr}/\sigma_c = 0.613 - 0.0003 \cdot Dz \quad [4]$$

$$K_{pc} (\sigma_{cp}/\sigma_{ck})$$



Şekil 8. Çimento dozajına bağımlı pomza bloklarda  $\sigma_{pr}/\sigma_c$  oran değişimi.

Prizmatik boşluklu pomza blok elemanlarının ortam şartlarındaki değişimlerde göz önünde bulundurulduğunda düzeltilmiş basınç dayanım değerlerinin belirlenmesine yönelik, matematiksel bir modelleme yapılarak aşağıda verilen istatistiksel model elde edilmiştir:

$$\sigma_{pr}^n = K_{pc} \cdot \sigma_c \cdot \xi \quad [5]$$

Burada,

$\sigma_{pr}^n$  : Düzeltilmiş prizmatik pomza blok basınç dayanım değeri,  $\text{kg/cm}^2$ ,

$K_{pc}$  : Basınç dayanım oranı,

$\sigma_c$  : Kübik pomza blok basınç dayanım değeri,  $\text{kg/cm}^2$ ,

$\xi$  : Kübik pomza blok dayanım değişimi.

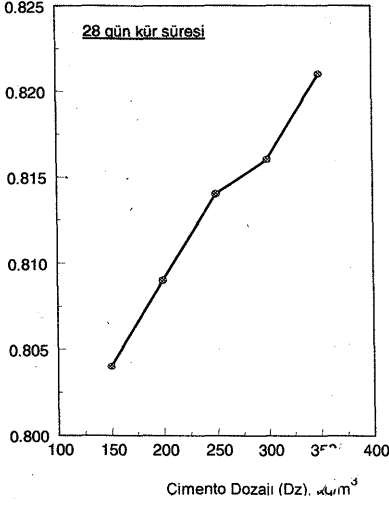
Bu yaklaşımdaki, kübik pomza blok dayanım değişimi ( $\xi$ ) (Şekil 9), standardize edilmiş bir basınç dayanım değişim katsayısı (S) (Şekil 10), çimento dozajına (Dz) bağımlı olarak tanımlanarak, fonksiyonel bir ifadeleme ile açılmış olup, elde edilen istatistiksel yaklaşım aşağıda verilmiştir.

$$\xi = (1.0 - 1.38 \cdot S) \quad [6]$$

Burada,

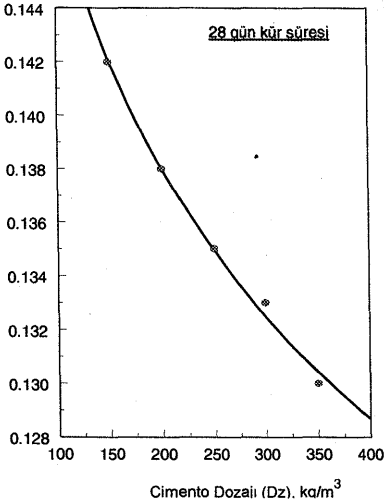
$$S = 0.2358 \cdot Dz^{-0.101} \quad [7]$$

Basınç Değişimi,  $\xi$



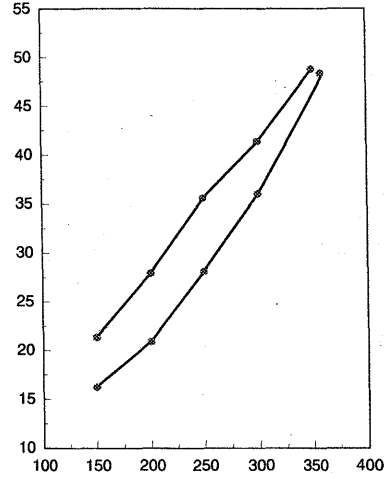
Şekil 9. Çimento dozajına bağlı pomza bloklarda basınç dayanım değişim ilişkisi.

Basınç Değişim Katsayısı, S



Şekil 10. Çimento dozajına bağlı pomza bloklarda basınç dayanım değişim katsayısı ilişkisi.

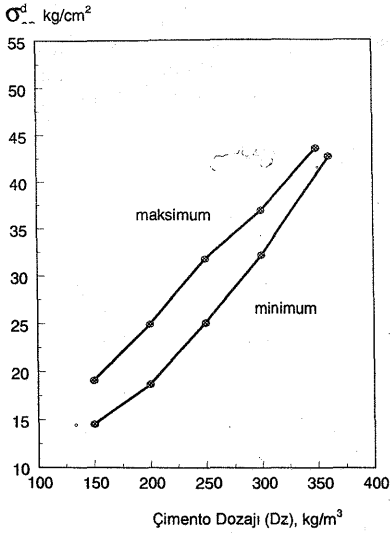
Yukarıda tanımlanan yaklaşımlar kullanılarak, prizmatik boşluklu pomza blok elemanlarının düzeltilmiş basınç dayanım değer değişiminin maksimum ve minimum limitleri, kullanılan çimento dozajına bağlı olarak Şekil 11'de grafiksel olarak ilişkisi verilmiştir.



Şekil 11. Çimento dozajına bağlı prizmatik boşluklu pomza bloklarda basınç dayanım değişim ilişkisi.

Bu matematiksel modellemeye ek olarak, prizmatik pomza bloklar için uygulamalarda yapılabilecek hatalardan kaynaklanan durumlarda göz önünde bulundurulduğunda, basınç dayanım değerlerinde bir miktar azalma olduğu gözlenen bir gerçektir. Bu olgu araştırılmış ve değer değişimi bir katsayı parametresi tanımlanarak ( $K_{sc}$ ), değeri 1.12 olarak belirlenmiştir. Bu değere göre, prizmatik boşluklu pomza blok elemanlarının tasarım basınç dayanım değeri ( $\sigma_{pr}^d$ ), kullanılan çimento dozajına bağlı olarak modellenmiştir. Elde edilen analiz bulgusu Şekil 12'de verilmiş olup, bu olgu parametrik olarak şu şekilde tanımlanmıştır.

$$\sigma_{pr}^d = \sigma_{pr}^n / K_{sc} \quad [8]$$



Şekil 12. Çimento dozajına bağımlı prizmatik boşluklu pomza bloklarda tasarım basınç dayanım ilişkisi.

Ayrıca, pomza blokların elastisite özellikleri deneysel analizlerle irdelenmiş olup, blok elemanın birim ağırlık ve dayanım değerine bağımlı elastisite özelliği tanımlamaları yapılmıştır.

Yapılan bu analiz irdelemelerinde elde edilen elastisite özelliğine ait genel matematiksel form şu şekilde formülize edilmiştir:

$$E = A \cdot \sigma_c^{a1} \cdot \rho^{b1} + B \quad [9]$$

Burada,

$E$  : Pomza bloğun Elastisite Modülü,  $\text{kg/cm}^2$ ,

$A, a1, a2, B$  : Blok özelliğine göre sabit katsayı değerleri,

$\sigma_c$  : Küçük pomza bloğun basınç dayanım değeri,  $\text{kg/cm}^2$ ,

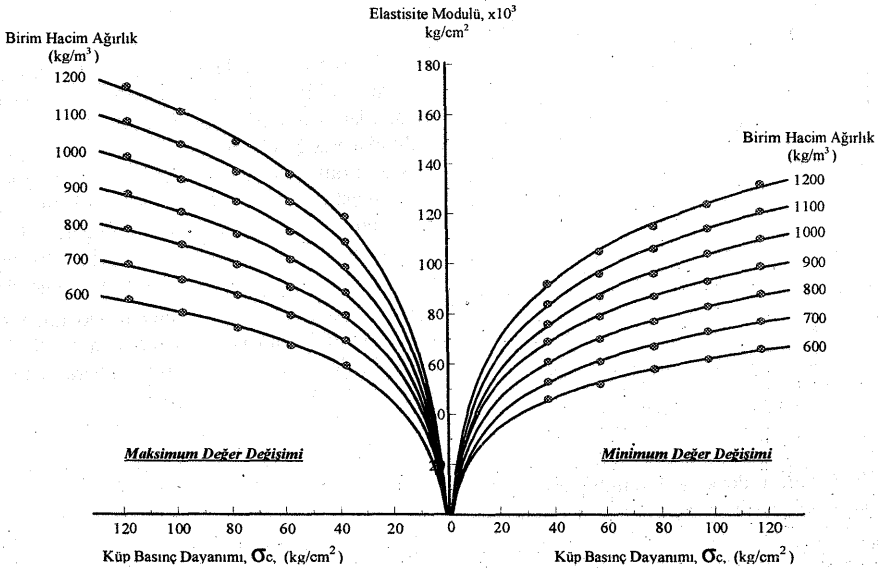
$\rho$  : Pomza bloğun birim hacim ağırlık değeri,  $\text{kg/m}^3$ .

Bu genel form karakteristiğinde, pomza blok elemanlarının elastisite modülü minimum ve maksimum limitler olarak ayrı ayrı tanımlanmış olup, aşağıda verilen eşitlikler belirlenmiştir:

$$E_{\min} = 22.34 \cdot \rho \cdot \sigma_c^{0.333} \quad [10]$$

$$E_{\max} = 28.72 \cdot \rho \cdot \sigma_c^{0.333} \quad [11]$$

Farklı basınç dayanım değerlerine sahip pomza blok elemanlarının birim yoğunluk değişimindeki elastisite modül değerleri Şekil 13'de abak olarak verilmiştir.



Şekil 13. Pomza bloklarda basınç dayanım ve elastisite modülü ilişkisi.

## 5. POMZA BLOK ELEMANLARININ KAYAÇ PARAMETRELERİ VE AKUSTİK KONFOR İLİŞKİSİ

Bölüm 4'de pomza blokların dayanımına etki eden faktör ve parametrelerin tanımlanması yapılarak, bu parametrelerin dayanıma etkilerinin irdelenebilmesi amacıyla, istatistiksel yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu bölümde, pomza blok elemanlarının, bu parametreler bazında ses akustik özelliklerinin tanımı ve blok elemanın ses yutuculuk kriterlerinin analizi, deneysel çalışmalarla yapılmış olup, analiz bulgularından elde edilen çıkarımlar burada yorumlanmıştır. Diğer taraftan, TSE standartlarında, pomzadan mamul yapı elemanlarının ses izolasyon özelliğini belirli baz parametre değerleri ile niteleyen bir standart henüz mevcut olarak bulunmamaktadır. Bu bakımdan, pomzadan mamul hafif yapı elemanları için kullanılabilecek veya uygulanabilecek bir standardın da geliştirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, SDÜ Pomza Teknolojisi Laboratuvarında Şekil 4'de sembolik gösterimi verilen deney düzeneği ile bir dizi deneysel ArGe çalışmaları sürdürülmüş olup, bu çalışma kapsamında, farklı frekans ve dış ortam ses şiddetlerinde pomza blokların ses yutuculuk değerleri ölçümlerle belirlenmiştir. Bu ölçümlere bir örnek Şekil 14'de verilmiştir.

Pomza blok elemanlarının ses yutuculuk değerleri, bloğun karakteristiği ile direkt olarak ilişkilidir. Burada blok karakteristiği, bloğun birim ağırlık, dayanım, kesit kalınlığı ve bloğun hacimsel doluluk oranı gibi parametrelerle tanımlanabilmektedir. Bu ve benzeri blok parametreleri deneysel olarak detay bir şekilde incelenmiş olup, blok elemanlarının ses yutuculuk değerine etkisi araştırılmıştır. Yapılan inceleme ve araştırma çalışmaları sonucunda, pomzadan mamul hafif yapı elemanları için kullanılabilecek blok elemanın ses yutuculuk sınır değer limitlerini belirleyen bir dizi algoritmik yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu algoritma kullanılarak, pomza blokların ne ölçülerde ve hangi ortam koşullarında ses izolasyon özelliği sağlayabilme (yalıtım amaçlı bir duvar elemanı olabilme) olanakları ve karakteristiklikleri tanımlanabilmektedir. Bu araştırma bulgularından elde edilen tek sıra boşluklu prizmatik pomza blok elemanlarına ait ses yutuculuk matematiksel modeli şu şekilde tanımlanmıştır:

$$R_m = (2.10 - 0.26 \ln p) \frac{\rho \cdot RD^{1.69}}{\sigma_c D d^{0.44}}$$

Burada;

- $R_m$  : Pomza blok ses yutuculuk değeri, dB,  
 $\rho$  : Pomza blok birim hacim ağırlık, kg/m<sup>3</sup>,  
 $RD$  : Dış ortam gürültü şiddeti, dB,  
 $\sigma_c$  : Pomza blok basınç dayanım değeri, kg/cm<sup>2</sup>,  
 $D$  : Pomza blok hacimsel doluluk oranı, %,  
 $d$  : Pomza blok kesit kalınlığı, cm.

Bu yaklaşıma göre, pomza blok elemanlarının farklı dış ortam gürültü şiddetlerinde farklı ses yalıtım değerleri sergileyeceği muhakkaktır. Bu bakımdan, pomza bloğun şekil, boyut, geometri, dayanım ve ağırlık değerlerine bağımlı olarak duvarda blok elemanı olarak kullanıldığı yere göre (dış ortam gürültü seviyesi şiddetine göre), her bir elemanın gürültü şiddetini yalıtma özelliğini sembolize eden karakteristik eğrilerinin belirlenmesi gerekmektedir. Fonksiyonel olarak belirlenen bu eğriler, pomza blok elemanın farklılık gösterebilecek minimum ve maksimum birim ağırlık ve dayanım değerlerine göre alt ve üst limit yalıtım karakteristik değişimleri, deneysel ve teorik olarak tanımlanmalıdır. Bu tanımlamalar yapıldıktan sonra, pomza blok ürününün deneysel olarak ölçülen ses yutuculuk ses şiddeti seviyesi değerlendirilerek, bu ürünün hangi maksimum dış ortam gürültü ses seviyesine kadar bir yalıtım elemanı olarak değerlendirilebileceği belirlenebilmektedir. Pomza bloğun maksimum ve minimum limitler içinde, blok karakteristiğine bağımlı olarak ses yutuculuk değerlerinin değişimi, aşağıda verilen matematiksel modellerle tanımlanmış olup, grafiksel olarak analizi Şekil 15'de verilmiştir.

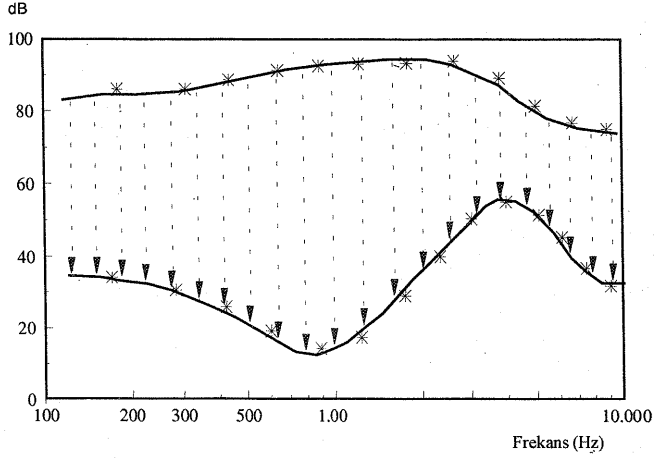
$$R_{m (min)} = (0.14 - 0.018 \ln p) \frac{\rho \cdot RD^{1.69}}{K_{pc} \cdot e^{0.00595 \cdot D_z} \cdot \xi \cdot D d^{0.44}}$$

$$R_{m (max)} = (10.7 - 1.33 \ln p) \frac{\rho \cdot RD^{1.69}}{K_{pc} \cdot D_z^{1.093} \cdot \xi \cdot D d^{0.44}}$$

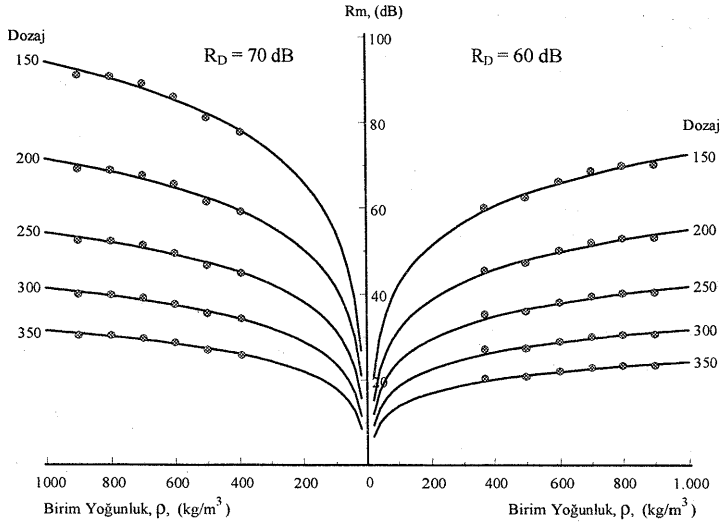
Diğer bir analizde ise, pomza blok dayanım değerinin, blok ses yutuculuk özelliğine etkisi araştırılmış ve Şekil 16'da verilen ilişki elde edilmiştir. Şekil 16 irdelendiğinde görüleceği gibi, blok elemanın dayanımı iyileştikçe, dış ortam gürültü şiddetine bağımlı olarak, bloğun akustik konforu sağlaması için arzu edilen ses yutuculuk limit değerinin düştüğü gözlenmektedir. Diğer bir

gözlemde ise, sabit bir dayanım değerinde, blok birim ağırlık değerinin artmasına paralel olarak, akustik konfor için gerekli olan ses yutuculuk limit değerinin de arttığı görülmektedir. Bu bulgulardan edinilen tecrübe ile, mekanik karakteristiği oldukça

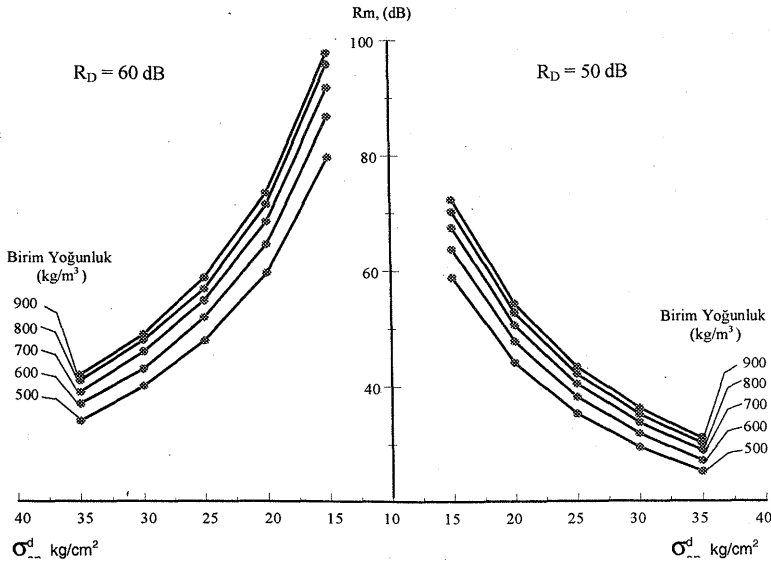
yüksek, birim ağırlık değeri düşük blok elemanlarının akustik konfor özelliği açısından, tercih edilecek bloklar olduğu gözlenmektedir.



Şekil 14. Pomza blok elemanına ait ses yutuculuk ölçüm değeri.



Şekil 15. Dış ortam gürültü şiddetinde, pomza blok ses yutuculuk sınır değer limitleri.



Şekil 16. Dış ortam gürültü şiddetinde, pomza blok dayanımı - ses yutuculuk sınır değer ilişkileri.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, pomzadan mamul hafif yapı elemanı olarak kullanılan pomza blok elemanlarının akustik konfor özelliği açısından ses yutuculuk karakteristiği ve buna etki eden kaya mekanik parametrelerinin analizleri deneysel ve gözlemsel olarak yapılmıştır. Analizlerden elde edilen bulgulardan, pratik olarak kullanılabilecek matematiksel modeller geliştirilerek, pomza blok karakteristiği tanımlanmaya çalışılmıştır. Bu çalışma kapsamında, teknik özellikleri belirli ve tanımlanmış olan yalnızca bir çeşit pomza malzemesinden blok elemanları üzerinde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Diğer taraftan, Türkiye'de farklı fiziksel, kimyasal ve mekanik karakteristik özellikler sergileyen pomza oluşumları üzerinde de benzer araştırmalar yapılması gerekmektedir.

Ayrıca, bu çalışma kapsamında ele alınan prizmatik blok elemanları tek sıra boşluklu blok elemanları olmuştur. Bunun haricinde iki sıra ve/veya üç sıra boşluklu blok elemanlarının da benzer yaklaşımlarla analizleri yapılmalıdır.

## KAYNAKLAR

- Everest, F. A., 1994, *The Master Handbook of Acoustics*, Tab Books Imprint of Mc Graw Hill.
- Gündüz, L., Sarıışık, A., Uğur, İ., 1998, *Pomza Teknolojisi Cilt I* ISPARTA.
- Huntington, W. C., 1988, *Building Construction*, John Wiley&Sons, Inc., United States of America.
- Knudsen, V. O., Harris, C. M., 1988 *Acoustical Designing in Architecture*, Acoustical Society of America.
- Moore, J. E., 1978, *Design for Good Acoustics and Noise Control*, The Macmillan Press Ltd.



## ADAPAZARI - DÜZCE OVALARININ JEOTEKNİK ÖZELLİKLERİ

### GEOTECHNICAL PROPERTIES OF ADAPAZARI - DÜZCE PLAINS

H. ŞİŞMAN, F. KOCA, M. ALTINTAŞ, S. BASA, S. SARAÇ, M. FİŞEK  
DLH Araştırma Dairesi Başkanlığı, ANKARA

**ÖZET :** Bu çalışmada Adapazarı-Karadeniz Ereğlisi arasında yapılması düşünülen yaklaşık 122 km demiryolu projesi kapsamında yapılan zemin etüdlerinden (jeofizik etüdler, sondaj çalışmaları, zemin mekaniği laboratuvar çalışmaları) yararlanılarak Km: 0+00-73+00 arasında yeralan ve son depremlerde ağır hasar gören Adapazarı ve Düzce ovasının hat boyunca jeoteknik özellikleri irdelenmiştir.

**ABSTRACT:** In this work, geotechnical properties of Adapazarı-Düzce plains (along railway line km: 0+000 -73+000), which suffered damage during the last quake, is examined by utilizing geotechnical survey (including geophysical explorations, drilling, soil mechanic laboratory tests) and completed as extension of approximately 122 km length proposed railway project between Adapazarı - Karadeniz Ereğlisi.

#### 1. GİRİŞ

İncelenen güzergah, Sakarya ırmağının oluşturduğu Adapazarı ovası içinde başlamakta, yaklaşık Km:25+000 dolayında, Hendeğin güneyine kadar bu ova içinde sürmektedir (Şekil 1 ve 2). Adapazarı ovası, güneybatı kenarından Geyve yönüne devam eden Sakarya ırmağının çevresinde gelişmiştir. Ancak ova burada batıya doğru Sapanca Gölü ve kıyı ovaları ile birleşirken güneydoğusundaki vadilerin ağzında doğruya doğru genişlemekte ve kuzeye doğru, Adapazarı yerleşimini de kapsayarak yayılmaktadır. Ova 27-30 m kotundadır. Hat Düzce ovasının batı yarısından geçmektedir. Küçük Melen çayının yatağı çevresinde, batıda Gümüşova, doğuda Çaydurt'a kadar yayılan bu ova, kenarlarından merkeze doğru eğimli gözükmemektedir. Ovanın kotu 120-130 m dolayındadır. Güzergah, Hendek-Düzce arasında alçak sirtlardan kurulu bir ortamdan geçmektedir. Adapazarı-Düzce arasında yaklaşık 700 lokasyonda sismik kırılma çalışması, toplam 170 adet 10-30 m derinliğe sahip sondaj çalışması yapılmıştır. Bu sondajlarda her 1,5 m arayla SPT deneyi yapılmıştır. Ayrıca gereken yerlerde bozulmamış numuneler alınmıştır. Yine hat boyunca yer alan dere ve yol geçişleri ve viyadüklerde 2 m arayla pressiometre deneyleri yapılmıştır. Alınan SPT ve UD numuneleri üzerinde, zemin mekaniği laboratuvarlarında üç eksenli, serbest basınç, tane dağılımı, hidrometre vb deneyleri yapılarak zeminin tür ve mühendislik özellikleri belirlenmiştir.

#### 2. GÜZERGAHIN JEOLJİSİ

Güzergah, Arifiye yakınında Adapazarı Ovası alüvyonlarında başlamaktadır. Bu alüvyonlar genellikle ince taneli, kumlu, siltli özelliktedir. Ancak, Km: 4+000 ile 4+800 arasında, Sakarya Irmağı yatağının çevresinde ve Km: 11+500 ile Km: 13+000 arasında Mudurnu Çayı yatağı çevresinde kaba taneli çakıllı bloklar egemendir. Km: 21+800 ile Km: 23+000 arasında Dinsiz Deresi yatağı çevresinde ise siltli, killi taşkın ortamın baskın olduğu görülmektedir. Buradan başlayarak Neojen çökelleri yüzeylenmeye başlamaktadır. Siltli killi bir matriksin içinde yer alan çakıllı yer yer de kumlu mercceklerden kurulu, yanal yönde sık sık değişen nitelikte tortullar söz konusudur. Güzergah Km: 37+000 dolayına kadar geniş bir Neojen havza içinde sürmekte, buradan sonra Neojen yüzeylemelerin daraldığı görülmektedir. Ancak güzergah Km: 44+000 den sonra kilaşı, silttaşı ve marnlardan oluşan Göktepe formasyonu içinden tünelle geçmektedir. Km: 47+000 civarından itibaren Km: 54+600'e kadar olan kesimde Eosen Volkanitleri yeralmaktadır. Eosen Volkanitleri yeşilimsi renkte, esas olarak kum boyutlu volkanik gereç içersinde rastgele dağılmış, çeşitli irilikte kimi yarı köşeli çakıl ve blok boyutlu lav parçalarından kuruludur. Km: 48+000 ile Km: 55+000 arasındaki koridorun morfolojisi bu vadinin fay zonunda gelişmiş olabileceğini düşündürmektedir. Km: 55+200 de Düzce Ovası alüvyonuna girilmektedir. Bu alüvyonun Adapazarı Ovasındakinden genel

olarak daha kaba taneli gereçten oluştuğu dikkat çekmektedir. Yer yer kaba çakıl ve bloklu çakıl yatakları görülmektedir. Bu alüvyon ovanın Kuzey kenarındaki Yazlık Deresi alüvyonu ile karışmaktadır ve Km: 74+000'e kadar sürmektedir. Buradan Kuzeye doğru Eosen ve Göktepe formasyonunun kumtaşı ve şeylleri yüzeylenmektedir.

### 3.YAPILAN ÇALIŞMALAR

#### 3.1. Jeolojik Araştırmalar

Güzergah çalışmasının birinci aşamasında farklı güzergah seçeneklerinin 1/25000 ölçekli jeoloji incelemesi yapılmış, şeritvari jeolojik harita ve kesitler çıkartılmıştır. Daha sonra sondaj ve jeofizik çalışmaları sonucunda veriler derlenip daha sağlıklı ve daha büyük ölçekli 1/5000, 1/1000 ölçekli haritalar ve kesitler hazırlanmıştır.

#### 3.2. Jeofizik Araştırmalar

Güzergah boyunca her iki ovada yaklaşık 100-250 m aralya sismik kırılma çalışmaları yapılarak zemine ait P ve S dalga hızları hesaplanmıştır. Bu hızlardan yararlanılarak, dinamik elastisite modülü, dinamik kayma modülü, poisson oranı gibi zeminle ilgili elastik parametreler belirlenmiştir.

350 serilim yapılarak, hat boyunca sürekli veri alınmıştır. Ayrıca bu noktalarda rezistivite (öz direnç) çalışmaları yapılarak sonuçlar birlikte yorumlanmıştır.

#### 3.3. Sondaj Çalışmaları

Jeofizik çalışmaların ardından her iki ovada güzergah boyunca kritik kesimlerde ve sanat yapılarının bulunduğu yerlerde 170 noktada 10-30 m derinliğe kadar mekanik sondajlar yapılmıştır. Bu sondajlarda her 1.5 m de bir SPT deneyi yapılmış ve ayrıca uygun yerlerde örselenmemiş numune alınmıştır. Bu numuneler üzerinde laboratuvarlarda gerekli deneyler yapılmıştır. Ayrıca viyadük ve köprü geçişlerinde 2 m ara ile pressiyometre deneyleri yapılarak net limit basınç değerleri belirlenmiştir. Tüm bu verilerden yararlanılarak sanat yapısı temelleri ile dolgu ve yarmalar için sıklık ve zemin emniyet gerilmeleri ve oturma değerleri ile stabilite katsayıları saptanmıştır.

### 4.ADAPAZARI-DÜZCE OVALARININ JEOTEKTONİK ÖZELLİKLERİ

#### 4.1 Adapazarı Ovası

Hat, başlangıçtan itibaren 25.km'ye kadar bu ovanın Kuvaterner yaşlı alüvyonları üzerinden geçmektedir. Bu çökellerin dinamik özellikleri çizelge 1'de diğer jeoteknik özellikleri ise çizelge 2 ve çizelge 3'de ayrıntılı olarak verilmiştir. Ovada yer alan alüvyon genellikle ince taneli birimlerden oluşmuştur. Yüzeyle yakın kısımlarda genellikle silt, kil (CH, CL) ağırlıklı birimler daha derinlerde ise kum (SM, SC) yer almaktadır. Km: 11+500-13+000 arasında bu birimlerin malzemesi bir miktar irileşmektedir. Yüzeyle yakın kısımlarda SPT darbe adedi ortalama 15 civarındadır. Genellikle 10m'den daha derinlerde bu darbe miktarı artmaktadır. Sismik P dalga hızları yeraltısu seviyesinin üstünde 150-400 m/sn, su seviyesinin altında ise 1200-1600 m/sn arasında değişmektedir.

Yeraltısu seviyesi ova içerisinde oldukça yüksek olup Ortalama 2m civarındadır. S dalga hızları yüzeyle yakın kısımlarda ortalama 100 m/sn civarında, ortalama 4 m'den aşağıda ise 150-200 m/sn'ye kadar yükselmektedir. Yine killi birimlerin rezistivite değerleri ortalama 5-10 ohm.m, kumlu seviyelerin ise 20-30 ohm.m civarındadır.

#### 4.2. Hendek ve Çevresi

Demiryolu hattı, 25. km'den sonra Hendek'in güneybatısında neojen çökellerine girmektedir. 37. km'ye kadar devam eden bu Neojen çökelleri, daha iri taneli kumlu ve çakıllı birimlerden oluşmuştur. Ancak yer yer yüzeyle itibaren 2,5-7m'ye kadar killi seviyeler yer almaktadır. Burada topoğrafya daha engelbelidir. Zeminin taşıma gücü oldukça yüksektir.

SPT-N<sub>30</sub> darbe adedi genellikle 50'nin üstündedir. S dalga hızları çoğu yerde 300 m/sn'nin üstüne çıkmaktadır. Yeraltı su seviyesi bu kısımda 4-5 m'den daha derindedir. Km: 37+000-47+000 arasında kıltaşı, silttaşı birimleri yer almaktadır. Km: 47+000-55+000 arasında hat, Eosen yaşlı volkanik birimler içinde devam etmektedir. Bu birim yüzeyde tamamen ayrılmış özellikte olup 20-30 m'lik ayrışmadan sonra sağlam kayaya girilmektedir. Sağlam kaya yer yer 5000 m/sn P, 2600 m/sn S dalga hızı değeri vermektedir. Volkanik birim içinde çok sayıda ezilme ve ayrışma zonu mevcuttur.

#### 4.3. Düzce Ovası

Güzergah, Km: 55+000 den sonra Düzce Ovası alüvyonlarına girmektedir. Burada genel olarak yüzeye yakın kısımlarda killi, siltli seviyeler daha derinde ise kumlu birimler yer almaktadır. İlk 10 m ye kadar genellikle SPT-N<sub>30</sub> darbe sayısı 20 civarındadır. Özellikle ilk metrelerde darbe sayısı yer yer 10 darbeye kadar düşmektedir. S dalga hızı yüzeye yakın kısımlarda düşüktür (40-150 m/sn). Yine bu ovadaki su seviyesi 1 m'ye kadar düşmektedir. Poisson oranı ovanın büyük kesiminde 0.49 seviyelerindedir.

#### 5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Adapazarı ve Düzce ovalarının jeoteknik özellikleri

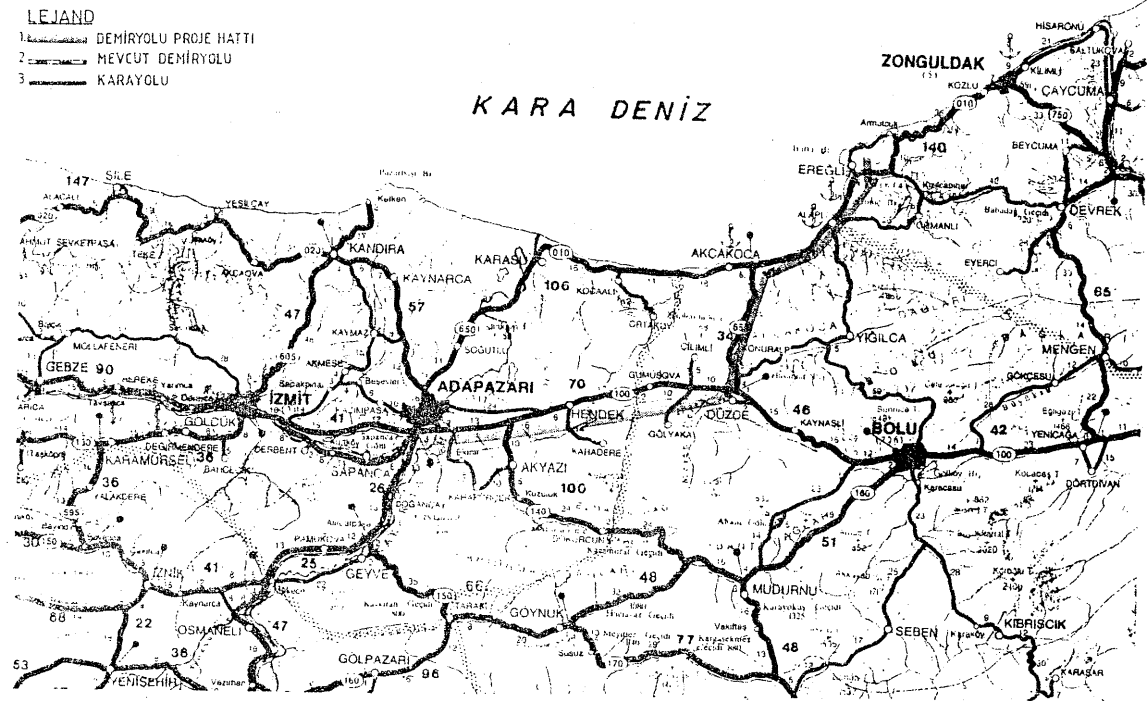
incelendiğinde genellikle yüzeye yakın kısımlarda silt, kil ve ince kumlu, SPT-N<sub>30</sub> darbe sayısı 10-20 olan gevşek alüvyonların yer aldığı, yeraltı su seviyesinin 1-2 m. kadar yüksek olduğu görülmektedir. Bu seviyelerin P ve S dalga hızları da oldukça düşüktür. Bu nedenlerden dolayı güzergahın geçtiği yerlerin büyük çoğunluğunda sıvılaşma riski oldukça yüksektir.

#### KAYNAKLAR

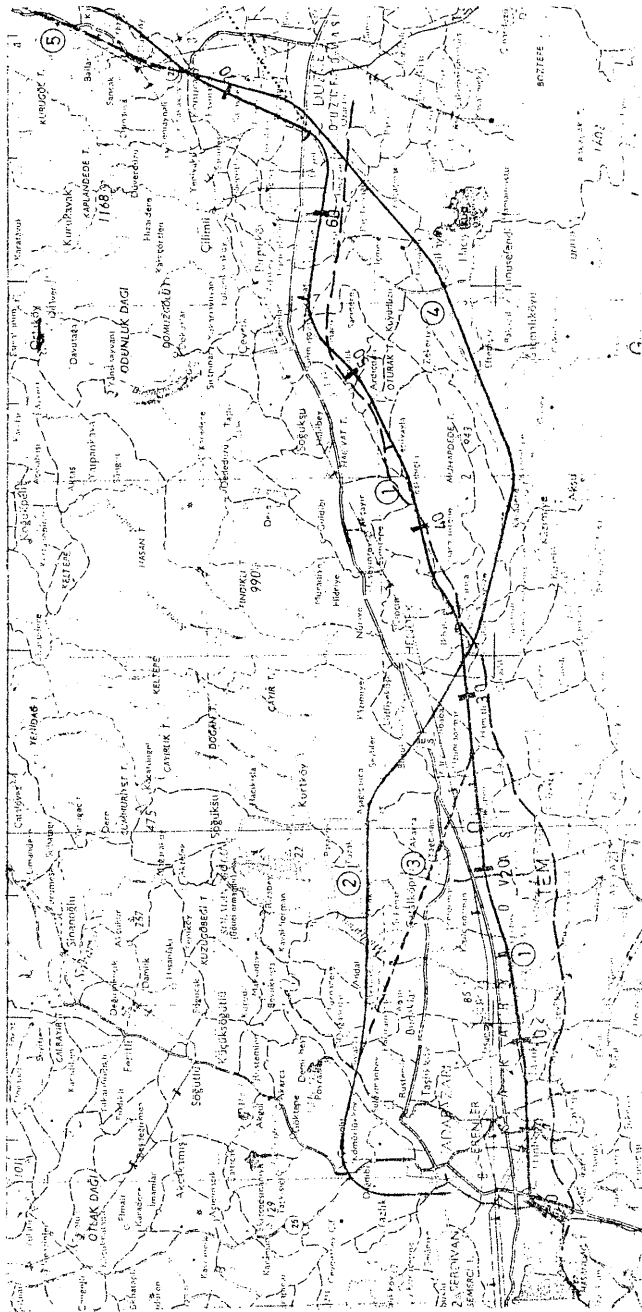
DLH, Karadeniz Ereğlisi - Adapazarı Demiryolu Projesi Jeoteknik Raporu, Ankara.  
Demirtaş, R. 2000 17 Ağustos 1999 İzmit Körfezi Depremi Raporu. B.İ.B. Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara

# LEJAND

1. DEMİRYOLU PROJE HATTI
2. MEVCUT DEMİRYOLU
3. KARAYOLU



Şekil 1. Adapazarı-Karadeniz Ereğlisi Demiryolu Projesi



Şekil 2. Adapazarı-Düzce arasında etüt edilen güzergahlar.

Çizelge 1. Adapazarı-Düzce arasında yapılan sismik kırılma çalışması sonuçları.

| KM    | Vp<br>m/sn | Vs<br>m/sn | $\sigma$  | Ed<br>kg/cm <sup>2</sup> | Gd<br>kg/cm <sup>2</sup> | Derinlik<br>m |
|-------|------------|------------|-----------|--------------------------|--------------------------|---------------|
| 0-5   | 150-400    | 75-150     | 0.33-0.49 | 250-800                  | 100-300                  | 2-6           |
|       | 500-1700   | 130-240    | 0.47-0.50 | 1000-3000                | 300-1000                 |               |
| 5-12  | 150-300    | 100-150    | 0.26-0.40 | 400-1000                 | 150-400                  | 6             |
|       | 1200-1600  | 160-300    | 0.40-0.49 | 1400-5000                | 500-1700                 |               |
| 12-17 | 150-400    | 70-120     | 0.25-0.48 | 200-650                  | 80-200                   | 2,5-5         |
|       | 500-1800   | 140-160    | 0.47-0.49 | 900-1400                 | 300-500                  |               |
| 17-25 | 180-650    | 80-140     | 0.33-0.47 | 300-900                  | 110-330                  | 2.6-6.5       |
|       | 400-2000   | 130-320    | 0.41-0.49 | 1200-6050                | 400-2050                 |               |
| 25-30 | 200-500    | 50-150     | 0.30-0.48 | 180-1150                 | 40-400                   | 1-9.2         |
|       | 600-1600   | 140-300    | 0.48-0.50 | 900-6200                 | 300-4000                 |               |
|       | 1000-2700  | 250-530    | 0.47-0.49 | 4000-19500               | 1300-5600                | 2-17          |
| 30-35 | 170-600    | 110-200    | 0.30-0.48 | 600-1700                 | 200-700                  | 1-6           |
|       | 600-1300   | 250-350    | 0.23-0.48 | 2000-8500                | 1100-3400                | 2.5-20        |
|       | 1200-3000  | 400-600    | 0.46-0.49 | 8500-22000               | 2900-7400                |               |
| 35-40 | 200-650    | 60-220     | 0.30-0.49 | 200-2500                 | 70-1200                  | 1-8           |
|       | 650-2600   | 200-400    | 0.34-0.49 | 1900-5000                | 700-4800                 | 6-24.5        |
|       | 1700-4800  | 400-700    | 0.30-0.49 | 12000-33000              | 2900-29000               |               |
| 40-42 | 200-500    | 60-180     | 0.42-0.49 | 150-1500                 | 50-500                   | 1-8.5         |
|       | 500-1700   | 120-350    | 0.30-0.49 | 700-8500                 | 240-1900                 | 3-11          |
|       | 1600-2100  | 250-370    | 0.47-0.49 | 4000-10500               | 1300-2800                |               |
| 42-47 | 200-750    | 80-250     | 0.35-0.48 | 200-3200                 | 100-1100                 | 1-13          |
|       | 600-2700   | 300-700    | 0.20-0.48 | 4800-28000               | 1600-9800                | 2-20          |
|       | 1700-3500  | 700-1200   | 0.43-0.47 | 38000-43000              | 13000-15000              |               |
| 47-55 | 350-1100   | 150-700    | 0.17-0.47 | 950-9800                 | 350-9800                 | 2-13          |
|       | 1100-2200  | 500-1800   | 0.12-0.48 | 4000-223000              | 6300-82000               | 4-26.5        |
|       | 2400-5000  | 600-2600   | 0.25-0.49 | 27000-429000             | 12000-171000             |               |
| 55-63 | 300-550    | 50-320     | 0.20-0.49 | 200-4900                 | 80-180                   | 1-6           |
|       | 400-1850   | 220-650    | 0.20-0.49 | 1150-20700               | 700-10600                |               |
|       | 1000-3400  | 1100-1200  | 0.10-0.49 |                          |                          | 6-13          |
| 63-73 | 250-500    | 40-150     | 0.35-0.49 | 150-1150                 | 40-1600                  | 1-3           |
|       | 950-1600   | 170-250    | 0.48-0.49 | 1900-4300                | 600-1450                 | 9-19          |

Vp : Boyuna sismik dalga hızı

Vs : Enine sismik dalga hızı

$\sigma$  : Poisson oranı

Ed : Dinamik elastisite modülü

Gd : Dinamik kayma modülü

Çizelge 2. Adapazarı-Düzce arasındaki sondaj ve laboratuvar çalışma sonuçları.

| KM    | Zemin<br>cinsi | Derinlik<br>m | SPT (N <sub>30</sub> )<br>darbe sayısı | YASS<br>m | $\Phi_u$<br>o | $\gamma_n$<br>kN/m <sup>3</sup> | PL(*)<br>kg/cm <sup>2</sup> |
|-------|----------------|---------------|----------------------------------------|-----------|---------------|---------------------------------|-----------------------------|
| 0-5   | Kil-Silt       | 4 - 9         | 15                                     | 2         | 0             | 18                              | 5 - 8                       |
|       | Kum            | 9>            | 30                                     | -         | 36-42         | 19                              | 12-20                       |
| 5-12  | Siltli kil     | 8.5           | 13                                     | 1.25      | 0             | 18                              | 1.5-8                       |
|       | Kum            | 8.5>          | 42                                     |           | 42            | 19                              | 10-20                       |
| 12-17 | Siltli kil     | 15            | 14-21                                  | 1.5       | 0             | 18                              | 5-7                         |
|       | Kum            |               | 30                                     |           | 36            | 19                              | 12-20                       |
| 17-25 | Kil            | 10            | 17                                     | 4         | 0             | 18                              | 7-10                        |
|       | Kum-çakıl      |               |                                        |           |               |                                 | 15-19                       |
| 25-30 | Siltli kil     | 2.5-10        | 20-50                                  | 6.5       | 30            | 19                              |                             |
|       | Kum-çakıl      |               | 45-50+                                 |           | 35            | 20                              |                             |
| 30-35 | Kil-çakıl      | 0-5.5         | 50+                                    | 5-10      | 30            | 19                              | 13-33                       |
|       | Çakıl          | 5.5-11        | 50+                                    |           | 38            | 20                              |                             |
| 35-40 | Kil-silt       | 5             | 50                                     | 3-10      | 26            | 19                              |                             |
|       | Çakıl          | 5+            | 50+                                    |           | 35            | 20                              |                             |
| 40-42 | Kil            | 12            | 50                                     | -         | 30            | 19                              |                             |
|       | Çakıl          |               | 50+                                    | 9         |               |                                 |                             |
|       | Kiltaşı        |               |                                        |           |               |                                 |                             |
| 42-47 | Silttaşı       |               |                                        |           |               |                                 |                             |
|       | Eosen          |               |                                        |           |               |                                 |                             |
| 47-55 | volkanitleri   |               |                                        |           |               |                                 |                             |
| 55-63 | Kil-silt       | 10            | 22                                     | 3         | 0             | 19                              |                             |
| 63-73 | Kil-silt       | 10            | 16-24                                  | 1         | 0             | 18                              |                             |
| 73-80 | Şeyl-kumtş     |               |                                        |           |               |                                 |                             |

N<sub>30</sub> : SPT darbe sayısı

$\Phi_u$  : İçsel sürtünme açısı

YASS : Yeraltısu seviyesi

$\gamma_n$  : Birim ağırlık

PL : Net limit basınç

(\*) Adapazarı, Pamuklu Dere, Karasu Deresi, Balıklı Dere Viyadüklerini kapsamaktadır. Oadaki değerlerden daha yüksek taşıma gücüne sahiptir.

Çizelge 3. Adapazarı-Düzce arasındaki sanat yapılarının taşıma gücü değerleri

| KM     | ADI              | N/SPT<br>(ort) 30<br>için | C<br>kPa | $\Phi_u$<br>o | Df min<br>m | YASS<br>m | qult<br>kPa | qa<br>kPa |
|--------|------------------|---------------------------|----------|---------------|-------------|-----------|-------------|-----------|
| 2+742  | Hanlı 1          | 13                        | 78       | -             | 3.0         | 1.4       | 471.1       | 157.0     |
| 3+140  | Hanlı 2 (K1)     | 15                        | 90       | -             | 3.0         | 3.0       | 567.0       | 189.0     |
| 4+157  | Karaabdiler (K1) | 14                        | 84       | -             | 3.0         | 2.3       | 520.8       | 173.6     |
| 4+690  | Seyitaliler      | 22                        | -        | 31            | 2.0         | 4.0       | 660.0       | 220.0     |
| 5+808  | Alancuma         | 33                        | -        | 38            | 2.0         | 1.1       | 990.0       | 330.0     |
| 6+630  | Karapürçek       | 21                        | 126      | -             | 2.5         | 1.6       | 747.7       | 249.2     |
| 7+625  | Tavuklar         | 22                        | 132      | -             | 2.0         | 1.7       | 783.2       | 261.0     |
| 9+456  | Sarıcalar        | 16                        | 96       | -             | 2.5         | 1.2       | 569.8       | 189.9     |
| 11+070 | Çaykışla         | 11                        | 66       | -             | 2.5         | 1.0       | 395.4       | 131.8     |
| 13+582 | Mudurnu          | 26                        | 156      | -             | 2.0         | -         | 925.2       | 308.4     |
| 14+480 | Gebeş            | 13                        | 78       | -             | 2.5         | 1.0       | 463.8       | 154.6     |
| 0+998  | B.Top.Yolu (K1)  | 16                        | 96       | -             | 2.5         | 2.0       | 583.6       | 194.5     |
| 1+935  | Hanlı 1          | 14                        | 84       | -             | 2.5         | 1.0       | 498.0       | 166.0     |
| 16+149 | Bediltahirbey 1  | 17                        | 102      | -             | 2.0         | 1.5       | 608.8       | 202.9     |
| 16+592 | Bediltahirbey 2  | 20                        | 120      | -             | 2.0         | 3.0       | 750.0       | 240.0     |
| 2+335  | Hanlı 2          | 14                        | 84       | -             | 2.5         | 1.0       | 498.0       | 166.0     |
| 8+093  | Tavuklar yaya    | 16                        | 96       | -             | 2.0         | 1.7       | 583.2       | 194.4     |
| 10+350 | Çaykışla 1 yaya  | 15                        | 90       | -             | 2.5         | 1.45      | 540.8       | 180.3     |
| 11+740 | Çaykışla 2 yaya  | 12                        | 72       | -             | 2.5         | 1.25      | 433.9       | 144.6     |
| 11+915 | Çaykışla 3 yaya  | 17                        | 72       | -             | 2.5         | 2.80      | 433.9       | 144.6     |
| 13+978 | Gebeş yaya       | 15                        | 90       | -             | 2.0         | 1.25      | 536.1       | 178.7     |
| 18+832 | Aktarla          | 17                        | 102      | -             | 2.0         | 4.0       | 617.4       | 205.8     |
| 5+691  | Kanal Köprüsü    | 10                        | -        | 30            | 3.0         | 1.0       | 300.0       | 100.0     |

N<sub>30</sub> : SPT darbe sayısı

C : Kohezyon

$\Phi_u$  : İçsel sürtünme açısı

Df : Temel derinliği

qult : Taşıma gücü

qa : Güvenli taşıma gücü

YASS: Yeraltı su seviyesi

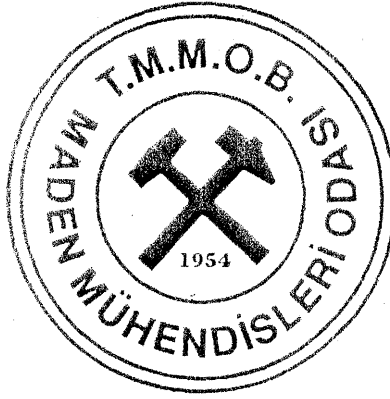
Çizelge 3'ün devamı

| KM     | ADI              | N/SPT<br>(ort) 30<br>için | C<br>kPa | $\Phi_u$<br>Açısı<br>o | Df min<br>m | YASS<br>m | qult<br>kPa | qa<br>kPa |
|--------|------------------|---------------------------|----------|------------------------|-------------|-----------|-------------|-----------|
| 20+143 | Akyazı-E5 Bağ.   | 14                        | 84       | -                      | 2.0         | 4.8       | 516.8       | 172.3     |
| 21+793 | Kumköprü         | 20                        | 120      | -                      | 2.0         | 3.1       | 722.0       | 240.7     |
| 25+370 | Uzuncaorm 1      | 22                        | 132      | -                      | 2.0         | 2.3       | 790.4       | 263.5     |
| 25+953 | Punayayalar      | 26                        | 153      | -                      | 2.0         | 3.2       | 910.0       | 303.4     |
| 26+729 | Hamitli          | 35                        | 210      | -                      | 1.5         | -         | 1225.5      | 408.5     |
| 28+664 | Servetiye 1      | 42                        | 252      | -                      | 1.5         | -         | 1464.9      | 488.3     |
| 30+311 | Hen-TEM Bağ      | 50+                       | 300      | -                      | 1.5         | -         | 1500.0      | 500.0     |
| 31+720 | Çağlayan 2       | 35                        | 210      | -                      | 1.5         | 5.0       | 1225.5      | 408.5     |
| 33+290 | Balıklı-İhsaniye | 50+                       | -        | 45                     | 1.5         | 8.0       | 1500.0      | 500.0     |
| 37+915 | Harmantepe       | 17                        | 102      | -                      | 2.0         | 2.2       | 619.4       | 206.5     |
| 39+350 | Karaçökek        | 50+                       | 300      | -                      | 1.5         | 4.0       | 1500.0      | 500.0     |
| 43+650 | Bıçkı            | 38                        | 228      | -                      | 1.5         | -         | 1328.1      | 442.7     |
| 26+523 | Uzuncaorm 2      | 50+                       | -        | 45                     | 1.5         | 9.0       | 1500.0      | 500.0     |
| 28+203 | Uzuncaorm3       | 50+                       | -        | 45                     | 1.5         | -         | 1500.0      | 500.0     |
| 29+135 | Servetiye 2      | 26                        | 153      | -                      | 1.5         | -         | 900.6       | 300.2     |
| 30+622 | Çağlayan 1       | 50+                       | 300      | -                      | 1.5         | -         | 1500.0      | 500.0     |
| 32+700 | İkbaliye         | 50+                       | -        | 45                     | 1.5         | -         | 1500.0      | 500.0     |
| 40+672 | Gürcüköyü 2      | 28                        | 168      | -                      | 1.5         | 9.0       | 986.1       | 328.7     |
| 41+243 | Yeşilyayla 1     | 50+                       | -        | 45                     | 2.0         | 9.0       | 1500.0      | 500.0     |
| 42+061 | Yeşilyayla 2     | 27                        | 162      | -                      | 1.5         | -         | 951.9       | 317.3     |
| 42+518 | Bıçkı            | 40                        | 240      | -                      | 1.5         | -         | 1396.5      | 465.5     |
| 23+700 | Kumköprü yaya    | 22                        | 132      | -                      | 1.5         | 7.5       | 780.9       | 260.3     |
| 29+818 | Servetiye 2      | 40                        | 240      | -                      | 1.5         | 1.95      | 1396.5      | 465.5     |
| 40+254 | Gürcüköyü 1      | 30                        | 180      | -                      | 1.5         | 7.5       | 1054.5      | 351.5     |
| 50+635 | Yongalık(K1)     | -                         | -        | 45                     | 1.5         | 1.0       | 1500.0      | 500.0     |
| 57+322 | Yakabaşı         | 17                        | 102      | -                      | 2.0         | 1.6       | 590.4       | 196.8     |
| 58+842 | İslahiye 1(K1)   | 31                        | 186      | -                      | 1.5         | 4.0       | 1088.7      | 362.9     |
| 59+648 | İslahiye 2       | 23                        | 138      | -                      | 2.0         | 2.4       | 824.6       | 274.9     |
| 60+157 | Şaziye Köyü      | 21                        | 126      | -                      | 2.0         | 2.5       | 756.2       | 252.0     |
| 62+212 | Fevziye Köyü     | 29                        | 174      | -                      | 1.5         | 0.75      | 1020.3      | 340.1     |



## YAZARLAR DİZİNİ AUTHORS INDEX

|                 |                  |                  |          |
|-----------------|------------------|------------------|----------|
| Akçın, N.A.     | 153              | İpek, T.         | 161      |
| Akdaş, H.       | 113, 179         | Kılıç, A.        | 57       |
| Altındağ, R.    | 105              | Kılıç, M.        | 161      |
| Altıntaş, M.    | 217              | Koca, F.         | 217      |
| Arioğlu, B.     | 21               | Kulaksız, S.     | 123, 195 |
| Arioğlu, E.     | 21               |                  |          |
| Ayhan, M.       | 99               | Öğretmen, S.     | 113      |
|                 |                  | Özarslan, A.     | 89       |
| Basa, S.        | 217              | Özçelik, Y.      | 123, 195 |
| Bilgin, H.A.    | 161              | Özel, R.         | 129      |
|                 |                  | Özgüven, A.      | 123, 195 |
| Çan, T.         | 45               | Özkahraman, H.T. | 171      |
|                 |                  | Özkan, İ.        | 129, 145 |
| Destanoğlu, N.  | 113              | Özkan, T.        | 153      |
|                 |                  |                  |          |
| Ertem, M.E.     | 35               | Saraç, S.        | 217      |
| Eyüboğlu, A.S.  | 123              |                  |          |
| Ertunç, A.      | 45               | Şişman, H.       | 217      |
| Esen, S.        | 161              |                  |          |
| Engin, I.C.     | 123              | Tatar, Ç.        | 35       |
|                 |                  | Tiryaki, B.      | 99       |
| Geniş, M.       | 65, 73           |                  |          |
| Gerçek, H.      | 65, 73, 89       | Turanboy, A.     | 139, 187 |
| Gökay, K. M.    | 11, 81, 139, 145 |                  |          |
| Gündüz, L.      | 205              | Uğur, İ.         | 205      |
|                 |                  |                  |          |
| Fişek, M.       | 217              | Yavuz, M.        | 113      |
|                 |                  | Yaralı, O.       | 1        |
| Hekimoğlu, O.Z. | 99               | Yüksel, A.       | 21       |



## **TMMOB MADEN MÜHENDİSLERİ ODASI**

1954 yılında 6235 sayılı yasayla kurulmuş kamu niteliği taşıyan bir meslek örgütüdür.

- 6500 Üye
- 4 Şube
- 45 Temsilcilik

ile ülkemizin her yerinde örgütlenmiştir.

Düzenlediği Madencilik ve Kömür Kongreleri, birçok sempozyum, seminer ve panellerle madencilik sektörü ve maden mühendislerinin sorunlarına çağdaş bir yaklaşımla çözüm arayan madencilik sektörünün en önemli sivil toplum örgütüdür.

### **Adres :**

Selânik Cad. Yeşim Apt. No:19/3  
06650 Kızılay / ANKARA

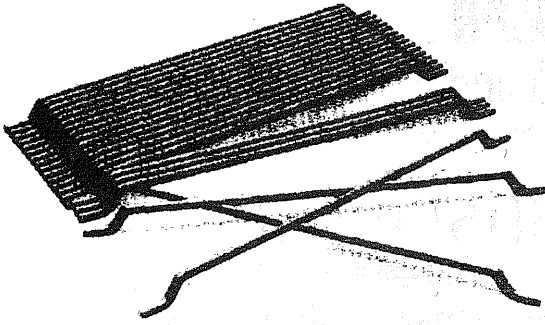
Tel : 0.312.425 10 80

: 0.312.418 36 57

Fax : 0.312.417 52 90

WEB <http://www.mining-eng.org.tr>

e-mail : [maden@mining-eng.org.tr](mailto:maden@mining-eng.org.tr)

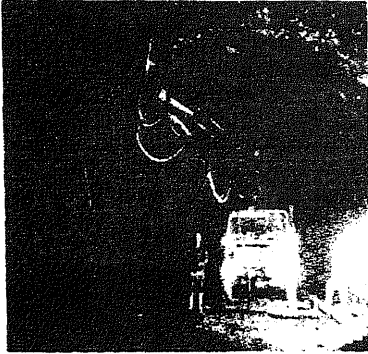


Bayındırlık ve İskan Bakanlığı  
2000 yılı İnşaat ve Tesisat  
Birim Fiyatları

POZ NO: 04.279/3  
19.104/C1  
19.104/C2  
19.104/C3  
19.104/C4

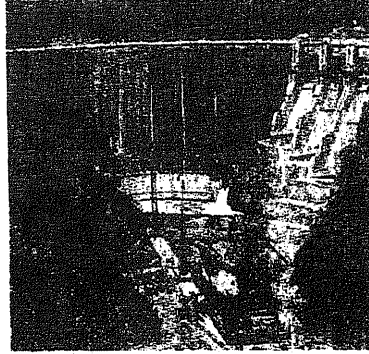
# Dramix®

## TÜNEL KAPLAMALARINDA ÇELİK TEL DONATILI BETON



### PÜSKÜRTME BETON

- ✓ Ön Kaplama
- ✓ İç Tünel Kaplama
- ✓ Şev Stabilizasyonu
- ✓ Tünel Onarımı
- ✓ İstinat Duvarları



### YERİNDE DÖKME

- ✓ İç Kaplama
- ✓ Dolusavak Koruma Betonunu
- ✓ Düşü Havuzu Koruma Betonunu
- ✓ Invert Betonları

### Çelik Tel Donatılı Betonun Avantajları:

- Klasik hasır donatı ortadan kalkar.
- Beton büyük deformasyon kapasitesine sahiptir.
- Ekonomiktir.
- Basit ve hızlı bir uygulamadır.
- Çelik teller hem kuru hem ıslak karışım püskürtme betonda kullanılır.

Evet, Detaylı bilgi istiyorum

☐ Püskürtme Beton

☐ Yerinde Dökme

Adı :

Firma :

Adres :

Tel :

Fax :

Çözüm Ortağımız:

İKSA İNŞAAT KATKILARI SAN. ve TİC. A.Ş.

Mebusevleri, İller Sok. 23/1 Tandoğan 06580 Ankara  
Tel: (312) 212 99 90 (pbx) Fax: (312) 212 99 89

# BEKSA

ÇELİK KORD SANAYİ ve TİCARET A.Ş.

MERKEZ : Sabancı Center, Kule 2 - Kat: 3 Levent 80745 İSTANBUL

TEL: (212) 270 41 00 FAX: (212) 280 92 26

FABRİKA : Alikahya Mevkii, Kentsa 41310 İzmir / KOCAELİ

TEL: (262) 364 76 00 FAX: (262) 364 75 75

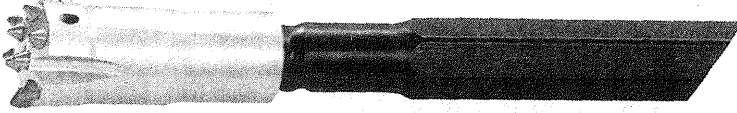
BEKSA, HACI ÖMER SABANCI HOLDİNG ve N.V. BEKAERT S.A. (Belçika) ORTAK KURULUŞUDUR.



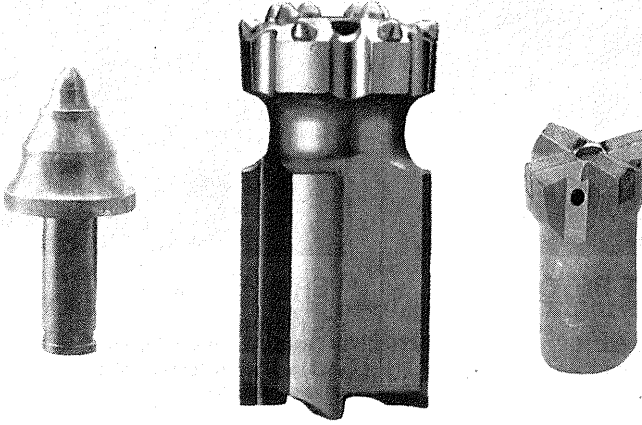
# PENAtrade

Tünelin Başından Sonuna Işık  
The light from the beginning to the end of the tunnel

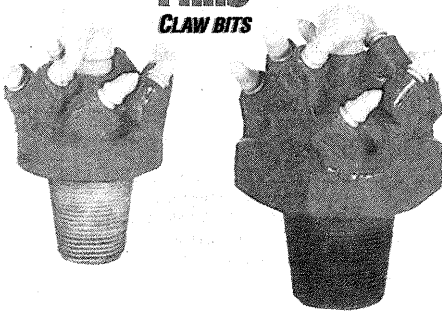
 **MITSUBISHI**  
**DIABIT**



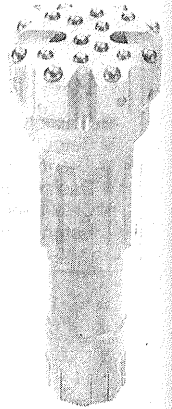
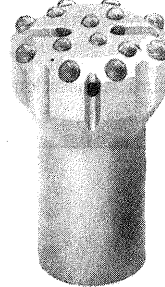
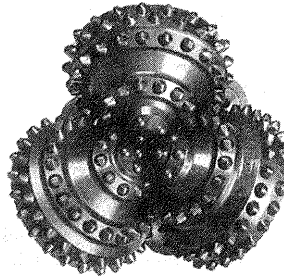
**BETEK**



**Mills**  
**CLAW BITS**



**e-rock tools market**



**PENA** İÇ VE DİŞ TİCARET LİMİTED ŞİRKETİ

Merkez: Koza Sokak No: 77/3 Gaziosmanpaşa 06700 ANKARA  
Tel: (0312) 447 43 24 - 447 43 25 Fax: 447 47 35 e-mail: penatrade@superonline.com  
Depo: 31/A Sokak Cevat Dündar İş Merkezi No: 71 Ostim 06370 ANKARA Tel: (0312) 385 39 84

## ÖZBERİL MADENCİLİK

### LİNYİT KÖMÜR İŞLETMESİ

**KÖMÜR ÜRETİMİNDE ÜLKE  
HİZMETİNDE**

Tel: ( 0258 ) 613 15 66

Tel: ( 0522 ) 217 71 36

Tavas Sanayii Çarşısı Karşısı, Shell Benzin  
İstasyonu, TAVAS / DENİZLİ

## İŞMER

**MERMER İŞLEME SANAYİ VE  
TİCARET LİM. ŞTİ.**

TEL : ( 246 ) 224 13 20

FAX : ( 246 ) 224 13 21

EĞİRDİR YOLU ASKERİ HASTANE KARŞISI  
ISPARTA

## ADİL KÖMÜR

**İNŞAAT NAKLİYE PETROL  
ÜRÜNLERİ TİC. SAN. LTD. ŞTİ.**

- ☛ KÖMÜR
- ☛ LPG LİPETGAZ
- ☛ PETROL ÜRÜNLERİ

**ADRES :**

110 CAD. NO. 38 ISPARTA

TEL : ( 246 ) 218 36 96



# Isparta

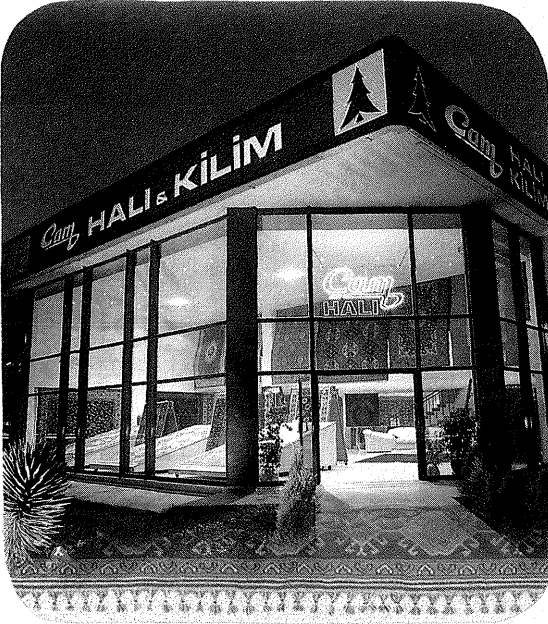
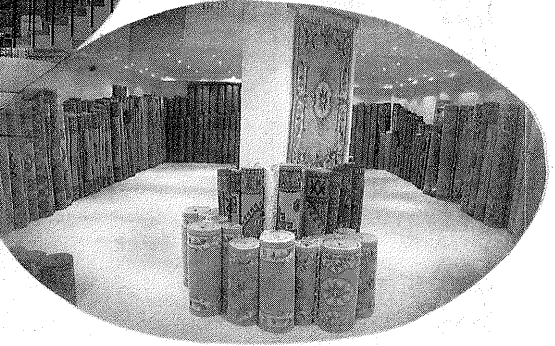
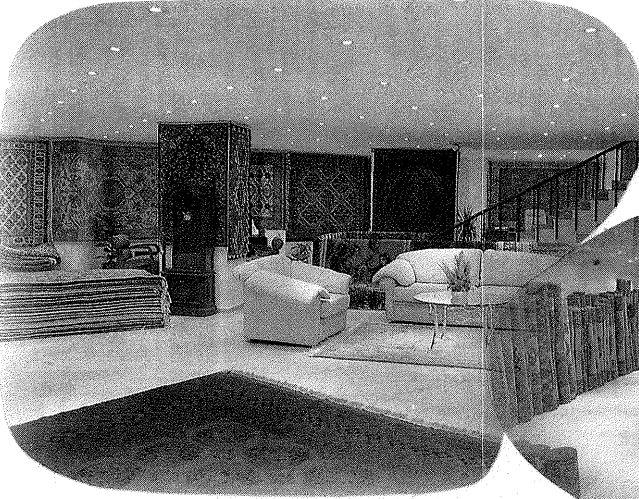
Petrol Turizm

*SEVGİYLE BEKLEYENLERE SAĞLIKLA ULAŞMAK İÇİN*



## İSPARTA

Müdüriyet : (0246) 227 23 73 Fax : 227 77 04  
Rezervasyon : (0246) 227 21 21- 227 21 22 - 227 77 01 - 02 - 03  
Mimar Sinan : (0246) 218 54 63 - 218 13 00 - 212 14 43  
Cumhuriyet : (0246) 223 62 42  
İSTANBUL : (0216) 658 09 99  
Harem : (0216) 341 83 67  
ANKARA  
Aşti Otogar : (0312) 224 04 32 - 224 07 54  
İZMİR  
Otogar : (0232) 472 03 33



Çam halı 45 yıllık tecrübesiyle halıcılık sektöründe. Her bir ilmeği ayrı bir sanatçının, her bir figürü ayrı bir sevdanın. Her bir rengi ayrı bir tutkunun simgesi; Yüzyıllardır el emeğinin göznurunun sanata dönüştüğü en mükemmel tuval; Halı

**Isparta (Factory) :**

Demirel Bul. 102 Cd. No: 197

Tel : (246) 227 41 41 (Pbx)

Fax : (246) 227 43 43

e-mail : factory@camhali.com.tr

**Isparta (Retail Shop)**

Halı Sarayı Zemin Kat No:26

Tel : (246) 218 23 49 (Pbx)

Fax : (246) 218 28 31

www.camhali.com.tr

**Antalya (Retail Shop)**

Fener Mh. Tekelioğlu Cd.

Yeni Lara Yolu No:13

Tel : (242) 324 25 74

Fax : (242) 324 25 73

**İstanbul (Retail Shop)**

Taşdirek Çeşme Sk. Yenil Han No:13

Çemberlitaş / İstanbul

Tel : (212) 638 75 95 (Pbx)

Fax : (212) 638 75 94

e-mail : istanbul@camhali.com.tr

# İTERKARBON

**SÜPERKOK®**

**Yüksek kalorili,  
Dünyanın  
en iyi  
kömürü...**



## İTERKARBON

SANAYİ VE TİCARET İTHALAT İHRACAT LTD.ŞTİ.

Prof. Muammer Aksoy Cad. No. 176 İSKENDERUN - TÜRKİYE

TEL: (326) 626 20 40 FAX: (326) 626 20 30

## ISBAŞ BİMSBLOK, DAHA İYİSİ YOK!

ISBAŞ BİMSBLOK, imalatın her aşamasında tamamen bilgisayar kontrollü full-robotik sistem ile el değmeden üretilmektedir. Araştırma- Geliştirme ve Kalite Kontrol Laboratuvarında hammadde ve ürün kalitesi sürekli denetlenmektedir. Mamüllerimiz **TS 2823 Kalite güvencesindedir.** Isparta Belediye'sinin bir kuruluşu olan ISBAŞ A.Ş. Ülkemizde pomza'dan mamül hafif yapı elemanları üreten **ilk, en büyük** ve 12 yılı aşan tecrübesi ile **en uzman** kuruluştur. Üretim kapasitesi **12 milyon adet/yılı** aşmaktadır. Duvar, döşeme ve yalıtım elemanlarından ürün çeşidi 22'dir. Mamüllerimiz Tüm Batı Anadolu'da toplam 25 bayimiz aracılığı ile tüketiciye kolayca ulaşmaktadır. ISBAŞ A.Ş. Halkımıza kaliteyi ucuza ulaştırmaktan kıvançlıdır.

## ISBAŞ BİMSBLOK NEDİR?

ISBAŞ A.Ş. Isparta yöresinde ruhsatı kendisine ait pomza maden ocaklarından **120.000 ton/ yıl** pomza üretimi gerçekleştirmektedir. Ürettiği pomza madeninden yine kendi Hafif Yapı Elemanları Tesisinde **12.000.000 adet/yıl** pomzadan mamul yapı elemanı üretmekte ve 25 bayisi vasıtasıyla tüm Batı Anadolu'ya pazarlanmaktadır.

Üretilen **Bimsblok** ve **Asmolen**lerin tamamı **TS 2823** belgelidir. Dokuz Eylül Ün., İ.T.Ü. Ve O.D.T.Ü.'lerinde ısı ve ses yalıtımı konusunda yapılan testlerde ( $\lambda=0,16$  k.cal/m.h. °C ve **R=45 dB**) kalitesini bir kez daha ispatlamıştır.

Bimsbloklarda minimum 25 kg/cm<sup>2</sup> lik (**Ortalama 28 kg/cm<sup>2</sup>**) basınç dayanımı, ve Asmolenlerde minimum 200 kgf'lik (**ortalama 230 kgf**) kesme yükü ile sağlamlığı tartışılmaz.

Hafiftir, ürün tipine göre; bimsblokların birim ağırlığı **90-125 kg/m<sup>2</sup>**, asmolenlerde **100-150 kg / m<sup>2</sup>** dir.

**Buhar Diffüzyon katsayısı (2) en düşük** yapı elemanıdır. Bu özelliği sayesinde yaşam mekanlarından ortamın nem dengesini sağlarken, duvarlarda nem oluşmaz, siva çökeltme yapmaz. Ortadan bölünebilme özelliği ve kolay tesisat kanalı açılabilme özelliği sayesinde zayıfatı en düşük duvar dolgu elemanıdır.

670°C lik ısıya dayanma özelliği ile **yangına en mukavim** duvar elemanıdır.

## DAYANIKLI VE GÜVENLİ YAPILAR İÇİN

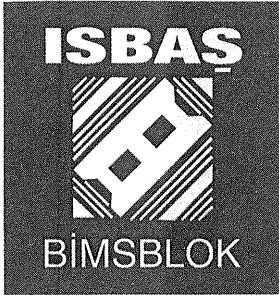
### "ISBAŞ BİMSBLOK"

Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı Laboratuvarlarında yaptırılan **Depreme Dayanıklılık Testi** (Ocak - 2000) sonuçlarına göre;

**"... Betonarme yapıların yatay yükler altındaki davranışlarına olumlu katkılar sağladığı, betonarme yapı elemanlarında oluşan hasar nedeni ile düşey yük taşıma kaybı durumunda düşey yük taşımaya önemli oranda katkı sağladığı"** ifade edilmiştir.

Ayrıca Başbakanlık Hazine ve Dış Ticaret Müsteşarlığı İhracaatı Geliştirme Etüd Merkezince, Toplu Konut ve Kamu Ortaklığı İdaresi Başkanlığı'na hazırlanan raporda (780-17.02.1989)

**"... Yüksek elastisite ve titreşimleri emme özelliği nedeniyle depreme karşı dayanıklılığı artırmaktadır. Bu özelliği nedeniyle bilhassa deprem kuşaklarındaki inşaatlar için ideal bir malzemedir"** ifadesi ile bimsblok tanımlanmış ve tavsiye edilmiştir.



| BASINÇ DAYANIMI RAPORU |               | ISI İZOLASYON RAPORLARI |                 |                 |                 | SES İZOLASYON RAPORLARI |                       |                 |                        |
|------------------------|---------------|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-----------------------|-----------------|------------------------|
| Tarihi                 | 18.12.1995    | Tarihi                  | 26.01.1991      | Tarihi          | 18.12.1995      | Tarihi                  | 27.08.1990            | Tarihi          | 01.05.1997             |
| Sayı                   | 175/a         | Sayı                    | 1481            | Sayı            | 175/B           | Sayı                    | -                     | Sayı            | 502                    |
| Yeri                   | 9 Eylül Üniv. | Yeri                    | İ.T.Ü           | Yeri            | 9 Eylül Üniv.   | Yeri                    | Bayındırlık Bak.Lab.. | Yeri            | O.D.T.Ü                |
| Deney esiti            | 700 cm²       | Deney Kalınlığı         | 19 cm           | Deney Kalınlığı | 15 cm           | Deney Kalınlığı         | 19 cm                 | Deney Kalınlığı | 19 cm ve 25 cm         |
| Sonuç                  | 26,1 kg/cm²   | Sonuç (λ)               | 0,16 k.kal/mh°C | Sonuç (λ)       | 0,17 k.kal/mh°C | Sonuç (R')              | 45 dB                 | Sonuç (R')      | 45 ± 2 dB<br>47 ± 2 dB |

# Nitro Mak

MAKİNA KİMYA - NİTRO NOBEL KİMYA SANAYİİ A.Ş.

**Yeni Nesil Patlayıcılarla;  
Yüksek Performanslı,  
Emniyetli  
Patlatma.**



MERKEZ: Cinnah Cad. No: 72/14  
06690 Çankaya - ANKARA  
tel: 0.312.440 53 17 (pbx)  
fax: 0.312.440 61 59  
e-mail: nitromak@superonline.com  
e-mail: nitromak@nitromak.com  
web site: www.nitromak.com.tr